



Diseño e implementación de un molino refinador de cacao con control de temperatura para optimizar los tiempos de molienda.

Monge Herrera, Karen Estefani

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería Electromecánica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electromecánica

Ing. Torres Muños, Guido Rafael Mgtr.

16 de febrero de 2023

Latacunga

Reporte de Verificación de Contenido



[OD Tesis Monge 15-02-23.docx](#)

Scanned on: 2:10 February 16, 2023 UTC



Overall similarity score



Results found



Total words in text

	Word count
Identical	1678
Minor Changes	0
Paraphrased	0
Omitted	1270





Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería Electromecánica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, “**Diseño e implementación de un molino refinador de cacao con control de temperatura para optimizar los tiempos de molienda.**”, fue realizado por la señorita **Monge Herrera, Karen Estefani**; ; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 22 de febrero de 2023

A handwritten signature in blue ink is positioned above a solid black horizontal line. The signature is highly stylized and cursive, appearing to read 'G. Torres Muños'.

Ing. Torres Muños, Guido Rafael Mgtr.

C.C. 1801624352

Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería Electromecánica

Responsabilidad de autoría

Yo, **Monge Herrera, Karen Estefani**, con cédula de ciudadanía N° 0550011647, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un molino refinador de cacao con control de temperatura para optimizar los tiempos de molienda** es de mi/nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 22 de febrero de 2023

Firma



Monge Herrera, Karen Estefani

C.C.: 0550011647



Departamento de Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería Electromecánica

Autorización de publicación

Yo, **Monge Herrera, Karen Estefani** con cédula de ciudadanía N° 0550011647, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Diseño e implementación de un molino refinador de cacao con control de temperatura para optimizar los tiempos de molienda.”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 22 de febrero de 2023

Firma

Monge Herrera, Karen Estefani

C.C.: 0550011647

Dedicatoria

Esta tesis se la dedico a Dios quien ha forjado mi camino y me ha dado las herramientas suficientes, la fuerza y resiliencia para terminar este proceso, agradezco a mi padre Holguer Monge por el apoyo y las enseñanzas brindadas y a mis hermanos y Daniel por su cariño y compañía.

Agradecimiento

Agradezco primero a Dios por haber guiado en todo este proceso darme la fuerza y resiliencia para terminar con esta etapa, a mis profesores por todo el apoyo brindado a lo largo de mi carrera estudiantil en especial al ing. Guido Torres por proporcionarme los conocimientos necesarios para hacer realidad este proyecto, al ing. Freddy Salazar por las palabras de aliento y las enseñanzas, a mi padre por darme los recursos económicos para hacer este proyecto y a mi familia y por ser parte de mi diario vivir, a mis amigos por las risas y el trabajo compartido tanto dentro como fuera del aula.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Caratula.....	1
Reporte de Verificación de Contenido	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría.....	3
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Índice de contenidos	8
Índice de Figuras	14
Índice de tablas	16
Resumen	18
Abstract.....	19
Capítulo I: Introducción	20
Planteamiento del problema.....	20
Antecedentes.....	20
Justificación e importancia	22
Objetivos	22
<i>Objetivo General.....</i>	22
<i>Objetivos Específicos.....</i>	23

VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN.....	23
<i>Variable Independiente.....</i>	23
<i>Variable Dependiente.....</i>	23
<i>Hipótesis.....</i>	23
Capítulo II: Marco teórico.....	24
Introducción.....	24
Chocolate con cacao fino de aroma.....	24
Chocolate.....	25
<i>Chocolate negro.....</i>	25
<i>Chocolate blanco.....</i>	26
Temperatura y grado de finura de la pasta en la molienda.....	26
Primera molienda.....	27
Segunda molienda.....	27
Refinado.....	27
Molino refinador de piedras.....	27
Molinos refinador de rodillos.....	28
Molinos de refinador de esferas.....	29
Molinos.....	29
Características del material a ser refinado.....	30
<i>Propiedades físico - químicas del cacao Nacional Ecuador.....</i>	31
<i>Viscosidad.....</i>	31
<i>Densidad.....</i>	32

Proceso de molienda de Teobroma cacao	33
Corrosión y oxido en la industria alimenticia	34
Aceros resistentes a la corrosión.....	34
Selección del tamaño de las esferas	35
Producción.....	36
Esfuerzos uniformemente distribuidos.....	37
Velocidad crítica.....	38
Zona de difusión limitada.....	38
Movimiento Circular Uniforme	38
Motores	39
<i>Motor CC</i>	39
<i>Motores monofásicos</i>	39
<i>Motores bifásicos</i>	40
<i>Motores trifásicos</i>	40
<i>Motor AC Síncronos</i>	40
<i>Motor AC Asíncronos</i>	41
Motores	41
Trasmisión de Potencia.....	42
Agitadores.....	43
Incertidumbre	44
Factor de diseño y construcción	45
PLC	46
Termocupla.....	47

Capítulo III: Diseño e implementación	48
Diseño y requerimientos del sistema	48
Selección del material	48
Diseño mecánico.....	50
<i>Proporciones geométricas para un sistema de agitación “normal”.....</i>	<i>50</i>
<i>Volumen de molino</i>	<i>51</i>
<i>Masa de las esferas de molienda</i>	<i>52</i>
<i>Cantidad de esferas de molienda o elementos molturadores</i>	<i>53</i>
<i>Volumen de las esferas de molienda dentro de la cuba.....</i>	<i>55</i>
<i>Altura del nivel de esferas.....</i>	<i>57</i>
<i>Altura del nivel de cacao</i>	<i>58</i>
<i>Volumen de cacao dentro de la cuba de molienda</i>	<i>58</i>
<i>Masa de cacao seco a moler</i>	<i>59</i>
<i>Masa de la pasta de cacao a moler</i>	<i>60</i>
<i>Velocidad crítica</i>	<i>61</i>
<i>Longitud de los brazos de molienda.....</i>	<i>62</i>
<i>Altura del primer agitador</i>	<i>65</i>
<i>Potencia que requiere el sistema</i>	<i>65</i>
<i>Trasmisión de par de torsión.....</i>	<i>70</i>
<i>Motorreductor</i>	<i>71</i>
<i>Diámetro del eje central.....</i>	<i>73</i>

<i>Masa de los elementos a rotar por los brazos de molienda</i>	75
<i>Fuerza Centrípeta</i>	76
<i>Diseño de los brazos de molienda</i>	78
<i>Diámetro los brazos agitadores para un molino a esferas</i>	80
<i>Comportamiento estático de los brazos de molienda</i>	81
<i>Comportamiento dinámico de los brazos de molienda.....</i>	89
<i>Factores que modifican el límite de resistencia.....</i>	97
<i>Acople.....</i>	100
<i>Diseño de la cuba de molienda.....</i>	102
<i>Estructura.....</i>	104
<i>Constante de lechada del chocolate para el refinador.....</i>	105
Diseño Eléctrico	106
<i>Control de temperatura, velocidad y tiempo.....</i>	107
<i>Etapas 1</i>	107
<i>Termocupla</i>	108
<i>Niquelina.....</i>	109
ETAPA 2.....	109
ETAPA 3.....	110
Molino Refinador.....	113
Capítulo IV: Pruebas y análisis de resultados	116

	13
Tiempo de proceso	116
Graficas de temperatura- tiempo	118
<i>Muestras de fluides a 89,17 rpm y 50°C</i>	121
Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones	122
Conclusiones.....	122
Recomendaciones	124
Bibliografía.....	125
Anexos	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Principio de trabajo de un molino de rodillos</i>	28
Figura 2 <i>Cantidad de sacos de cacao</i>	37
Figura 3 <i>Fuerza Centrípeta</i>	39
Figura 4 <i>Motorreductor</i>	43
Figura 5 <i>PLC</i>	47
Figura 6 <i>Diámetro del agitador desde los extremos de la cuba</i>	64
Figura 7 <i>Aceleración centrípeta</i>	77
Figura 8 <i>Comportamiento estático de los brazos de molienda</i>	82
Figura 9 <i>Longitud del agitador</i>	83
Figura 10 <i>Esquema de carga del brazo agitador</i>	86
Figura 11 <i>Fuerza Cortante (Comportamiento estático agitadores)</i>	86
Figura 12: <i>Momento Flector (Comportamiento estático agitadores)</i>	86
Figura 13 <i>Distribución de carga triangular en el brazo de molienda</i>	91
Figura 14 <i>Esquema de carga (Comportamiento dinámico)</i>	96
Figura 15 <i>Fuerza Cortante (Comportamiento dinámico)</i>	97
Figura 16 <i>Momento flector (Comportamiento dinámico)</i>	97
Figura 17 <i>Diagrama de fatiga</i>	99

Figura 18 <i>Retenedor 45-25-10</i>	100
Figura 19 <i>Acople para el eje la brida y el retenedor</i>	101
Figura 20 <i>Brida de sujeción</i>	101
Figura 21 <i>Cuba de molienda</i>	104
Figura 22 <i>Estructura de soporte</i>	105
Figura 23 <i>Etapas del proceso de refinación</i>	107
Figura 24 <i>Conexiones del controlador de temperatura</i>	108
Figura 25 <i>Conexiones del tablero de control</i>	111
Figura 26 <i>Conexiones de entradas y salidas del PLC</i>	112
Figura 27 <i>Sistema Mecánico</i>	113
Figura 28 <i>Sistema eléctrico y electrónico</i>	114
Figura 29 <i>Refinación de pasta de cacao</i>	115
Figura 30 <i>Grafica temperatura-tiempo 50°C</i>	119
Figura 31 <i>Grafica temperatura-tiempo 45°C</i>	119
Figura 32 <i>Grafica temperatura-tiempo 40°C</i>	120
Figura 33 <i>Muestras de pasta de cacao</i>	121

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Composición del chocolate blanco</i>	26
Tabla 2 <i>Variables fundamentales en los molinos</i>	30
Tabla 3 <i>Dimensiones de grano de cacao</i>	31
Tabla 4 <i>Clasificación de aceros inoxidable</i>	35
Tabla 5 <i>Motores</i>	41
Tabla 6 <i>Selección de motor</i>	42
Tabla 7 <i>Sistemas de molienda</i>	44
Tabla 8 <i>Termocuplas en el mercado</i>	47
Tabla 9 <i>Propiedades del acero inoxidable 304</i>	49
Tabla 10 <i>Características del motor</i>	71
Tabla 11 <i>Características del motorreductor FCN40 ITAL</i>	72
Tabla 12 <i>Masa de los elementos a rotar por el eje</i>	75
Tabla 13 <i>Energía cinética de las esferas de molienda</i>	92
Tabla 14 <i>Factores Modificadores</i>	99
Tabla 15 <i>Programación del variador</i>	109
Tabla 16 <i>Molienda de chocolate con azúcar</i>	116
Tabla 17 <i>Molienda de pasta de cacao pura</i>	117

Tabla 18 <i>Molienda de chocolate con azúcar impalpable</i>	118
--	------------

Resumen

En el presente proyecto se diseñó e implemento un molino refinador de fácil transportación para pequeños productores de derivados y semi derivados de cacao , el molino más idóneo para refinar pasta de cacao es un molino refinador a esferas ya que estamos trabajando con un grano que es considerado húmedo siendo uno de los pocos molinos capaces de procesar este grano con eficacia, además que es capaz de llegar obtener medidas micrométricas, dado que la calidad del chocolate depende de la finura de la pasta se vuelve la mejor opción, es un molino con escasa contaminación en el producto final usando como principal material en todos los elementos que tengan contacto con la pasta de cacao es el acero inoxidable 304, un acero adecuado para la industria alimenticia por su resistencia a la corrosión además que resistente a altas temperaturas, el proyecto nos permitirá refinar 7,22kg de pasta de cacao una producción pequeña de tabletas de chocolate, tener una adecuada cantidad de esferas de molienda me permitirá obtener una buena finura en la pasta de cacao, uno de los parámetros más importantes a controlar es la velocidad con las que las esferas de molienda rotan en el tanque , se diseñó un eje capaz de transmitir movimiento a las esferas, tanto el eje como las esferas de molienda se encuentran en una cuba de doble cilindro con entradas y salidas de agua para realizar un control de temperatura que nos permita optimizar los tiempos de molienda.

Palabras clave: molino refinador, control de temperatura, industria alimenticia, aceros.

Abstract

In this project, an easily transportable refining mill was designed and implemented for small producers of cocoa derivatives and semi-derivatives. The most suitable mill for refining cocoa paste is a sphere refining mill since we are working with a grain that is considered humid being one of the few mills capable of processing this grain effectively, in addition to being able to obtain micrometric measurements, since the quality of the chocolate depends on the fineness of the paste, it becomes the best option, it is a mill with little contamination. In the final product, using 304 stainless steel as the main material in all the elements that come into contact with the cocoa paste, a steel suitable for the food industry due to its resistance to corrosion, as well as its resistance to high temperatures, the project will allow us to refine 7.22kg of cocoa paste a small production of chocolate tablets, have an adequate amount of molten spheres store will allow me to obtain a good fineness in the cocoa paste, one of the most important parameters to control is the speed with which the grinding spheres rotate in the tank, an axis capable of transmitting movement to the spheres was designed, both the axis and the grinding spheres are found in a double-cylinder tank with water inlets and outlets for temperature control that allows us to optimize grinding times.

Keywords: refiner mill, temperature control, food industry, steel.

Capítulo

Introducción

Planteamiento del problema

El proyecto nace de la necesidad de un molino refinador que se adapte a la molienda del cacao o pasta de cacao, se busca un diseño que nos permita obtener una pasta fluida de cacao.

En este sentido su construcción, costo y movilidad sea fácil y accesible ya que gran parte de agricultores cuyas fincas tienen como producto principal el cacao se encuentran en sitios remotos con vías de segundo orden con acceso limitado, cuyo principal objetivo es el obtener la semilla de cacao seca para venderla, teniendo valores finales que no representan el trabajo detrás de la obtención de este preciado producto.

Frente a este problema se pretende generar los derivados y semi derivados, que no se obtienen debido a que se necesita más de un proceso, lo que conlleva varias máquinas que hace que el presupuesto para este fin salga del alcance de los agricultores.

En relación a este problema se plantea la creación de un molino que se adapte a las condiciones de los pequeños agricultores y productores, para que puedan obtener elaborados y semielaborados y obtengan un precio justo por su producto.

Antecedentes

Ecuador es un país con gran producción de cacao o su nombre científico *Theobroma cacao*, considerado como uno de los principales exportadores de cacao fino de aroma, mismo que tiene un sabor especial, en sus inicios como una moneda de cambio incaica por sus propiedades sensoriales e increíble sabor, factor determinante para que sea cultivado y mejorado naturalmente para ser el mejor, por tal razón es considerado un producto

emblemático que caracteriza nuestro país, utilizado para la producción de chocolates de alta calidad tanto dentro del país como en el exterior. Existen investigaciones que señalan que al menos una variedad de cacao fino de aroma tiene su punto de origen en la Amazonía ecuatoriana.(Lanaud et al., s. f.) (Abad et al., 2020, p. 63)

La brecha de precios entre la materia prima el cacao los elaborados y semielaborados es muy grande, los precios en el mercado de la materia prima no son estáticos lo cual causa incertidumbre en los agricultores a diferencia de los elaborados que tienen su precio y sus mercados bien definidos, sumado a esto que la materia prima se estropea más rápido que los elaborados.

La necesidad de procesar materias primas crea más oportunidades de trabajo y superación dentro de Ecuador, el factor más notable para que las personas no emprendan es el alto precio de las maquinarias y la difícil movilidad debido a su peso y gran tamaño, para empezar y abrirse camino en el mundo del procesado del cacao es una buena alternativa comenzar con una opción económica y que se adapte a la necesidad de un pequeño agricultor.

La práctica de la molienda de cacao antiguamente en la sierra ecuatoriana se realizaba en una piedra de moler dando un resultado excelente en cuanto a la fluidez de la pasta y sumado a este proceso se secaba en pencas de cabuya, este proceso era muy tardado y laborioso pero su sabor era especial. Para moler los alimentos se utilizaban piedras planas (grano cutanarumi = piedra de moler granos) para los granos.(Amores, 2015, p. 5)

Los molinos son parte esencial del proceso de producción de elaborados y semielaborados de cacao, los cuales deben cumplir con factores importantes como que el material con el que se construye sea el adecuado para la industria alimenticia.

Un molino de piedras es un molino de frotamiento con disco, se monta sobre un eje dos piedras circulares los productos experimentan una fuerza de cizalla algunos molinos giran en dirección diferente, para molinos de cacao son muy utilizadas piedras triples horizontales. (Balcázar Díaz & Guamba Díaz, 2009, p. 39)

Justificación e importancia

En nuestro país, son pocas las industrias chocolateras que se dedican a la producción de chocolates de calidad, la principal causa que este mercado sea limitado, es el precio elevado de la maquinaria necesaria para satisfacer los procesos que conlleva a la preparación de los elaborados del cacao.

Los molinos que se encuentran en el mercado ecuatoriano para la producción de chocolate además de tener precios elevados, son diseñados para grandes cantidades, de igual forma otro problema es que se necesita más de un proceso para lograr una pasta de cacao de textura fina, en algunos procesos como el refinado del chocolate se necesita un control del tiempo y temperatura para no alterar las propiedades fisicoquímicas, ya que de esto depende la calidad y el sabor del producto final.

La importancia de un molino que sea fácil de transportar, más económico y de fácil uso sería una alternativa que podría motivar al agricultor para producir elaborados del cacao.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un molino refinador de *Teobroma cacao* para uso de pequeños productores de procesados y semiprocados.

Objetivos Específicos

- Realizar una investigación del proceso de molienda de *Teobroma cacao*, los métodos de molienda y las variables fundamentales en procesamiento de *Teobroma cacao*.
- Diseñar y seleccionar elementos mecánicos
- Diseñar el control eléctrico y electrónico
- Construir un molino refinador de cacao
- Pruebas de funcionamiento

Variables de la Investigación**Variable Independiente**

Parámetros y características de funcionamiento del molino

Variable Dependiente

Calidad de pasta del cacao

Hipótesis

La implementación del molino refinador permitirá tener una pasta fluida mejorando la calidad de los procesados y semiprocados.

Capítulo II

Marco teórico

Introducción

El capítulo que a continuación se aborda tiene la finalidad de encontrar un diseño óptimo para la refinación de cacao, se busca obtener una pasta con textura fina por lo cual se investigara los procesos que mejor se adaptan a la molienda del chocolate los elementos mecánicos y eléctricos que componen al molino refinador más propicio.

Chocolate con cacao fino de aroma

En el mercado ecuatoriano las empresas productoras de chocolate con cacao fino de aroma son pocas, siendo menos de diez empresas que se encuentran consolidadas en el mercado del chocolate de calidad, los estándares de salud y tecnología son los principales factores que dificultan la operatividad en el país de origen(Lombeida & Herrera, 2018, p. 70). La mayoría de máquinas destinadas al procesamiento del cacao son importadas lo cual duplica sus precios.

La falta de inversión en tecnología en la industria del cacao y chocolate, amerita que se requiera la importación de maquinaria originaria esencialmente de Italia y Estados Unidos. Considerando que Ecuador invierte apenas el 2% del Producto Interno Bruto en investigación y tecnología. (Lombeida & Herrera, 2018, p. 75). La falta de conocimientos en el mercado y la escasa cabida que se le da al tema de chocolate fino, son las principales razones para que los investigadores centren sus estudios en este tema.

El cacao fino y de aroma tiene características distintivas de aroma y sabor buscadas por los fabricantes de chocolate. Ecuador, por sus condiciones geográficas y su riqueza en recursos biológicos, es el productor por excelencia de Cacao Arriba fino y de aroma (63% de la producción mundial) proveniente de la variedad Nacional cuyo sabor ha sido reconocido

durante siglos en el mercado internacional. Este tipo de grano es utilizado en todos los chocolates refinados. Sin embargo, los que muchos no saben que el chocolate fino se distingue por su pureza. (*Cacao Nacional | Anecacao Ecuador*, s. f.)

Chocolate

El chocolate tiene distintas presentaciones en el mercado, chocolate negro, blanco y con leche, están varían de acuerdo a los ingredientes que lo compongan, los ingredientes cambian la composición por ende la densidad y el sabor, factor que afecta el tiempo de molienda. Es un producto que nace de la pepa de cacao lo caracteriza su sabor amargo y distintivo olor se usan varios aditivos para mejorar su sabor o que se mantenga a lo largo del tiempo como sacarina, manitol y aspartame, entre mas puro el chocolate su tiempo de consumo será mayor y su tiempo de consumo será menor

Chocolate negro

Se puede encontrar en fondant, chocolate bitter y chocolate amer, chocolate duro, chocolate con leche donde los principales ingredientes son manteca de cacao y azúcar (Zuñiga & Felipe, 2013, p. 93) .Entre más concentración de cacao tenga mejor es la calidad y más alto es el precio, las concentraciones de cacao más valorados en el mercado son del 70% en adelante, factor que nutricionalmente le atribuye propiedades que lo hacen un super alimento, como que es un excelente energizante ayuda a prevenir trastornos cardiovasculares y estimula el cuerpo y las defensas del organismo. (Jaramillo & Elizabeth, 2005, p. 21).

Entre más puro el chocolate el proceso de producción es más difícil, al mezclarlo con elementos como leche o manteca de cacao la molienda se vuelve más sencilla, el cacao es un grano complicado de moler ya que al principio de la molienda nos encontramos con una pasta

bastante granulada y de difícil molienda, lograr una pasta fluida y que sea agradable al paladar puede llevar horas y será necesario más de un proceso.

Chocolate blanco

No tiene nada que ver con el chocolate negro, entre otras cosas porque carece de un elemento imprescindible la pasta o licor de cacao, por lo que no se lo podría considerar como chocolate mientras su color sea más blanco menor será su calidad los marfilados tienen a tener un poco más de aportación de nutrientes pero es escasa. (Zuñiga & Felipe, 2013, p. 95).

Tabla 1

Composición del chocolate blanco

Composición del chocolate blanco	
Sólidos lácteos	14%
Grasa láctea	3,5%
Manteca de cacao	20%
Azúcar u otros edulcorantes	55%

Temperatura y grado de finura de la pasta en la molienda

La temperatura de un proceso de molienda de cacao no debe superar los 50°C, entre más tiempo de molienda mayor será la finura de la pasta, las pastas de cacao comercializadas industrialmente tienen finuras entre el 99-99,5%. (Plua Cuesta, 2008, p. 2). "Un tamaño de partícula ideal es inferior a 30 micras, pero no inferior a 20 micras para el chocolate". (*Grindometro - medidor de finura para el chocolate*, s. f.).

Primera molienda

En esta etapa del proceso el nib se muele para transformarlo en pasta de cacao. Por lo general, se utilizan molinos de pistones (pines) que muelen los granos hasta alcanzar una finura aproximada del 90%. Durante este proceso se libera la manteca de cacao y se funde como resultado de la elevación de la temperatura por la fricción, el producto resultante que es todavía grosero y se deberá reducir en una molienda posterior. (Plua Cuesta, 2008, p. 4)

Segunda molienda

La función de la segunda molienda es el aumento de la finura de la pasta hasta el 99 % aproximadamente. Para este proceso son muy comunes los molinos de esferas. Estos molinos tienen un cuerpo de trituración que gira y está relleno con esferas o cilindros trituradores. La temperatura que alcanza la pasta en esta etapa está entre 65 y 70 °C. (Plua Cuesta, 2008, p. 4)

Refinado

La mezcla inicial es luego procesada en refinadoras con el objetivo de disminuir el tamaño de las partículas, de tal forma que el resultado final sea suave al paladar evitando así la sensación de arenosidad que suelen presentar chocolates mal procesados, entre más tiempo dure el proceso de refinación mejor será la calidad del producto pero si el proceso es enfocado los tiempos de refinación disminuyen y también los costos operativos. (Zuñiga & Felipe, 2013, p. 55)

Molino refinador de piedras

Es una máquina que por medio de un agitador mecánico cumple la función de mantener mezclando el chocolate junto a otros ingredientes durante un tiempo largo con el objeto de producir las reacciones de caramelización, evaporándose la humedad y eliminando los ácidos

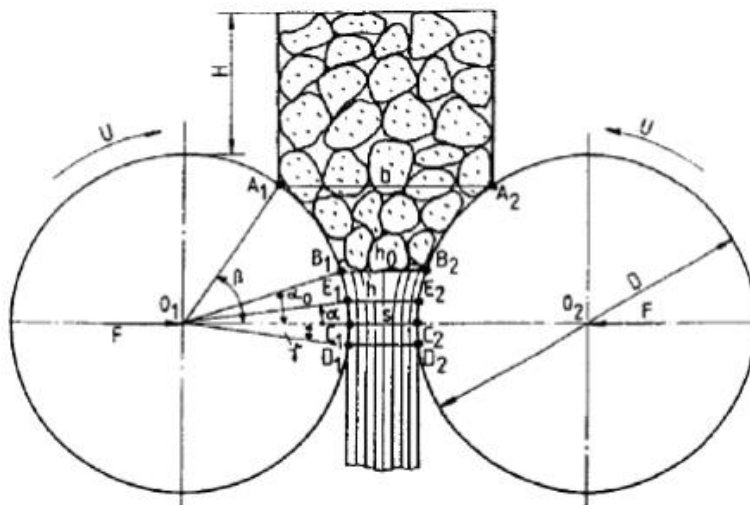
volátiles excluyendo así los sabores indeseados y obteniendo una emulsión perfecta. (Horna Martinez & Diaz Cercado, 2019, p. 1707)

Molinos refinador de rodillos

El molino de rodillos es una máquina que consiste principalmente en dos rodillos cilíndricos del mismo diámetro y longitud, los cuales están uno frente a otros, cuyos ejes son paralelos y generalmente en posición horizontal. La dirección de rotación de los rodillos se da de forma que uno gire en sentido contrario que el otro, de modo que el material de alimentación sea “extraído” de la parte superior del par de rollos, se compacte y a la salida emerja con un grano en forma de polvo con una determinada granulometría. (Huaman Huambo, 2021, p. 20). El molino de rodillos tiene un funcionamiento similar al molino de piedras.

Figura 1

Principio de trabajo de un molino de rodillos



Nota. Tomado de (Zhang et al., 2009, fig. 3)

Molinos de refinador de esferas

En los molinos de esferas que utiliza la molienda por atricción, opera simultáneamente las fuerzas de cizallamiento e impacto. Una de las consideraciones más importantes son la entrada de fuerza, ya que está conectada directamente con el sistema. Están constituidos por un molino giratorio, horizontal, que se mueve a poca velocidad, en cuyo interior se halla un cierto número de esferas de acero o piedras duras. A medida que el cilindro gira, las piedras se elevan por las paredes del cilindro y caen sobre el producto a triturar que llenan el espacio libre entre las esferas. (Rueda Barreno & Sánchez Paredes, 2015, p. 35). Estos molinos actúan de manera excelente en la refinación de pasta de cacao ya que son aptos para granos tanto secos como húmedos, estos molinos por lo general trabajan con pasta pre-molida donde el 92% de las partículas tienen un tamaño menor a 75μ . (Jose Vicente, 1989, p. 30). Estos molinos se utilizan para la molienda de minerales y rocas, pero obtuvieron resultados asombrosos en la molienda de *Theobroma cacao*.

Molinos

Los molinos se usan para diferentes aplicaciones todas destinadas al mismo fin a la reducción de partículas, la densidad de los elementos a ser molidos la humedad

y la contaminación entre otros son factores que tienen que tener en consideración para seleccionar cual es el molino más adecuado para la molienda que se desea realizar, en el caso de la molienda del cacao hay factores que no se pueden pasar por alto como la contaminación ya que cuando se trabaja con cacao es imprescindible trabajar con materiales adecuados para la industria alimenticia, la capacidad de reducir el tamaño de las partículas ya que de la finura depende la calidad del producto, las demás variables suman características al molino que lo hace más apto.

Tabla 2*Variables fundamentales en los molinos*

Molinos	Ponderación	M. de Rodillos	M. de Martillos	M. de Fricción	M. de Tambor	M. Atritor
Granulometría de las partículas	10	8	8	9	10	10
Contaminación nula del chocolate	10	10	8	10	7	10
Tamaño	10	6	5	8	4	8
Facilidad de construcción y montaje	10	5	4	7	3	8
Costo	10	8	7	7	6	6
Limpieza	10	9	7	7	8	8
Ruido y Vibración	10	8	6	8	7	8
PROMEDIO	10,0	7,7	6,4	8,0	6,4	8,3

Características del material a ser refinado

Se conoce que se podrá refinar cacao previamente tostado, así como pasta de cacao, el tiempo de refinación cambiará en relación a la densidad, a mayor densidad menor será el espacio que ocupe teniendo la capacidad de moler más masa por lo cual se necesita un estudio de las características y su influencia en el proceso mecánico.

Propiedades físico - químicas del cacao Nacional Ecuador

Las propiedades me dan una idea de la calidad del cacao y el tratamiento mecánico que se le debe proporcionar para obtener sus derivados debe cumplir con ciertos requisitos como una temperatura menor a 50 grados Celsius y calidad en el material de construcción para conservar sus propiedades. Un proceso efectivo de refinación me permitirá obtener pasta de cacao con textura fluida, el sabor y la calidad es directamente relacionado con la finura de la pasta del cacao.

Tabla 3

Dimensiones de grano de cacao

<i>Cultivares cacao</i>	<i>Variables</i>		
	<i>Largo(mm)*</i>	<i>Ancho(mm)*</i>	<i>Espesor(mm)*</i>
<i>Nacional Ecuador</i>	21,96 \mp 0,13	12,32 \mp 0,17	8,19 \mp 0,09

Nota. Tomado de (Andrade Almeida et al., 2019)

Los molinos consiguen mejores resultados entre más seco este el grano, pero una pequeña humedad del 1% favorece a la rotura del grano, entre más húmedo el grano se recubre las esferas y forros e impide el choque y la abrasión. (*8._molienda.pdf*, s. f., p. 12). El cacao Nacional Ecuador tiene una humedad de Alrededor del 6,03 \mp 0,10% de humedad haciéndolo un grano húmedo. (Andrade Almeida et al., 2019).

Viscosidad

La Viscosidad para en la pasta de cacao es importante ya que varía el sabor y su textura en su forma final, además se necesita cierto nivel de viscosidad para que pueda entrar

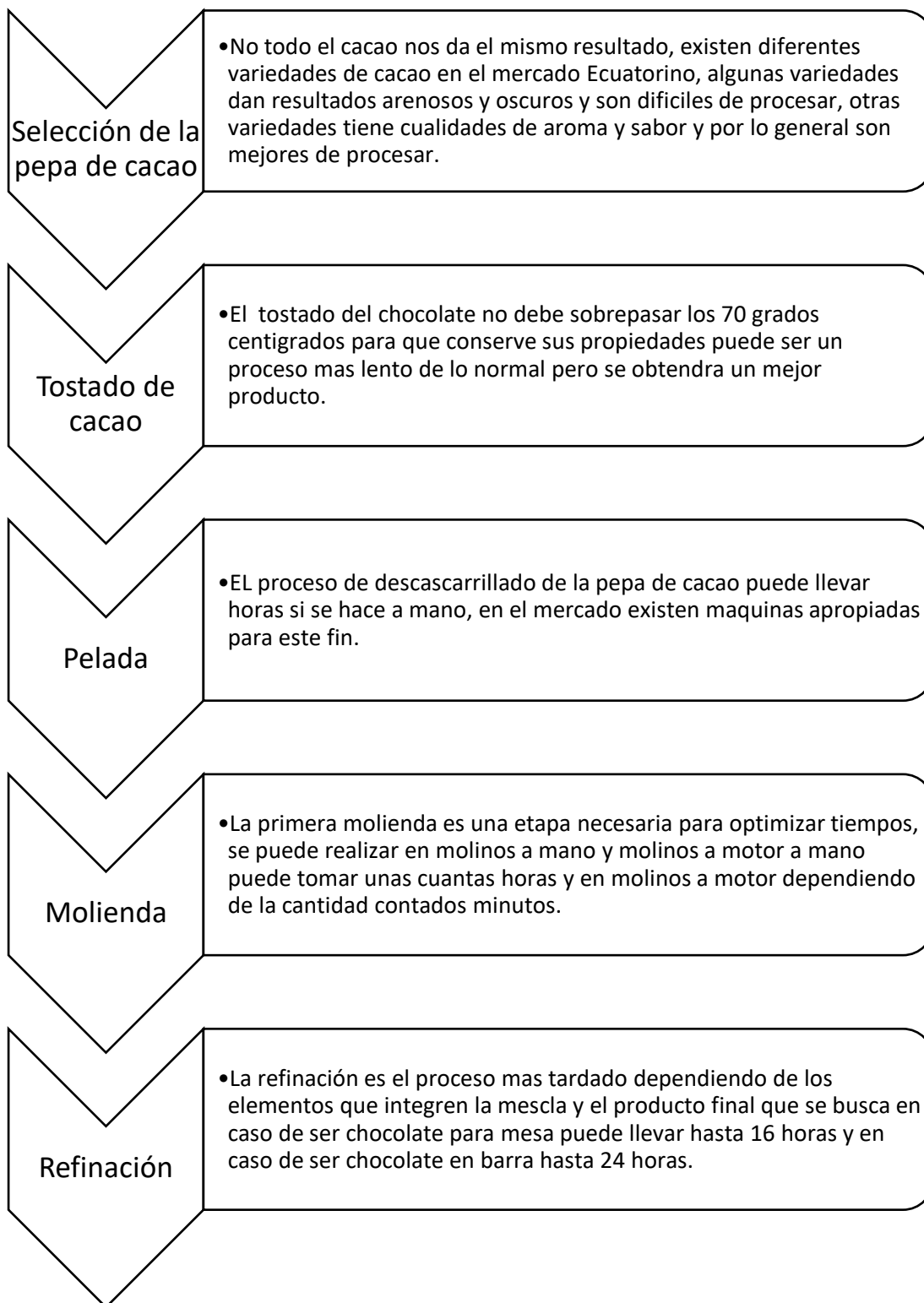
a las maquinas del proceso de temperado ya que si pasa de esto limites no fluye en las siguientes máquinas.(Sandoya Man Ging & Vargas Rumazo, 2019, p. 15)

Densidad

El chocolate tiene una densidad que depende de su composición, desde 1200 kg/m³ (1,2 kg/L) el más graso hasta 1300 el chocolate con leche, menos graso y con hasta un 60 % de azúcar. Esta densidad se explica a partir de sus ingredientes: es una mezcla de azúcar (de densidad 1587 kg/m³), de manteca de cacao (de densidad aproximadamente 860) y de polvo de cacao. La densidad de este último ingrediente es difícil de encontrar: las habas de cacao tienen densidad aparente de 600, por el hecho que tienen muchos huecos en su interior. La densidad aparente del polvo de cacao está entre 400 y 600, dependiendo de la molturación, pero la densidad de cada una de las partículas sólidas que lo constituyen será superior a 1000.(Claudi Mans Teixidó, 2015)

Las densidades de pulpa usuales para los molinos de esferas están entre 55 y 70 en % de volumen de agua, lo que representa entre el 60 y 70% de sólidos en peso para menas de 2,7 a 3 t/m³ de densidad.(Blanco, 2014, p. 26)

Proceso de molienda de Teobroma cacao



Corrosión y oxido en la industria alimenticia

La corrosión de los equipos y envases que entran en contacto con los alimentos puede provocar cambios indeseables en el aspecto y el sabor, y en casos graves incluso intoxicaciones, las bacterias prosperan de forma muy rápida cuando el ambiente es húmedo y en procesos donde se proporciona calor. Por lo tanto, la protección contra la corrosión debe comenzar tanto con el material como con el alimento. Las máquinas que entran en contacto con los alimentos son en su mayoría de acero inoxidable, preferiblemente con un cierto contenido de molibdeno para garantizar una resistencia suficiente a las picaduras en soluciones salinas. El aluminio se puede utilizar en muchos casos siempre que el medio no contenga haluros o bases. Recientemente, los revestimientos de plástico se han utilizado cada vez más. Sin embargo, no solo se debe tener en cuenta la resistencia a la corrosión de estos materiales, sino también el riesgo de que los componentes (por ejemplo, plastificantes, estabilizadores) migren del plástico. Por el lado del producto, se puede tener en cuenta que algunos componentes (por ejemplo, la gelatina) tienen un efecto inhibitorio. (Stahl & Kiefer, 1973)

Aceros resistentes a la corrosión

Las aleaciones con base de hierro que contienen al menos 12 por ciento de cromo se llaman aceros inoxidables. La característica más importante de estos aceros es su resistencia a muchas condiciones corrosivas, pero no a todas. El costo y la resistencia del aluminio y sus aleaciones los colocan entre los materiales más versátiles desde el punto de vista de la fabricación. (Budynas & Murrieta Murrieta, 2012, p. 50)

Tabla 4*Clasificación de aceros inoxidables*

ACEROS INOXIDABLES "AISI"		
Serie	Composición	Características
A2XX	Manganeso-Níquel-Cromo	Austenítico. No se endurece
A3XX	Níquel-Cromo	Austenítico. No se endurece
A4XX	Cromo	(1) Martensítico. Sí se endurece (2) Ferrítico. No se endurece
A5XX	Cromo (4 a 6) %	(1) Martensítico. Sí se endurece (2) Ferrítico. No se endurece

Nota. Tomado de (Valencia Flores, 2010, p. 1)

El acero AISI 304 forma parte de la familia de los aceros inoxidables Austeníticos, presenta una buena resistencia a la corrosión, no es necesario un tratamiento de recocido después de procesos de soldadura, tiene alta ductilidad, pero es poco maquinable, este tipo de aceros es de fácil obtención en el mercado nacional. Su área de aplicación es extremadamente amplia, siendo utilizado para la construcción de equipos utilizados en la industria alimenticia, fabricación de tanques de almacenamiento de leche, industria cervecera, intercambiadores de calor, equipos quirúrgicos, plantas de tratamiento de aguas, etc. (Valencia Flores, 2010, p. 12)

Selección del tamaño de las esferas

Para poder seleccionar adecuadamente el tamaño más idóneo para un proceso de refinación de pasta de cacao se debe tener en cuenta variables tales como la finura, el radio de las esferas que se van a utilizar y la cantidad que va a ser procesada. Las esferas conocidas también como cuerpos molturadores se pueden encontrar en tamaños normalizados en el mercado ecuatoriano. La unidad de medida es mm y con el paso del tiempo cambia sus dimensiones por el desgaste. La variación de la finura de la pasta de cacao está en función del tamaño de las esferas o más conocidas como esferas, que debido al desgaste que sufren las

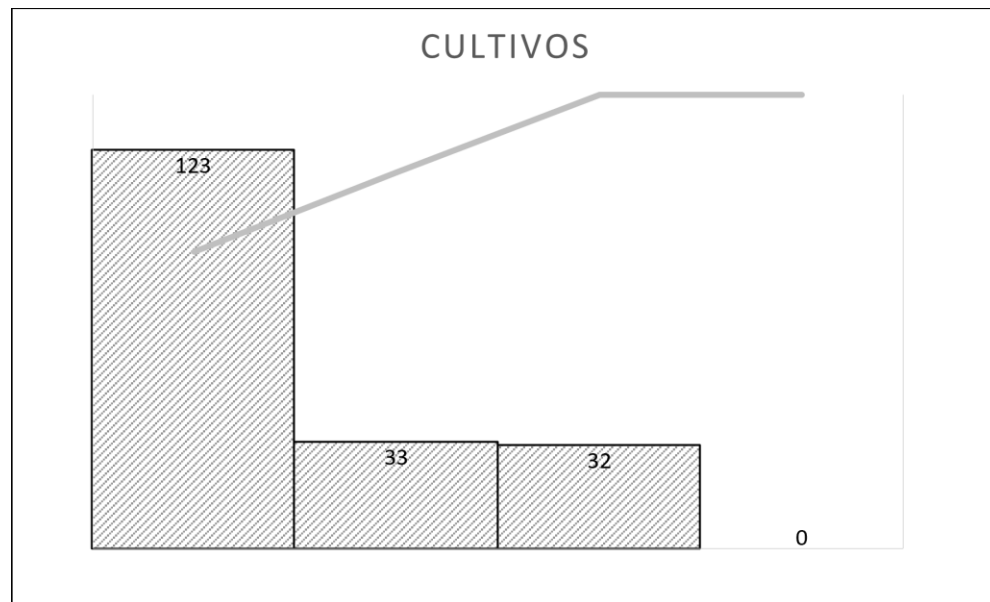
esferas después de un determinado tiempo de producción se produce una llamado collar de esferas donde se encuentran diferentes tamaños de esferas, consecuentemente a este desgaste la capacidad de refinar disminuye ya que el peso de las esferas cambia y las condiciones iniciales a las cuales el molino fue diseñado no son las mismas, ya que el desgaste de los elementos molturadores altera el resultado final.

Producción

La producción cambia en base a la necesidad del consumidor, entre más grande sea la cantidad de cacao que se tiene que refinar el tiempo de la producción aumentara, se necesitaran más elementos molturadores y las dimensiones del diseño serán más grandes por ende se necesitara más material en la construcción y la potencia será mayor lo que eleva costos en materiales eléctricos.

En el Ecuador existen numerosas familias campesinas que se vienen dedicando al cultivo de la pepa de oro, como es conocido también el cacao, el mismo que ha sido calificado como el mejor cacao fino en aroma lo que le ha valido al país ser uno de los principales exportadores de esta gramínea. (Quimi et al., 2020, p. 98)

Los pequeños productores de cacao en su mayoría llegan a producir entre 18 y 15 quintales de cacao lo que representa el 65,43% y los demás productores menos de 15 quintales, después de producir la materia prima pocos son los productores que realizan derivados y semi derivados de cacao.(Parada-Gutiérrez & Veloz-Cordero, 2021, p. 7)

Figura 2*Cantidad de sacos de cacao*

Nota. Tomado de (Parada-Gutiérrez & Veloz-Cordero, 2021)

Esfuerzos uniformemente distribuidos

Cuando se aísla una superficie interna los momentos totales que actúan sobre la superficie se manifiestan a sí mismos como distribuciones de fuerzas a través de toda el área. Con frecuencia, en el diseño se adopta el supuesto de una distribución uniforme del esfuerzo. En este caso el resultado se llama tensión pura, compresión pura o cortante puro, dependiendo de cómo se aplique la carga externa al cuerpo bajo estudio. Algunas veces se emplea la palabra simple en lugar de puro o pura para indicar que no hay otros efectos que compliquen el estado. (Budynas & Murrieta Murrieta, 2012, p. 86)

Velocidad crítica

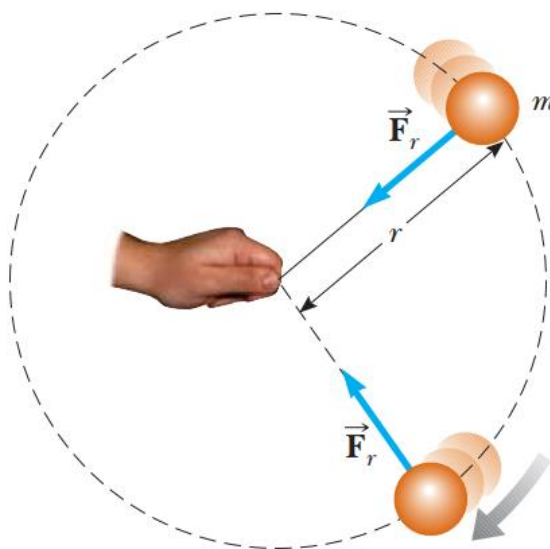
La definición de velocidad crítica teórica se refiere a la velocidad a la que se expulsa una pequeña partícula desde el centro en la circunferencia interior del molino. El concepto crítico se aplica porque representa la velocidad más baja que produce el efecto anterior, ya que cualquier velocidad superior a la crítica produce el efecto de pegado. Cuando se supere la velocidad crítica, el molino perderá su capacidad de trituración porque hay un porcentaje de los elementos molturadoras que no están realizando ningún trabajo.(Blanco, 2014)

Zona de difusión limitada

Esta es el área dentro del recipiente donde la actividad de molienda se reduce debido a la baja velocidad de recirculación, la baja tasa de recirculación conduce a una molienda ineficiente ya que las partículas no se rompen. Esta zona se crea porque siempre hay un espacio entre la pared del tanque y el agitador.(Alvarez Zambrano & Dávila Sánchez, 2011, p. 9).Si la zona de difusión es considerable entre el eje de agitación y las paredes del molino, la molienda será ineficiente ya que no se lograra mover los elementos molturadores y se quedaran estancados.

Movimiento Circular Uniforme

Se analiza un movimiento un poco más complejo. Las leyes de Newton se aplican a cuerpos que se mueven en órbitas circulares. La aceleración se dirige hacia el centro del círculo, por lo que se llama aceleración centrípeta. Además, siempre es perpendicular a la velocidad centrípeta. (Si hay un componente de aceleración paralelo a la velocidad centrípeta, la velocidad de la partícula cambiará).(Serway et al., 2008, p. 137)

Figura 3*Fuerza Centrípeta*

Nota. Tomado de (Serway et al., 2008, fig. 6.1)

Motores***Motor CC***

Los motores de CC se utilizan en algunas aplicaciones porque su velocidad es fácil y precisa de controlar y ajustar, son motores costosos con muchas piezas y solo existen monofásicos. Estos son utilizados en las industrias (Valenzuela Cerón, 2013, p. 1)

Motores monofásicos

La mayoría de los hogares y pequeñas empresas no tienen sistemas de potencia trifásicos. En este tipo de lugares todos los motores deben alimentarse de fuentes de potencia monofásicas. El principal problema asociado con el diseño de los motores de inducción monofásicos es que, a diferencia de las fuentes de potencia trifásicas, una fuente de potencia monofásica no produce un campo magnético giratorio.

En cambio, el campo magnético producido por una fuente monofásica es estacionario y oscila con el tiempo. Son motores de costo no elevado y que se pueden arreglar con mayor facilidad.(CHAPMAN STEPHEN, 2012, p. 415)

Motores bifásicos

Un motor bifásico es un sistema de dos tensiones desfasadas 90 grados, que ya no se utiliza hoy en día. El dinamo está alineado por dos devanados colocados 90 grados uno respecto del otro.(*Motores monofásicos, bifásicos y trifásicos*, 2018)

Motores trifásicos

Funcionan a través de una fuente de potencia trifásica. Son impulsados por tres corrientes alternas de la misma frecuencia, los cuales alcanzan sus valores máximos de forma alternada.(*Motores monofásicos, bifásicos y trifásicos*, 2018)

Motor AC Síncronos

Los motores síncronos son utilizados en máquinas de gran tamaño que tienen una carga variable y necesitan de una velocidad constante. La característica principal de este tipo de motores es que trabajan a velocidad constante que depende solo de la frecuencia de la red y de otros aspectos constructivos de la máquina. A diferencia de los motores asíncronos, la puesta en marcha requiere de maniobras especiales a no ser que se cuente con un sistema automático de arranque. Otra particularidad del motor síncrono es que al operar de forma sobrecitado consume potencia reactiva y mejora el factor de potencia.(Valenzuela Cerón, 2013, p. 34)

Motor AC Asíncronos

El motor asíncrono trifásico conocido en el medio con el nombre de motor trifásico es el más empleado en la industria, en cualquier otra aplicación donde se requiera un motor robusto sin regulación de velocidad. Actualmente gracias al avance que tiene la electrónica de potencia este tipo de motores se están empleando más y más en aplicaciones que exigen regulación de velocidad. (Valenzuela Cerón, 2013, p. 38)

Motores

Tabla 5

Motores

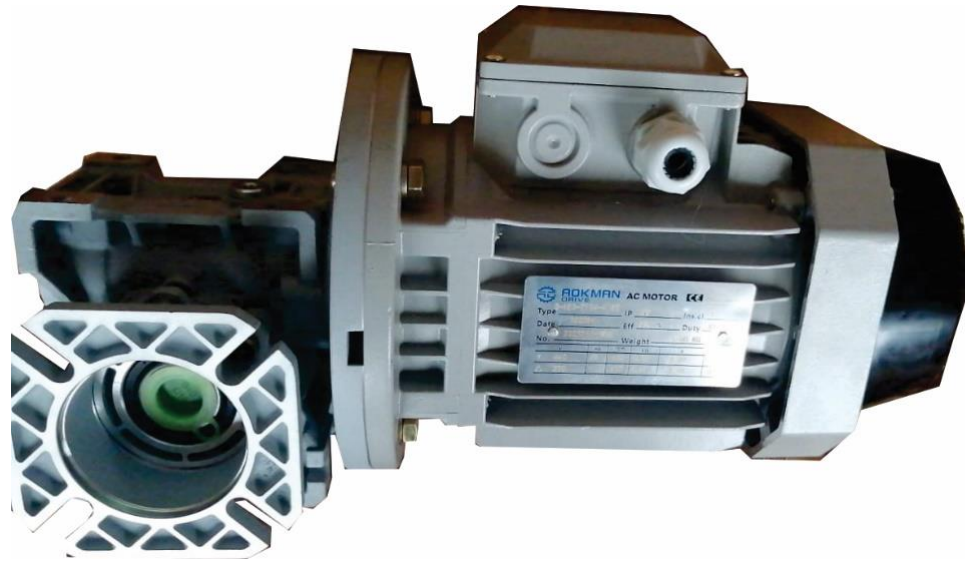
Motores		
Motores eléctricos	Monofásicos	Trifásicos
Uso domestico	x	
Uso industrial		x
Flexibilidad		x
Negocios	x	x
Espacios grandes		x
Espacios reducidos	x	
Estabilidad	x	x

Tabla 6*Selección de motor*

Selección de motor			
Motores eléctricos	Pocos cambios de velocidad	Varios cambios de velocidad	Posicionamiento preciso
Motor asincrónico	x		
Motor sincrónico		x	
Motor paso a paso			x

Trasmisión de Potencia

Muchas aplicaciones industriales requieren que se proporcione potencia a las maquinas mediante motores de combustión o motores eléctricos. Por lo general, la fuente de potencia corre más eficientemente en un rango pequeño de velocidad de rotación. Cuando la aplicación requiere que se entregue potencia a una menor velocidad que la que suministra el motor, se utiliza un reductor de velocidad, el cual debe transmitir la potencia desde el motor a la aplicación con tan poca energía como resulte práctico, mientras se reduce la velocidad y en consecuencia se incrementa el par de torsión.(Budynas et al., 2012, p. 24)

Figura 4*Motorreductor***Agitadores**

En el proceso químico y las industrias relacionadas, muchas operaciones dependen en gran medida de la agitación y mezcla eficientes de los fluidos. La agitación generalmente se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para que adquiera un movimiento circulatorio en el interior de un recipiente. La mezcla implica comenzar con dos fases separadas, como un líquido y un sólido en polvo o dos líquidos, y dividir aleatoriamente las dos fases entre sí. La trayectoria del flujo en el tanque mezclador depende de las propiedades del líquido, la geometría del tanque, el tipo de deflectores y el propio mezclador. Si un impulsor u otro agitador se monta verticalmente en el centro del tanque sin deflectores, casi siempre se creará una trayectoria de flujo en forma de remolino. Esto generalmente no es deseable porque el aire queda atrapado, creando vórtices significativos, y pueden ocurrir olas y otros efectos adversos,

especialmente a altas velocidades. Para evitar esto, se pueden utilizar posiciones angulares descentradas cuando se trabaja con motores de baja potencia. Sin embargo, para agitación vigorosa a potencias altas, las fuerzas no equilibradas pueden ser severas y limitar el uso de esas potencias. Para lograr una agitación vigorosa con agitadores verticales, se acostumbra el empleo de deflectores para reducir el tamaño del remolino y obtener así un buen mezclado. (Geankoplis, 1999, p. 161)

Tabla 7

Sistemas de molienda

Alternativas	Mantenimiento	Fiabilidad	Facilidad de construcción	Aplicabilidad	Costo	Suma
Agitador de brazos	9	8	8	10	10	45
Agitador de discos	8	7	4	10	8	37
Agitador de hélice	5	7	3	5	6	26

Nota. Tomado de (Alvarez Zambrano & Dávila Sánchez, 2011, p. 55)

Incertidumbre

En la mecánica existen incertidumbres en los diseños de maquinarias.

- La composición del material y el efecto de las variaciones en las propiedades.
- Las variaciones de las propiedades en diversos puntos dentro de una misma barra de material.
- El efecto local o cercano en las propiedades, del procesamiento
- El efecto del tratamiento termo mecánico en las propiedades.
- La intensidad y distribución de las cargas.
- La validez de los modelos matemáticos que se utilizan para representar la realidad.
- El efecto de la corrosión.
- El efecto del desgaste.

Los ingenieros deben adecuarse a la incertidumbre; ésta siempre acompaña al cambio. Entre los aspectos que conciernen a los diseñadores están las propiedades de los materiales, la variabilidad de la carga, la fiabilidad de la fabricación y la validez de los modelos matemáticos. El método determinístico establece un factor de diseño basado en las incertidumbres absolutas de un parámetro de pérdida de función y un parámetro máximo permisible. (Budynas et al., 2012, p. 16)

$$nd = \frac{\text{parámetro de pérdida de función}}{\text{parámetro máximo permisible}}$$

Ec. 1

Nota. Tomado de (Budynas et al., 2012, p. 16)

Factor de diseño y construcción

En este caso, el factor se conoce como factor de seguridad, nd que tiene la misma definición que el factor de diseño, pero por lo general difiere en su valor numérico. Como el esfuerzo puede no variar en forma lineal con la carga, el uso de la carga como el parámetro de

pérdida de función puede no ser aceptable. Entonces, es más común expresar el factor de diseño en términos del esfuerzo y una resistencia relevante.

$$nd = \frac{\text{resistencia de pérdida de la función}}{\text{esfuerzo permisible}} = \frac{S}{\sigma(o \tau)}$$

Ec. 2

Nota. Tomado de (Budynas et al., 2012, p. 17)

PLC

Un PLC es útil en la automatización de procesos, hablar de la importancia del PLC hoy en día y su gran aporte no solo a la industria sino al comercio y ahora también en instituciones, hogares y cada vez se va haciendo más conocido no solo por profesionales técnicos dedicados al rubro de la programación sino por personas de diferente profesiones que entienden que es un dispositivo que se puede programar como un cerebro y darle distintas instrucciones para un determinado trabajo, muchos profesionales que antes le tenían un poco de temor por su complicada programación y la poca información que se tenía de ellos, los elevados costos y conseguir personal adecuado que lo programe, lo hacía cada vez más inaccesible; pero con la estandarización del lenguaje y la similitud en el manejo de símbolos eléctricos, hizo posible operar diferentes procesos.(Quispe Flores, 2018, p. 32)

Figura 5

PLC



Termocupla

Un termopar es un dispositivo para la medición de la temperatura, basado en efectos termoeléctricos. Es un circuito formado por dos conductores de metales diferentes o aleaciones de metales diferentes, unidos en sus extremos y entre cuyas uniones existe una diferencia de temperatura, que origina una fuerza electromotriz. (Rodríguez et al., 2007)

Tabla 8

Termocuplas en el mercado

<i>Termocupla</i>	<i>Rango de temperatura</i>	<i>Rango de error</i>
<i>Tipo T</i>	-200°C – 0°C	±1°C – ±2,5%
<i>Tipo J</i>	0°C – 760°C	±1°C – ±0,75%
<i>Tipo E</i>	0°C – 870°C	±1,7°C – ±0,5%
<i>Tipo K</i>	0°C – 1260°C	±2,2°C – ±0,75%
<i>Tipo S</i>	0°C – 1480°C	±1,5°C – ±0,25%
<i>Tipo R</i>	0°C – 1480°C	±1,5°C – ±0,25%
<i>Tipo B</i>	870°C – 1700°C	±0,25%

Nota. Tomado de (*Termocupla, cómo funciona, tipos, consejos y modelos.* | Alutal, s. f.)

Capítulo III

Diseño e implementación

En el presente capítulo describe de forma sistemática el diseño y la construcción de un molino refinador a esferas o conocido también como molino refinador a bolas es un molino que puede trabajar con granos húmedos y reduce de forma eficiente las partículas de cacao, es un molino refinador que consta de un eje central encargado de dar movimiento a los elementos molturadores (esferas de molienda). Se realizará un estudio de factores que influyen en el comportamiento del molino tales como la velocidad con la que el actúa el sistema y los materiales para la construcción de los diferentes elementos que componen del molino refinador.

Se realizará análisis mecánicos para que las partes que componen el molino refinador tengan las dimensiones adecuadas y que los costos en construcción no sean elevados. Se buscará llevar las dimensiones obtenidas a opciones que se puedan ser adquirir en el mercado ecuatoriano.

Diseño y requerimientos del sistema

En el presente capítulo se describe los requerimientos mecánicos, eléctricos y electrónicos para que el sistema sea más eficiente y los tiempos de molienda se optimicen.

Selección del material

Se asumirá un acero inoxidable 304 por sus características físicas y químicas, las características principales por las que se escogió este acero es que es un acero

apropiado para la industria alimenticia, no contamina el producto y es un acero con cualidades aptas para procesos de soldadura.

Tabla 9

Propiedades del acero inoxidable 304

PROPIEDADES DEL ACERO INOXIDABLE 304

<i>Características</i>		<i>Unidades</i>
<i>Condición</i>	<i>Recocido</i>	---
<i>Resistencia a la Fluencia S_y'</i>	276	<i>MPa</i>
<i>Resistencia Última S_u'</i>	568	<i>MPa</i>
<i>Resistencia a la fractura $\sigma f'$</i>	1600	<i>MPa</i>
<i>Coefficiente $\sigma O'$</i>	1270	<i>MPa</i>
<i>Resistencia a la deformación, exponente m</i>	0,45	---
<i>Resistencia a la fractura ϵf</i>	1,67	---

Propiedades del acero Inoxidable

Son muy buenos resistiendo la corrosión intergranular y al ataque químico del medio ambiente.

Resiste la corrosión a materiales como agua, acidos y álcalis

Nota. Tomado de (Budynas et al., 2012, p. 1007)

Diseño mecánico

Se diseñará y construirá un molino refinador a esferas en el que las dimensiones se calculen en base al diámetro interior de la cuba de molienda, un valor que será asumido con la intención que el molino refinador sea pequeño y que se adapte a las necesidades de un pequeño productor de derivados de cacao.

Se empezará el diseño con el diámetro interior de la cuba que será 22,5 cm este es un dato fundamental ya que nos permite controlar el tamaño del molino.

$$D = 22,5 \text{ [cm]} \approx 225 \text{ [mm]} \quad \text{Ec. 3}$$

Proporciones geométricas para un sistema de agitación "normal"

$$\frac{H}{D} = 1 \quad \text{Ec. 4}$$

Nota. Tomado de (Geankoplis, 1999, p. 165)

Dónde:

H = Altura de la molienda [cm]

D = Diametro interno de la cuba [cm]

HT = Altura de la cuba [cm]

En el proceso de molienda se pueden presentar trayectorias aleatorias lo que ocasiona que la pasta de cacao se desborde, teniendo en cuenta este concepto se tendrá una altura H en la que se da la molienda del cacao conjuntamente con los

elementos molturadores que es la altura de molienda y una altura HT que es la altura de construcción la cuba de molienda. A la altura HT por cuestiones de seguridad se le suma 5cm para prever posibles desbordamientos de la pasta de cacao.

$$HT = H + [5cm] \quad \text{Ec. 5}$$

$$HT = 22,5 + 5$$

$$HT = 27,5 [cm]$$

Volumen de molino

Obteniendo el volumen que el molino refinador es capaz de producir podemos concluir, si las dimensiones que obtuvimos nos proporcionarían un volumen que sea razonable con respecto al costo que tendrá la construcción. El proceso llevará varias horas y si la cantidad de cacao a refinar es muy pequeña no representará el costo de operación. Se usará la altura de molienda para obtener el volumen de molienda, ya que la altura de construcción es para evitar derramamientos. El diseño de la cuba es cilíndrico por lo que se usará la ecuación de un cilindro para obtener el volumen.

$$V_{mol} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot H}{4} \quad \text{Ec. 6}$$

Dónde:

$$V_{mol} = \text{Volumen de Molino } [cm^3]$$

$$D = \text{Diámetro interior de la cuba de molienda } [cm]$$

$$H = \text{Altura de la molienda } [cm]$$

$$H = D$$

$$V_{mol} = \frac{\pi \cdot (22,55)^3}{4} = 8946,176 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$V_{mol} = 8,946 \times 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$$

Masa de las esferas de molienda

La masa de los elementos molturadores depende de la densidad del material que se use para su construcción, el material tiene que ser adecuado para alimentos y debido al constante rozamiento y choque debe ser un material resistente. La masa de las esferas de molienda (elementos molturadores) que se encuentren dentro de la cuba de molienda es un factor que nos permite determinar los costos de construcción y dimensionar el eje de molienda. Las esferas de molienda serán de acero inoxidable 304 por ser apto para la industria alimenticia.

Dónde:

$$m_e = \text{Masa de las esferas de molienda [g]}$$

$$\delta a = \text{Densidad del acero inoxidable 304} \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$$

$$V_{mol} = \text{Volumen de Molino [cm}^3\text{]}$$

$$\delta a = 7,9 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$$

Ec. 7

Nota. Tomado de (Blanco, 2014, p. 6)

$$m_e = V_{mol} \cdot (0,2 - 0,4) \cdot 0,6 \cdot \delta a$$

Ec. 8

Nota. Tomado de (Cabezas Casco, 2017, p. 26)

Entre mayor sea la cantidad de los elementos molturadores, mejor será la calidad de la pasta después del proceso de refinación, se buscará obtener la cantidad precisa de esferas de molienda para que la calidad sea la mejor, los precios no se incrementen exceso y los tiempos de molienda no sean extensos. Podemos usar un factor multiplicador que se encuentre entre (0,2 - 0,4) cuando se usa un factor de 0,2 se obtiene la menor cantidad de esferas, ya que las esferas son bastante densas la altura solo llega al primer agitador provocando que la transmisión de energía cinética no sea la mejor, seleccionado un factor intermedio de 0,3 que me proporciona una buena cantidad de esferas logro transmitir mejor la energía cinética. Las esferas de molienda de 6mm tienen un costo en el mercado ecuatoriano de 28 \$ dólares americanos el kilogramo, en caso de usar un factor multiplicador más alto a 0,3 los costos de construcción se incrementarán.

$$m_e = 8946,176 \cdot 0,3 \cdot 0,6 \cdot 7,9$$

$$m_e = 12721,46 \text{ [g]}$$

$$m_e = 12,721 \text{ [kg]}$$

Cantidad de esferas de molienda o elementos molturadores

Los elementos molturadores que mejor se adaptan al proceso que se encuentran en el mercado ecuatoriano y son de 6 mm, en base a estos diámetros se obtendrá la cantidad de elementos molturadores para el proceso de refinación.

La cantidad de elementos molturadores es importante ya que entre más elementos molturadores la fricción del movimiento genera un incremento en la temperatura en el interior del molino.

El volumen de las esferas de molienda se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$V_{e6} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{e6}^3$$

Ec. 9

El volumen de esferas de molienda de 6mm es:

Dónde:

$$V_{e6} = \text{Volumen de la esfera de 6mm} \quad [cm^3]$$

$$r_{e6} = \text{radio de la esfera de 6mm} \quad [cm]$$

$$V_{e6} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (0,3)^3$$

$$V_{e6} = 0,1130 \quad [cm^3]$$

La masa de cada esfera se obtiene a partir de la fórmula:

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

Ec. 10

$$m_{e6} = \partial a \cdot V_e$$

Dónde:

$$V_{e6} = \text{Volumen de la esfera de 6mm} \quad [cm^3]$$

$$m_{e6} = \text{Masa de la esfera de 6mm} \quad [g]$$

$$\partial a = \text{Densidad del acero inoxidable} \quad \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

$$m_{e6} = 7,9 \cdot 0,1130$$

$$m_{e6} = 0,8934 \text{ [g]}$$

Relacionando el peso total de las esferas de molienda 12721,46g con el peso de cada unidad de esferas, que es 0,8934g el número aproximado de esferas de molienda es de 14239,377 unidades.

$$ne = \frac{m_e}{m_{e6}}$$

Ec. 11

Dónde:

ne = Numero de esferas

m_e = Masa de las esferas de molienda [g]

m_{e6} = Masa de la esfera de 6mm [g]

$$ne = 14239,77 \text{ [unidades]}$$

Volumen de las esferas de molienda dentro de la cuba

$$V_e = \frac{m_e}{\delta a}$$

Ec. 12

Dónde:

m_e = Masa de las esferas de molienda [g]

$$V_e = \text{Volumen de las esferas de molienda} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

$$\delta a = \text{Densidad del acero inoxidable 304} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

Utilizando la ecuación 9 para obtener el volumen que van a ocupar los elementos molturadores dentro de la cuba de molienda y la ecuación 7 para obtener la densidad del acero inoxidable 304:

$$V_e = \frac{12721,46}{7,9} = 1610,311 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$V_e = 1,610 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$$

El volumen que las esferas ocupan dentro de la cuba de molienda es $1,073 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$, sin tener en consideración los huecos que se forman entre los elementos molturadores, para tener en consideración este punto, del total de esferas de molienda que caben en un volumen V_e la fracción de huecos es de 40%.(Blanco, 2014).

Para incluir los huecos que se presentan entre elementos molturadores, al volumen de las esferas V_e calculado anteriormente se le sumará un 40% adicional del volumen de las esferas V_e , esto nos permite saber el volumen real que ocuparan una cantidad $8,480kg$ de elementos molturadores.

$$V_e = V_e + 0,40V_e$$

Dónde:

$$V_e = \text{Volumen de las esferas de molienda} \left[\frac{g}{cm^3} \right]$$

$$V_e = 1,610 \cdot 10^{-3} + 0,40 \cdot 1,610 \cdot 10^{-3}$$

$$V_e = 2,254 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$$

Altura del nivel de esferas

Utilizando la ecuación 6 para calcular la altura que van a ocupar las esferas en el interior de la cuba de molienda.

$$V_e = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot HE}{4}$$

Dónde:

$$HE = \text{Altura de las esferas en el recipiente cilindrico [cm]}$$

$$D = \text{Diametro interior de la cuba de molienda [cm]}$$

$$V_e = \text{Volumen de la esferas [cm}^3\text{]}$$

$$HE = \frac{V_e \cdot 4}{\pi \cdot D^2}$$

Ec. 14

$$HE = \frac{2254 \cdot 4}{\pi \cdot (22,5)^2}$$

$$HE = 5,668 \text{ [cm]}$$

Altura del nivel de cacao

Se estimará la altura que tendrá el cacao seco en la cuba de molienda después de ingresar los elementos molturadores restando a la altura de molienda a la altura de las esferas.

$$HC = H - HE$$

Ec. 15

Dónde:

$HC = \text{altura de cacao [cm]}$

$HE = \text{altura de las esferas [cm]}$

$H = \text{Altura de la molienda [cm]}$

$$HC = 22,5 - 5,668$$

$$HC = 16,832 \text{ [cm]}$$

Volumen de cacao dentro de la cuba de molienda

Utilizando la ecuación 6 para estimar el volumen de cacao a ser refinado.

$$VC = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot HC}{4}$$

Dónde:

$VC = \text{volumen de cacao [cm}^3\text{]}$

$D = \text{Diametro interior de la cuba de molienda [cm]}$

$HC = \text{altura de cacao [cm]}$

$$VC = \frac{\pi \cdot (22,5)^2 \cdot 16,832}{4}$$

$$VC = 6692,5348 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$VC = 6,6925 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$$

Masa de cacao seco a moler

Utilizando la ecuación 10 para estimar la masa de cacao seco:

$$MC = VC \cdot \delta c$$

Dónde:

$VC = \text{volumen de cacao [m}^3\text{]}$

$\delta c = \text{densidad del cacao seco } \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$

$MC = \text{Masa de cacao [Kg]}$

$$\delta c = 600 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

Ec. 16

Nota. Tomado de (Claudi Mans Teixidó, 2015)

$$MC = 6,6925 \cdot 10^{-3} \cdot 600$$

$$MC = 4,0155 \text{ [kg]}$$

Masa de la pasta de cacao a moler

El molino es refinador la mejor opción es usarlo para refinar la pasta de cacao después de la primera molienda.

Utilizando la ecuación 10 para estimar la masa de pasta de cacao:

$$MP = VC \cdot \delta p$$

Dónde:

$$VC = \text{volumen de cacao } [m^3]$$

$$\delta p = \text{densidad de la pasta del cacao } \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$MP = \text{Masa de la pasta de cacao } [Kg]$$

Utilizando la ecuación 7 para estimar la pasta de cacao a ser refinada

$$\delta p = 1080 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

Ec. 17

Nota. Tomado de (Arreaga Barzola, 2015, p. 34)

$$MP = 6,6925 \cdot 10^{-3} \cdot 1080$$

$$MP = 7,2279 [kg]$$

La masa de cacao seco ocupa un menor volumen y más espacio en el interior de la cuba, a comparación de la masa de la pasta de cacao con más volumen y menos espacio, cuando se procesa cacao seco se necesita que la altura de la cuba sea más alta ya que el cacao seco ocupa más espacio que la pasta de cacao.

Una tableta de chocolate contiene alrededor de 65 gramos de pasta de cacao, se podrán producir alrededor de 111,076 tabletas de chocolate en un día sin tener en consideración las pérdidas de pasta de cacao en las esferas del molino y el eje, con pérdidas se podrá tener un aproximado de 105 tabletas de 65 gramos al hacer esta estimación se toma en consideración que en la maquina se queda una pequeña y variable cantidad de pasta de cacao.

Velocidad crítica

Es la velocidad con la que el molino va a trabajar, esta velocidad permite que las esferas de molienda se encuentren en un punto de equilibrio, en que la fuerza centrípeta no adhiera las esferas de molienda a la carcasa del molino, pero una velocidad adecuada para que la molienda sea la correcta, la capacidad de molienda sería mucho menor a la deseada con una velocidad mayor a la crítica ya que entre mayor velocidad, mayor la adherencia de las esferas de molienda a las paredes de la cuba y se produciría un desgaste mayor en las esferas de molienda, al contrario con velocidades muy bajas las esferas de molienda no se mueven con la suficiente velocidad para romper las partículas. (Blanco, 2014)

$$\omega_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}}$$

Ec. 18

Nota. Tomado de (Blanco, 2014)

Dónde:

$\omega_c =$ *Velocidad centripeta* [rpm]

$D =$ *Diametro interno del molino* [m]

$$D = 0,225 \text{ [m]}$$

$$\omega_c = \frac{42,3}{\sqrt{0,225}} = 89,176 \text{ [rpm]}$$

$$\omega_{c75\%} = Vc * 0,75$$

Ec. 19

$$\omega_{c75\%} = 89,176 * 0,75 = 66,87 \text{ [rpm]}$$

Es una buena opción utilizar un 75% de la velocidad crítica para evitar que el proceso se lleve límites de operación, con lo que la velocidad que se utilizará en el proceso de molienda será 66,87 (rpm) y para cálculos se utilizara la velocidad de 89,176 (rpm).

Longitud de los brazos de molienda

Los brazos agitadores sumarán al eje central fuerzas, para determinar estas fuerzas se realiza un análisis dinámico y estático.(Reyes et al., 2013, p. 87). Los brazos agitadores deben estar lo más cercanos posible a las paredes interiores de la cuba de molienda para disminuir la zona de difusión limitada, pero se debe contemplar un distanciamiento adecuado para evitar que se choque con gran fuerza en el caso de que el eje tome una trayectoria inesperada.

Se dimensionará la longitud de los ejes agitadores en base al diámetro interior del tanque, la longitud de los brazos agitadores tiene que ser lo más cercano al diámetro interior del tanque, se usaran esferas de molienda con diámetro mínimo de 6 (mm) a este diámetro aplicaremos una toleración de un 1 (mm) , al tener esta consideración podemos evitar que las esferas de molienda se queden trabadas entre el eje y la pared interior de la cuba de molienda, otro aspecto importante es que el brazo

de molienda tendrá la capacidad de mover la mayoría de las esferas evitando que se queden pegadas en las paredes del tanque, efecto que se da por la fuerza centrípeta. Teniendo una separación de los agitadores a las paredes del tanque de 17,5 (mm) se logra un movimiento de los elementos molturadores efectivo y se evitaban choques entre el eje agitador y las paredes interiores de la cuba de molienda.

$$D_{b_{min}} = D_b + D_p \quad \text{Ec. 20}$$

Dónde:

D_{min} = Distancia del final del agitador a la pared de la cuba [mm]

D_b = Diametro de la esferas [mm]

D_p = Tolerancia para evitar choques abruptos [mm]

$$D_{min} = 6 + 10 = 17,5[mm]$$

La separación de 17,5 mm estará presente en ambos extremos del eje agitador a las paredes interiores de la cuba, será llamada D_a . La zona de difusión limitada que es la distancia que se forma entre el brazo agitador y la pared del molino debe ser lo más pequeña posible para evitar que los elementos molturadores se queden estancados por la velocidad centrípeta, el tomar como punto de partida el diámetro de los elementos molturadores nos permite que exista una adecuada agitación logrando mover todos los elementos dentro del molino.

$$D_a = D - D b_{max}$$

Ec. 21

Dónde:

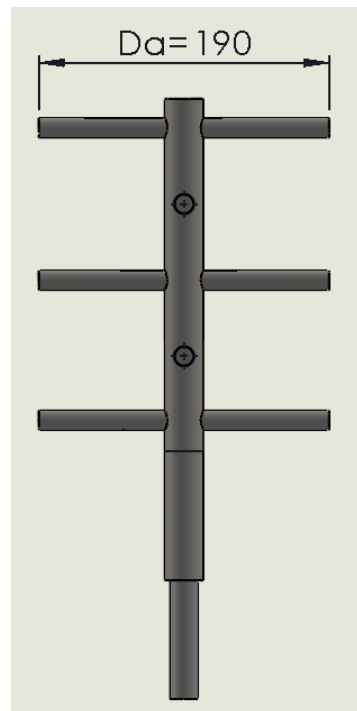
D = *Diámetro interno del molino* [cm]

D_a = *Diámetro del agitador* [cm]

$$D_a = 22,5 - 2 * 1,75 = 19 \text{ [cm]}$$

Figura 6

Diámetro del agitador desde los extremos de la cuba



Altura del primer agitador

La altura del primer agitador al fondo de la cuba no debe ser tan grande ya que afectaría al libre movimiento de las esferas de molienda tampoco puede ser del tamaño de las esferas de molienda o menor ya que con el tiempo las esferas de molienda sufren desgastes. La diferencia de distancia entre la base de la cuba de molienda y la altura del primer agitador debe ser mayor a el diámetro de las esferas de molienda de 6mm ya que si es menor con el paso del tiempo se producirá un daño en la base de la cuba formado caminos en la base de la cuba de molienda, alterando el proceso además que se producirán atascamientos ya que las esferas de molienda con el tiempo sufren desgaste menorando su tamaño este desgaste es aleatorio y poco predecible y en el caso que las bolas de molienda llegaran a tener el mismo tamaño que la altura del fondo de la cuba al primer agitador se podrían quedar trabadas lo que provocaría esfuerzos no deseados del eje pudiendo producir que se salga de su trayectoria o creando caminos en el fondo de la cuba que dañan la maquina y alteran el proceso.

$$Ha = (6 + 1) [mm] = 7 [mm] \quad \text{Ec. 22}$$

Potencia que requiere el sistema

El sistema requiere una potencia en función de la velocidad a la que va a operar el proceso y de las dimensiones del molino. Se tomará en cuenta la velocidad más crítica con la cual operará el molino.

Utilizando la ecuación 18 de la velocidad centrípeta:

$$N = 89,176 [rpm] \approx 9,338 \left[\frac{rad}{s} \right]$$

$$V_{\infty} = \frac{\pi \cdot D_a \cdot N}{60} \left[\frac{m}{s} \right]$$

Ec. 23

Dónde:

$$V_{\infty} = \text{Velocidad final} \left[\frac{\text{rev}}{\text{min}} \right]$$

$$D_a = \text{Diámetro del agitador} \text{ [m]}$$

$$N = \text{Velocidad centripeta} \left[\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right]$$

$$V_{\infty} = \frac{\pi \cdot 0,19 \cdot 89,176}{60}$$

$$V_{\infty} = 0,8871 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Utilizando la ecuación de 6 obtenemos el volumen total:

$$V_T = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot HT}{4}$$

Dónde:

$$D = \text{Diámetro interior de la cuba de molienda} \text{ [m]}$$

$$HT = \text{Altura de la cuba} \text{ [m]}$$

$$V_T = \text{volumen total} \text{ [m}^3\text{]}$$

$$V_T = \frac{\pi \cdot (0,2255)^2 \cdot 0,2755}{4}$$

$$V_T = 11,0 \times 10^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$$

La altura total considera 5cm extras en la cuba de molienda para que no se produzcan derramamientos, se usa el volumen total V_T , ya que es un caso crítico, en el que se necesita más potencia.

$$\varepsilon = \frac{V_e + V_c}{V_T}$$

Ec. 24

Nota. Tomado de (Alvarez Zambrano & Dávila Sánchez, 2011, p. 69)

Dónde:

$V_e = \text{Volumen de las esferas } [m^3]$

$V_c = \text{Volumen del cacao } [m^3]$

$V_T = \text{volumen total } [m^3]$

$\varepsilon = \text{Fracción de volumen}$

$$\varepsilon = \frac{1,610 \cdot 10^{-3} + 6,6925 \cdot 10^{-3}}{11,0 \times 10^{-3}}$$

$$\varepsilon = 0,7547$$

$$P = 0,092 \cdot V_\infty \cdot g \cdot \left(\frac{D_T}{D_a}\right) \cdot \left(\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}\right)^{1/2} \cdot \exp\left(\frac{5,3Ha}{D_T}\right) \cdot (\rho_s - \rho_1) \cdot V_T$$

Ec. 25

Nota. Tomado de (Reyes et al., 2013, p. 65)

Dónde:

$V_\infty = \text{velocidad final } \left[\frac{m}{s}\right]$

$P = \text{Potencia } [W]$

$g = \text{gravedad } 9,8 \left[\frac{m}{s^2}\right]$

$V_T = \text{Volumen del tanque } [m^3]$

$D_T = \text{Diámetro del tanque } [m]$

$D_a = \text{Diámetro del agitador } [m]$

$\varepsilon = \text{Fracción del volumen total ocupada por sólidos}$

$Ha = \text{Altura del 1er agitador medida desde el fondo } [m]$

$\rho_s = \text{Densidad del sólido } \left[\frac{kg}{m^3} \right]$

$\rho_1 = \text{Densidad del líquido } \left[\frac{kg}{m^3} \right]$

La ρ_s que es la densidad de los sólidos, será la densidad de las esferas de molienda que son de acero inoxidable 304. La molienda en seco tiene una densidad en liquido de $\rho_1 = 0$ ya que es la molienda que necesita mayor potencia y se considera un caso crítico.

$$P = 0,092 \cdot 1,017 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot \left(\frac{0,225[m]}{0,19[m]} \right) \cdot \left(\frac{1 - 0,8132}{0,8132} \right)^{1/2} \cdot \exp \left(\frac{5,3 \cdot 7 \cdot 10^{-3}}{0,215[m]} \right)$$

$$\cdot \left(7900 \left[\frac{kg}{m^3} \right] - 0 \right) \cdot 8,946 \times 10^{-3} [m^3]$$

$$P = 1,086 \frac{1}{s} \cdot \left(\frac{1 - 0,7547}{0,7547} \right)^{1/2} \cdot \exp \left(\frac{5,3 \cdot 7 \cdot 10^{-3}}{0,215[m]} \right) \cdot \left(7900 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \right) \cdot 8,946 \times 10^{-3} [m^3]$$

$$P = 1,086 \cdot 0,5701 \cdot 1,1883 \cdot \left(7900 \frac{kg}{m^3} \right) \cdot 8,946 \times 10^{-3} [m^3]$$

$$P = 51,995 [W]$$

En los molinos de atricción se trabaja con tres o cuatro filas de brazos en excepción a los utilizados en los molinos atritor los cuales poseen más filas dependiendo del volumen del contenedor. En este caso se considera cinco filas para la molienda ya que el motor que se usara es capaz de mover este número de brazos. El número de brazos incrementa el consumo de potencia por tanto se realiza una relación de los números de brazos que componen el eje agitador y la potencia que consumen en total.(Alvarez Zambrano & Dávila Sánchez, 2011, p. 70)

$$P_{real} = N_a \cdot P$$

Ec. 26

Dónde:

P_{real} = Potencia Real [W]

P = Potencia [W]

N_a = Numero de agitadores

$$P_{real} = 5 * 51,995 = 259,975 \text{ [W]}$$

$$P_{real} = 0.348 \text{ [HP]}$$

En cuanto a, motorreductores y demás equipos eléctricos y mecánicos es más factible conseguirlos en el mercado cuando hablamos de valores estandarizados el valor más cercano a 0.348 HP en equipos, es ½ HP.

$$P_{real} = \frac{1}{2} \text{ [HP]}$$

Trasmisión de par de torsión

Unas de las funciones de las fechas es transmitir movimiento a través del eje. Este debe tener el tamaño adecuado para soportar el esfuerzo y la deflexión por torsión. (Budynas & Murrieta Murrieta, 2012, p. 347) . El par de torsión se obtendrá a partir de la potencia del motor que se va utilizar en el proceso que es un motor de 0,5HP y la velocidad centrípeta obtenida para molinos a esferas en la base al diámetro interior de la cuba.

$$T = \frac{9550 \cdot P \text{ [Kw]}}{\omega c \text{ [rpm]}}$$

Ec. 27

Dónde:

$$T = \text{Par producido por el motor} \left[\frac{N}{m} \right]$$

$$\omega c = \text{Velocidad critica} \text{ [rpm]}$$

$$P = \text{Potencia} \text{ [Kw]}$$

$$P = \frac{1}{2} \text{ [Hp]} \approx 0,373 \text{ [Kw]}$$

$$T = \frac{9550 \cdot 0,373}{89,17}$$

$$T = 39,947 \left[\frac{N}{m} \right]$$

Motorreductor

Un motorreductor contiene en su estructura un motor y un reductor que me permiten optimizar espacio y que la maquina sea más compacta, al escoger el motorreductor puedo reducir la velocidad hasta donde las características del motorreductor me lo permitan la ventaja ante la otra alternativa que son las poleas es la optimización del tamaño.

El motor tiene que cumplir con ciertas características para que se adapte al proceso, las dimensiones del molino nos permiten refinar 7,22 kg de pasta de cacao, que considera como una producción pequeña, al tomar en cuenta este aspecto se necesitara 0,5HP de potencia. En la tabla 7 se muestran algunas características que presentan los motores monofásicos y trifásicos, con las que se escogió un motor trifásico con el objetivo de tener una buena eficiencia y flexibilidad y el factor más importante el par constante, lo hacen una buena opción.

La potencia que se necesita en el motor es de 0,5 HP, y una frecuencia de 60Hz, la eficiencia que nos ofrece la maquina es de 72,7% es un motor trifásico que usualmente se usa en la industria entonces para controlar la velocidad del motorreductor se utilizará un variador de frecuencia con el cual nos hace posible trabajar con un motor trifásico.

Tabla 10

Características del motor

Motor AC				
AOKMAN 3~IE2 – 7124 – 4/B5				
<i>IP: 55</i>	<i>S1</i>		<i>PESO: 5,80KG</i>	
<i>Conexion</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>Kw</i>	<i>A</i>	<i>cosφ</i>
Δ	60Hz	0,37	0,89	0,75

<i>Conexion delta</i>				
Y	60Hz	0,37	1,78	0,75
<i>Conexion estrella</i>				

Para reducir las rpm (revoluciones por minuto) en el motor se usará motorreductor AOKMAN tipo 3~IE2 – 7124 – 4/B5 , con relaciones de transmisión i15, que nos permite un control seguro y eficiente a comparación de un sistema de poleas, es más seguro en la trasmisión de potencia, el tamaño que ocupa es más reducido la instalación es más sencilla y nos permite reducir los costos de mantenimiento a largo plazo y alarga la vida del motor.

Tabla 11

Características del motorreductor FCN40 ITAL

Motorreductor FCN40 ITAL	
<i>P(Kw)</i>	0,37Kw
$n2 \left(\frac{1}{\text{min}} \right)$	93,3
<i>M2(Nm)</i>	31
<i>t. s.</i>	1,3
<i>i</i>	15
<i>Size</i>	FCN 40
<i>PAM</i>	71
<i>Fr2(N)</i>	1657
<i>η</i>	0,82

$$i = 15$$

$$\omega_s = \omega_e \cdot i$$

Dónde:

$\omega_s = \text{Velocidad de salida [rpm]}$

$\omega_e = \text{Velocidad de entrada [rpm]}$

$i = \text{Relación de transmisión}$

Utilizando la ecuación 15 obtenemos la ω_e

$$\omega_e \approx \omega_c$$

$$\omega_s = \omega_e \cdot i$$

$$\text{reducción} = \frac{1}{i}$$

$$\text{reducción} = \frac{1}{15} = 0,0666$$

$$\omega_s = 1650 \cdot 0,0666$$

$$\omega_s = 110 \text{ rpm}$$

Diámetro del eje central

El eje central transmite energía cinética a los elementos molturadores o esferas de molienda mediante los brazos agitadores, al obtener la dimensión mínima necesaria para soportar la potencia del motor, nos aseguramos de que el eje no sufra fracturas o roturas en proceso. Para la aproximación del diámetro del eje, se debe conocer previamente la potencia y la velocidad a la cual el eje se someterá.

Bajo efectos de torsión, el esfuerzo cortante máximo se expresa mediante la ecuación 29 la cual nos servirá para obtener el diámetro mínimo que soportaría este movimiento.

$$\tau = \frac{16 \cdot T}{\pi \cdot D_E^3}$$

Ec. 28

Nota. Tomado de (Budynas & Murrieta Murrieta, 2012, p. 33)

Dónde:

$D_E =$ *Diámetro del eje central* [mm]

$\tau =$ *Esfuerzo cortante máximo* $\left[\frac{N}{m^2} \right]$

$T =$ *Par producido por el motor* $\left[\frac{N}{m} \right]$

$$D_E = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot T}{\pi \cdot \tau}}$$

$$D_E = \sqrt[3]{\frac{16 \cdot 39,947 \left[\frac{N}{m} \right]}{\pi \cdot 276 \cdot 10^6 \left[\frac{N}{m^2} \right]}}$$

$$D_E = 9,033 \cdot 10^{-3}$$

$$D_E = 9,033 \text{ [mm]}$$

$$DE = DE * Fs$$

Ec. 29

$$DE = 9,033 * 2$$

$$DE > 18,066 \text{ [mm]}$$

En condiciones de torsión, el diámetro del eje central debe ser superior a 18,006mm, el diámetro final del eje central depende del tamaño de la caja reductora

teniendo un radio de 15mm el diámetro que vamos a utilizar es 25mm para tener un buen ajuste.

$$DE = 25 \text{ [mm]}$$

El diámetro del eje además de resistir la potencia del motor debe considerar que en su diseño constan brazos agitadores que tienen que tener un tamaño inferior con el fin de forma una estructura capaz de coincidir y formar un eje agitador. El eje central tendrá un diámetro de 25 (mm) de diámetro y un largo de 225 (mm).

Masa de los elementos a rotar por los brazos de molienda

Es importante conocer la masa total de los elementos que van rotar dentro de la cuba del molino, para conocer la fuerza a la que los brazos de molienda deben resistir, cuando el elemento a moler es pasta de cacao la masa es mayor comparado a cuando el elemento a moler es cacao, la capacidad de moler para pasta de cacao anteriormente calculada $MP = 7,227$ (kg) ya que es el caso en el que más fuerza se necesita. El grado de llenado es el volumen del conjunto, de la pasta de cacao o cacao en pepa con los elementos molturadores(esferas de molienda), un factor que afecta directamente al rendimiento del molino (Blanco, 2014, p. 5)

Tabla 12

Masa de los elementos a rotar por el eje

ELEMENTO	CANTIDAD	PESO(Kg)
Masa de elementos molturadores	1	12,721 [kg]
Masa de la Pasta de cacao	1	7,227 [kg]

Total	2	19,948 [kg]
-------	---	-------------

$$m = 19,948 \text{ [kg]}$$

Fuerza Centrípeta

La estimación de la fuerza centrípeta en los agitadores, se puede plantear usando la segunda ley de newton ya que esta ley, está relacionada con la velocidad centrípeta.

En la ecuación 18 obtenemos la velocidad centrípeta:

$$\omega_c = 89,176 \text{ [rpm]}$$

$$\omega_c \approx 9,33 \left[\frac{\text{rad}}{\text{seg}} \right]$$

$$a_c = \omega_c^2 \cdot r$$

Ec. 30

Dónde:

$$a_c = \text{acerleración centripeta} \left[\frac{\text{m}}{\text{seg}^2} \right]$$

$$r = \text{radio [m]}$$

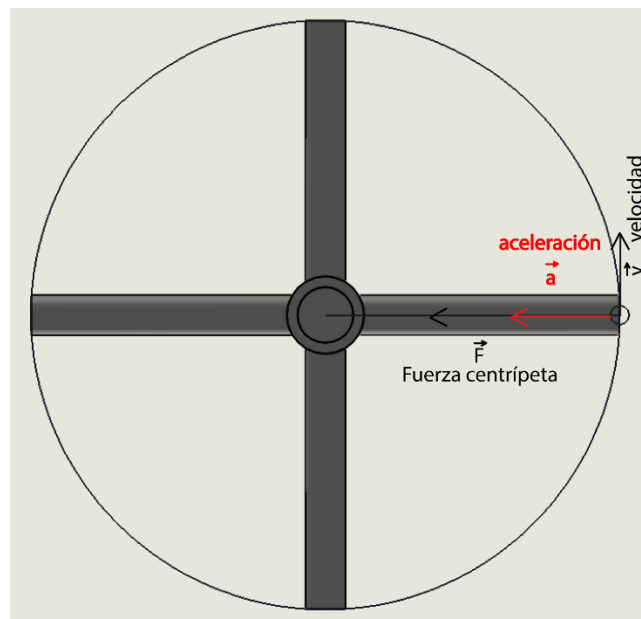
$$a_c = (9,33)^2 \cdot 0,0825$$

$$a_c = 7,181 \left[\frac{\text{m}}{\text{seg}^2} \right]$$

La aceleración centrípeta nos permite expresar la rapidez con la que los elementos molidores cambian de velocidad hacia el centro del molino.

Figura 7

Aceleración centrípeta



$$F_c = m \cdot a$$

Ec. 31

Dónde:

$$m = \text{masa [kg]}$$

$$a = \text{aceleración} \left[\frac{m}{seg^2} \right]$$

$$F_c = \text{Fuerza centrípeta [N]}$$

$$F_c = 19,948 \cdot 7,181$$

$$F_c = 143,246 \text{ [N]}$$

La fuerza con que son atraída la pasta y los elementos molturadores hacia el centro de la circunferencia es 143,246 (N).

Diseño de los brazos de molienda

Los brazos de molienda transmiten el movimiento a los elementos molturadores para que sean capaces de reducir las partículas de cacao al mínimo tamaño posible, los brazos de molienda deben ser lo suficientemente resistentes para que su forma no ceda con el movimiento y el paso del tiempo, si no son lo suficiente resistentes se deforman o se rompen.

Para diseñar los brazos de molienda se debe conocer el torque que el motor debe transmitir al eje, para que cumpla la función de mover los elementos molturadores de una manera eficiente y con la velocidad adecuada para que todas las esferas de molienda realicen una correcta trayectoria alrededor de la cuba de molienda disminuyendo el tamaño de las partículas.

Los brazos de molienda tienen que mover de manera efectiva los elementos molturadores, deben ser diseñados de manera que todos los elementos molturadores se muevan a la velocidad centrípeta suficiente para que no se queden estancados en las paredes de la cuba.

En la ecuación 21 se pudo concluir que el motor puede mover hasta 8 brazos agitadores.

Los brazos agitadores sumaran esfuerzos al eje central, por consiguiente si aumentamos la cantidad de brazos agitadores se necesitara más potencia , al igual que si aumentamos el número esferas de molienda, cuando aumentamos el número de brazos agitadores la distancia entre los agitadores disminuye logrando que con menos cantidad de esferas podemos conseguir que exista mayor contacto entre el agitador y las esferas, trasmitiendo más energía cinética a las esferas de molienda, otro factor importante es que a mayor de numero de esferas será mejor la molienda, pero se debe tener en consideración que si aumentamos el número de esferas y tenemos el máximo posible de agitadores en el molino, se tendrá que aumentar también la potencia de trabajo aumentando considerablemente el tamaño del motor, elevando costos en materiales electrónicos como variadores de frecuencia y protecciones ya que serán adquiridos para controlar más potencia así elevando los costos de producción. Se debe tener en cuenta que es más importante el volumen esferas de molienda que la cantidad de brazos agitadores, ya que las esferas no ocupan mucho volumen se necesitara una mayor cantidad para elevar la altura de llenado, a pesar que las esferas ocupen el mayor espacio posible en la cuba no todos los agitadores tendrán contacto con las esferas. Es aconsejable tener en consideración la altura de llenado de las esferas y la distancia de los agitadores con la base de la cuba para saber cuántos agitadores tendrán contacto con las esferas.

En el cálculo de la cantidad de esferas que se necesita para el molino refinador, en la ecuación 8 se tiene un factor de 0,2 a 0,4 que es directamente proporcional, este es un valor asumible según el diseñador y su presupuesto, ya que dependiendo del valor que se escoja dentro de este rango se tendrá cierta cantidad de esferas de

molienda por ende el precio variara, entre más esferas el costo de construcción aumentara, pero tenemos que tener en consideración que estas son importadas y bastantes escasas en el mercado ecuatoriano y tener un numero alto de esferas en el diseño es un poco riesgoso, entre más alto el valor asumido en el rango mayor cantidad de esferas, lo que implica que el volumen de llenado de las esferas aumentara, por consiguiente más contacto con los brazos agitadores mejorando la trasmisión de energía y movimiento, pero tener más esferas de molienda también incrementa las pérdidas de pasta de cacao ya que más cacao se quedara incrustado en las esferas, por el contrario tener el mínimo de esferas si bien reduce las pérdidas de cacao también se tiene menor volumen de llenado y menos trasmisión de energía.

Diámetro los brazos agitadores para un molino a esferas

El agitador es el encargado de generar un movimiento aleatorio, lo que hace que las esferas ejerzan fuerzas de corte y de impacto sobre el material lo que produce una reducción en los granos de cacao, la finura resultante de pasta dependerá de la velocidad critica del eje y el tiempo de permanencia del mismo. Eje que a lo largo está equipado con brazos que deben tener la suficiente acción de agitado para obligar a las esferas a que choquen entre sí para que la pasta de cacao se reduzca.

Para la estimación del diámetro de los brazos de molienda previamente se debe tener en consideración el diámetro de los elementos molturadores ya que el diámetro de los brazos de molienda debe ser mayor al diámetro de los elementos molturadores el mayor diámetro que se usara es de 8mm, posteriormente se calculara un factor de seguridad con el que se deducirá si el valor es aceptable, en caso de no serlo ser volverá un proceso iterativo.

$$D_{ba} > 6mm$$

Dónde:

$$D_{ba} = \text{Diámetro del brazo agitador}[mm]$$

El diámetro de los brazos agitadores debe ser mayor al máximo tamaño de las esferas de molienda, para que la estructura no falle se usara un valor comercial en ejes de acero inoxidable, un diámetro comercial de ½ pulgada.

$$D_{ba} = 12,7mm$$

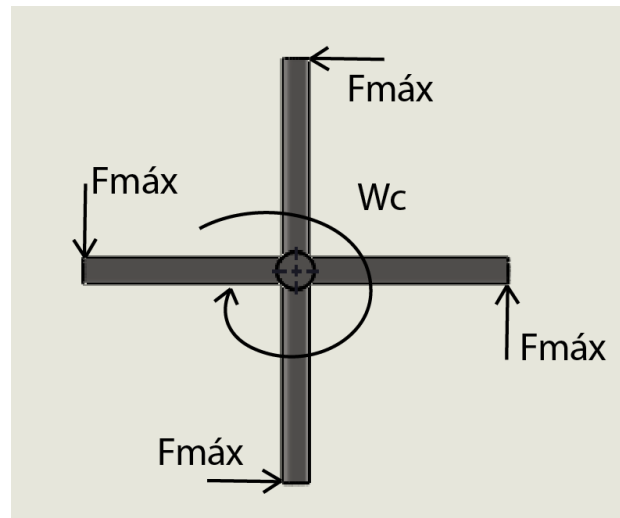
Comportamiento estático de los brazos de molienda

El movimiento de los brazos de molienda, no es un movimiento predecible la trayectoria de los elementos molturadores es aleatoria, por lo que es necesario analizar la distribución de la carga en los brazos de molienda teniendo en consideración siempre casos críticos, para que bajo cualquier circunstancia el eje sea capaz de mover los elementos molturadores a la velocidad centrípeta y fuerza necesaria para reducir las partículas.

El diseño de los brazos de molienda se realizará bajo criterios de fatiga, se considera que el brazo de molienda esta empotrado en un extremo del eje, sometido a flexión mecánica en el extremo. Se diseñará los brazos considerando el caso más crítico, si molino trabajara con un solo brazo ya que tendría que mover los elementos molturadores y la masa de cacao considerando que el molino puede estar al máximo de su capacidad la fuerza máxima que se presenta en estos casos en los extremos del agitador.

Figura 8

Comportamiento estático de los brazos de molienda



La separación del final de los agitadores a las paredes de la cuba es de 17,5mm, el diámetro interior de la cuba de molienda es de 225mm y el eje central un diámetro de 25mm. Los 8 brazos de molienda estarán soldados al eje central.

$$L_a = \frac{D - 2 \cdot D_{b_{min}} - D_E}{2}$$

Ec. 32

Dónde

L_a = Longitud de los agitadores [mm]

$D_{b_{min}}$ = Distancia del final del agitador a la pared de la cuba [mm]

D = Diámetro interno del molino [mm]

D_E = Diámetro del eje central [mm]

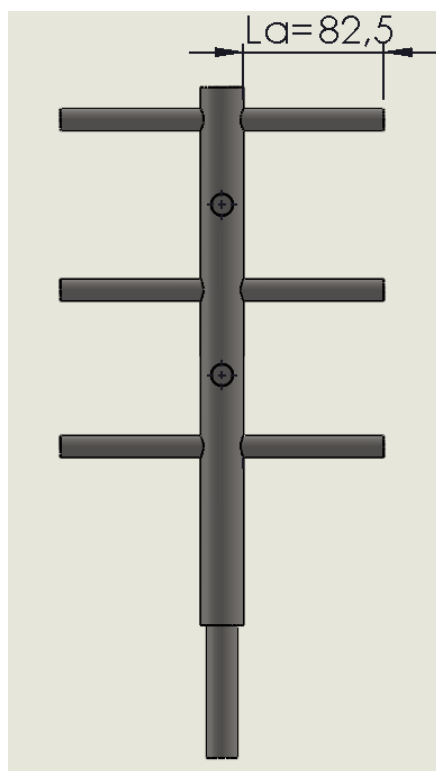
$$La = \frac{225 - 2 * 17,5 - 25}{2}$$

$$La = 82,5mm$$

La longitud de los agitadores para que sean capaces de dar movimiento a la mayor cantidad de elementos molturadores es $La=8,25cm$.

Figura 9

Longitud del agitador



$$T = 5 \cdot F_{max} \cdot La$$

Dónde:

$$T = \text{Par producido por el motor} \left[\frac{N}{m} \right]$$

$$F_{max} = \text{Fuerza Maxima en los extremos del agitador} [N]$$

$$L_a = \text{longitud del brazo de palanca} [m]$$

$$F_{max} = \frac{39,947}{5 \cdot 0,0825}$$

$$F_{max} = 96,8412 [N]$$

La fuerza mínima para este sistema es $F_{min} = 0$, se presenta cuando en la cuba no encontramos esferas de molienda y el agitador no tendrá presentar ningún esfuerzo.

$$F_m = \frac{F_{m\acute{a}x} + F_{min}}{2}$$

Ec. 33

Donde:

$$F_m = \text{Fuerza media} [N]$$

$$F_{min} = \text{Fuerza mínima} [N]$$

$$F_{m\acute{a}x} = \text{Fuerza máxima} [N]$$

$$F_m = \frac{96,8412 + 0}{2}$$

$$F_m = 48,420N$$

Ya que la fuerza mínima que presenta el sistema es 0 la fuerza alterna y media es igual.

$$F_m = F_a$$

Ec. 34

Dónde:

$$F_a = \text{Fuerza alterna [N]}$$

$$F_m = \text{Fuerza media [N]}$$

$$F_a = 48,420N$$

$$M_m = M_a = F_m * L_a$$

Ec. 35

Dónde:

$$M_m = \text{Momento medio [Nm]}$$

$$M_a = \text{Momento alterno [Nm]}$$

$$L_a = \text{longitud del brazo de palanca [m]}$$

$$F_m = \text{Fuerza media [N]}$$

$$M_m = 48,420N * 0,0825m$$

$$M_m = 3,994Nm$$

$$M_{m\acute{a}x} = F_{m\acute{a}x} * L_a$$

Ec. 36

Dónde:

$$M_{m\acute{a}x} = \text{Momento m\acute{a}ximo [Nm]}$$

$$F_{m\acute{a}x} = \text{Fuerza m\acute{a}xima [N]}$$

$$L_a = \text{longitud del brazo de palanca [m]}$$

$$M_{m\acute{a}x} = 96,8412 * 0,0825m$$

$$M_{m\acute{a}x} = 7,989 \text{ Nm}$$

Figura 10

Esquema de carga del brazo agitador



Figura 11

Fuerza Cortante (Comportamiento estático agitadores)

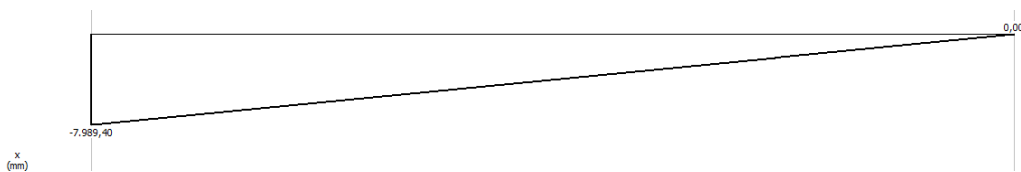
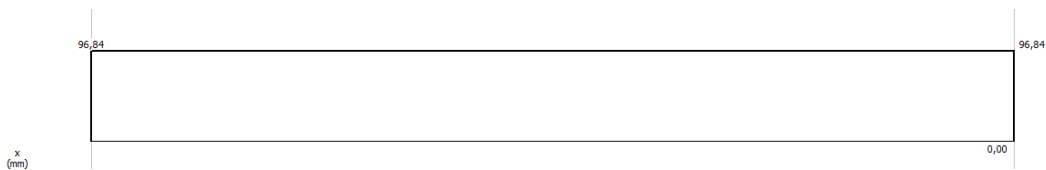


Figura 12:

Momento Flector (Comportamiento estático agitadores)



Se estudiará como si fuera una viga de 82,5mm de longitud empotrada en el extremo, que tendrá la función de dar movimiento a los elementos molturadores conjuntamente con la pasta de cacao, para dar movimiento a estos elementos se necesitara una fuerza de 96,8412 Newtons, con la ayuda del software MDSolid 4.0, se obtendrán el esquema de carga de fuerza cortante y momento flector. Obteniendo el momento flector máximo $M_{m\acute{a}x} = 7,989 Nm$ que nos servirá para obtener el factor de seguridad.

$$M_{m\acute{a}x} = 7,989 [Nm]$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{32M_{m\acute{a}x}}{\pi \cdot D_{ba}^3}$$

Ec. 37

Dónde:

$D_{ba} =$ *Diametro del brazo agitador* [m]

$M_{m\acute{a}x} =$ *Momento máximo* [Nm]

$\sigma_{m\acute{a}x} =$ *Esfuerzo máximo* [MPa]

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{32 \cdot 7,989Nm}{\pi \cdot (12,7 \cdot 10^{-3}m)^3}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 39,726MPa$$

Utilizando la ecuación 2, el factor de seguridad en la construcción de los brazos de molienda será:

$$n_e = \frac{S_y}{\sigma_{m\acute{a}x}}$$

Ec. 38

Dónde:

n_e = Factor de seguridad

$\sigma_{m\acute{a}x}$ = Esfuerzo máximo [MPa]

S_y = Resistencia a la fluencia [MPa]

$$n_e = \frac{276 \cdot 10^6}{39,726 \cdot 10^6}$$

$$n_e > 6,9475$$

Un factor de seguridad superior a 1 nos asegura que la estructura resistirá en caso tener más peso del calculado. El factor de seguridad $n_e > 6,9475$ nos indica que el eje esta sobredimensionado, esto se dio debido a que buscamos los elementos más próximos en el mercado ecuatoriano.

$$\sigma_{min} = 0$$

Ec. 39

Dónde:

σ_{min} = Esfuerzo mínimo [MPa]

Cuando el esfuerzo mínimo en el sistema es 0, nos referimos al momento cuando no existe contacto entre el brazo de molienda y las esferas de molienda.

$$\sigma_{med} = \frac{\sigma_{m\acute{a}x} + \sigma_{min}}{2}$$

Ec. 40

Dónde:

$$\sigma_{min} = \text{Esfuerzo minimo [MPa]}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \text{Esfuerzo m\acute{a}ximo [MPa]}$$

$$\sigma_{med} = \text{Esfuerzo medio [MPa]}$$

$$\sigma_{med} = \frac{39,726 + 0}{2}$$

$$\sigma_{med} = 19,863 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{med} = \sigma_a$$

Ec. 41

Dónde:

$$\sigma_a = \text{Esfuerzo alterno [MPa]}$$

$$\sigma_a = 19,863 \text{ [MPa]}$$

Comportamiento dinámico de los brazos de molienda

Se consideran que se encuentran fuerzas que actúan en el sistema, de tal forma que la fuerza máxima es la que se presenta cuando los brazos agitadores impactan con los elementos molturadores y la fuerza mínima que es la fuerza que se presenta cuando la maquina no presenta contacto con los elementos molturadores ni la pasta de cacao.

La velocidad de las esferas de molienda depende de que tan alejadas estén del centro de movimiento, la velocidad es proporcional al brazo de palanca que se utiliza

para mover las esferas de molienda así que a lo largo de brazo agitador se mueven con distintas velocidades las esferas de molienda.

$$v = r \cdot \omega_c \quad \text{Ec. 42}$$

Dónde:

$$v = \text{Velocidad lineal} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$r = \text{Radio} [m]$$

$$\omega_c = \text{Velocidad centripeta} \left[\frac{rad}{seg} \right]$$

Para obtener la fuerza máxima es necesario obtener la energía cinética que se produce en el impacto.

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m_b \cdot v_b^2 \quad \text{Ec. 43}$$

Dónde:

$$E_c = \text{Energía cinética} [J]$$

$$m_b = \text{masa de una bola} [kg]$$

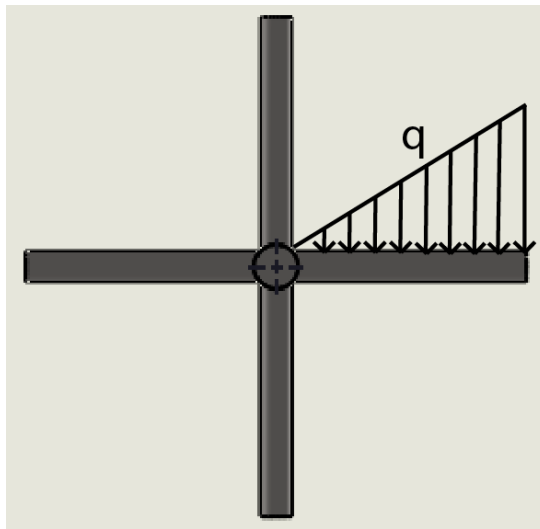
$$v_b = \text{velocidad máxima de una bola} [m/s]$$

$$m_b = 2,117 \cdot 10^{-3} [kg]$$

La velocidad que las esferas adquieren es mayor entre más alejadas se encuentren del eje central, por lo que se presenta una carga triangular.

Figura 13

Distribución de carga triangular en el brazo de molienda



A lo largo del brazo agitador se podrían ubicar cierta cantidad de esferas de 6mm se considera esta situación como la peor condición a la que puede estar sometido el brazo agitador, ya que la longitud del brazo agitador es $L_a=82,5\text{mm}$ a lo largo se pueden impactar un máximo 14 esferas de molienda al mismo tiempo, cada bola de molienda tendrá una velocidad lineal diferente lo que conlleva a obtener una energía cinética diferente para cada bola de molienda.

Tabla 13*Energía cinética de las esferas de molienda*

Bola	Wc (rad/s)	Posición(m)	Distancia al centro del movimiento (m)	v (m/s)	Energía Cinética (KJ)
1	9,338	0,0825	0,095	0,88711	4,14727E-05
2	9,338	0,0765	0,089	0,831082	3,63995E-05
3	9,338	0,0705	0,0705	0,658329	2,28399E-05
4	9,338	0,0645	0,0645	0,602301	1,91177E-05
5	9,338	0,0585	0,0585	0,546273	1,57263E-05
6	9,338	0,0525	0,0525	0,490245	1,26658E-05
7	9,338	0,0465	0,0465	0,434217	9,93622E-06
8	9,338	0,0405	0,0405	0,378189	7,53746E-06
9	9,338	0,0345	0,0345	0,322161	5,46957E-06
10	9,338	0,0285	0,0285	0,266133	3,73254E-06
11	9,338	0,0225	0,0225	0,210105	2,32638E-06
12	9,338	0,0165	0,0165	0,154077	1,25107E-06
13	9,338	0,0105	0,0105	0,098049	5,06633E-07
14	9,338	0,0045	0,0045	0,042021	9,30551E-08
Total, de energía cinética					8,73684E-06

$$E_c = 8,73684 \cdot 10^{-3} [J]$$

La energía potencial elástica en el sistema será el resultado del choque del brazo de molienda y los elementos molturadores, lo que produce deformación.

$$E_e = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \delta_{m\acute{a}x}^2$$

Ec. 44

Nota. Tomado de (Alvarez Zambrano & Dávila Sánchez, 2011, p. 80)

Dónde:

$E_e =$ Energía potencial elástica [Pa]

$k =$ constante elástica [N/m]

$\delta_{m\acute{a}x} =$ deformación máxima [m]

$$I = \frac{\pi \cdot (D_{ba})^4}{64}$$

Ec. 45

Dónde:

$I =$ Momento de inercia [m⁴]

$D_{ba} =$ Diámetro del brazo agitador [m]

$$I = \frac{\pi \cdot (12,7 \cdot 10^{-3})^4}{64}$$

$$I = 1,2769 \cdot 10^{-9} \text{ [m}^4\text{]}$$

Donde el módulo de elasticidad del acero está dado por:

$$E_e = 193 \cdot 10^9 \text{ [Pa]}$$

(Ficha Técnica del Acero Inoxidable, s. f.)

La fuerza de impacto F_i es la fuerza que se presenta en una carga triangular

$$F_i = \sqrt{\frac{120 \cdot E_c \cdot I \cdot E_e}{11 \cdot L_a^3}}$$

Ec. 46

Dónde:

$E_c = \text{Energía cinética [J]}$

$E_e = \text{Modulo elastico [Pa]}$

$I = \text{Inercia [m}^4\text{]}$

$L_a = \text{Longitud del agitador [m]}$

$F_i = \text{Fuerza de impacto [N]}$

$$F_i = \sqrt{\frac{120 \cdot 8,73684 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2769 \cdot 10^{-9} \cdot 193 \cdot 10^9}{11 \cdot 0,0825^3}}$$

$$F_i = 204,5255 \text{ [N]}$$

La zona elástica está dada según la ley de Hooke por medio de la siguiente ecuación:

$$F_i = k \cdot \delta_{\text{máx}} \text{ [N]}$$

Ec. 47

Dónde:

$F_i = \text{Fuerza de impacto [N]}$

$k = \text{constante elástica [N/m]}$

$\delta_{m\acute{a}x} = \text{deformaci3n m\acute{a}xima [m]}$

Bas\ndose en la ley de la conservaci3n de la energ\fa, la energ\fa cin\etica de las esferas de molienda ser\fa igual a la de impacto de los brazos agitadores.

Utilizando la ecuaci3n 43 de energ\fa cin\etica:

$$E_c \cdot 2 = m_b \cdot v_b^2$$

$$E_c = 8,73684 \cdot 10^{-3} [J]$$

$$E_c \cdot 2 = 17,47368 \cdot 10^{-3} J$$

$$E_c = E_e$$

$$\frac{1}{2} \cdot m_b \cdot v_b^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{F_i}{\delta_{m\acute{a}x}} \cdot \delta_{m\acute{a}x}^2$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{m_b \cdot v_b^2}{F_i}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{17,47368 \cdot 10^{-3} [N \cdot m]}{204,5255 [N]}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = 8,5435 \cdot 10^{-5} \text{ [m]}$$

La deblexi3n máxima que se va a presentar en el extremo de la viga con una carga triagular esta y dada por:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{11 \cdot q_0 \cdot L^4}{120 \cdot E_e \cdot I}$$

D3nde:

$$q_0 = \text{Carga máxima por unidad de longitud} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$$

$$L = \text{Longitud de la viga [m]}$$

$$E_e = \text{M3dulo de elasticidad del acero [Pa]}$$

$$I = \text{Momento de inercia [m}^4\text{]}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = \text{deformaci3n máxima [m]}$$

$$q_0 = \frac{120 \cdot E_e \cdot I \cdot \delta_{m\acute{a}x}}{11 \cdot L^4}$$

$$q_0 = \frac{120 \cdot 200 \cdot 10^9 \cdot 1,2769 \cdot 10^{-9} \cdot 8,5435 \cdot 10^{-5} \text{ [m]}}{11 \cdot 0,0825^4}$$

$$q_0 = 5138,016 \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right]$$

Figura 14

Esquema de carga (Comportamiento dinámico)

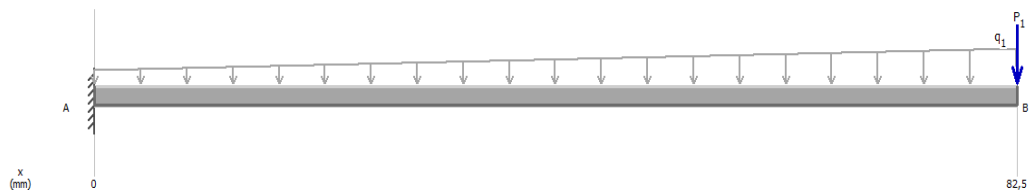


Figura 15

Fuerza Cortante (Comportamiento dinámico)

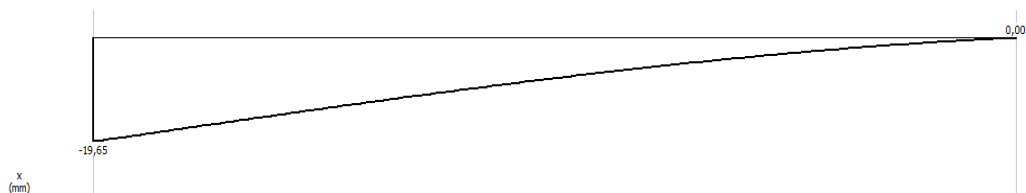
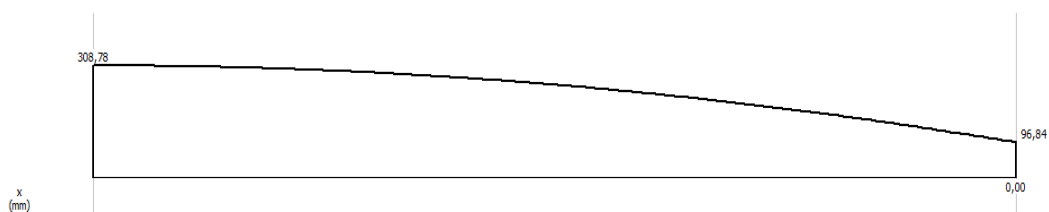


Figura 16

Momento flector (Comportamiento dinámico)



Factores que modifican el límite de resistencia

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S_e'$$

Ec. 48

Nota. Tomado de (Budynas & Murrieta Murrieta, 2012, p. 273)

Dónde:

k_a = factor de modificación por la condición superficial

k_b = factor de modificación por el tamaño

k_c = factor de modificación por la carga

k_d = factor de modificación por la temperatura

k_e = factor de confiabilidad

k_f = factor de modificación por efectos varios

S_e' = límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria [MPa]

S_e = límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso. [MPa]

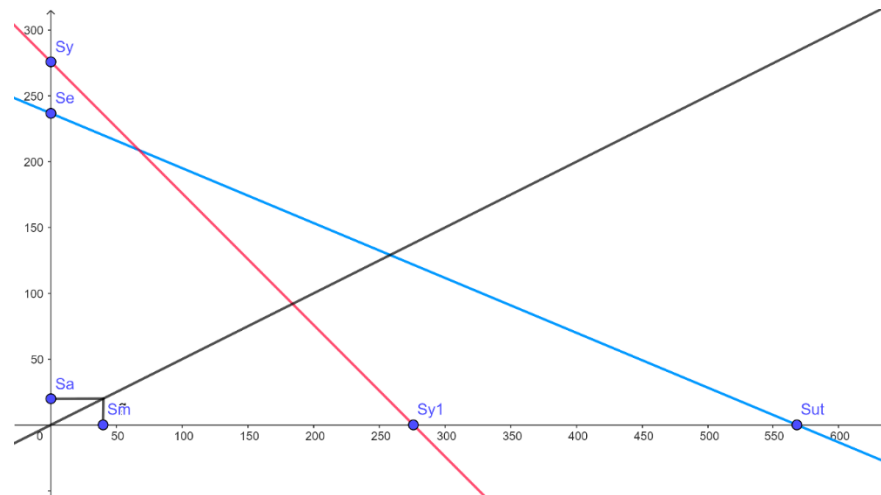
Utilizando la Tabla 6: Propiedades del acero inoxidable 304, obtenemos la resistencia última a la tracción

$$S_e' = \overline{S_{ut}} \leq 568 \text{ [MPa]}$$

Tabla 14*Factores Modificadores*

Factores Modificadores	
k_a	0,839
k_b	0,880
k_c	0,59
k_d	1,011
k_e	1
k_f	1
S_e'	284MPa
S_e	125,073MPa

El límite de la resistencia a la fatiga que los brazos de molienda presentan es 125,073MPa.

Figura 17*Diagrama de fatiga*

Acople

Se uso un retén *NBR* $\varnothing 42 - 25 - 10$, capaz de soportar una temperatura de -30 a 120°C para complementar el ajuste del eje.

Figura 18

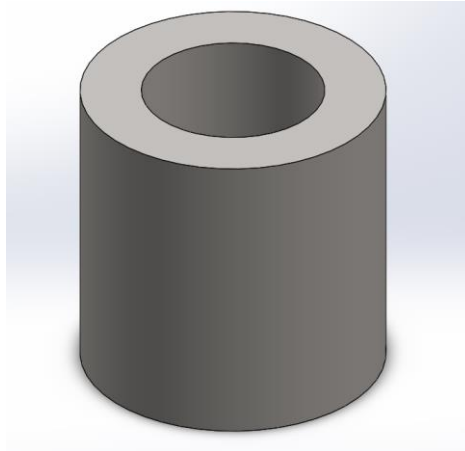
Retenedor 45-25-10



Se realizo con la ayuda de torno un acople entre la brida y el retenedor:

Figura 19

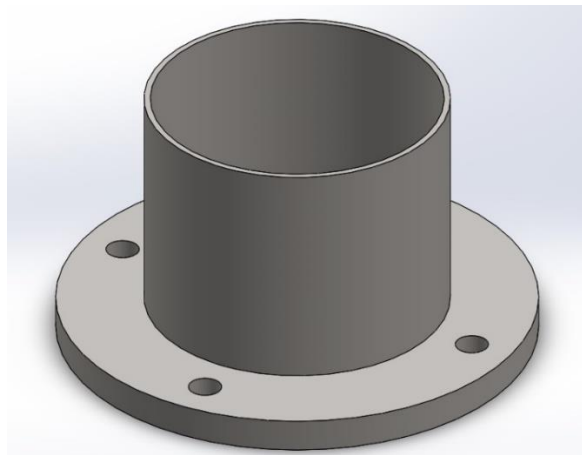
Acople para el eje la brida y el retenedor



Conjuntamente con una brida de diámetro interior de 70mm para acoplar el movimiento

Figura 20

Brida de sujeción



Diseño de la cuba de molienda

El material más idóneo cuando es cuestión de alimentos es el acero AISI 304 el cual es usado en la construcción de la cuba, el diámetro interior de la cuba del molino es de 22,5cm y el diámetro exterior de la cuba es de 26,5cm se agregaron entradas y salidas de agua, y dos entradas adicionales para el ingreso de una resistencia eléctrica y una termocupla tipo J.

$$p = \varrho \cdot g \cdot h$$

Ec. 49

Nota. Tomado de (Arreaga Barzola, 2015, p. 33)

Dónde:

$$\varrho = \text{Densidad del licor de cacao} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

$$p = \text{Presión interna en el cilindro en [Pa]}$$

$$h = \text{altura [m]}$$

$$g = \text{gravedad} \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

$$p = 1800 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 0,225m = 3969 \frac{N}{m^2}$$

$$\sigma_t = \frac{p \cdot D}{2t}$$

Ec. 50

Nota. Tomado de (Arreaga Barzola, 2015, p. 33)

Dónde:

$\sigma_t = \text{Esfuerzo Tangencial en [Pa]}$

$p = \text{Presión interna en el cilindro en [Pa]}$

$D = \text{Diámetro del cilindro [m]}$

$t = \text{espesor de las paredes del cilindro [m]}$

Una consideración de diseño será el espesor de pared, para que pueda soportar la presión del movimiento este espesor de plancha para construir la cuba será de 2mm.

Se usará la plancha de acero inoxidable 304 por que presenta las siguientes características:

$$\sigma_t = \frac{3969 \frac{N}{m^2} \cdot 0,225m}{2 \cdot 2 \cdot 10^{-3}m}$$

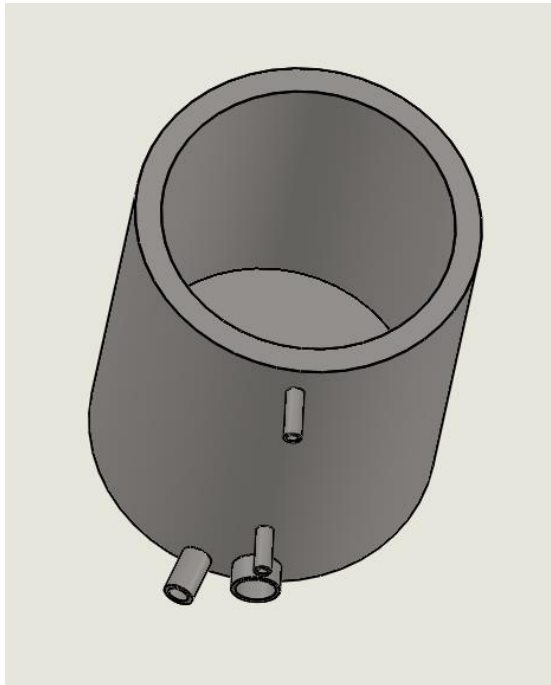
$$\sigma_t = 206381,25 \frac{N}{m^2}$$

$$\sigma_t = 0,20638MPa$$

La altura de construcción de la cuba de molienda es 27,5cm a razón de que se contemplan 5cm adicionales para evitar derramamientos, también ayuda a evitar una fricción excesiva.

Figura 21

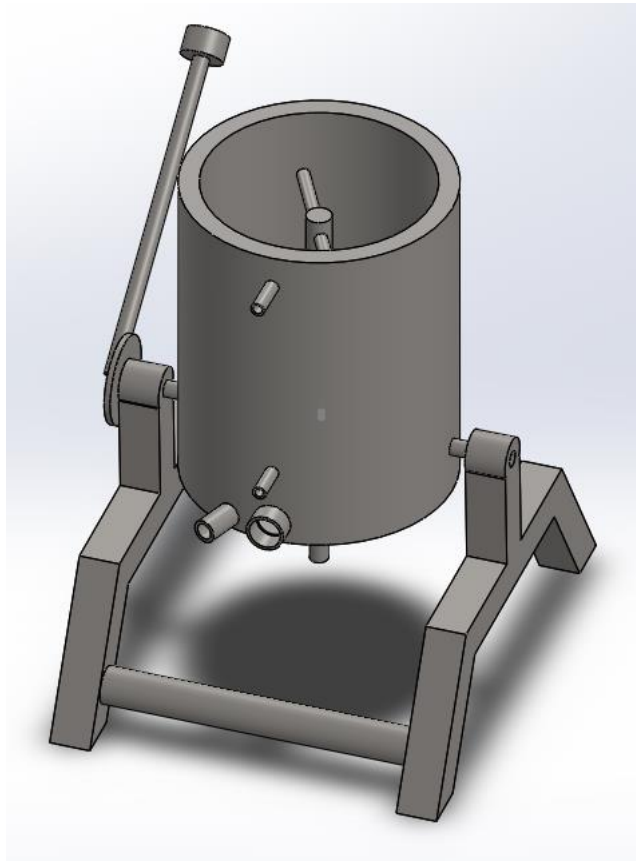
Cuba de molienda

**Masa:****Material:** Acero
inoxidable 304**Capacidad para
pasta de cacao:** 8,038kg**Capacidad para
pepa de cacao:** 4,4659kg***Estructura***

Para que la cuba pueda ser volteada se adecuo una estructura que me permite descargar las esferas y la pasta de cacao. Se encuentra en la parte inferior de la cuba de molienda.

Figura 22

Estructura de soporte

***Constante de lechada del chocolate para el refinador***

El tiempo de molienda es un proceso experimental en el cual se puede interpretar mediante la siguiente ecuación.

$$t_m = \frac{K \cdot D_b}{\sqrt{N}}$$

Ec. 51

Nota. Tomado de (Alvarez Zambrano & Dávila Sánchez, 2011, p. 21)

Dónde:

$D_b = \text{Diámetro de las bolas [mm]}$

$N = \text{Velocidad angular del agitador [rpm]}$

$K = \text{Constante que depende de la lechada a ser procesada, depende del tipo y material de las esferas y el tipo de molino (rpm/2. h/mm)}$

$t_m = \text{Tiempo medio (horas)}$

La constantes K depende de cada molino y es un dato experimental, y se obtiene con diferentes pruebas y considerando la velocidad centrípeta del proceso y la cantidad procesada.

$$K = \frac{t_m \cdot \sqrt{N}}{D_b}$$

$$K = \frac{12 \cdot \sqrt{89,17}}{6}$$

$$K = 18,88$$

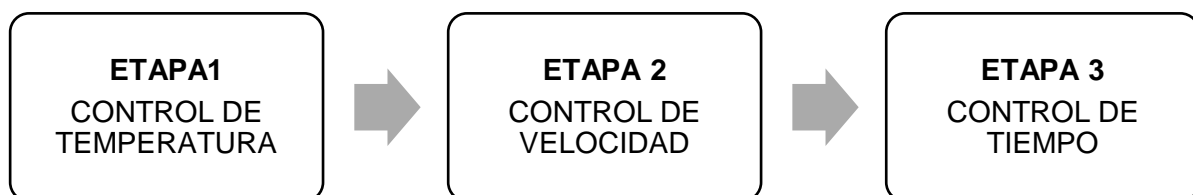
La contante de lechada nos sirve para estimar el tiempo de molienda cuando la velocidad centrípeta cambie.

Diseño Eléctrico

El sistema cuenta una parte hardware y software, que se detalla a continuación.

Control de temperatura, velocidad y tiempo.**Figura 23**

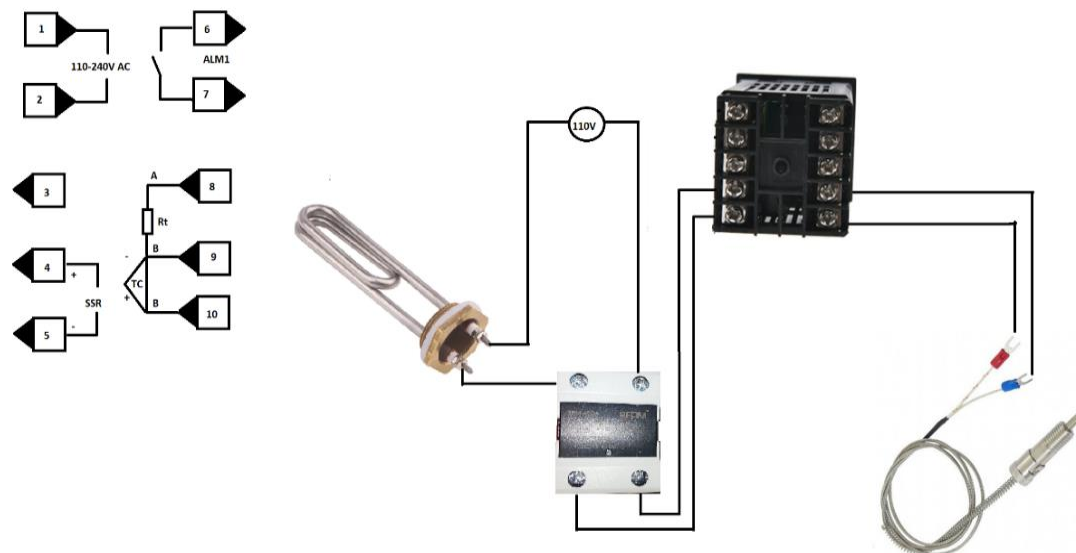
Etapas del proceso de refinación

***Etapa 1***

Para el control de temperatura se usó el módulo REX-C100 que cuenta con un control PID interno lo cual facilita el proceso, las conexiones se realizaron de la siguiente manera:

Figura 24

Conexiones del controlador de temperatura

**Termocupla**

Utilizando la tabla 8 podemos analizar cuál es la termocupla que mejor se adapta al proyecto de todas las opciones, las termocuplas tipo J tienen rangos cortos de medición que van desde 0°C – 760°C un factor que no afecta ya que no necesitamos medir altas temperaturas, es una de las mejores opciones ya que tiene una línea de error de $\mp 1^{\circ}\text{C} - \pm 0,75\%$.

La termocupla J tipo bayoneta elegida tiene un rango de medición de 0°C a 145°C .

Niquelina

La niquelina cumple la función de calentar el líquido que se encuentra dentro del doble fondo de la cuba, para que se adapte al tanque debe ser una resistencia eléctrica tubular a inmersión con rosca ya que son perfectas para introducir en agujeros, para que los líquidos no se salgan por la entrada de la niquelina.

ETAPA 2

El sistema tiene una velocidad fija que permite que los elementos molturadores no se queden en las paredes del tanque por el efecto de fricción, se usara un variador de frecuencia para producir un arranque suave graduando la aceleración hasta llegar a la velocidad centrípeta calculada. La velocidad a la que se va a mantener el sistema es 89,17(rpm).

El modelo del variador de frecuencia es un variador POWTRAN PI 150 es un variador que posee un control de hasta 16 velocidades, protecciones contra sobretensiones, sobrecargas, sobre corriente y sobrecalentamiento es un variador que se alimenta bifásicamente y puede controlar un motor trifásico permitiendo que sea de uso doméstico.

Tabla 15

Programación del variador

Programación de la Frecuencia del Variador		
Código	Función	Valor

F0. 01	Frecuencia de ajuste del teclado		60[Hz]
F0. 13	Tiempo de aceleración		6[seg]
F0. 14	Tiempo de desaceleración		6[seg]
F0. 15	Unidades de tiempo (segundos)	0	
F0. 19	Frecuencia máxima		60[Hz]
Parámetros del Motor			
b0.01	Potencia Nominal		3,7Kw
b0.03	Corriente Nominal		A
b0.04	Frecuencia Nominal del motor		60Hz

ETAPA 3

En esta etapa consiste dar un tiempo de molienda desde la aplicación desarrollada en el computador lo cual permite al variador funcionar un determinado tiempo.

El hardware del sistema se describe en el esquema siguiente:

Figura 25

Conexiones del tablero de control

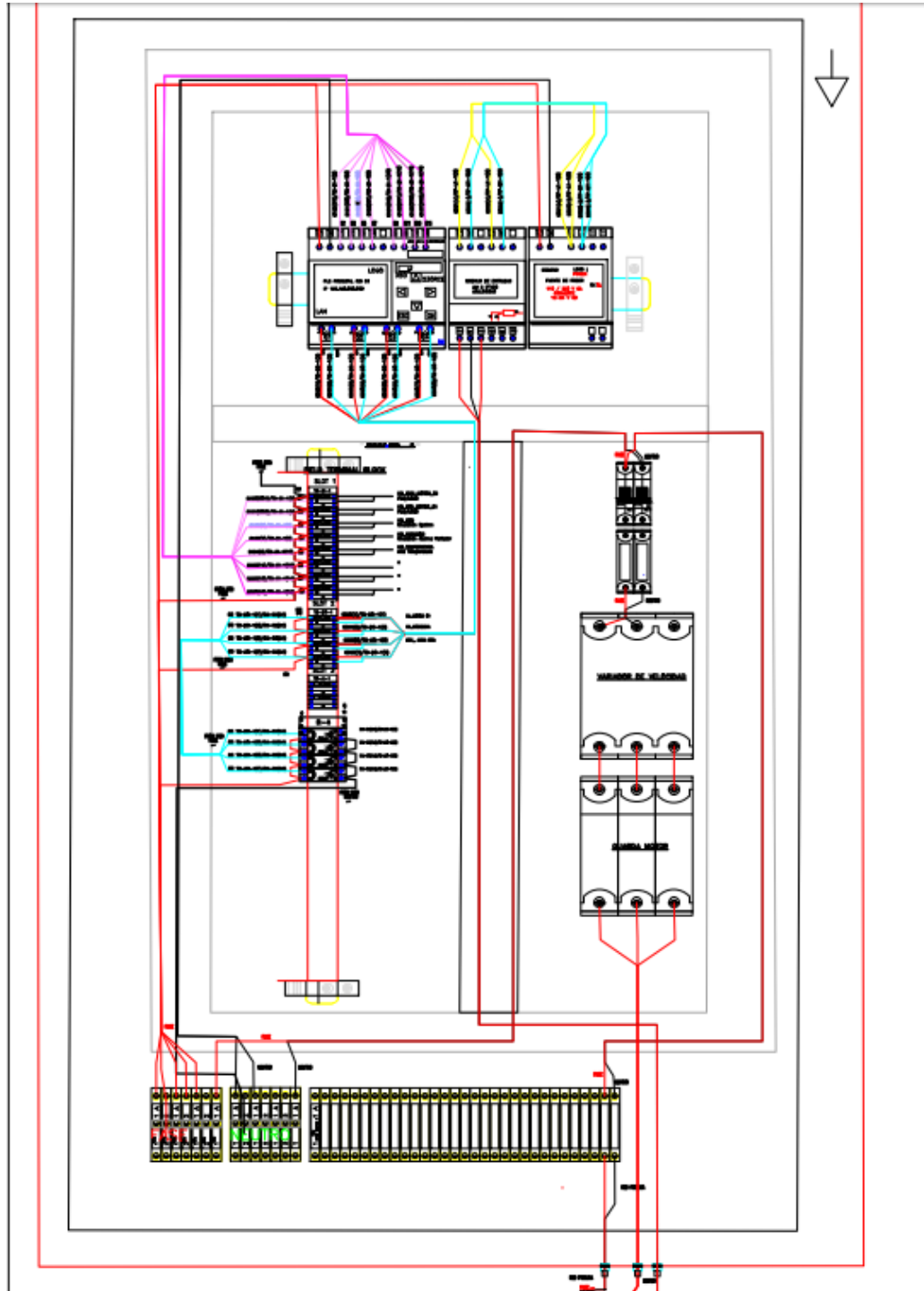
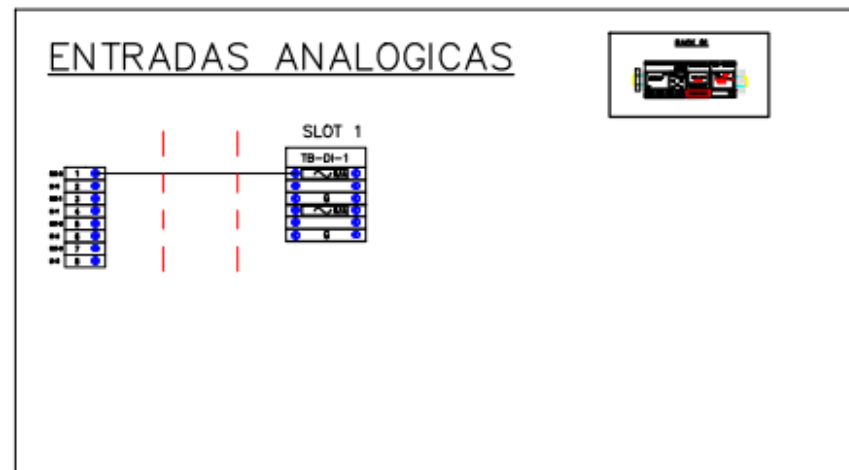
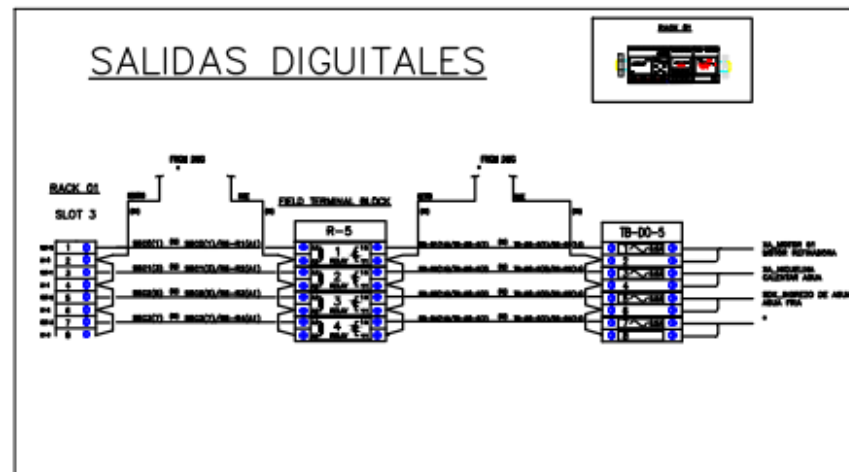
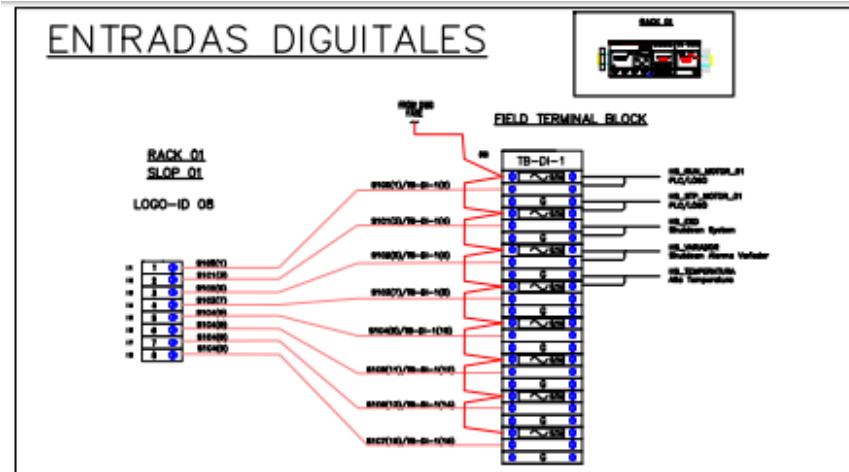


Figura 26

Conexiones de entradas y salidas del PLC



Para el software se usó el programa Logo Sofw, para crear una interfaz que permita visualizar las variables de proceso de una manera más intuitiva, así como tener control sobre el tiempo de molienda.

Molino Refinador

Figura 27

Sistema Mecánico



Figura 28

Sistema eléctrico y electrónico

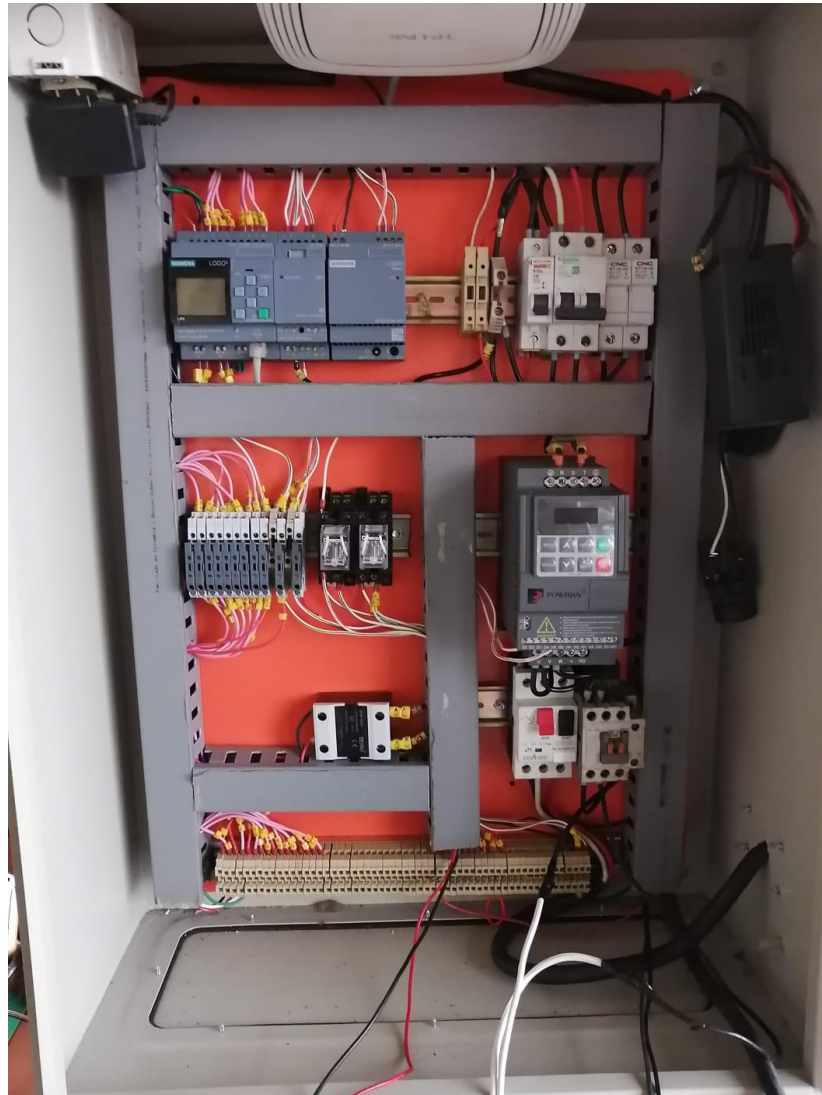


Figura 29

Refinación de pasta de cacao



Capítulo IV

Pruebas y análisis de resultados

Tiempo de proceso

El tiempo de molienda cambia en base a la cantidad y los componentes que se integran en el proceso de molienda.

En la tabla 15 se presentan los tiempos que tomo el molino en obtener una pasta fluida incorporando al refinador pasta de cacao y azúcar hasta lograr una pasta fluida sin grumos:

Tabla 16

Molienda de chocolate con azúcar

Prueba	Cantidad Procesada (Kg)			Temperatura del proceso (°C)	Velocidad (rpm)	Tiempo de Molienda (horas)
	Pasta de Cacao	Azúcar	Total			
1	5,22	2	7,22	50	55	16
2	5,22	2	7,22	50	66,87	12
3	5,22	2	7,22	50	89,167	10

Las horas del proceso de molienda se alargan dependiendo de los materiales a refinar, el azúcar es un elemento que tarda más en ser procesado pero se puede realizar ya que los molinos de esferas son capaces de procesar azúcar pero en tiempo elevados, lo ideal es refinar el azúcar en otra máquina exclusivamente diseñada para pulverizar los cristales de azúcar e incorporarlo al proceso para optimizar tiempos y evitar cristales de azúcar en el producto final ya que las características del molino fueron diseñadas para pasta de cacao se extienden los tiempos de molienda. El

chocolate dulce se puede encontrar en versión de mesa donde el momento de la preparación y el hervor y la mezcla con agua y leche se derretirán los cristales de azúcar, y el chocolate en barra donde el proceso de molienda se puede extender hasta 24 horas eliminado por completo grumos y cristales de azúcar, pero logrando el punto más importante menorando los sabores ácidos naturales del chocolate a esta mezcla se le puede incorporar leche en polvo y manteca de cacao y preservantes.

En la tabla 16 se presentan los tiempos que tomo el molino en obtener una pasta fluida incorporando al refinador pasta de cacao.

Tabla 17

Molienda de pasta de cacao pura

Prueba	Cantidad Procesada (Kg)		Temperatura del proceso (°C)	Velocidad (rpm)	Tiempo de Molienda (horas)
	Pasta de Cacao	Total			
1	7,22	7,22	50	55	10
2	7,22	7,22	50	66,87	8
3	7,22	7,22	50	89,167	7

Para refinar 7,22Kg de pasta de cacao que es la máxima cantidad que se puede refinar y conseguir una textura fluida el molino tarda 7 horas, al máximo de velocidad centrípeta. Cuanto tiempo más de refinación se exponga la pasta de cacao dependiendo de la aplicación se conseguirá distintos sabores, si se usa para tabletas de chocolate amargo de mesa se puede quedar en 7 horas.

Tabla 18*Molienda de chocolate con azúcar impalpable*

Prueba	Cantidad Procesada (Kg)			Temperatura del proceso (°C)	Velocidad (rpm)	Tiempo de Molienda (horas)
	Pasta de Cacao	Azúcar impalpable	Total			
1	5,22	2	7,22	50	55	12
2	5,22	2	7,22	50	66,87	10
3	5,22	2	7,22	50	89,167	9

La azúcar pulverizada me permite menorar los tiempos de molienda, cuando el chocolate está destinado para ser chocolate de mesa es una excelente opción ya que si el tiempo de molienda disminuye los gastos energéticos menoran, ya que está destinando a combinarse con leche o agua y no influirá de una forma notoria en su sabor, sin embargo, los sabores ácidos naturales del chocolate en caso de ser para consumo en barra solo serán mejorados con más de 24 horas de molienda.

Graficas de temperatura- tiempo

Si se superan los 50°C en el proceso de molienda se puede quemar la pasta de cacao, de por si el proceso de cizallamiento genera calor si aumentamos la temperatura podríamos perder las propiedades físico químicas del cacao.

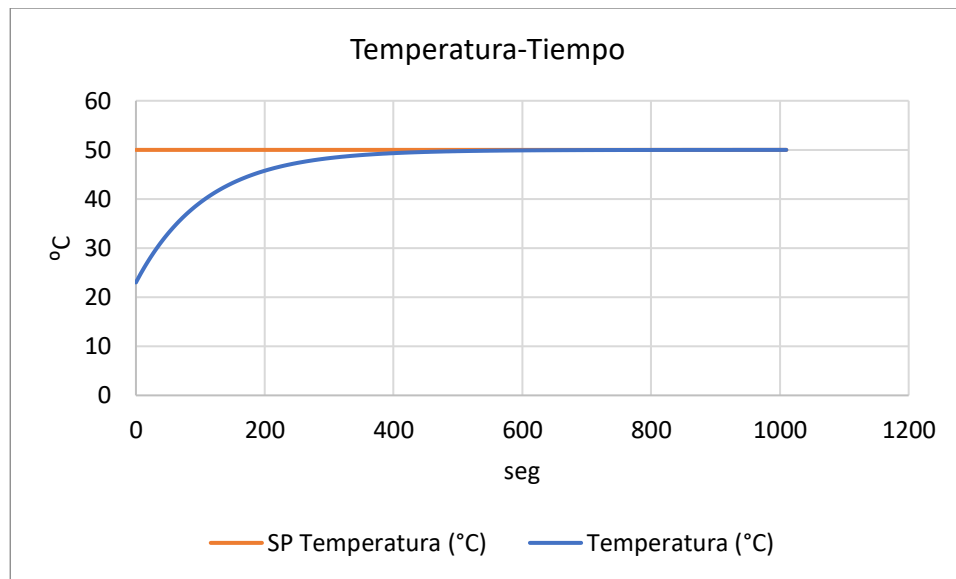
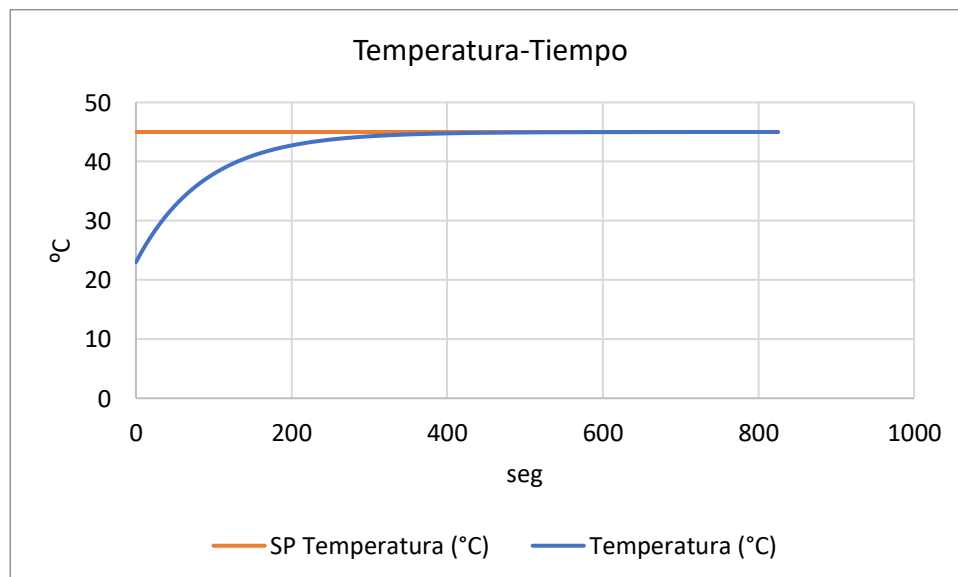
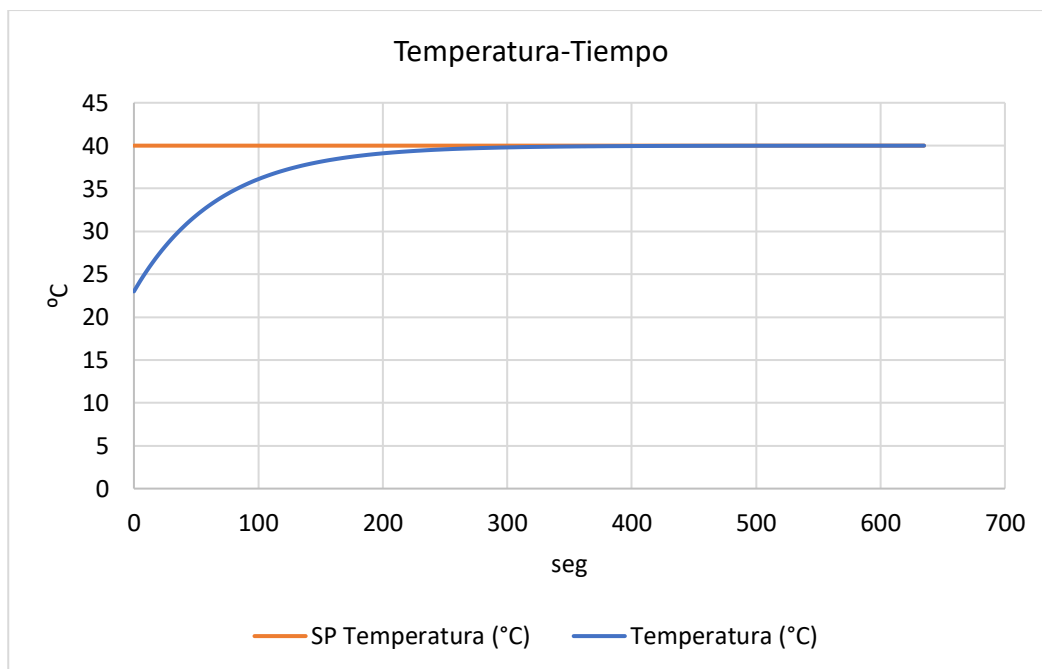
Figura 30*Grafica temperatura-tiempo 50°C***Figura 31***Grafica temperatura-tiempo 45°C*

Figura 32

Grafica temperatura-tiempo 40°C



Como se puede observar de forma lógica a mayor temperatura elegida para trabajar, el tiempo en que el proceso alcanza la temperatura aumenta, además es importante recalcar que el sistema de calentamiento es independiente del control de velocidad, por ende, las perturbaciones son mínimas y por lo tanto tendremos un control muy preciso.

Muestras de fluides a 89,17 rpm y 50°C

Figura 33

Muestras de pasta de cacao



Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Tomando en consideración que la producción de cacao de un pequeño productor es de 18 a 15 quintales al año, y que el máximo tiempo de refinación es de 16 horas y la primera molienda toma alrededor de 1 hora y se puede producir 7,22 kg de pasta refinada al día, al año sin contar los fines de semana se podrá refinar 18,772 quintales. Si la refinación de pasta de cacao es constante durante todas las semanas del año se podrá refinar el 104,288 % de la producción de cacao de un pequeño productor.

El proceso de molienda de Teobroma cacao al ser un grano húmedo debe ser bajo el método de fricción, existen algunas opciones en el mercado siendo las más usadas para el tratamiento del chocolate los molinos a fricción, piedras y a esferas (atritor), en la tabla 2 se realizó una ponderación sobre 10 de varias variables fundamentales al escoger un molino refinador demostrando que el que más se adapta al proceso de refinación es molino a esferas con la ponderación más alta 8,3. Hay variables del molino refinador a esferas, importantes como la velocidad centrípeta que si sobrepasa los 89,167 rpm provoca que las esferas por efecto de la fuerza centrípeta se peguen a las paredes del tanque esto fue evidenciado en las pruebas de funcionamiento, y la temperatura de molienda que no puede ser superior a 50°C, se realizó una prueba a 89,167 rpm y 50 °C, y se obtuvo en 7 horas la fluides de la pasta de cacao deseada como se puede observar en la figura 29, compara con otras pruebas fue el mejor resultado el más rápido y con mejor calidad.

La selección de elementos mecánicos está relacionada con la capacidad del molino, en base a los 12,7 Kg de esferas y los 7,22 Kg de cacao calculados que el molino puede refinar, se diseñó un eje agitador que presenta un factor de seguridad de 6,94 que demuestra que los elementos están diseñados de manera correcta, un factor que nos indica que la estructura resistirá en caso de tener más peso que del calculado. Ya que el diseño de los elementos es el correcto no se presentaron deformaciones en el proceso de molienda.

En el control eléctrico y electrónico permite tener una velocidad fija de 89,167 rpm que hace proceso más rápido, no se presentó anomalías en el control de velocidad es un proceso controlado que llega sin presentar problemas a la velocidad programada con una aceleración progresiva gracias a la cual no se presentaron movimientos bruscos, el control de temperatura permite mantener el sistema en 50° C lo que dio como resultado un cacao de un aroma y sabor exquisito con textura fluida capaz de adaptarse a cualquier uso.

Recomendaciones

La separación de las esferas y el chocolate debe ser realizada desde el primer momento con un colador para evitar que las esferas se queden en la pasta de cacao debido a la naturaleza oscura y bastante espesa, es bastante difícil diferenciar cuando se van esferas en el producto. En un futuro se recomienda crear un sistema exterior para la separación de las esferas y el chocolate.

El sistema del control eléctrico y electrónico está diseñando para pasar la mayor parte del tiempo censando y si lo apagamos y prendemos con mucha frecuencia en el transcurso del día podemos deteriorar el PLC, para evitar esto se adecuo un botón de arranque y paro, solo para el molino refinador en caso de querer comprobar el estado de la pasta sin tener que apagar los demás equipamientos.

Se debe realizar un mantenimiento preventivo de la maquina donde, los reten NBR 42-25-10 deben ser revisados cada 6 meses para comprobar que se encuentren en buen estado dado el caso se debe cambiar para que maquina tenga un correcto funcionamiento.

No llenar la cuba de molienda en su totalidad con cacao, solo llenar hasta cubrir el eje agitador ya que están contemplados 5 centímetros adicionales, para evitar desbordamientos que se producen cuando el cacao está siendo refinado

Bibliografía

Abad, A., Acuña, C., & Naranjo, E. (2020). El cacao en la Costa ecuatoriana: Estudio de su dimensión cultural y económica. *Estudios de la Gestión: revista internacional de administración*, 7, Art. 7. <https://doi.org/10.32719/25506641.2020.7.3>

Álvarez Zambrano, C. A., & Dávila Sánchez, J. L. (2011). *Diseño y construcción de un molino de atricción para moler materiales cerámicos*.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/3920>

Amores, E. M. (2015). Imbabura deleite al estilo ancestral. *Kalpana*, 13, 20-27.

Andrade Almeida, J., Rivera García, J., Chire Fajardo, G. C., Ureña Peralta, M. O.,
Andrade Almeida, J., Rivera García, J., Chire Fajardo, G. C., & Ureña Peralta, M. O. (2019). Propiedades físicas y químicas de cultivares de cacao *Theobroma cacao* L. de Ecuador y Perú. *Enfoque UTE*, 10(4), 1-12.

Arreaga Barzola, A. A. (2015). *Diseño de un molino para refinar licor de cacao en una empresa procesadora de cacao*.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/30565>

Balcázar Díaz, M. E., & Guamba Díaz, J. P. (2009). *Diseño de un triturador de cacao*.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/1393>

Blanco, E. A. (2014). *Curso: Tecnología Mineralúrgica (2014)*.
<https://ocw.unican.es/course/view.php?id=70>

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

- Budynas, R. G., & Murrieta Murrieta, J. E., Nisbett, J. Keith. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, novena edición*. McGraw-Hill Interamericana.
- Cabezas Casco, E. A. (2017). *Diseño y construcción de un molino de bolas para aplicaciones de pulvimetalurgia en los Laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato*.
<https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/26388>
- Cacao Nacional | Anecacao Ecuador*. (s. f.). Recuperado 17 de marzo de 2022, de <http://www.anecacao.com/es/quienes-somos/cacao-nacional.html>
- CHAPMAN STEPHEN. (2012). *Máquinas Eléctricas 5/ED*. CALIFORNIA SPANISH Books.
- Claudi Mans Teixidó. (2015, diciembre 7). *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*. Investigación y Ciencia. <https://www.investigacionyciencia.es/blogs/fisica-y-quimica/24/posts/chocolate-al-cava-13783>
- Ficha Técnica del Acero Inoxidable*. (s. f.). 6.
- Geankoplis, C. J. (1999). *Procesos de transporte y operaciones unitarias*.
- Grindometro—Medidor de finura para el chocolate*. (s. f.). Recuperado 23 de mayo de 2022, de <https://utilcentre.com/grindometro-medidor-de-finura.html>
- Horna Martinez, L. M., & Diaz Cercado, C. K. (2019). Diseño e Implementación de un Prototipo Automatizado para el Proceso de Conchado de Chocolate en la Empresa Industrias Sol Norteño – Jaén – Perú. *Universidad Nacional de Jaén*.
<http://localhost/jspui/handle/UNJ/200>

- Huaman Huambo, J. C. (2021). *Diseño de un molino de rodillos para la producción de grano uniforme de sal de consumo humano en la región Lambayeque*.
<http://tesis.usat.edu.pe/handle/20.500.12423/4237>
- Jaramillo, A., & Elizabeth, A. (2005). *Estudio de prefactibilidad para la producción artesanal de chocolates*. <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/209>
- Jose Vicente, B. S. (1989). *Criterios para la selección y optimización del tamaño de esferas de acero para molienda de pasta de cacao*.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/4513>
- Lanaud, C., Solórzano, R. L., & Zarrillo, S. (s. f.). *Y su uso temprano en Ecuador*. 4.
- Lombeida, M. D. Q., & Herrera, J. V. A. (2018). Denominación de origen de cacao ecuatoriano: ¿Un aporte de marketing global? *INNOVA Research Journal*, 3(10.1), Art. 10.1. <https://doi.org/10.33890/innova.v3.n10.1.2018.825>
- Motores monofásicos, bifásicos y trifásicos: Todo lo que necesitas saber*. (2018, septiembre 18). <https://clr.es/blog/es/motores-monofasicos-bifasicos-trifasicos/>
- Parada-Gutiérrez, O., & Veloz-Cordero, R. L. (2021). Análisis socioeconómico de productores de cacao, localidad Guabito, provincia Los Ríos, Ecuador. *Ciencias Holguín*, 27(1), 1-17.
- Plua Cuesta, J. C. (2008). *Diseño de una línea procesadora de pasta de cacao artesanal (theobroma cacao.)*.
<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/2400>
- Quimi, W. D. C., Castro, M. B. A., Risco, G. S. C., & Cabezas, Y. K. P. (2020). Evaluación socioeconómica del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la

zona norte de la Provincia de los Ríos. *Journal of business and entrepreneurial studies: JBES*, 4(2), 96-106.

Quispe Flores, J. P. (2018). Aplicaciones de PLC en Procesos Básicos. *Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle*.

<http://repositorio.une.edu.pe/handle/20.500.14039/3941>

Reyes, C., Guerra, J., Guerrero, V., & Dávila, J. (2013). Diseño y Construcción de un Molino de Atricción con Sistema de Control Atmosférico y de Temperatura para la Obtención de Compuestos Aleados Mecánicamente. *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, 8(1), Art. 1. <https://doi.org/10.24133/cctespe.v8i1.111>

Rodríguez, E. J. A., Ocampo, J. W. M., & Ortega, C. A. S. (2007). Medición de temperatura: Sensores termoeléctricos. *Scientia et Technica*, 1(34), Art. 34.

<https://doi.org/10.22517/23447214.5509>

Rueda Barreno, D. S., & Sánchez Paredes, G. A. (2015). *Diseño y construcción de un molino de discos para el acondicionamiento final de chocolate*.

<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10381>

Sandoya Man Ging, M. M., & Vargas Rumazo, S. A. (2019). *Diseño de un sistema automático para el control y monitoreo del proceso de conchado en la elaboración de chocolate*.

<http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/47606>

Serway, R. A., Jewett Jr, & John W. (2008). *Física para ciencias de la ingeniería Vol. 1*. 7e. Cengage Learning Editores S.A. de C.V.

<http://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=4641582>

- Stahl, R., & Kiefer, P. (1973). Korrosion und Korrosionsschutz in der Lebensmittelindustrie. *Materials and Corrosion*, 24(6), 513-517.
<https://doi.org/10.1002/maco.19730240608>
- Termocupla, cómo funciona, tipos, consejos y modelos.* | Alutal. (s. f.). Recuperado 10 de febrero de 2023, de <https://www.alutal.com.br/es/termopar>
- Valencia Flores, W. A. (2010). *Fabricación de accesorios de acero inoxidable austenítico para unión fuerte en tubería de ½" (12,7 mm)* [BachelorThesis, QUITO/EPN/2010]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2481>
- Valenzuela Cerón, J. E. (2013). *Manual de tipos de motores eléctricos, reconocimiento y sus aplicaciones en la industria.* <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6069>
- Zhang, Z., Wang, Y., Zhou, F., & Ji, J. (2009). Study on pressure and stress distributions on roller in roller mill. *2009 IEEE 10th International Conference on Computer-Aided Industrial Design Conceptual Design*, 2292-2296.
<https://doi.org/10.1109/CAIDCD.2009.5375113>
- Zuñiga, D. L. C., & Felipe, A. (2013). *Desarrollo de una guía de técnicas de chocolatería con chocolate ecuatoriano.*
<http://repositorio.ute.edu.ec/xmlui/handle/123456789/11837>

Anexos