ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO DE UNA MÁQUINA DOSIFICADORA DE CREMA DE RELLENO PARA GALLETAS, CON UNA CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN DE 120 GALLETAS POR MINUTO PARA LA EMPRESA PRIMATEC.

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

OSCAR IVÁN LUCERO SÁNCHEZ

oilsnavy@yahoo.es

CHRISTIAN ANDRÉS CANCHIG ROMERO

chris_can_1986@yahoo.com

DIRECTOR: ING. JAIME RAÚL VARGAS TIPANTA

jaime.vargas@epn.edu.ec

Quito, Mayo 2014

DECLARACIÓN

Nosotros, OSCAR IVÁN LUCERO SÁNCHEZ y CHRISTIAN ANDRÉS CANCHIG ROMERO, declaramos que el trabajo desarrollado en el presente documento es resultado de nuestra investigación; que no ha sido utilizado para ningún propósito similar al de la obtención de un título de carácter profesional; y, que todas las referencias bibliográficas detalladas en el documento han sido consultadas y verificadas.

Mediante esta declaración también cedemos los derechos de propiedad intelectual correspondientes a la información respectiva a esta investigación y desarrollo, a la Escuela Politécnica Nacional.

Oscar Iván Lucero Sánchez

Christian Andrés Romero Canchig

CERTIFICACIÓN

Certificamos que la presente investigación fue desarrollada por OSCAR IVÁN LUCERO SÁNCHEZ y CHRISTIAN ANDRÉS CANCHIG ROMERO, bajo nuestra dirección.

Ing. Jaime Raúl Vargas Tipanta	Ing. Mario Germán Granja Ramírez
DIRECTOR DE PROYECTO	**COLABORADOR**

DEDICATORIA

A mi familia, base fundamental de este logro, especialmente a mi Mamá Myriam y a mi Papá Víctor, quienes con su apoyo incondicional, sabiduría y fortaleza me han enseñado que la vida es una constante lucha de la cual se aprende todos los días, que con su sacrificio, dedicación y múltiples enseñanzas, han forjado una familia unida y fuerte ante cualquier adversidad; a Sandy, Myriam, Víctor y Carlos, quienes que con su ejemplo de vida me enseñaron que los grandes triunfos conllevan grandes sacrificios.

A mis sobrinas Andrea y Analie, quienes con el día a día se convirtieron en una razón más para culminar esta etapa de mi vida.

Iván Lucero Sánchez

A mis padres queridos, Andrés y Gloria, que con su sabiduría, disciplina, bondad, sufrimiento, sacrificio y sobre todo con su infinito amor supieron enseñarme a ser tanto una persona de valores como una persona dispuesta a entregar todo el esfuerzo para lograr cumplir mis sueños.

A mis hermanos Adriana y Willan, a mi sobrino Maty, por el apoyo, amor y respeto, que ellos me han brindado siempre.

A Ely, mi novia y mejor amiga, por brindarme tu fortaleza, confianza, por apoyar mis decisiones y sobre todo por el amor inmenso que me entregas día a día. ¡Te amo!

Christian Andrés

AGRADECIMIENTOS

A mis profesores, por su dedicación y probidad por lograr impartir sus conocimientos. A la gloriosa Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, lugar donde se construyó este sueño.

Un agradecimiento especial al Ing. Jaime Raúl Vargas, Director de este Proyecto, quien más que un profesor se convirtió en un amigo, que me demostró que a pesar de las dificultades que nos ponga la vida siempre tenemos que salir adelante, aunque el camino sea duro. Gracias por ser parte de este trabajo.

"Tres rases, un chispún y un carajo por Mecánica"

Iván Lucero Sánchez

A Dios, por brindarme la fuerza para lograr cumplir mis sueños, por darme el valor día a día y por regalarme la familia unida a la que tengo el orgullo de pertenecer.

A mis amigos, que son como mis hermanos Pato, Iván, Giovanny, Darwin, José Miguel, por enseñarme el verdadero significado de la eterna amistad. A Jenny, Cathy, María Fernanda, Alex, Miguel, Javier, por brindarme su amistad durante cada etapa de mi vida.

Al Ingeniero Jaime Vargas, por la amistad y apoyo para culminar el presente proyecto, aun cuando su situación no lo permitía, siempre estuvo con las puertas abiertas para cualquier inquietud y consejo que nos supo brindar.

Christian Andrés

CONTENIDO

CAPÍTULO I

GENERALIDADES 1

1.1 ANTECEDENTES 1

1.2 OBJETIVOS 1

1.2.1 OBJETIVO GENERAL 1

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 1

1.3 JUSTIFICACIÓN 2

1.4 RELLENO DE GALLETAS 2

1.4.1 INFLUENCIA DE LOS INGREDIENTES 3

1.5 REOLOGÍA 4

1.6 TORNILLO SIN FÍN 5

1.6.1 TIPOS DE TORNILLO SIN FÍN 6

1.6.2 PROTECCIONES 7

1.7 CALENTADORES ELÉCTRICOS DE INMERSIÓN 7

1.7.1 INMERSIÓN DE TORNILLO 8

1.7.2 INMERSIÓN DE PUENTE LATERAL 9

1.8 CINTAS TRANSPORTADORAS 9

1.9 RETENEDOR 10

1.10 ELECTROVÁLVULAS 11

1.11 PERNOS DE SUJECIÓN 11

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO 13

2.1 INTRODUCCIÓN 13

2.2 ANÁLISIS REOLÓGICO 13

2.3 COMPORTAMIENTO DE LOS ALIMENTOS 13

2.3.1 FLUIDOS 14

2.4 DOSIFICACIÓN 17

2.4.1 TIPOS DE DOSIFICADORES. 17

CAPÍTULO III

REQUERIMIENTOS Y PARÁMETROS DE DISEÑO 22

3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. 22

3.2 REQUERIMIENTOS. 22

3.2.1 REQUERIMIENTOS DE USO. 23

3.2.2 REQUERIMIENTOS ESTRUCTURALES. 23

3.2.3 REQUERIMIENTOS ECONÓMICOS. 23

3.3 PARÁMETROS DE DISEÑO. 24

3.4 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS. 24

3.5 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS. 25

3.5.1 ALTERNATIVAS PARA EL SUBSISTEMA A. 25

3.5.2 ALTERNATIVAS PARA EL SUBSISTEMA B. 28

3.5.3 ALTERNATIVAS PARA EL SUBSISTEMA C. 30

3.5.4 MÉTODO DE CRITERIOS PONDERADOS. 30

3.5.5 RESULTADO FINAL DE ALTERNATIVAS. 36

3.6 PROTOCOLO DE PRUEBAS 36

3.6.1 PRUEBA FÍSICA Y DIMENSIONAL 37

3.6.2 PRUEBA EN VACIO. 37

3.6.3 PRUEBA CON CARGA 38

CAPITULO IV

DISEÑO DE LA MÁQUINA 39
4.1 RESTRICCIONES DEL EQUIPO. 39
4.1.1 CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN 39
4.2 DIMENSIONAMIENTO BANDA TRANSPORTADORA 39
4.3 POTENCIA REQUERIDA 44
4.3.1 DENSIDAD DE LA CREMA 44
4.3.2 CAPACIDAD DE CARGA Y DIAMETRO DE HÉLICE 45
4.3.3 CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE LA BASE DE LA HÉLICE 48
4.3.4 CÁLCULO POTENCIA REQUERIDA 51
4.3.5 BANDAS Y POLEAS 53
4.3.6 CÁLCULO DE REACCIONES 61
4.3.7 DISEÑO ESTÁTICO DEL EJE TORNILLO DOSIFICADOR 66
4.3.8 DISEÑO DINÁMICO DEL EJE TORNILLO DOSIFICADOR 69
4.3.9 DISEÑO DE LA LENGUETA SOBRE EL EJE TORNILLO 72
4.3.10 SELECCIÓN DEL RETENEDOR 76
4.3.11 DISEÑO DEL MONTAJE DEL RETENEDOR 1 80
4.4 DISEÑO DE LA TOLVA 83
4.4.1 TOLVA DE ALIMENTACIÓN 83
4.4.2 CÁLCULO DEL ESPESOR DE PARED. 85
4.4.3 CÁLCULO DEL ESPESOR DE LA PARED. 95
4.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO 104
4.5.1 POTENCIA REQUERIDA PARA EL CALENTAMIENTO. 105
4.6 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA 111
4.6.1 SELECCIÓN ELEMENTOS ESTRUCTURALES 115

4.6.2 SIMULACIÓN DE LA MÁQUINA 120

CAPÍTULO V

CONSTRUCCIÓN, MONTAJE Y PRUEBAS DE CAMPO DEL PROTOTIPO 123

5.1 CONSTRUCCIÓN 123

5.1.1 MÁQUINAS Y EQUIPOS 124

5.2 MONTAJE 125

5.3 PRUEBAS DE CAMPO 126

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE COSTOS DEL PROYECTO 127

6.1 INTRODUCCIÓN 127

6.2 COSTOS DIRECTOS 127

6.2.1 COSTOS DE ELEMENTOS MAQUINADOS 127

6.2.2 COSTO DE EQUIPOS 129

6.2.3 COSTO DE ELEMENTOS NORMALIZADOS 130

6.2.4 TOTAL COSTOS DIRECTOS 131

6.3 COSTOS INDIRECTOS 132

6.4 COSTO TOTAL DEL PROYECTO 132

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 134

7.1 CONCLUSIONES 134

7.2 RECOMENDACIONES 136

ANEXOS…. 140

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 3.1. Peso específico de cada criterio para el subsistema a..... 32

Tabla 3.2. Evaluación del criterio tiempo de dosificación. 33

Tabla 3.4. Evaluación del criterio costo. 34

Tabla 3.5. Evaluación de cada alternativa. 34

Tabla 4.1. Coeficiente de llenado del canalón..... 47

Tabla 4.2. Coeficiente de disminución de llenado del canalón 47

Tabla 4.3. Coeficiente para materiales solidos..... 52

Tabla 4.4. Consideraciones para la selección de las bandas..... 54

Tabla 4.5. Polea y banda seleccionada 57

Tabla 4.6. Descripción retenedor seleccionado. 77

Tabla 4.7. E_1 vs. Fs..... 91

Tabla 4.8. E_2 vs. Fs..... 94

Tabla 4.9. E3 vs. Fs 104

Tabla 6.1. Costos de maquinado..... 128

Tabla 6.2. Costos de equipos..... 129

Tabla 6.3. Costos de elementos normalizados..... 130

Tabla 6.4. Total costos directos..... 131

Tabla 6.5. Total costos indirectos..... 132

Tabla 6.6. Costo total del proyecto..... 133

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1.1. Tornillo sin fin en disposición horizontal. 6

Figura 1.2. Artesa tubular. 8

Figura 1.3. Calentador de inmersión de tornillo. 8

Figura 1.4. Calentador de inmersión de puente lateral. 9

Figura 1.5. Cinta transportadora. 10

Figura 1.6. Juntas tóricas. 11

Figura 2.1. Clasificación de los fluidos por su comportamiento. 14

Figura 2.2. Comportamiento de los fluidos 16

Figura 2.3. Dosificador volumétrico de plato giratorio. 19

Figura 2.4. Dosificador volumétrico de tornillo sin fin. 20

Figura 2.5. Dosificador de pistón 20

Figura 2.6. Dosificador de banda con balanza y compuerta solidarias. 21

Figura 3.1. Dosificador de bomba de engranes. 28

Figura 3.2. Resistencia con tapón npt. 29

Figura 3.6. Resistencia con brida. 30

Figura 4.1. Disposición de galletas a lo largo de la banda. 40

Figura 4.2. Distribución de galletas a lo ancho de la banda. 43

Figura 4.3. Vista frontal del eje tornillo. 49

Figura 4.4. Vista lateral del eje tornillo. 50

Figura 4.5. Diagrama de fuerzas sobre un hélice. 51

Figura 4.6. Geometría del sistema de bandas con relación 1:1. 57

Figura 4.7. Columna de crema sobre el dosificador (valores en mm). 62

Figura 4.8. Diagrama de cuerpo libre del dosificador en el plano xy. 63

Figura 4.9. Diagrama de cuerpo libre del dosificador en el plano xz. 64

Figura 4.10. Fuerza cortante y momento flector plano xy. 65

Figura 4.11. Fuerza cortante y momento flector plano xz. 66

Figura 4.12. Punto crítico de la sección. 67

Figura 4.13. Plano frontal de la salida del motoreductor. 73

Figura 4.14. Esquema de fuerza actuantes sobre la lengüeta. 74

Figura 4.15. Ranura vs presión de trabajo. 78

Figura 4.16. Retenedor extruido 78

Figura 4.17. Dimensiones alojamiento montaje rotativo. 79

Figura 4.18. Rugosidades de las superficies relacionadas. 79

Figura 4.19. Esquema posición del retenedor - entrada. 80

Figura 4.20. Esquema posición del retenedor - salida. 81

Figura 4.21. Configuración de pernos para la junta tórica. 82

Figura 4.22. Tolva de alimentación 85

Figura 4.23. Distribución de presión sobre la placa base. 86

Figura 4.24. Placa simplemente apoyada. 87

Figura 4.25. Diagrama de cuerpo libre de la placa base. 88

Figura 4.26. Diagramas de corte y momento flector. 89

Figura 4.27. Inercia de la sección de la placa rectangular. 90

Figura 4.28. Placa empotrada en ambos extremos. 92

Figura 4.29. Diagrama de cuerpo libre de la placa base empotrada. 92

Figura 4.30. Diagramas de corte y momento flector. 93

Figura 4.31. Distribución de presión sobre las paredes de la tolva. 95

Figura 4.32. Dimensiones de la tolva de alimentación. 97

Figura 4.33. Fuerzas que actúan en la superficie curva. 101

Figura 4.34. Diagrama de cuerpo libre de la superficie curva. 102

Figura 4.35. Representación del sistema de calentamiento. 106

Figura 4.36. Analogía eléctrica del sistema..... 108

Figura 4.37. Esquema del montaje de la resistencia en la tolva. 110

Figura 4.38. Configuración de la estructura soportante. 112

Figura 4.39. Visualización posterior de la máquina. 113

Figura 4.40. Visualización delantera de la máquina..... 115

Figura 4.41. Visualización propiedades de la máquina. 114

Figura 4.42. Condiciones de apoyo para columnas. 117

Figura 4.43. Visualización desplazamientos de la estructura. 120

Figura 4.44. Visualización final a) vista frontal izq, b) vista frontal der..... 121

Figura 4.45. Visualización final vista posterior..... 122

SIMBOLOGÍA

d_g Diámetro de la galleta [mm]

e Espacio entre galletas [mm]

e' Distancia entre centros de las galletas [mm]

td' Tiempo de trabajo por galleta [s]

td Tiempo de diseño [s]

tav Tiempo avance de la banda [s]

tde Tiempo descarga de crema [s]

a_b Ancho mínimo de la banda [mm]

l_b Longitud mínima de la banda [mm]

m_g Masa total de crema por galleta [g]

d_c Diámetro de crema depositada [mm]

h_c Altura de la crema en la galleta [mm]

d_g Diámetro de la galleta [mm]

V_g Volumen de crema por galleta [cm^3]

δ_g Densidad de la crema [g/cm^3]

Q_{real} Capacidad de carga [Ton / h]

S Área de relleno del canalón [m^2]

v Velocidad de desplazamiento del tornillo [m/s]

γ Densidad del material transportado [Ton/m^3]

D Diámetro de la hélice del tornillo [mm]

Λ Coeficiente de llenado del canalón

t Paso del tornillo [m]

n Revoluciones por minuto del tornillo [rad/s]

k Coeficiente de disminución de llenado por el ángulo de trabajo β

d Diámetro base de la hélice [mm]

P Potencia requerida por tornillo [kW]

P_H Potencia necesaria para desplazamiento horizontal [kW]

P_N Potencia necesaria accionamiento del tornillo [kW]

P_{ST} Potencia necesaria accionamiento del tornillo inclinado [kW]

L_t Longitud del tornillo [m]

C_0 Coeficiente para materiales solidos

$\mathrm{P}_{\mathrm{Diseño}}$ Potencia de diseño [hp]

P Potencia requerida [hp]

D Diámetro de la polea motriz [mm].

D Diámetro de la polea conducida [mm].

C Distancia entre centros [mm].

$\theta_D\ y\ \theta_d$ Ángulo de contacto [rad].

L Longitud de banda [mm].

$\mathrm{F_c}$ Tensión circunferencial debido a la fuerza centrífuga [lbf]

V velocidad [ft/min]

w Peso de un pie de banda [lbf/pulg]

γ Peso específico de la banda [lbf/pulg^3]

b Ancho de banda [pulg]

t Espesor de banda [pulg]

T Par de torsión [lbf x pulg]

H_{nom} Potencia nominal [Hp]

k_s Factor de servicio

n_d Factor de seguridad de diseño

n Revoluciones de entrada [rpm]

F_1 , F_2 Fuerzas actuantes [lbf]

F_i Tensión inicial [lbf]

$\sigma_{A,B}$ Esfuerzos principales normales [lbf/pulg^2]

M, M_{max} Momento máximo en el eje tornillo dosificador [lbf x pulg]

T Torque transmitido por el motoreductor al eje [lbf x pulg]

S_e Límite de resistencia a la fatiga en la ubicación crítica de una parte de máquina en la geometría y condición de uso.

$S_e{}'$ Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria.

k_a Factor de modificación de la condición superficial,

k_b Factor de modificación del tamaño.

k_c Factor de modificación de la carga.

k_d Factor de modificación de la temperatura.

k_e Factor de confiabilidad.

k_f Factor de modificación de efectos varios.

$\dot{E}_{ent}$ Energía que entra al sistema

$\dot{E}_g$ Energía generada por una fuente química, eléctrica, etc.

$\dot{E}_{sale}$ Energía que sale del sistema.

$\dot{E}_{alm}$ Energía almacenada en el sistema.

RESUMEN

El presente proyecto surge de la necesidad de tener una máquina de fabricación nacional que permita a la empresa PRIMATEC mejorar el proceso de elaboración de su producto, planteándose como objetivo una producción de 120 galletas por minuto mediante la dosificación semiautomatizada de la crema de relleno de las galletas. El proceso de depósito de la crema sobre las galletas es una parte fundamental en su la línea de producción, es por esta razón se requiere desarrollar un sistema que resuelva esta necesidad, mediante el diseño de una máquina que permita alcanzar los ideales de producción y calidad.

El desarrollo del Proyecto presentado en el actual documento, se realiza dentro de una secuencia de investigación, evaluación y ejecución de criterios. A continuación se hace una referencia breve de los capítulos que engloban el proceso.

El primer Capítulo describe de manera directa y sencilla las características del producto final y de la sustancia de trabajo de la máquina.

En el segundo Capítulo de esta investigación se presentan en detalle las especificaciones de la crema usada en el proceso, así como también una descripción concisa de los sistemas y elementos que interactúan en el sistema de la máquina.

El tercer Capítulo formula los requerimientos de la máquina y ejecuta un análisis de alternativas para los sistemas y subsistemas que trabajan solidariamente entre sí.

El cuarto Capítulo presenta el diseño, dimensionamiento y selección de cada uno de los elementos mecánicos que forman parte de la máquina.

En el quinto Capítulo se presenta el procedimiento de la construcción, el montaje de la máquina y las pruebas de campo para cuando se construya el prototipo.

En el sexto Capítulo se realiza el análisis de los costos totales de diseño y construcción de la máquina.

El séptimo Capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones recopiladas durante la ejecución del proyecto.

Se acompaña la documentación de respaldo de elementos diseñados y seleccionados que conforman el prototipo, así como los catálogos de materiales empleados y la simulación del diseño desarrollado mediante el software INVENTOR 2013. Finalmente también se anexan los respectivos planos de montaje y de taller, con toda la ingeniería de detalle pertinente, que permite la fabricación y el montaje del prototipo.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

La competitividad dentro del mercado es un factor determinante para el desarrollo tecnológico de la industria, que dependiendo de su campo de aplicación está sometida al cumplimiento de parámetros de calidad, salubridad y las normativas que rijan los productos de su fabricación, es por esto que es importante el aporte de conocimiento por parte de la universidad en el desarrollo de maquinaria dirigida a satisfacer las necesidades del mercado y permita a las empresas alcanzar estándares de calidad y productividad.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una máquina dosificadora de crema para galletas, con una capacidad de producción de 120 galletas por minuto para la empresa PRIMATEC.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Satisfacer las necesidades tecnológicas de la empresa con una máquina diseñada en base a los requerimientos del producto final.

- Obtener el diseño de la máquina adaptado a las características del mercado proponiendo a la accesibilidad a repuestos en el futuro.

- Presentar los planos de taller concernientes a la construcción de la máquina.

- Aumentar la producción mediante la racionalización del tiempo de llenado y la cantidad del producto utilizado, evitando desperdicios.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Optimizar los procesos de producción dentro de la industria delinean el desarrollo económico de las empresas, reduciendo tiempos de fabricación, desperdicios de material, implementando procesos de calidad, permitiendo acceder a niveles de competencia que garanticen a los sectores alcanzar una productividad favorable y poder continuar incursionando en la economía del país. Es por esto que el presente proyecto plantea el diseño de una máquina que permita dosificar la crema utilizada como relleno de las galletas evitando el desperdicio de la misma.

El desarrollo de este tipo de maquinaria es de considerable apoyo a la mediana y pequeña industria pastelera, representando una alternativa viable económicamente para suplir la necesidad de importar equipos destinados al mismo objetivo.

1.4 RELLENO DE GALLETAS

Consiste en una sustancia conformada por diversos ingredientes que son mezclados en diferentes proporciones por lo que cada fabricante tiene una

receta en especial, en este caso en particular la crema consta de los siguientes ingredientes:

- Crema de leche.
- Manteca vegetal.
- Azúcar granulada.
- Azúcar en polvo.

Las proporciones de estos ingredientes dan a la receta la característica en particular buscada por la empresa, por lo que no son indicadas en el presente trabajo de investigación para salvaguardar su propiedad intelectual.

Cada componente tiene influencia sobre las propiedades físicas de la crema por lo que el análisis de las mismas es muy importante para establecer parámetros de diseño como la potencia requerida, la longitud del dosificador, medios de calentamiento. Así luego de un análisis se determina que la viscosidad es una propiedad limitante para el caso del diseño, esta propiedad es hallada mediante un estudio reológico en laboratorio.

1.4.1 INFLUENCIA DE LOS INGREDIENTES

1.4.1.1 Crema de leche

La crema empleada para la elaboración del relleno tiene un porcentaje de alrededor de 20% en grasa siendo la apropiada para la preparación de la receta, Es una fuente de vitamina A, calcio y proteínas.

1.4.1.2 Manteca vegetal

Es una grasa alimentaria que por sus características permanece en estado sólido a temperatura ambiente, lo que representa un problema para la dosificación, sin embargo es un componente importante gracias a su capacidad de evitar la proliferación de bacterias en los alimentos.

1.4.1.3 Azúcar

También conocida como sacarosa que es un compuesto formado por glucosa y fructuosa, este compuesto es importante para el sabor y contextura de la crema de relleno.

Una vez conocidas las características básicas de los componentes de la crema del relleno es necesario conocer acerca del análisis requerido para definir las propiedades de la mezcla.

1.5 REOLOGÍA

Definida como la deformación sufrida por los objetos causada por los esfuerzos a los que se encuentran sometidos, mediante ensayos reológicos se pueden determinar propiedades físicas tanto de sólidos como de líquidos, esto representa un papel muy importante en el desarrollo de procesos tecnológicos en los cuales intervengan sustancias cuyas características es necesario conocer para el diseño de mecanismos que actúan con estos, los resultados de estos ensayos tienen diversas aplicaciones en la industria alimentaria como por ejemplo:

- Diseño de sistemas de bombeo.
- Diseño de sistemas de mezclado.
- Diseño de sistemas de dosificación.
- Selección de empaquetaduras.
- Sistemas de calentamiento.

La reología también permite al fabricante poder determinar propiedades del producto tales como la textura, el aroma, el olor y el color que representan características importantes al momento de diferenciar el producto de la competencia.

1.6 TORNILLO SIN FÍN

Este sistema de transporte de material se lleva a cabo mediante una hélice de acero acoplada o construida sobre un eje, el mismo que está suspendido dentro de una carcasa o canal denominada artesa que puede tener una geometría cilíndrica o en U, que es conformada en chapa metálica normalmente entre 2 y 8 mm de espesor.

El movimiento de rotación de la hélice es provocado por la acción de un moto-reductor tomando en cuenta que el material a ser transportado es siempre arrastrado y no empujado por lo que el actuar del motor se ubica en el punto de carga del tornillo.

La posición de trabajo de un tornillo sin fin en la cual se alcanza un mayor rendimiento del sistema en cuando el ángulo de trabajo es 0° es decir en posición horizontal como indica la figura 1.1.

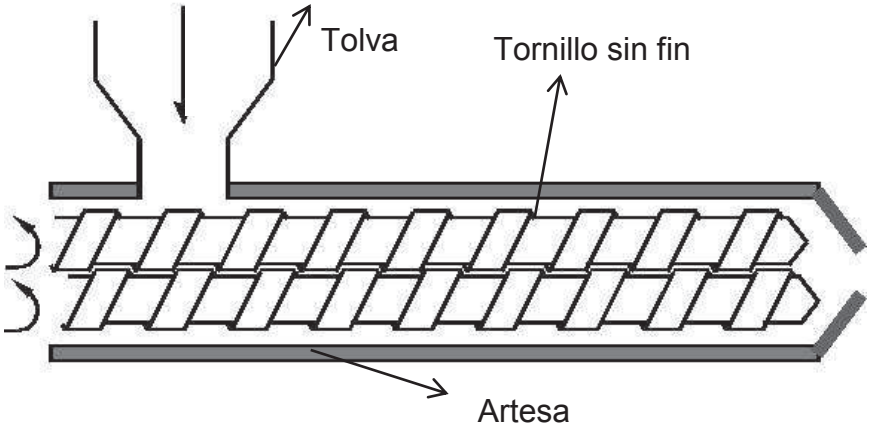


Figura 1.1. Tornillo sin fin en disposición horizontal.
Fuente: http://es.scribd.com/doc/86928050/Memoria-Tornillo-Sin-Fin

El tornillo sin fin trabaja entre un 15 y 45 % del total de la capacidad del canal de transporte y se pueden colocar soportes intermedios si la longitud del tornillo es demasiado grande esto con el fin de evitar que el eje fleje. Si el material a ser transportado requiere un sistema de control de temperatura se puede instalar calefacción o dispositivos de refrigeración de ser el caso. Los tornillos sin fin empleados en el trasporte de material tienen diversas configuraciones, por lo que es necesario el estudio de los mismos.

1.6.1 TIPOS DE TORNILLO SIN FÍN

La clasificación más significativa de este tipo de elementos está dada por el tipo de helicoide de la que están compuestos, así se tiene entre los principales para este estudio:

- **Hélice normal h=D:** caracterizada porque el paso es igual al diámetro, además de que la hélice esta arrollada a un cilindro.

- **Hélice de gran paso con h > D:** empleada principalmente para el transporte de materiales escurridizos.

- **Hélice de pequeño paso con h<D:** Este tipo de tornillos se usan en aplicaciones con inclinaciones de menos de 20° y cuando se requiere permanencia del material en el mecanismo para enfriamiento.

- **Hélice de dos entradas:** se utiliza para obtener un flujo uniforme de materiales delicados y en disposiciones inclinadas o verticales.

La protección del material a ser dosificado es un punto a considerar sobre todo cuando se trabaja con alimentos, por lo que se realiza un breve estudio.

1.6.2 PROTECCIONES

La protección de los tornillos dosificadores que se emplea en el presente proyecto es una de tipo tubular debido a que se requiere hermeticidad por el tipo de material que se desea dosificar, además de ocupar un espacio reducido, Una representación del tipo de protección del tornillo es presentada en la figura 1.2.

1.7 CALENTADORES ELÉCTRICOS DE INMERSIÓN

Son elementos que permiten elevar o mantener la temperatura de la sustancia con la que se trabaje, esto mediante la utilización de resistencias eléctricas. Los principales tipos de calentadores empleados en aplicaciones relacionadas con la industria son:

Figura 1.2. Artesa tubular.
Fuente: Propia

1.7.1 INMERSIÓN DE TORNILLO

Los calentadores de inmersión eléctricos de tornillo son componentes de forma tubular en un extremo y un extremo roscado que permite la sujeción al contenedor, estos pueden o no disponer de dispositivos adicionales para un mejor control de la temperatura, son ideales para calentar líquidos, fluidos viscosos a través del contacto directo, la figura 1.3 presenta una resistencia eléctrica de este tipo.

Figura 1.3. Calentador de inmersión de tornillo.
Fuente: http://www.precisamex.com/inmersion.htm

1.7.2 INMERSIÓN DE PUENTE LATERAL

Son diseñados para poder acoplarse a la parte superior del contenedor sin necesidad de que el mismo sea perforado, son de fácil extracción para el mantenimiento, en la figura 1.4 se visualiza un ejemplo de estos elementos.

Figura 1.4. Calentador de inmersión de puente lateral.
Fuente: http://www.precisamex.com/inmersion.htm

1.8 CINTAS TRANSPORTADORAS

Son dispositivos mecánicos que permiten el transporte de materiales de un lugar a otro de manera rápida y segura, están constituidos de dos tambores principales y de rodillos inter-tambores que brindan soporte a la banda, además de constar con un sistema motriz animado por un motor que da movimiento a uno de los tambores que por efecto de la fricción provoca que la banda se mueva, mientras que el otro tambor que se mueve libremente permite el retorno de la banda, una representación simplificada de este tipo de sistemas se presenta en la figura 1.5.

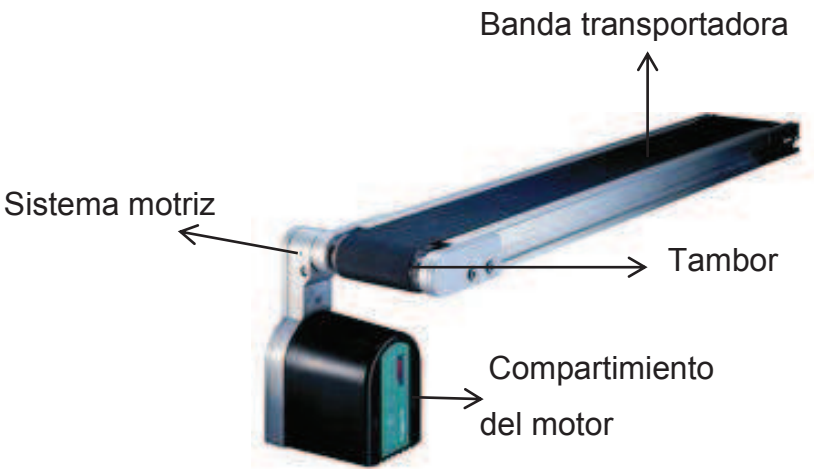


Figura 1.5. Cinta transportadora.

Fuente: http://www.cintastransportadoras.com.es/

1.9 RETENEDOR

También conocidos como juntas tóricas son elementos mecánicos empleados en las máquinas con la finalidad de garantizar estanqueidad en la misma de tal forma que la sustancia de trabajo no fugue hacia el exterior y contamine el interior del equipo.

Son ampliamente utilizados gracias a su diseño sencillo y facilidad de instalación su denominación viene dada por el diámetro interior del elemento, el diámetro de la sección y el material del cual está fabricado. Su funcionamiento está relacionado con la deformación del retenedor ya instalado debido a efectos de presión que se producen por la interacción de la junta tórica con el metal, provocando el efecto de cierre como se observa en la figura 1.6.

El material del cual está fabricado el retenedor es un fundamental para poder determinar su aplicación, por lo que las propiedades respectivas son presentadas en un capítulo posterior.

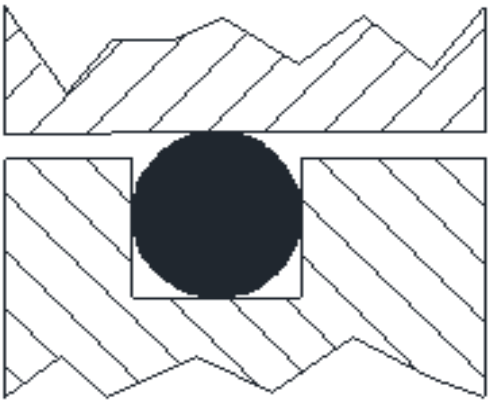


Figura 1.6. Juntas Tóricas.

Fuente: Catálogo de retenedores IJASA

1.10 ELECTROVÁLVULAS

Son dispositivos electromecánicos que están formados de un solenoide y válvula, para su funcionamiento el solenoide es el encargado de transformar la energía eléctrica en energía mecánica que permita vencer la fuerza del muelle y abrir la válvula. Las electroválvulas pueden presentar dos solenoides uno empleado para abrir y otro para cerrar el dispositivo o bien puede usar un solo solenoide para ejercer las dos funciones, un ejemplo de estos elementos se presenta en la figura 1.7.

1.11 PERNOS DE SUJECIÓN

Son elementos que permiten establecer una unión semipermanente entre las partes relacionadas lo que permite montar y desmontar la unión sin necesidad de destruir alguno de los elementos del conjunto. Esto representa una gran ventaja frente a las uniones permanentes como las juntas remachadas en las cuales para separar las partes es necesario destruir el remache, la facilidad de

acceder a los pernos en el mercado y su característica de normalizados presenta otra gran ventaja al momento de usarlos en el diseño de equipos.

Figura 1.7. Electroválvula de dos vías.

Fuente: Catálogo de electroválvulas, “Solenoid Valves” de m&m international

CAPÌTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 INTRODUCCIÓN

En este Capítulo se hace referencia a definiciones relacionadas con el estudio reológico de la crema empleada para el relleno de las galletas así como también de los elementos que intervienen en el proceso de diseño y construcción de la máquina.

2.2 ANÁLISIS REOLÓGICO

El análisis reológico es un procedimiento de laboratorio que permite definir las propiedades mecánicas de los alimentos que al ser sometidos a diversos esfuerzos durante el proceso de elaboración, dosificación, transporte y almacenamiento, sufren cambios en sus características físicas lo que altera su comportamiento durante los procesos. El poder determinar este comportamiento permite establecer las condiciones óptimas para el correcto funcionamiento de los elementos diseñados.

2.3 COMPORTAMIENTO DE LOS ALIMENTOS

Es importante poder definir el comportamiento de la sustancia de trabajo para así establecer las condiciones necesarias y obtener el diseño adecuado, partiendo de que los alimentos reaccionan de diferente forma frente a la acción

de un esfuerzo. En forma simplificada la clasificación de los fluidos frente al actuar de un esfuerzo de puede observar en la figura 2.1.

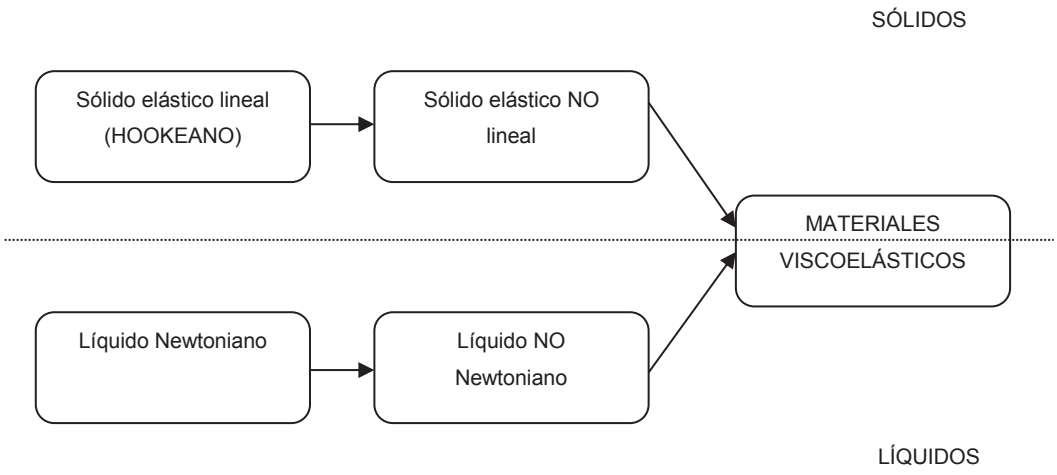


Figura 2.1. Clasificación de los fluidos por su comportamiento.
Fuente: Propia

La descripción de estos comportamientos es necesaria para el desarrollo investigativo de este trabajo, por lo que son mencionados a continuación:

2.3.1 FLUIDOS

Una clasificación muy específica define a los fluidos como:

- Fluidos newtonianos
- Fluidos no newtonianos

2.3.1.1 Fluidos newtonianos

Son aquellos fluidos en los cuales la relación entre el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la razón de corte.

2.3.1.2 Fluidos no newtonianos

En estos fluidos la relación entre el esfuerzo de corte y la razón de corte ya no es directamente proporcional, estos fluidos tienen una segunda clasificación según su comportamiento respecto al tiempo como se indica a continuación:

- Independientes del tiempo
- Dependientes del tiempo

2.3.1.2.1 Fluidos no newtonianos independientes del tiempo

Su comportamiento está regido únicamente por el esfuerzo de corte al igual que su viscosidad depende únicamente de la deformación siempre que se mantenga una temperatura constante. Estos fluidos se subdividen en:

- **Pseudoplásticos**.- se caracterizan porque a medida que aumenta el esfuerzo de corte su viscosidad disminuye.

- **Dilatantes**.- tienen un comportamiento inverso a los pseudoplásticos.

- **Plásticos de Bingham**.- la magnitud del esfuerzo de corte depende del estado del material.

- **Plásticos Herschel- Bulkley**.- representan una combinación de los comportamientos definidos anteriormente.

En la figura 2.2 se puede observar el comportamiento reológico de los fluidos.

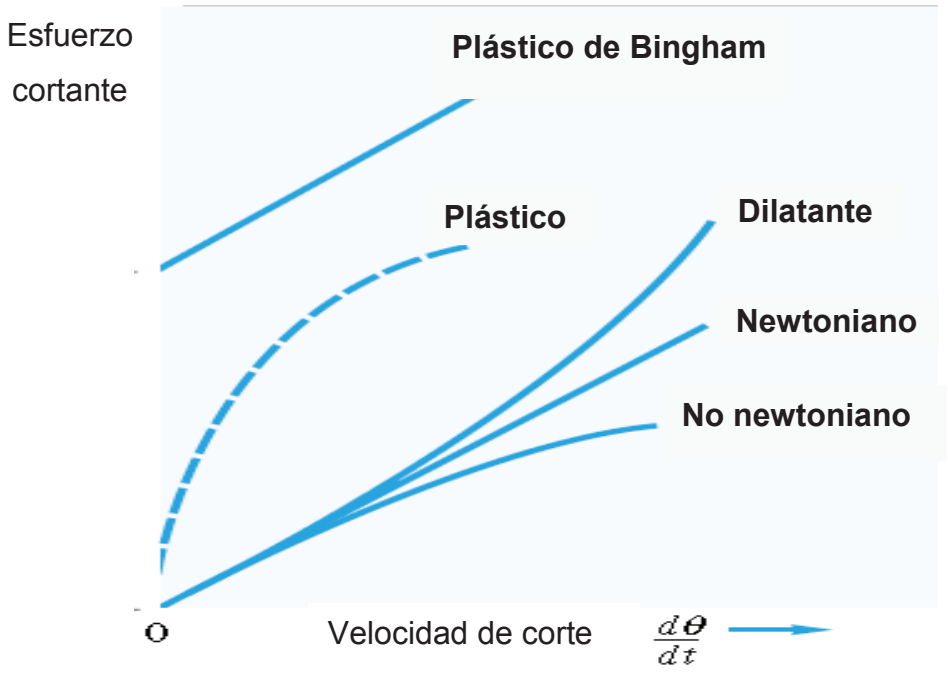


Figura 2.2. Comportamiento de los fluidos
Fuente: Propia

2.3.1.2.2 Fluidos no newtonianos dependientes del tiempo

Son fluidos que por sus características variantes con el tiempo con muy complejos de analizar ya que no solo varían con el tiempo de aplicación del esfuerzo sino que también lo hacen con la temperatura y la velocidad de corte.

2.4 DOSIFICACIÓN

Es la regulación y control de la cantidad que se desea depositar de cierto material dentro o sobre el lugar de almacenamiento para lo cual se emplean máquinas adecuadas para el tipo de sustancia de trabajo. El proceso de dosificación tiene un alto nivel de aplicación dentro de las diferentes industrias, como es el caso de la alimentaria, en la cual se requiere un control de las porciones a ser empleadas a más de cumplir un régimen de salubridad que los productos de este sector deben cumplir, emplear un proceso de dosificación para una línea de producción se traduce en varios beneficios como son:

- Optimización de recursos.
- Disminución de los tiempos de llenado.
- Limpieza.
- Fácil operación y mantenimiento.

Dependiendo del tipo de control que lleve el proceso del depósito de material, ya sea con la medida en unidades de masa o de volumen en un intervalo de tiempo, las máquinas dosificadoras tienen su clasificación, la misma que se indica a continuación:

2.4.1 TIPOS DE DOSIFICADORES.

Dependiendo de las necesidades de dosificación se pueden emplear diferentes clases de dosificadores como son:

- Dosificadores Volumétricos.
- Dosificadores de tornillo sin fin.
- Dosificadores de pistón.

- Dosificadores por gravedad.
- Dosificadores de bomba de engranes.

2.4.1.1 Dosificadores volumétricos.

Para este tipo de dosificadores, el depósito del material se da mediante el control del volumen del mismo, su aplicación más común está en la dosificación de granos. Están constituidos por una tolva que se alimenta manual o automáticamente una determinada cantidad de vasos telescópicos que contienen la sustancia a ser depositada, la figura 2.3 ilustra un sistema de estas características.

2.4.1.2 Dosificador de tornillo sin fin.

Constituido por una tolva en la que la sustancia es almacenada bajo ciertas condiciones para garantizar una dosificación continua y adecuada de la misma de tal forma que se cumpla con los requerimientos establecidos por el producto, la porción de material que se deposita es regulada mediante un tornillo sin fin que gira a determinadas revoluciones establecidas por el diseño. La figura 2.4. Representa un esquema de un sistema de dosificación con tornillo sin fin.

2.4.1.3 Dosificador de pistón

Este tipo de dosificador está formado por un pistón de carrera regulable dependiendo las necesidades, una válvula y una boquilla de dosificación, son fabricados principalmente en acero inoxidable, la figura 2.5. presenta un ejemplo de un sistema de dosificación mediante pistón.

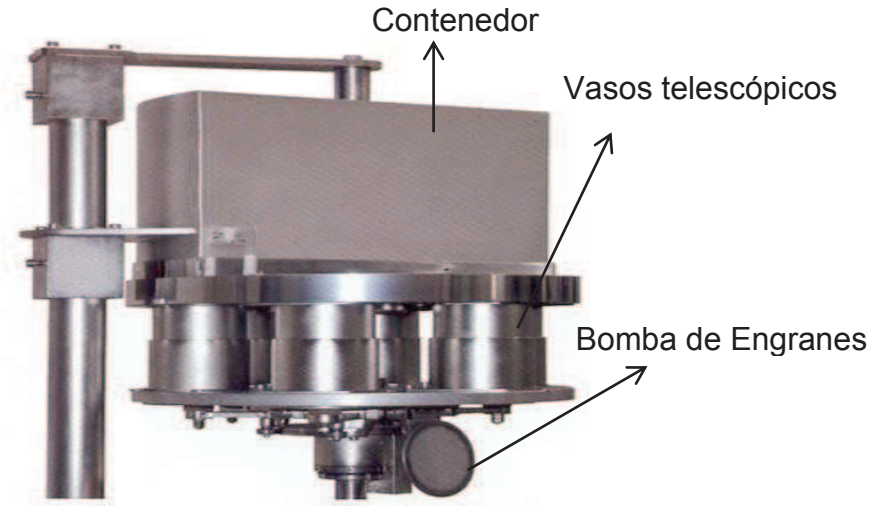


Figura 2.3. Dosificador volumétrico de plato giratorio.
Fuente:http://www.logismarket.com.ar/navigation/search/SearchTextualAction.do?sp=true&searchParam=dosificador%20volumetrico

2.4.1.4 Dosificador gravimétrico

La cantidad dosificada es más precisa ya que esta no depende de la variación del volumen aparente, la configuración más empleada para estos sistemas es la que en su conjugado cuenta con una banda y compuerta que actúan solidariamente entre ellas, mediante un control adecuado de la máquina la cantidad del material depositada cumple con los requerimientos de producción de la empresa, en el siguiente punto se expone con mayor detalle el sistema ibídem.

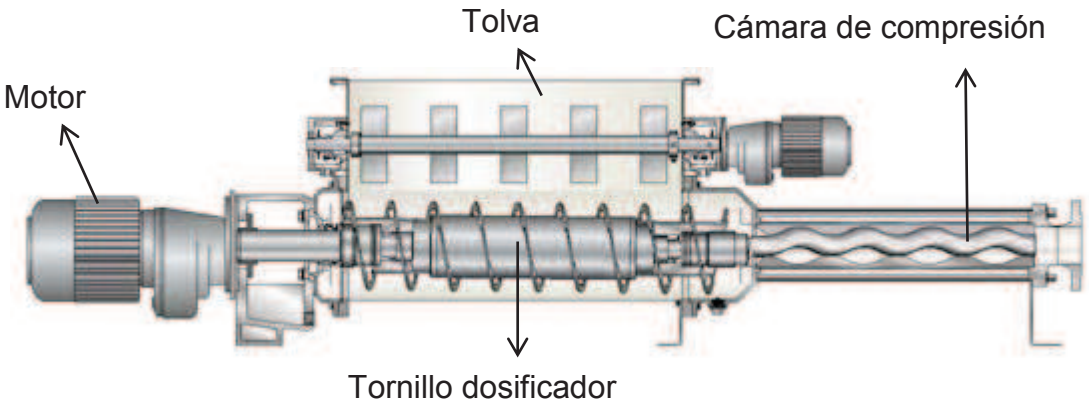


Figura 2.4. Dosificador volumétrico de tornillo sin fin.

Fuente: https://www.google.com.ec/search?q=dosificador+de+tornillo+sin+fin

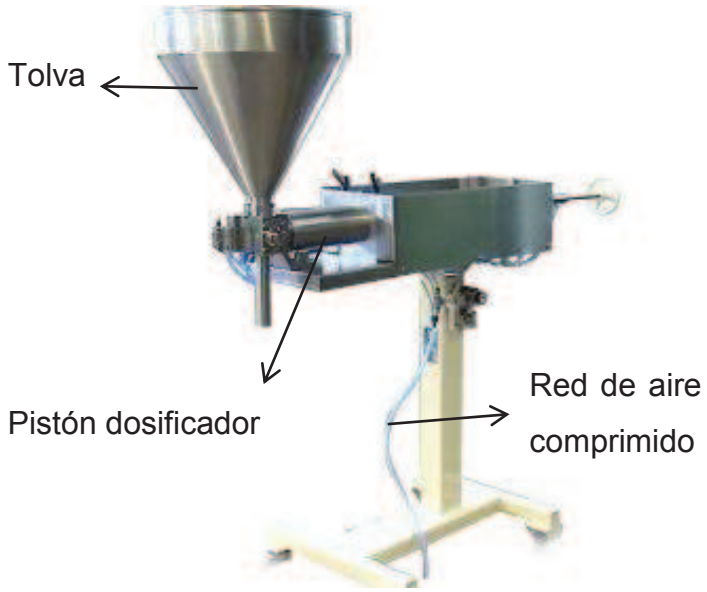


Figura 2.5. Dosificador de pistón

Fuente: http://www.famensal.com.sv/prod.php?prodid=0000000012

2.4.1.4.1 Dosificador gravimétrico de banda

Estos están constituidos por una tolva, una compuerta, una banda transportadora y una balanza, la cantidad de producto dosificado depende del peso de la masa que se deposite en la banda, así es la compuerta la encargada de permitir el paso del producto o de anularlo en función de una señal emitida por la balanza, dicha compuerta puede ser remplazada por tornillos sin fin. La máquina representada en la figura 2.6 permite tener un ejemplo de este tipo de sistemas.

Figura 2.6. Dosificador de banda con balanza y compuerta solidarias.

Fuente: https://www.google.com/search?q=dosificador+gravimetrico+y+banda

CAPÍTULO III

REQUERIMIENTOS Y PARÁMETROS DE DISEÑO

3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El proceso de colocar el relleno en las galletas es parte de la línea de producción dentro de la empresa solicitante, actualmente se lo realiza de manera manual, lo que implica pérdida de tiempo y materia prima, elevando de esta manera el costo en la producción del producto. En el mercado se encuentran maquinarias similares para este proceso pero por su elevado costo es un inconveniente para la media y baja industria, por lo que los productores de galletas recurren a la obtención de maquinaria de bajo costo y producción nacional que cumpla con los requisitos de calidad e higiene.

El presente trabajo pretende mejorar el proceso productivo de galletas, mediante la implementación de un equipo que permita optimizar esta sección de la línea productiva, abaratando los costos que implica la actividad y obtener un producto de calidad, con precios atractivos para el mercado nacional.

3.2 REQUERIMIENTOS.

El diseño de una máquina dosificadora de crema para galletas parte de un estudio realizado por la empresa fabricante la cual solicita introducir a su línea de procesos una alternativa que dosifique automáticamente la cantidad necesaria de crema sobre las galletas, la misma que tiene que cumplir con los objetivos de producción de la empresa, entre los principales requerimientos considerados por la empresa se tienen los siguientes:

3.2.1 REQUERIMIENTOS DE USO.

Debe tomarse en cuenta la seguridad del operador al manipular la máquina, al igual que se considera las dimensiones adecuadas para su libre utilización, facilidad de limpieza y peso moderado para tener facilidad de transportación y mantenimiento. Es importante considerar las capacidades del operario que controla el correcto funcionamiento para de esta forma garantizar que el producto cumpla con los parámetros de la empresa.

3.2.2 REQUERIMIENTOS ESTRUCTURALES.

La máquina es diseñada de tal forma que exista armonía entre su apariencia y funcionamiento, así se permite que todos los sistemas con cada uno de sus elementos trabajen coordinadamente y se alcance el objetivo de producción. El ensamble adecuado de los componentes permite la sujeción estable y resistente del conjunto. Así como garantizar las mínimas vibraciones mediante la correcta ubicación del sistema de transmisión.

3.2.3 REQUERIMIENTOS ECONÓMICOS.

Los costos que implican la fabricación de la máquina son un factor determinante para la ejecución final del mismo, por lo que se analizan las alternativas viables que permiten una reducción afable, con los objetivos de la empresa, las exigencias del mercado, las normativas que regulan la industria, siempre garantizando la funcionalidad del equipo y la satisfacción del usuario final.

3.3 PARÁMETROS DE DISEÑO.

En este punto se presentan los parámetros fundamentales, con los que se lleva a cabo al desarrollo del diseño, a continuación se indican los principales:

- **Propiedades de la crema.-** Partiendo de que la crema presenta propiedades que varían con respecto a la temperatura, se toma en cuenta que el método de transportación al dosificador y al llenado final sea adecuado, procurando que se mantengan constantes las características físicas para poder controlar mejor el proceso de dosificación.

- **Higiene.-** Al estar manipulando alimentos se debe contemplar que los materiales de los elementos que conforman la máquina cumplan con la respectiva normativa y requerimientos para su uso dentro de la industria y que la manipulación de los mismos se lleve a cabo de manera higiénica para evitar la contaminación del producto a dosificar.

- **Espacio.-** La disponibilidad de espacio, es un factor determinante en el diseño, debido a que el equipo final se acopla a un sistema de transporte ya existente.

3.4 ESTUDIO DE ALTERNATIVAS.

Al tener los requerimientos y los parámetros del diseño, se procede a realizar la división de la máquina en subsistemas, para hacer un estudio de las alterativas más adecuado para el diseño de la máquina. A continuación se presenta la división de la máquina en subsistemas.

3.5 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.

Para el procedimiento de selección de alternativas se consideran los sistemas más utilizados para la dosificación de sustancias similares a la crema, los mismos que son listados a continuación:

- Subsistema A: Dosificación.
- Subsistema B: Calentamiento.
- Subsistema C: Transportador.

3.5.1 ALTERNATIVAS PARA EL SUBSISTEMA A.

Se consideran los sistemas más comunes empleados para la dosificación de sustancias de características similares a la crema.

3.5.1.1 ALTERNATIVA 1: DOSIFICADOR DE TORNILLO SIN FIN.

El transporte del producto a dosificar es realizado por el trabajo de un tornillo sin fin hasta llegar a las boquillas desde donde el producto es colocado en su lugar final de acuerdo a los requerimientos de producción, la figura 2.4. del capítulo anterior permite tener una idea más clara de este tipo de sistemas.

3.5.1.1.1 Ventajas

- No requiere de grandes áreas de trabajo.
- Fácil montaje.
- Soportan altas temperaturas.
- Herméticos.

- Versátil.
- Varias zonas de carga y descarga.
- Dosificación continua.

3.5.1.1.2 Desventajas

- No grandes tamaños (hasta 50 m).
- No se pueden transportar materiales frágiles, delicados o abrasivos.
- Mayores requerimientos de potencia.
- Al quedar resto de materiales transportados con anterioridad existen riesgos de contaminación.
- Volumen de material bajo.

3.5.1.2 ALTERNATIVA 2: DOSIFICADOR DE CILINDRO- PISTÓN.

En este tipo de máquinas es la acción neumática de un pistón la que permite llevar la crema hasta las válvulas dosificadoras, mediante el movimiento axial del pistón a lo largo de la carrera dentro de la cámara de compresión, la figura 2.5 representa anteriormente permite visualizar un sistema de dosificación cilindro-pistón.

3.5.1.2.1 Ventajas

- Regulación en la dosificación.
- Fácil montaje.
- Herméticos.
- Fácil alimentación.

3.5.1.2.2 Desventajas

- Insuficiencia en el volumen de llenado debido a la presencia de espacios de aire en la cantidad a dosificar.
- No se pueden transportar materiales frágiles, delicados o abrasivos.
- Ciclos amplios de dosificación.
- Sistema neumático costoso.

3.5.1.3 ALTERNATIVA 3: DOSIFICADOR DE ENGRANES.

El transporte del producto a dosificar se ejecuta a través de una bomba de engranajes que empuja el producto hasta los dosificadores, la sustancia ingresa en la cámara de engranes que giran en sentido contrario el uno del otro, la cantidad dosificada depende de la velocidad de giro y del tamaño del diente de los engranes, la figura 3.1 representa un sistema de dosificación mediante bomba de engranes.

3.5.1.3.1 Ventajas

- Regulación en la dosificación.
- Herméticos.
- Fácil alimentación.
- Dosificación continua.
- Bajo ruido de operación.
- Reducción de desperdicios.

3.5.1.3.2 Desventajas

- Elevado costo de mantenimiento y construcción de elementos.
- No se pueden transportar materiales frágiles, delicados o abrasivos.
- Montaje complicado.
- Inconvenientes de sincronización.
- Lubricación de los elementos.

Figura 3.1. Dosificador de bomba de engranes.
Fuente: http://sistemasmecanicosiiesm464iunics.blogspot.com/

3.5.2 ALTERNATIVAS PARA EL SUBSISTEMA B.

Para el sistema de calentamiento se emplean resistencias de tipo sumergible para mantener la temperatura del fluido y establecer condiciones de trabajo óptimas para el proceso de dosificación. Existen resistencias sumergibles tubulares fabricadas en acero inoxidable, ideal para utilizarse en el fluido ya que se descarta la posibilidad de corrosión y contaminación del producto, estos

dispositivos se montan en el interior de la tolva con la finalidad de generar las condiciones necesarias para que la crema alcance las propiedades deseadas para el trabajo adecuado de la máquina, las resistencias sumergibles existentes en el mercado tienen diversas configuraciones de acoplamiento, por lo que para este proyecto se presentan las siguientes:

3.5.2.1 TIPO "L".

También conocidas como resistencias de puente lateral, trabajan en recipientes de baja profundidad y brindan una zona caliente grande, a más de calentar líquidos donde no se tiene un buen control del nivel, la figura 1.4 permite tener una idea general de este tipo de resistencias.

3.5.2.2 CON TAPÓN NPT.

Este tipo de resistencias presentan un sellado perfecto y las diversas posiciones donde se la puede adaptar entre el material que va a calentar y el exterior, debido a que le permite atornillarse a los recipientes, una representación de este tipo de resistencias se presenta en la figura 3.2.

Figura 3.2. Resistencia con tapón NPT.
Fuente: http://backeralpe.com/pdfs/calentadores.pdf

3.5.2.3 TUBULAR CON BRIDA.

Este tipo de resistencias permiten ampliar la capacidad de calentamiento y además presentan un sellado hermético al recipiente, siempre y cuando el montaje de las mismas sea apropiado y acorde a las recomendaciones del fabricante.

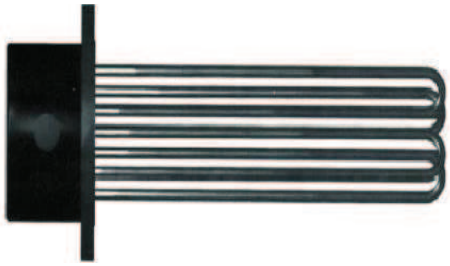


Figura 3.6. Resistencia con Brida.
Fuente: http://backeralpe.com/pdfs/calentadores.pdf

3.5.3 ALTERNATIVAS PARA EL SUBSISTEMA C.

Para el subsistema C la empresa solicitante manifiesta su intención de acoplar la máquina diseñada al sistema de transportación por bandas existente en la planta la misma que se regula acorde a los requerimientos de la máquina desarrollada en este trabajo.

3.5.4 MÉTODO DE CRITERIOS PONDERADOS.

La mayor parte de las veces para decidir entre diversas soluciones especialmente en la etapa de diseño conceptual basta conocer el orden de preferencia de su evaluación global. Es por ello que se recomienda el método ordinal corregido de criterios ponderados que sin la necesidad de evaluar los parámetros de cada propiedad y sin tener que estimar numéricamente el peso de cada criterio permite obtener resultados globales suficientemente significativos, este procedimiento se basa en tablas donde cada criterio o

solución, para un determinado criterio se confronta con los restantes valores y se asignan los valores siguientes.

Un valor de 1 si el criterio de las filas es superior o menor que el de las columnas, de 0,5 si el criterio de las filas es equivalente o igual al de las columnas y 0 si la solución de las filas es inferior o peor que el de las columnas.

Luego para cada alternativa se suman los valores asignados en relación a los restantes al que se le añade una unidad para evitar que el criterio o solución menos favorable tenga una valoración nula, después en otra columna se calculan los valores ponderados para cada criterio. Finalmente la evaluación total para cada propuesta resulta de la suma de productos de los pesos específicos de cada solución por el peso específico del respectivo criterio.

3.5.4.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL SUBSISTEMA A.

Se parte de la determinación de los parámetros relevantes que afectan a los requerimientos funcionales de la máquina a diseñar.

A continuación se mencionan los criterios de mayor importancia para el subsistema A:

- **Tiempo de dosificación:** Tiene como base el volumen de producción establecido por los requerimientos de la empresa.

- **Mantenimiento:** Garantizar el acceso a elementos de repuesto y/o fácil reparación.

- **Costo:** El costo debe ser moderado debido a los requerimientos económicos del sector industrial al cual se dirige la máquina.

En la tabla 3.1 que se presenta a continuación se establece la evaluación para cada criterio.

Tabla 3.1. Peso específico de cada criterio para el subsistema A.

Tiempo de dosificación > Mantenimiento > Costo.

CRITERIO	Tiempo de dosificación	Mantenimiento	Costo	∑+1	Ponderación
Tiempo de dosificación		**1**	**1**	**3**	**0,5**
Mantenimiento	**0**		**1**	**2**	**0,3**
Costo	**0**	**0**		**1**	**0,2**
			∑	**6**	**1**

Fuente: Propia

3.5.4.2 SELECCIÓN DEL SUBSISTEMA A.

En base a los criterios establecidos en la tabla 3.1 se visualiza la evaluación más acorde a los requerimientos, en la tabla 3.2 se realiza la evaluación de los pesos específicos de las alternativas para el subsistema A, al finalizar con la evaluación se tiene que la Alternativa 1 es la más adecuada para los requerimientos del cliente.

El análisis de la evaluación, bajo la consideración del tiempo de dosificación determina que la alternativa mediante un sistema de tornillo sin fin permite ejecutar el depósito del material de manera más rápida.

Tabla 3.2. Evaluación del criterio Tiempo de dosificación.

Alternativa 1 = Alternativa 3 > Alternativa 2.

Tipo de dosificador	Tornillo sin fin	Cilindro - Pistón	Engranes	∑+1	Ponderación
Tornillo sin fin		1	0,5	0,5	0,5
Cilindro -Pistón	0		0	1	0,2
Engranes	0,5	0		1,5	0,3
			∑	5	1

Fuente: Propia

La tabla 3.3 establece la evaluación en base al mantenimiento para las alternativas.

Tabla 3.3. Evaluación del criterio Mantenimiento.

Alternativa 2 > Alternativa 1 > Alternativa 3.

Tipo de dosificador	Tornillo sin fin	Cilindro - Pistón	Engranes	∑+1	Ponderación
Tornillo sin fin		1	1	3	0,5
Cilindro -Pistón	0		1	2	0,3
Engranes	0	0		1	0,2
			∑	6	1

Fuente: Propia

Al finalizar con la evaluación se determina que la mediante el sistema de tornillo sin fin permite realizar operaciones de mantenimiento sin mayor dificultad.

Finalmente la tabla 3.4 evalúa las alternativas del sistema de dosificación con respecto al costo, al finalizar con la evaluación se observa que el sistema

formado por tornillo sin fin y la opción del cilindro – pistón son las que presentan menor costo.

Tabla 3.4. Evaluación del criterio Costo.

Alternativa 2 = Alternativa 1 > Alternativa 3.

Tipo de dosificador	Tornillo sin fin	Cilindro - Pistón	Engranes	∑+1	Ponderación
Tornillo sin fin		0.5	1	2.5	0,4
Cilindro -Pistón	0.5		1	2.5	0,4
Engranes	0	0		1	0,2
			∑	6	1

Fuente: Propia

En la tabla 3.5 se presenta la alternativa más adecuada de cada uno de los parámetros para el subsistema A.

Tabla 3.5. Evaluación de cada Alternativa.

PONDERACIÓN	0,5	0,3	0,2		
CRITERIO	Tiempo de dosificación	Mantenimiento	Costo	∑+1	Ponderación
Tornillo sin fin	0.5	0,.5	0,4	2,4	0,4
Cilindro -Pistón	0,2	0,3	0,4	1.9	0,3
Engranes	0,3	0,2	02	1.7	0,3
Suma	1	1	1	6	1

Fuente: Propia

Como se puede notar en la Tabla 3.5 La alternativa más idónea para la dosificación es la del dosificador de tornillo sin fin presenta un tiempo de

dosificación menor a las demás alternativas, así como facilidad de mantenimiento. Por lo que es la seleccionada para este trabajo.

3.5.4.3 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL SUBSISTEMA B.

Se determinan los parámetros relevantes que afectan a los requerimientos funcionales de la máquina a diseñar para a continuación listar y desarrollar los criterios de mayor importancia para el sistema B.

- **Capacidad de calentamiento:** El área de calentamiento generada por la resistencia debe ser suficiente para garantizar que la crema alcance un grado de fluidez y pueda ser dosificada fácilmente.

- **Montaje:** El montaje de cada elemento debe ser sencillo y de fácil ejecución sin tener complicaciones durante y después del proceso, considerando la posibilidad de una falla o mantenimiento casos en los que se permita de forma rápida ejecutar las acciones pertinentes.

- **Costo:** Se toma en cuenta que el costo debe estar en la capacidad de los requerimientos económicos de la industria sin que esto merme la calidad del producto final e incumpla con las normativas aplicables a la industria alimentaria.

Para estas alternativas se selecciona la de tipo NPT debido a que la profundidad de la tolva no es mayor y es necesario que cumpla con el área suficiente de calentamiento, además debido al espesor de la tolva es la que más se adapta a la misma.

Luego del análisis de alternativas desarrollado anteriormente se presenta un resumen del mismo, con la finalidad de aclarar las alternativas seleccionadas.

3.5.5 RESULTADO FINAL DE ALTERNATIVAS.

Al obtener los resultados finales, la máquina se constituye de un sistema dosificador de tornillo sin fin, un sistema de calentamiento de la crema mediante resistencias eléctricas sumergibles, la máquina se acopla a un sistema de transporte por medio de banda.

El diseño final consta además de un sistema de transmisión de movimiento por medio de bandas accionadas por un motoreductor, la cantidad de crema a ser dosificada se lo realiza a través de electroválvulas controladas por un dispositivo PLC, el mismo que además permite regular el accionar de las resistencias del sistema de calentamiento.

3.6 PROTOCOLO DE PRUEBAS

El proceso que se lleva a cabo para elaborar el Protocolo de Pruebas, está basado en una evaluación comparativa de resultados esperados versus resultados obtenidos en la dosificación de la crema del relleno de galletas.

El Protocolo de Pruebas verifica tres indicadores fundamentales:

- Pruebas físicas y dimensionales,
- Pruebas en vacío,
- Pruebas con carga.

3.6.1 PRUEBAS FÍSICAS Y DIMENSIONALES

En esta etapa del protocolo de pruebas, se comprueban:

- Las dimensiones generales de la máquina,
- Las tolerancias establecidas por la ingeniería de detalle,
- El funcionamiento del motor eléctrico,
- Posición del tornillo sin fin.

Para realizar la prueba se emplean los siguientes instrumentos:

- Flexómetro,
- Calibrador pie de rey,
- Micrómetro.

3.6.2 PRUEBA EN VACIO.

Para este procedimiento se pone en marcha la máquina sin carga y se verifica:

- Que no existan vibraciones exageradas que se transmitan a los elementos,
- El funcionamiento adecuado de las electroválvulas,
- Defectos del montaje.

Para esta etapa de las Pruebas de campo se emplea la inspección visual y auditiva.

3.6.3 PRUEBA CON CARGA

En esta prueba se verifica el funcionamiento de la máquina a plena carga, comprobándose los siguientes puntos:

- Capacidad de dosificación,
- Velocidad de trabajo,
- Cantidad de crema por galleta.

Se emplean los siguientes instrumentos:

- Cronómetro,
- Balanza.

Para la ejecución de las pruebas se utiliza el formato “Pruebas de Campo” establecido en el ANEXO 16.

CAPÍTULO IV

DISEÑO DE LA MÁQUINA

En el presente capítulo se desarrolla el diseño de la máquina en base a las características técnicas que se requieren para poder alcanzar la producción especificada por la empresa solicitante.

4.1 RESTRICCIONES DEL EQUIPO.

Partiendo de la capacidad de producción que se debe cumplir por la máquina se determinan ciertas condiciones de trabajo principales para el posterior diseño.

4.1.1 CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN

La máquina debe alcanzar un nivel de producción de 120 galletas por minuto dato que permite definir tiempos dentro del proceso de dosificación así como otras variables para garantizar su funcionalidad, además de restringir las características técnicas de la banda transportadora sobre la cual se acopla el equipo.

4.2 DIMENSIONAMIENTO BANDA TRANSPORTADORA

El dimensionamiento de este sistema facilita establecer requerimientos de montaje y funcionamiento del equipo, lo que es un punto muy importante para

el diseño, ya que la máquina se acopla a un sistema externo de transportación siendo fundamental restringir ciertas variables.

En la figura 4.1 se observa la disposición geométrica de las galletas sobre la banda transportadora.

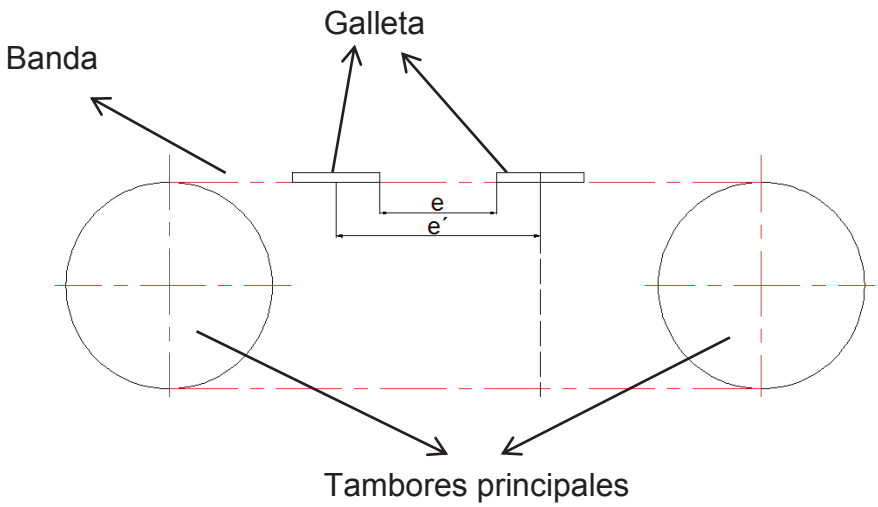


Figura 4.1. Disposición de galletas a lo largo de la banda.
Fuente: Propia

Donde:

$$e' = e + d_g \qquad (\mathbf{4.1})$$

$$e' = 20 + 65$$

$$e' = 85\ mm.$$

Siendo:

d_g: Diámetro de la galleta [mm]

e: Espacio entre galletas [mm]

e': Distancia entre centros de las galletas [mm]

Para el cálculo del tiempo por ciclo de dosificado es decir avance y descarga o se aplica de la siguiente ecuación.

$$td' = \frac{td}{\#\ de\ galletas} \qquad (\mathbf{4.2})$$

$$td' = \frac{60}{20}$$

$$td' = 3\ s/galleta$$

Donde:

td': Tiempo de trabajo por galleta

td : Tiempo de diseño

$$td' = tav + tde \qquad (\mathbf{4.3})$$

Donde:

tav: Tiempo avance de la banda

tde: Tiempo descarga de crema

Si:

$$tav = tde$$

Entonces:

$$td' = 2tav$$

$$tav = 1.5\ s$$

Para el cálculo de la velocidad de avance de la banda se considera el tiempo de descarga de la crema y que la misma se detiene durante la misma cantidad de tiempo por lo que se establece lo siguiente.

$$Vb = \frac{e'}{tav} \qquad (\mathbf{4.4})$$

$$Vb = \frac{85}{1{,}5}$$

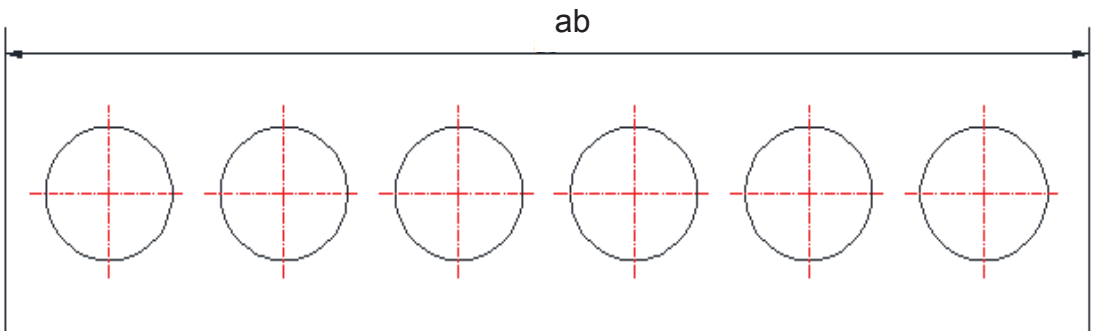
$$Vb = 56{,}67\ {}^{mm}/_{s}$$

Luego de este análisis se determina que la banda avanza a una velocidad de 56,67 mm / s un recorrido de 85 mm durante 1.5 s para detenerse durante 1,5 s tiempo empleado para la descarga de la crema y avanzar nuevamente y repetir el ciclo.

La máquina a ser diseñada presenta requerimientos para su correcto funcionamiento como son las dimensiones mínimas de la banda transportadora, por esta razón es que se plantean las siguientes consideraciones geométricas de la banda en función de la capacidad de producción a ser cumplida y las características del producto final.

Para establecer el ancho mínimo de la banda se parte de la disposición de los dosificadores que en este caso son 6 en paralelo, en la figura 4.2 se observa lo antes mencionado.

Figura 4.2. Distribución de galletas a lo ancho de la banda.



Fuente: Propia.

Donde:

a_b : Ancho mínimo de la banda [mm]

$$a_b = 6d_g + 7e \qquad (\mathbf{4.5})$$

$$a_b = 6\,(65) + 7\,(20)$$

$$a_b = 530\ mm$$

Para determinar la longitud mínima de la banda transportadora se parte de que se debe contar como mínimo con seis hileras de 20 galletas, cada una alimentada continuamente para mantener un proceso de dosificación permanente, realizando un análisis similar al anterior se plantea la relación para establecer la longitud mínima requerida para la banda transportadora.

$$l_b = 20d_g + 20e \qquad (\mathbf{4.6})$$

$$l_b = 20(65) + 20(20)$$

$$l_b = 1700\ mm$$

Donde:

l_b: Longitud mínima de la banda [mm].

4.3 POTENCIA REQUERIDA

Para poder determinar la potencia requerida por el funcionamiento de la máquina se realiza el análisis de los factores influyentes como las propiedades físicas de la crema, dimensiones y capacidades del tornillo sin fin.

4.3.1 DENSIDAD DE LA CREMA.

Para este cálculo se realiza un análisis experimental en base a productos de características similares a más de considerar el análisis reológico de la crema el mismo que se lo observa en el ANEXO 1.

Teniendo así primero la obtención de la cantidad de crema contenida en cada galleta para lo cual se extrae la misma de una muestra total de 6 galletas proceso que se presenta en el ANEXO 2 mediante un registro fotográfico obteniendo los siguientes resultados.

m_g : Masa total de crema por galleta es de 4.5 g.

d_c : Diámetro de crema depositada es de 40 mm.

h_c : Altura de la crema en la galleta es de 3 mm.

d_g : Diámetro de la galleta es de 65 mm.

Por lo tanto:

$$V_g = \frac{\pi}{4} * \ d_c^4 * \ h_c \qquad (\mathbf{4.7})$$

$$V_g = \frac{\pi}{4} * \ 40^2 * 3$$

$$V_g = 3769.91\ mm^3 = 3.77\ cm^3$$

Entonces:

$$\delta_g = \frac{m_g}{V_g} \qquad (\mathbf{4.8})$$

$$\delta_g = \frac{4.5\ g}{3.77\ cm^3} = 1.19\ {}^{g}/_{cm^3}$$

Donde:

V_g : Volumen de crema por galleta.

δ_g : Densidad de la crema.

4.3.2 CAPACIDAD DE CARGA Y DIAMETRO DE HÉLICE

Considerando que en un minuto pasan 20 galletas por cada dosificador con un requerimiento de 4,5 g de crema, se logra obtener la capacidad de carga que resulta ser de 90 g / min pero esta cantidad de crema satisface el proceso por un minuto, para poder mantener una continuidad del proceso de dosificación este valor se considera de 200 g/min que son equivalentes a 0.012 Ton / h. Partiendo de la siguiente relación se puede determinar el diámetro de la hélice del tornillo.

$$Q_{teórica} = 3600 \times S \times v \times \gamma \times k \ [{}^{\mathrm{Ton}}/_{\mathrm{h}}] \qquad (\mathbf{4.9})$$

$$\mathrm{S} = \frac{\pi \times \mathrm{D}^2 \times \lambda}{4} \ [m^2] \qquad \mathbf{(4.10)}$$

$$v = \frac{t \times n}{60} \ [{}^{m}/_{s}] \qquad \mathbf{(4.11)}$$

Donde:

$Q_{teórica}$: Capacidad de carga

S : Área de relleno del canalón

v : Velocidad de desplazamiento del tornillo

γ : Densidad del material transportado

D : Diámetro de la hélice del tornillo

λ : Coeficiente de llenado del canalón

t : Paso del tornillo

n : Revoluciones por minuto del tornillo

k : Coeficiente de disminución de llenado por el ángulo de trabajo β

Partiendo de las consideraciones de que el tornillo es de paso normal lo que implica que el paso es igual a diámetro, que el número de revoluciones es de 60 rev/min valor que resulta del análisis reológico, la densidad de la crema es de 1,19 Ton/m^3 y de los valores de los coeficientes de las tablas respectivas. En la tabla 4.1 se observan los valores para el coeficiente de llenado del canalón λ, las características del material a transportar lo ubican en materiales ligeros poco abrasivos por lo que el valor del coeficiente de llenado es 0,32.

Tabla 4.1. Coeficiente de llenado del canalón

Material	λ
Pesados y abrasivos	0,125
Pesados poco abrasivos	0,25
Ligeros poco abrasivos	0,32
Ligeros no abrasivos	0,4

Fuente: http://es.scribd.com/doc/24729435/46/Generalidades-en-el-diseno-del-tornillo-transportador

En la tabla 4.2 se observan valores para el coeficiente de disminución de llenado k en función del ángulo de trabajo β.

Tabla 4.2. Coeficiente de disminución de llenado del canalón

B	0	5	10	15	20
$\boldsymbol{k}$	1	0.9	0.8	0.7	0.6

Fuente: http://es.scribd.com/doc/24729435/46/Generalidades-en-el-diseno-del-tornillo-transportador

El ángulo de trabajo del dosificador de tonillo sin fin es 0° por lo que el valor de k es de 1. Sustituyendo las ecuaciones 4.10, 4.11 en la ecuación 4.9 se llega a la siguiente expresión.

$$Q_{teórica} = 47 \times \lambda \times \gamma \times k \times n \times \mathrm{D}^3$$

$$\mathrm{D} = \sqrt[3]{\frac{Q_{teórica}}{47 \times \lambda \times \gamma \times k \times n}}$$

$$D=\sqrt[3]{\frac{0{,}012}{47\ \times 0.32\ \times 1.19\ \times 1\ \times 60}}$$

$$D = 0.02\ m = 2{,}24\ cm\ \approx\ 1''$$

Con este valor se realiza el cálculo de la capacidad de carga real y se compara con la capacidad teórica con el fin de verificar si el diámetro obtenido satisface las necesidades de dosificación.

$$Q_{real} = 47\ \times 0.32\ \times 1{,}19\ \times 1\ \times 60\ \times\ 0{,}0254^3$$

$$Q_{real}=0.0175\ \text{Ton}\ /\text{h} \approx 4{,}72 \times 10^{-3}\ {}^{kg}/_{s}\ \approx 0.014\ {}^{m^3}/_{h}$$

Al realizar la comparación se observa que los dos valores son cercanos por lo que una selección de diámetro de hélice de $2{,}24\ cm\ \approx\ 1''$es factible.

4.3.3 CÁLCULO DEL DIÁMETRO DE LA BASE DE LA HÉLICE

Para el cálculo de este parámetro se parte de la siguiente relación.

$$Q_{real} = \frac{\pi}{4}(D^2 -\ d^2) \times t\ \times n\ \times\ \lambda\ \times 60 \qquad (\mathbf{4.12})$$

$$d = \sqrt{D^2 - \frac{4\ \times\ Q_{real}}{\pi\ \times\ t\ \times n\ \times\ \lambda\ \times 60}}$$

Donde:

d: Diámetro base de la hélice

$$d = \sqrt{(0{,}0254)^2 - \frac{4(0{,}014)}{\pi \times 0{,}0254 \times 60 \times 60 \times \lambda}}$$

Si:

$$\lambda = 0{,}35$$

Entonces:

$$d = 10\,mm \approx {}^{1}/_{2}{}''$$

La altura de la hélice resulta ser de ¼ de pulgada, para mantener armonía en el diseño se asume el ancho de la hélice en ¼ de pulgada, en la figura 4.3 se observa la vista frontal del tornillo con los diámetros exterior, de base y medio.

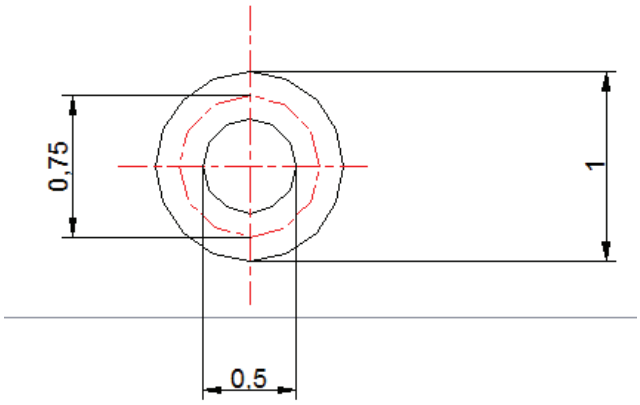


Figura 4.3. Vista frontal del eje tornillo.

Fuente: Propia

Mientras que en la figura 4.4 se tiene la configuración geométrica del eje en vista lateral, esta figura permite observar el ángulo de avance, el ángulo de

hélice y el paso del mismo por lo que es didácticamente aceptable para la obtención de los ángulos.

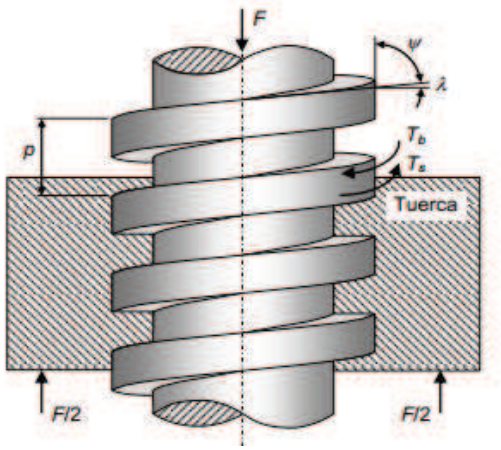


Figura 4.4. Vista lateral del eje tornillo.

Fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, octava edición.

Donde:

λ Ángulo de avance.

Ψ Ángulo de hélice.

De la figura 4.4 se nota que la suma entre los ángulos de avance y hélice es de 90°, además de que para el tipo de tornillo seleccionado de paso normal el avance l es igual al paso, luego de este análisis y en base a la teoría, el ángulo de avance es calculado aplicando el teorema de Pitágoras en la figura 4.5 que permite observar la disposición de fuerzas que actúan sobre el área normal de la rosca y el ángulo de avance.

Entonces:

$$\tan \boldsymbol{\lambda} = \frac{l}{\pi d_m} \qquad (\mathbf{4.13})$$

$$\tan \boldsymbol{\lambda} = \frac{1}{\pi \times 0.75}$$

$$\boldsymbol{\lambda} = 23°$$

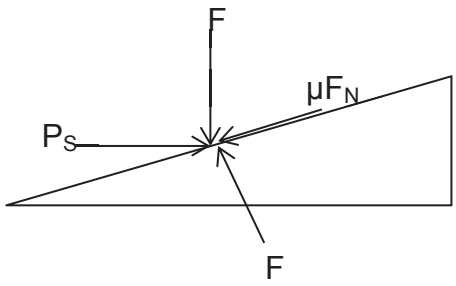


Figura 4.5. Diagrama de fuerzas sobre un hélice.

Fuente: Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley, octava edición, pág. 401.

4.3.4 CÁLCULO POTENCIA REQUERIDA

Para la obtención de la potencia requerida se realiza el cálculo de la potencia solicitada por un tornillo transportador para luego obtener la necesaria por los seis dosificadores que conforman la máquina, recurriendo a las siguientes relaciones.

$$P = P_H + P_N + P_{ST} \qquad (\mathbf{4.14})$$

$$P_N = \frac{D \times L_t}{20} \qquad (\mathbf{4.15})$$

$$P_H = C_0 \frac{Q \times L_t}{367} \qquad (\mathbf{4.16})$$

Donde:

P: Potencia requerida por tornillo.

P_H: Potencia necesaria para desplazamiento horizontal.

P_N: Potencia necesaria accionamiento del tornillo.

P_{ST}: Potencia necesaria accionamiento del tornillo inclinado.

L_t: Longitud del tornillo.

C_0: Coeficiente para materiales sólidos.

Dado a que la posición de trabajo es horizontal el valor de P_{ST} es cero, mientras que en la tabla 4.3 se tienen los valores para el coeficiente para materiales sólidos.

Tabla 4.3. Coeficiente para materiales solidos

Material	C_0
Harina, aserrín, materiales granulosos	1,2
Turba, sosa, carbón en polvo	1,6
Antracita, carbón, sal de roca	2,5
Yeso, arcilla, cal, arena, tierra fina	4

Fuente: http://es.scribd.com/doc/24729435/46/Generalidades-en-el-diseno-del-tornillo-transportador.

El material a transportar es de tipo granuloso por lo que el valor de C_0 es de 1,2 y considerando que la longitud el tornillo es de 20 cm, por lo que el cálculo de la potencia requerida para un tornillo resulta de la siguiente manera.

$$P_N = \frac{0.0254 \times 0.2}{20} = 2{,}54 \times 10^{-4}\ kW$$

$$P_H = 1{,}2\ \frac{4{,}72 \times 10^{-3} \times 0{,}2}{367} = 3.08 \times 10^{-6}\ kW$$

$$P = 2{,}57 \times 10^{-4}\ kW \approx 3{,}4 \times 10^{-4}\ HP$$

Por lo tanto la potencia requerida para los seis tornillos P_6 corresponde a la siguiente relación:

$$P_6 = P \times 6 \qquad (\mathbf{4.17})$$

$$P_6 = 3{,}4 \times 10^{-4} \times 6$$

$$P_6 = 0{,}0024\ HP$$

El valor de la potencia requerida por los seis tornillos para poder transportar la crema es bajo pero para por motivos de mercado se selecciona un motor de 0,5 HP y 1600 rpm del cual sus características técnicas se encuentran en el ANEXO 3.

4.3.5 BANDAS Y POLEAS

Para este caso se aplican las recomendaciones de la teoría planteada en el libro de Diseño en ingeniería mecánica de Shigley planteadas en la tabla 4.4. Dado a que se requiere una velocidad de 60 rpm del tornillo la relación de transmisión de las poleas es de 1:1.

Tabla 4.4. Consideraciones para la selección de las bandas.

Consideraciones para la selección de las bandas			
Potencia de Motor eléctrico	**Velocidad del motor eléctrico**	**Potencia considerando las pérdidas (70%)**	**Velocidad salida del reductor**
0,5 Hp	1600 rpm	0,27 Hp	60 rpm

Fuente: Propia

4.3.5.1 OBTENCIÓN DEL TIPO DE BANDA

En este proyecto se emplean bandas planas dada su facilidad de montaje y la accesibilidad de encontrarlas en el mercado en diversas longitudes lo cual es un aspecto importante para este caso puesto que se trabaja con distancias entre centros pequeñas.

De la tabla 17.2 de Shigley del ANEXO 4 se determina el tipo de banda a usarse partiendo de que se desea tener una polea máximo de 2 pulgadas de diámetro, de esta forma se tiene que la banda es de tipo F-1^c cuyo espesor es de 0.05 pulgadas.

4.3.5.2 DISTANCIA ENTRE CENTROS

La distancia entre ejes debe ser mayor que el diámetro de la polea motriz y menor de tres veces la suma de los diámetros de las poleas, así la distancia entre centros queda definida dentro el siguiente rango.

$$D < C < 3(D + d) \qquad (\mathbf{4.18})$$

Donde:

D: Diámetro de la polea motriz.
d: Diámetro de la polea conducida.
C: Distancia entre centros.

Resultando:

$$50 < C < 3(50 + 50)$$
$$50 < C < 300$$

Para este caso se selecciona una distancia entre centros de 85 mm para mantener armonía con la distribución de las galletas sobre la banda.

4.3.5.3 LONGITUD DE BANDA

Para determinar la longitud de la banda se utiliza la siguiente ecuación.

$$L = [4C^2 - (D - d)^2]^{1/2} + \frac{1}{2}(D\theta_D + d\theta_d) \qquad (\mathbf{4.19})$$

Donde:

D: Diámetro de la polea motriz [mm].
d: Diámetro de la polea conducida [mm].
C: Distancia entre centros [mm].
θ_D y θ_d: Ángulo de contacto [rad].

L: Longitud de banda [mm].

Entonces:

$$\theta_d = \pi - 2\, sen^{-1} \frac{D-d}{2C} \qquad (\mathbf{4.20})$$

Y:

$$\theta_D = \pi + 2\, sen^{-1} \frac{D-d}{2C} \qquad (\mathbf{4.21})$$

Puesto que la relación de transmisión es de 1:1 es decir $D = d$ se tiene que:

$$\theta_D = \theta_d = \theta = \pi$$

Reemplazando estas condiciones en la ecuación 4.19 se obtiene que:

$$L = 2C + D\theta$$

$$L = 2(85) + (50{,}8)\pi$$

$$L = 329{,}59\, mm$$

La figura 4.6 presenta la geometría del sistema de bandas seleccionado para la transmisión de movimiento a los tornillos dosificadores..

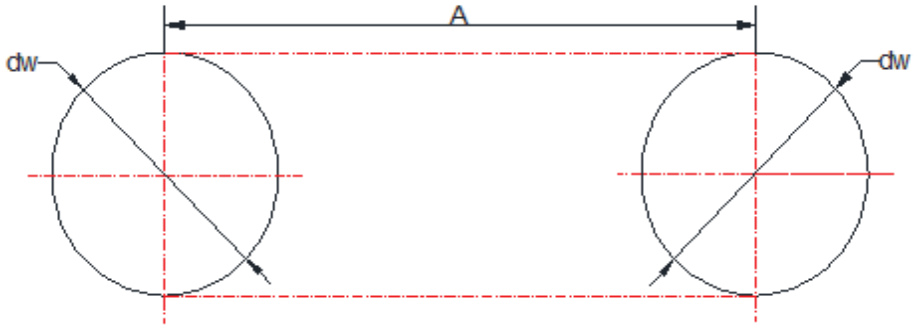


Figura 4.6. Geometría del sistema de bandas con relación 1:1.

Fuente: Propia.

En la tabla 4.5 se observa un resumen de las características de las poleas y bandas seleccionadas.

Tabla 4.5. Polea y Banda seleccionada

Tipo de banda	Espesor (pulg)	Longitud de la banda (mm)	Distancia entre centros (mm)	Diámetro Polea (mm)	Ancho Polea (pulg)
Plana F-1[c]	0.05	329,59	85	50,8	0.5

Fuente: Propia

4.3.5.4 TRANSMISIÓN DE POTENCIA EN LA BANDA-POLEA

La obtención del torque que se transmite en el sistema de bandas y poleas permite el dimensionamiento del eje dosificador, para lo cual se establece el siguiente procedimiento:

4.3.5.4.1 Cálculo de la tensión centrífuga

Para el cálculo de la fuerza centrífuga se emplea la siguiente formula:

$$\mathrm{F_c} = \frac{w}{32.17}\left(\frac{V}{60}\right)^2 \qquad (\mathbf{4.22})$$

Donde:

$\mathrm{F_c}$: Tensión circunferencial debido a la fuerza centrífuga

V: velocidad (pie/min)

w: Peso de un pie de banda

Para obtener la velocidad:

$$\mathrm{V} = \frac{\pi * D * \mathrm{n}}{12} \qquad (\mathbf{4.23})$$

$$\mathrm{V} = \frac{\pi * 2 * 60}{12}$$

$$\mathrm{V} = 31.41\ \mathrm{ft/min}$$

$$w = 12\gamma bt \qquad (\mathbf{4.24})$$

Donde:

γ: Peso específico de la banda [lbf/pulg^3].

b: Ancho de banda [pulg].

t: Espesor de banda [pulg].

De la tabla 17.2 de Shigley se tiene que el peso específico de la banda es:

$$\gamma = 0.035\ {}^{lbf}/_{pulg^3} = 9500.65\,\frac{N}{m^3}$$

$$t = 0.05\,pulg = 0.0012\,m$$

El ancho de la banda es de:

$$b = 0.5\,pulg = 0.012\,m$$

Entonces:

$$w = 12 \times 0.035 \times 0.5 \times 0.05 = 0.1\ {}^{lbf}/_{pulg} = \ 17.51\,N/m$$

Reemplazando en la ecuación 4.22:

$$F_c = \frac{0.1}{32.17}\left(\frac{31.41}{60}\right)^2 = 8.52\ \times\ 10^{-4}\,lbf = \ 0.00378\,N$$

4.3.5.4.2 Cálculo del par de torsión.

Para determinar el calor del par de torsión se considera la siguiente relación:

$$T = \ M_m = \frac{22500\ \times H\ \times\ k_s\ \times\ n_d}{n\ \times\ \pi} \qquad (\mathbf{4.25})$$

Donde.

T: Par de torsión.

H : Potencia nominal.

k_s : Factor de servicio.

n_d: Factor de seguridad de diseño.

n: Revoluciones de entrada.

Para el presente trabajo se considera un factor de servicio k_s para una maquinaria impulsada uniforme y características del par de torsión normal, este valor es determinado en la tabla 17.15 recomendada en la página 868 de Shigley presentada en el ANEXO 5.

El valor del factor de seguridad de diseño n_d se asume con un valor de 1.5, sustituyendo estas condiciones en la ecuación 4.25 se tiene.

$$T = \frac{22500 \ \times 0.5 \times 1.0 \times 1.1}{60 \ \times \ \pi} = 65{,}65 \ Kgxcm = 6{,}43 \ Nm = 56{,}91 \ lbfxpulg$$

4.3.5.4.3 Cálculo fuerzas F1 y F2 sobre la polea

Es necesario que se determine el valor de la siguiente expresión:

$$exp(f\emptyset) = \exp(0.5 \times \pi) = 4.81$$

Para la obtención de las fuerzas F_1 y F_2 se consideran las siguientes ecuaciones.

$$F_1 = F_i + F_c + {}^{T}/_{D} \qquad (\mathbf{4.26})$$

$$F_2 = F_i + F_c - {}^{T}/_{D} \qquad (\mathbf{4.27})$$

$$F_i = \frac{T}{D}\frac{\exp(f\emptyset)+1}{\exp(f\emptyset)-1} \qquad (\mathbf{4.28})$$

Donde:

F_1 , F_2: Fuezas actuantes [lbf].

F_i: Tensión inicial [lbf].

Sustituyendo valores en la ecuación 4.27 se tiene que:

$$F_i = \frac{56{,}91}{2}\frac{4.81+1}{4.81-1} = 43{,}39\ lbf = 193.00\ N$$

De las ecuaciones 4.26 y 4.25 se determinan los valores de las fuerzas F_1 y F_2 dando como resultado lo siguiente:

$$F_1 = 43{,}39 + 8.52 \times 10^{-4} + \frac{56{,}91}{2} = 71{,}85\ lbf = 319.60\ N$$

$$F_2 = 43{,}39 + 8.52 \times 10^{-4} - \frac{56{,}91}{2} = 14{,}94 lbf = 66.46\ N$$

4.3.6 CÁLCULO DE REACCIONES

Una vez determinadas las fuerzas F_1 y F_2 es necesario determinar la fuerza distribuida generada por la columna de crema sobre el tornillo, luego de esto

se procede con la ayuda del software MDSolids 3.5 al cálculo de las reacciones generadas por efecto de las fuerzas actuantes sobre el tornillo dosificador.

Para este caso se considera el caso más extremo del tornillo en el cual se tienen 2 poleas que transmiten el movimiento, esto dado a que en los tornillos interiores del sistema se requiere de dos poleas una para que les sea transmitido el movimiento y otra para replicar el movimiento al siguiente dosificador.

4.3.6.1 FUERZA DISTRIBUIDA SOBRE EL DOSIFICADOR.

Partiendo de la configuración geométrica de la columna de crema sobre el dosificador que se observa en la figura 4.7 y considerando valores como la densidad de la crema y la gravedad se determina el valor de esta fuerza actuante.

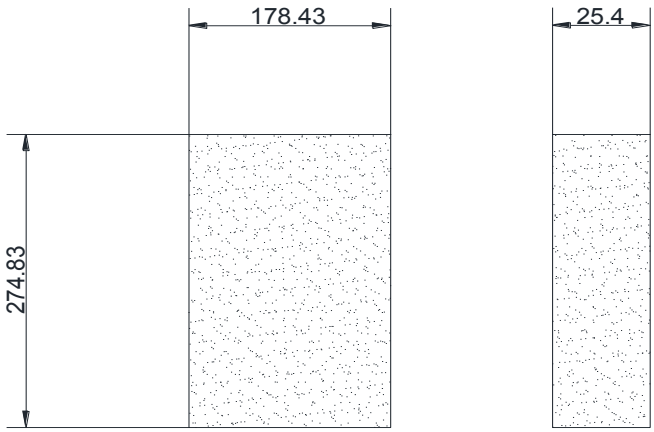


Figura 4.7. Columna de crema sobre el dosificador (valores en mm).

Fuente: Propia.

El volumen que ocupa la columna de crema es de 1241.17 cm^3 valor que al multiplicar por la densidad de la crema permite determinar la masa de crema contenida en la columna siendo de 1476,98 gr, una vez encontrado el valor de la cantidad de masa se obtiene el peso de dicha cantidad resultando ser de 14.47 N que equivalen a 3.18 lbf. Por lo tanto el valor de la carga distribuida sobre el tornillo dentro de la tolva es de w=0.45 lbf / in.

En las figuras 4.8 y 4.9 que se indican a continuación se puede observar el diagrama de cuerpo libre del tornillo dosificador en el plano xy en que se encuentra la fuerza distribuida generada por la columna de crema y xz respectivamente.

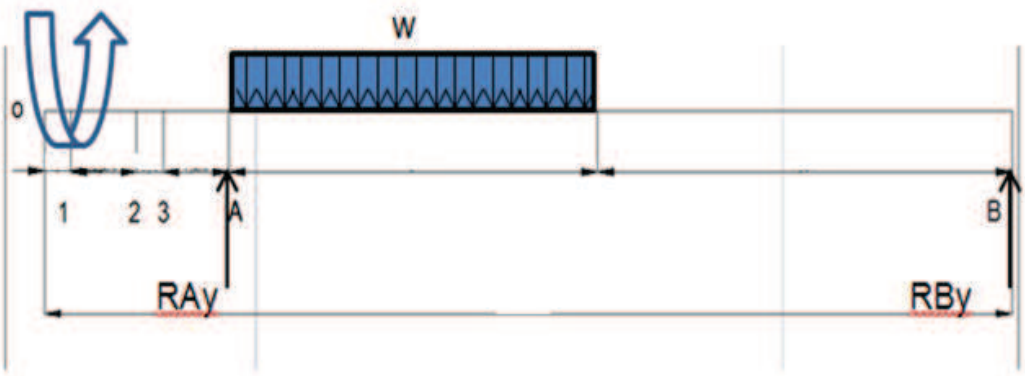


Figura 4.8. Diagrama de cuerpo libre del dosificador en el plano xy.

Fuente: Propia.

Figura 4.9. Diagrama de cuerpo libre del dosificador en el plano xz.

Fuente: Propia.

Empleando la herramienta computacional mencionada anteriormente se determinan las reacciones en los puntos A y B, de igual manera se determinan los diagramas de fuerza cortante y momento flector sobre el dosificador, estos resultados se observan en las figuras 4.10 y 4.11. Analizando los resultados obtenidos se tiene lo siguiente para el primer eje dosificador.

$$R_{Ay} = 6{,}24 lbf = 27.76\ N$$

$$R_{Az} = -190{,}80\ lbf = 848.72\ N$$

$$R_{By} = -3{,}09\ lbf = 17.35\ N$$

$$R_{Bz} = 17{,}22\ lbf = 76.6\ N$$

$$M_1 = M_{máx\ xy} = 56{,}91\ lbf\ x\ pulg = 6.43\ Nm$$

$$M_2 = M_{máx\ xz} = 256{,}03\ lbf\ x\ pulg = 28.93\ Nm$$

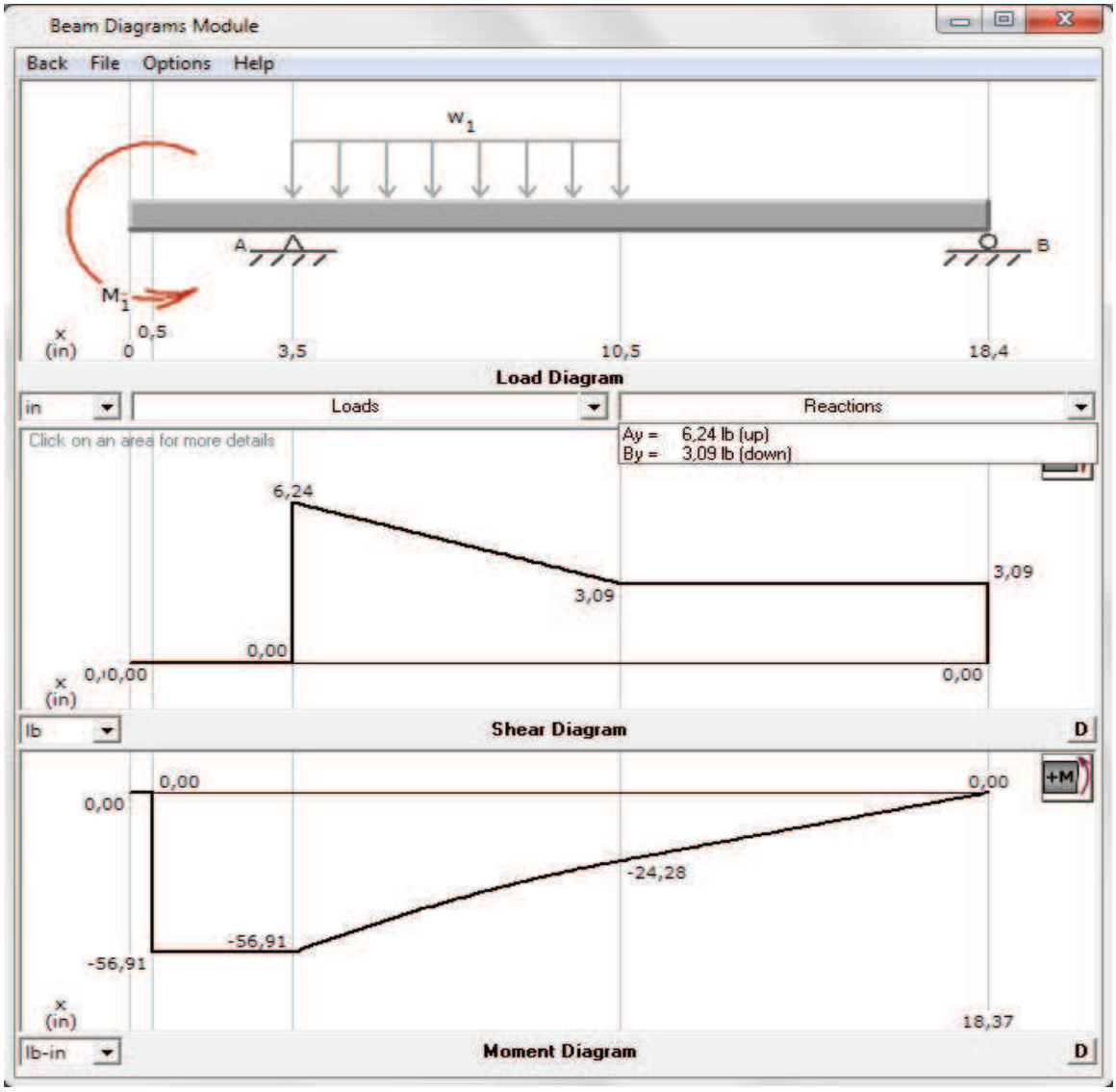


Figura 4.10. Fuerza cortante y momento flector plano xy.

Fuente: Propia.

Entonces las fuerzas radiales resultantes en los puntos 1 y 2 son:

$$R_A = \left({R_{Ay}}^2 + {R_{Az}}^2\right)^{1/2} = 190{,}90\ lbf = 849{,}17\ N$$

$$R_B = \left({R_{By}}^2 + {R_{Bz}}^2\right)^{1/2} = 17{,}49\ lbf = 77{,}8\ N$$

$$M_{máx} = \left({M_{máx\ xy}}^2 + {M_{máx\ xz}}^2\right)^{1/2} = 262{,}28\ lbf\ x\ pulg = 29{,}63\ Nm$$

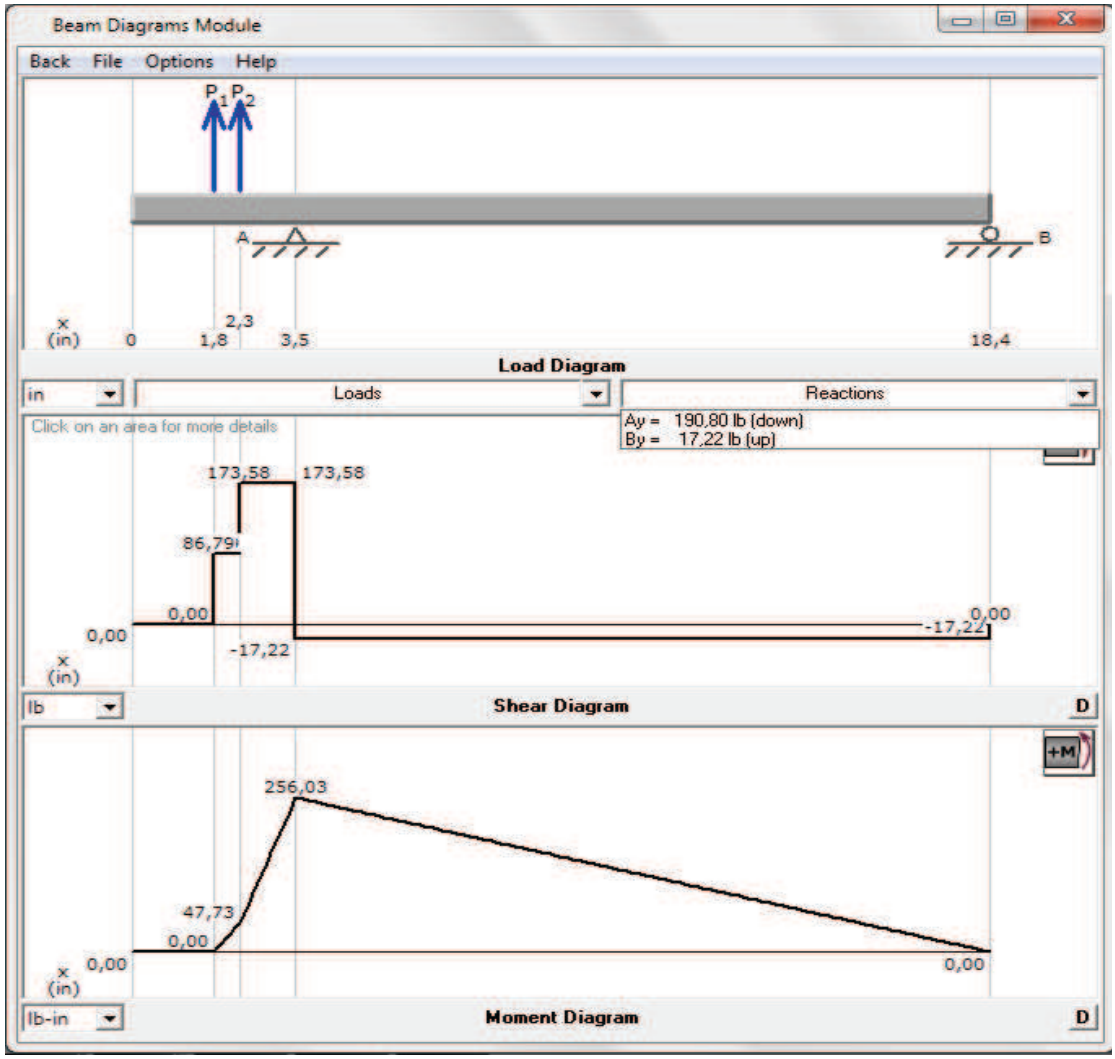


Figura 4.11. Fuerza cortante y momento flector plano xz.

Fuente: Propia.

4.3.7 DISEÑO ESTÁTICO DEL EJE TORNILLO DOSIFICADOR

Debido a que el punto A del eje tornillo tiene el mayor momento torsor se lo considera para la sección crítica por lo que es analizado para el diseño, una vez encontrada la sección crítica se determina el punto crítico resultando ser el siguiente elemento representado en la figura 4.12.

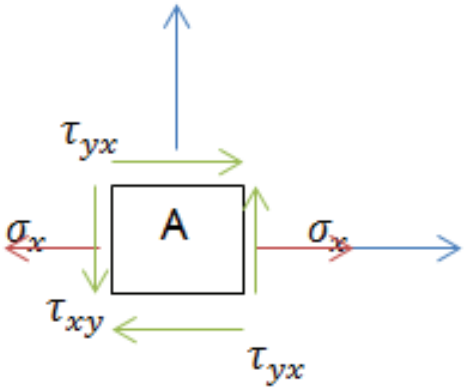


Figura 4.12. Punto crítico de la sección.

Fuente: Propia.

Se aplica la teoría de la energía de la distorsión para material dúctil, partiendo del cálculo de los esfuerzos principales normales.

$$\sigma_{A,B} = \frac{16\,M}{\pi d^3} \pm \sqrt{\left(\frac{16M}{\pi d^3}\right)^2 + \left(\frac{16T}{\pi d^3}\right)^2} \qquad (\mathbf{4,29})$$

$$\sigma_{A,B} = \frac{16}{\pi d^3}\left(M \pm \sqrt{M^2 + T^2}\right) \qquad (\mathbf{4,30})$$

Donde:

$\sigma_{A,B}$ Esfuerzos principales normales [lbf/pulg^2].

$M = M_{max}$ Momento máximo en el eje tornillo dosificador [lbf x pulg].

T Torque transmitido por el motoreductor al eje [lbf x pulg].

d Diámetro del tornillo.

Entonces:

$$\sigma_{A,B} = \sigma_{1,2} = \frac{16}{\pi d^3}\left(262{,}28 \pm \sqrt{262{,}28^2 + 56{,}91^2}\right)$$

$$\sigma_1 = {}^{2702.28}/_{d^3}\ {}^{lbf}/_{pulg^2}$$

$$\sigma_3 = {}^{-31{,}08}/_{d^3}\ {}^{lbf}/_{pulg^2}$$

Conociendo las propiedades del material DURALON – TECAMID 66 que se visualizan en el ANEXO 6, se tiene una resistencia a la tracción de:

$$S_y = 84\ MPa = 12183{,}16\frac{lbf}{pulg^2} = 84\ MPa$$

Aplicando la teoría de la distorsión:

$$S_A = \frac{S_y}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_1}\right) + \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_1}\right)^2}} \qquad (\mathbf{4,31})$$

$$S_A = \frac{12183{,}16}{\sqrt{1 + \left(\frac{-31{,}08}{2702{,}28}\right) + \left(\frac{-31{,}08}{2702{,}28}\right)^2}} = 12253{,}012\ {}^{lbf}/_{pulg^2} = 84.48\ MPa$$

Si:

$$n = factor\ de\ dise\tilde{n}o = \frac{S_A}{\sigma_1} = 2 \qquad (\mathbf{4,32})$$

$$n = \frac{12253{,}012\ d^3}{2702{,}28}$$

$$d = 0{,}75\ pulg = 0.02\ m$$

Lo que indica que el diámetro mínimo del eje en el punto de mayor momento tiene como valor crítico ¾ de pulgada o su equivalente de 0.02 m.

4.3.8 DISEÑO DINÁMICO DEL EJE TORNILLO DOSIFICADOR

Partiendo de las propiedades del material:

$$S_y = 84\ MPa = 12{,}18\ Kpsi\ , \qquad S_{ut} = 85\ MPa = 12{,}33\ Kpsi$$

$$\sigma_{xmax} = \frac{32\ M_{max}}{\pi \times d^3} \qquad (\mathbf{4,33})$$

$$\tau_{xymax} = \frac{16T}{\pi d^3} \qquad (\mathbf{4,34})$$

$$\sigma_a{}' = \sigma_{xmax} \qquad (\mathbf{4,35})$$

$$\sigma_m{}' = \tau_{xymax} \times \sqrt{3} \qquad (\mathbf{4,36})$$

Si:

$$d = 1\ pulg = 0.025\ m$$

$$M_{max} = 262{,}28\ lbf\ x\ pulg = 29{,}63\ Nm$$

$$T = 56{,}91\ lbf x pulg = 6.43\ Nm$$

Entonces:

$$\sigma_{xmax} = \frac{32\ \times 262{,}28}{\pi \times (1)^3} = 2671{,}56\ {}^{lbf}\!/_{pulg^2}$$

$$\tau_{xymax} = \frac{16 \times 56{,}91}{\pi(1)^3} = 289{,}84 \, {}^{lbf}\!/_{pulg^2}$$

$$\sigma_m{}' = 289{,}84 \times \sqrt{3} = 502{,}01 \, {}^{lbf}\!/_{pulg^2} = 3{,}461 \, MPa$$

Puesto que:

$$S_{ut} < 200 \, Kpsi$$

$$S_e{}' = 0{,}5 \, S_{ut} \qquad (\mathbf{4,37})$$

$$S_e{}' = 0{,}5 \times 85 \, MPa = 42{,}5 \, MPa$$

$$S_e = S_e{}' \times k_a \times k_b \times k_c \times k_d \times k_e \times k_f \qquad (\mathbf{4,38})$$

Donde:

S_e Límite de resistencia a la fatiga.

$S_e{}'$ Límite de resistencia a la fatiga en viga rotatoria.

k_a Factor de modificación de la condición superficial,

k_b Factor de modificación del tamaño.

k_c Factor de confiabilidad.

k_d Factor de modificación de la temperatura.

k_e Factor de modificación por concentración de esfuerzo.

k_f Factor de modificación de efectos varios.

$$k_a = aS_{ut}^b \qquad (\mathbf{4,39})$$

De la tabla 6,2 del “Diseño en ingeniería mecánica de Shigley” Octava edición presentada en el ANEXO 7, se obtienen los valores de $a\ y\ b$ considerando un acabado superficial adecuado para el maquinado se tiene.

$$a = 4{,}51$$

$$b = -0{,}265$$

$$k_a = 4{,}51 \times 85^{-0{,}265}$$

$$k_a = 1{,}38$$

De la ecuación 6,20 del “Diseño en ingeniería mecánica de Shigley” Octava edición, se obtiene la relación adecuada para el cálculo del factor de modificación del tamaño k_b, considerando que el diámetro del eje en el punto analizado es de 1 pulg, entonces:

$$k_b = 0{,}879 d^{-0{,}107} \qquad (\mathbf{4,40})$$

$$k_b = 0{,}879\ (1)^{-0{,}107} = 0{,}879$$

Para el factor de confiabilidad se asume una confiabilidad del 0,50, analizando en la tabla 6,5 del ANEXO 7 tomada del “Diseño en ingeniería mecánica de Shigley” Octava edición, se tiene que:

$$k_c = 1$$

Puesto que la temperatura de operación es menor a 450 °C, el valor del factor de modificación de la temperatura k_d es 1, el factor de modificación por concentración de esfuerzo k_e es tomado como 1 al igual que el factor de efectos múltiples k_f.

$$S_e = 42{,}5 \times 1{,}38 \times 0{,}879 \times 1 \times 1 \times 1 \times 1$$

$$S_e = 51{,}55\ MPa$$

$$S_m = \frac{S_e}{\left(\frac{S_e}{S_{ut}}\right) + \left(\frac{\sigma_a'}{\sigma_m'}\right)} \qquad (\mathbf{4,41})$$

$$S_m = \frac{51{,}55}{\left(\frac{51{,}55}{85}\right) + \left(\frac{2671{,}56}{502{,}01}\right)} = 8{,}69\ MPa$$

$$n = \frac{S_m}{\sigma_m'} \qquad (\mathbf{4,42})$$

$$n = \frac{8{,}69}{3{,}461} = 2{,}5$$

Luego de este análisis se determina que el diámetro mínimo de 1 pulgada o su equivalente 0.0254 m en la sección que se encuentra sometida al momento flector máximo satisface el diseño para los esfuerzos, esta condición es determinante para la selección y diseño de otros elementos que se acoplan al eje dosificador.

4.3.9 DISEÑO DE LA LENGUETA SOBRE EL EJE TORNILLO

Considerando el diámetro del eje acoplado al motoreductor es de 25 mm o 0,98 pulg, la lengüeta es diseñada partiendo de este valor y otras variables determinadas anteriormente, el ancho de la lengüeta se encuentra limitado por las dimensiones de la salida del motoreductor como se observa en la figura 4,13 en la que se observa el plano frontal de la salida del motoreductor seleccionado.

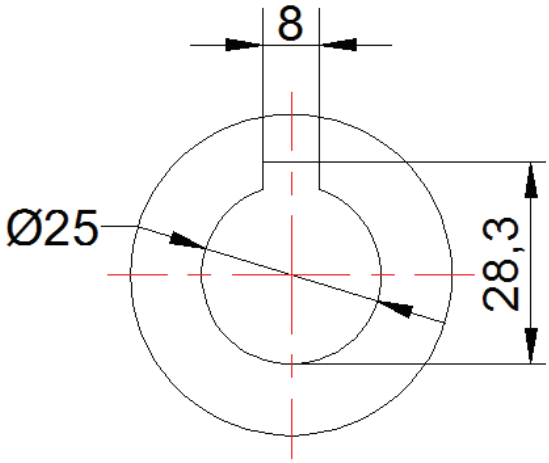


Figura 4.13. Plano frontal de la salida del motoreductor.
Fuente: Catálogo de motoreductores "Motores Rossi".

Sabiendo además que el par de torsión transmitido desde el motor es de:

$$T = 65{,}65\ Kgxcm = 6{,}43\ Nm = 56{,}91\ lbfxpulg$$

Y que se trabaja con un factor de seguridad n = 2 se emplea el siguiente procedimiento, en base a la figura 4.14 se determina la fuerza cortante que actúa sobre la chaveta por efecto del par de torsión.

De donde:

$$F = \frac{T}{r} \qquad (\mathbf{4,43})$$

$$F = \frac{56{,}91\ lbfxpulg}{0{,}98\ pulg} = 58{,}07\ lbf = 258.30\ N$$

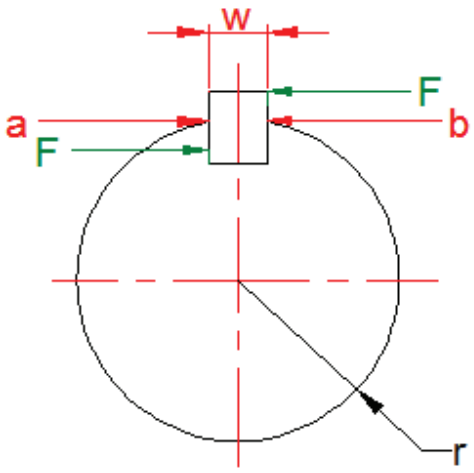


Figura 4.14. Esquema de fuerza actuantes sobre la lengüeta.
Fuente: propia.

El material de la lengüeta es el mismo duralón empleado para la fabricación del tornillo dosificador.

$$S_{sy} = 0.577 S_y \qquad (\mathbf{4,44})$$

$$S_{sy} = 0{,}577 \times 85\ MPa$$

$$S_{sy} = 49{,}05\ MPa = 7114{,}1\ {}^{lbf}\!/_{pulg^2} = 49.05\ MPa$$

La acción de esta fuerza cortante crea un esfuerzo τ.

$$\tau = \frac{F}{\mathrm{w}l} \qquad (\mathbf{4,45})$$

Donde:

W Ancho de la lengüeta.

l Longitud de la lengüeta.

SI:

$$\tau = \frac{S_{sy}}{n} \qquad (\mathbf{4,46})$$

Igualando las ecuaciones 4,45 y 4,46 se tiene:

$$\frac{S_{sy}}{n_{corte}} = \frac{F}{\mathrm{w}l} \qquad (\mathbf{4,47})$$

$$\frac{7114,1}{2} = \frac{58,07}{0,31l}$$

$$l = 0,05\ pulg = 1.27\ mm$$

Para la resistencia al aplastamiento se emplea el área de la mitad de la cara de la lengüeta, entonces:

$$\frac{S_y}{n_{aplastamiento}} = \frac{F}{wl/_2} \qquad (\mathbf{4,48})$$

$$\frac{12328,2}{2} = \frac{58,07}{0,31l/_2}$$

$$l = 0,06\ pulg = 1.52\ mm$$

Como se observa, las longitudes mínimas para garantizar un factor de diseño de 2 son muy pequeñas, por lo que tienen que ser sobredimensionadas para facilitar su construcción, entonces la longitud a seleccionarse es igual al ancho de las poleas, cumpliendo de esta forma la facilidad de construcción y la restricción de que la longitud de la lengüeta no exceda el 1,5 con relación al diámetro del eje.

El valor del factor de seguridad tanto para resistencia al corte como al aplastamiento son recalculados usando las expresiones respectivas y la nueva dimensión de la longitud dando como resultado.

$$\frac{S_{sy}}{n_{corte}} = \frac{F}{\mathrm{w}l}$$

$$\frac{7114{,}1}{n_{corte}} = \frac{58{,}07}{0{,}31 \times 0{,}5}$$

$$n_{corte} = 19$$

$$\frac{S_y}{n_{aplastamiento}} = \frac{F}{wl/_2}$$

$$\frac{12328{,}2}{n_{aplastamiento}} = \frac{58{,}07}{0{,}31 \times 0{,}5/_2}$$

$$n_{aplastamiento} = 16{,}45$$

4.3.10 SELECCIÓN DEL RETENEDOR

Para el proceso de selección se considera detalles como el tipo de sustancia con la que el retenedor está en contacto y el espacio limitado en el lugar de instalación, debido a que la sustancia de contacto es la crema para las galletas el material de fabricación de este elemento tiene que ser de características

aplicables a la industria alimentaria por lo que del catálogo de retenedores del ANEXO 8 empleado para este proyecto se tiene la siguiente selección.

Considerando que el diámetro interior del elemento seleccionado por requerimiento del catálogo debe ser 5% mayor que el diámetro del eje sobre el cual se va a montar, esto según el tipo de junta tórica con un eje rotativo. En la tabla 4.6 se tiene un resumen de las características finales del retenedor seleccionado.

Tabla 4.6. Descripción retenedor seleccionado.

Retenedor		
Diámetro interior (mm)	**Diámetro sección (mm)**	**Material**
26,7 / 20	3.6	Silicona VMR/MVR

Fuente: Propia.

4.3.10.1 Diseño del alojamiento

Siguiendo las recomendaciones para evitar la extrusión del elemento en base a una aplicación dinámica de baja presión, en la figura 4.15 se tiene una guía para el dimensionamiento de la ranura en función de la presión máxima de trabajo, mientras que en la figura 4.16 se tiene una representación gráfica de la extrusión que se quiere evitar con el correcto dimensionamiento de la ranura.

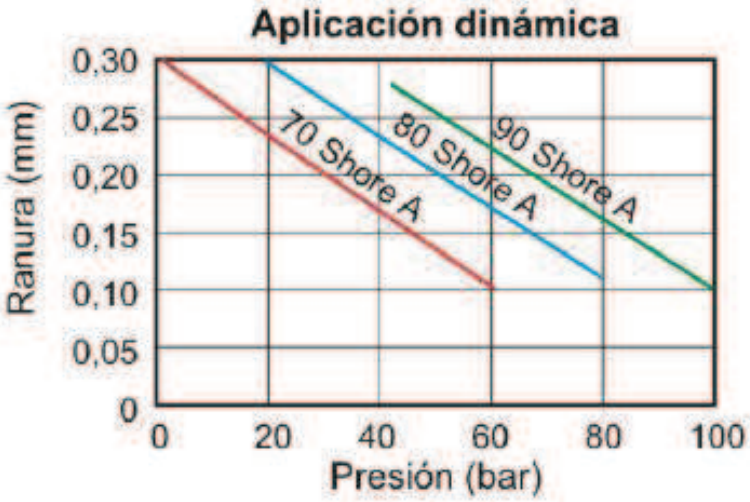


Figura 4.15. Ranura Vs Presión de trabajo.

Fuente: Catálogo de retenedores IJASA.

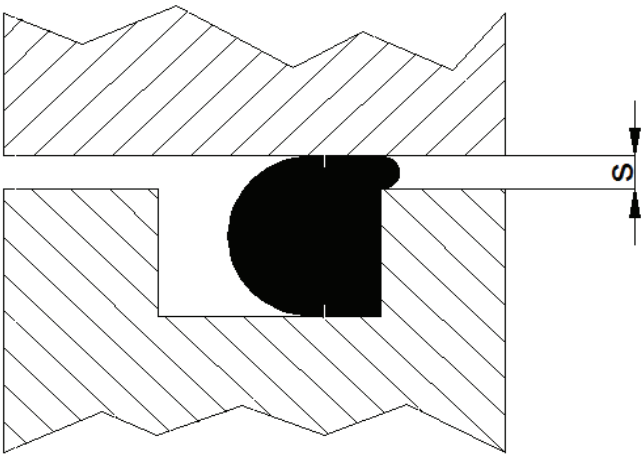
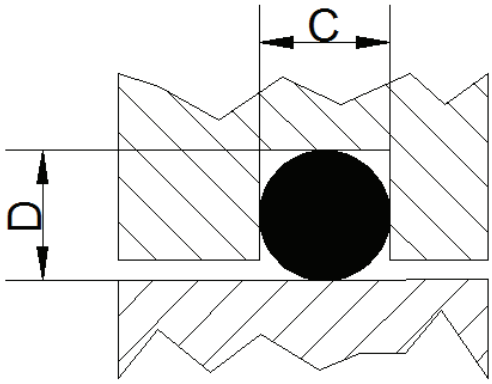


Figura 4.16. Retenedor extruido

Fuente: Propia.

La dimensión de la ranura “s” seleccionada es de 0,3 mm, para las dimensiones explicitas del alojamiento al igual que las características de las superficies en contacto se determinan en base a las figuras 4.17 y 4.18.



Diámetro sección del retenedor (mm)	D	C
1.78	1.7	2
2	1.8	2.3
2.4	2.2	2.6
2.5	2.3	2.7
2.62/2.65	2.5	2.8
2.7	2.6	2.9
3	2.8	3.2
3.5/3.53/3.55	3.4	3.7
3.6	3.5	3.8
5.3/5.34	5	5.8
5.7	5.4	6.1
6.99/7	6.7	7.5

Figura 4.17. Dimensiones alojamiento montaje rotativo.

Fuente: Catálogo de Retenedores IJASA.

Partiendo del diámetro de la sección del retenedor se tiene que las dimensiones D y C son respectivamente 3,5 mm y 3,8 mm.

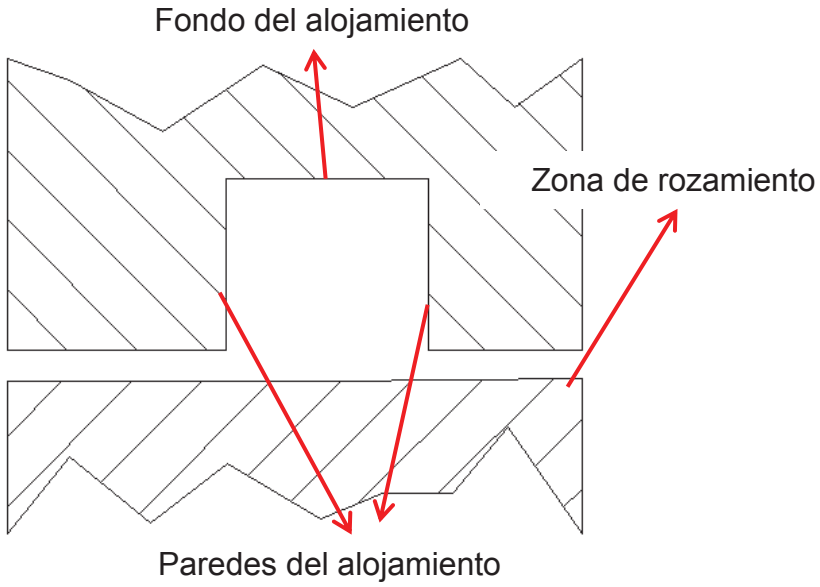


Figura 4.18. Rugosidades de las superficies relacionadas.

Fuente: Catálogo de Retenedores IJASA.

En la figura 4.19 y 4.20 se tienen las representaciones del sistema de montaje del retenedor tanto a la entrada de la tolva (1) como al final del tornillo (2).

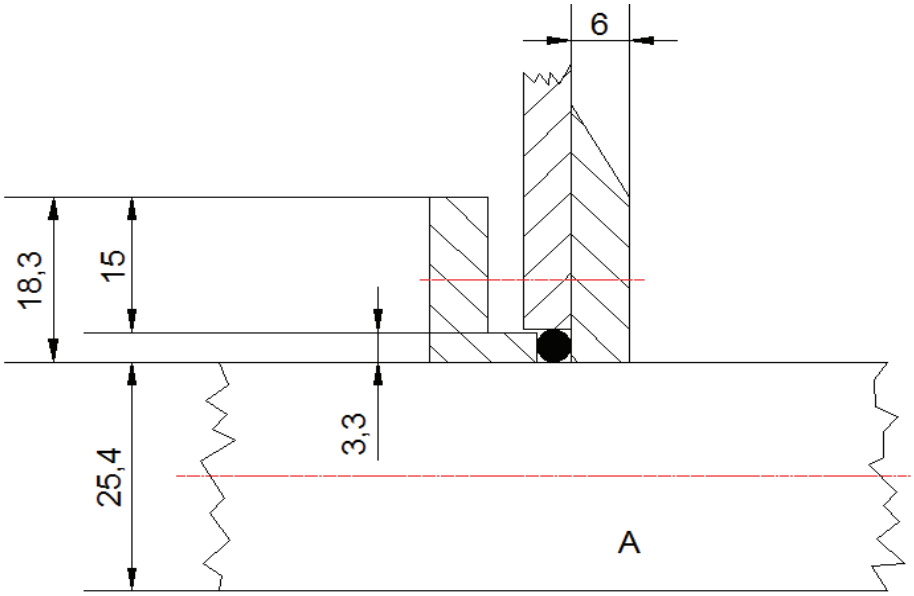


Figura 4.19. Esquema posición del retenedor - entrada.
Fuente: Propia.

4.3.11 DISEÑO DEL MONTAJE DEL RETENEDOR 1

El objetivo de este conjunto es garantizar que el retenedor funcione adecuadamente cumpliendo su función de evitar que la crema salga por el orificio. Para esto se considera un sistema de prensa estopa con sujeción mediante tornillos de tal forma que se produzca la junta tórica con el retenedor y el alojamiento determinados en el punto anterior.

Este mecanismo está fundamentado en el uso de pernos que cumplen la acción de crear un sello entre las partes involucradas en la junta tórica mediante presión, por lo que es necesario dimensionar los elementos de ajuste, en este punto los elementos roscados se diseñan a corte debido al momento

torsor que existe en esa sección del eje, para el diseño se establece una configuración de 4 pernos de ajuste ubicados simétricamente como se observa en la figura 4.21.

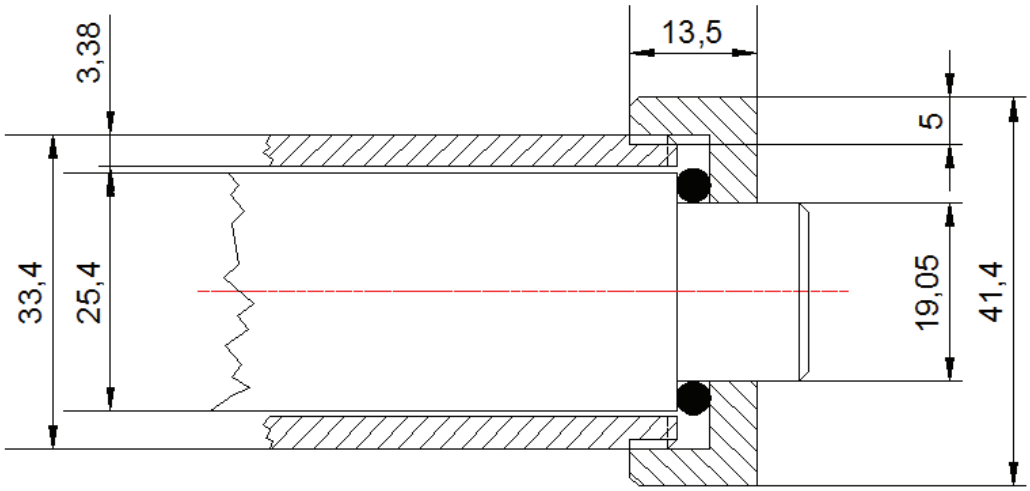


Figura 4.20. Esquema posición del retenedor - salida.
Fuente: Propia.

El material empleado para este elemento es teflón debido a sus características de funcionamiento como son la de no ser contaminante al contacto con alimentos y ser además un material auto lubricante apropiado para el sistema sobre el cual va a trabajar, las características técnicas del material se encuentran en el ANEXO 9.

Considerando la ecuación 4,49 se determina el esfuerzo cortante al que cada perno se encuentra sometido.

$$\tau = \frac{F_{perno}}{A_s} = \frac{4\,F_{perno}}{\pi d^2} \qquad (\mathbf{4,49})$$

Donde:

F_{perno}: Fuerza soportada por perno.

A_s: Área de corte.

d: Diámetro del perno.

$$\tau = \frac{4 \times 258{,}01\ N}{\pi \times (6 \times 10^{-3}\ m)^2} = 9{,}125\ MPa$$

La resistencia a la fluencia al corte se determina a partir de la relación 5,50

$$S_{sy} = 0{,}577\ S_y \qquad (\mathbf{4,50})$$

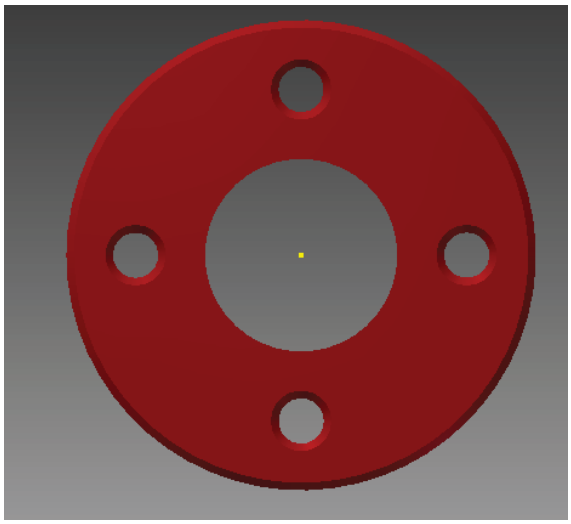


Figura 4.21. Configuración de pernos para la junta tórica.
Fuente: Propia.

Conociendo que el material de los pernos usados es acero inoxidable AISI 304 se tiene un límite a la fluencia de 310 MPa, por lo tanto:

$$S_{sy} = 0{,}577 \times 310\ MPa = 178{,}87\ MPa$$

Empleando la teoría de la distorsión de la energía se tiene que el factor de seguridad responde a la relación 4,51.

$$\eta = \frac{S_{sy}}{\tau} \qquad (\mathbf{4,51})$$

$$\eta = \frac{178{,}87}{9{,}125} = 19{,}60$$

Se observa de acuerdo al valor obtenido del factor de seguridad que los pernos empleados resisten al esfuerzo cortante al que son sometidos, los pernos utilizados son M6 x 1 x 1.5.

4.4 DISEÑO DE LA TOLVA

Para el diseño de la tolva se consideran factores como el tipo de fluido con sus propiedades físicas, así como la geometría y propiedades del material utilizado en la tolva.

4.4.1 TOLVA DE ALIMENTACIÓN

Para determinar el volumen total del sistema de alimentación se considera la permanente capacidad de llenado en el sistema dosificador, el cual es 200 g/min, pero si se tiene en cuenta un tiempo de trabajo de 8 horas diarias lo cual da la capacidad total por jornada de 48000 g/día.

Puesto que:

$$Q_{diaria} = 48000 \frac{g}{día} \qquad (\mathbf{4.52})$$

Entonces:

$$m_T = 48000\ g$$

$$\delta_g = 1{,}19\ g/cm^3$$

Se puede obtener el volumen total necesario para cubrir la capacidad diaria de la siguiente manera:

$$V_{teor} = {}^{m_T}/_{\delta_g} \qquad (\mathbf{4,53})$$

Donde:

V_{teor}: Volumen teórico total de la tolva.

m_T: Masa total de la crema.

δ_g : Densidad de la crema.

$$V_{teor} = \frac{48000\ g}{1{,}19\ {}^{g}/_{cm^3}} = 40336{,}134\ cm^3$$

Las dimensiones de la tolva se asumen en armonía a las dimensiones del tornillo dosificador y su geometría se establece de manera de tanque

rectangular para facilitar su construcción, además de disminuir el costo y la dificultad al fabricarlo, las cargas a las que tolva se encuentra sometida se calculan de acuerdo a la configuración, al tipo de fluido y a la máxima profundidad, de tal forma que su volumen sobrepase el valor calculado para la operación diaria, así la figura 4.22 permite visualizar el aspecto que este sistema presenta.

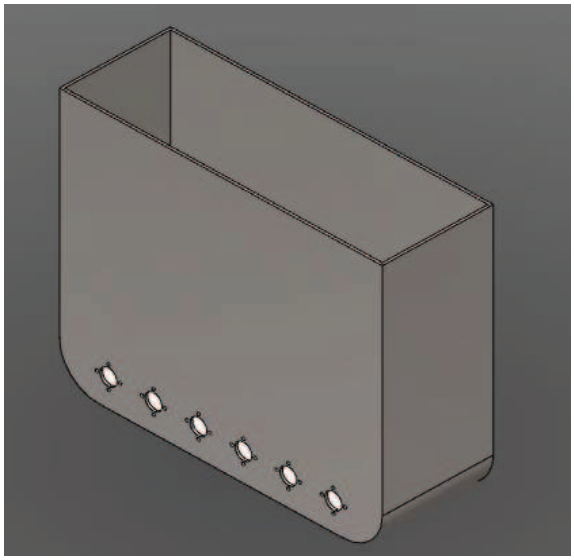


Figura 4.22. Tolva de alimentación
Fuente: Propia.

Siendo así el volumen total de la tolva de:

$$V_{tot} = 60000\ cm^3$$

4.4.2 CÁLCULO DEL ESPESOR DE PARED.

Para el cálculo de la pared de la tolva se considera la configuración del tanque de la figura 4.22, estableciéndose el siguiente procedimiento:

4.4.2.1 Espesor de la placa de la base.

Sobre la placa base de la tolva el fluido ejerce una distribución de presión como se muestra en la figura 4.23.

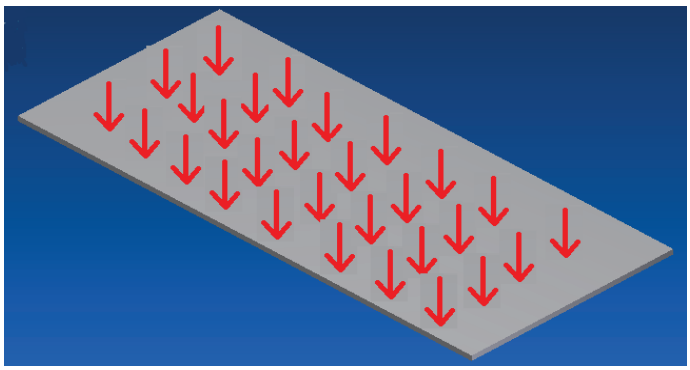


Figura 4.23. Distribución de Presión sobre la placa base.
Fuente: Propia.

Para realizar el cálculo se asume dos casos:

- La placa está simplemente apoyada.
- La placa está empotrada en ambos extremos.

Para ambos casos la fuerza resultante en la placa base es:

$$F_P = \gamma A_b h \qquad (\mathbf{4,54})$$

$$A_b = L_b \times w_b \qquad (\mathbf{4,55})$$

Donde:

F_P: Fuerza resultante debido al fluido que actúa sobre la placa base.

A_b: Peso específico de la crema.

h: Profundidad del tanque.

L_b: Longitud de la base.

w_b: Ancho de la base.

Las dimensiones de la placa de la base son L_b= 450 [mm] y w_b= 200 [mm].

$$F_P = 1190\frac{kg}{m^3} \times 9{,}86\frac{m}{s^2} \times 0{,}45m \times 0{,}2m \times 0{,}5m = 528\ [N]$$

4.4.2.2 Placa simplemente apoyada.

La figura 4.24 presenta un esquema de la placa base bajo las condiciones de simplemente apoyada.

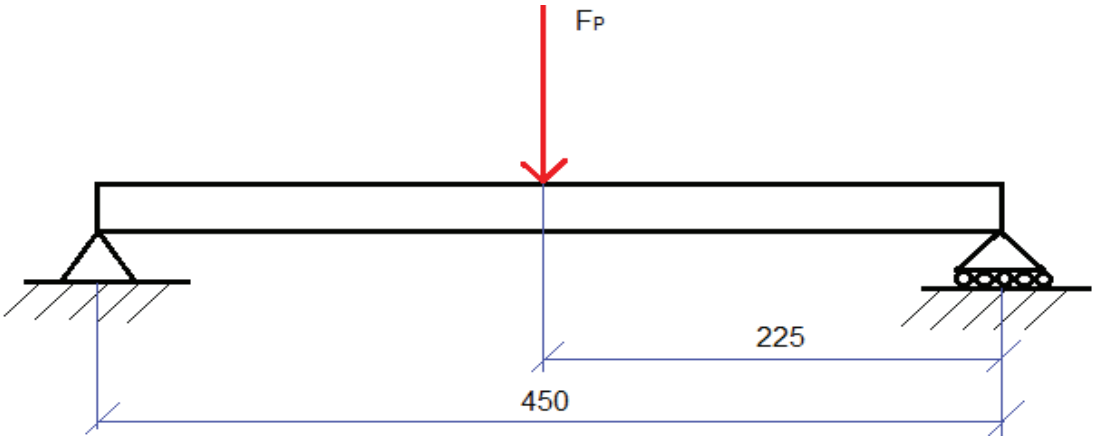


Figura 4.24. Placa simplemente apoyada.

Fuente: Propia.

Al realizar el diagrama de cuerpo libre del tornillo sin fin representado en la Fig.4.25 se tiene**:**

$$\sum F_y = 0 \qquad (\mathbf{4.56})$$

$$R_1 + R_2 = F$$

$$\circlearrowleft + \sum M_1 = 0 \qquad (\mathbf{4,57})$$

$$(R_2 \times 0{,}45m) - (528\ N\ \times 0{,}225m) = 0$$

$$R_2 = R_1 = 264\ N$$

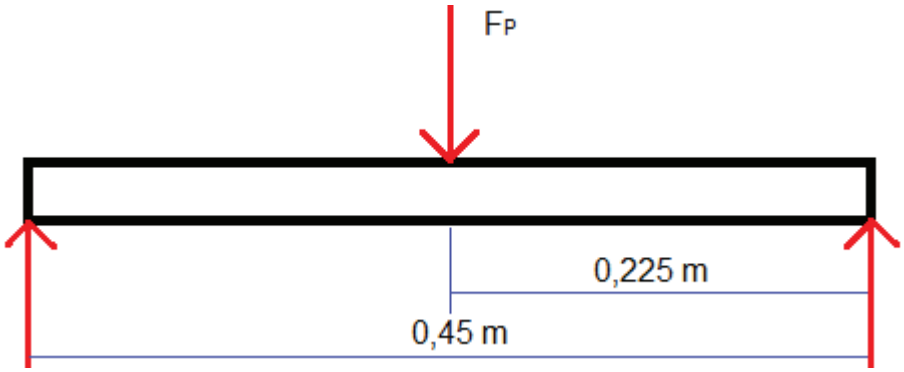


Figura 4.25. Diagrama de cuerpo libre de la placa base.

Fuente: Propia.

Los diagramas tanto de Fuerza cortante como de Momento Flector son presentados en la figura 4.26, se determina el momento máximo con el área del rectángulo del diagrama de Corte de la siguiente manera:

$$M_{máx} = 264\ N \times 0{,}225m = 59{,}4\ N.m$$

Teniendo el momento máximo se puede determinar el esfuerzo máximo.

$$\sigma_{máx} = \frac{M_{máx} \times c}{I} \qquad (\mathbf{4,58})$$

$$I = \frac{b \times h^3}{12} \qquad (\mathbf{4,59})$$

$$c = \frac{h}{2} \qquad (\mathbf{4,60})$$

Dónde:

$\sigma_{máx}$: Esfuerzo máximo sobre la placa.

$M_{máx}$: Momento flector máximo.

c: Centroide de la sección de la placa.

I: Inercia de la sección de la placa.

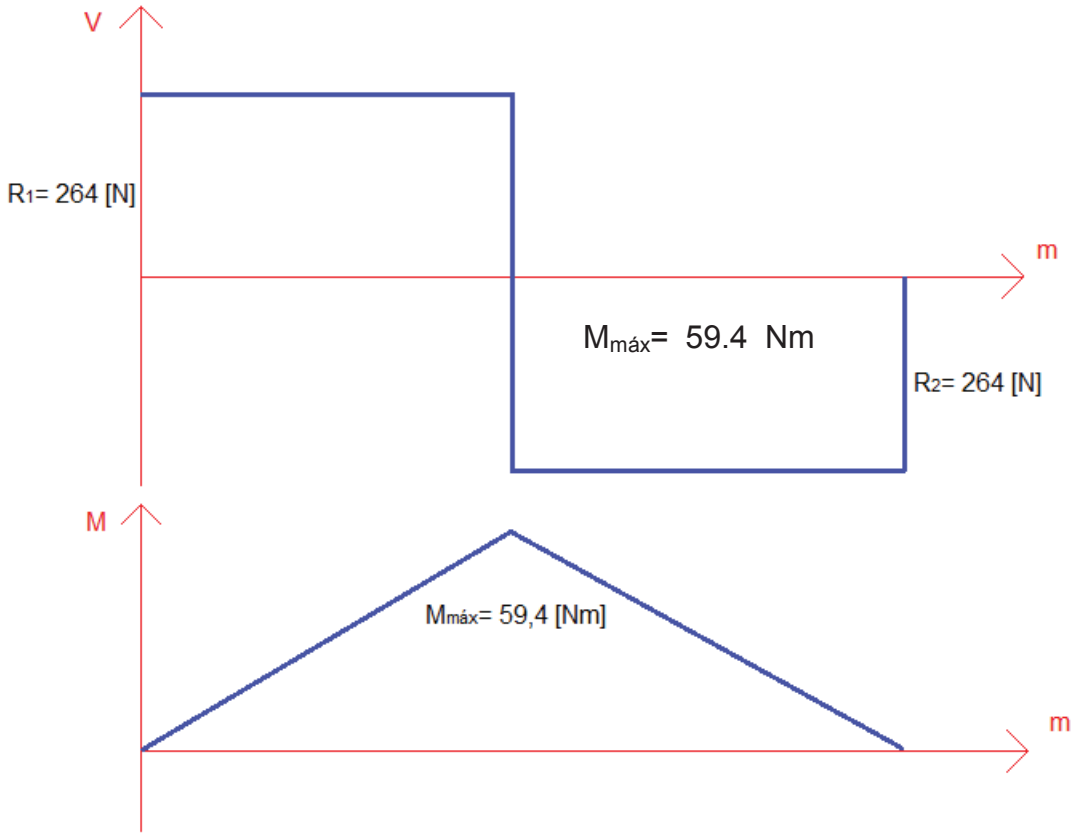


Figura 4.26. Diagramas de Corte y Momento Flector.

Fuente: Propia.

La figura 4.27 representa la placa rectangular sobre la cual se trabaja para la obtención de la inercia.

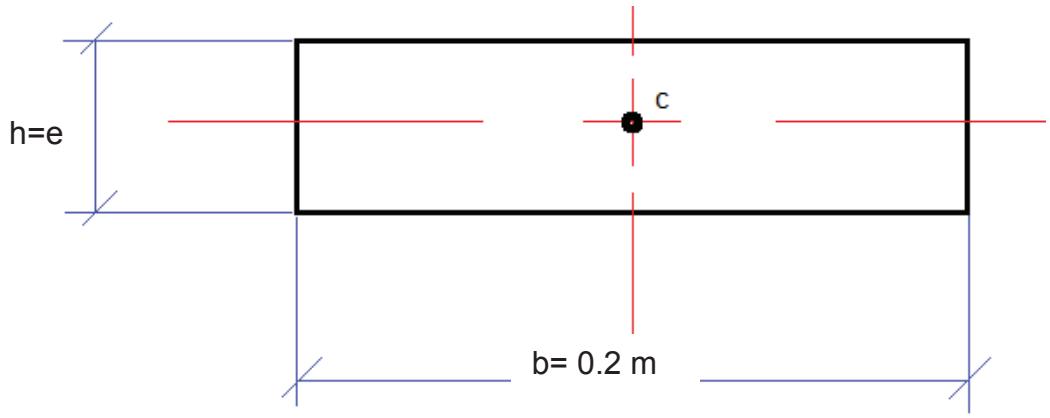


Figura 4.27. Inercia de la sección de la placa rectangular.
Fuente: Propia.

Se reemplazan los valores en la Ec. 4,58 Y se obtiene el esfuerzo máximo.

$$\sigma_{máx} = \frac{6M_{máx}}{bh^2} \qquad (\mathbf{4,61})$$

Al sustituir los valores de momento máximo, ancho y asumir un espesor de la placa h = e = 5 mm, se tiene que:

$$\sigma_{máx} = \frac{6 \times 59{,}4\ N.m}{0{,}2m \times (0{,}005m)^2} = 71280\ kPa = 10338{,}29\ Psi$$

A continuación se determina el Factor de seguridad mediante la Ec. 4,62, teniendo como valor del esfuerzo de fluencia S_y = 42000 Psi.

$$F_s = \frac{S_y}{\sigma_{máx}} \qquad (\mathbf{4,62})$$

$$F_s = \frac{42000\ Psi}{10338{,}29\ Psi} = 4{,}06\ \approx 4$$

En la tabla 4.7 se asumen los espesores y así se determina cuál es el espesor óptimo para que la placa resista, mediante la comparación entre los factores de seguridad obtenidos en cada caso.

Tabla 4.7. e_1 Vs. FS

Espesor e [m]	**0,005**	0,004	0,003	0,002
Esfuerzo máximo σ_{max} [Kpa]	**71280**	16153,57	28717,57	64614,31
Factor de Seguridad FS	**4,06**	2,60	1,46	0,65

Fuente: propia.

En base a la tabla 4.7 se selecciona la placa de espesor e = 5 mm dado a que con esta se obtiene un factor de seguridad amplio con el cual se puede trabajar en las partes soldadas y perforaciones que se requieren para el proceso de fabricación y montaje de la máquina dosificadora con sus diferentes componentes.

4.4.2.3 Empotrada en los dos extremos.

La figura 4.28 presenta un esquema de la placa base bajo las condiciones de empotrada en los dos extremos.

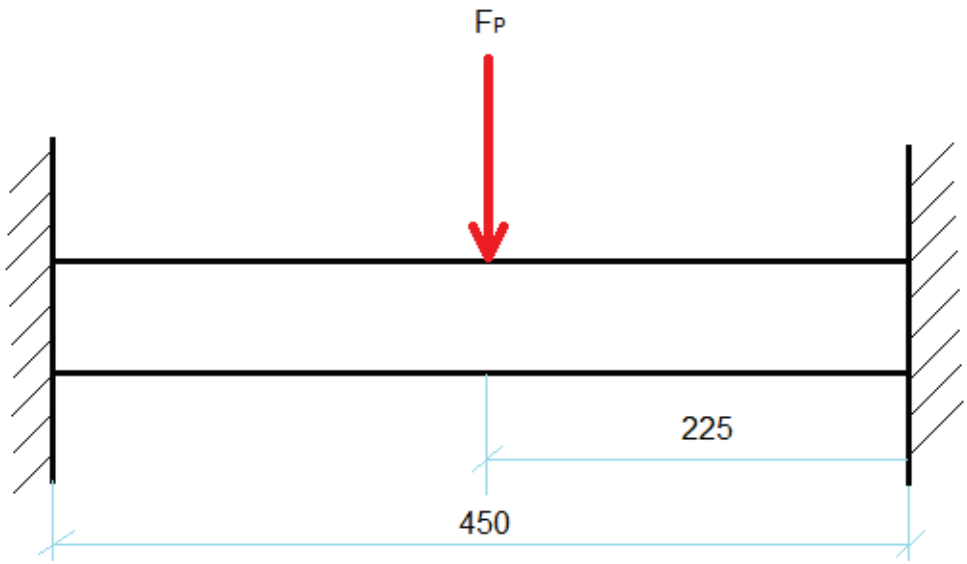


Figura 4.28. Placa empotrada en ambos extremos.

Fuente: Propia.

Al realizar el diagrama de cuerpo libre representado por la Fig.4.29 se tiene**:**

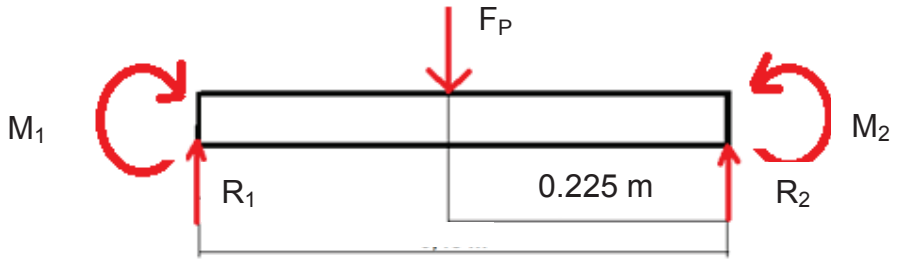


Figura 4.29. Diagrama de cuerpo libre de la placa base empotrada.

Fuente: Propia.

Se determinan las reacciones y los momentos flectores a partir de la figura 4.29 y se realizan los diagramas de corte y momento flector presentados en la figura 4.30.

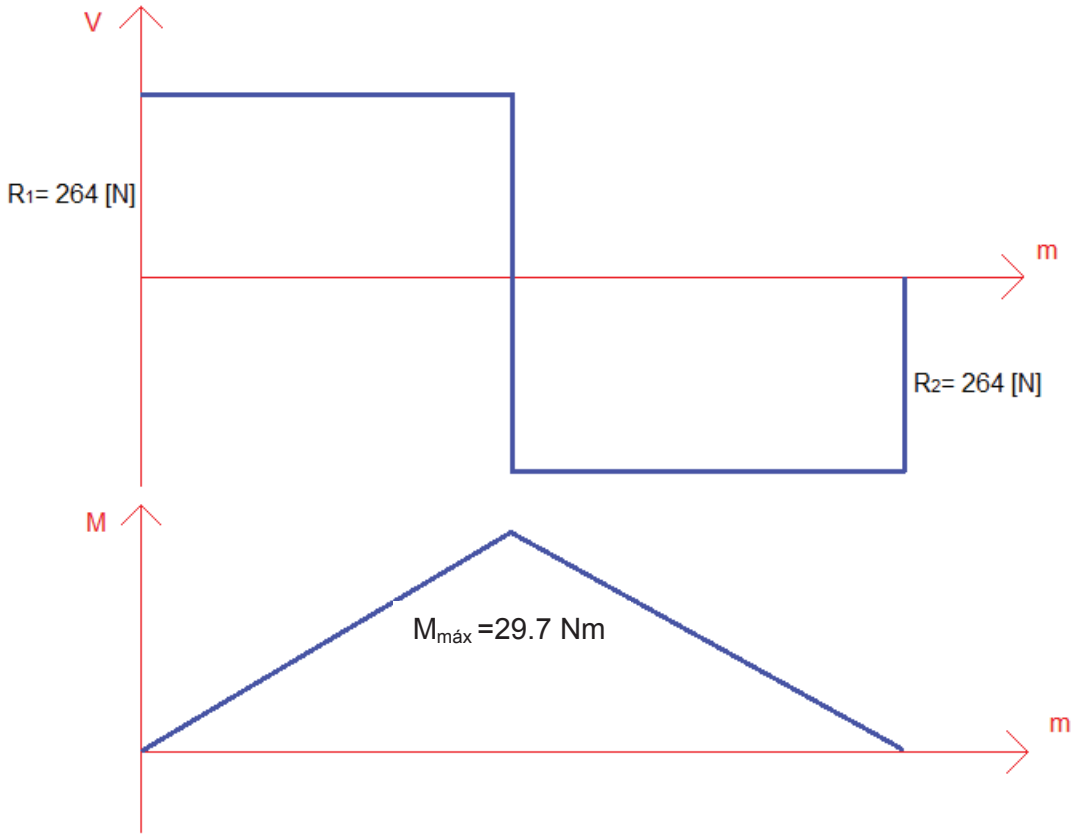


Figura 4.30. Diagramas de Corte y Momento Flector.
Fuente: Propia.

$$R_1 = R_2 = \frac{P}{2} = 264\ N$$

$$M_{1=}M_2 = \frac{PL}{8} = \frac{528N \times 0{,}45m}{8} = 29{,}7\ N.m$$

Aplicando la ecuación 4.61 para los datos obtenidos y bajo las consideraciones detalladas en base a la figura 4.27 se tiene:

$$\sigma_{máx} = \frac{6M_{máx}}{bh^2}$$

Se reemplazan los valores y se asume el valor de h = e = 0.005m

$$\sigma_{máx} = \frac{6 \times \ 29{,}7N.m}{0{,}2m \times (0{,}005m)^2} = 35640\ kPa = 5169{,}14\ Psi$$

A continuación se determina el factor de seguridad mediante la Ec. 4,62 teniendo como valor del esfuerzo de fluencia S_y = 42000 Psi.

$$F_s = \frac{S_y}{\sigma_{máx}}$$

$$F_s = \frac{42000\ Psi}{5169{,}14\ Psi} = 8{,}125\ \approx 8$$

En la tabla 4.8 se presentan los valores resultantes de asumir los espesores y así se determina cuál es el espesor óptimo para que la placa resista.

Tabla 4.8. e_2 Vs. FS

Espesor e [m]	**0,005**	0,004	0,003	0,002
Esfuerzo máximo σ_{max} [Kpa]	**35640**	55687,5	99000	222750
Factor de Seguridad FS	**8,125**	5,2	2,92	1,30

Fuente: Propia.

Se elige la placa de mayor espesor considerando que a la tolva se sueldan tuberías para alojar a los tornillos sin fin, se realizan perforaciones para el montaje de elementos y que se requiere una máxima resistencia además de un medio resistivo a la perdida de calor hacia el ambiente.

4.4.3 CÁLCULO DEL ESPESOR DE LA PARED.

En el tolva de alimentación se encuentra un fluido que al interactuar con el tanque genera una presión denominada presión Hidrostática, la cual varia linealmente desde la superficie hacia el fondo del tanque como se muestra en la fig. 4.31.

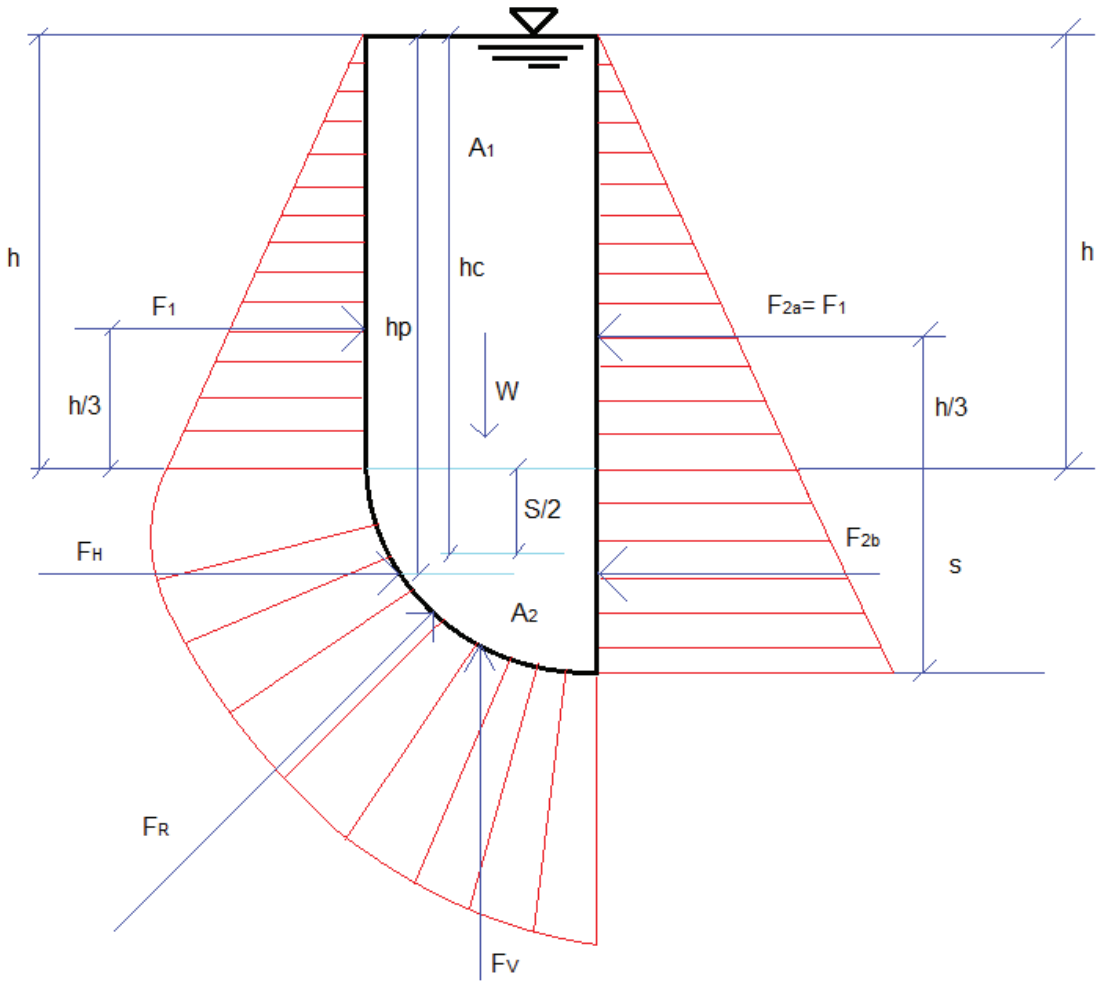


Figura 4.31. Distribución de presión sobre las paredes de la tolva.

Fuente: Propia.

Se calcula la fuerza vertical sobre la superficie curva en el fondo de la tolva de alimentación.

$$F_v = \gamma \times A \times t \qquad (\mathbf{4,63})$$

Dónde:

F_v: Fuerza vertical aplicada en las esquinas del fondo de la tolva.

γ: Densidad específica de la crema.

t: Profundidad de la tolva de alimentación.

A: Área.

El área se determina por la suma de dos áreas tanto sobre la superficie vertical, como la superficie curva.

$$A = A_1 + A_2 \qquad (\mathbf{4,64})$$

Dónde:

A_1: Área sobre la superficie vertical.

A_2: Área sobre la superficie curva.

R: Radio de curvatura.

h_t: Altura de la parte vertical de la tolva.

$$A = (h_t \times R) + \left(\frac{1}{4} \times \pi \times R^2\right) \qquad (\mathbf{4.65})$$

A continuación en la fig. 4.32 se indican las dimensiones de la tolva para realizar los cálculos.

Se reemplazan los valores en la ecuación 4.65 teniendo como resultado lo siguiente.

$$A = (0{,}425m \times 0{,}075m) + \left[\frac{1}{4} \times \pi \times (0{,}075m)^2\right]$$

$$A = 0{,}036\, m^2$$

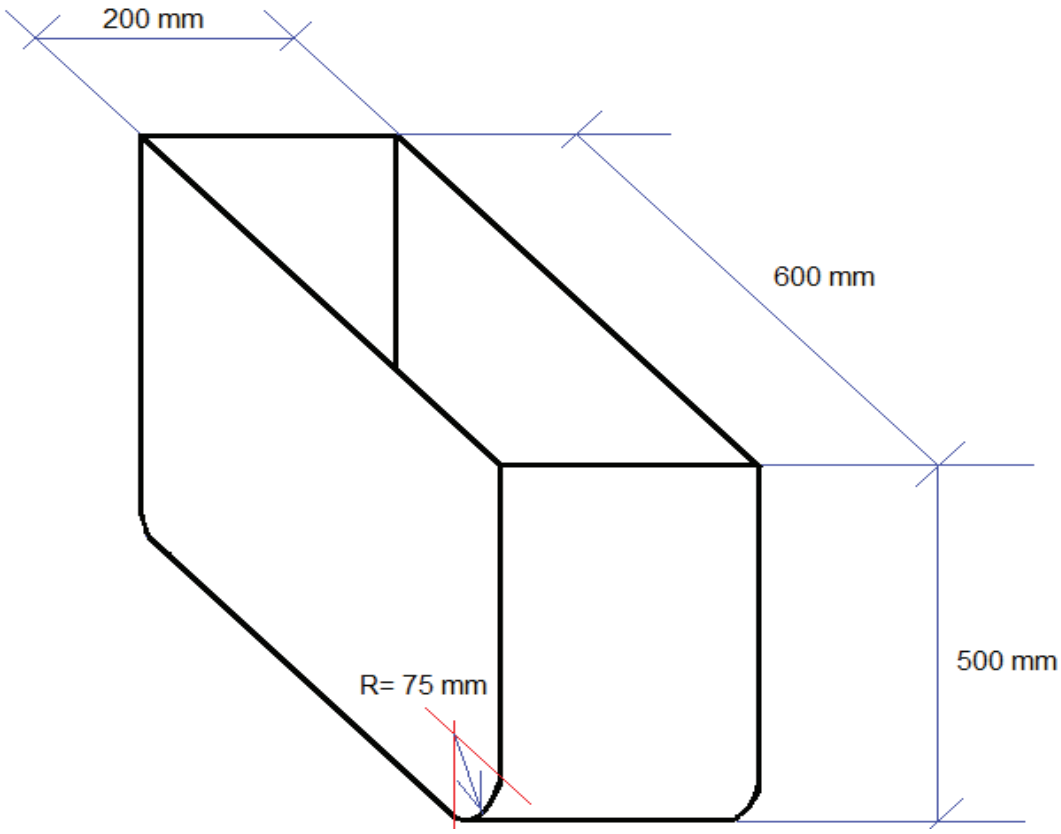


Figura 4.32. Dimensiones de la tolva de alimentación.

Fuente: Propia.

Conociendo:

$$\rho = 1190\ \frac{kg}{m^3}$$

$$g = 9{,}86\ \frac{m}{s^2}$$

$$t = 200mm = 0{,}2m$$

Se reemplaza en la ecuación 4,63 para determinar la fuerza vertical.

$$F_v = 1190\ \frac{kg}{m^3} \times 9{,}86\ \frac{m}{s^2} \times 0{,}036\ m^2 \times 0{,}2m$$

$$F_v = 84{,}48\ N$$

La fuerza horizontal en el extremo del fondo de la tolva de alimentación se calcula de la siguiente forma.

$$F_H = \gamma \times A_p \times h_c \qquad (\mathbf{4,66})$$

$$A_p = S \times t \qquad (\mathbf{4,67})$$

$$h_{c=}h + \frac{S}{2} \qquad (\mathbf{4,68})$$

Donde:

F_H: Fuerza horizontal aplicada en la superficie curva del fondo de la tolva.

γ: Densidad específica de la crema.

h_c: Profundidad del centroide del área proyectada.

A_p: Área proyectada de la superficie curva.

t: Profundidad del área proyectada.

S: Altura de la proyección de la superficie curva.

Reemplazando valores en las ecuaciones 4.68, 4.67, 4.66 se obtiene:

$$h_{c=}0{,}425m + \frac{0{,}075m}{2} = 0{,}4625m$$

$$A_p = 0{,}075m \times 0{,}20m = 0{,}015m^2$$

$$F_H = 1190\ \frac{kg}{m^3} \times 9{,}86\ \frac{m}{s^2} \times 0{,}015m^2 \times 0{,}4625m$$

$$F_H = 81{,}57\ N$$

Para ubicar el punto de aplicación de la F_v en el área proyectada se parte de la ecuación 4.69.

$$h_p - h_c = \frac{I_c}{h_c \times A_p} \qquad (\mathbf{4,69})$$

El momento de inercia del área proyectada por un rectángulo se establece en base a la ecuación 4.70.

$$I_c = \frac{t \times S^3}{12} \qquad (\mathbf{4,70})$$

Al sustituir la ecuación 4.70 en la 4.69 se tiene la expresión 4.71

$$h_p - h_c = \frac{S^2}{12 \times h_c} \qquad (\mathbf{4,71})$$

$$h_p = \frac{(0{,}075m)^2}{12 \times 0{,}4625m} + 0{,}4625m = 0{,}4635m$$

La fuerza resultante que actúa sobre la pared del fondo de la tolva se calcula usando la ecuación 4.72.

$$F_R = \sqrt{{F_H}^2 + {F_v}^2} \qquad (\mathbf{4,72})$$

$$F_R = \sqrt{(81{,}4N)^2 + (84{,}4N)^2} = 117{,}2N$$

Para un cuadrante de circunferencia la posición de F_v desde el centro es:

$$x_1 = \frac{R}{2} = \frac{0{,}075m}{2} = 0{,}0375m\ , \qquad x_2 = 0{,}424R = 0{,}424 \times 0{,}075m = 0{,}0318m$$

La ubicación del centroide está dada por:

$$\bar{x} = \frac{A_1 x_1 + A_2 x_2}{A_1 + A_2} \qquad (\mathbf{4,73})$$

$$\bar{x} = \frac{(0{,}0318m^2)(0{,}0375m) + (0{,}0044m^2)(0{,}0318m)}{0{,}0318m^2 + 0{,}0044m^2} = 0{,}0368m$$

Para determinar el espesor en la parte curva se la analiza como tal, el análisis se basa en la representación de la figura 4.33.

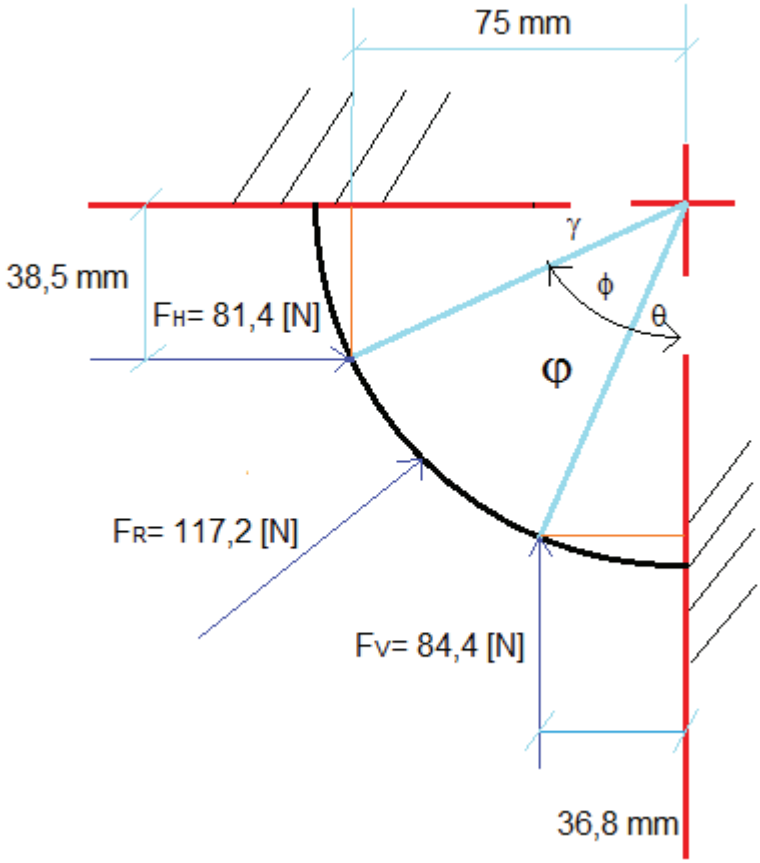


Figura 4.33. Fuerzas que actúan en la superficie curva.

Fuente: Propia.

A continuación se determinan los ángulos γ, φ y θ:

$$\sin\theta = \frac{36{,}8mm}{75mm}$$

$$\theta = 29{,}38°$$

$$\sin\gamma = \frac{38{,}5mm}{75mm}$$

$$\gamma = 30{,}88°$$

$$\emptyset = 90° - \theta - \gamma = 90° - 29{,}38° - 30{,}88° = 29{,}73°$$

En la figura 4.34 se observa el diagrama de cuerpo libre la superficie curva

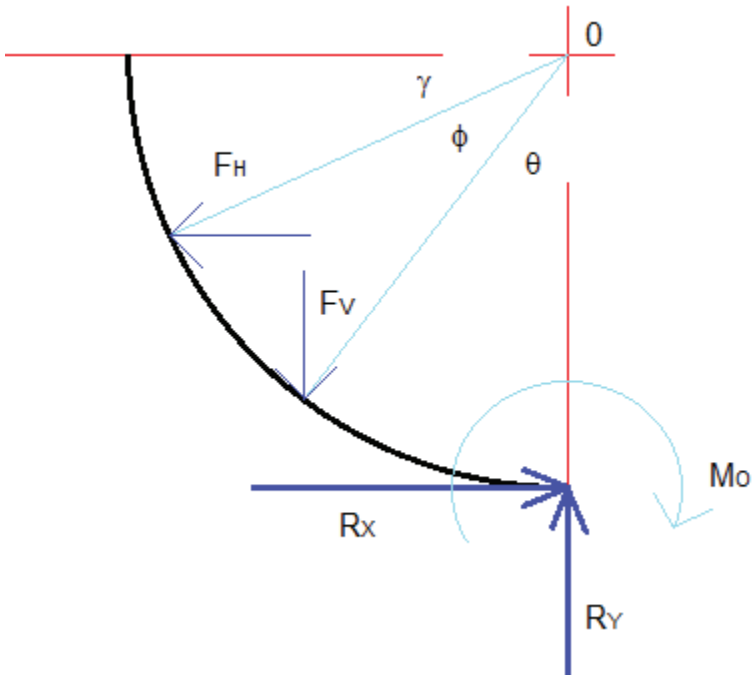


Figura 4.34. Diagrama de cuerpo libre de la superficie curva.
Fuente: Propia.

Las reacciones de la figura 4.34 son determinadas a continuación:

$$\sum F_y = 0$$

$$R_y = F_v = 84{,}4N, \qquad R_x = F_H = 81{,}4N$$

$$\sum M_P = 0$$

$$M_0 - F_v R \cos 60{,}61° - F_H R \sin 30{,}88° = 0$$

$$M_0 = (84{,}4N \times 0{,}075m \times \cos 60{,}61°) + (81{,}4N \times 0{,}075m \times \sin 30{,}88°)$$

$$M_0 = 6{,}24Nm$$

El momento máximo se determina de la expresión 4.74 que es aplicable únicamente cuando 0 < ϕ < 59,11°

$$M_{\varphi} = R_x(R - R\sin\varphi) + R_y(R\cos\varphi) - F_v(R\cos\varphi - R\cos\theta) - M_O \qquad (\mathbf{4,74})$$

Fuente: CARLOS C; JAVIER F; "Diseño de una mezcladora dosificadora de cremas cosméticas"; EPN; Quito – Ecuador; 2008.

Al sustituir los valores respectivos se obtiene:

$$M_{\varphi} = 81{,}4 \times 0{,}075(1 - \sin\varphi) + 84{,}4(0{,}075\cos\varphi) - 84{,}4 \times 0{,}075(\cos\varphi - \cos 29{,}38°) - M_O$$

La ecuación 4.74 se resuelve considerando como variable el ángulo ϕ , de esta forma el valor del momento máximo se obtiene al sustituir valores para dicho ángulo, estos valores son tabulados en la tabla del ANEXO 10 del cual se tiene que para un valor de 33º el momento máximo es el siguiente.

$$M_{máx} = 6{,}33\ Nm$$

Para determinar el esfuerzo máximo al cual está sometida la placa inferior de la tolva aplicando la ecuación 4.75.

$$\sigma_{máx} = \frac{M_{máx}}{I/c} \qquad (\mathbf{4,75})$$

Al sustituir las ecuaciones 4.59 y 4.60 se obtiene la siguiente expresión:

$$\sigma_{máx} = \frac{6M_{máx}}{b \times t^2} \qquad (\mathbf{4,76})$$

$$\sigma_{máx} = \frac{6 \times 6{,}33Nm}{0{,}2m \times (0{,}005m)^2} = 7596000\,\frac{N}{m^2} \approx 1101{,}70\,psi$$

$$FS = \frac{S_y}{\sigma_{máx}} = \frac{42000\,psi}{1101{,}70\,psi} = 38$$

En la tabla 4.9 se asumen los espesores e3 para la sección curvada de la tolva y así se determina cuál es el espesor óptimo para que la placa resista al esfuerzo que se encuentra sometida.

Tabla 4.9. e3 Vs. FS

Espesor e [m]	**0,005**	0,004	0,003	0,002
Esfuerzo máximo σ_{max} [Kpa]	**7596**	11868,750	21100	47475
Factor de Seguridad FS	**38**	24	13	6

Fuente: Propia.

Para facilidad de construcción se utiliza una placa de 5mm de espesor esto debido a que la placa utilizada en la base es del mismo espesor de esta manera se reduce el costo de adquirir una plancha de otro espesor, por las características de la máquina y la sustancia de trabajo el material empleado para la tolva es acero inoxidable del cual el ANEXO 11.

4.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO

El sistema de calentamiento es importante para poder mantener la temperatura adecuada de la crema durante el proceso de dosificación, para cumplir este

propósito la crema tiene que estar a una temperatura promedio de 30ºC valor con una variación de 5 grados esto determinado a partir del análisis reológico.

El sistema de calentamiento está formado por una resistencia eléctrica de inmersión instalada en el interior de la tolva, la cual está en contacto directo con la crema, permitiendo elevar la temperatura de la misma y así lograr disminuir su viscosidad, de tal forma que la alimentación a los tornillos dosificadores se constante, este sistema entra en funcionamiento una vez que la tolva ha sido llenada.

Una vez alcanzada dicha temperatura, el sistema se desconecta para evitar llegar a temperaturas mayores de 35°C sobre las cuales la crema sufre transformaciones desfavorables, cuando se detecte un descenso en la temperatura de alrededor de 5°C la resistencia eléctrica se conecta nuevamente para elevar la temperatura nuevamente hasta la necesaria para la dosificación.

4.5.1 POTENCIA REQUERIDA PARA EL CALENTAMIENTO.

Para el cálculo de la potencia necesaria con la cual se alcanza la temperatura de dosificación, se tienen las siguientes consideraciones de transferencia de calor:

- Flujo de calor unidimensional.
- No incidencia del sol sobre el sistema.
- las pérdidas de calor en las paredes de la tolva no son consideradas.
- El espesor de las paredes de la tolva es despreciable.
- Las propiedades térmicas de los elemento conformantes del sistema son constantes.

- La temperatura es función del tiempo.

La figura 4.35 es una representación del sistema de calentamiento acoplado en la tolva.

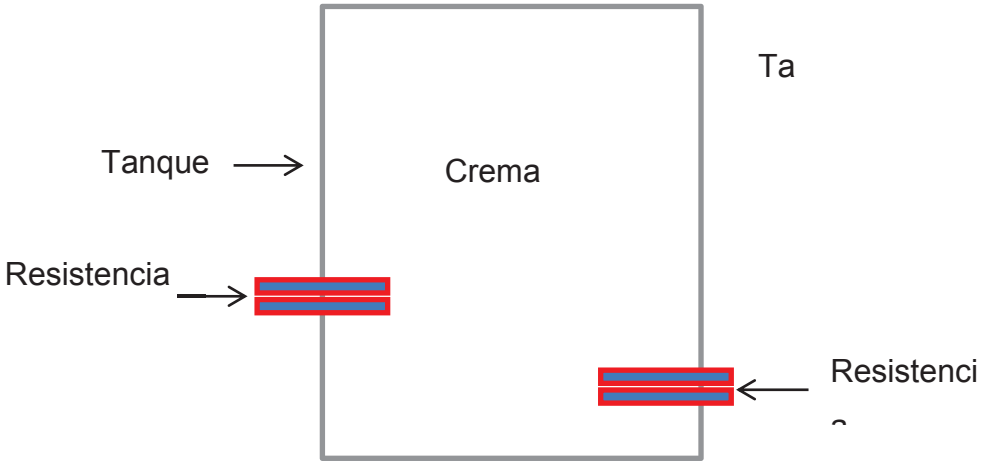


Figura 4.35. Representación del sistema de calentamiento.
Fuente: Propia.

Partiendo de la primera ley de la termodinámica representada en la ecuación 4,77.

$$E_{ent} + \dot{E}_g - \dot{E}_{sale} = \dot{E}_{alm} \qquad (\mathbf{4,77})$$

Donde:

$\dot{E}_{ent}$ = Energía que entra al sistema.
$\dot{E}_g$ = Energía generada por una fuente química, eléctrica, etc.
$\dot{E}_{sale}$ = Energía que sale del sistema.

$\dot{E}_{alm}$ = Energía almacenada en el sistema.

El valor de la energía almacenada en la crema se obtiene del resultado de la diferencia entre la energía aportada por la resistencia eléctrica y las pérdidas de calor determinadas por el sistema mediante los mecanismos de transferencia de calor, este comportamiento se representa mediante la ecuación 4,78.

$$\left(m * c_p\right)_C * \frac{dT_C}{dt} = I^2 * R - 2A_C * U_{C-a_\uparrow}(T_C - T_a) \qquad (\mathbf{4,78})$$

Donde:

$(mc_p)_C$ = Capacitancia térmica de la crema, (J/K).
dT/dt = Variación de la temperatura con respecto al tiempo, (K/s).
I = Intensidad de corriente, (A).
R = Resistencia eléctrica, (Ω).
T_C = Temperatura de la superficie absorbedora crema, (K).
T_a = Temperatura ambiente, (K).
A_C = Área de la crema, (m^2).
$U_{C-a_\uparrow}$ = Coeficiente global de transferencia de calor entre la crema y el ambiente en la parte lateral de la tolva, ($W/m^2.K$).

En base a la configuración establecida por la geometría del sistema tolva – crema se determinan los parámetros de la ecuación 4,78, partiendo de una analogía eléctrica representada en la figura 4.36. se puede determinar el coeficiente global de transferencia de calor entre la crema y el ambiente en la parte lateral de la tolva obteniéndose la siguiente expresión.

$$U_{C-a_{\uparrow}} = \frac{1}{(R_{crema} + R_{acero}) \times A_c} \qquad (4,79)$$

Sustituyendo en la ecuación 4,78 se tiene:

$$P = I^2 + R = (m * c_p)_C * \frac{dT_C}{dt} + 2A_C * \frac{1}{(R_{crema} + R_{acero}) \times A_c}(T_C - T_a) \qquad (4,80)$$

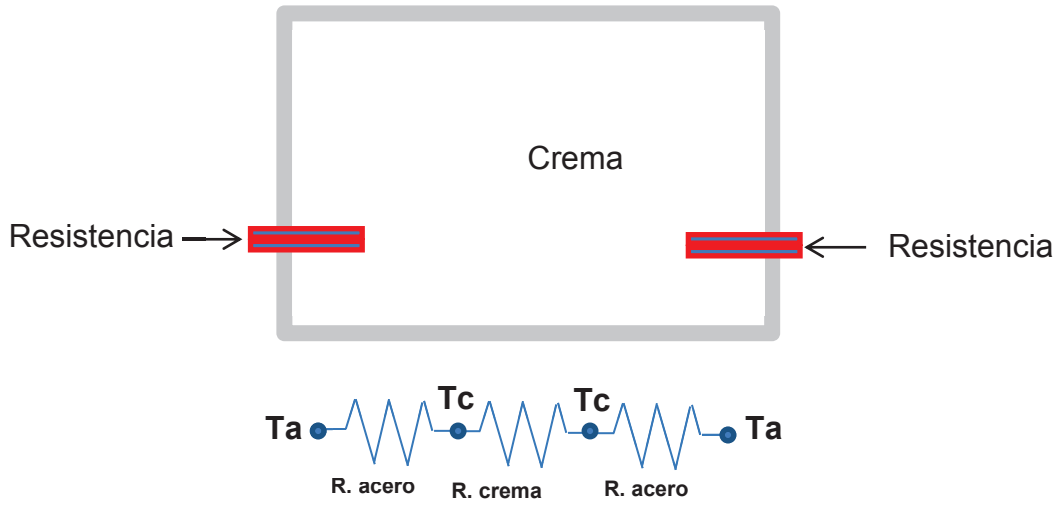


Figura 4.36. Analogía eléctrica del sistema.

Fuente: Propia.

Donde:

$$R_{crema} = \frac{l_{tolva}}{k_{crema} * A} \qquad (4.81)$$

$$R_{acero} = \frac{l_{acero}}{k_{acero} * A} \qquad (4.82)$$

Siendo:

l_{tolva} = Espesor de la sección de crema cm

l_{acero} = Espesor de la pared de la tolva cm

k_{crema} = Conductividad térmica de la crema W cm / cm^2 °C

k_{acero} = Conductividad térmica del acero W cm / cm^2 °C

A = Área del lateral de la tolva cm^2

Al reemplazar las ecuaciones 4.81 y 4.82 en la relación 4.80 se llega a la siguiente expresión:

$$P = I^2 + R = \left(m * c_p\right)_C * \frac{dT_C}{dt} + 2 * \frac{1}{\left(\frac{l_{tolva}}{k_{crema} * A} + \frac{l_{acero}}{k_{acero} * A}\right)}(T_C - T_a)$$

Se conoce:

$$\left(m * c_p\right)_C = \left(50\ kg * 0.690 \frac{kJ}{kg\ K}\right) = 34.5\ kJ/K$$

$$\frac{dT_C}{dt} = 2.36\ \frac{K}{s}$$

$$l_{tolva} = 60\ cm$$

$$l_{acero} = 0.5\ cm$$

$$k_{crema} = 0.524\ {}^{W * cm}/_{cm^2 * °C}$$

$$k_{acero} = 0.0197\ {}^{W * cm}/_{cm^2 * °C}$$

$$A = 1000\ \ cm^2$$

Entonces:

$$P = I^2 + R = 81.42\ kW$$

Este análisis está basado en la conducción a través de la crema en una sola dirección, entonces la potencia requerida para la resistencia de calentamiento se divide para dos con el fin de garantizar un calentamiento uniforme de la crema. Por lo tanto la potencia requerida para cada resistencia de calentamiento de la crema es la siguiente:

$$P_{Resistencia} = 40.71\ kW$$

El tipo de resistencia seleccionado es una resistencia eléctrica tubular sumergible apta para el contacto con alimentos el montaje se lo realiza mediante perforación de la tolva de almacenamiento y un posterior roscado, la figura 4.37 permite visualizar en detalle el montaje. El ANEXO 12 expone las características de la resistencia eléctrica seleccionada.

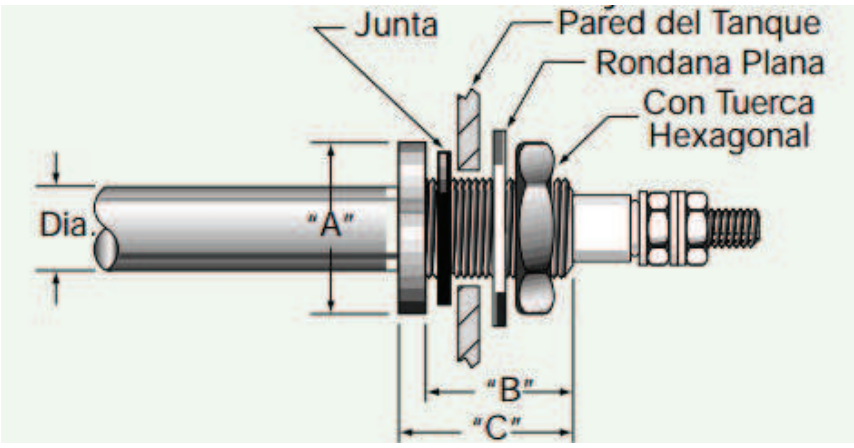


Figura 4.37. Esquema del montaje de la resistencia en la tolva.
Fuente: http://www.tempco.com/bodypages/products.pdf.

El sistema de calentamiento es controlado mediante un dispositivo PLC, el mismo que es programado para activar o desactivar la fuente de alimentación de las resistencias eléctricas sumergibles, el ANEXO 13 permite tener acceso a las características técnicas del dispositivo seleccionado para el conjunto.

Este dispositivo controla además la apertura y cierre sincronizado de las electroválvulas, mediante la programación necesaria se deposita a cantidad de crema requerida por la empresa, la información técnica respectiva a los solenoides se encuentra en el ANEXO 14.

4.6 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

Para el cálculo de la estructura que soporta el sistema de dosificación se toma en cuenta la capacidad de la misma así como también el peso propio de la máquina como se muestra a continuación:

$$M_t = M_c + M_{maq} \qquad (\mathbf{4.83})$$

Dónde:

$M_t =$ Masa total [Kg]

$M_c =$ Masa crema [Kg]

$M_{maq} =$ Masa máquina [Kg]

Para el cálculo de la masa se utiliza el volumen de crema contenida en la tolva y la densidad de la misma, especificados en la sección 4.4.1 del presente trabajo.

$$V_c = 6000\ [cm^3]$$

$$\rho_c = 1{,}19\ \left[{}^{g}/_{cm^3}\right]$$

$$M_c = \frac{V_c * \rho_c}{1000}\ [Kg] \qquad (\mathbf{4.84})$$

$$M_c = 7{,}14\ [Kg]$$

En la figura 4.38 se presenta la configuración determinada para soportar la máquina dosificadora, partiendo de que la masa total se distribuye en 4 columnas que forman parte de la estructura donde por motivos de seguridad se le añade un 10 % del peso total para el diseño.

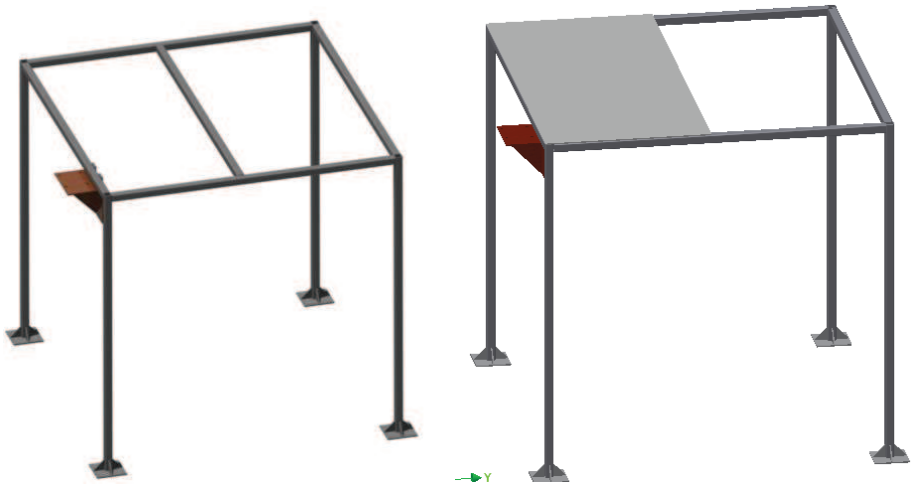


Figura 4.38. Configuración de la estructura soportante.

Fuente: Propia.

Para determinar la masa total de la máquina se utiliza la herramienta informática Autodesk Inventor como se muestra en las figuras 4.39 y 4.40 en las cuales se observa la máquina diseñada sin estructura soportante.

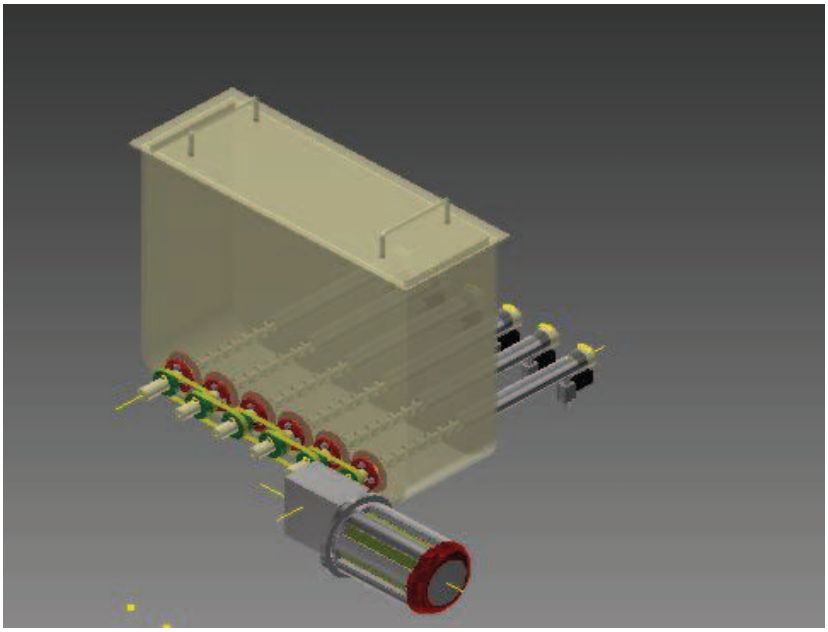


Figura 4.39. Visualización posterior de la máquina.
Fuente: Inventor autodesk 2013.

La figura 4.41 que permite visualizar las propiedades físicas de todo el conjunto diseñado.

Una vez aplicada la herramienta que permite observar las propiedades físicas del conjunto dosificador se determina el peso aproximado de la máquina y se aplica la ecuación 4.83.

$$M_{maq} \approx 45\ [Kg]$$

$$M_t = 7{,}14\ [Kg] + 45\ [Kg] = 52{,}14\ [Kg]$$

$$M_D = 1{,}1 * 52{,}14\ [Kg] = 57{,}35\ [Kg]$$

Donde:

M_D: Masa de diseño $[Kg]$.

Por lo tanto la masa de diseño le la aproxima a un valor superior.

$$M_D \approx 58\ [Kg]$$

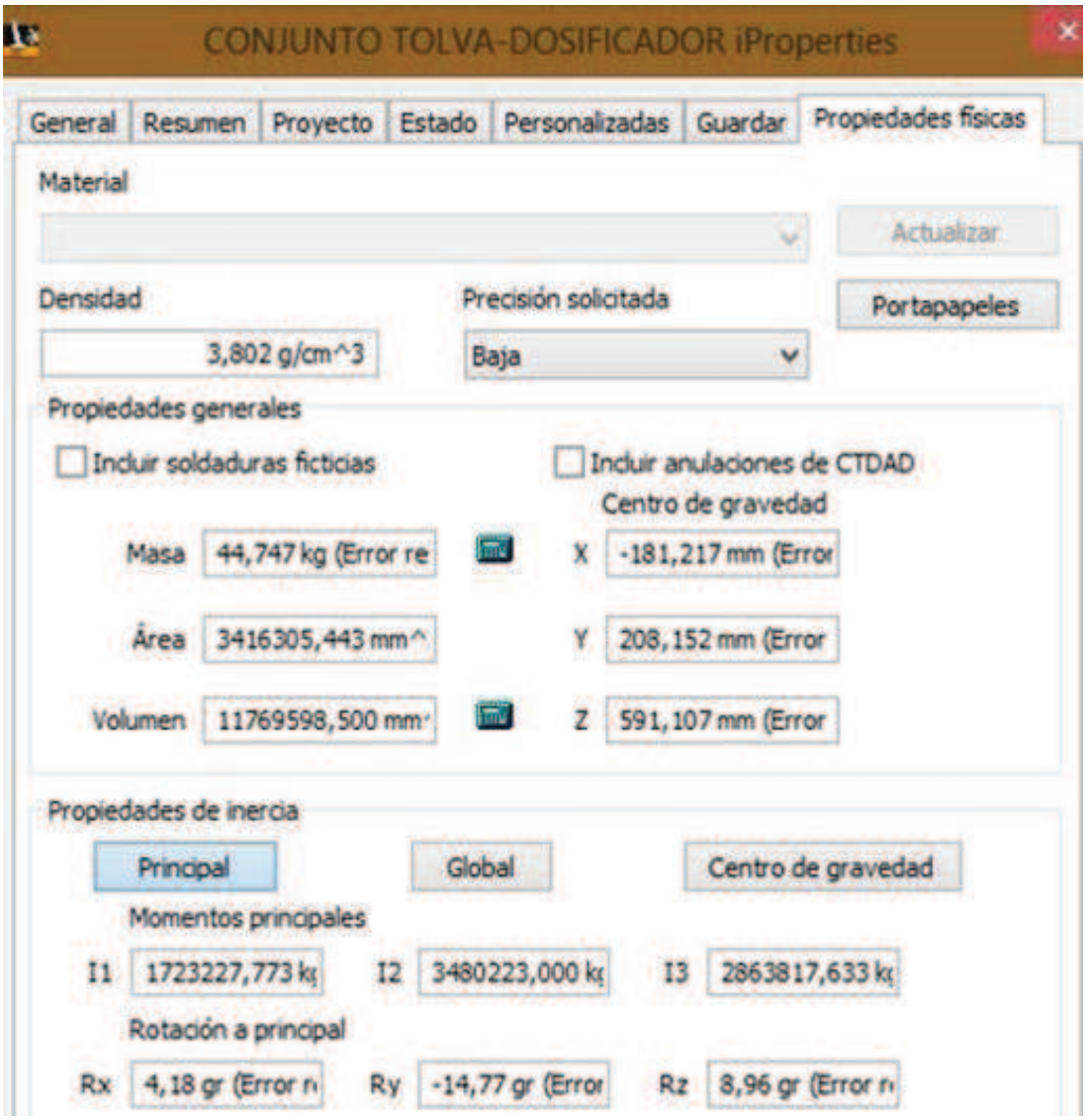


Figura 4.41. Visualización propiedades de la máquina.

Fuente: Inventor autodesk 2013.

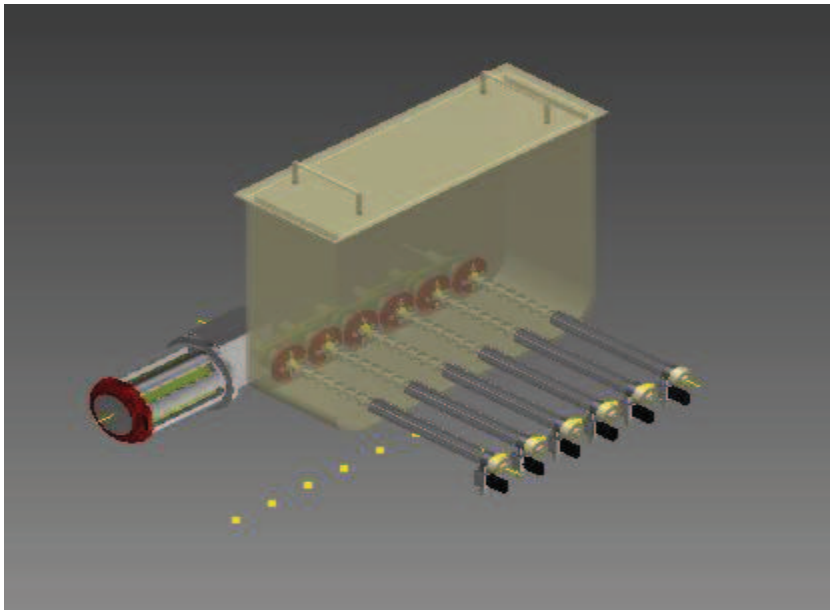


Figura 4.40. Visualización delantera de la máquina.
Fuente: Inventor autodesk 2013.

4.6.1 SELECCIÓN ELEMENTOS ESTRUCTURALES

La máquina se acopla a la banda trasportadora de las galletas existente en la fábrica y por las características de la misma, la longitud de las columnas de la estructura es de 1000 mm. Establecido este parámetro es necesario determinar la longitud efectiva de diseño para las columnas, para este fin se parte de la figura 4.38 tomando en cuenta que cada columna se considera con apoyos en los extremos, por lo tanto en función de la figura 4.42 se determina la longitud efectiva para el diseño.

Entonces:

$$L_e = K * L \qquad (\mathbf{4.85})$$

$$L_e = 1000\ [\boldsymbol{mm}]$$

Las columnas son elementos sometidos principalmente a esfuerzos de flexión y compresión, el diseño para la selección de la columna está en función de la esbeltez y el esfuerzo crítico, considerando que mientras mayor sea la relación de esbeltez menor es el esfuerzo necesario para deformar la columna y que la esbeltez máxima para elementos a compresión es menor o igual a 200 se determina el radio mínimo de la sección transversal de la columna.

$$\frac{L_e}{r}_{max} = 200 \qquad (\mathbf{4.86})$$

$$\frac{L_e}{r} \leq \frac{L_e}{r}_{max} \qquad (\mathbf{4.87})$$

Reemplazando los valores de longitud equivalente y relación de esbeltez máxima en la ecuación 4.87, se obtiene el radio de giro mínimo que debe tener el elemento que forma la columna.

$$r \geq \frac{L_e}{200}$$

$$r \geq \frac{1000\ [mm]}{200} \geq 5\ [mm]$$

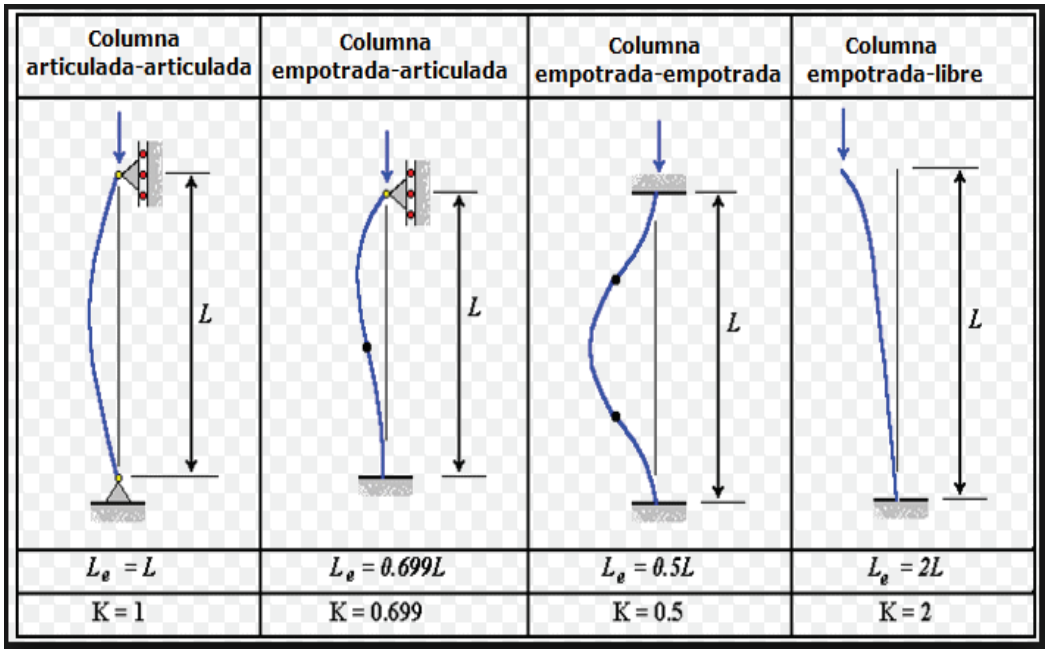


Figura 4.42. Condiciones de apoyo para columnas.
Fuente: MÁQUINAS PRONTUARIO de N. LARBURU.

Una vez determinado este valor se selecciona el elemento que se aproxime lo posible al resultado obtenido para el radio de giro mínimo requerido, de esto se obtiene que el perfil estructural cuadrado 20x20x1,2 del catálogo DIPAC del ANEXO 15 cumple con los requerimientos determinados posteriormente para el diseño.

Siendo:

$$r = 7{,}7[mm]$$

$$A = 90[mm^2]$$

Seleccionado el elemento estructural y usando sus propiedades físicas y geométricas se analiza el esfuerzo crítico al cual está sometido esto mediante la ecuación 4.88.

$$\sigma_{crit} = \frac{2 * \pi^2 * E}{[L_e/r]^2} \qquad (\mathbf{4.88})$$

Considerando las propiedades del acero.

$$E = 200[GPa]$$

$$\sigma_y = 250[MPa]$$

$$\sigma_{crit} = \frac{2 * \pi^2 * 200[GPa] * 1000}{(1000/7{,}7)^2} = 234{,}06[MPa]$$

A continuación se determina el esfuerzo permisible para la columna, siendo necesario para esto calcular la fuerza que soporta cada elemento.

$$F_D = M_D * g \qquad (\mathbf{4.89})$$

$$F_D = 58\ [Kg] * 9{,}8[m/s^2] = 568{,}4\ [N]$$

$$P_c = F_D/4 \qquad (\mathbf{4.90})$$

Donde:

F_D= Peso total de la estructura[N]

P_c= Peso soportado por cada columna[N]

$$\sigma_{perm} = \frac{P_c}{A} \qquad (\mathbf{4.91})$$

$A =$ Área de la sección transversal de la columna $[mm^2]$

$$\sigma_{perm} = \frac{142{,}1[N]}{90[mm^2]} = 1{,}57[MPa]$$

Por lo tanto relacionando el esfuerzo crítico que soporta la estructura y el esfuerzo permisible de la misma se acepta la selección del perfil mencionado, para comprobar los cálculos realizados se ejecuta la simulación de la estructura expuesta a las cargas que soporta mediante el programa informático AUTODESK INVENTOR 2013, los resultados se presentan en la figura 4.43 donde se observan que los desplazamientos máximos de los elementos al soportar el peso de la máquina diseñada más el peso estimado de la carga y un porcentaje añadido por seguridad, se determina luego del análisis que estos desplazamientos son mínimos en comparación con las dimensiones de los elementos, por lo que la selección de los elementos estructurales es aceptable.

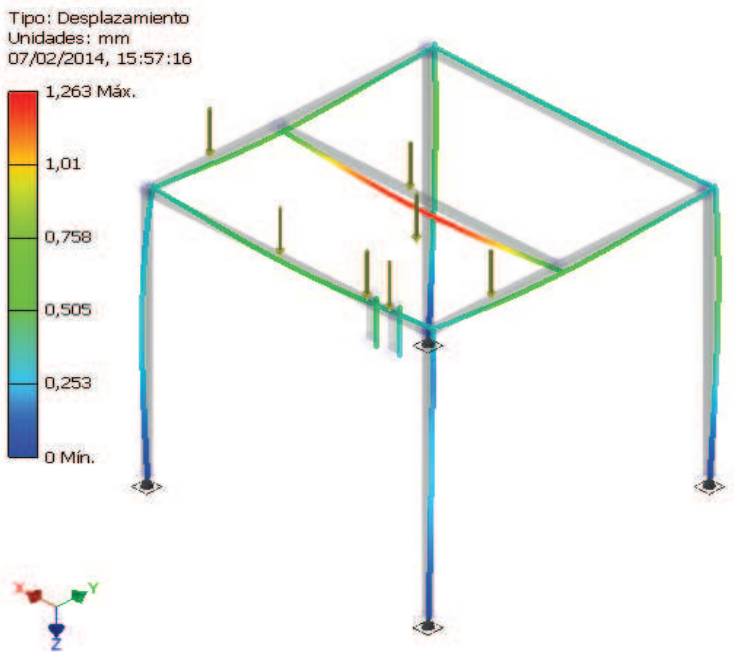


Figura 4.43. Visualización desplazamientos de la estructura.
Fuente: Inventor autodesk 2013.

4.6.2 SIMULACIÓN DE LA MÁQUINA

En este punto se presentan los resultados del diseño de la máquina mediante el software AUTODESK INVENTOR 2013, donde se observan en conjunto cada uno de los elementos involucrados en el presente trabajo. Las figuras 4.44 y 4.45 que se indican a continuación representan la simulación de los resultados finales del diseño y permiten al responsable de la construcción de la máquina tener una idea más clara de la configuración de los elementos componentes de la misma.

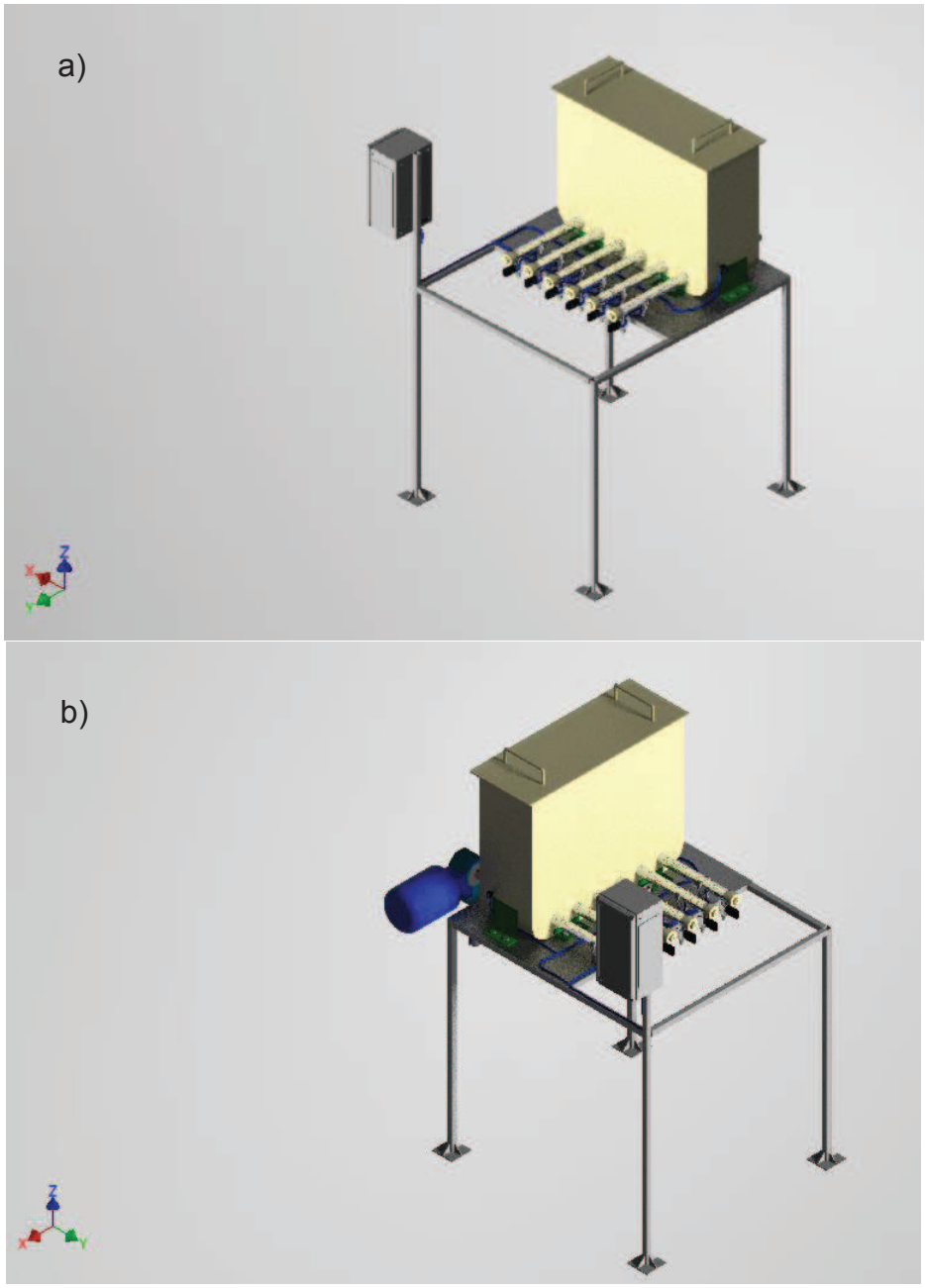


Figura 4.44. Visualización final a) vista frontal izq., b) vista frontal der.

Fuente: Inventor Autodesk 2013.

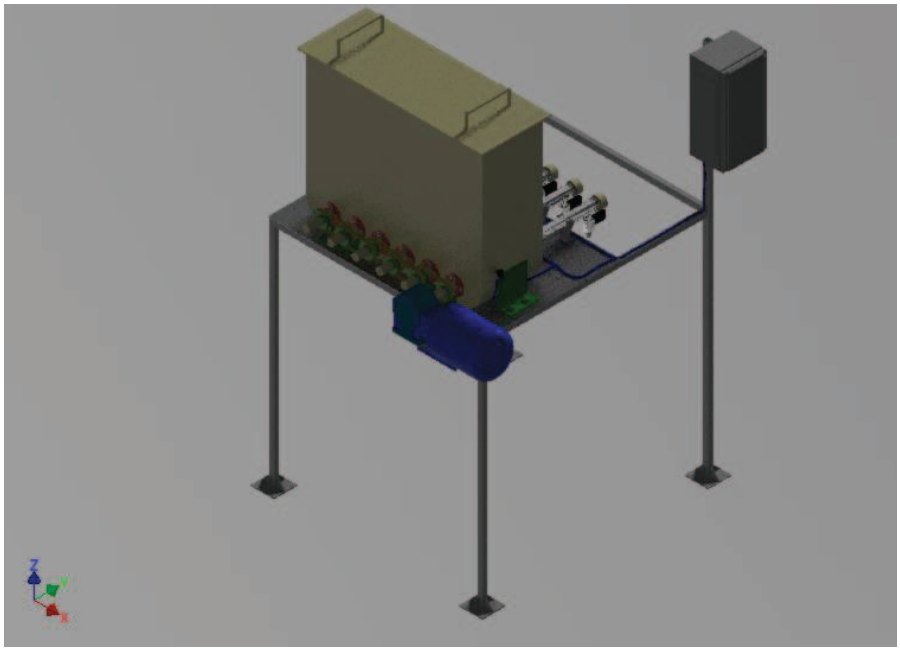


Figura 4.45. Visualización final vista posterior.

Fuente: Inventor autodesk 2013.

Finalmente los planos de taller y constructivos de la máquina son presentados en el ANEXO 17.

CAPÍTULO V

CONSTRUCCIÓN, MONTAJE Y PRUEBAS DE CAMPO DEL PROTOTIPO

En este capítulo se describe el proceso de construcción de la máquina, los equipos y materiales necesarios para el montaje de la misma, así como los instrumentos de medida y control para los elementos que conforman la dosificadora.

5.1 CONSTRUCCIÓN

La construcción de la máquina se subdivide en grupos que se detallan a continuación:

- Tolva alimentadora.
- Sistema de transmisión.
- Sistema de dosificación.
- Estructura de soporte.

Para la fabricación de cada grupo se requieren de ciertos procesos de maquinado, soldadura, doblado, etc. A continuación se listan algunos de los equipos y herramientas necesarios tanto para la construcción y montaje de la máquina dosificadora.

5.1.1 MÁQUINAS Y EQUIPOS

Para la construcción de los elementos que forman la máquina se requieren de las siguientes maquinas, herramientas y equipos:

5.1.1.1 Máquinas y equipos

- Cizalla,
- Torno,
- Taladro,
- Fresadora,
- Dobladora,
- Equipo de soldadura SMAW,
- Equipo de soldadura MIG.

5.1.1.2 Herramientas

- Brocas,
- Discos de desbaste,
- Cuchillas,
- Mesa de trazado,
- Inmovilizadores.
- Herramientas para instalaciones eléctricas.

5.1.1.3 Instrumentos de medición y control

- Calibrador pie de rey,
- Flexómetro,

- Micrómetro,
- Comprobador de energía,
- Multímetro.

Una vez listadas de forma breve las herramientas, los equipos y los instrumentos de medición necesarios para la construcción y el montaje, se numeran los materiales que emplean en el proceso de fabricación de la máquina.

5.1.1.4 Materiales empleados en la fabricación y montaje.

- Plancha de acero inoxidable,
- Barra redonda sólida de duralón,
- Barra redonda solida de teflón,
- Electrodos,
- Tubería redonda de acero inoxidable,
- Tubo estructural,
- Pintura anticorrosiva.

El proceso constructivo de cada uno de los elementos que constituyen la máquina dosificadora se presenta en las hojas de procesos del ANEXO 18.

5.2 MONTAJE

El procedimiento a seguir para el montaje de la máquina se lo realiza siguiendo lo indicado en el plano de montaje 3095.001, presentado en el ANEXO 19.

5.3 PRUEBAS DE CAMPO

Para realizar las Pruebas de Campo se debe seguir el Protocolo de Pruebas del ANEXO 16.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE COSTOS DEL PROYECTO

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se determinan los costos que representa tanto el diseño como la construcción de la máquina, considerándose para este fin los costos de fabricación de los elementos que requieran de procesos de maquinado, de elementos normalizados disponibles en el mercado, de equipos requeridos para el funcionamiento de la máquina y costos de montaje.

Para el análisis de los costos es necesario cotizar para cada uno de los elementos que constituyen la máquina, tomando en cuenta que estos valores son susceptibles de cambio acorde con las características del mercado.

6.2 COSTOS DIRECTOS

Son valores que se determinan a partir de las acciones que involucra la fabricación de la máquina y se pueden determinar en el producto final.

6.2.1 COSTOS DE ELEMENTOS MAQUINADOS

En la ejecución del proyecto se deben realizar varias operaciones que involucran procesos de maquinado que permitan dar la geometría requerida a la materia prima, esto representa un costo directo para la ejecución del proyecto.

Para determinar el costo de estos procesos se parte de la adquisición de la materia prima siguiendo con la estructuración de un plan de procesos a seguir con la finalidad de establecer las acciones que implica la fabricación de cada elemento sus tiempos de intervención y finalmente el costo real.

Los costos de fabricación de los elementos maquinados se presentan en la tabla 6.1 que se indica a continuación.

Tabla 6.1. Costos de maquinado

DESCRIPCIÓN	COSTO UNIDAD	CANTIDAD	COSTO TOTAL
BOQUILLA	18,5	6	111
CHAVETA 1-6	3	2	6
CHAVETA 2-5	2,25	4	9
POLEA 1	18,5	2	37
POLEA2	16	4	64
PRENSA ESTOPA 1	19,5	6	117
PRENSA ESTOPA 2	20	6	120
TAPA SELLO SALIDA	17	6	102
TORNILLO 1	100	1	100
TORNILLO 2	100	4	400
TORNILLO 3	100	1	100
		TOTAL	1166

Fuente: Propia.

Los costos detallados en la tabla 6.1 consideran tiempos y costos de maquinado, asi como tambien los costos que implica el uso de las máquinas requeridas para la construcción de cada elemento de la dosificadora, ademas de incluir los costos de mano obra calificada para el uso de los equipos empleados en la condtruccion.

6.2.2 COSTO DE EQUIPOS

Los costos de los equipos se indican en la tabla 6.2.

Tabla 6.2. Costos de equipos

DESCRIPCION	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	PRECIO
MOTOREDUCTOR ORTOGONAL 0,5 HP, 57 rpm, 220 V	360,64	1	360,64
SOLENOID VALVE 2W ½	147,94	6	887,64
MicroLogix 1100, 120/240V ac power, (10) 24V dc digital inputs, (2) 10V analog inputs, (6) relay outputs	491,41	1	491,41
		TOTAL	1739,7

Fuente: Propia.

6.2.3 COSTO DE ELEMENTOS NORMALIZADOS

Los costos de los elementos normalizados de detallan en la tabla 6.3, que se indica a continuación:

Tabla 6.3. Costos de elementos normalizados

DESCRIPCION	VALOR UNITARIO	CANTIDAD	PRECIO
Perno M6X20-m 1	0,04	4	0,16
Tuerca M6-m 1	0,02	4	0,08
Arandela ø 6 X 1,6 mm	0,02	4	0,08
Perno M6X10-m 1	0,04	4	0,16
Perno M10X20-m 1	0,23	12	2,76
Tuerca M10-m 1	0,07	12	0,84
Arandela ø 10 X 1,6 mm	0,02	12	0,24
Perno inox M6X35-m 1	0,11	24	2,64
Tuerca inox M6-m 1	0,02	24	0,48
Arandela inox ø 6 X 1,6 mm	0,05	24	1,2
Tubo redondo hueco ø exterior: (33,4 mm x 3,38 mm de pared)	43,26	1	43,26
Tubo redondo hueco ø exterior: (21,3 mm x 2,77 mm de pared)	35,11	1	35,11
Barra tubo cuadrado 20X20X1,2	20	3	60
Plancha inox e=5mm	558,36	1	558,36

Tabla 6.3. (Continuación)			
Retenedor ø int: 26,7 mm ø sección: 3,6 mm, silicona VMR/MVR	1	6	6
Retenedor ø int: 20 mm ø sección: 3,6 mm silicona VMR/MVR	1	6	6
Barra redonda de teflón ø 60 mm	175,5	1	175,5
Barra redonda de duralón ø 30 mm X 4000mm	180,45	1	180,45
Barra cuadrada de duralón 10 X 10 x 200 mm	180,45	1	180,45
		TOTAL	1253.77

Fuente: Propia.

6.2.4 TOTAL COSTOS DIRECTOS

Tabla 6.4. Total costos directos

DESCRIPCIÓN	COSTO
COSTOS ELEMENTOS NORMALIZADOS	1253,77
COSTOS DE FABRICACIÓN	1166
COSTOS DE EQUIPOS	1739,7
TOTAL	4159,47

Fuente: Propia.

6.3 COSTOS INDIRECTOS

Para determinar los costos indirectos se consideran parámetros como materiales, equipos empleados durante el desarrollo del proyecto, costo intelectual del diseño, costo de implementación de software de diseño, costo del desarrollo de simulación y costos imprevistos, estos costos se detallan en la tabla 6.5.

Tabla 6.5. Total costos indirectos

DESCRIPCIÓN	COSTO
COSTO MATERIALES	100,00
COSTO DISEÑO Y SIMULACION	650,00
COSTOS IMPREVISTOS	490,947
TOTAL	1240,947

Fuente: Propia.

6.4 COSTO TOTAL DEL PROYECTO

El costo total de la máquina es equivalente a la suma de los costos de fabricación de elementos, costo de materiales y partes normalizadas y costos indirectos, se presentan en la tabla 6.6.

Tabla 6.6. Costo total del proyecto

DESCRIPCIÓN	VALOR
COSTOS DIRECTOS	4159,47
COSTOS INDIRECTOS	1240,947
TOTAL	5400,417

Fuente: Propia.

Los costos expuestos para la fabricación de la máquina dosificadora de crema de relleno de galleta se obtienen de proformas solicitadas a las empresas distribuidoras a nivel nacional.

CAPÍTULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Durante el desarrollo y posterior culminación del presente proyecto se presentaron situaciones de las cuales se obtienen las siguientes conclusiones:

7.1 CONCLUSIONES.

- El conocimiento obtenido en la investigación es fundamental para el diseño de la máquina, en algunas ocasiones es necesario acudir al diseño concurrente debido a que se adapta al uso de elementos existentes en el país para así disminuir los costos en importaciones.

- Al diseñar una máquina de dosificación se toman en cuenta diversos parámetros para cumplir a cabalidad con un diseño óptimo, pudiendo tomar en cuenta varias opciones al momento de optar por la mejor, pero un parámetro importante es el costo de la máquina.

- La máquina dosificadora es diseñada bajo los requerimientos técnicos de la empresa solicitante, de este modo se toma en cuenta ciertos factores que intervienen en el diseño de la misma, para cumplir con lo predispuesto y el mejor acople al sistema de producción de la empresa.

- La receta original de la crema no fue proporcionada debido a las políticas de privacidad de la empresa así que se parte como referencia una crema de galletas conocida para realizar el respectivo estudio que permita iniciar con el diseño de la máquina.

- En la industria moderna se han elaborado materiales que son más livianos, fáciles de maquinar, resistentes y para diversos usos como en el caso de este proyecto se utilizan varios materiales los cuales poseen varias propiedades que permiten abaratar los costos a más de poderlos utilizar para el propósito de manipular alimentos sin que haya contaminación de los mismos.

- En la máquina se nota que el subsistema más importante es el de dosificación debido a que en este subsistema se controla la cantidad exacta a dosificar, la incorrecta calibración del subsistema puede llevar a pérdidas del material a dosificar o dosificación tanto excesiva como escasa.

- Se utilizan elementos diseñados con factores de seguridad en el margen de diseño, en algunos casos se puede elegir de menor valor que aún se pueden utilizar para el diseño pero por parámetros de construcción y funcionales se ha optado por elegir unos más altos.

- La incorporación de sistemas de calentamiento en ciertos procesos de producción facilita la ejecución de los mismos como es el caso de este proyecto en el cual al calentar el fluido se alcanzan propiedades óptimas para la dosificación de la misma. Para el diseño de este tipo de máquinas orientadas a la industria de los alimentos se debe considerar recursos bibliográficos como normas para manejo de alimentos, normas sanitarias, ambientales, tecnológicas.

7.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda la limpieza diaria de la máquina en especial de las partes que interactúan con el fluido a dosificar debido a que se quedan residuos, para así evitar que haya contaminación del fluido nuevo con el anterior.

- Se tiene que controlar la correcta operación de la máquina así como la temperatura del fluido para que la máquina pueda trabajar de manera normal para evitar el daño de alguno de sus componentes.

- Verificar el estado de los empaques que permiten la impermeabilidad de la máquina para que no exista desperdicio de fluido por fugas.

- Mantener la tolva de alimentación cerrada para evitar que el fluido se contamine por presencia de agentes externos en el ambiente.

- Para el diseño de sistemas de calentamiento se debe tomar en cuenta las propiedades del fluido de tal forma que no se sobrepasen estos límites garantizando la calidad del producto.

BIBLIOGRAFÍA

1. AISC, (1980), *"Manual of Steel Construction"*, Eighth Edition.

2. BUDINAS, Richard, (2012), *"Diseño en Ingeniería Mecánica"*; Editorial Mc Graw Hill, Novena Edición, México.

3. GERE James, (2006), *"Mecánica de materiales"*, Sexta Edición, Editorial Thomson, México.

4. INEN, (1981), *"Código de Dibujo Técnico Mecánico"*; Quito.

5. MARKS, *"Manual del Ingeniero Mecánico"*; Editorial McGraw-Hill, México.

6. N. LARBURU, (2003) *"Máquinas prontuario",* Editorial THOMSON – PARANINFO, treceava edición.

7. MERIAM J., (1976), *"Estática"*; Editorial Reverté, Barcelona.

8. NORTON Robert, (2011), *"Diseño de Maquinas"*; Cuarta Edición, Editorial Pearson Educación, México.

9. RIBA Carles, (2002), *"Diseño Concurrente"*, Editorial ETSEIB – UPC, Barcelona.

10. VARGAS Jaime, (2013), *"Guía de los Fundamentos del Dibujo Industrial"*, E.P.N, Facultad de Ingeniería Mecánica, Ecuador.

11. CATÁLOGO M&M INTERNATIONAL, *"Solenoid valves".*

12. CATÁLOGO DIPAC, *“Tuberías”.*

13. CATÁLOGO DIPAC, *“Planchas”.*

14. CENGEL, Y; BOLES, M; (2006); *“Termodinámica”;* sexta edición; McGraw – Hill; México.

15. ALVARADO JUAN DE DIOS; *“Principios de la Ingeniería aplicación a los alimentos”;* Secretaria General de la Organización de los Estados Americanos; Programa de desarrollo regional; Quito – Ecuador.

TESIS CONSULTADAS

1. MAURICIO O.; ALEJANDRO C; *"Diseño y construcción de una máquina dosificadora de masa para la elaboración de humitas para la empresa Del Valle Lojano"*; EPN; Quito – Ecuador; 2011.

2. CARLOS C; JAVIER F; *"Diseño de una mezcladora dosificadora de cremas cosméticas"*; EPN; Quito – Ecuador; 2008.

ANEXOS

ANEXO 1
ANALISIS REOLÓGICO DE LA CREMA USADA PARA EL RELLENO

ANEXO 2
REGISTRO FOTOGRÀFICO

ANEXO 3

ESPECIFICACIONES TECNICAS MOTOREDUCTOR

ANEXO 4

TABLAS SELECCIÒN BANDAS, SHIGLEY TABLA 17-2.

ANEXO 5

TABLA FACTOR DE SERVICIO, SHIGLEY TABLA 17-15.

ANEXO 6
ESPECIFICACIONES DURALÓN

ANEXO 7
FACTORES PARA EL DISEÑO

ANEXO 8

CATALOGO RETENEDORES

ANEXO 9
CATALOGO TEFLÓN

ANEXO 10

MOMENTO MÁXIMO Vs ÁNGULO φ

ANEXO 11

CATALOGO PLANCHAS DE ACERO INOXIDABLE

ANEXO 12

CATALOGO RESISTENCIAS ELÉCTRICAS

ANEXO 13

CATALOGO DISPOSITIVOS PLC

ANEXO 14
CATALOGO ELECTROVÁLVULAS

ANEXO 15
CATÁLOGO TUBERÍA DIPAC

ANEXO 16

FORMATO PRUEBAS DE CAMPO

ANEXO 17

PLANOS Y HOJAS DE PROCESOS