

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

*Trabajo de titulación previo
a la obtención del título
de Ingeniero Mecánico*

PROYECTO TÉCNICO

**“PROPUESTA DE MEJORA PARA EL PROCESO DE
MOLIENDA DE LACTOSA EN EMPRESAS LÁCTEAS”**

AUTORES:

Víctor Romario Lojano Pillco
Darío Javier Pinguil Loja

TUTOR:

Ing. Nelson Jara Cobos, PhD.

CUENCA - ECUADOR

2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Víctor Romario Lojano Pillco con documento de identificación N° 0106716178 y Darío Javier Pinguil Loja con documento de identificación N° 0105000806, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“PROPUESTA DE MEJORA PARA EL PROCESO DE MOLIENDA DE LACTOSA EN EMPRESAS LÁCTEAS”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Mecánico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, diciembre del 2019



Víctor Romario Lojano Pillco

C.I. 0106716178



Darío Javier Pinguil Loja

C.I. 0105000806

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “**PROPUESTA DE MEJORA PARA EL PROCESO DE MOLIENDA DE LACTOSA EN EMPRESAS LÁCTEAS**”, realizado por Víctor Romario Lojano Pillco y Darío Javier Pinguil Loja, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, diciembre del 2019



Ing. Nelson Jara Cobos, PhD.

C.I. 0102679644

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Víctor Romario Lozano Pillco con documento de identificación N° 0106716178 y Darío Javier Pinguil Loja con documento de identificación N° 0105000806, autores del trabajo de titulación: **“PROPUESTA DE MEJORA PARA EL PROCESO DE MOLIENDA DE LACTOSA EN EMPRESAS LÁCTEAS”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, diciembre de 2019



Víctor Romario Lozano Pillco
C.I. 0106716178



Darío Javier Pinguil Loja
C.I. 0105000806

AGRADECIMIENTOS

Nuestros agradecimientos a Ricardo Viracucha Gerente de la Empresa y a Paola Encalada, por confiarnos este proyecto y habernos facilitado los medios necesarios para llevar a cabo.

Al cuerpo docente de la carrera de Ing. Mecanica por los conocimientos adquiridos a lo largo de nuestra formación academica. De manera especial a los profesores Nelson Jara y Efren Vasquez, quienes nos brindaron su apoyo técnico y humano, para el desarrollo de este proyecto

Victor, Dario.

Agradesco a mis padres Nancy Loja y Medardo Pinguil, quienes siempre me han apoyado con su amor y sacrificio para mi formación personal y profesional, sobre todo en las situaciones más duras y a lo largo de mi vida.

También a Juan Carlos Galarza y Manolo Galarza, quienes fueron parte de este proceso con su incondicional amistad.

Dario.

Agradesco a mis Padres Carmen Pillco y Víctor Lojano por su comprensión, amor y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar a cumplir una meta más, por la confianza que me brindaron durante el transcurso de mi preparación.

Victor.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi Familia, en especial a mis padres, quienes, siempre desearon lo mejor para mi, supieron confiar en mí y me brindaron su apoyo para lograr este objetivo.

A mi hermana Natalia, mis sobrinos Alexander y Marcelo por su incondicional ayuda y palabras de aliento en las situaciones más difíciles.

Dario Javier Pinguil Loja

Este proyecto va dedicado a Dios por la vida que me ha dado junto a mis seres queridos y por haberme dado fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mis Padres por su comprensión, amor y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar a cumplir una meta más, por la confianza que me brindaron durante el transcurso de mi preparación.

A mis hermanos por estar presente, acompañarme y por el apoyo moral que me brindaron día a día en el transcurso de cada año de mi vida universitaria.

Víctor Romario Lojano Pillco

A todas las personas y amigos que han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

De corazón gracias a todos.

Victor, Dario

RESUMEN

Este documento presenta los resultados obtenidos luego de haber implementado una mejora en el proceso de molienda de lactosa desarrollado en una empresa láctea, trabajo que inició con el levantamiento de información de los datos técnicos principales del proceso de molienda, como son determinar el tipo de elementos molientes utilizados, tiempo de operación y tamaño de partícula de lactosa obtenida, los resultados indicaron que se muele con arandelas de acero inoxidable de 2 pulgadas de diámetro y 1/8 de pulgada de espesor aproximadamente en un tiempo de operación de 48 horas continuas lo que resulta un tamaño promedio de las partículas de lactosa de $40,23 \mu m$ (valor determinado mediante la comparación entre el análisis granulométrico por el método de tamizado y microscopia óptica mediante microfotografías).

En este sentido se asumió el reto de disminuir el tiempo de operación de molido y el tamaño de partículas de lactosa; luego del proceso de investigación teórica y experimental desarrollado se estableció que: un molino de tambor es la mejor opción, un volumen que ocupa los elementos molientes del 25%, una velocidad de operación de 70 rpm, cylpebs como la mejor opción de elementos molientes por ser los más eficientes para obtener una molienda fina y un tiempo de operación de 5 horas continuas, todas estas variables aportaron en la obtención de una lactosa con un tamaño promedio de partículas de $24.9 \mu m$. Este tamaño de partícula de lactosa permite una mejora importante de la calidad en la textura de la leche condensada.

En definitiva, juntando el beneficio que aportan cada uno de los parámetros mejorados se establece un beneficio promedio del 72,5 % en el proceso de molienda de lactosa, lo que involucra principalmente un ahorro por materia prima (lactosa), consumo energético y tiempo de operación.

Palabras clave: medición microscópica de partículas, análisis granulométrico, molino de bolas, distribución de cylpebs, leche condensada

ABSTRACT

This document presents the results obtained after having implemented an improvement in the lactose milling process developed at the Milky Company, work that began with the gathering of information from the main technical data of the grinding process, such as determining the type of grinding elements used, operating time and particle size of lactose obtained, the results indicated that it is ground with stainless steel washers 2 inches in diameter and 1/8 inch thick approximately in an operating time of 48 continuous hours resulting in an average size of lactose particles of 40.23 μm (value determined by comparison between granulometric analysis by screening method and optical microscopy by microphotographs).

In this sense, the challenge of reducing the grinding operation time and the size of lactose particles was assumed; After the theoretical and experimental research process developed, it was established that: a drum mill is the best option, a volume that occupies the milling elements of 25%, an operating speed of 70 rpm, cylpebs as the best choice of milling elements per being the most efficient to obtain a fine grinding and an operating time of 5 continuous hours, all these variables contributed to obtaining a lactose with an average particle size of 24.9 μm . This lactose particle size allows a significant improvement in the texture quality of the condensed milk.

In short, by combining the benefit provided by each of the improved parameters, an average benefit of 72.5% is established in the lactose milling process, which mainly involves a saving by raw material (lactose), energy consumption and operating time.

Keywords: microscopic particle measurement, granulometric analysis, ball mill, distribution of cylpebs, condensed milk.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	I
CERTIFICACIÓN	II
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA	V
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT.....	VII
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
1. Tema.....	1
Propuesta de mejora para el proceso de molienda de lactosa en Empresas Lácteas.	1
2. Introducción	1
3. Planteamiento del problema	2
3.1 Antecedentes	2
3.2 Importancia y Alcance	2
3.3 Delimitaciones.....	2
3.4 Problema General.....	3
3.5 Problemas Específicos.....	3
4. Objetivos	3
4.1 Objetivo general	3
4.2 Objetivos Específicos.....	3
5. Fundamentos Teóricos	3
5.1 Molienda.....	3
5.1.1 Elementos de molienda	4
5.1.2 Velocidad crítica	4
5.1.3 Velocidad de operación.....	4
5.1.4 Relación entre los elementos variables de los molinos	5
5.1.5 Tamaño máximo de los elementos moledores	5
5.1.5.1 Carga de los cuerpos moledores.....	5
5.1.6 Distribución de tamaño del material moliente bolas o cylpebs	6
Método 1. En función del diámetro.....	6

Método 2. En función al diámetro con la fórmula de Bond.....	6
5.1.7 Potencia.....	7
5.2 Tipos de molienda.....	7
5.3 Molino de bolas.....	7
5.3.1 Tipos de molino de bolas.....	8
5.3.1.1 Molino de bolas Planetario.....	8
5.3.1.2 Molino Attritor.....	9
5.3.1.3 Molino de tambor.....	10
5.3.1.4 Molinos de bolas de alta energía.....	10
5.4 Lactosa.....	11
5.4.1 Defecto más común de la Condensada.....	11
5.5 Métodos de medición del tamaño de partícula.....	12
5.5.1 Análisis granulométrico por tamizado.....	12
5.5.2 Análisis granulométrico por microscopia.....	14
6. Parámetros del proceso de molienda.....	15
6.1 Metodología.....	15
6.2 Descripción del equipo de molienda de lactosa.....	16
6.3 Velocidad del molino.....	17
6.4 Parámetros de operación del molino.....	17
6.5 Carga moledora y distribución de las arandelas de acero.....	17
6.6 Caracterización del material.....	18
6.6.1 Comportamiento granulométrico.....	18
6.6.2 Cantidad de la muestra.....	19
6.7 Procedimiento del análisis granulométrico por tamizado.....	19
6.7.1 Análisis granulométrico del tamaño inicial de partícula de lactosa.....	20
6.7.2 Procedimiento para el análisis granulométrico del tamaño de partícula.....	20
6.7.3 Evaluación de modelos de distribución.....	22
6.7.4 Análisis granulométrico del tamaño de partícula de la molienda con arandelas.....	29
6.8 Análisis granulométrico por microscopia.....	29
6.8.1 Muestra inicial de lactosa Antes de moler.....	31
6.8.2 Muestra con el proceso actual de molienda de lactosa.....	32
7. Diseño experimental para reducir el tamaño de partícula.....	33
7.1 Alternativas para el desarrollo del diseño.....	33
7.2 Selección de alternativas.....	33
7.3 Descripción de equipos y materiales utilizados.....	37

7.4	Preparación de la muestra.....	38
7.5	Cálculos para los ensayos experimentales de molienda	39
7.5.4	Material moliente	41
7.5.4.1	Bolas.....	41
7.5.4.2	Cylpebs.....	43
7.6	Desarrollo del proceso experimental.....	48
7.6.1	Variables a estudiar	49
7.6.2	Variación de parámetros.....	49
7.6.3	Velocidades de operación del molino X2.....	51
7.6.4	Tiempo de molienda X3.....	51
7.7	Matriz de diseño compuesto.....	51
7.8	Análisis del diseño factorial 2^K	52
7.8.1	Evaluación del tiempo de molienda, distribución de tamaño de cylpebs y velocidad. 53	
7.9	Modelo matemático.....	60
7.10	Análisis gráfico del modelo.....	61
7.10.1	Efecto de las variables e Interacciones.....	61
7.11	Modelo de regresión.....	65
8.	Resultados y discusión	68
9.	Costos generados en la investigación.....	72
9.1	Costo de propuesta de mejora	73
9.2	Costo anual de operación con propuesta de mejora	74
9.3	Valoración de la inversión.....	74
10.	Conclusiones y Recomendaciones	77
11.	Referencias Bibliográficas	79
	ANEXOS.....	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Movimiento de la carga de un molino de bolas [4].	5
Figura 2: Molino de bolas [2].	7
Figura 3: Molino de bolas planetario [2].	8
Figura 4: Molino Attritor [2].	9
Figura 5: Molino de bolas de tambor [2].	10
Figura 6: Molino de bolas de alta energía [2].	10
Figura 7: Lactosa en polvo Fuente: Autores	11
Figura 8: Tamiz y proceso de tamizado [7].	13
Figura 9: Metodología para el diseño experimental. Propuesta de mejora y análisis económico para el proceso de molienda de lactosa. Fuente: Autores	15
Figura 10: Molino horizontal giratorio. Fuente: Autores.	16
Figura 11: Material moliente “Arandelas”. Fuente: Autores.	17
Figura 12: Lactosa: saco y muestra. Fuente: Autores	18
Figura 13: Agitador automático Advantech Dura Tap. Fuente Autores	19
Figura 14: Diagrama de flujo del análisis granulométrico. Fuente: Autores	20
Figura 15. Porcentaje pasante acumulado y retenido acumulado vs tamaño de partícula. Fuente Autores	22
Figura 16: Curva granulométrica del Modelo de Schumann. Fuente: Autores.	25
Figura 17: Modelo de Rosin Rammler. Fuente: Autores	27
Figura 18. Microscopio OLYMPUS BX43. Fuente: Autores	30
Figura 19: Procedimiento de medición por microscopia. Fuente: Autores	30
Figura 20: Partículas de lactosa antes de moler. Fuente: Autores	31
Figura 21: Partículas de lactosa 48h de molienda.	32
Figura 22: Molino Giratorio. Fuente: Autores	37
Figura 23: Balanza. Fuente: Autores	37
Figura 24: Tricalcium Phosphate. Fuente: Autores	38
Figura 25: Lugol. Fuente: Autores	38
Figura 26: Homogenización de la muestra. Fuente: Autores	39
Figura 27: Volumen ocupado por el material moliente. Fuente: Autores	39
Figura 28: Llenado de material moliente [7].	40
Figura 29: Regímenes distintos de velocidad de rotación de un molino [19].	40
Figura 30: Material moliente Bolas. Fuente: Autores	41
Figura 31: Partículas de lactosa molidas;(a) 1h y (b) 5h. Fuente: Autores	43
Figura 32: Material moliente Cylpebs. Fuente: Autores	44
Figura 33: Partículas de lactosa (a) 1h, (b) 5h. Fuente: Autores	46
Figura 34: Perdidas del material molido. Fuente: Autor	46
Figura 35: Comparación en número de cylpebs de las distribuciones del tamaño de cylpebs utilizados. Fuente: Autores	51
Figura 36. Respuestas obtenidas de tamaño de partícula por microscopia. Fuente: Autores	53
Figura 37: Diagrama de Pareto para la reducción del tamaño de lactosa. Fuente: Autores	61
Figura 38: Grafica de los efectos principales. Fuente: Autores	62
Figura 39: Efecto velocidad. Fuente: Autores	62
Figura 40: Efecto principal tiempo de molienda. Fuente: Autores	63
Figura 41: Interacción Velocidad*Tiempo de molienda. Fuente: Autores	64
Figura 42: Gráfica de superficie de respuesta Estimada de Y tamaño de partícula. Fuente: Autores	64

Figura 43: Gráfica de contorno para Y tamaño de partícula. Fuente: Autores.....	65
Figura 44: Probabilidad Normal de los residuos. Fuente: Autores	67
Figura 45: Residuos vs Y estimada. Fuente: Autores	67
Figura 46: Textura de la leche condensada con ingrediente lactosa molida con arandelas. Fuente: Autores	71
Figura 47: Textura de la leche condensada con ingrediente lactosa molida con Cylpebs a 20x. Fuente: Autores	71
Figura 48: Carga anual de la lactosa Fuente: Autores	75
Figura 49: Tiempo de operación anual. Fuente: Autores	75
Figura 50: Costo anual de lactosa. Fuente: Autores	76
Figura 51: Costo anual del consumo de energía eléctrica. Fuente: Autores	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación entre molienda húmeda y seca [2].	7
Tabla 2: Ventajas y desventajas del molino Planetario [2]	8
Tabla 3: Ventajas y desventajas del molino Attritor [2].	9
Tabla 4: Ventajas y desventajas del molino de tambor [2].	10
Tabla 5: Ventajas y desventajas del molino de tambor [2]	11
Tabla 6: Designación de tamiz ASTM y aberturas de apertura nominal correspondientes [12]	14
Tabla 7: Especificaciones técnicas del molino. Fuente: Autores.	16
Tabla 8: Condiciones de operación. Fuente: Autores.	17
Tabla 9: Distribución de tamaños de arandelas. Fuente: Autores	17
Tabla 10: Tamices seleccionados con referencia del tamaño inicial. Fuente: Autores.	18
Tabla 11: Masa mínima recomendada para medición [14].	19
Tabla 12: Resultados del análisis granulométrico por tamizado. Fuente: Autores	21
Tabla 13: Valores para el promedio del tamaño de partícula. Fuente: Autores	23
Tabla 14: Cálculo de Desviación estándar. Fuente: Autores.	24
Tabla 15: Variables x e y del modelo de Schumann. Fuente: Autores.	25
Tabla 16: Variables x e y del modelo de Rosin Rammler. Fuente: Autores	27
Tabla 17: Resultados del Análisis Granulométrico por tamizado. Fuente: Autores	29
Tabla 18: Medición por microscopía óptica de lactosa antes de moler. Fuente: Autores	31
Tabla 19: Comparación de las técnicas de tamizado y microscopía de los resultados de medición de muestra inicial. Fuente: Autores.	31
Tabla 20: Medición por microscopía óptica de lactosa molida. Fuente: Autores	32
Tabla 21: Valores de tamaño de grano obtenido. Fuente: Autores	34
Tabla 22: Evaluación del tamaño de grano obtenido. Fuente: Autores.	34
Tabla 23: Valores del tiempo de molienda. Fuente: Autores	34
Tabla 24: Evaluación del tiempo de molienda. Fuente: Autores.	34
Tabla 25: Valores del tipo de molienda. Fuente: Autores	35
Tabla 26: Evaluación del tipo de molienda. Fuente: Autores	35
Tabla 27: Valores del peso específico del criterio disponibilidad. Fuente: Autores	35
Tabla 28: Evaluación del peso específico del criterio disponibilidad. Fuente Autores.	35
Tabla 29 Valores de los costos. Fuente: Autores	36
Tabla 30: Evaluación de los costos. Fuente: Autores.	36
Tabla 31: Ponderación de resultados. Fuente: Autores.	36
Tabla 32: Distribución de tamaño de bolas método 1. Fuente: Autores	42
Tabla 33: Resultados obtenidos con material moliente tipo bolas. Fuente: Autores.	43
Tabla 34: Distribución de tamaño de cylpebs método 1. Fuente: Autores	45
Tabla 35: Resultados obtenido con material moliente tipo cylpebs. Fuente: Autores	45
Tabla 36: Valores de pérdidas del producto. Fuente: Autores	47
Tabla 37 : Evaluación de las pérdidas del producto. Fuente: Autores.	47
Tabla 38 : Valores de tamaño de grano obtenido. Fuente: Autores	47
Tabla 39: Evaluación de tamaño de grano. Fuente: Autores.	47
Tabla 40: Valores de los costos. Fuente: Autores.	48
Tabla 41 : Evaluación de los costos. Fuente: Autores.	48
Tabla 42: Ponderación de resultados. Fuente: Autores	48
Tabla 43: Variación de Parámetros. Fuente: Autores.	49
Tabla 44 : Distribución de tamaño de cylpebs método 1. Fuente: Autores.	50

Tabla 45: Distribución de tamaño de cylpebs método 2. Fuente: Autores.....	50
Tabla 46: Matriz de diseño Factorial 2 ³ Completo. Fuente: Autores	52
Tabla 47: Experimentos y Combinaciones. Fuente: Autores	52
Tabla 48: Experimentos y Combinaciones. Fuente: Autores	53
Tabla 49: Matriz codificada para el cálculo de efectos e interacciones. Fuente: Autores.....	54
Tabla 50: Resultados de los efectos e interacciones. Fuente: Autores	56
Tabla 51: Análisis de Varianza. Fuente: Autores.....	59
Tabla 52: Coeficientes de regresión. Fuente: Autores	65
Tabla 53: Resultados de los valores observados y predichos. Fuente: Autores	66
Tabla 54: Parámetros de operación mejorados. Fuente: Autor	68
Tabla 55: Microscopia Optica de las diferentes situaciones de molienda de lactosa. Fuente: Autores	70
Tabla 56: Tiempo y costos del talento Humano en un semestre. Fuente: Autores	72
Tabla 57: Costos de recursos generales. Fuente: Autores	72
Tabla 58: Costo anual del consumo de energía eléctrica del molino. Fuente: Autores	72
Tabla 59: Análisis de precios unitarios Cylpebs. Fuente: Autores.....	73
Tabla 60: Consumo anual de energía eléctrica con propuesta de mejora. Fuente: Autores	74
Tabla 61. Valor total de la inversión. Fuente: Autores	74

1. Tema

Propuesta de mejora para el proceso de molienda de lactosa en Empresas Lácteas.

2. Introducción

Las políticas de calidad y el mercado global en general exigen a las industrias a producir productos con mejor calidad, es decir el mercado se vuelve más competitivo, haciendo la tarea más difícil para muchas industrias que quieren mantenerse en el mercado y sobre todo para tratar de abrir nuevos.

En este sentido las industrias lácteas ecuatorianas, no están ajenas a esta realidad, por esta razón y de manera específica las Empresas Lácteas han decidido mejorar la calidad de uno de sus productos “Leche Condensada”. Para lograrlo se necesita mejorar sus parámetros organolépticos principalmente en su textura. En consecuencia, es indispensable reducir el tamaño de partícula de un ingrediente primordial que es la lactosa que ayuda con esta finalidad.

Para este proyecto, se establece una propuesta de mejora del proceso de molienda de la lactosa en el laboratorio de microbiología de la Empresa buscando cumplir netamente con la reducción del tamaño de partícula mediante el cual se reduce el volumen promedio de una muestra sólida de lactosa, para ello se busca la opción más factible para realizar la molienda y conseguir el objetivo. Existen diferentes tipos de molinos a ser utilizados, todo esto dependiendo del producto a ser requerido, tales como molinos de bolas, cylpebs, martillos, agitadores, granuladores y clasificadores de partículas.

Para el desarrollo de la presente investigación, en principio se determinará los parámetros del proceso de molienda actuales, en el cual se pretende obtener: tiempo de operación, velocidad de molienda, la carga de materia prima (lactosa), tamaño de partícula, para analizar los parámetros que serán mejorados. Mientras el tamaño de partícula será determinado por dos métodos: análisis granulométrico por tamizado y microscopía óptica.

El análisis granulométrico realizado con tamices, es el cual referencia la medición de la partícula por el tamaño de la malla por el que la partícula pueda pasar y el análisis por microscopía óptica, el cual permite visualizar y medir los tamaños de partícula. Entre estos, se definirá la opción factible para la determinación del tamaño.

Se realizará el análisis para determinar que el mejor tipo de molino que será utilizado sea, un molino horizontal de cylpebs, el cual tiene una gran precisión en reducción de tamaño de partículas, larga vida útil, bajos costos de mantenimiento y operación. Además, se elegirá entre bolas o cylpebs, el elemento moliente para el desarrollo de los ensayos.

Mediante el desarrollo del proceso experimental se define un diseño factorial 2^k , por lo tanto, las variables dependientes e independientes serían respectivamente: el tamaño de partícula de lactosa y distribución de cylpebs, velocidad de operación, tiempo de molienda. En tanto que, finalmente se determina el tamaño de partícula mejorado. Este resultado comprobaría que mejorara de

manera importante la calidad en la textura de la leche condensada siendo este proceso un beneficio cualitativo. Con la Aplicación estos parámetros mejorados se evaluarán cuales serán beneficios y costos de cada uno de ellos que involucran en el proceso de molienda de lactosa.

3. Planteamiento del problema

3.1 Antecedentes

Las industrias lácteas tienen la obligación de mejorar la calidad en sus productos, tales como leche, leche en polvo, leche condensada, yogurt, quesos, etc. En las empresas lácteas se ha visto en la necesidad de mejorar el proceso de molienda de la lactosa, siendo este ingrediente, el que cambia las propiedades finales de la leche condensada, tales como una textura más suave, agradable, espesa y dulce.

Existen diferentes tipos de molinos a ser utilizados, todo esto dependiendo del producto a ser requerido, tales como molinos de bolas, martillos, agitadores, granuladores y clasificadores de partículas. Para el desarrollo de la investigación se considerará un molino de bolas o cylpebs como un equipo que posibilita mejorar el proceso de molienda actual. Estos molinos tienen una gran precisión en reducción de tamaño de partículas, larga vida útil, bajos costos de mantenimiento y operación.

Existen dos métodos para medir el tamaño de la partícula. El análisis granulométrico realizado con tamices, el cual referencia la medición de la partícula por el tamaño de la malla por el que la partícula pueda pasar y la visualización por microscopía, el cual permite visualizar y medir los tamaños de partícula.

Mediante el desarrollo del diseño experimental, se puede determinar los parámetros óptimos para cumplir con los requerimientos del tamaño de partícula requeridos, y su vez, desarrollar la propuesta de mejora del proceso de molienda para la lactosa.

3.2 Importancia y Alcance

En esta investigación se propondrá un nuevo diseño del proceso de molienda para mejorar la calidad de la leche condensada.

El alcance de la presente investigación es encontrar los parámetros de operación óptimos del nuevo diseño del proceso de molienda, siendo los más importantes: velocidad de operación, tiempo y distribución de tamaño de material moliente.

3.3 Delimitaciones

Mediante esta investigación se quiere analizar los parámetros actuales en el proceso de molienda de la empresa para posterior realizar un nuevo diseño de este proceso, con el fin de mejorar la calidad de la leche condensada.

Este análisis se realizará en el laboratorio de microbiología de la empresa. Además, se realizarán dos tipos de análisis del tamaño de partícula, mediante análisis granulométrico por tamizado y

visualización microscópica, los mismos que serán realizados en los laboratorios de biotecnología de la Universidad Politécnica Salesiana. Una vez analizado ambos métodos de mediciones, se determinará el más apropiado para determinar el tamaño de partícula.

3.4 Problema General

¿Es posible establecer una propuesta de mejora para el proceso de molienda de lactosa en el laboratorio de microbiología de la empresa láctea?

3.5 Problemas Específicos

- ¿Cuáles son las variables iniciales del proceso de molienda de lactosa y el tamaño de partícula actual en el laboratorio de microbiología de la Empresa Láctea?
- ¿Es posible realizar el diseño experimental para reducir el tamaño de partícula de la lactosa?
- ¿Se puede proponer una mejora en el proceso de molienda de lactosa, a fin de cumplir con los parámetros organolépticos exigidos?
- ¿Es posible a través de un análisis costo – beneficio determinar la factibilidad económica para mejorar el proceso de molienda de lactosa en la Empresa Lácteas?

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Establecer una propuesta de mejora del proceso de molienda de la lactosa en el laboratorio de microbiología de la Empresa Lácteas.

4.2 Objetivos Específicos

- Identificar las variables iniciales del proceso de molienda de lactosa y el tamaño de partícula actual en el laboratorio de microbiología de la Empresa Láctea.
- Realizar el diseño experimental para reducir el tamaño de partícula de la lactosa.
- Proponer una mejora para el proceso de molienda de lactosa, a fin de cumplir con los parámetros organolépticos exigidos.
- Realizar un análisis de costo - beneficio para el proceso de mejora de molienda de lactosa en la Empresa Lácteas.

5. Fundamentos Teóricos

5.1 Molienda

La molienda es una operación mecánica que reduce el volumen promedio de las partículas de una muestra sólida. Los métodos más utilizados en los equipos de molienda son compresión, impacto,

cizalla y cortado. Estos métodos son realizados por el movimiento libre de elementos molientes como barras, bolas o cylpebs [1].

5.1.1 Elementos de molienda

Existen una serie de parámetros que influyen en el proceso de molienda, mismos que a continuación se presentan: [2]

- Velocidad critica
- Relación entre los elementos variables de los molinos
- Tamaño máximo de los elementos moledores
- Volumen de carga
- Distribución de tamaño de material moliente
- Potencia
- Tipos de molienda

5.1.2 Velocidad critica

La velocidad critica es aquella que ocurre cuando la fuerza centrífuga anula la influencia que la gravedad opera sobre las bolas, en esta situación los cuerpos moledores no caen, e impiden formar la acción de catarata o cascada requerida, por lo tanto, no prestan ningún servicio de molienda. La siguiente relación determina esta velocidad crítica [3].

$$V_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}} \text{ Sistema métrico} \quad (1)$$

$$V_c = \frac{76.6}{\sqrt{D}} \text{ Sistema ingles} \quad (2)$$

Donde:

$v_c =$ Velocidad critica en rpm

$D =$ Diámetro del molino [m], [ft]

5.1.3 Velocidad de operación

La velocidad de operación del molino debe ser menor a la velocidad critica, situándose un rango de operación de los molinos de bolas o cylpebs entre 65% y 80% de V_c (ecuación 1,2) [4]. En la Figura 1 se observa el movimiento del molino con sus efectos de cascada y catarata respectivamente.

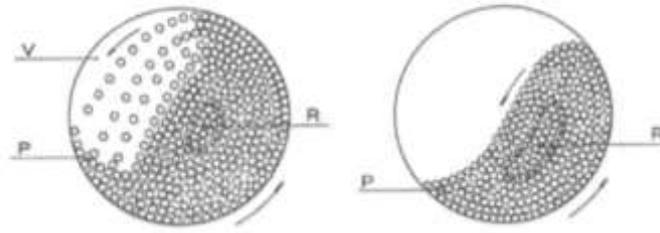


Figura 1: Movimiento de la carga de un molino de bolas [4].

Para el cálculo de la velocidad de operación se presenta la ecuación 3 [5].

$$V_{op} = V_c \cdot \%V_c \quad (3)$$

Donde:

V_{op} = Velocidad de operación

V_c = Velocidad crítica en rpm

$\%V_c$ = Porcentaje de la velocidad crítica

5.1.4 Relación entre los elementos variables de los molinos

Las variables principales al momento de realizar la molienda son: la velocidad crítica, el diámetro interno del molino y los cuerpos moledores, se debe tener en cuenta que en el proceso de molienda se emplea medidas de diferentes cuerpos moledores. A continuación, se explica algunas consecuencias de las variaciones [2].

- Mayor Medida de los cuerpos moledores, mayor rotura de las partículas grandes (percusión o choque).
- Menor medida de los cuerpos moledores, mayor es la molienda de partículas pequeñas por una mayor superficie de los elementos moledores (fricción).
- Para igual molienda, a mayor diámetro del molino a mayor velocidad, menor la medida necesaria del cuerpo moliente.

5.1.5 Tamaño máximo de los elementos moledores

Estos elementos moledores no son del mismo tamaño, sino que a partir del diámetro máximo se realiza una distribución de elementos moledores, pero a tamaños inferiores.

El tamaño máximo de los elementos moledores se obtiene de la distribución porcentual y las respectivas medidas de los componentes para obtener una efectiva molienda.

5.1.5.1 Carga de los cuerpos moledores

Los molinos de tambor no trabajan totalmente llenos. El volumen ocupado por los elementos moledores y el material a moler referido al total del cilindro del molino es lo que se denomina la carga de los cuerpos moledores, se calcula con la ecuación 4 [2]:

$$B = V_m \cdot b \cdot 0,6 \cdot \delta_b \quad (4)$$

Donde:

B = masa de los cuerpos moledores [Kg]

b = constante (0.2 – 0.4)

V_m = Volumen del material en dm^3

δ_b = densidad de las cylpebs 7.8 Kg/ dm^3

D = diametro interno del molino

Habitualmente el grado de llenado en la elaboración de la molienda con cylpebs comprende una carga del 25% al 33% del volumen total y lo forman cuerpos moledores y material a moler [6].

5.1.6 Distribución de tamaño del material moliente bolas o cylpebs

Esta distribución se puede determinar por diversos métodos, de los cuales se utilizó dos métodos en el desarrollo de esta investigación:

Método 1. En función del diámetro

Una vez conocida la carga inicial del material moliente, se procede a sumar los diámetros de las bolas que piensa utilizarse. La sumatoria corresponde al 100%. Seguidamente se determina el porcentaje que corresponde al valor de cada diámetro. El resultado que se obtenga corresponde al porcentaje en peso, de la carga inicial, que corresponde a cada tamaño del tamaño del material moliente [6].

Método 2. En función al diámetro con la fórmula de Bond.

Conocido la carga inicial del material moliente y el tamaño máximo de las mismas, se procede a determinar el porcentaje de distribución que corresponde a cada tamaño de elemento moliente, empleando: $Y = 100(X/B)^{3.2}$ se lleva al gráfico y se determina el porcentaje en peso que corresponde a cada tamaño comercial que se debe alimentar. En cuanto a la distribución porcentual de los medios de molienda en función del diámetro, se aplica la fórmula de Bond en la ecuación 5 [6]:

$$y = 100 \left(\frac{x}{B} \right)^m \quad (5)$$

Donde:

y = Porcentaje en peso de los medios de molienda de diametro inferior a x

B = diámetro máximo cuerpo moliente [in] o [mm]

x = diámetro de cuerpo moliente a distribuirse [in] o [mm]

m = constante, sus valores son:

- (3.2 para molinos de barras o cylpebs)
- (3.84 para molinos de bolas)

5.1.7 Potencia

La potencia máxima se desarrolla cuando el volumen de carga es mayor al 30% y se encuentra en un 50%. Por lo general se trabaja entre 35% y 40% de la potencia [2].

5.2 Tipos de molienda

Existe dos tipos de procesos de molienda: molienda húmeda y seca. En la molienda en seco se consigue un mayor rendimiento de los molinos, este puede mejorar con una humedad del 1% para una rotura más rápida de los elementos a moler, en la (Tabla 1) se realiza la comparación entre las mismas.

Tabla 1: Comparación entre molienda húmeda y seca [2].

Molienda húmeda	Molienda seca
Menor potencia por kilogramo de material	Mayor potencia por cada kilogramo de material
Disminución de ruido, facilidad de transporte y menos polvo	Ruido excesivo
Mayor consumo de revestimiento	Menor consumo de revestimiento

5.3 Molino de bolas

Los molinos de bolas son cilindros rotatorios en donde se realiza el corte del material por el movimiento de los cuerpos moledores. Al girar el cilindro del molino (Ver Figura 2), el montón formado por los elementos moledores y el material, se eleva hasta un valor óptimo para su acción molturadora. La molienda se realiza por el choche y rozamiento entre los cuerpos moledores y las paredes blindadas del molino [6].

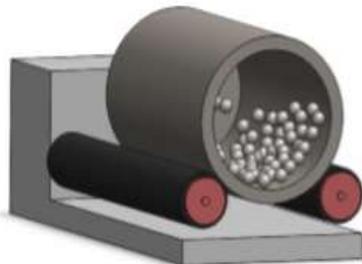


Figura 2: Molino de bolas [2].

Componentes de un molino de bolas

A continuación se presentan de manera general las partes principales de un molino de bolas [2].

- a) **Coraza:** Parte exterior resistente de forma cilíndrica.
- b) **Carga y descarga:** Abertura central por donde ingresa el material a moler.
- c) **Rodamientos:** Componente que ayuda el movimiento de giro.
- d) **Bancada:** Sostiene los elementos del molino.
- e) **Muñón:** Sistema de accionamiento.
- f) **Rejilla:** Elemento interno de clasificación.
- g) **Blindaje:** Protege la carcasa del molino, ayuda al efecto de molienda y facilita la disminución del ruido.
- h) **Sistema de acoplamiento:** Corresponde al piñón y corona con el molino.
- i) **Cuerpos Moledores:** Elementos que rompen el mineral por impacto.

5.3.1 Tipos de molino de bolas

5.3.1.1 Molino de bolas Planetario

Este molino posee una fuerza gravitacional elevada que permite obtener granulometría muy fina en tiempos cortos, debido a que la fuerza centrífuga puede aumentar de 10g a más de 40g. El funcionamiento, consiste en la entrada de una energía motriz que se transmite del motor al eje central que es el encargado de transmitir esa rotación a los demás sistemas (Ver Figura 3) [2].



Figura 3: Molino de bolas planetario [2]

En la Tabla 2 se presentan algunas de las ventajas y desventajas que se tienen al utilizar este molino.

Tabla 2: Ventajas y desventajas del molino Planetario [2]

Ventajas	Desventajas
Tipo de molienda en seco y húmedo.	Costo elevado de fabricación.
Altas velocidades de Impacto	El desgaste de las bolas produce contaminación en el producto a moler.
Simplicidad de carga y descarga del material.	Las velocidades altas producen desgaste de las paredes del molino.
Trituración rápida y potente	El contenedor sufre desgastes en una determinada superficie, debido que las

bolas giran en una sola pista del recipiente.

5.3.1.2 Molino Attritor

El molino Attritor está formado por una armadura sujeta a un eje, lo que permite girar varios ejes o brazos que se encuentran sujetos al eje principal. La molienda se realiza por el acercamiento y alejamiento continuo. Posee una cámara de molienda, en la que se introduce los cuerpos molidores y el material a alear, se encuentra acoplado de forma directa al impulsor y las paletas, lo que aprovecha la velocidad del motor y la acción de la gravedad (Ver Figura 4).



Figura 4: Molino Attritor [2]

La entrada de energía es directa para producir la molienda. El material a moler se coloca en un tanque inmóvil con los elementos molidores. Los materiales y los medios son agitados por un eje con brazos rotando a alta velocidad, esto hace que los medios ejerzan fuerzas de alto impacto en el material [2]. En la Tabla 3 se pueden observar algunas ventajas y desventajas.

Tabla 3: Ventajas y desventajas del molino Attritor [2].

Ventajas	Desventajas
Obtención de granulometría muy fina	Bajos índices de contaminación.
Sistema sencillo	Dificultades para la descarga del material.
Varias opciones de molienda	Desgaste impulsores y material moliente por altas temperaturas que se producen.
Gran velocidad de impacto entre el impulsor y medios molidores.	Costo del sello para mantener el vacío.
Fácil mantenimiento	Mayor pérdida del material a alear dentro del tazón.

5.3.1.3 Molino de tambor

El tambor rota sobre su eje horizontal y pueden trabajar con barras o bolas. Los cuerpos moledores se emplean para la molienda fina de sólidos por efectos de choque y fricción tanto por vía húmeda como seca (Ver Figura 5).

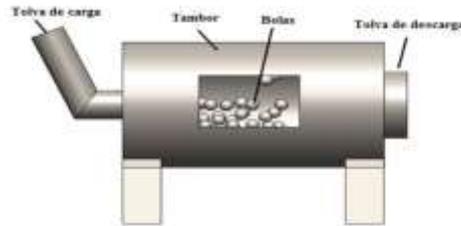


Figura 5: Molino de bolas de tambor [2]

En la Tabla 4 se puede observar algunas ventajas y desventajas de este molino.

Tabla 4: Ventajas y desventajas del molino de tambor [2].

Ventajas	Desventajas
Molienda rápida.	Material previamente triturado.
Se puede utilizar una operación de barras o bolas.	Produce contaminación el desgaste de los medios moledores.
Grandes cantidades de muestra.	

5.3.1.4 Molinos de bolas de alta energía

Son molinos para realizar moliendas de máxima intensidad, se caracteriza por combinar mecanismos complejos de trituración, lo que permite obtener partículas muy finas en poco tiempo (Ver Figura 6) [2].



Figura 6: Molino de bolas de alta energía [2]

En la Tabla 5 se puede observar algunas ventajas y desventajas de este molino.

Tabla 5: Ventajas y desventajas del molino de tambor [2]

Ventajas	Desventajas
Tiempos cortos de molienda.	Costo elevado de elaboración.
Obtención de aleación manométrica.	Produce contaminación el desgaste de los medios molidores.

5.4 Lactosa

La lactosa se presenta como partículas o polvo cristalino de color blanco a blanquecino. Tradicionalmente se utilizan en alimentos infantiles y en la elaboración de comprimidos y se considera un azúcar de gran importancia en las industrias de elaboración de alimentos. Excelente excipiente de pastillas y píldoras. Se utiliza para añadir a sopas, bebidas instantáneas, mezclas de especias, productos cárnicos, etc. Puede usarse con medicamentos sensibles a la humedad debido a su bajo contenido de humedad. [7], [8].



Figura 7: Lactosa en polvo Fuente: Autores

5.4.1 Defecto más común de la Condensada

Cristalización de la lactosa

El defecto se percibe en el paladar solo cuando los cristales alcanzan un tamaño mínimo. La cristalización o “azucaramiento” de la condensada, se desarrolla, en consecuencia, la cristalización irremediablemente sobre vendrá después de un cierto tiempo de almacenamiento, evitarla o postergarla será fundamental para mejorar la calidad y prolongar la vida útil del producto [9].

La solubilidad de la lactosa es diez veces menor que de la sacarosa, si a ello le sumamos los azúcares agregados, el problema inmediato será evitar la saturación de la solución, ya que llegándose al límite de saturación, el exceso de azúcares precipitará en forma de cristales (cristales o azucaramiento), defecto físico que comúnmente se presenta en los dulces comerciales.[9]

El enfriamiento rápido de la condensada evita formación de grandes cristales de lactosa. Esta operación puede llevarse a cabo en el mismo tanque para enfriamiento, con agitación o película de agua. Tiene un poder edulcorante, logrando mayor estabilidad microbiológica. El agregado de la lactosa confiere al dulce más brillo y mejora su textura [9].

Con tal objeto se ha propuesto el método de **siembra con cristales de lactosa**, el cual plantea lo siguiente:

- Se siembra la leche ya concentrada con finísimos cristales de lactosa, estos actúan como núcleos de cristalización. Con un número muy grande de núcleos, el crecimiento es menor y los cristales son más pequeños y menos perceptibles.[9]

Por su parte, la leche condensada azucarada contiene una alta proporción de sacarosa (de 40 a 45%) que influye para que la lactosa cristalice más rápido, pero con la forma indeseable; para evitar esto, previamente se induce su cristalización controlada mediante la adición de lactosa de tamaño muy fino (que pase malla 200) en una cantidad de 250 g por cada 1.000 kg de leche; En estas condiciones, la leche produce cristales de tamaño muy pequeño que le confieren una textura más tersa [10].

5.5 Métodos de medición del tamaño de partícula

Existen varios métodos para medir el tamaño de las partículas. En este proyecto utilizó dos métodos: análisis granulométrico por tamizado y visualización microscópica.

5.5.1 Análisis granulométrico por tamizado

El tamizado es una de las técnicas más antiguas de clasificación de polvos (es decir, separación basada en el tamaño o alguna otra característica física) que todavía se usa en la actualidad. Se encuentra entre las técnicas más utilizadas y menos costosas para la determinación de la distribución del tamaño de partícula en un amplio rango de tamaños. Se puede utilizar en un rango de tamaño muy amplio, desde poco más de 100 mm hasta aproximadamente 20 um.

Un tamiz de prueba es un dispositivo de medición diseñado para retener partículas más grandes que un tamaño designado, mientras permite que partículas más pequeñas pasen a través del dispositivo (Ver Figura 8) [7] [11] [12].

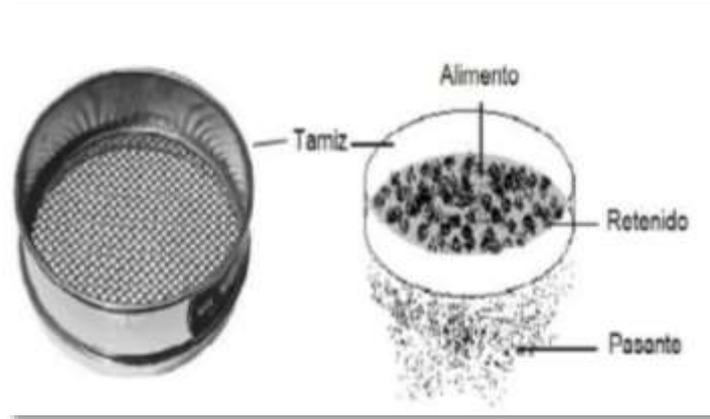


Figura 8: Tamiz y proceso de tamizado [7]

Es aplicable a los polvos secos que fluyen libremente y a algunas pastas preparadas cuidadosamente. El método, en el sentido más general, consiste en agitar la muestra a través de una serie de tamices apilados con un tamaño de malla decreciente. La malla con la mayor apertura está en la parte superior, y la que tiene la menor apertura está en la parte inferior de la pila. La distribución del tamaño se informa como la masa del material retenido en una malla de un tamaño dado, pero también se puede informar como la masa acumulada retenida en todos los tamices por encima de un tamaño de malla o como la fracción de masa acumulada por encima de un tamaño de malla dado.

Los tamices generalmente se clasifican en gruesos, medianos o finos, en función del tamaño de las aberturas de apertura. Los tamices gruesos tienen aberturas en el rango de tamaño de 100 mm a 4 mm, los tamices medianos varían de 4 mm a 200 μm , y los tamices finos se extienden por debajo de 200 μm [12].

En la Tabla 6 se presenta la designación del tamiz de acuerdo a lo que se establece en la norma ASTM correspondiente.

Tabla 6: Designación de tamiz ASTM y aberturas de apertura nominal correspondientes [12]

ASTM Sieve Designation					
Aperture Opening	Designation	Aperture Opening	Designation	Aperture Opening	Designation
125 mm	5 in.	9.5 mm	3/8 in.	425 µm	No. 40
106 mm	4.24 in.	8.0 mm	5/16 in.	355 µm	No. 45
100 mm	4 in.	6.7 mm	0.265 in.	300 µm	No. 50
90 mm	3½ in.	6.3 mm	¼ in.	250 µm	No. 60
75 mm	3 in.	5.6 mm	No. 3 ½	212 µm	No. 70
63 mm	2½ in.	4.75 mm	No. 4	180 µm	No. 80
53 mm	2.12 in.	4.00 mm	No. 5	150 µm	No. 100
50 mm	2 in.	3.35 mm	No. 6	125 µm	No. 120
45 mm	1¾ in.	2.80 mm	No. 7	106 µm	No. 140
37.5 mm	1½ in.	2.36 mm	No. 8	90 µm	No. 170
31.5 mm	1¼ in.	2.00 mm	No. 10	75 µm	No. 200
26.5 mm	1.06 in.	1.7 mm	No. 12	63 µm	No. 230
25.0 mm	1.00 in.	1.4 mm	No. 14	53 µm	No. 270
22.4 mm	7/8 in.	1.18 mm	No. 16	45 µm	No. 325
19.0 mm	¾ in.	1.00 mm	No. 18	38 µm	No. 400
16.0 mm	5/8 in.	850 µm	No. 20	32 µm	No. 450
13.2 mm	0.53 in.	710 µm	No. 25	25 µm	No. 500
12.5 mm	½ in.	600 µm	No. 30	20 µm	No. 635
11.2 mm	7/16 in.	500 µm	No. 35		

Las vibraciones pueden ser generadas mecánicamente, las vibraciones mecánicas son transmitidas por excéntricos de alta velocidad hacia la cubierta de la unidad, y de ahí hacia los tamices. El rango de vibraciones es aproximadamente 1800 a 3600 vibraciones por minuto.

La distribución granulométrica de las partículas puede ser representada gráficamente en forma acumulativa o diferencial.

Existen correlaciones empíricas utilizadas para describir la distribución de las partículas en el material, los dos métodos más comunes que se aplican con más frecuencia a los estudios de pulverización en los que se obtienen distribuciones de tamaño uniformes son los métodos Gates-Guadin-Schumann y Rosin - Rammler [13].

Un análisis granulométrico completo consiste en hacer pasar un material generalmente 100 gramos representativos de la muestra original, por una serie de tamices comenzando por un menor número de mallas y concluyendo con el de mayor número [13].

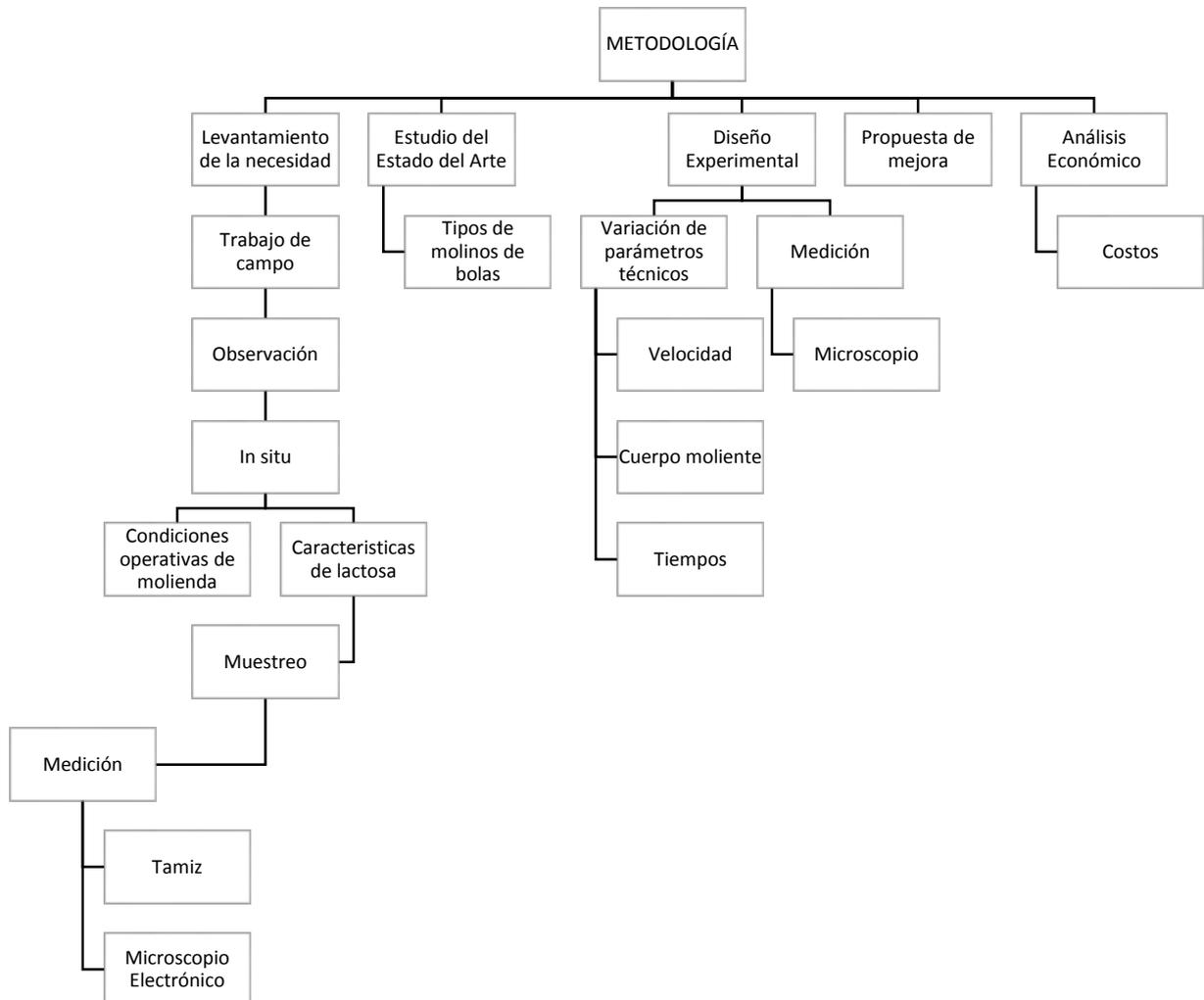
5.5.2 Análisis granulométrico por microscopia

El análisis por microscópica permite visualizar rápidamente el tamaño y forma nominal de las partículas en una muestra y obtener una micrografía representativa de la región analizada, obteniendo además por ampliación detalles de la forma y de la superficie de partículas [13].

6. Parámetros del proceso de molienda

6.1 Metodología

Para el desarrollo de este capítulo se seguirá la metodología establecida en la Figura 9.



En la etapa 1 se realiza el levantamiento de la necesidad, para lo cual es indispensable ejecutar un trabajo de campo dentro de la empresa láctea, realizando en primera instancia una identificación de las variables iniciales del proceso de molienda de lactosa, así como condiciones operativas de molienda y las características de la lactosa molida (tamaño de partícula).

En la etapa 2 se realiza un trabajo investigativo, para obtener información acerca de los diferentes tipos de molinos para laboratorios que existen en el mercado para determinar sus características constructivas y su adaptabilidad a las condiciones específicas para el proceso de molienda de lactosa.

En la etapa 3 se realiza un diseño experimental, en el cual se variarán los parámetros de operación del equipo de molienda como: velocidad, distribución del material moliente y tiempo de molienda.

Para saber el tamaño de partícula actual se someterán las muestras en tamices y microscopía en los laboratorios de biotecnología de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca. Estas mediciones nos permitirán analizar si los parámetros variados son óptimos para obtener un tamaño de partícula menor a la actual.

En la etapa 4 se propone la propuesta de mejora con los parámetros de operación óptimos para el proceso de molienda de lactosa.

En la etapa 5 se realiza un análisis económico de la propuesta de mejora, esto permitirá saber que tan rentable resultó la mejora del proceso de molienda de lactosa para la empresa.

6.2 Descripción del equipo de molienda de lactosa

El equipo que se utiliza en la actualidad para la molienda de lactosa, es un molino de arandelas giratorio horizontal de 20 cm x 30 cm, con una capacidad de 2.5 kg. El equipo de molienda se muestra en la Figura 10. El molino de laboratorio de microbiología está instalado sobre una estructura de acero inoxidable, accionado por un motorreductor de velocidad constante, contiene un variador de frecuencia para controlar la velocidad de salida del motor.



Figura 10: Molino horizontal giratorio. Fuente: Autores.

En la Tabla 7 se presentan las características del molino utilizado en el proceso de molienda de la empresa.

Tabla 7: Especificaciones técnicas del molino. Fuente: Autores.

Características Técnicas		
Tambor	Díámetro Tambor [cm]	20
	Longitud [cm]	30
	Volumen [cm^3]	9424
	Capacidad [kg]	2.5
Motoreductor	Velocidad de giro [rpm]	70
	Potencia [hp]	1
	Material Moliente	Arandelas Acero Inoxidable
	Variador de frecuencia	Telemecanique altivar 31

6.3 Velocidad del molino

Se calcula la velocidad crítica del molino de lactosa de la empresa, utilizando la ecuación (1). Se obtiene una velocidad crítica igual a 94.5 rpm, de este valor la velocidad de operación que debe trabajar el molino se encuentra en un rango del 65% al 85%, lo que corresponde a 61.42 rpm y 80.325 rpm. Actualmente el molino de lactosa del laboratorio trabaja a una velocidad de 61.7 rpm, por lo tanto, está en el rango de la velocidad óptima del molino.

6.4 Parámetros de operación del molino

Los parámetros de operación que se utiliza para el proceso de molienda de lactosa se presentan en la Tabla 8 y en la Figura 11 se presenta una fotografía de los materiales molientes que se utilizan en dicho molino.

Tabla 8: Condiciones de operación. Fuente: Autores

Condiciones de Operación	
Tiempo De Molienda [h]	48
Peso lactosa [kg]	2.5
Velocidad [rpm]	61
Material moliente	arandelas



Figura 11: Material moliente "Arandelas". Fuente: Autores.

6.5 Carga moledora y distribución de las arandelas de acero

El porcentaje de llenado de las arandelas en el molino es de 12%, cuya distribución en función del diámetro se presenta en la Tabla 9.

Tabla 9: Distribución de tamaños de arandelas. Fuente: Autores

Diámetros Interior [mm]	Diámetro Exterior [mm]	Masa [kg]	Masa unidad [kg]	Cantidad de arandelas
42	75	2.9322	0.0824	37
22	50	0.1585	0.0444	2
13	38	0.07925	0.030016	1
TOTAL		3.170		40

6.6 Caracterización del material

El material en estudio es un azúcar presente en la leche de un sabor dulce o también conocido como lactosa (Ver Figura 12), se emplea en la industria farmacéutica y alimenticia. Este producto tiene una granulometría inicial de 150 μ m. Las muestras utilizadas para las pruebas de molienda son obtenidas de las muestras de Stock.



Figura 12: Lactosa: saco y muestra. Fuente: Autores

Se establece las características del material a moler, en el cual se determina las características físicas del material que ingresa a la molienda.

6.6.1 Comportamiento granulométrico

El análisis granulométrico tiene la finalidad de determinar la distribución de tamaño de las partículas que constituye una muestra de material, para la cual se emplean tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decrecientes, los cuales corresponden a diferentes series como: Internacional ISO, americanas Tyler o ASTM [12].

Con el objetivo de analizar la distribución de tamaño de partículas de las muestras, se efectuaron análisis granulométricos utilizando los tamices ASTM N° 40, 60, 70, 80, 100, 140 y 200 cuyas aberturas en μ m se muestra en la Tabla 10 de tamices seleccionados.

Tabla 10: Tamices seleccionados con referencia del tamaño inicial. Fuente: Autores.

Tamiz ASTM	Abertura del Tamiz [μ m]	Observaciones
40	425	
60	250	
70	212	Fracciones del tamaño que representa el extremo grueso
80	180	
100	150	Fracciones del tamaño que representa el extremo fino
140	106	
200	75	
FONDO	0	

6.6.2 Cantidad de la muestra

La cantidad mínima representativa será de acuerdo a lo que se establece en la Tabla 11.

Tabla 11: Masa mínima recomendada para medición [14].

Procesos Granulométrico	Tamaño de Partícula [um]	Tamaño de Muestra [g]
Tamización	> 30	5 – 100
Sedimentación	> 2 - >0.5	
Coulter	0.4 – 1200	< 1
Difracción Laser	0.01 – 900	1 – 5
Microscopia (óptica y electrónica)	>1 - >0.01	0.1

Para la determinación de la distribución del tamaño de partícula por el método de tamizado para sólidos finos y muy finos se debe considerar una cantidad de muestra no mayor a los 100 g y un tiempo de agitación de 30 min[15].

6.7 Procedimiento del análisis granulométrico por tamizado

La tamizadora es un agitador automático de marca Advantech DuraTap (Ver Figura 13), utilizado para el análisis del material fino. Este dispositivo mecánico soporta una serie de siete tamices Standard. El movimiento para efectuar el tamizado lo realiza en sentido horizontal y circular junto con el golpeteo en sentido vertical y a su tiempo estándar de tamizado de 15 a 30 minutos por prueba se produce un tamizado uniforme y eficiente.



Figura 13: Agitador automático Advantech Dura Tap. Fuente Autores

En la Figura 14 se muestra un diagrama de flujo que se aplica para el desarrollo de análisis granulométrico de una muestra de lactosa.

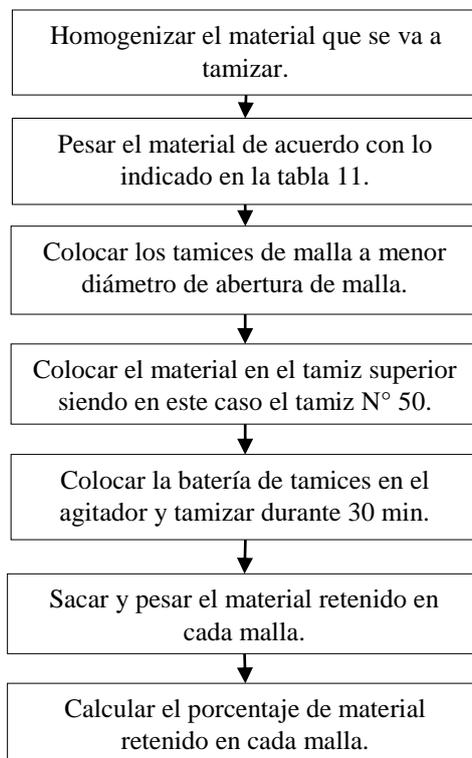


Figura 14: Diagrama de flujo del análisis granulométrico. Fuente: Autores

6.7.1 Análisis granulométrico del tamaño inicial de partícula de lactosa

La lactosa se adquiere inicialmente con un tamaño de partícula de 150 μm equivalente a la malla 100. Siendo este un dato de referencia para validar las técnicas de mediciones, se procede a medir respectivamente muestras de lactosa inicial y la que actualmente se obtiene con la molienda de arandelas. Por lo tanto, aplicando la técnica por tamizado y la visualización microscópica se comparará los resultados para determinar si existe reducción de tamaño de partícula.

6.7.2 Procedimiento para el análisis granulométrico del tamaño de partícula

Se procede a caracterizar pesando la muestra de lactosa con 100g, en el tamizaje se utilizarán mallas: #40, #60, #70, #80, #100, #140, #200, para posteriormente llevarlas al agitador y esperar 30 minutos de su funcionamiento. Luego se pesa la muestra retenida en cada malla desmontando cada uno de los tamices teniendo precaución de que no haya pérdidas. A continuación, se explicará cómo será desarrollada las tablas para cada fase.

A partir de la muestra representativa, al realizar el tamizaje se determino los siguientes resultados en la Tabla 12.

Tabla 12: Resultados del análisis granulométrico por tamizado. Fuente: Autores

Malla	tamaño [um]	Masa retenida [g]	Fracción retenida [f(x)]	Fracción retenido acumulada [F(x)]	Fracción pasante acumulada [R(x)]	Schumann		Rosin Rammler	
						y	x	y	x
						log F(x)	log (x)	ln (x)	ln(ln(1/1- F(x)))
+40	500	8.22	0.083	0.000	1.00	0.000	2.699	-	6.215
-40 +60	425	31.81	0.320	0.083	0.92	-0.037	2.628	-	6.052
-60 +70	250	14.11	0.142	0.403	0.60	-0.224	2.398	-0.095	5.521
-70 +80	212	12.17	0.122	0.545	0.46	-0.342	2.326	-0.498	5.357
-80 +100	180	9.98	0.100	0.667	0.33	-0.478	2.255	-0.904	5.193
-100 +140	150	8.11	0.082	0.767	0.23	-0.633	2.176	-1.329	5.011
-140 +200	106	7.19	0.072	0.849	0.15	-0.821	2.025	-1.809	4.663
-200	75	7.83	0.079	0.921	0.08	-1.104	1.875	-2.501	4.317
		99.4	1.000	0.000	1.00				

Se procede a explicar la obtención de las fórmulas para cada uno de los parámetros expuestos en la tabla 12.

Fracción retenida. - es la relación entre la masa retenida y la masa total. Se puede expresar en fracción o en porcentaje, en la medición de la masa total después del tamizado se toma el valor de la masa retenida en cada malla, la suma de todas las fracciones da como resultado 1 o en porcentaje 100% [16].

$$f(x)\% = \left(\frac{\text{masa retenida}}{\text{masa total}} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

Fracción pasante acumulada. - es la diferencia de la unidad con la fracción retenida acumulada.

$$F(x) = 1 - \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

Fracción Retenida Acumulada. - es la sumatoria de las fracciones retenidas en cada malla

$$F(x) = \sum_{i=1}^n x_i \quad (8)$$

Error: se calcula el error porque al momento de trabajar en el proceso de tamizado, se presenta cierta pérdida de cantidad del material, en donde las partículas se disipan en forma de polvo por efecto de la agitación de la tamizadora, en el momento de separar los tamices y llevarlas a pesar las muestras. Es recomendable por lo general perder hasta un máximo de 3gr caso contrario se deberá repetir el proceso [16].

$$\text{Error: } \frac{\text{Peso muestra inicial} - \text{Peso muestra final}}{\text{Peso muestra inicial}} \cdot 100\% \quad (9)$$

$$\text{Error: } \frac{100 \text{ g} - 99.4 \text{ g}}{100 \text{ g}} \cdot 100\%$$

$$\text{Error: } 0.60 \%$$

6.7.3 Evaluación de modelos de distribución

Para conocer a cuál modelo se ajusta más la distribución granulométrica, se debe determinar la línea de tendencia que refleje un R^2 cercano a 1, la misma permitirá determinar el modelo que más se ajusta a distribución [16].

Cabe denotar que, para el análisis de datos de la distribución de tamaños de partículas, se utiliza la siguiente nomenclatura.

+M = retenido en malla M

-M = retenido en malla M

En la Figura 15. Se puede observar las gráficas de % Pasante acumulado que representa el porcentaje de muestra con su tamaño equivalente y el % Retenido acumulado representa el porcentaje de material que tiene un tamaño (x) mayor.

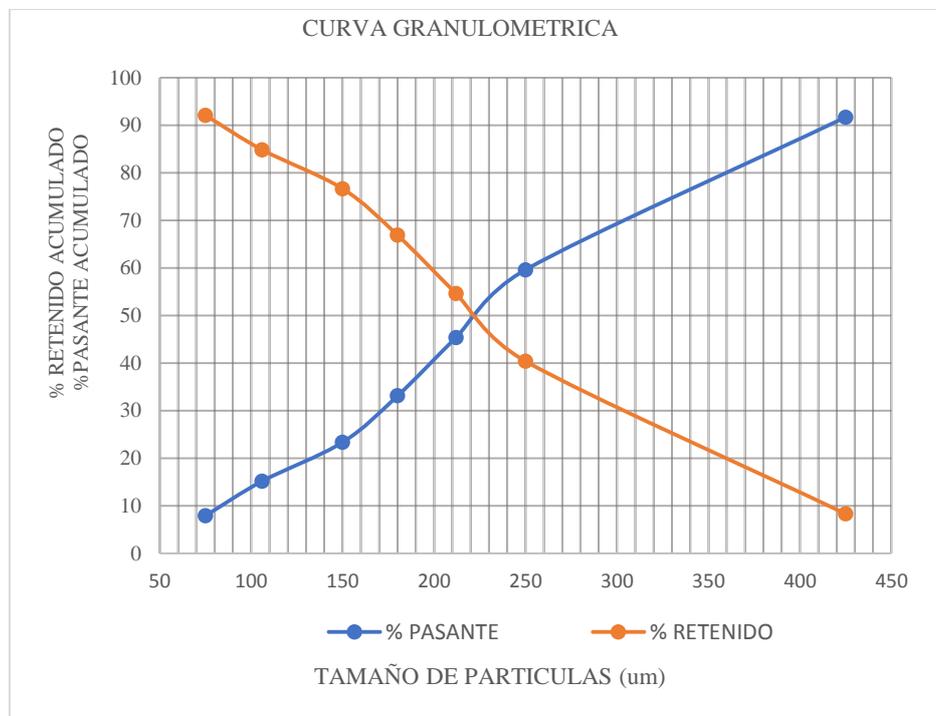


Figura 15. Porcentaje pasante acumulado y retenido acumulado vs tamaño de partícula. Fuente Autores

- **Promedio, desviación estándar y tamaño x máximo**

Para estimaciones promedio de los tamaños de partículas generalmente se realiza la media de los valores medidos, en este caso se aplica para el promedio del tamaño característicos de la distribución en los tamices siendo que se relaciona directamente proporcional el tamaño de la malla en μm con la fracción retenida en peso, (Ver ecuación 10).

$X_{M\acute{a}x}$: *Tamaño mínimo de tamiz por el cual pasan todas partículas*

El tamiz malla 30 (600 μm) es el que pasa el 100 % de la muestra

$$X_{M\acute{a}x} = 600 \mu m$$

\bar{X} = *Tamaño promedio característico de la distribución*

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot f(x_i) \quad (10)$$

En la Tabla 13 se presenta los valores para estimar el promedio característico de la distribución de los tamaños de grano de lactosa.

Tabla 13: Valores para el promedio del tamaño de partícula. Fuente: Autores

Tamaño malla [μm]	Fracción retenida $f(x_i)$	$\bar{X} = \sum_{i=1}^n x_i \cdot f(x_i)$
500	0.083	35.139
425	0.320	135.981
250	0.142	35.481
212	0.122	25.951
180	0.100	18.069
150	0.082	12.236
106	0.072	7.66
75	0.079	5.907
	1	241.292

$$\bar{X} = 241.292 \mu m$$

Desviación estándar

En la Tabla 14 se presenta la determinación de la desviación estándar, misma que es una media de dispersión que indica cuanto puede alejarse los valores respecto al valor promedio.

$$\sigma^2 = \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot f(x_i) \quad (11)$$

Tabla 14: Cálculo de Desviación estándar. Fuente: Autores.

Tamaño malla [μm]	Fracción retenida $f(x_i)$	σ^2 $= \sum_i^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot f(x_i)$
425	0.083	5533.8010
425	0.320	10798.2695
250	0.142	10.7662
212	0.122	105.0181
180	0.100	377.0857
150	0.082	679.8236
106	0.072	1323.6963
75	0.079	2177.8188
Total	1	18262.8514
	σ	135.1401

Evaluación de los modelos de Schumann – Rosin Rammler

El procedimiento para la determinación de la distribución del tamaño de partícula mediante el tamizado se analiza mediante los métodos de Schumann y Rammler respectivamente para realizar la comparación y estimación del mejor resultado. Se explica a continuación el procedimiento [16]. Para conocer cual modelo se ajusta más a la distribución granulométrica, se debe determinar la línea de tendencia que refleje un R^2 cercano a 1, la misma permitirá determinar el modelo que más se ajusta a la distribución.

- **Método de distribución de Schumann**

En este método se considera el porcentaje acumulado en cada malla para comparar con el tamaño de partícula, es la distribución más aplicada para presentar la distribución de tamaños obtenidos por tamizaje [16].

$$F(x) = \left(\frac{x}{K_{sch}}\right)^n \quad (12)$$

Donde:

$F(x)$: % en peso acumulado pasante por cada malla

n : Parámetro de Distribución

K_{sch} : Constante de Schumann (Tamaño máximo de distribución)

x : Tamaño de partícula.

Para utilizar el modelo de Schumann se grafica (Ver figura 16) los valores presentados en la Tabla 15 son los valores resultantes empleados en este método y su desarrollo se explica a continuación.

$$\text{Log}(F(x)) \text{ vs } \text{Log}(x)$$

Y se realiza una linealización del tramo recto de la gráfica, tomando en referencia la ecuación de la recta ecuación 7.

$$y = mx + b \tag{13}$$

Tomando logaritmos se resume en la siguiente ecuación

$$\text{Log}(F(x)) = n\text{Log}(x) - n\log(K_{sch})$$

Los datos correspondientes obtenidos en Excel son los observados en la Tabla 15.

Tabla 15: Variables x e y del modelo de Schumann. Fuente: Autores.

Schumann	
y	x
$\text{Log}(F(x))$	$\text{Log}(x)$
0	2.628
-0.037	2.628
-0.224	2.398
-0.342	2.326
-0.478	2.255
-0.633	2.176
-0.821	2.025
-1.104	1.875

En la figura 16 se utilizan los valores de la linealización, obtenidos en ecuación de la línea de tendencia, para determinar el modelo de Schumann.

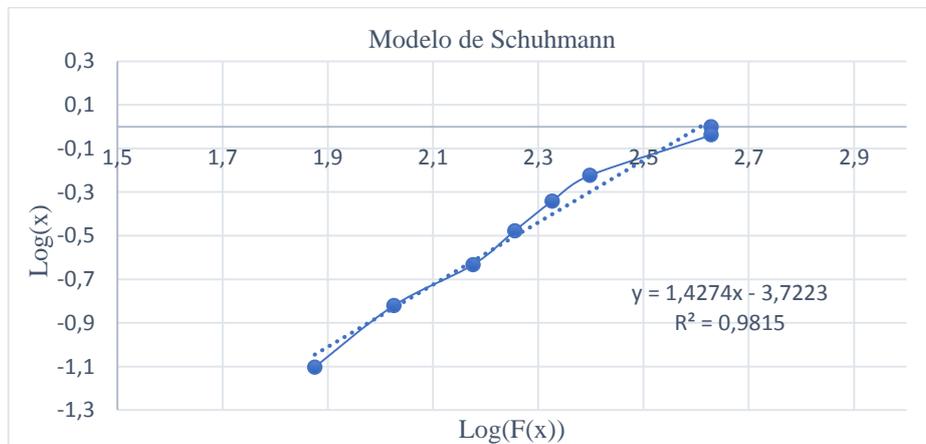


Figura 16: Curva granulométrica del Modelo de Schumann. Fuente: Autores.

En esta aproximación se obtiene el valor de n y K_{sch}

$$\text{Log}(F(x)) = 1.4274 \text{Log}(x) - 3.7223 \text{Log}(K_{sch})$$

En donde $n=1.4274$ (pendiente de la sección lineal) y $n\text{Log}(K_{sch})=3.7223$

$$K_{sch} = 10^{\frac{3.7223}{n}} = 10^{\frac{3.7223}{1.4274}} = 405.273$$

De esta manera se define el modelo de Schumann como

$$F(x) = \left(\frac{x}{K_{sch}}\right)^n = \left(\frac{x}{405.273}\right)^{3.7223}$$

- Método de Distribución de Rosin Rammler

En la distribución tipo Rosin Rammler, a partir del análisis granulométrico se obtiene un conjunto de datos tales como: tamaño de partículas, su respectivo porcentaje de pasante acumulado, y se ajustaran a la distribución de Rosin Rammler si cumple los parámetros de la ecuación [16]:

$$F(x) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{x}{K_{RR}}\right)^m \right] \quad (14)$$

Donde:

m Parámetro de Distribución

K_{RR} : Constante de Rosin Rammler (Tamaño característico de la Distribución)

x : Tamaño de Partícula.

Para utilizar el Modelo de Rosin – Rammler se grafica

$$\text{Ln} \left[\text{Ln} \left(\frac{1}{1 - F(x)} \right) \right] \text{ vs } \text{Ln}(x)$$

Y se realiza un linealización del tramo recto de la gráfica, tomando en referencia la ecuación de la recta

$$y = mx + b$$

Y se resumen en la siguiente ecuación

$$\text{Ln} \left[\text{Ln} \left(\frac{1}{1 - F(x)} \right) \right] = m \text{Ln}(x) - m \text{Ln}(K_{RR})$$

Los datos correspondientes obtenidos del modelo de Rammler son los presentados en la Tabla 16.

Tabla 16: Variables x e y del modelo de Rosin Rammler. Fuente: Autores

Rosin Rammler	
y	x
$\mathbf{Ln[Ln(1/(1 - F(x)))]}$	$\mathbf{Ln(x)}$
-	6.052
-	6.052
-0.095	5.521
-0.498	5.357
-0.904	5.193
-1.329	5.011
-1.809	4.663
-2.501	4.317

En la Figura 17 se utilizan los valores de la linealización, obtenidos en ecuación de la línea de tendencia, para determinar el modelo de Rammler.

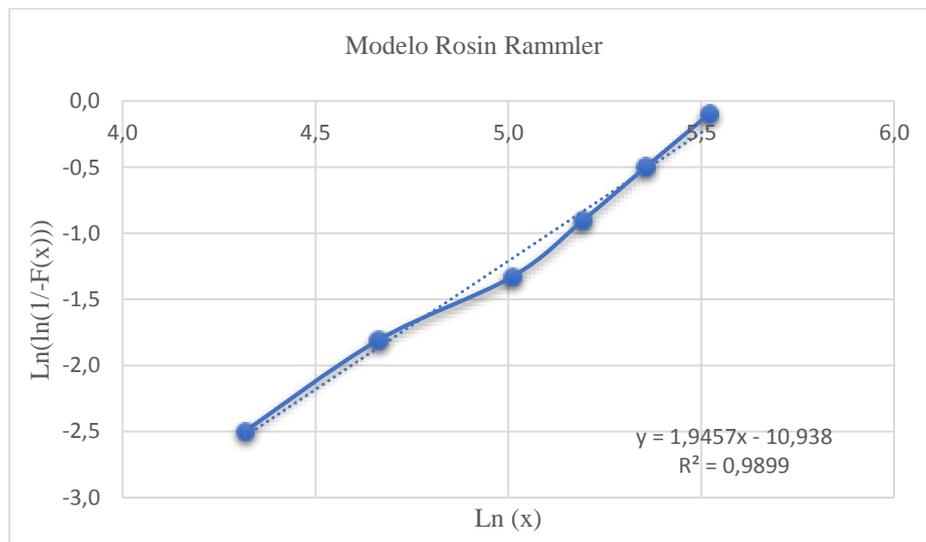


Figura 17: Modelo de Rosin Rammler. Fuente: Autores

De esta aproximación se obtiene el valor de m y K_{RR}

$$F(x) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{x}{K_{RR}}\right)^m \right]$$

$$1 - F(x) = \exp \left[-\left(\frac{x}{K_{RR}}\right)^m \right]$$

$$\text{Ln}(1 - F(x)) = \left(-\frac{x}{K_{RR}} \right)^m$$

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(x)} \right) \right] = m \ln(x) - m \ln(K_{RR})$$

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(x)} \right) \right] = 1.9457 \ln(x) - 10.938$$

En donde $m=1.9457$ y $m \ln(K_{RR})=10.938$

$$K_{RR} = e^{\frac{10.938}{m}} = e^{\frac{10.938}{1.9457}} = 275.74 \text{ } \mu\text{m}$$

De esta manera se define el modelo de Rosin – Rammler como

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{275.74} \right)^{1.9457} \right]$$

- **Determinación del D50**

Al determinar el modelo que mejor se ajusta a 1, se calcula los diferentes porcentajes de material retenido.

Ahora en base al modelo, se determina en primer lugar el d50, para ello se define que el d50 se refiere al tamaño que permite pasar el 50% en peso de la población de partículas.

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{x}{K_{RR}} \right)^m \right]$$

$$1 - F(x) = \exp \left[- \left(\frac{x}{K_{RR}} \right)^m \right]$$

$$\ln(1 - F(x)) = \left(- \frac{x}{K_{RR}} \right)^m$$

$$\left[-\ln(1 - F(x)) \right]^{\frac{1}{m}} = \frac{x}{K_{RR}}$$

$$x = K_{RR} \left\{ \left[-\ln(1 - F(x)) \right]^{\frac{1}{m}} \right\}$$

$$x = 276.339 \text{ } \mu\text{m} \left\{ \left[-\ln(1 - 0.5) \right]^{\frac{1}{1.9457}} \right\} = 228.89 \text{ } \mu\text{m}$$

$$x = 228.89 \text{ } \mu\text{m}$$

Ahora para comprender como funciona el modelo de Schumann se realizará el cálculo con $d=80$, según datos reflejados previamente.

$$F(x) = \left(\frac{x}{K_{Sch}} \right)^n = \left(\frac{x}{405.273} \right)^{3.7223}$$

$$x = K_{Sch} (F(x))^{\frac{1}{n}}$$

$$x = 405.273 (0.5)^{\frac{1}{3.7223}} = 258.07 \text{ } \mu\text{m}$$

$$x = 258.07 \text{ } \mu\text{m}$$

Tabla 17: Resultados del Análisis Granulométrico por tamizado. Fuente: Autores

Análisis Granulométrico por Tamizado		
Modelos	R^2	x
Promedio		241.29 ±135
Schumann	0.9815	258.07
Rosin - Rammler	0.9899	228.89

Analizando ambos modelos se concluyó que el que representa una mejor aproximación es el modelo de Rosin – Rammler ya que, al momento de graficar la línea de tendencia se acerca más a la unidad que el modelo de Schumann (Ver Tabla 17).

Como se puede observar en la Tabla 17 el modelo de Rosin Rammler mostro una mejor aproximación de los pasantes del material.

Por lo tanto se estima que el tamaño promedio de la partícula es 228.89 *um* por el método de tamizado, pero la medición según el certificado de análisis el tamaño de partícula esta entre 150 *um* y 180 *um*. En consecuencia este método se descarta para el analisis granulométrico de lactosa por que en el proceso de operación de tamizado la humedad provoco aglomeración entre sus cristales e impidió realizar el correcto tamizado.

6.7.4 Análisis granulométrico del tamaño de partícula de la molienda con arandelas.

Se ha decidido que este análisis se lo realizará solo por granulométrico por microscopia, debido a que la muestra se aglomera al momento de realizar el tamizado en el cual da como resultados datos erróneos, también se podría decir que el método de tamizado solo sirve para tamaños de partículas superiores a malla 200 (74 *um*), en cual la muestra obtenida es más fina que la malla 200.

6.8 Análisis granulométrico por microscopia

El análisis por microscópica permite visualizar rápidamente el tamaño y forma nominal de las partículas en una muestra y obtener una micrografía representativa de la región analizada, obteniendo además por ampliación detalles de la forma y de la superficie de partículas [11].

Microscopio

El microscopio usado para las pruebas es OLYMPUS BX43 (Figura 18), posee luz transmitida desde la base con ajuste de foco. Lámpara halógena de 12V/100W. Integra dos filtros de densidad neutra (ND6, ND25), uno de ellos para balance de la luz del día, y una bahía vacía para un filtro de fluorescencia opcional. Condensador universal de 8 posiciones que permite observación continua sobre los rangos 4x – 100x para uso en campo claro, campo oscuro, contraste de fase, polarización y contraste de fase diferencial[17] [18].

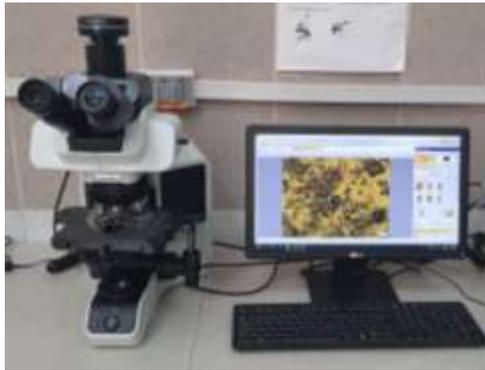


Figura 18. Microscopio OLYMPUS BX43. Fuente: Autores

El procedimiento de medición del tamaño de partícula de lactosa por microscopía se presenta en la Figura 19.

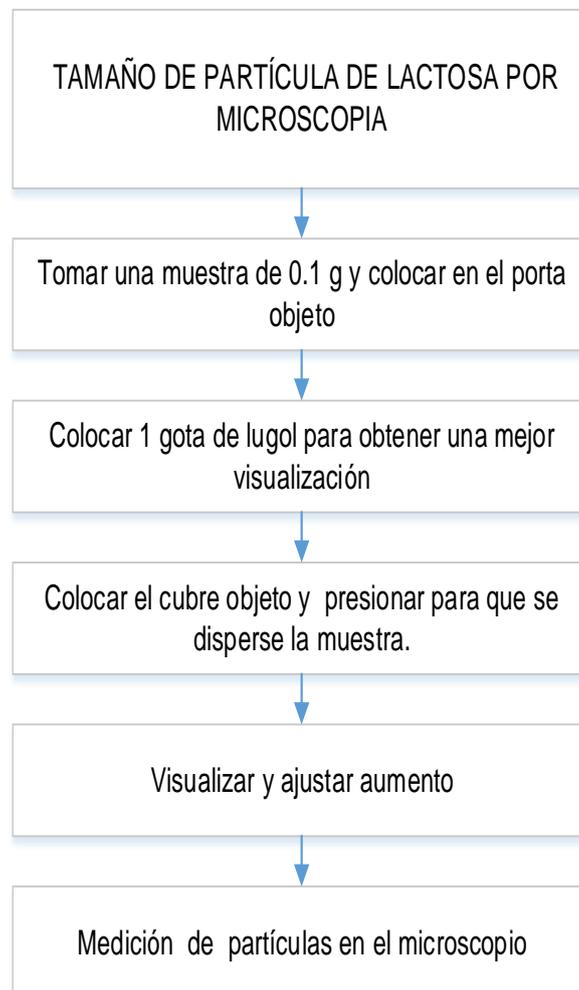


Figura 19: Procedimiento de medición por microscopía. Fuente: Autores

Para la visualización en el microscopio y su correspondiente análisis, se recomienda utilizar el mínimo aumento de lente, mismo que ayudará en el análisis del tamaño de partícula.

6.8.1 Muestra inicial de lactosa Antes de moler

Con el procedimiento antes mencionado, con aumento de 4x se puede observar la microfotografía en la Figura 20, que las partículas de lactosa tienen características de forma heterogénea y aleatoria con distintas medidas.

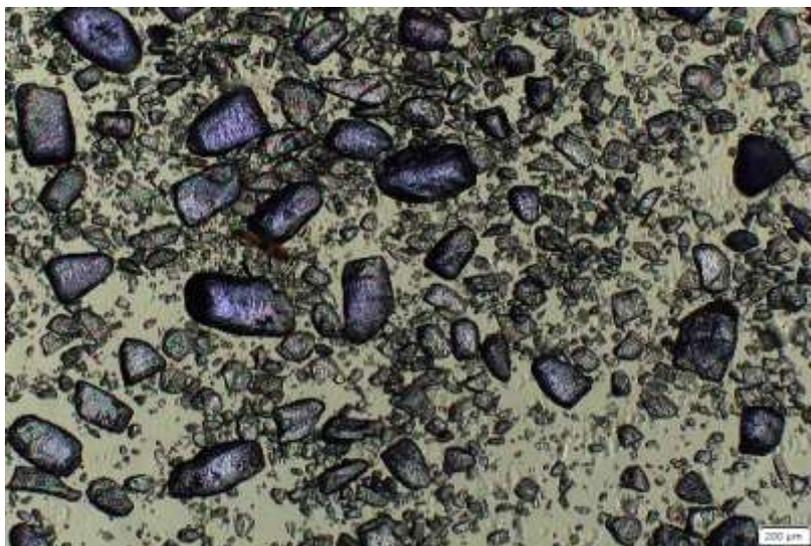


Figura 20: Partículas de lactosa antes de moler. Fuente: Autores

En la Tabla 18. Se presenta la medición de los tamaños promedios, máximo y mínimos de las partículas.

Tabla 18: Medición por microscopía óptica de lactosa antes de moler. Fuente: Autores

# Mediciones	Medición por Microscopía		Promedio	Desv. Stad.
	Tamaño de partícula [um]			
	Mínimo	Máximo		
30	124.51	483.44	264.56	95.34

En comparación del análisis microscópico el valor promedio de tamaños de partícula es 264.56 um y en el certificado de análisis de lactosa esta entre 150 um y 180 um. Por lo tanto, las mediciones microscópicas son más exactas y se acercan al certificado de calidad. Por tratar de una muestra heterogénea de sus cristales el resultado es aceptable.

En la Tabla 19 se presenta una tabla de comparación de resultado de las medidas promedio del proceso de medición en el microscopio óptico y tamizado, en el cual la medición por microscopía es la más precisa para el tamaño de partícula.

Tabla 19: Comparación de las técnicas de tamizado y microscopía de los resultados de medición de muestra inicial. Fuente: Autores

Técnicas de medición	Tamaño de Partícula [um]
Tamizado	228.89
Microscopía	264.56

6.8.2 Muestra con el proceso actual de molienda de lactosa

Con aumento de 20x se puede observar en la Figura 21, la microfotografía presenta los cristales de lactosa molida con arandelas como material moliente, de igual forma dichas partículas tienen características de forma heterogénea y aleatoria con distintas medidas por lo que dificulta estimar el tamaño promedio de partícula, aun así se realiza las mediciones y los resultados se presentan en la Tabla 20.

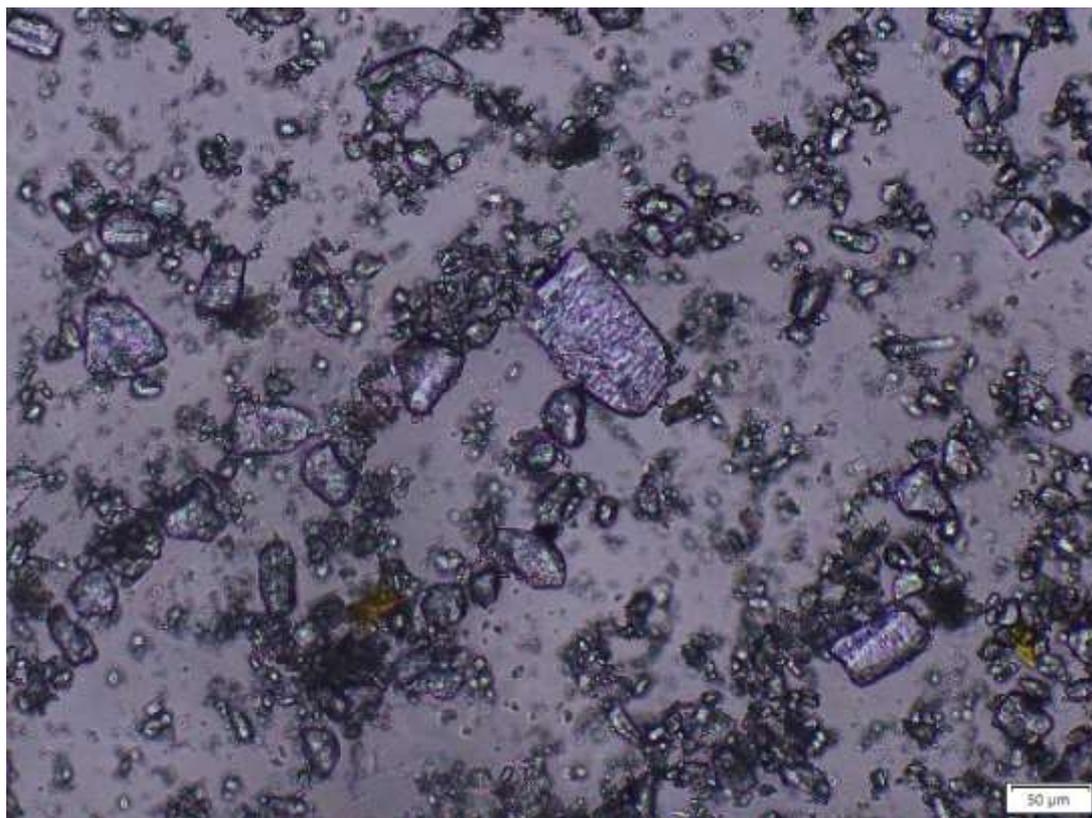


Figura 21: Partículas de lactosa 48h de molienda.

Tabla 20: Medición por microscopía óptica de lactosa molida. Fuente: Autores

# Mediciones	Medición por Microscopía		Media	Desv. Stad.
	Tamaño de partícula [um]			
	Mínimo	Máximo		
30	19.99	108.67	40.23	17.24

7. Diseño experimental para reducir el tamaño de partícula

7.1 Alternativas para el desarrollo del diseño

De acuerdo con las investigaciones realizadas en los fundamentos teóricos los parámetros para la selección de alternativas se consideran a continuación:

- Tamaño de grano obtenido
- Tiempo de molienda
- Tipo de molienda
- Potencia requerida
- Costo

Tamaño de grano obtenido

Es de gran importancia el tamaño de grano de lactosa obtenido debido a que de ella depende la calidad de la textura de la leche condensada.

Tiempo de molienda

El tiempo de molienda se relaciona de manera proporcional con el consumo energético y con la aglomeración de material a moler, por lo que representa un costo alto por mayor consumo energético y pérdida de materia prima.

Tipos de molienda

El rendimiento de los molinos aumenta cuando se utiliza una humedad del 1% con el fin de disminuir ruido, facilidad de reducir el volumen del material, además se debe considerar con algunas excepciones que se puedan producir oxidación o contaminación del material al momento de producirse la molienda [2].

Potencia

La potencia necesaria para la molienda, se requiere las necesidades básicas para el trabajo del molino, y el tiempo de molienda.

Costo

- Costes energéticos. Se relaciona con la potencia que requiera el molino.
- Mantenimiento. Involucra la rápida intervención en la máquina, además, considera los elementos que se puedan adquirir rápidamente.
- Costes de construcción. Abaratar costos de materiales como mano de obra.

7.2 Selección de alternativas

Se realiza una ponderación de las alternativas, considerando ventajas y desventajas de los tipos de molinos, que se utilizan en los laboratorios de acuerdo a la referencia en los fundamentos teóricos con la finalidad de seleccionar un molino óptimo para el desarrollo de los ensayos de reducción de partícula.

Tamaño de grano obtenido. - en la Tabla 21 se muestran los valores de tamaño establecidos y ponderados para el análisis.

Tabla 21: Valores de tamaño de grano obtenido. Fuente: Autores

Tamaño de grano obtenido		
Muy fino	5	$\leq 5 \mu m$
Fino	3	10 – 20 μm
Grueso	1	$\geq 32 \mu m$

En la Tabla 22 se colocan los resultados de la ponderación que llegan a tener los distintos tipos de molinos en base al parámetro establecido.

Tabla 22: Evaluación del tamaño de grano obtenido. Fuente: Autores

Tamaño de grano obtenido				
Tipo de molino	Muy fino	Fino	Grueso	Total
Planetario	X			5
Attritor		X		3
Tambor		X		3
Alta energía	X			5

Tiempo de molienda. - en la Tabla 23 se muestran los valores de tiempo de molienda establecidos y ponderados para el análisis.

Tabla 23: Valores del tiempo de molienda. Fuente: Autores

Tiempo de molienda		
Rápido	5	< 1 hora
Normal	3	1
Lento	1	≥ 2 horas

En la Tabla 24 se colocan los resultados de la ponderación que llegan a tener los distintos tipos de molinos en base al parámetro establecido.

Tabla 24: Evaluación del tiempo de molienda. Fuente: Autores

Tiempo de molienda				
Tipo de molino	Alto	Media	Baja	Total
Planetario	X			5
Attritor		X		3
Tambor		X		3
Alta energía	X			5

Tipo de Molienda. - en la Tabla 25 se muestran los valores de tipo de molienda establecido y ponderado para el análisis.

Tabla 25: Valores del tipo de molienda. Fuente: Autores

Tipo de molienda	
Húmeda y seca	5
Seca	1

En la Tabla 26 se colocan los resultados de la ponderación que llegan a tener los distintos tipos de molinos en base al parámetro establecido.

Tabla 26: Evaluación del tipo de molienda. Fuente: Autores

Tipo de molienda			
Tipo de molino	Húmeda y seca	Seca	Total
Planetario		X	1
Attritor	X		5
Tambor	X		5
Alta energía		X	1

Potencia requerida. - en la Tabla 27 se muestran los valores de la potencia requerida establecido y ponderado para el análisis.

Tabla 27: Valores del peso específico del criterio disponibilidad. Fuente: Autores

Potencia requerida		
	Alto	Mayor a 1 HP
Medio	3	½ a 1 HP
Bajo	5	Menor a 1/2 HP

En la Tabla 28 se colocan los resultados de la ponderación que llegan a tener los distintos tipos de molinos en base al parámetro establecido.

Tabla 28: Evaluación del peso específico del criterio disponibilidad. Fuente Autores.

Potencia requerida				
Tipo de molino	Alto	Media	Baja	Total
Planetario		X		3
Attritor		X		3
Tambor		X		3
Alta energía	X			1

Costos. - en la Tabla 29 se muestran los valores de los costos establecidos y ponderados para el análisis.

Tabla 29 Valores de los costos. Fuente: Autores

Costos	
Energético	
Alto	1
Medio	3
Bajo	5

En la Tabla 30 se colocan los resultados de la ponderación que llegan a tener los distintos tipos de molinos en base al parámetro establecido.

Tabla 30: Evaluación de los costos. Fuente: Autores.

Tipo de molino	Costos			Total
	Energético			
	Alto	Medio	Bajo	
Planetario	X			3
Attritor	X			3
Tambor			X	5
Alta energía	X			1

Ponderación de resultados.

Una vez con los resultados de la ponderación de cada uno de los tipos de molinos sometidos a los factores de análisis de ponderación planteados antes, en la Tabla 31 se colocan los resultados finales que serán decisivos para seleccionar el tipo de molino más adecuado para el proceso de molido, motivo de esta investigación.

Tabla 31: Ponderación de resultados. Fuente: Autores.

Ponderación						
Tipo de molino	Costo	Potencia requerida	Tiempo de molienda	Tamaño de grano obtenido	Tipo de molienda	Total
Planetario	3	3	5	5	1	17
Attritor	3	3	3	3	5	17
Tambor	5	3	3	3	5	19
Alta energía	1	1	5	5	1	13

De acuerdo con los resultados de ponderación obtenida para cada tipo de molino, resultó como la mejor opción el molino de tambor, el cuál es ideal para el laboratorio ya que cumple con la ponderación más alta en los parámetros utilizados como: bajo costo, potencia alta, tamaño de grano fino y el tipo de molienda puede ser húmedo o seco. Por lo tanto, para la elaboración del presente proyecto, el molino giratorio horizontal de tambor servirá para los experimentos, a fin de encontrar el tiempo, velocidad y distribución de tamaños de material moliente óptimos.

7.3 Descripción de equipos y materiales utilizados

Una vez seleccionados los materiales a utilizar y las condiciones de operación, como el material moliente, tiempo de molienda y distribución del tamaño del cylpebs, se procede a definir los equipos y materiales que se utilizarán en el desarrollo de los ensayos, mismos que a continuación se explican:

Molino. - Es un molino giratorio horizontal, ubicado en el laboratorio, tiene un motorreductor a una Potencia de 1hp con velocidad de salida de 70 rpm. La velocidad de salida es controlada por un variador de frecuencia marca Altivar 31. En la Figura 22 se puede observar el material moliente cylpebs utilizados en los ensayos.



Figura 22: Molino Giratorio. Fuente: Autores

Microscopio óptico. - Es un instrumento que está compuesto principalmente por oculares y objetivos que son los encargados de ampliar las imágenes que se enfocan (Ver Figura 18).

Balanza. - Este equipo es de marca DUNE (Ver Figura 23), tiene una capacidad de medición desde 1 g a 2000 g, con un error de medición de 0.1 g.



Figura 23: Balanza. Fuente: Autores

Tricalcium Phosphate. - Es una combinación de los compuestos de calcio y fosfato (Ver Figura 24), este químico se utiliza como agente antiaglomerante en la industria manufacturera y la agricultura.



Figura 24: Tricalcium Phosphate. Fuente: Autores

Reactivo de Lugol. - Es una disolución de yodo molecular I₂ y yoduro de potasio KI en agua destilada. Las aplicaciones de este producto son emplear frecuentemente como desinfectante y antiséptico, para la desinsectación de agua en emergencias y como un reactivo para la prueba del yodo en análisis médicos y de laboratorio. En estos ensayos utiliza como contraste visual del grano de lactosa en el microscopio con el objetivo de medir el mismo. (Ver Figura 25).



Figura 25: Lugol. Fuente: Autores

7.4 Preparación de la muestra

Para la preparación de la muestra se utilizó 1050 g de lactosa y 100 g de Tricalcium Phosphate. La preparación de las muestras consta en homogenizar y mezclar la lactosa con el Tricalcium Phosphate. La homogenización se realizó mediante un tamiz de malla 30 (600 μ m), consiste en colocar la muestra sobre el tamiz y homogenizarlo con un movimiento continuo (Figura 26). La mezcla de Tricalcium Phosphate con la muestra, consiste en hacer pasar los dos productos por el tamiz malla 30 (600 μ m), esta operación se repite tres veces para obtener una buena mezcla.



Figura 26: Homogenización de la muestra. Fuente: Autores

7.5 Cálculos para los ensayos experimentales de molienda

En esta investigación se tomarán en cuenta tres parámetros de molienda que son: distribución de tamaño de material moliente, tiempo de molienda y velocidad, para esto se realiza pruebas preliminares con dos diferentes tipos de material moliente: bolas y cylpebs.

7.5.1 Llenado

Con los datos expuestos anteriormente en la descripción del equipo de molienda de lactosa (Tabla 7: Especificaciones técnicas del molino), se realiza el cálculo del grado de llenado óptimo y velocidad de operación del molino, el cual es importante para tener una molienda efectiva. En la Figura 27 se puede observar que la carga de material moliente ocupa un cierto volumen del Molino.

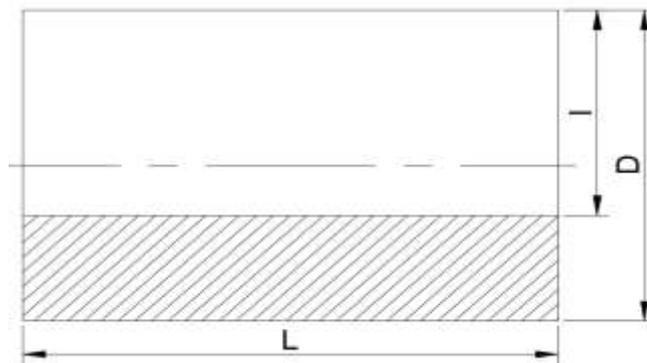


Figura 27: Volumen ocupado por el material moliente. Fuente: Autores

Fórmula

$$\%carga_{material\ moliente} = 113\% - 126\% \left(\frac{l}{D}\right) \quad (15)$$

l = altura Disponible sin carga de material moliente.

D = diametro del molino.

El llenado óptimo de los molinos debe ser tal que $h = 0.16 \cdot D$ (Ver Figura 28) [7].

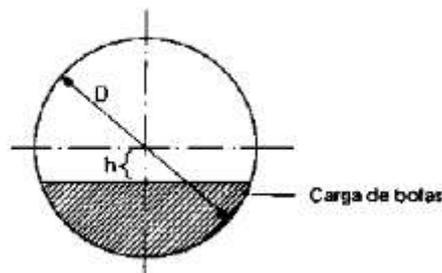


Figura 28: Llenado de material moliente [7].

$$h = 0.16 \cdot 0.20$$

$$h = 0.032 \text{ m}$$

$$l = 0.10 \text{ m} + 0.032 \text{ m}$$

$$l = \mathbf{0.132 \text{ m}}$$

$$\% \text{volumen carga}_{\text{material moliente}} = 113 \% - 126 \% \left(\frac{l}{D} \right)$$

$$\% \text{volumen carga}_{\text{material moliente}} = 113 \% - 126 \% \left(\frac{0.132 \text{ m}}{0.20 \text{ m}} \right)$$

$$\% \text{volumen carga}_{\text{bolas}} = \mathbf{30 \%}$$

Se define trabajar a un grado de llenado mínimo para los dos tipos de material moliente del 25% debido, que el 30% es demasiado peso para la capacidad del molino.

7.5.2 Velocidad crítica

La velocidad crítica es cuando el tambor gira a una velocidad muy alta, esto provoca que los medios de molienda se muevan junto a la carcasa del molino y estos no están cayendo por impacto ni por deslizamiento. Por lo tanto, en este régimen no se puede moler. En la Figura 29 se puede observar los distintos regímenes de velocidad de rotación de un Molino durante el proceso de molienda.

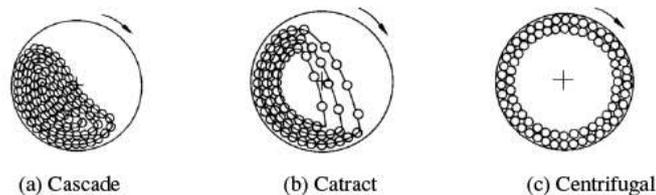


Figura 29: Regímenes distintos de velocidad de rotación de un molino [19].

Remplazando la ecuación (1), se obtiene.

$$V_c = 94.5 \text{ rpm}$$

El valor de 94.5 rpm es la velocidad de rotación crítica en el cual las bolas no realizan ningún trabajo útil.

7.5.3 Velocidad de operación

Se obtiene una velocidad crítica de 94.5 rpm, de este valor, la velocidad óptima con la que debe trabajar el molino está en un rango del 65% al 80%, lo que corresponde a 61.425 rpm y 75.6 rpm. Actualmente, el molino trabaja a una velocidad 61.7 rpm, lo que corresponde a un 65%, esta se encuentra dentro del rango establecido.

Remplazando en la ecuación (3) se obtiene.

$$\begin{aligned}V_o &= V_c \cdot \% V_c & V_o &= V_c \cdot \% V_c \\V_o &= 94.5 \cdot 0.65 & V_o &= 94.5 \cdot 0.80 \\V_{o\ min} &= \mathbf{61.425\ rpm} & V_{o\ max} &= \mathbf{75.6\ rpm}\end{aligned}$$

7.5.4 Material moliente

Para realizar los ensayos se debe conocer los diámetros del material moliente a utilizar, el peso total y la distribución de tamaño.

Los datos que se mantuvieron constante en los ensayos, para los dos materiales molientes son:

- Grado de llenado del 25 %.
- Velocidad de 61.4 rpm.

7.5.4.1 Bolas

Son cuerpos molientes esféricos que se colocan en los molinos, en el cual mediante impacto y fricción se obtiene una reducción del tamaño de grano del producto. Estos están hechos de acero inoxidable o cerámicos etc., en este proyecto se utilizó bolas de acero inoxidable, esto debido que son para el área de alimentos y también son resistentes al desgaste por impacto y fricción (Ver Figura 30).

Cálculo del peso del material moliente bolas



Figura 30: Material moliente Bolas. Fuente: Autores

Con el porcentaje de llenado del 25 % remplazamos en la ecuación (4) y calculamos el valor del peso que soportara el tambor.

$$P_{bolas} = V_m \cdot 0,25 \cdot 0,6 \cdot \delta_{bolas}$$

Cálculo del volumen del tambor

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

$$V_m = \frac{\pi \cdot (0,2)^2}{4} \cdot 0,30$$

$$V_m = 9,424 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

La densidad aparente usada para las bolas es de $4,55 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$ [7].

$$P_{bolas} = V_m \cdot 0,25 \cdot 0,6 \cdot \delta_{bolas}$$

$$P_{bolas} = 9,424 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot 0,25 \cdot 0,6 \cdot 4,55 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

$$P_{bolas} = 6.43188 \times 10^{-3} \text{ ton}$$

$$P_{bolas} = 6.43 \text{ kg}$$

La masa total que se debe colocar en el tambor es de 6,43 kg.

Diámetro máximo del material moliente.

El tamaño de bolas a utilizar es de 31.75 mm y 25.4 mm.

Tamaño y distribución de bolas

Método 1. En función al diámetro de bolas.

En la Tabla 32 se presenta el % de masa que están distribuidos los tamaños de bolas y el número de bolas que se colocaran en el molino.

Tabla 32: Distribución de tamaño de bolas método 1. Fuente: Autores

Diámetros [mm]	% de masa	Masa [kg]	masa unidad [kg]	Cantidad de bolas
31.75	55.55	3.57	0.132	27
25.4	44.44	2.85	0.0671	42
57.15	100%	6.43		69

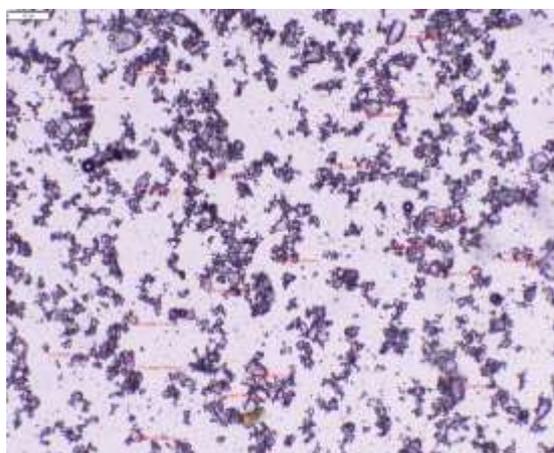
En la Tabla 33, se presenta los resultados de los cinco ensayos realizados a diferentes tiempos de molienda, la medición de los tamaños de partículas se realizó por la técnica de microscopía en el cual se tomó tres muestras de cada ensayo realizado, así mismo se realizó 30 mediciones para cada muestra, esto nos da como resultado los tamaños máximos y mínimos de partícula de lactosa.

También se observa que a mayor tiempo de molienda se tiene mayores pérdidas del producto, esto es debido a la aglomeración del producto en las paredes del molino y en los cuerpos molientes en este caso las bolas.

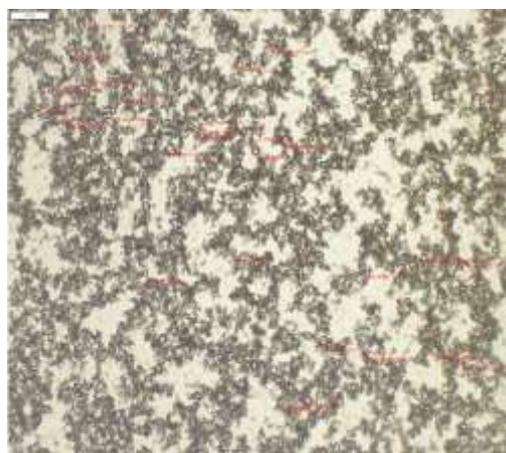
A un tiempo 1h de molienda, se observa la reducción del tamaño de grano del producto y a un tiempo de 5h produce aglomeración en las paredes del molino y en los cuerpos moledores, esto debido al comportamiento de los cuerpos moledores y a la masa del cuerpo moliente, así mismo se obtuvo una buena reducción de tamaño de partícula (Ver Figura 31).

Tabla 33: Resultados obtenidos con material moliente tipo bolas. Fuente: Autores

Ensayo con bolas					
Peso lactosa [g]	Peso Tricalcium Phosphate [g]	Pérdidas [g]	Tiempo Molienda [h]	Tamaño de partícula [um]	
				Máximo	Mínimo
1050	100	100	1	102.6	26.45
		110	2	96.89	19.85
		119	3	85.42	17.25
		150	4	60.07	12.08
		200	5	59.04	6.82



(a)



(b)

Figura 31: Partículas de lactosa molidas; (a) 1h y (b) 5h. Fuente: Autores

7.5.4.2 Cylpebs

Las Cylpebs de molienda son medios de molienda cilíndricos ligeramente cónicos con una longitud igual al diámetro $L = D$ (Ver Figura 32).

Estos están hechos de hierro fundido refrigerado de baja aleación. El metal fundido sale del horno a aproximadamente 1500°C , y se transfiere a una máquina de colada continua donde se crean los Cylpebs del tamaño seleccionado.

Debido a su geometría cilíndrica, estos tienen mayor área superficial y mayor densidad aparente en comparación con las bolas de masa y tamaño similares. Las bombillas cilíndricas de igual diámetro y longitud tienen un 14.5% más de superficie que las bolas de la misma masa, y un 9% más de densidad aparente que las bolas de acero, o un 12% más que las bolas de fundición [20].

Cálculo del peso de los cuerpos molidores cylpebs



Figura 32: Material moliente Cylpebs. Fuente: Autores

Con el porcentaje de llenado del 25 % reemplazamos en la ecuación (4) y calculamos el valor de la masa que soportara el tambor.

$$P_{cilindros} = V_m \cdot 0,25 \cdot 0,6 \cdot \delta_{cilindros}$$

Cálculo del volumen del tambor

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

$$V_m = \frac{\pi \cdot (0,2)^2}{4} \cdot 0,30$$

$$V_m = 9,424 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

La densidad aparente usada para cylpebs es de $4,85 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$ [7].

$$P_{cilindros} = V_m \cdot 0,25 \cdot 0,6 \cdot \delta_{cilindros}$$

$$P_{cilindros} = 9,424 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot 0,25 \cdot 0,6 \cdot 4,85 \frac{\text{ton}}{\text{m}^3}$$

$$P_{cilindros} = 6,855 \times 10^{-3} \text{ ton}$$

$$P_{cilindros} = 6,85 \text{ kg}$$

La masa total que se debe colocar en el tambor es de 6,85 kg.

Diámetro máximo de carga moledora

Los diámetros recomendados para un molino con cylpebs (trozos de acero) son de 10 a 26 mm de diámetro, en los que la longitud más favorable está en el rango $L = D$ o $L = 2D$. Se utiliza cylpebs de 38.1mm, 44.45 mm, 25.4mm, 19.05 mm, 15.875 mm y 13mm [6] [20].

Tamaño y distribución de cylpebs

Con el peso total que se debe colocar en el molino a un llenado del 25% se realiza una distribución óptima para los cuatro distintos tamaños de cylpebs, para esto se utilizó el método en función del diámetro de material moliente.

En la Tabla 34 se presenta el % de Peso que están distribuidos los tamaños de cylpebs y el número de cylpebs que se colocaran en el molino.

Método 1. En función al diámetro de cylpebs.

Tabla 34: Distribución de tamaño de cylpebs método 1. Fuente: Autores

DTC 1						
	Diámetros	Longitud	% de masa	Masa [kg]	masa	Cantidad de
	[mm]	[mm]			unidad [kg]	cylpebs
	38.1	38.1	26.66	1.82	0.262	7
	44.45	44.45	22.22	1.52	0.183	8
	25.4	25.4	17.77	1.21	0.089	14
	19.05	19.05	13.33	0.91	0.051	18
	15.875	15.875	11.11	0.76	0.028	27
	13	13	8.88	0.60	0.020	30
TOTAL	130.475		100%	6.85		104

En la Tabla 35, se presenta los resultados de los cinco ensayos realizados a diferentes tiempos de molienda, la medición de los tamaños de partículas se realiza por la técnica de microscopía en el cual se efectúa 30 mediciones para cada muestra.

En la Figura 33 se observa una diferencia de los tamaños de partícula de lactosa, durante una hora de molienda los tamaños de partícula son gruesos y a las cinco horas de molienda los tamaños de partícula de lactosa son finos.

Tabla 35: Resultados obtenido con material moliente tipo cylpebs. Fuente: Autores

Ensayo con Cylpebs					
Peso lactosa [g]	Peso Tricalcium Phosphate [g]	Perdidas [g]	Tiempo Molienda [h]	Tamaño de partícula [um]	
				Máximo	Mínimo
1050	100	80	1	100.85	15.56
		120	2	92.62	12.23
		132	3	78.45	10.81
		290	4	65.48	9.89
		359	5	54.29	5.78

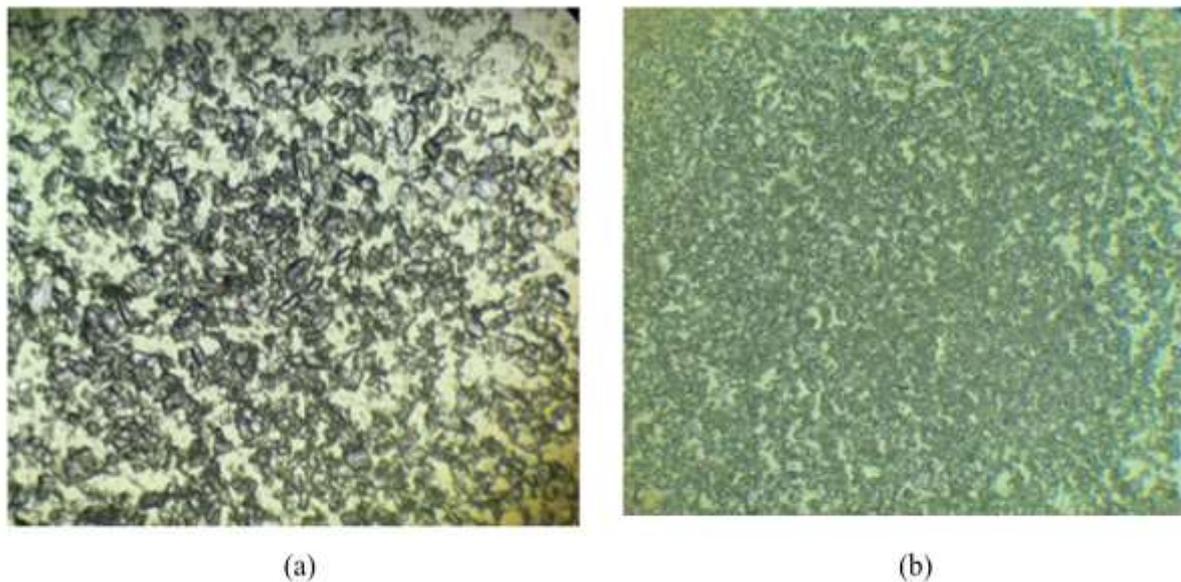


Figura 33: Partículas de lactosa (a) 1h, (b) 5h. Fuente: Autores

En la Figura 34, se puede observar que, con un material moliente tipo bolas se tiene menores pérdidas del producto final, pero presenta tamaños de partículas gruesas. Mientras que los cylpebs produce mayor pérdida, pero se tiene una mejor reducción del tamaño de partículas.

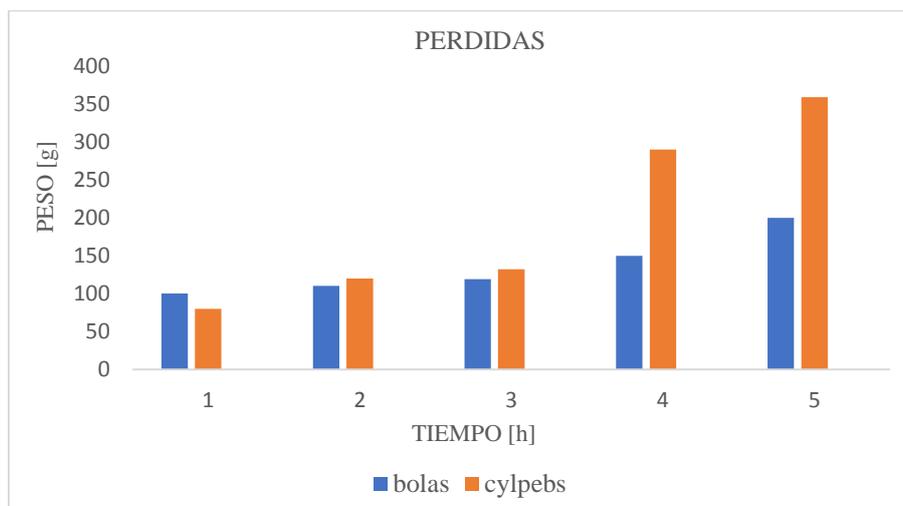


Figura 34: Perdidas del material molido. Fuente: Autor

Para realizar una molienda se utiliza diferentes tipos de material moliente como, bolas, arandelas, cylpebs, barras, etc., para la seleccionar la mejor alternativa para obtener una buena molienda se analiza los dos tipos de material moliente bolas y cylpebs.

Se realiza una ponderación para seleccionar la mejor alternativa, en el cual se evaluará las pérdidas, costos y tamaño de partícula a las cinco horas de molienda.

Pérdidas. - En la Tabla 36 se coloca valores a los niveles mencionados, en el nivel alto se da un valor mínimo de 1 debido a la mayor pérdida del producto durante la molienda y un valor máximo de 5 debido a menor pérdida del producto.

Tabla 36: Valores de pérdidas del producto. Fuente: Autores

Perdidas		
Niveles	Valores	Cantidad
Alto	1	≥ 200 g
Medio	3	150 g
Bajo	5	≤ 50 g

En la Tabla 37 se colocan los resultados de la ponderación que llegan a tener los distintos tipos de material moliente en base al parámetro establecido.

Tabla 37 : Evaluación de las pérdidas del producto. Fuente: Autores.

Perdidas				
Tipo de material moliente	Niveles			Total
	Alto	Medio	Bajo	
Bolas		X		3
Cylpebs	X			1

Tamaño de grano obtenido. - En la Tabla 38 se muestran los valores del tamaño de partícula establecido y ponderado para el análisis.

Tabla 38 : Valores de tamaño de grano obtenido. Fuente: Autores

Tamaño de grano		
Nivel	Valores	Tamaño de partícula
Muy fino	5	≤ 5 μ m
Fino	3	10 - 25 μ m
Grueso	1	$\geq 32\mu$ m

En la Tabla 39 se colocan los resultados de la ponderación que llegan a tener los distintos tipos de material moliente en base al parámetro establecido.

Tabla 39: Evaluación de tamaño de grano. Fuente: Autores.

Tamaño de grano				
Tipo Material Moliente	Niveles			Total
	Muy fino	Fino	Grueso	
Bolas			X	1
Cylpebs		X		3

Costos. - En la Tabla 40 se muestran los valores de los costos establecido y ponderado para el análisis.

Tabla 40: Valores de los costos. Fuente: Autores.

Costos		
Niveles	Valores	Precio [\$]
Alto	1	7347
Medio	3	3000
Bajo	5	300

En la Tabla 41 se presentan las especificaciones y las evaluaciones de los costos para los dos tipos de material moliente.

Tabla 41 : Evaluación de los costos. Fuente: Autores.

Costos				
Tipo de material moliente	Niveles			Total
	Alto	Medio	Bajo	
Bolas	X			1
cylpebs			X	5

Ponderación de resultados

Tabla 42: Ponderación de resultados. Fuente: Autores

Ponderación				
Tipo de material moliente	Perdidas	Tamaño de grano	Costos	Total
Bolas	3	1	1	5
Cylpebs	1	3	5	8

De acuerdo con la ponderación obtenida, el material moliente ideal para realizar nuestra investigación son los cylpebs, ya que cumple con: costo bajo, tamaño de grano fino. También se podría decir que los cylpebs tienen mayor área de superficie para el golpeo al momento de efectuar la molienda, son más eficaces que las bolas para obtener una molienda fina.

7.6 Desarrollo del proceso experimental

El diseño experimental nos permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental. Se manipulan una o más variables independientes para analizar las consecuencias de las variables dependientes [21].

Además, determina la combinación de experimentos que conviene realizar para hacer un mejor estudio de las variables, determinando la influencia de cada función objetivo. En el caso de determinación de experimentos de molienda, para una máxima de relación de variables, nos permite obtener un número necesario de pruebas para determinar los parámetros de operación [21] [22] [23].

7.6.1 Variables a estudiar

Independientes

- Distribución del tamaño de cylpebs
- Velocidad de operación del molino
- Tiempo de molienda

Dependientes

Tamaño de grano

7.6.2 Variación de parámetros

Los parámetros son variados en base de la investigación bibliográfica. En la Tabla 43, se representa las condiciones de operación, distribución de carga de cuerpos molidores, velocidad de giro del molino y tiempo de molienda para la evaluación de razón reducción.

Para evaluar la influencia de las variables independientes se seleccionó el diseño factorial 2^k el cual estudia el efecto de 3 factores experimentales y una respuesta en 8 corridas.

Tabla 43: Variación de Parámetros. Fuente: Autores

Variables	Niveles	
	Inferior	Superior
X1 (Distribución de tamaño de cylpebs)	1	2
X2 (Velocidad de Operación [rpm])	61	70
X3 (Tiempo de molienda en [h])	3	5

Distribución de tamaños de cylpebs “X1”

Para llevar a cabo las pruebas de laboratorio necesarias se prepararon dos diferentes distribuciones de tamaño de cylpebs utilizando seis tamaños diferentes: 38.1 mm, 44.45mm, 25.4mm, 19.05mm, 15.875mm, 13mm.

Las distribuciones de tamaño de cylpebs consideradas para los ensayos presentan las siguientes características:

- a. La primera distribución de tamaño de cylpebs fue empleando el método en función del diámetro de cylpebs nombrada “DTC 1”, (Tabla 44).
- b. La segunda distribución de tamaño de cylpebs fue empleado el segundo método en función del diámetro de cylpebs acorde a la fórmula que propone Bond, nombrada “DTC 2” (Tabla 45).

Método 1. En función al diámetro de cylpebs.

Tabla 44 : Distribución de tamaño de cylpebs método 1. Fuente: Autores

DTC 1						
	Diámetros [in]	Longitud [in]	% de masa	Masa [kg]	Masa unidad [kg]	Cantidad de cylpebs
	38.1	38.1	26.66	1.82	0.262	7
	44.45	44.45	22.22	1.52	0.183	8
	25.4	25.4	17.77	1.21	0.089	14
	19.05	19.05	13.33	0.91	0.051	18
	15.875	15.875	11.11	0.76	0.028	27
	13	13	8.88	0.60	0.020	30
TOTAL	130.475		100%	6.85		104

Método 2. En función al diámetro de cylpebs con la fórmula de Bond.

Remplazando en la ecuación (5) se obtiene:

Tabla 45: Distribución de tamaño de cylpebs método 2. Fuente: Autores

DTC 2						
	Diámetros [in]	Longitud [in]	% de masa	Masa [kg]	Masa unidad [kg]	Cantidad de cylpebs
	38.1	38.1	44.202	3.02	0.262	12
	44.45	44.45	28.478	1.95	0.183	11
	25.4	25.4	16.44	1.126	0.089	13
	19.05	19.05	4.809	0.32	0.051	6
	15.875	15.875	3.101	0.212	0.028	8
	13	13	2.97	0.203	0.020	10
TOTAL			100%	6.85		60

En cada caso, la masa de carga se calculó de 6,85 Kg aproximadamente, para un nivel de llenado de molino del 25 %.

La Figura 35 presenta una comparación de las distribuciones del tamaño de cylpebs empleados en la investigación, donde se puede observar que la DTC1 tiene mayor cantidad de cylpebs con diámetros menores ½ in, mientras que la DTC2 tiene una distribución con mayor cantidad de cylpebs con diámetros mayores 1 in.

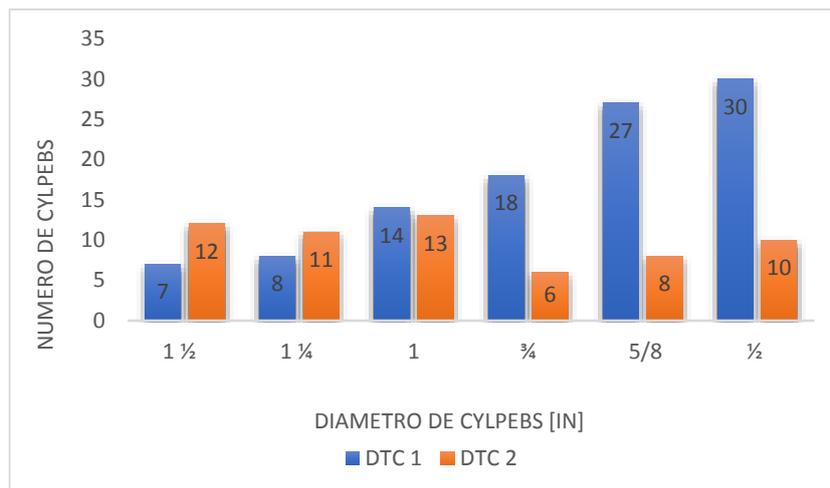


Figura 35: Comparación en número de cylpebs de las distribuciones del tamaño de cylpebs utilizados.

Fuente: Autores

7.6.3 Velocidades de operación del molino X2

La velocidad de operación obtenida anteriormente, se empleó como parámetro para seleccionar las velocidades de trabajo incluidas en el diseño de experimentos, considerando que la velocidad en el molino no debe ser mayor a 85% ni menor al 65% de la velocidad crítica, tomando para nuestro diseño de experimentos dos niveles de velocidades: 61 rpm debido a que es la velocidad mínima a la que el molino puede girar y 70 rpm es la velocidad máxima de salida del motor y esta en dentro del rango del porcentaje recomendado de la velocidad crítica del molino.

7.6.4 Tiempo de molienda X3

Para la selección del tiempo de molienda se realizaron moliendas preliminares manteniendo constante la carga de cuerpos moledores, la alimentación al molino y la velocidad de giro. Se emplearon cinco tiempos diferentes para obtener una distribución de tamaño semejante a la que se desea obtener, esto permite seleccionar los tiempos adecuados para incluir en el diseño de experimentos que fueron de 3 h y 5h.

7.7 Matriz de diseño compuesto

Para evaluar la influencia de las variables del tiempo de molienda, distribución de tamaño de cylpebs y velocidad en la razón de reducción de tamaño, se seleccionó un diseño experimental de dos niveles con tres factores – Diseño factorial 2^k , al cual estudia los efectos de 3 factores experimentales y una respuesta en 8 corridas[24].

Las variables que se mantuvieron constantes en las pruebas de molienda fueron:

- Cantidad de muestra de lactosa de 1,050 kg y 100g de Tricalcium Phosphate.
- Granulometría de la muestra de lactosa (F80).
- Nivel de llenado del molino 25% (6.85 kg de cylpebs).
- Molienda en medio seco.

La matriz del diseño experimental factorial 2^k a escala codificada y natural es mostrada en la Tabla 46.

Tabla 46: Matriz de diseño Factorial 2^3 Completo. Fuente: Autores

ENSAYO	ESCALA CODIFICADA			ESCALA NATURAL		
	X1	X2	X3	X1	X2	X3
1	1	-1	-1	1	61	3
2	-1	-1	-1	2	61	3
3	1	1	-1	1	70	3
4	-1	1	-1	2	70	3
5	1	-1	1	1	61	5
6	-1	-1	1	2	61	5
7	1	1	1	1	70	5
8	-1	1	1	2	70	5

El número de pruebas fue determinado empleando la ecuación de diseño compuesto para un diseño factorial 2^k , dando como resultado 8 corridas. En la Tabla 47 se presentan datos a escala natural.

Tabla 47: Experimentos y Combinaciones. Fuente: Autores

N° de Experimento	Variables		
	X1	X2	X3
	Distribución del tamaño de cypbebs	Velocidad de operación [rpm]	Tiempos de molienda [h]
1	1	61	3
2	2	61	3
3	1	70	3
4	2	70	3
5	1	61	5
6	2	61	5
7	1	70	5
8	2	70	5

7.8 Análisis del diseño factorial 2^k

Los resultados obtenidos, después de realizar los ensayos de molienda, fueron procesados mediante el análisis de varianza ANOVA, utilizando el software libre Minitab 19 y analíticamente, con el cual se determinaron la significancia de los factores experimentales referenciados de acorde a los niveles seleccionados.

7.8.1 Evaluación del tiempo de molienda, distribución de tamaño de cypbebs y velocidad.

Resultados experimentales

En la Tabla 48 se presenta los datos obtenidos de los ocho experimentos de molienda realizados con diferentes combinaciones. Para la medición en el microscopio se toma cuatro muestras de cada experimento, en el cual se realiza 50 mediciones de cada muestra. En la Figura 36 se observa los promedios de las réplicas realizadas en el proceso de molienda de las ocho combinaciones, en el cual el menor tamaño de partícula corresponde al experimento 5 y el mayor tamaño de grano se obtiene en el experimento 1.

Tabla 48: Experimentos y Combinaciones. Fuente: Autores

N° de Experimento	Variables			Mediciones tamaño de partículas			
	X1	X2	X3	Réplicas		Σ	Media Y1
	Distribución del tamaño de cypbebs	Velocidad de operación [rpm]	Tiempos de molienda [h]	I	II		
1	1	61	3	55.05	38.03	93.08	46.54
2	2	61	3	35.77	35.85	71.62	35.81
3	1	70	3	31.22	32.12	63.34	31.17
4	2	70	3	27.22	27.57	54.79	27.395
5	1	61	5	21.19	22.96	44.15	22.075
6	2	61	5	28.55	29.18	57.73	28.865
7	1	70	5	26.16	27.46	53.62	26.815
8	2	70	5	22.39	23.91	46.30	23.15

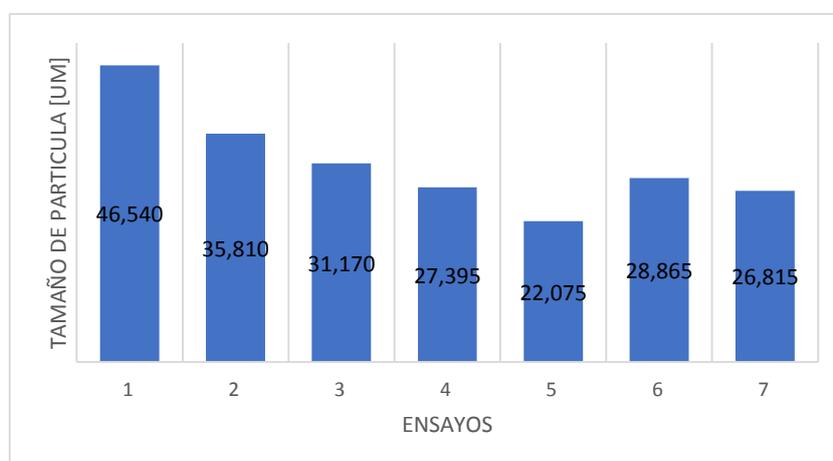


Figura 36. Respuestas obtenidas de tamaño de partícula por microscopia. Fuente: Autores

Cálculo de los efectos

Las estimaciones de cualquier efecto principal o interacción en un diseño 2^k se determina al multiplicar las combinaciones de tratamientos de la primera columna de la tabla de signos del correspondiente efecto principal o columna de interacción, sumando los resultados para obtener un contraste, y dividiendo el contraste por la mitad del número total de réplicas.

Los símbolos (1), a, b, ab, c, ac, bc y abc, representan el total de las réplicas hechas con las combinaciones de los tratamientos[25]. (Ver Tabla 49).

Tabla 49: Matriz codificada para el cálculo de efectos e interacciones. Fuente: Autores

Combinación	X0	X1	X2	X3	X1X	X1X	X2X	X1X2X	Σ
					2	3	3	3	
(1)	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	93.08
a	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	71.62
b	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	63.34
c	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	54.79
ab	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	44.15
ac	1	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	57.73
abc	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	53.62
	1	1	1	1	1	-1	1	1	46.30

Los efectos medios se calculan a partir de los contrastes partidos entre $4n$. Donde n es el número de réplicas realizadas ($n = 2$).

Para la determinación de los contrastes y efectos se aplica las siguientes fórmulas:

$$X1 = \frac{1}{4n} [a - (1) + ab - b + ac - c + abc - bc] \quad (16)$$

$$X2 = \frac{1}{4n} [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac] \quad (17)$$

$$X3 = \frac{1}{4n} [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab] \quad (18)$$

$$X1X2 = \frac{1}{4n} [(1) + ab + c + abc - a - b - ac - bc] \quad (19)$$

$$X1X3 = \frac{1}{4n} [(1) + b + ac + abc - a - ab - c - bc] \quad (20)$$

$$X2X3 = \frac{1}{4n} [(1) + a + bc + abc - b - ab - c - ac] \quad (21)$$

$$X1X2X3 = \frac{1}{4n} [abc + a + b + c - ab - ac - bc - (1)] \quad (22)$$

$$X1 = \frac{1}{4.2} [71.61 - (93.08) + 54.79 - 63.34 + 57.73 - 44.15 + 46.30 - 53.62]$$

$$X1 = \frac{1}{8} \cdot [-23.75]$$

$$X2 = \frac{1}{4.2} [63.34 + 54.79 + 53.62 + 46.30 - (93.08) - 71.62 - 44.15 - 57.73]$$

$$X2 = \frac{1}{8} \cdot [-48.53]$$

$$X3 = \frac{1}{4.2} [44.15 + 57.73 + 53.62 + 46.30 - (93.08) - 71.62 - 63.64 - 54.79]$$

$$X3 = \frac{1}{8} \cdot [-81.03]$$

$$X1X2 = \frac{1}{4.2} [(93.08) + 54.79 + 44.15 + 46.30 - 71.62 - 63.34 - 57.73 - 53.62]$$

$$X1X2 = \frac{1}{8} \cdot [-7.99]$$

$$X1X3 = \frac{1}{4.2} [(93.08) + 63.34 + 57.73 + 46.30 - 71.62 - 54.79 - 44.15 - 53.62]$$

$$X1X3 = \frac{1}{8} \cdot [36.27]$$

$$X2X3 = \frac{1}{4.2} [(93.08) + 71.62 + 53.62 + 46.30 - 63.34 - 54.79 - 44.15 - 57.73]$$

$$X2X3 = \frac{1}{8} \cdot [44.61]$$

$$ABC = \frac{1}{4n} [abc + a + b + c - ab - ac - bc - (1)]$$

$$X1X2X3 = \frac{1}{4.2} [46.30 + 71.62 + 63.34 + 44.15 - 54.79 - 57.73 - 53.62 - (93.08)]$$

$$X1X2X3 = \frac{1}{8} \cdot [-33.81]$$

En la Tabla 50 se presentan los resultados de los cálculos de los efectos estimados con los datos de la suma de las combinaciones de cada tratamiento. Las cantidades entre corchetes en las ecuaciones anteriores se les llaman contrastes, que se utilizan para calcular la suma de cuadrados para los efectos principales X1, X2, X3 y las interacciones X1X2, X1X3, X2X3 y X1X2X3.

Tabla 50: Resultados de los efectos e interacciones. Fuente: Autores

Combinaciones	Contraste	Efecto
X1	-23.75	-2.9687
X2	-48.53	- 6.0662
X3	-81.03	-10.1285
X1X2	-7.99	- 0.9987
X1X3	36.27	4.5337
X2X3	44.61	5.5762
X1X2X3	-33.81	-4.2262

Cálculo de la suma de cuadrados.- La suma de cuadrados atribuible a cada término del modelo. Esta mide el incremento sobre la varianza del error experimental si cada término fuera eliminado por separado del modelo. La suma de cuadrados totales para el error también se incluye, donde:

$$SC_{efecto} = \frac{Contraste^2}{8n} \quad (23)$$

$$SS_{x1} = \frac{(-23.75)^2}{8 * 2}$$

$$SS_{x1} = 35.2539$$

$$SS_{x2} = \frac{(-48.53)^2}{8 * 2}$$

$$SS_{x2} = 147.1975$$

$$SS_{x3} = \frac{(-81.03)^2}{8 * 2}$$

$$SS_{x3} = 410.3663$$

$$SS_{x1x2} = \frac{(-7.99)^2}{8 * 2}$$

$$SS_{x1x2} = 3.9900$$

$$SS_{x1x3} = \frac{(36.27)^2}{8 * 2}$$

$$SS_{x1x3} = 82.2195$$

$$SS_{x2x3} = \frac{(44.61)^2}{8 * 2}$$

$$SS_{x_2x_3} = 124.3782$$

$$SS_{x_1x_2x_3} = \frac{(-33.81)^2}{8 * 2}$$

$$SS_{x_1x_2x_3} = 71.4447$$

Cálculo de SS total

$$SS_T = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{y \dots^2}{4n} \quad (24)$$

$$y_{ijk}^2 = 15703.06$$

$$\frac{y^2}{4n} = 14679.1398$$

$$SS_T = 1023.93$$

Cálculo de SS_{ERROR}

$$SS_{ERROR} = SS_T - SS_{x_1} - SS_{x_2} - SS_{x_3} - SS_{x_1x_2} - SS_{x_1x_3} - SS_{x_2x_3} - SS_{x_1x_2x_3} \quad (25)$$

$$SS_{ERROR} = 149.075$$

El número de grados de libertad de cualquier efecto principal es el número de los niveles del factor menos uno y el número de grados de libertad de una interacción es el producto del número de grados de libertad asociados con los componentes individuales de la interacción [23]. (Ver Anexo 2).

Donde:

$gl_{efectos}$: Grados de libertad de los efectos e interacciones para dichos diseños factoriales a dos niveles: $2 - 1 = 1$

gl_{error} : $2.2.2(2 - 1) = 8$

Cálculo del MS_{efecto} .- El cuadrado medio asociado con cada término, se obtiene de dividir la suma de cuadrados asociadas entre sus grados de libertad. El cuadrado medio del error (MS_{efecto}) estima la varianza del error experimental:

$$MS_{efecto} = \frac{SS_{efectos}}{gl_{efectos}} \quad (26)$$

$$MS_{efecto} X1 = \frac{35.2539}{1}$$

$$MS_{efecto} X1 = 35.2539$$

$$MS_{efecto\ X2} = \frac{147.1975}{1}$$

$$MS_{efecto\ X2} = 147.1975$$

$$MS_{efecto\ X3} = \frac{410.3663}{1}$$

$$MS_{efecto\ X3} = 410.3663$$

$$MS_{efecto\ X1X2} = \frac{3.9900}{1}$$

$$MS_{efecto\ X1X2} = 3.9900$$

$$MS_{efecto\ X1X3} = \frac{82.2195}{1}$$

$$MS_{efecto\ X1X3} = 82.2195$$

$$MS_{efecto\ X2X3} = \frac{124.3782}{1}$$

$$MS_{efecto\ X2X3} = 124.3782$$

$$MS_{efecto\ X1X2X3} = \frac{71.4447}{1}$$

$$MS_{efecto\ X1X2X3} = 71.4447$$

Cálculo del MS_{error}

$$MS_{error} = \frac{SS_{error}}{gl_{error}} \quad (27)$$

$$MS_{error} = \frac{149.075}{8}$$

$$MS_{error} = 18.6343$$

Cálculo del F_0 .- El cociente F es utilizado para determinar la significancia estadística de cada efecto. El cociente F divide el cuadrado medio de un efecto por el cuadrado medio del error:

$$F_0 = \frac{MS_{efecto}}{MS_{error}} \quad (28)$$

$$F_0x1 = \frac{35.2539}{18.6343}$$

$$F_0 x1 = 1.8918$$

$$F_0 x2 = \frac{147.1975}{18.6343}$$

$$F_0 x2 = 7.8992$$

$$F_0 x3 = \frac{410.3663}{18.6343}$$

$$F_0 x3 = 22.0220$$

$$F_0 x1x2 = \frac{3.9900}{18.6343}$$

$$F_0 x1x2 = 0.2141$$

$$F_0 x1x3 = \frac{82.2195}{18.6343}$$

$$F_0 x1x3 = 4.4122$$

$$F_0 x2x3 = \frac{124.3782}{18.6343}$$

$$F_0 x2x3 = 6.6746$$

$$F_0 x1x2x3 = \frac{71.4447}{18.6343}$$

$$F_0 x1x2x3 = 3.8340$$

La Tabla 51 divide la variabilidad de Tamaño de partícula en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, 3 efectos tienen una P- valor menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0%.

Tabla 51: Análisis de Varianza. Fuente: Autores

Fuente de variación	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón – F	Valor – P
X1	35.2539	1	35.2539	1.8918	0.2062
X2	147.1975	1	147.1975	7.8992	0.0228
X3	410.3663	1	410.3663	22.0220	0.0015
X1X2	3.9900	1	3.9900	0.2141	0.6558
X1X3	82.2195	1	82.2195	4.4122	0.06887
X2X3	124.3782	1	124.3782	6.6746	0.03243
X1X2X3	71.4475	1	71.4475	3.8340	0.08591
Error	149.07	8	18.6343		
Error Total	1023.93	15			

R-cuadrada = 85,4409 porciento

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 72,7016 porciento

Error estándar del est. = 4,31675

Error absoluto medio = 1,47312

Estadístico Durbin-Watson = 1,39971 (P=0,2333)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,0553085

Regla de decisión con el P- Valor

P- Valor $> \alpha$: El nivel de significancia α se acepta la hipótesis nula de que todos los parámetros son iguales a cero.

P- Valor $< \alpha$: El nivel de significancia α se rechaza la hipótesis nula, en el cual se aceptaría que dichos parámetros significativamente son distintos de cero.

Se sabe que un efecto de interacción es significativo si cumple la siguiente relación

$$F_0 > F(\alpha, \vartheta_1, \vartheta_2)$$

ϑ_1 : *grados de libertad de los efectos.*

ϑ_2 : *grados de libertad del error.*

Donde F es la distribución de Fisher con ϑ_1 y ϑ_2 grados de libertad $F(\alpha, \vartheta_1, \vartheta_2)$, es el F de las tablas (Anexo 3), siendo el α el nivel de confiabilidad.

El valor de F para $\alpha = 0.05$, $\vartheta_1 = 1$ $\vartheta_2 = 8$ es 5,32.

Por lo tanto X_2, X_3 y X_2X_3 , son significativos.

7.9 Modelo matemático

Una vez determinado los efectos y las influencias que resultan significativas, el siguiente paso es obtener un modelo matemático que represente el proceso, con el diseño factorial a dos niveles.

$$Y = \beta_0 + \beta_2X_2 + \beta_3X_3 + \beta_{23}X_{23} \quad (29)$$

$$\beta_0 = \frac{1}{8n} \sum_i^n Y_i$$

$$\beta_0 = \frac{484.63}{16} = 30.2893$$

$$\beta_2 = \frac{\text{Efecto}}{2}$$

$$\beta_2 = \frac{-6.0662}{2} = -3.0331$$

$$\beta_3 = \frac{-10.1287}{2} = -5.0643$$

$$\beta_{23} = \frac{5.57625}{2} = 2.7881$$

$$Y = 30.2893 - 3.0331X_2 - 5.0643X_3 + 2.7881X_{23}$$

7.10 Análisis gráfico del modelo

Los términos individuales de cada uno de los componentes de los modelos fueron analizados estadísticamente con el objetivo de observar aquellos que afectan significativamente a la respuesta del modelo.

Para ello, se utilizaron los diagramas de Pareto con la finalidad de observar de forma gráfica la significancia de los diferentes términos. De igual forma este tipo de gráfica permite observar la jerarquía en importancia de los diferentes términos que intervienen en el modelo. Este análisis se realizó para cada modelo desarrollado, los cuales se muestran en los apartados siguientes.

7.10.1 Efecto de las variables e Interacciones

La Figura 37 Muestra el diagrama de Pareto con efecto estandarizado para la reducción del tamaño de partícula para la molienda de lactosa.

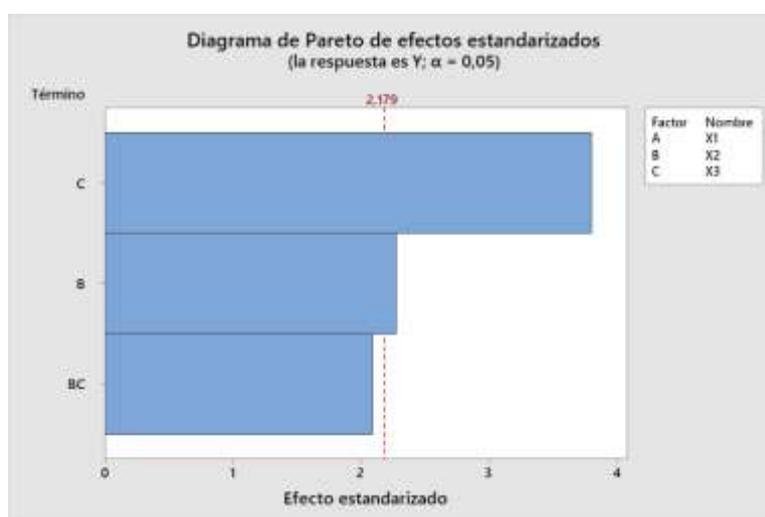


Figura 37: Diagrama de Pareto para la reducción del tamaño de lactosa. Fuente: Autores

En el diagrama de Pareto se llega a la misma conclusión que en el análisis de varianza, debido que los valores significativos son los que sobrepasa la línea de referencia del diagrama.

También se puede observar que el efecto más importante sobre el modelo es debido al término lineal del tiempo de molienda, seguido por los términos lineales velocidad y la interacción también muestra ser significativa la velocidad – tiempo de molienda, ($p < 0.05$).

Las demás interacciones no mostraron ser significativas ($p > 0.05$) para este modelo.

Gráfica de efectos principales

En la Figura 38 se puede observar cómo el tiempo de molienda presenta una pendiente más inclinada en comparación al factor velocidad, esto nos dice que el tiempo de molienda fue el efecto más influyente sobre la obtención de tamaño de grado fino.

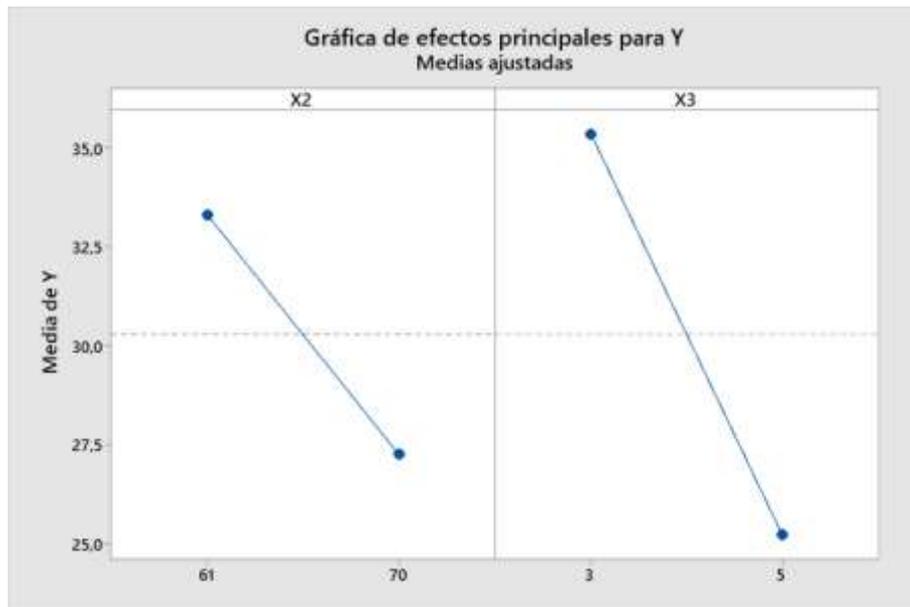


Figura 38: Gráfica de los efectos principales. Fuente: Autores

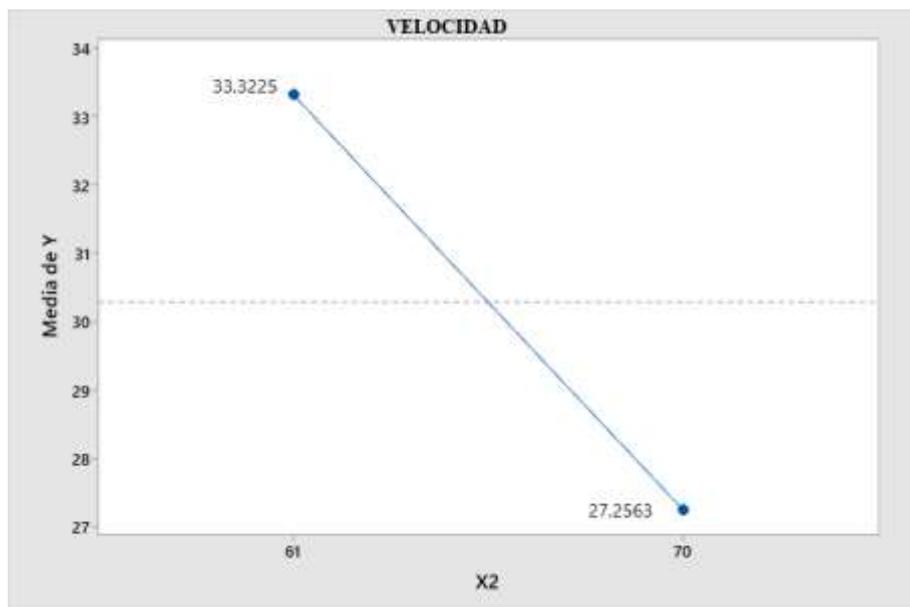


Figura 39: Efecto velocidad. Fuente: Autores

En la Figura 39 se puede observar que el efecto de la velocidad indica que un aumento de sus valores genera una obtención de tamaño de partícula de 27.263 μm .

Mientras que para el factor tiempo de molienda (Figura 40) presenta un efecto positivo señalando que un aumento de sus valores permite obtener un tamaño de partícula de 25.225 μm .

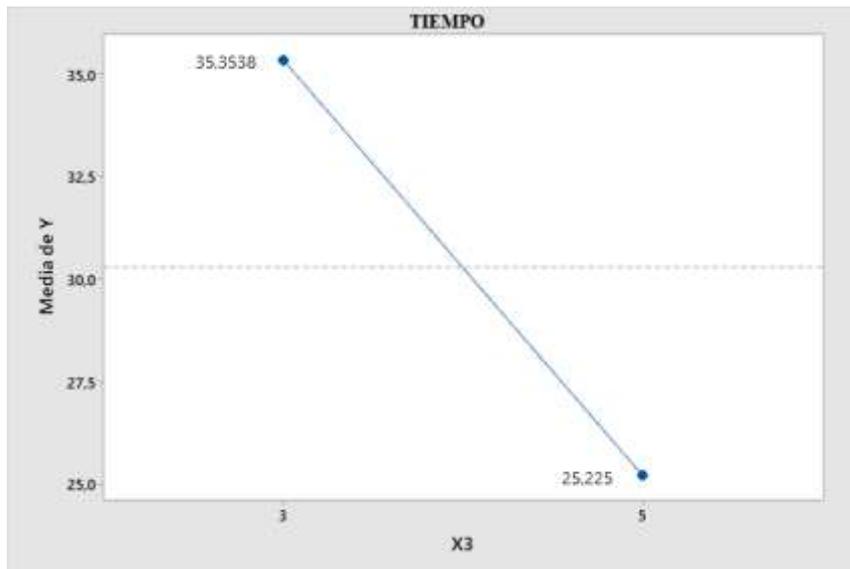


Figura 40: Efecto principal tiempo de molienda. Fuente: Autores

Gráfica de Interacción

En este caso como buscamos reducir el tamaño de partícula relacionada con los efectos de DTC, tiempo y velocidad, en la Figura 41 se ilustra la interacción.

En la Figura 41 se observa el efecto que produce la interacción tiempo de molienda con velocidad, el efecto que produce es la siguiente:

- Nivel bajo de velocidad y nivel alto de tiempo de molienda se obtiene valores de tamaño de grano bajos.
- Nivel bajo de velocidad y nivel bajo de tiempo de molienda se obtiene valores de tamaño de grano altos.
- Nivel alto de velocidad y nivel alto de tiempo de molienda se obtiene valores de tamaño de grano bajos.
- Nivel alto de velocidad y nivel bajo de tiempo de molienda se obtiene valores de tamaño de grano intermedios.

Al variar la velocidad de 61 rpm a 70 rpm no existe mayor variación, esto quiere decir que al incrementar la velocidad no tiene mayor efecto al momento de la molienda, por lo tanto se puede trabajar con ambas velocidades.

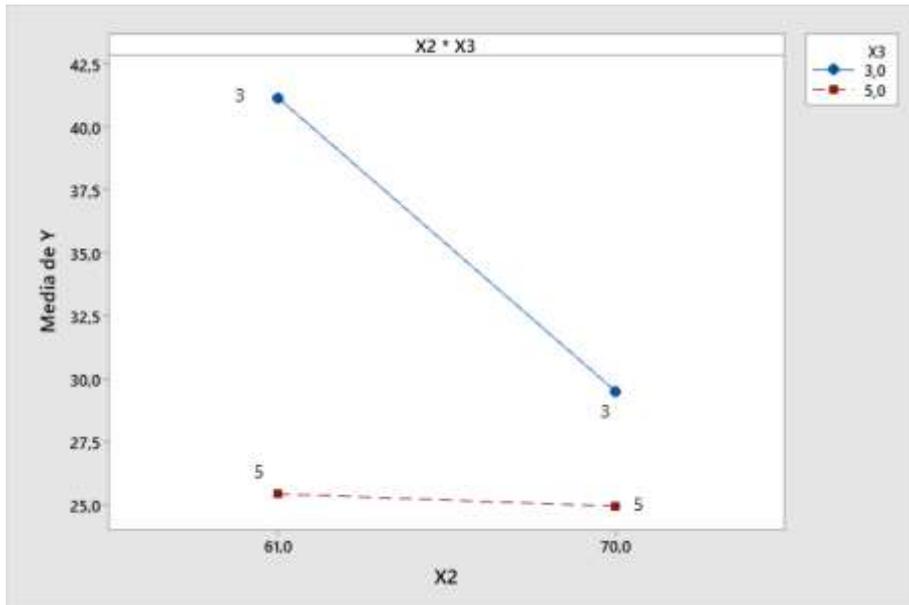


Figura 41: Interacción Velocidad*Tiempo de molienda. Fuente: Autores

Grafica de superficie de respuestas

La Figura 42 muestra la gráfica de superficie de respuestas estimada entre los factores velocidad y tiempo para Y el tamaño de partícula. En el cual el punto óptimo sobre el tamaño de partícula se da cuando la velocidad esta a un nivel alto y el tiempo de molienda en el nivel alto obteniendo valores de una Y de tamaño de partícula mínimos.

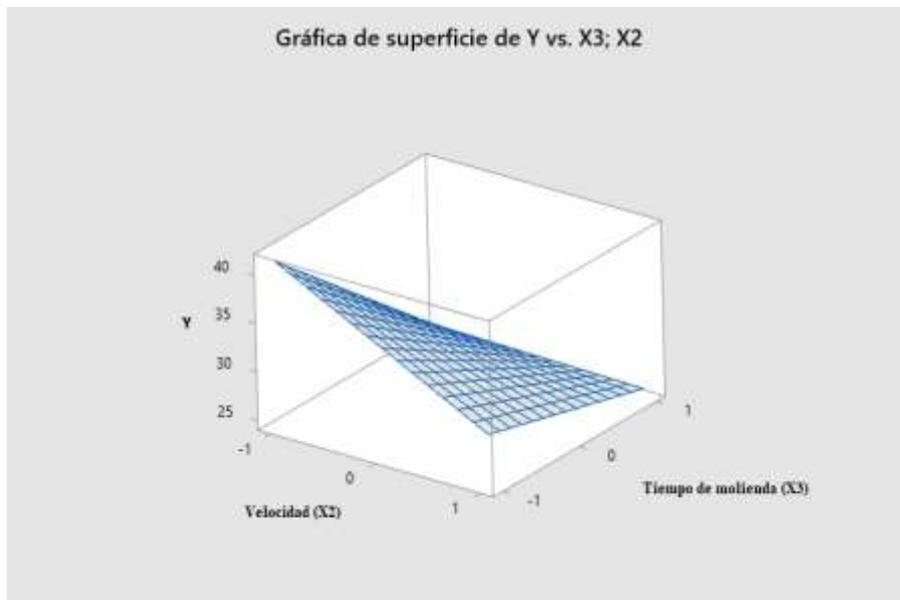


Figura 42: Gráfica de superficie de respuesta Estimada de Y tamaño de partícula. Fuente: Autores

Gráfica de contorno de la superficie de respuesta estimada

La gráfica 43 muestra la gráfica de contornos de superficie de respuestas estimada para Y tamaño de partícula se observa la relación de los factores, velocidad y tiempo ajustados en la ecuación del modelo, en el cual para obtener una Y mínima se tiene un tiempo a un nivel alto y a una velocidad de nivel alto.

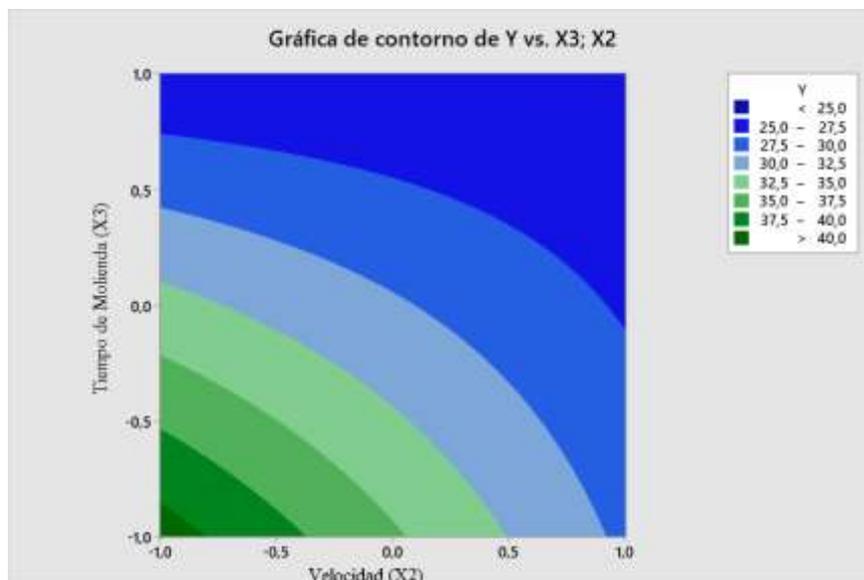


Figura 43: Gráfica de contorno para Y tamaño de partícula. Fuente: Autores

7.11 Modelo de regresión

En base a los resultados obtenidos a partir del ANOVA y de los diagramas de Pareto correspondientes a cada una de las variables de respuesta, se puede observar cómo la reducción de tamaño de partícula puede ser ajustada mediante un modelo. En la Tabla 52 se presentan los valores de los coeficientes estimados para cada variable y para cada interacción entre ellas, con el cual se construye la ecuación de regresión para el tamaño de grano de lactosa que mejor se ajusta a los datos, esta ecuación ayuda a comprender como el valor de tamaño de grano de lactosa cambia en función a los factores, Tiempo y velocidad.

Tabla 52: Coeficientes de regresión. Fuente: Autores

Termino	Coefficientes
Constante	30.29
X1: DTC	-1.48
X2: Velocidad	-3.03
X3: Tiempo de molienda	-5.06
X1X2	-0.50
X1X3	2.27
X2X3	2.79
X1X2X3	-2.11

A partir de la Tabla 52 se construye la ecuación de regresión para el tamaño de grano de lactosa que se ajusta a los datos, esta ecuación ayuda a comprender como el valor Y del tamaño de grano de lactosa cambia en función de los factores DTC, velocidad y tiempo.

Así la ecuación matemática estimada para la reducción de tamaño de partícula se muestra a continuación:

$$Y = 30.2893 - 3.0331X_2 - 5.0643X_3 + 2.7881X_{23}$$

Tabla 53: Resultados de los valores observados y predichos. Fuente: Autores

N° Experimentos	Valores		
	Observados	Predichos	Residuos
1	55.05	41.1750	13.8750
2	35.77	41.1750	-5.4050
3	31.22	29.5325	1.6875
4	27.22	29.5325	-2.3125
5	21.19	25.4700	-4.2800
6	28.55	25.4700	3.0800
7	26.16	24.9800	1.1800
8	22.39	24.9800	-2.5900
9	38.03	41.1750	-3.1450
10	35.85	41.1750	-5.3250
11	32.12	29.5325	2.5875
12	27.57	29.5325	-1.625
13	22.96	25.4700	-2.5100
14	29.18	25.4700	3.7100
15	27.46	24.9800	2.4800
16	23.91	24.9800	-1.0700

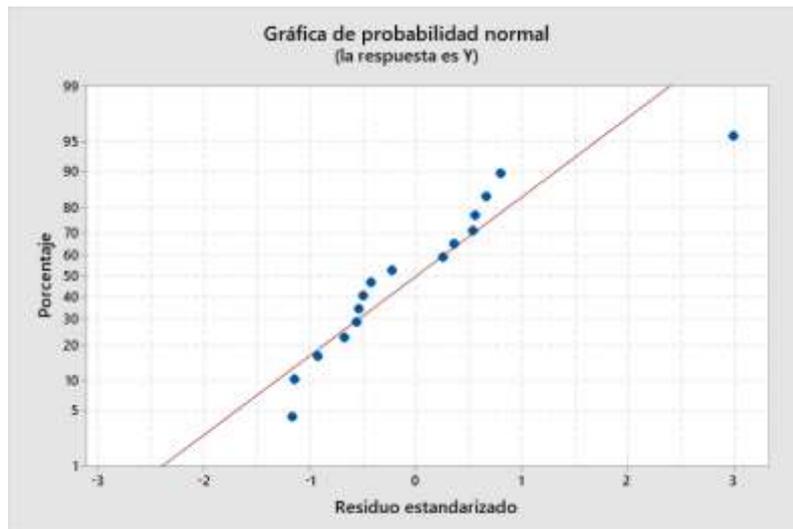


Figura 44: Probabilidad Normal de los residuos. Fuente: Autores

En la Figura 44 se observa que los valores se distribuyen de manera aleatoria por arriba y debajo de la línea central indicando que son independientes de la respuesta.

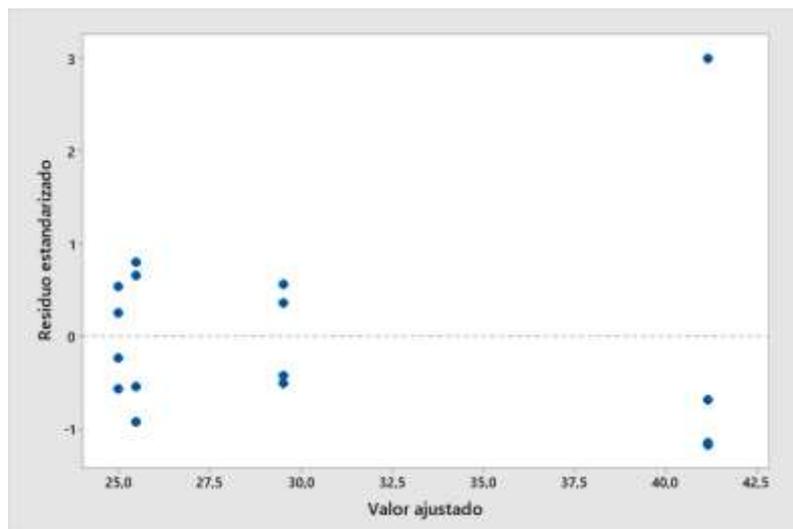


Figura 45: Residuos vs Y estimada. Fuente: Autores

En la Figura 45 se observa que los datos son aleatorios, se encuentran cerca de la línea de regresión, esto indica que los valores se distribuyen en forma normal y el modelo es válido.

8. Resultados y discusión

Uno de los factores que se establecen para el mejoramiento del proceso de molienda de lactosa, es el material moliente, en este caso se propone utilizar cylpebs (cilindros de acero inoxidable) (Figura 32), debido que este material tiene una mayor área de superficie para reducir el tamaño de partícula de lactosa mediante impacto, permitiendo obtener una mayor cantidad de partículas finas en menor tiempo.

Para que la molienda sea efectiva se debe controlar los parámetros de operación como el tiempo, velocidad y la distribución de tamaño de cylpebs. Estos parámetros mejorados se presentan en la Tabla 54.

Tabla 54: Parámetros de operación mejorados. Fuente: Autor

	Empresa	Propuesta de mejora
% Volumen de carga	12	25
Velocidad [rpm]	61	70
Tiempo de Molienda [h]	48	5
material moliente	Arandelas	cylpebs
Peso material moliente [Kg]	3,17	6,85
Número de material moliente	40	104
Tamaño de partícula [um]	40.23	24.9

Durante los ensayos de molienda realizados se observó que cuando se aumentó la proporción de cylpebs grandes en la carga del molino, es decir cuando se aplicó una distribución de tamaño de cylpebs con el método de Bond, las microfotografías presentan menor existencia de tamaño de partículas gruesas y menor cantidad de partículas finas, en comparación que cuando empleamos la distribución de tamaño de cylpebs que presentan menor proporción de cylpebs grandes.

Por otro lado se pudo observar que cuando se aumentó la proporción de cylpebs pequeños en la carga del molino, es decir cuando se aplicó la distribución de tamaño de cylpebs con el método en función de los diámetros de cylpebs, las microfotografías presentan mayor cantidad de partículas finas.

Estos cuerpos molientes indican que los medios de molienda más grandes ofrecen una mayor probabilidad de rotura por impacto, pero menos rotura por abrasión. Tal mecanismo de rotura conducirá a una rápida desaparición de partículas más gruesas y evitaría la presencia de una mayor cantidad de partículas finas. Mientras que los medios de molienda más pequeños ofrecen menor probabilidad de rotura por impacto pero más por abrasión. Conduciendo a una lenta desaparición de las partículas más gruesas con mayor presencia de partículas finas.

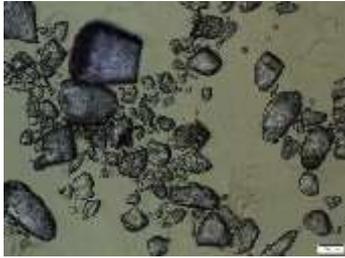
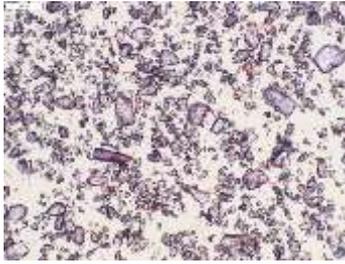
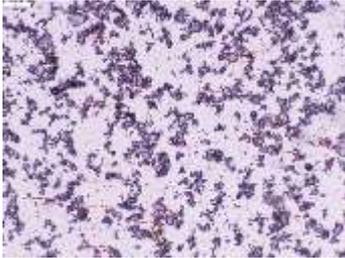
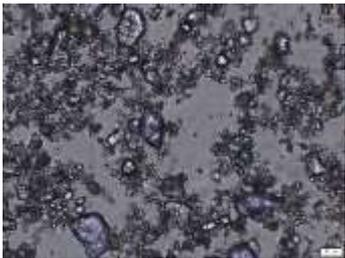
Así mismo se observó que para un tiempo de molienda de 3h, cuando se aumentó la velocidad a 70 rpm, no se obtiene una buena reducción del tamaño de grano de lactosa, dando como resultado mayor cantidad de partículas gruesas. Mientras que al aumentar el tiempo de molienda a 5h y manteniendo la velocidad se obtiene una mayor cantidad de partículas finas.

Mediante el diseño factorial 2^3 se pudo observar que el factor tiempo es el que más influye en el proceso de molienda, seguido del factor velocidad. Al realizar el método de superficie de respuesta se obtuvo el valor más bajo del tamaño de grano de lactosa con la configuración: DTC de nivel bajo, tiempo de nivel alto y velocidad de nivel alto. Además se obtuvo la ecuación de regresión para el tamaño de grano de lactosa en función de los factores estudiados.

Se realizaron visualizaciones en el microscopio óptico de las diferentes situaciones de molienda como son: molienda con arandelas, bolas, cylpebs. Con la finalidad de analizar las diferentes reducciones de partícula de lactosa. En la tabla 55 se presenta microfotografías a diferentes aumentos: 4x, 10x, 20x, 40x. Se toma como referencia a la materia prima sin moler (lactosa) para distinguir los cambios de tamaños de grano con las otras moliendas, a continuación, se enlistan los detalles:

- La molienda con arandelas presenta tamaños de partículas de lactosa heterogéneas, la misma que no es eficiente para ser aplicada en la producción de la leche condensada dando como resultado una calidad con bajas características organolépticas.
- La molienda con bolas presenta mayor cantidad de tamaños de partículas finas, pero al aplicar el proceso se obtiene gran pérdida por aglomerar la lactosa en el tambor. Además, la adquisición de este material moliente es costoso (ver anexo 5) por lo que no es factible la implementación del mismo.
- La molienda con cylpebs presentan notablemente mayor homogeneidad de partículas. Implementar estos elementos molientes son factibles porque son mecanizados resultan económicos. Además, de ser efectivos en tiempo de molienda y no dan gran porcentaje de pérdida de lactosa en el tambor.

Tabla 55: Microscopia Optica de las diferentes situaciones de molienda de lactosa. Fuente: Autores

		Microfotografias		
Situacion de Molienda	4x		10x	
	Sin Moler			
Arandelas	10x		20x	
	Bolas	10x		20x
Cylpebs	4x		20x	
		40x		

En la Figura 46 se puede observar que la leche condensada no presenta buena calidad aplicando la lactosa molida con material moliente de tipo arandelas, en el cual no se obtiene una buena textura del producto final debido que el tamaño de partícula de la lactosa no es lo suficiente fino para mejorar la textura final del producto.



Figura 46: Textura de la leche condensada con ingrediente lactosa molida con arandelas. Fuente: Autores

En la figura 47 se presenta la microfotografía de la textura final de la leche condensada, empleando la lactosa molida con cylpebs, en el cual se obtiene una buena textura en el producto con cristales más finos y homogéneos.

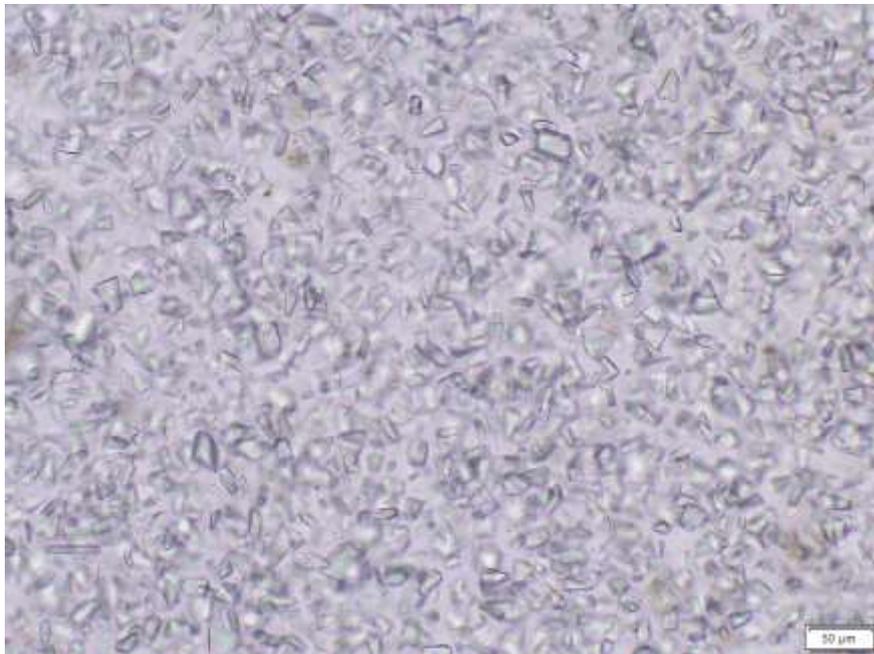


Figura 47: Textura de la leche condensada con ingrediente lactosa molida con Cylpebs a 20x. Fuente: Autores

9. Costos generados en la investigación

Talento humano

Se planifico un semestre para el proyecto, incluye tomar en cuenta todos los gastos necesarios como los recursos generales para el desarrollo. En la Tabla 56 se indica las horas por día que se trabajara para el desarrollo y el costo total del talento humano.

Tabla 56: Tiempo y costos del talento Humano en un semestre. Fuente: Autores

	Horas/días	Horas/semana	Hora/mes	Semestre	costo por hora [\\$]	Costo semestral/resista
Darío	4	20	80	480	3,00	1.440,00
Lingual						
Víctor	4	20	80	480	3,00	1.440,00
Lojano						
					Costo total	2.880,00

En la Tabla 57 se detalla los requerimientos de los recursos generales básicos incluyendo el precio de cada uno de ellos.

Tabla 57: Costos de recursos generales. Fuente: Autores

	Costo/mes	Semestre	Costo total
Internet	28	1	168
Transporte	50	1	300
Varios	120	1	720
		Total	1188

Costo del consumo de energía electica de operación anterior de la molienda

Anteriormente se definió el tiempo de operación del molino en la identificación de los parámetros iniciales de las condiciones de operación (Ver Tabla 8). Este equipo opera 48 horas seguidas por cada molienda.

$$\text{Potencia del motor} = 1 \text{ hp} = 0.7457 \text{ kW}$$

$$\text{Costo kWh} = \$ 0.1$$

La Tabla 58 se proyectó el costo por semana, mes y año, del consumo de energía eléctrica debido a que todas las semanas se debe realizar la molienda de lactosa para abastecimiento en las otras plantas de empresas lácteas.

Tabla 58: Costo anual del consumo de energía electica del molino. Fuente: Autores

	Semanal	Mensual	Anual
--	---------	---------	-------

Tiempo operación [h]	48	192	2304
Potencia [kWh]	35,79	143,17	1718,09
Costo kWh [\$]	3,34	13,36	160,30

9.1 Costo de propuesta de mejora

En la selección del material moliente más factible resultaron los Cylpebs. Por lo tanto, se considera mecanizar y mediante el análisis de precios unitarios se determina el costo total de los 210 Cylpebs de diferentes dimensiones (Ver Tabla 59).

Tabla 59: Análisis de precios unitarios Cylpebs. Fuente: Autores

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS				
Nombre del oferente	Empresa lácteas			
Proyecto	Propuesta de mejora del proceso de molienda de lactosa			
Descripción	Cylpebs			
Equipo y herramienta				
Descripción	Cantidad	Tarifa hora	Rendimiento hora/u	Costo total
cylpebs				
Herramienta menor	1			
Torno	100	6,00	0,3	180,00
Cortadora	100	5,00	0,1	50,00
			Subtotal	230,00
Materiales				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio/u	Costo total
Eje acero inoxidable 1 1/2 pulgada	m	1	55,52	55,52
Eje acero inoxidable 1 1/4 pulgada	m	1	35,50	35,5
Eje acero inoxidable 1 pulgada	m	1	23,63	23,63
Eje acero inoxidable 3/4 pulgada	m	1	11,32	11,32
Eje acero inoxidable 5/8 pulgada	m	1	8,00	8,00
Eje acero inoxidable 1/2 pulgada	m	1	6,000	6,00
			Subtotal	139,97
Transporte				
Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/u	Costo total
Trasporte de ejes para corte	u	1	5,00	5,00
Trasporte para mecanizado	u	1	5,00	5,00
			Subtotal	10,00
Mano de obra				
Descripción	Cantidad	S.R.H	Cantidad/horas	Costo total

Tornero	2	3,22	20	128,8
			Subtotal	128,8
Total costos directos			368,80	
Indirectos y utilidad			20%	73,76
Valor propuesto			442,56	

9.2 Costo anual de operación con propuesta de mejora

Con la propuesta obtenida en el diseño experimental, el tiempo de operación disminuyó 89.6 % equivalente a 6 horas, por lo tanto, influye en consumo de energía eléctrica proyectada al año (Ver Tabla 60).

Tabla 60: Consumo anual de energía eléctrica con propuesta de mejora. Fuente: Autores

	Semanal	Mes	Anual
Carga de lactosa [kg]	1,050	4,200	50,400
Tiempo operación [h]	5	20	240
Costo de lactosa [\$]	12,6	50,4	604,8
potencia kWh	4,47	17,89	214,76
costo kWh	0,37	1,49	17.90

9.3 Valoración de la inversión

En la Tabla 61 se presenta el total de la inversión. Siendo este costo considera en un lapso de 6 meses con trabajo diario de 4 horas.

Tabla 61. Valor total de la inversión. Fuente: Autores

	Costo
Talento humano	2880,00
Recursos generales	1188,00
Mecanizado Cylpebs	442,56
TOTAL	\$ 4576,56

Análisis del beneficio de la propuesta de mejora

Con los datos obtenidos de los costos. En la Figura 48 se puede observar que en la situación inicial de la empresa el consumo de lactosa al año llegaba a valores en el orden de los 120 kg; luego de la intervención realizada se proyecta un consumo de 50,4 kg, representando un ahorro del 58%.

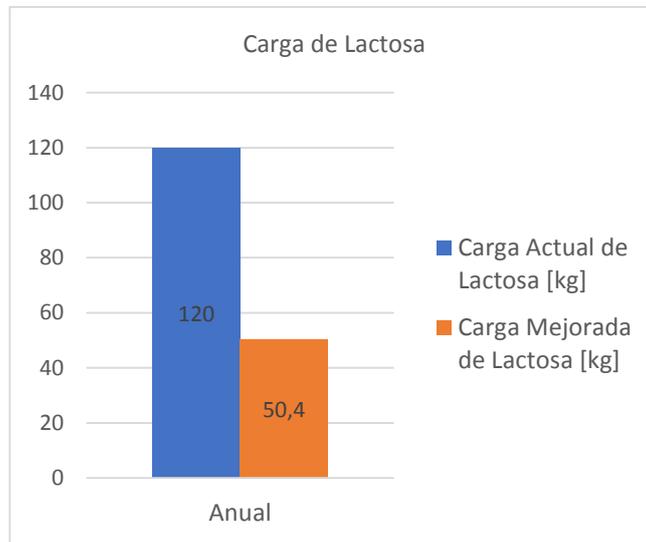


Figura 48: Carga anual de la lactosa Fuente: Autores

- En la Figura 49 inicialmente el tiempo de operación de molienda anual llegaba a valores de 2304 horas; luego de la intervención realizada se proyecta 240 horas al año, representando un ahorro del 89.6 %.

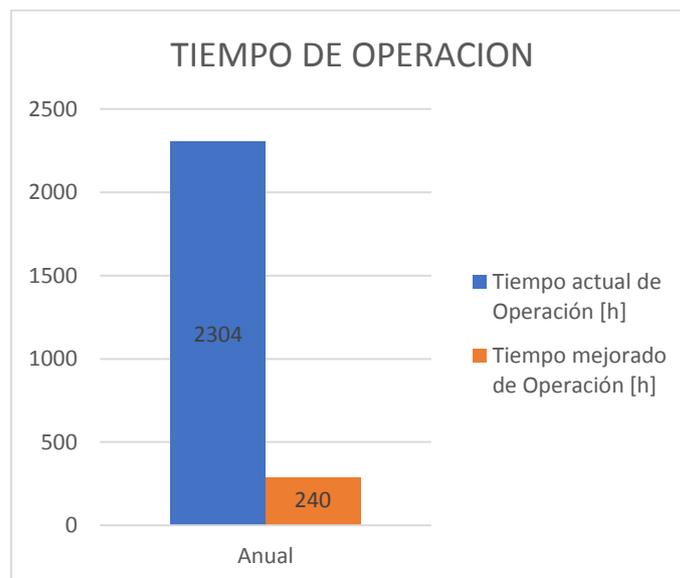


Figura 49: Tiempo de operación anual. Fuente: Autores

- En la Figura 50 anteriormente el costo del consumo anual de lactosa era \$1440,00, ahora con la propuesta de mejora se proyecta un costo de \$ 604,80, esto representaría un ahorro del 58%

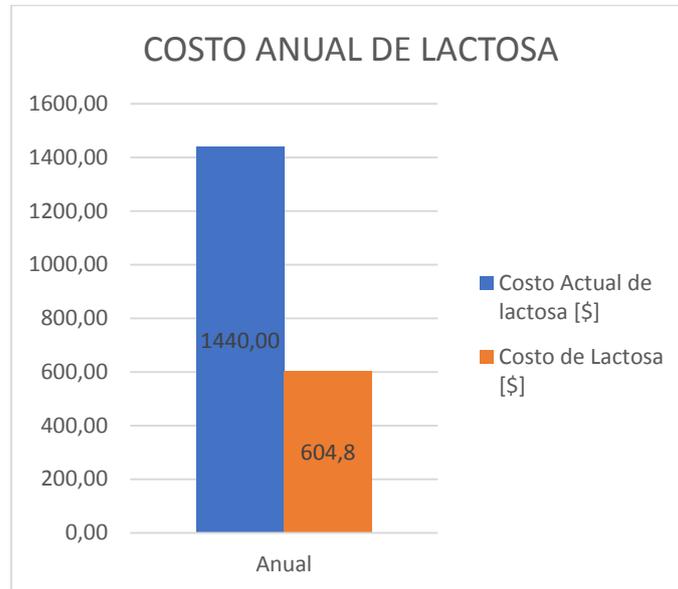


Figura 50: Costo anual de lactosa. Fuente: Autores

- En la figura 51 se produce un ahorro proyectado del costo anual de consumo energía desde los \$171,81 a \$21,48; representando un ahorro del 58%.

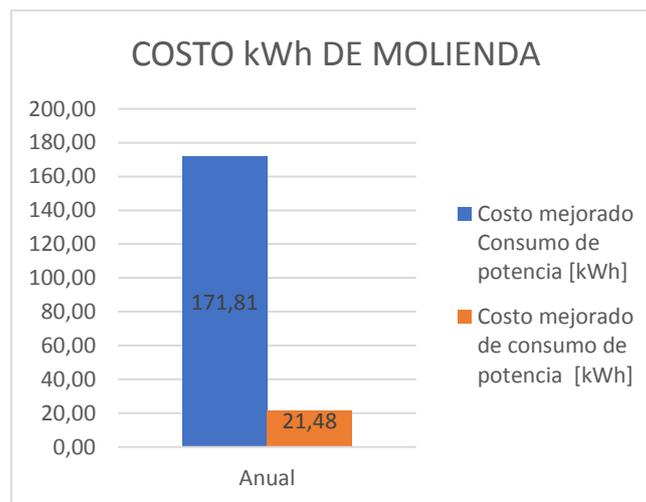


Figura 51: Costo anual del consumo de energía eléctrica. Fuente: Autores

10. Conclusiones y Recomendaciones

10.1 Conclusiones

Las variables identificadas que influyen en el proceso de molienda de lactosa son: distribución de tamaño de material moliente, tiempos de molienda y velocidad, las mismas que implican en el tamaño de grano de lactosa. Mediante las pruebas de molienda efectuadas en el molino de tambor se logró determinar los parámetros óptimos de operación. En consecuencia, se seleccionó los cylpebs como material moliente más eficaz para el proceso de molienda en productos finos.

Mediante el análisis estadístico se realizó un diseño factorial 2^3 , y se aplicó el método de superficie de respuesta para analizar estadísticamente los resultados, en el cual los valores más bajos de tamaño de grano de lactosa se consiguieron a: DTC bajo, tiempo alto y velocidad alta. También mediante la superficie de respuesta se obtuvo la ecuación de regresión lineal $Y = 30.2893 - 3.0331X_2 - 5.0643X_3 + 2.7881X_{23}$ para el tamaño de grano de lactosa en función a los parámetros estudiados; resultando que el tiempo de molienda (X_3) es el efecto más influyente en el proceso de molienda para la obtención del tamaño de grado fino.

La selección de los Cylpebs como elementos molientes, es debido que presentan una mayor área de superficie para la rotura de las partículas de lactosa mediante impacto, en el cual resulta tener una molienda más efectiva, en menor tiempo con mayor cantidad de partículas finas. Estos cuerpos molientes ayudaron a mejorar los parámetros de molienda con una distribución de tamaño de cylpebs 1 (X_1), un tiempo de molienda de 5h (X_3) y a una velocidad de operación de 70 rpm (X_2) obteniendo como resultado tamaño de grano de 24.9 μm .

Los costos generados para la propuesta alcanzaron un total de \$ 4510, incluyendo talento humano y la implementación de los elementos molientes Cylpebs. En consecuencia, se determinó los beneficios que implica la mejora del proceso de molienda que notablemente se logró optimizar los parámetros. Primeramente, el tiempo de operación se redujo de 2304 horas a 240 horas anuales de operación dando como ahorro \$ 140.27. Segundo se optimiza la carga de lactosa aplicada a la molienda anual disminuyendo de 120 kg a 50,4 kg. Finalmente se determina de manera cualitativa la mejora en la textura de la leche condensada.

10.2 Recomendaciones

Evitar la formación de cristales grandes, en base a lo investigado son otros factores que influyen en la formación del tamaño de los cristales de la leche condensada es decir, la metodología del control de enfriamiento que deberá garantizar formación de cristales de menor tamaño.

Almacenar el saco lactosa, mismo deberá conservarse en un área que se mantenga no menos de una temperatura ambiente de 24 ° C, para evitar aglomeración de la lactosa y así conservar las características del tamaño con respecto al certificado de análisis.

Respetar los nuevos parámetros establecidos de molienda los mismos que garantizaran homogenizar el mayor porcentaje de la muestra requerida.

Mejorar diseño del molino para facilitar la colocación de la materia prima, cylpebs; así como mejorar la limpieza del molino y elementos. Se debe mejorar el diseño de la tapa del molino, con esto se evitaría mayor pérdida del producto final.

Calificar o categorizar la nueva calidad del producto con la reducción del tamaño de particular de lactosa.

Verificar antes de cada molienda la calidad de los cylpebs, puede surgir el caso de agrietamiento de este elemento y por consecuencia contaminaría la muestra.

Realizar un tamizado con malla fina para homogenizar las partículas de lactosa previa a la esterilización del producto para garantizar una muestra más homogénea en sus tamaños de partícula.

11. Referencias Bibliográficas

- [1] M. A. Cárdenas Mosquera y M. P. Tacuri Coronel, «Diseño y construcción de un molino para extraer aceite del fruto morete», B.S. thesis, 2011.
- [2] E. A. Cabezas Casco, «Diseño y construcción de un molino de bolas para aplicaciones de pulvimetalurgia en los Laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato», B.S. thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica ..., 2017.
- [3] J. Alcántara, «Diseño Práctico de un Molino de Bolas», (Tesis para obtener el Título de Ingeniero Mecánico), Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 2008.
- [4] O. A. Gutiérrez Gutiérrez, «Estudio Para Calibración De Molinos», 2011.
- [5] A. Peralta, M. Sebastián, y D. J. Sacoto Rivera, «Evaluación experimental del proceso de molienda de crudo de UCEM planta industrial Guapán», B.S. thesis, Universidad del Azuay, 2017.
- [6] W. H. Duda, *Manual tecnológico del cemento*. Reverte, 1977.
- [7] R. C. Rowe, P. Sheskey, y M. Quinn, *Handbook of pharmaceutical excipients*. Libros Digitales-Pharmaceutical Press, 2009.
- [8] M. de Industrias Lácteas, «Tetra Pak Processing Systems AB (1996)», *Madr. Vicente Ediciones Madr. Esp.*
- [9] C. D. Char, «HACCP, Microbiología predictiva y factores en combinación para mejorar la calidad de productos lácteos : dulce de leche : aplicación del concepto de factores en combinación y de la microbiología predictiva en el mejoramiento de la calidad del Dulce de Leche», Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, 2003.
- [10] S. Badui Dergal, *Química de los alimentos*. México, Pearson Educación, 2016.
- [11] B. A. Wills, «Tecnología de procesamiento de minerales», *Editor. Limusa*, 1987.
- [12] A. Jillavenkatesa, S. J. Dapkunas, y L.-S. H. Lum, *Particle size characterization*, vol. 960. National Institute of Standards and Technology Washington, DC, 2001.
- [13] R. L. Earle, «Ingeniería de los alimentos. Editorial Acribia», *Zaragoza Esp.*, 1997.
- [14] E. J. M. Montes, R. T. Gallo, y R. D. A. Pizarro, «Determinación de los Factores de Forma de Área (a) y Volumen (V), de Cristales de α -Lactosa Utilizando Microscopía Óptica», *Temas Agrar.*, vol. 13, n.º 2, pp. 17–24, 2008.
- [15] D. M. Caramés, S. Cabrera, y R. Irigaray, «Estudio comparativo de la determinación del tamaño de partícula por dos métodos : tamizado en seco y difracción láser», *INNOTEC*, n.º 5 ene-dic, pp. 23-28, 2010.
- [16] F. T. V. Guaricela, «Elaboración de guías de prácticas de procesos metalúrgicos para el laboratorio de minas de la Universidad del Azuay», Universidad del Azuay.
- [17] P. Ramirez y D. Velez, «Activación superficial de fibras de bambú mediante técnica termo-mecánica y plasma frío a baja presión», Universidad Politecnica Saliesiana, 2019.
- [18] W. O. S. Hurtado, R. Benenaula, J. Marcos, y N. G. Jara, «Diseño y construcción de un homogeneizador por inmersión de alto cizallamiento, para la empresa FORMALAB», B.S. thesis, Universidad Politecnica Saliesiana, 2016.
- [19] P. Muhayimana, «Process Optimization of a Small Scale BallMill for Mineral Processing using Discrete Element Method», PhD Thesis, JKUAT-COETEC, 2019.
- [20] «Grinding Cylpebs», *911Metallurgist*. [En línea]. Disponible en: <https://www.911metallurgist.com/equipment/grinding-cylpebs/>. [Accedido: 17-sep-2019].
- [21] N. Portocarrero y C. Pastor, «Diseño, Construcción Y Determinación De Los Parámetros De Operación De Un Molino De Bolas Para El Laboratorio Metalurgico De La Escuela Profesional De Ingeniería Química», PhD Thesis, TESIS. Arequipa-Perú, 2010.

- [22] Z. Ferrofin y D. Martin, «Evaluación de la influencia de las variables en la distribución granulométrica del producto de molienda por bolas de minerales mediante diseños experimentales», 2017.
- [23] D. Montgomery, «Diseño y análisis de experimentos: Limusa, SA Segunda edición: México DF», 2004.
- [24] A. B. V. Andino, «INGENIERA EN ESTADÍSTICA INFORMÁTICA», Escuela Superior Técnica del Chimborazo, 2012.
- [25] Douglas C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, Eight Edition. 2013.

ANEXOS

Anexo 1. Certificado de análisis de lactosa

818 kcal

DVA
GO FURTHER. TOGETHER

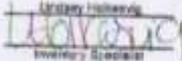
CERTIFICATE OF ANALYSIS

Product Name: 102171 Lactose 80-100 Mesh 25kg
Lot/Batch Number: NPE301C1 **Pallet Numbers:** 1-15
Certificate Print Date: 01/23/2018
Quantity: 720 Bags

Test Name	Result	Reporting Unit	Acceptance Criteria	Reference to the Test Method
Color	0.5	g/l	0 to 2.0	Manual Check
Flavor	Pass		PASS	Organoleptic
Lactose	89.44	%	88.0 min.	Calculation
As is Protein	0.06	%	0.30 max.	OF 193.2002
Ash	0.06	%	0.30 max.	AOAC 930.36
Moisture	0.4	%	0.20 max.	AOAC 931.05
pH	7.1		4.5 to 7.8	ISO 19044 42004
Scorched Particles	<7.5	mg/50g	15.0 max.	AOAC
Aerobic Plate Count	<200	CFU/g	50000 max.	AOAC 930.12
Coliforms	<15	CFU/g	<10	AOAC 931.14
Yeast	<10	CFU/g	80 max.	AOAC 931.32
Mold	<10	CFU/g	80 max.	AOAC 931.32
Enterobacteriaceae	<10	CFU/g	<10	AOAC 931.14
Staphylococcus aureus	<10	CFU/g	<10	AOAC 931.14
Salmonella 375 µm	Negative	7.375 x2	Negative	AOAC 2003.06

Additional Comments:

Production Date: 12/27/2018 **Expires in 24 months.**
Expiration Date: 12/27/2020
Allergen Information: MILK
 Made in the USA

Lindsay Hollands

 Inventory Specialist



TRUE AND CORRECT AS
 RECEIVED FROM SUPPLIER

DVA Health & Nutrition (P) Ltd. | www.dva.com | 10000 10th Ave S, Suite 1000, Denver, CO 80202 | Tel: 303.733.2222 | Fax: 303.733.2222 | Email: info@dva.com

Anexo 2

Tabla de análisis de varianza para el modelo de efectos fijo de tres factores

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	Expected Mean Square	F_0
A	SS_A	$a - 1$	MS_A	$\sigma^2 + \frac{bcn \sum \tau_i^2}{a - 1}$	$F_0 = \frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	$b - 1$	MS_B	$\sigma^2 + \frac{acn \sum \beta_j^2}{b - 1}$	$F_0 = \frac{MS_B}{MS_E}$
C	SS_C	$c - 1$	MS_C	$\sigma^2 + \frac{abn \sum \gamma_k^2}{c - 1}$	$F_0 = \frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	$(a - 1)(b - 1)$	MS_{AB}	$\sigma^2 + \frac{cn \sum \sum (\tau\beta)_{ij}^2}{(a - 1)(b - 1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	SS_{AC}	$(a - 1)(c - 1)$	MS_{AC}	$\sigma^2 + \frac{bn \sum \sum (\tau\gamma)_{ik}^2}{(a - 1)(c - 1)}$	$F_0 = \frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SS_{BC}	$(b - 1)(c - 1)$	MS_{BC}	$\sigma^2 + \frac{an \sum \sum (\beta\gamma)_{jk}^2}{(b - 1)(c - 1)}$	$F_0 = \frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS_{ABC}	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$	MS_{ABC}	$\sigma^2 + \frac{n \sum \sum \sum (\tau\beta\gamma)_{ijk}^2}{(a - 1)(b - 1)(c - 1)}$	$F_0 = \frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Error	SS_E	$abc(n - 1)$	MS_E	σ^2	
Total	SS_T	$abcn - 1$			

Anexo 3

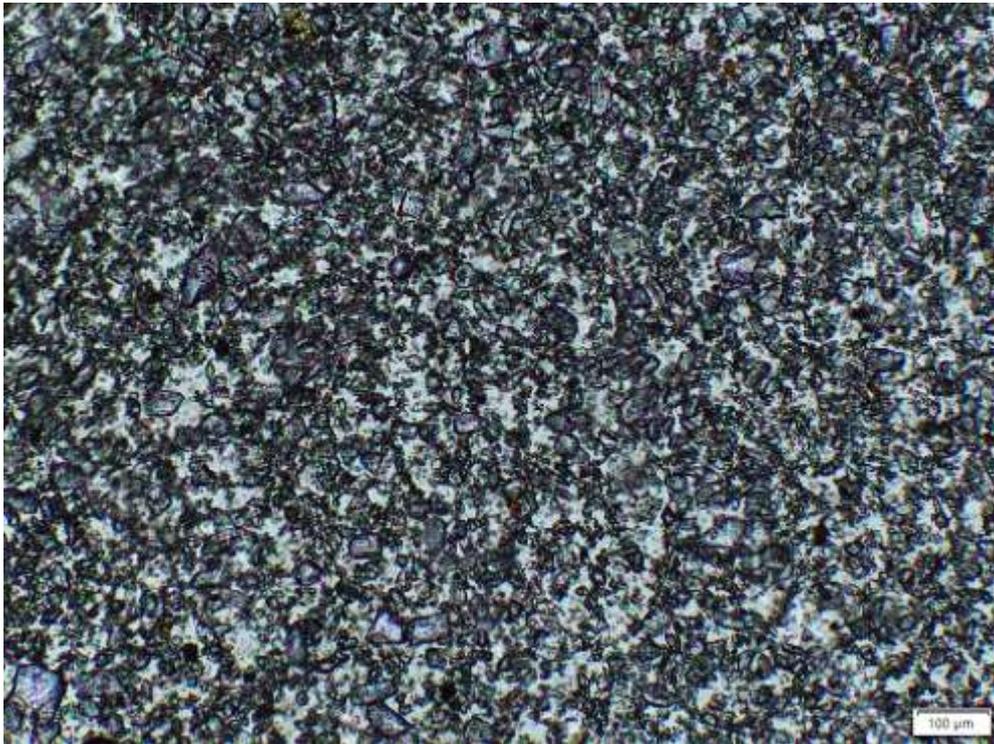
$F_{0.05, \nu_1, \nu_2}$

$\nu_2 \backslash \nu_1$	Degrees of Freedom for the Numerator (ν_1)																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞	
2	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3	
3	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50	
4	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53	
5	7.71	6.94	6.39	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63	
6	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36	
7	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67	
8	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23	
9	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93	
10	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71	
12	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54	
15	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40	
20	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30	
24	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21	
30	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13	
40	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07	
60	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	
120	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96	
∞	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92	
2	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88	
3	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84	
4	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81	
5	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78	
6	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76	
7	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73	
8	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71	
9	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69	
10	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67	
12	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65	
15	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64	
20	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62	
30	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51	
40	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39	
60	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.55	1.43	1.35	1.25	
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.10	

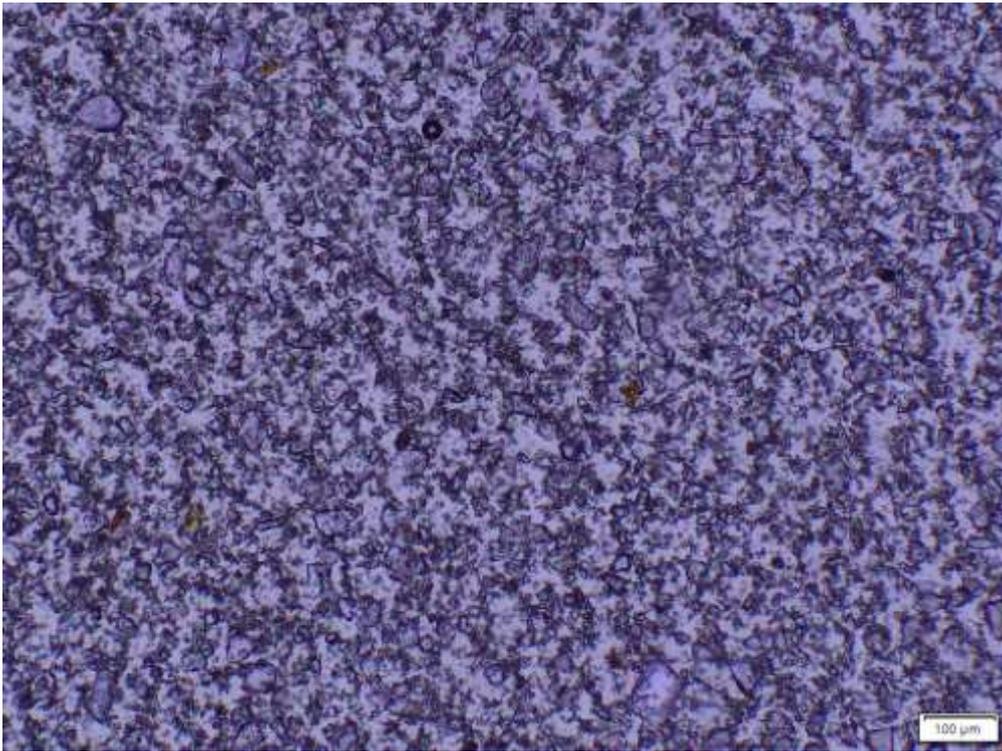
Anexo 4

Se ha colocado las fotografías de los tamaños de partícula de las 8 combinaciones realizadas en los ensayos con material moliente tipo cylpebs.

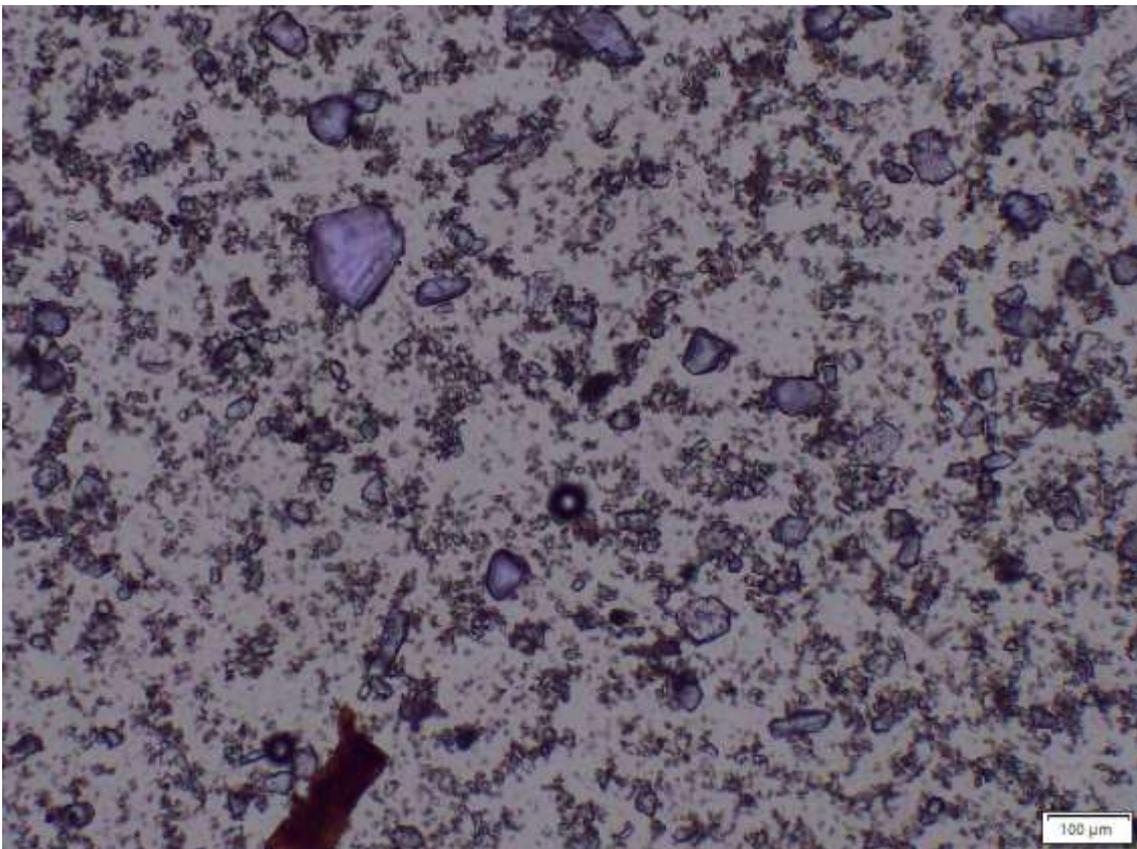
Combinación 1 a 10x (1; 61rpm; 3h)



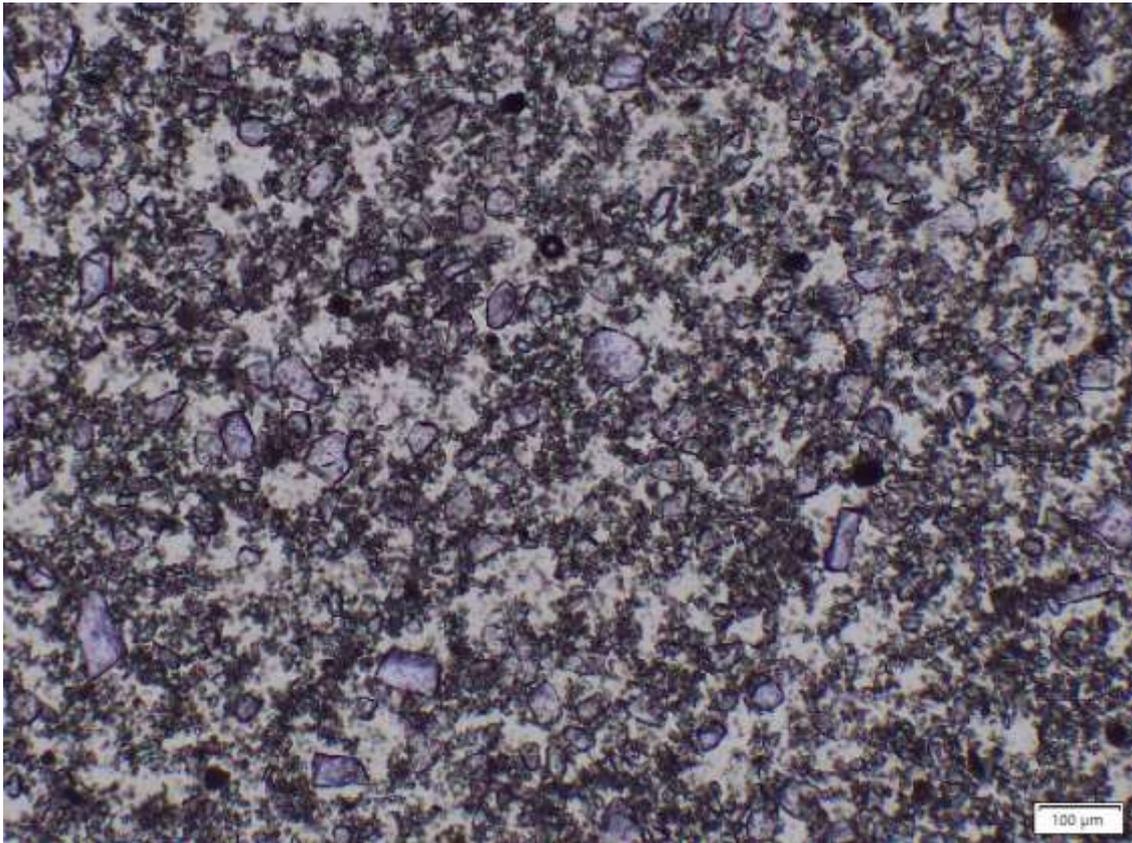
Combinación 2 a 10x (2; 61rpm; 3h)



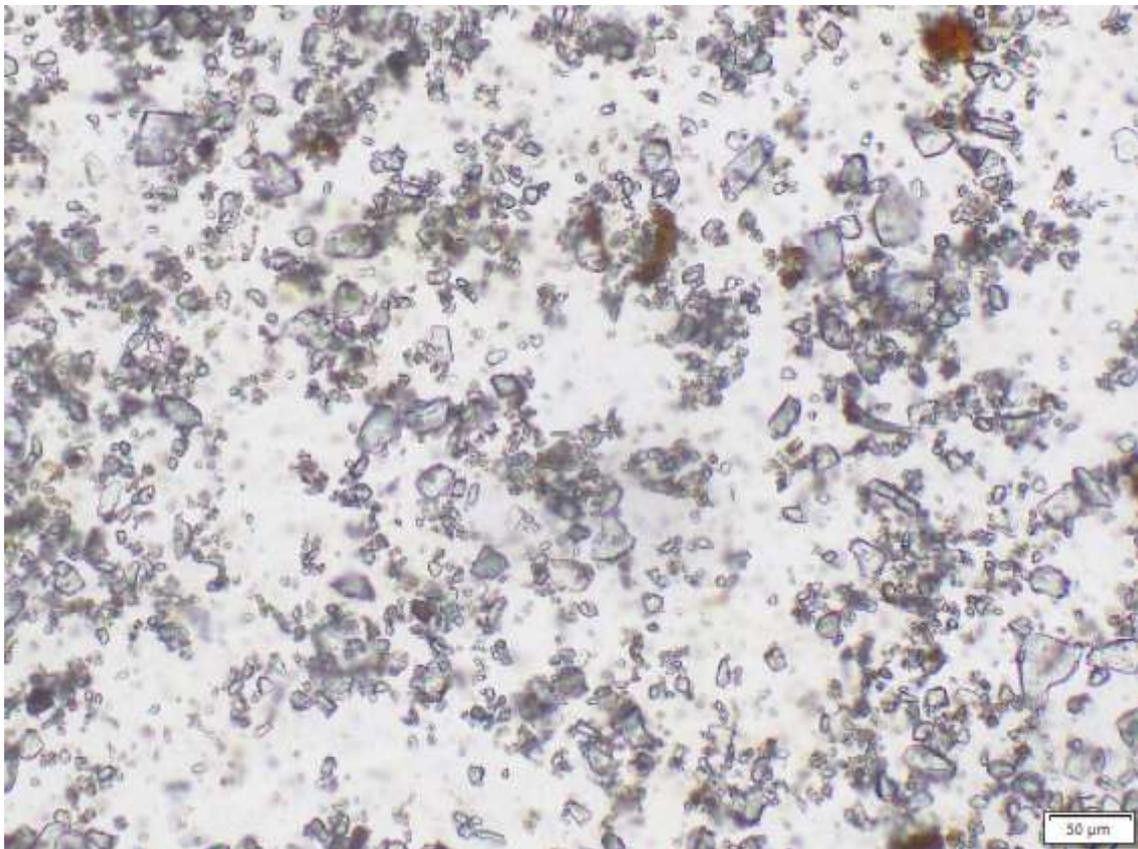
Combinación 3 a 10x (1; 70rpm; 3h)



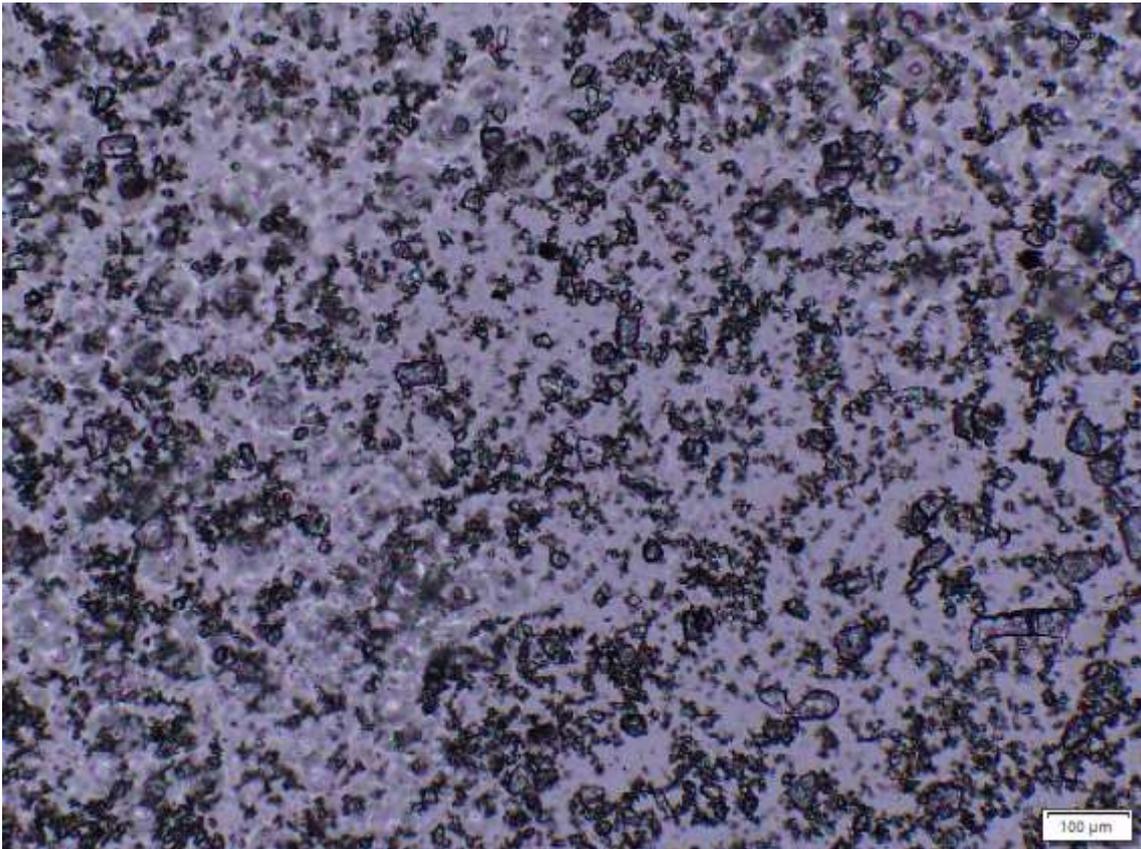
Combinación 4 a 10x (2; 70rpm; 3h)



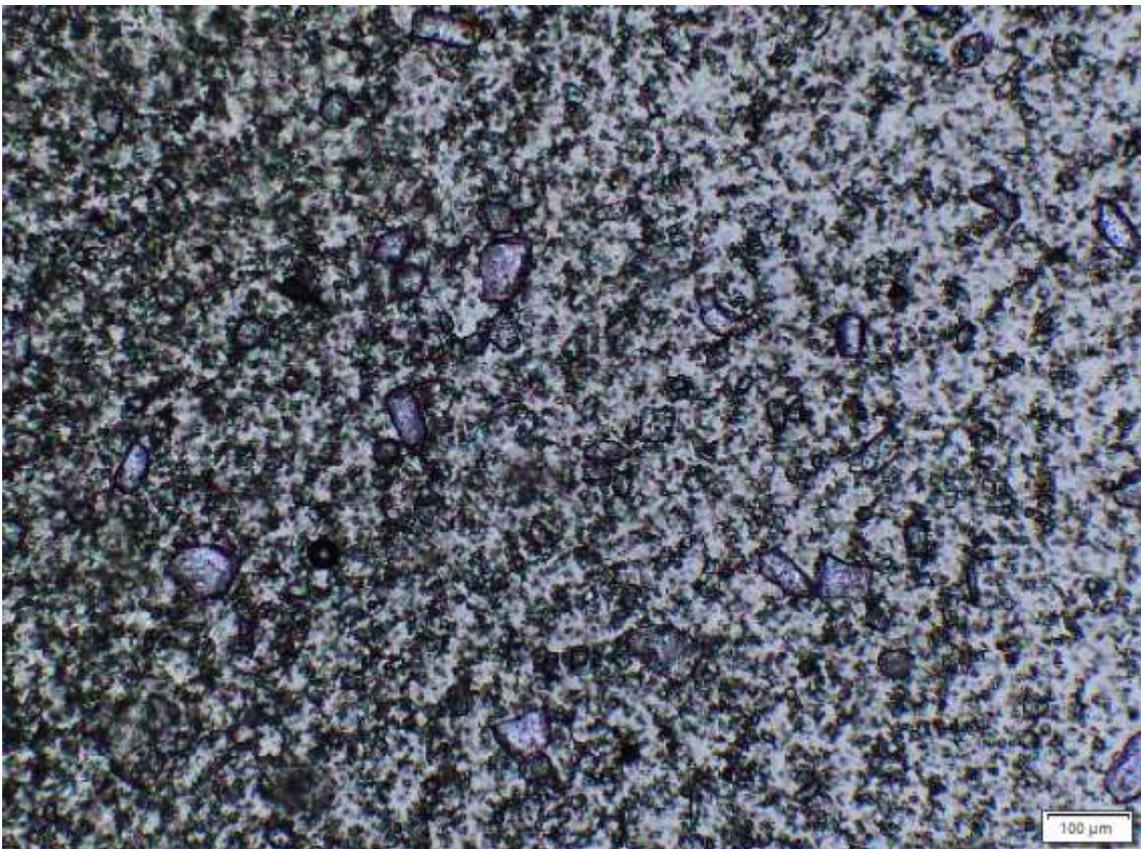
Combinación 5 a 20x (1; 61rpm; 5h)



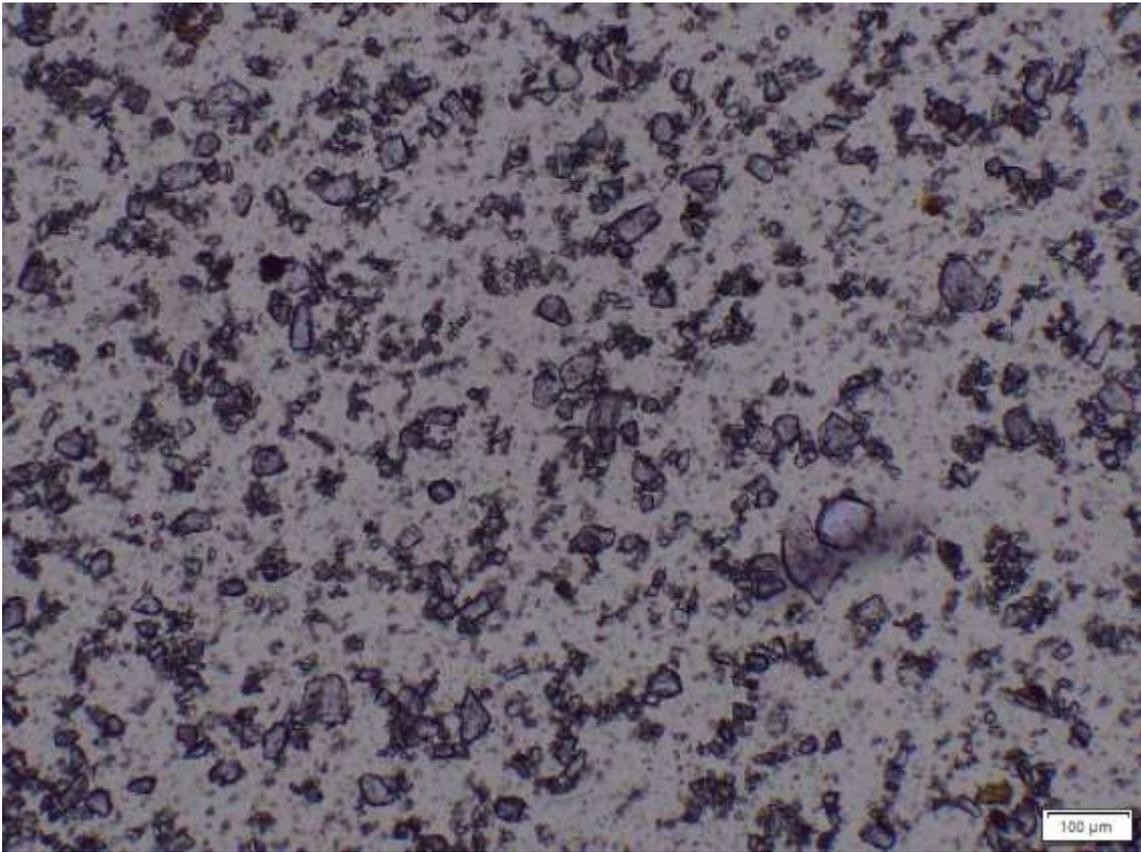
Combinación 5 a 10x (1; 61rpm; 5h)



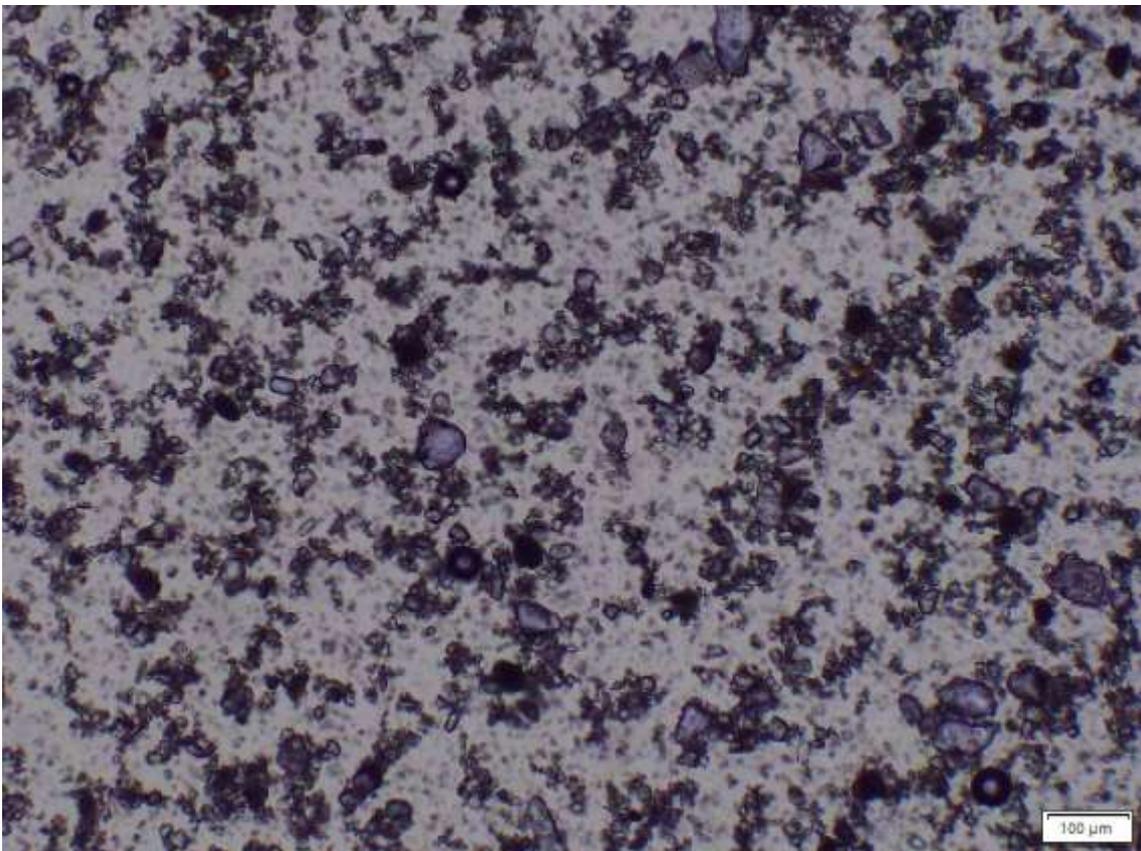
Combinación 6 a 10x (2; 61rpm; 5h)



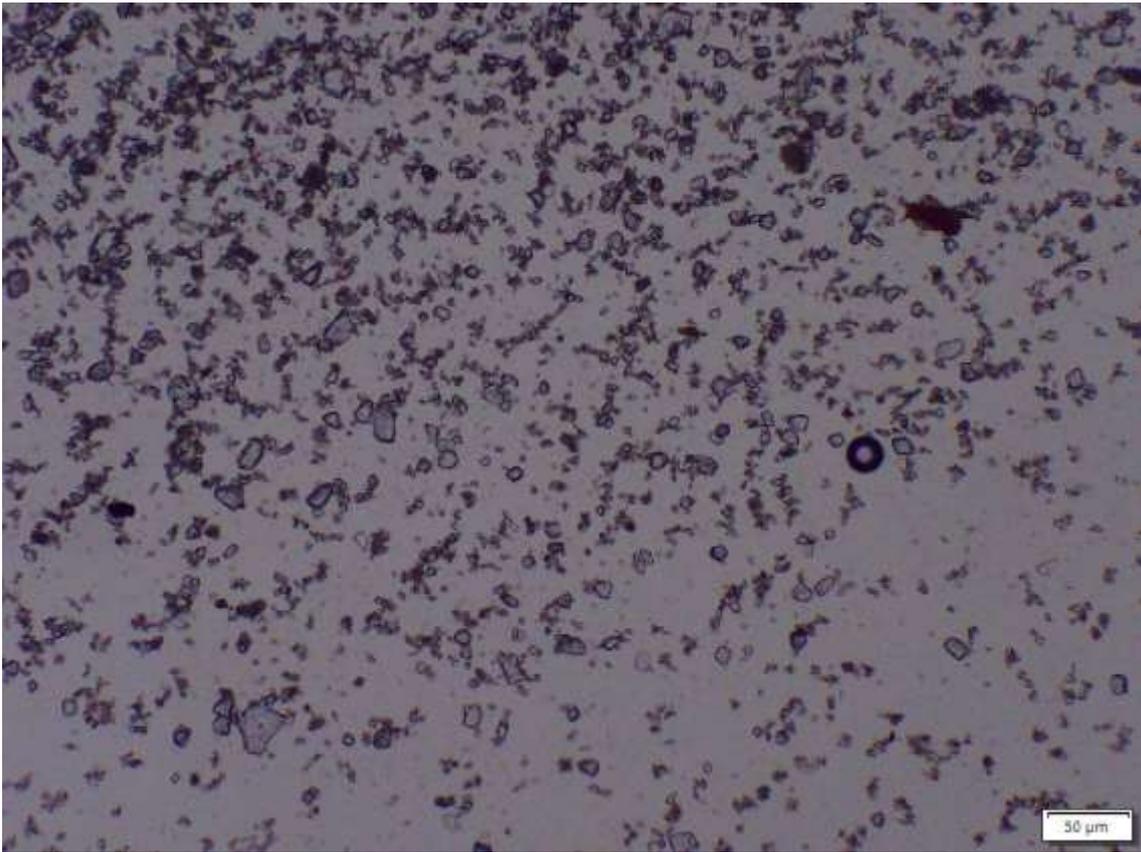
Combinación 7 a 10x (1; 70rpm; 5h)



Combinación 8 a 10x (2; 70rpm; 5h)



Combinación 8 a 20x (2; 70rpm; 5h)



Anexo 5



Cotización

Fecha: 09/05/2019
 Válido hasta: 10/05/2019
 Cotización #:
 Código/RUC del Cliente: 1104269244001

HIVIMAR

Nombre Empresa:
 Proceso:
 Solicita:
 Observaciones:
 Vendedor:

INFORMACIÓN

SANTIAGO RENGEL ROMAN

IMPORTACION: AEREA
 Vendedor: Pablo Chico Cel: 0997574554

ITEM	CANT	ENTREGA	MARCA	DESCRIPCIÓN	COD. SAP	P.UMT	P. NETO
1	95	12 DIAS	SN	BOLAS 1"		\$ 22.59	\$ 1,988.10
2	100	12 DIAS	SN	BOLAS 1 1/4		\$ 46.90	\$ 4,690.00
						\$ -	\$ -

Instrucciones		SUBTOTAL	\$ 6,578.10
TIEMPO DE ENTREGA PROMEDIO : 10 A 12 DIAS LABORALES		IVA 12%	\$ 789.37
FORMA DE PAGO EFECTIVO		TOTAL	\$ 7,367.47
CONDICIONES: 50 % ANTIPOYO Y SALDO CONTRA ENTREGA			

Oferta presentada por:



Pablo Chico
 División Ventas Industriales
 Email: pchico@hivimar.com
 Cel: 0997574554



Av. Juan Tanco Marango Km 2.5 y Agustín Frias
 Telef. (593 4) 2681100 ext.348 Fax: (593 4) 2681485