



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PULVERIZADORA DE MIEL DE CAÑA A PANELA EN POLVO PARA LA ASOCIACIÓN DE PEQUEÑOS PRODUCTORES MAQUITA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

CRESPO TIMBILA MARCO VINICIO
marco.crespo@epn.edu.ec

CRUZ CASA ERICK SEBASTIÁN
erick.cruz01@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. GRANJA RAMÍREZ MARIO GERMAN, M.Sc.
mario.granja@epn.edu.ec

CO-DIRECTOR: ING. GUACHAMÍN ACERO WILSON IVÁN, Ph.D.
wilson.guachamin@epn.edu.ec

Quito, noviembre 2018

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Marco Vinicio Crespo Timbila y Erick Sebastián Cruz Casa**, bajo mi supervisión.

Ing. Mario Granja, M.Sc.

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Wilson Guachamín, Ph.D.

CO-DIRECTOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Marco Vinicio Crespo Timbila y Erick Sebastián Cruz Casa**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Marco Vinicio Crespo Timbila

Erick Sebastián Cruz Casa

DEDICATORIA

A mis padres José y Rosa. Por ser los pilares de mi vida y su apoyo incondicional durante mi formación profesional.

Vinicio

El presente proyecto va dedicado a todas las personas que formaron parte de mi vida universitaria, especialmente a mis padres, hermanos y sobrinos, este es un logro de todos ustedes.

Erick

AGRADECIMIENTO

A Dios, por ser mi guía y levantarme en momentos de tristeza.

Agradezco a mis padres, quienes siempre estuvieron apoyándome en todas mis decisiones, por ser ejemplos que seguir y por haber inculcado valores que me permiten cada día ser una mejor persona.

A mis herman@s, Milton, Klever, Jaime y Elvia. Gracias por confiar en mí y su apoyo en todo momento.

A mi amigo Erick por darme la oportunidad de trabajar junto a él, por el esfuerzo, entrega y dedicación para superar todo tipo de adversidad durante el trabajo de titulación.

A mis compañeros y amigos 'LOS CAMARADAS', gracias por brindarme su amistad, por las experiencias compartidas, viajes, chumas, todos y cada uno de ustedes hicieron de mi estadía en Quito y en la Poli una de las mejores etapas de mi vida.

A mis directores de tesis Mario Granja y Wilson Guachamín, mil gracias por su colaboración, dirección y ayuda en el desarrollo del presente proyecto de titulación.

A mis profesores de la EPN, por compartir sus conocimientos y experiencias dentro y fuera de las aulas de clase.

Finalmente, agradezco a la Escuela Politécnica Nacional y sobre todo a la mejor facultad del mundo 'INGENIERÍA MECÁNICA' por abrirme sus puertas y brindarme la oportunidad de formarme como profesional.

Vinicio

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todas las personas que formaron parte de la culminación de mi carrera profesional en especial a mis padres que con su apoyo y consejos implantaron en mí el carácter necesario para afrontar este duro desafío, a mis hermanos que con sus experiencias y ayuda incondicional fueron guiándome a lo largo de mi vida universitaria, a mis tíos y primos que desde muy lejos llegaron a ser un soporte importante para lograr mis objetivos, a mis profesores que con sus conocimientos fueron implantando en mí el deseo de aprender a superar cualquier obstáculo que pueda presentarse a lo largo de mi vida laboral, a mis amigos con los que compartí lo sacrificado de la vida estudiantil y fueron un apoyo fundamental para avanzar en mi carrera, gracias, a mi querida Escuela Politécnica Nacional, en la cual me enorgullece haber sido parte y tener el privilegio de decir soy politécnico. Para finalizar quiero realizar una mención especial a mi compañero de tesis y directores que con su ayuda, colaboración y orientación permanente hicieron que el presente proyecto culmine con éxito.

Erick

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Panela Granulada.....	3
1.1.1. Descripción General.....	3
1.1.2. Cultivo de caña.....	3
1.2. Proceso para la elaboración de la panela.....	4
1.3. Etapas del proceso de pulverizado.....	6
1.4. Requisitos para la comercialización de la panela granulada.....	6
1.4.1. Objeto.....	6
1.4.2. Definiciones.....	6
1.4.3. Clasificación.....	7
1.4.4. Requisitos.....	7
1.4.5. Inspección y muestreo.....	8
1.4.6. Envasado y embalado.....	8
1.4.7. Rotulado.....	8
1.5. Tipos de pulverizadoras o mezcladoras.....	8
1.5.1. Mezcladoras móviles.....	8
1.5.2. Mezcladoras estáticas.....	10
1.5.3. Especificaciones técnicas de mezcladoras existentes en el mercado nacional.....	12
1.6. Elementos que conforman una máquina pulverizadora.....	13

1.7. Superficies sumergidas de la máquina pulverizadora	15
1.7.1. Superficies sumergidas de pared plana	15
1.7.2. Superficies sumergidas de pared curva	16
1.8. Fuerzas de un fluido sobre una superficie en movimiento	16
1.8.1. Fuerza generada por un esfuerzo cortante	17
1.8.2. Fuerza de arrastre en un fluido	17
1.9. Diseño a fatiga de ejes.....	18
1.10. Selección de rodamientos.....	20
1.11. Controladores de arranque y paro para motores.....	21
1.12. Soldadura y juntas soldadas	21
1.12.1. Proceso de soldadura para la fabricación de la máquina	21
1.12.2. Juntas soldadas	22
1.12.3. Diseño de juntas soldadas	22
1.13. Diseño de columnas y pórticos	23
1.14. Selección de materiales	24
2. METODOLOGÍA	25
2.1. Requerimientos de la máquina pulverizadora.	27
2.1.1. Voz del usuario	27
2.1.2. Voz del ingeniero	27
2.1.3. Casa de la calidad	27
2.2. Especificaciones técnicas de la máquina pulverizadora	28
2.3. Análisis Funcional.....	29
2.3.1. Niveles funcionales de la máquina pulverizadora.....	30
2.4. Desarrollo de módulos y alternativas de diseño	30
2.4.1. Depósito de la mezcla.....	31
2.4.2. Sistema encendido – apagado.....	35
2.4.3. Sistema motriz	38
2.4.4. Agitadores.....	41
2.4.5. Vaciado de la mezcla	44

2.5. Matriz morfológica.....	47
2.6. CÁLCULO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES.....	49
2.6.1. Dimensionamiento del recipiente de mezclado	49
2.6.2. Dimensionamiento del agitador doble hélice	54
2.6.3. Selección de chumaceras	70
2.6.4. Cálculo del pasador para conexión eje y tubo	71
2.6.5. Diseño de chavetas	72
2.6.6. Potencia del motor	73
2.6.7. Soldadura	74
2.6.8. Diseño de la estructura de soporte.....	75
2.7. Elaboración de planos	77
2.8. Construcción de la máquina pulverizadora.....	78
2.9. Costos	80
2.9.1. Costos de materiales	80
2.9.2. Costos de elementos normalizados	81
2.9.3. Costos de mano de obra.....	82
2.9.4. Costo total de la máquina pulverizadora	83
2.10. Protocolo de pruebas	83
2.10.1. Protocolo de uso	83
2.10.2. Protocolo de pruebas	84
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	85
3.1. Resultados.....	85
3.2. Discusión	86
4. CONCLUSIONES	86
Referencias Bibliográficas	88
Anexos	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Principales variedades de caña en la industria panelera.....	4
Figura 1.2. Esquema del proceso de obtención de la panela granulada:(a) apronte, (b) extracción de jugos (c) prelimpieza, (d) clarificación, (e) concentración, (f) pulverizado, (g) tamizado, (h) secado y enfriado, (i)empaquetado.....	4
Figura 1.3. Etapas del proceso de pulverizado: (a) líquida, (b) transición y (c) sólida.....	6
Figura 1.4. Mezcladora de tambor cilíndrico.....	9
Figura 1.5. Mezclador bicónico.....	9
Figura 1.6. Mezcladora en V.....	9
Figura 1.7. Mezcladora de tornillo sin fin vertical.....	10
Figura 1.8. Mezclador horizontal.....	10
Figura 1.9. Mezclador de palas planetario.....	11
Figura 1.10. Mezclador de paletas.....	11
Figura 1.11. Mezclador de barra Z.....	12
Figura 1.12. Esquema general de la máquina pulverizadora:(a) estructura soporte, (b) árboles y ejes, (c) recipiente de mezclado, (d) motorreductor, (e) sistema de vaciado, (f) agitadores y (g) chumaceras.....	13
Figura 1.13. Representación esquemática de rodamientos: (a) de bolas y (b) rodillos cilíndricos.....	14
Figura 1.14. Agitadores: (a) de paletas, (b) de turbina y (c) de hélice.....	14
Figura 1.15. Distribución de presiones sobre una pared plana sumergida.....	15
Figura 1.16. Componentes de la fuerza que actúa sobre una superficie curva.....	16
Figura 1.17. Esfuerzo cortante en una superficie.....	17
Figura 1.18. Fuerza de arrastre de un fluido sobre una placa.....	17
Figura 1.19. Tipos de controladores: (a) controlador manual y (b) controlador magnético.....	21
Figura 1.20. Parámetros que intervienen en el proceso TIG.....	21
Figura 1.21. Tipos de juntas soldadas: a) a tope, (b) de esquina, (c),de traslape y (d) en T.....	22
Figura 1.22. Esquema de la junta soldada.....	22
Figura 1.23. Esquema del pórtico.....	23
Figura 2.1. Diagrama de flujo para la implementación de la máquina pulverizadora...	25
Figura 2.2. Recipiente de mezclado horizontal.....	31
Figura 2.3. Recipiente de mezclado vertical.....	32

Figura 2.4. Recipiente de mezclado de tambor giratorio.....	32
Figura 2.5. Switch ON –OFF.....	35
Figura 2.6. Tablero de control.....	36
Figura 2.7. Motorreductor.....	38
Figura 2.8. Motor eléctrico.....	39
Figura 2.9. Agitador de turbina.....	41
Figura 2.10. Agitador de paletas.....	42
Figura 2.11. Agitador doble hélice.....	42
Figura 2.12. Válvula mariposa.....	44
Figura 2.13. Compuerta de vaciado.....	45
Figura 2.14. Mecanismo giratorio de vaciado.....	45
Figura 2.15. Diseño conceptual de la máquina pulverizadora.....	48
Figura 2.16. Esquema del recipiente de mezclado.....	50
Figura 2.17. Diagrama de cuerpo libre del recipiente.....	51
Figura 2.18. Diagrama de cuerpo libre del recipiente considerándolo como una viga en U empotrada.....	52
Figura 2.19. Diagrama: (a) fuerza cortante y (b) momento flector del recipiente de mezclado.....	52
Figura 2.20. Agitador doble hélice: (a) hélice, (b) eje soporte, (c) eje motriz y (d) tubo.....	54
Figura 2.21. Analogía de una hélice considerándolo placa inclinada.....	55
Figura 2.22. Fases: (b) transición y (c) sólida de la panela pulverizada.....	57
Figura 2.23. Fuerza resultante en una hélice.....	58
Figura 2.24. Diagrama de la hélice considerándolo viga empotrada en sus extremos.....	59
Figura 2.25. Diagramas: (a) fuerza cortante y (b) momento flector de la hélice.....	59
Figura 2.26. Diagrama de cuerpo libre eje soporte.....	61
Figura 2.27. Esquema de torsiones a lo largo del agitador.....	64
Figura 2.28. Torque resultante a lo largo del eje.....	65
Figura 2.29. Diagrama de momento torsor.....	66
Figura 2.30. Diagrama de cuerpo libre del eje motriz.....	66
Figura 2.31. Diagramas: (a) fuerza cortante y (b) momento flector del eje.....	68
Figura 2.32. Sujetadores agitador-eje motriz.....	71
Figura 2.33. Transmisión del movimiento: (a) matrimonio y (b) chaveta.....	73
Figura 2.34. Soldadura de filete tubo-eje soporte.....	74
Figura 2.35. Diagrama de cuerpo libre de la estructura.....	75
Figura 2.36. Diagrama de momento flector en la estructura.....	75

Figura 2.37. Carga crítica en una columna libre.....	76
Figura 3.1. (a) depósito de mezcla y (b) inicio del proceso de pulverizado.....	85
Figura 3.2. (a) obtención de la panela granulada y (b) vaciado de la panela granulada.....	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Sólidos sedimentables y granulometría.....	7
Tabla 1.2. Requisitos de la panela granulada.....	7
Tabla 1.3. Plan de muestreo para la panela granulada.....	8
Tabla 1.4. Especificaciones técnicas de máquinas mezcladoras nacionales.....	12
Tabla 2.1. Requerimientos voz usuario / voz del ingeniero.....	27
Tabla 2.2. Especificaciones técnicas para la máquina pulverizadora.....	28
Tabla 2.3. Modularidad.....	30
Tabla 2.4. Ventajas y desventajas del recipiente de mezclado horizontal.....	31
Tabla 2.5. Ventajas y desventajas del recipiente de mezclado vertical.....	32
Tabla 2.6. Ventajas y desventajas del recipiente rotatorio de mezclado.....	33
Tabla 2.7. Pesos específicos para los criterios de selección del módulo 1 (Depósito de mezcla).....	34
Tabla 2.8. Evaluación de las soluciones con respecto a la distribución.....	34
Tabla 2.9. Evaluación de las soluciones con respecto a la capacidad.....	34
Tabla 2.10. Evaluación de las soluciones con respecto al mantenimiento.....	34
Tabla 2.11. Evaluación de las soluciones con respecto al costo.....	35
Tabla 2.12. Conclusiones para el módulo 1 (Depósito de la mezcla).....	35
Tabla 2.13. Ventajas y desventajas del Switch ON – OFF.....	36
Tabla 2.14. Ventajas y desventajas del panel de control Encendido – Apagado.....	36
Tabla 2.15. Pesos específicos para los criterios del módulo 2 (Sistema encendido – apagado).....	37
Tabla 2.16. Evaluación de las soluciones con respecto a la protección.....	37
Tabla 2.17. Evaluación de las soluciones con respecto a la fácil operación.....	37
Tabla 2.18. Evaluación de las soluciones con respecto al costo.....	37
Tabla 2.19. Conclusiones para el módulo 2 (Sistema encendido - apagado).....	37
Tabla 2.20. Ventajas y desventajas de un motorreductor.....	38
Tabla 2.21. Ventajas y desventajas de un motor eléctrico.....	39
Tabla 2.22. Pesos específicos para los criterios de selección del módulo 3 (Sistema motriz).....	39
Tabla 2.23. Evaluación de soluciones con respecto al costo.....	40
Tabla 2.24. Evaluación de soluciones con respecto a la seguridad.....	40
Tabla 2.25. Evaluación de soluciones con respecto a lo compacto del sistema.....	40
Tabla 2.26. Evaluación de soluciones con respecto al montaje.....	40
Tabla 2.27. Conclusiones para el módulo 3 (Sistema motriz).....	40
Tabla 2.28. Ventajas y desventajas del agitador de turbina.....	41

Tabla 2.29. Ventajas y desventajas del agitador de paletas.....	42
Tabla 2.30. Ventajas y desventajas del agitador doble hélice.....	42
Tabla 2.31. Pesos específicos para los criterios de selección del módulo 4 (Agitadores).....	43
Tabla 2.32. Evaluación de las soluciones del módulo agitadores respecto a la viscosidad.....	43
Tabla 2.33. Evaluación de las soluciones del módulo agitadores respecto a la homogenización.....	43
Tabla 2.34. Evaluación de las soluciones del módulo agitadores respecto a las bajas RPM.....	44
Tabla 2.35. Conclusiones del módulo 4 (Agitadores).....	44
Tabla 2.36. Ventajas y desventajas de la válvula mariposa.....	45
Tabla 2.37. Ventajas y desventajas de la compuerta de vaciado.....	45
Tabla 2.38. Ventajas y desventajas del mecanismo giratorio de vaciado.....	46
Tabla 2.39. Pesos específicos para los criterios de selección del módulo 5 (Vaciado de la mezcla).....	46
Tabla 2.40. Evaluación de las soluciones del módulo de vaciado respecto a hermeticidad.....	46
Tabla 2.41. Evaluación de las soluciones del módulo de vaciado respecto a la fácil apertura.....	47
Tabla 2.42. Evaluación de las soluciones del módulo de vaciado respecto al costo....	47
Tabla 2.43. Evaluación de las soluciones del módulo de vaciado respecto al montaje.....	47
Tabla 2.44. Conclusiones del módulo 5 (Vaciado de la mezcla).....	47
Tabla 2.45. Matriz morfológica.....	48
Tabla 2.46. Propiedades físicas de la miel de caña y panela granulada.....	49
Tabla 2.47. Dimensiones del recipiente de mezclado.....	50
Tabla 2.48. Resultados experimentales en las fases de transición y sólida.....	57
Tabla 2.49. Selección del espesor de la hélice.....	60
Tabla 2.50. Características del rodamiento YET 206-102.....	71
Tabla 2.51. Proceso de construcción y ensamble de la máquina pulverizadora.....	78
Tabla 2.52. Costos de materiales.....	81
Tabla 2.53. Costos de elementos normalizados.....	81
Tabla 2.54. Costos de mano de obra.....	82
Tabla 2.55. Costos totales de la máquina pulverizadora.....	83

RESUMEN

En el Ecuador, las comunidades productoras de panela en polvo realizan el proceso de pulverizado de la miel de caña de manera artesanal, desconociendo que dicho proceso puede ser tecnificado. Por lo tanto, el presente proyecto plantea la construcción de una máquina pulverizadora de miel de caña a panela en polvo dirigida a la comunidad “Flor de Caña”, perteneciente a la asociación de pequeños productores Maquita dedica a dicha actividad.

La tecnificación del proceso de pulverizado consistió en solucionar los problemas que existían en el proceso artesanal dando como resultado: incremento en la capacidad de producción, disminución de tiempos muertos, evitando quemaduras en la piel por salpicaduras y afecciones en las vías respiratorias producto de la inhalación de vapores provenientes de la miel, mejorando así las condiciones de trabajo.

La metodología utilizada para el diseño y construcción de la máquina pulverizadora a través del diseño concurrente de Riba permitió desarrollar el modelo de una mezcladora horizontal doble hélice, a partir del cual se seleccionó el material para el cálculo y dimensionamiento de sus componentes, se realizó planos de conjunto y taller utilizando los Software Autodesk Inventor y AutoCAD, elaboración de costos, protocolo de pruebas y construcción de la máquina.

Finalmente, se desarrollaron pruebas de funcionamiento y se concluyó que la máquina realizó el proceso de pulverizado de 150 kilogramos de miel de caña a panela en polvo en un tiempo promedio de 18 minutos, lo que implica una reducción del 50% del tiempo estimado en comparación al proceso manual.

Palabras clave: Agitador doble hélice, diseño concurrente, mezcladora horizontal, miel de caña, NTE INEN 2332 y proceso de pulverizado.

ABSTRACT

In Ecuador, communities that produce panela powder still carry out the process of sugar cane honey pulverization in a traditional way, unaware that this process can be technified. This work proposes the construction of a pulverizing machine for sugar cane honey to convert it into panela powder. This is a necessity of the “Flor de Caña” community, which belongs to the association of small producers Maquita.

Technification of the pulverization process aims at resolving the problems that exists in the traditional process, which results in: increase in production capacity, diminution of downtime, prevention of burning in the skin from splatters and airways diseases generated by vapours inhalation coming from the hot honey, thus improving working conditions.

The methodology used for the design and construction of the pulverizing machine follows the concurrent design of Riba, which allows to develop a double helical ribbon horizontal mixer model. In addition, material selection for the calculation and sizing of its components is conducted. Moreover, assembly and workshop drawings were made employing Autodesk Inventor and AutoCAD Software. Costs of implementation, tests protocols and construction of the machine were also assessed.

Finally, the performance of the machine was evaluated, from which it was concluded that for converting 150 kilograms of cane honey into the same amount of powdered panela, an average time of 18 minutes is required. This implies a reduction of 50% of the required time when compared with the manual process.

Keywords: Double helical ribbon, concurrent design, horizontal mixer, cane honey, NTE INEN 2332, pulverizing process.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PULVERIZADORA DE MIEL DE CAÑA A PANELA EN POLVO PARA LA ASOCIACIÓN DE PEQUEÑOS PRODUCTORES MAQUITA

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Sacharum officinarum*) es un tipo de gramínea originaria de Nueva Guinea, posteriormente se difundió en China, India, Medio Oriente, África Oriental, Hawai e Islas del Atlántico. En 1493 Cristóbal Colón viaja a América llevando las semillas de caña por Centro América a países como: Cuba, Puerto Rico y México y en Sudamérica a países como: Colombia, Perú, Brasil y Ecuador. La principal utilidad de esta planta es su tallo, el cual se emplea como materia prima en la industria panelera y azucarera, se cultivan en climas tropicales y cálidos hasta una altura de 2200 metros sobre el nivel del mar (msnm) y una temperatura de 25 °C aproximadamente. (Quezada M, 2007, p. 6)

En el Ecuador la elaboración de productos derivados de la caña es una de las principales fuentes de sustento económico de las zonas rurales que lo cultivan, la falta de modernización de equipos para la producción es una limitante para satisfacer la demanda del mercado, debido al aumento de tiempos, costes, y mano de obra para su elaboración.

Dentro de este contexto la Fundación Maquita-Comercio Justo representa una organización de Economía Popular y solidaria que ejecuta proyectos de carácter social y productivo, dedicados a la comercialización y exportación de diferentes productos tales como: cereales, panela granulada, harinas, granos andinos y agroindustriales con certificaciones orgánicas.

Maquita junto a la 'Asociación flor de caña' dedicada a la producción y exportación de panela granulada, requiere de una máquina pulverizadora que transforme la miel de caña a panela en polvo, con el propósito de aumentar y tecnificar el proceso de producción así como reducir accidentes laborales, quemaduras y riesgos de enfermedades por la inhalación de vapores a elevadas temperaturas, de tal manera que garantice un ambiente propicio de trabajo, mejorando así la calidad del producto y salvaguardando la integridad de los trabajadores.

Objetivo general

Diseñar y construir una pulverizadora de miel de caña a panela en polvo para la asociación de pequeños productores MAQUITA.

Objetivos específicos

- Definir las diferentes variables físicas que intervienen en el proceso de pulverización de la panela.
- Seleccionar las alternativas de diseño.
- Establecer la estructura funcional de la alternativa seleccionada.
- Realizar el diseño, construcción, montaje y pruebas de la máquina pulverizadora.

1. MARCO TEÓRICO

El presente capítulo estudia temas relacionados con la descripción de la panela granulada, cultivo de la caña de azúcar y el proceso de elaboración de esta, en base a normativas referentes a la manipulación de alimentos. Este estudio es importante para establecer condiciones de borde necesarios para el diseño de la máquina pulverizadora.

Además, se describe los componentes mecánicos principales que conforman la máquina pulverizadora de miel de caña, así como los tipos de máquinas existentes en el mercado que servirán como base para la selección de la alternativa más idónea y su posterior diseño y construcción.

1.1. Panela Granulada

Este subcapítulo presenta los fundamentos generales sobre el cultivo y las variedades de especies de caña de azúcar.

1.1.1. Descripción General

La panela granulada es un producto que resulta de la extracción de los jugos de caña de azúcar, dando lugar a la formación de un jarabe espeso que posteriormente se solidifica y pulveriza hasta obtener el producto granulada. La panela contiene nutrientes como: fructosa, glucosa y vitamina C con alto contenido de sales minerales, mayores a los del azúcar refinado.

1.1.2. Cultivo de caña

La caña se cultiva en climas cálidos y tropicales hasta los 2200 msnm y temperatura promedio de 25 °C aproximadamente.

Existen variedades de especies de caña que dependen de la región en la que se cultiva, por ejemplo: POJ (negra y blanca), PR (Puerto Rico), CU (cubana), ver Figura 1.1. Dichas variedades contienen azúcares como sacarosa, glucosa y fructosa aptas para la implementación en la industria panelera. (Quezada, 2007)



Figura 1.1. Principales variedades de caña en la industria panelera.
(Fuente: (Quezada, 2007, p.25))

1.2. Proceso para la elaboración de la panela

El proceso para la obtención de la panela granulada sigue una secuencia de producción definida. La Figura 1.2 muestra las etapas para la elaboración de la panela granulada, y estos son: (a) apronte, (b) extracción de jugos, (c) prelimpieza, (d) clarificación, (e) concentración, (f) pulverizado, (g) tamizado, (h) enfriado e (i) empaquetado.

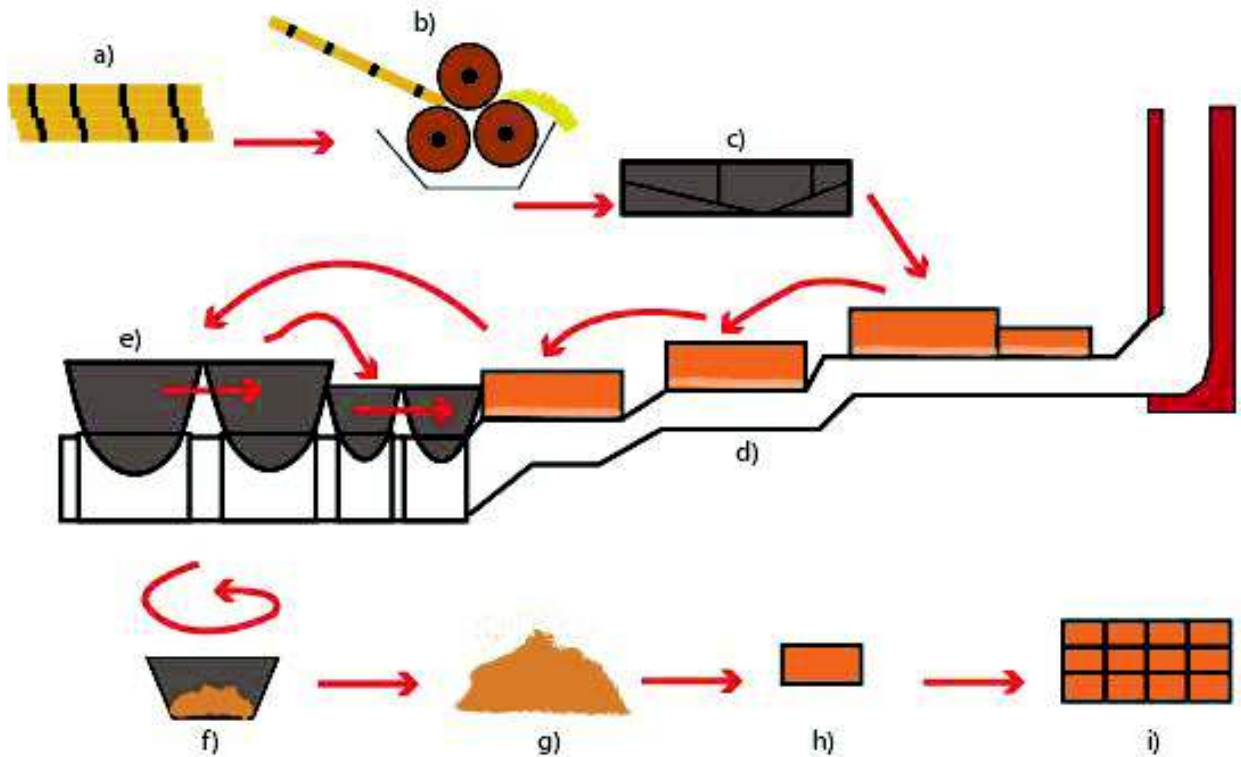


Figura 1.2. Esquema del proceso de obtención de la panela granulada: (a) apronte, (b) extracción de jugos (c) prelimpieza, (d) clarificación, (e) concentración, (f) pulverizado, (g) tamizado, (h) secado y enfriado, (i) empaquetado.
(Fuente: Propia)

La primera etapa del proceso para obtener la panela granulada es el apronte, y se refiere al corte del tallo libre de hojas y cogollo, ver Figura 1.2 etapa (a). Después del apronte se recolecta, almacena y transporta al siguiente proceso.

La Figura 1.2 etapa (b), muestra el proceso de extracción de jugos que se efectúa mediante un método de compresión a través de rodillos de acero en el trapiche.

La etapa (c) de la Figura 1.2 se refiere a la prelimpieza, que consiste en la eliminación a temperatura ambiente de sólidos y material grueso tales como: lodos, partículas de bagazo, arena, hojas, insectos que se encuentran inmersos en el jugo de caña.

En el proceso de clarificación, ver Figura 1.2 etapa (d), se realiza la eliminación de material coloidal del jugo de caña a través de la adición de sustancias naturales que aglomeran los compuestos colorantes del jugo mediante un proceso de calentamiento que va de 50 a 55°C (Quizanga, 2009). Esto permite que los sólidos cambien de tamaño y densidad, logrando así la suspensión en el líquido para la extracción de sedimentos.

La concentración, ver Figura 1.2 etapa (e), tiene lugar en las pailas punteadoras cuando el jugo de caña llega a una temperatura de 100°C a 128°C aproximadamente, (Quizanga, 2009), la adición de agentes antiadherentes y antiespumantes homogenizan la miel de caña.

Una vez que la miel se encuentre en condiciones para procesarse como panela, esta es introducida al área de pulverizado, ver Figura 1.2 etapa (f), donde se realiza la mezcla mediante batido manual.

El proceso de tamizado, ver Figura 1.2 etapa (g), consiste en separar las partículas gruesas de las pequeñas mediante una agitación o movimiento de una zaranda, hasta obtener un tamaño requerido para su comercialización.

El periodo de secado y enfriado, ver Figura 1.2 etapa (h), se realiza en enfriadoras de acero inoxidable a temperatura ambiente. La panela pulverizada puede ganar o perder humedad, esto evita que se endurezca durante el siguiente proceso.

Para finalizar la secuencia de producción, la etapa (i) de la Figura 1.2 muestra el proceso de empaquetado, que consiste en almacenar el producto en fundas plásticas a temperatura ambiente.

1.3. Etapas del proceso de pulverizado

El presente estudio se basa únicamente en el proceso de pulverizado de la miel de caña a panela en polvo, ver Figura 1.2 (f), dicho proceso consta de tres etapas, como se observa en la Figura 1.3 y estas son: (a) líquida, (b) transición y (c) sólida.



Figura 1.3. Etapas del proceso de pulverizado: (a) líquida, (b) transición y (c) sólida.
(Fuente: Propia)

En la Figura 1.3 etapa (a), el fluido ingresa en fase líquida (miel) a un recipiente de mezclado, se procede a elevar su temperatura a unos 96°C con la finalidad de evaporar el agua presente en el jugo de caña y obtener miel pura.

Posteriormente pasa a un proceso de transición Figura 1.3 etapa (b), donde el fluido comienza a solidificarse por agitación y enfriamiento.

Finalmente se obtiene la transformación de la etapa de transición a panela granulada, ver Figura 1.3 etapa (c).

1.4. Requisitos para la comercialización de la panela granulada

El manejo y comercialización de la panela granulada se rige únicamente bajo el registro sanitario para panela granulada NTE INEN 2332 (2002). Algunas consideraciones importantes de esta norma se describen brevemente a continuación.

1.4.1. Objeto

Establecer los requisitos que debe cumplir la panela granulada para el consumo humano (INEN, 2002, p.1)

1.4.2. Definiciones

- **Caña:** Tallo procedente de la planta gramínea.
- **Panela granulada:** Es la obtención del producto pulverizado a través del jarabe espeso proveniente del jugo de caña.

- **Panela granulada defectuosa:** Consiste en la presencia de irregularidades en el color de la panela granulada, a causa de insectos vivos, impurezas y materia extraña.

1.4.3. Clasificación

Existen tres tamaños de grano para la comercialización de la panela granulada que se detallan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1. Sólidos sedimentables y granulometría.

Panela	Sólidos Sedimentables Max g/100 g de panela	Pase el 100% por tamiz	
		Mm de abertura	No.
Extra	0,1	1,40	14
Primera	0,5	1,70	12
Segunda	1,0	2,00	10
Método de ensayo	NTE INEN 388		

(Fuente: (INEN, 2002, p. 2))

1.4.4. Requisitos

Algunos requisitos específicos y complementarios se muestran a continuación.

1.4.4.1. Específicos

Los requerimientos específicos según la norma INEN 2332, ver Tabla 1.2, para la comercialización de panela granulada son los siguientes: tamaño de partículas, porcentaje de sacarosa, humedad, sólidos solubles, pH, y acrilamida.

Tabla 1.2. Requisitos de la panela granulada.

Requisitos	Min	Max
Tamaño de partículas [mm]	<2	≤3
Sacarosa %	75	83
Humedad %	--	3
Sólidos solubles (CUALITATIVA - Maquita)	A (<0.2%)	A (<0.4%)
pH	5,5	---
Acrilamida [ppb]	---	850

(Fuente: (Maquita, 2017, p.4))

1.4.4.2. Complementarios

Las instalaciones deben estar limpias, desinfectadas, libre de insectos y roedores. El almacenamiento se debe hacer a una temperatura apropiada que impida el deterioro y contaminación de la panela.

1.4.5. Inspección y muestreo

De acuerdo con el tamaño del lote la norma establece criterios de aceptación y rechazo como se detallan en la Tabla 1.3. Por ejemplo, si el tamaño del lote es de 26 a 90 unidades se toman trece muestras al azar con un grado de aceptación de una unidad defectuosa, si sobrepasa dicho valor el lote es rechazado.

Tabla 1.3. Plan de muestreo para la panela granulada.

Tamaño del Lote en unidades	Tamaño de la muestra	Acepta	Rechaza
Hasta 25	3	0	1
26 a 90	13	1	2
91 a 150	20	2	3
151 a 280	32	3	4
281 a 500	50	5	6
501 a 1200	80	7	8
Mayor que 1201	125	10	11

(Fuente: (INEN, 2002, p. 3))

1.4.6. Envasado y embalado

El envase del producto debe cumplir con la calidad alimenticia fijada por FDA (Food and Drug Administration) para que no se alteren las características químicas, físicas, de manipulación, transporte, almacenamiento, higiénicas, nutricionales y organolépticas. (INEN, 2002, p.4).

1.4.7. Rotulado

No debe contener leyendas con significado ambiguo ni descripción de características que no puedan ser comprobadas. (INEN, 2002,p.4)

1.5. Tipos de pulverizadoras o mezcladoras

En los subcapítulos anteriores se realizó una descripción breve sobre el cultivo de la caña de azúcar, proceso de elaboración de la panela y los requerimientos de la normativa, en base a esta información se procederá a realizar un estudio de los diferentes tipos de pulverizadoras o mezcladoras, utilizadas en la elaboración de diversos productos, entre ellos la panela granulada.

1.5.1. Mezcladoras móviles

Equipos que basan su funcionamiento en el movimiento del recipiente de mezclado y la acción de la fuerza de la gravedad en el desalojamiento del material. Los parámetros que se toman en cuenta en este tipo de máquinas son: tamaño y forma del mezclador, tipo de sustancia y velocidad de giro.

1.5.1.1. Mezclador de tambor cilíndrico

Máquina giratoria de carcasa cilíndrica que proporciona un flujo cruzado, facilitando la mezcla homogénea y suave del material, conservando así la calidad del producto procesado, ver Figura 1.4.



Figura 1.4. Mezcladora de tambor cilíndrico.
(Fuente: (PremierTech, 2017))

1.5.1.2. Mezclador bicónico

Máquina mezcladora que mediante un recipiente bicónico gira a través de un eje horizontal haciendo que las capas del material se desplacen de un punto a otro con acción de la fuerza de gravedad, dando lugar al mezclado, ver Figura 1.5.



Figura 1.5. Mezclador bicónico.
(Fuente: (ATPP, 2008))

1.5.1.3. Mezcladora en V

La Figura 1.6 muestra una máquina mezcladora con recipiente en V y una apertura que varía entre 45° y 90°. El recipiente gira en torno a un eje horizontal produciendo la homogenización por el movimiento continuo de las capas del material, muy similar al proceso bicónico.

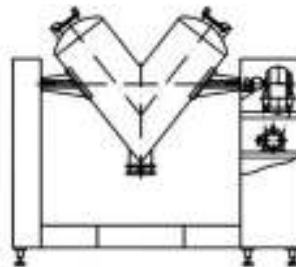


Figura 1.6. Mezcladora en V.
(Fuente: (Chuang, 2012))

1.5.2. Mezcladoras estáticas

Equipo de mezclado donde el recipiente es fijo y en su interior contiene elementos tales como: cuchillas, tornillos, paleta que realizan la homogenización del producto.

1.5.2.1. Mezclador de tornillo sin fin vertical

La Figura 1.7 muestra una máquina de mezclado que consta de un recipiente cónico en cuyo interior se encuentra un tornillo sin fin, capaz de generar dos movimientos simultáneos, el primer movimiento permite el desplazamiento del material al interior del recipiente y segundo movimiento consiste en elevar el material, repitiendo el ciclo de homogenizado.



Figura 1.7. Mezcladora de tornillo sin fin vertical.
(Fuente: (Manufactura, 2015))

1.5.2.2. Mezclador horizontal

La Figura 1.8 representa un equipo de mezclado que consta de un recipiente horizontal en cuyo interior se encuentra un eje axial que gira a lo largo del mismo, permitiendo la agitación de todo el material.



Figura 1.8. Mezclador horizontal.
(Fuente: (Becaria, 2015))

1.5.2.3. Mezclador de palas planetario

Máquina de mezclado que consta de un recipiente cilíndrico y un eje vertical que rota y desplaza a las paletas asemejando un movimiento planetario, como se muestra en la Figura 1.9. Se recomienda su implementación en procesos de amasado y sustancias de alta viscosidad.



Figura 1.9. Mezclador de palas planetario.
(Fuente: (Technology, 2015))

1.5.2.4. Mezclador de paletas

Equipo de mezclado que consta de un recipiente vertical o inclinado, ver Figura 1.10. En el interior se encuentra un eje adaptado a varias paletas de orientación vertical, horizontal o inclinada que describen un movimiento circular.

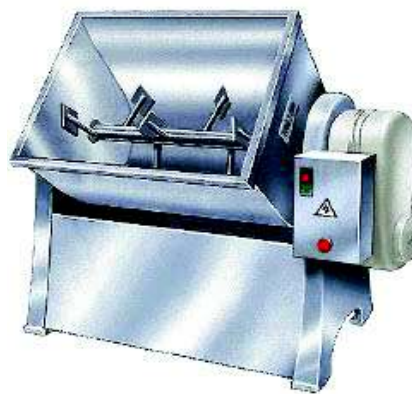


Figura 1.10. Mezclador de paletas.
(Fuente: (Albiz, 2010))

1.5.2.5. Mezclador de barra Z

La Figura 1.11 muestra este tipo de mezclador; su funcionamiento se basa en la disposición de un recipiente horizontal en cuyo interior se encuentran dos ejes paralelos que giran en direcciones opuestas y a velocidades diferentes, produciendo una homogenización de la sustancia.



Figura 1.11. Mezclador de barra Z.
(Fuente: (Equipos y Herramientas, 2009))

1.5.3. Especificaciones técnicas de mezcladoras existentes en el mercado nacional

La Tabla 1.4, recopila las especificaciones técnicas de máquinas mezcladoras existentes en el mercado, tales como: potencia, dimensiones, capacidad y el tiempo de mezclado. Esto permitirá establecer parámetros de diseño iniciales de la máquina pulverizadora.

Tabla 1.4. Especificaciones técnicas de máquinas mezcladoras nacionales.

Tipos de mezcladores		Especificaciones técnicas			
		Potencia [HP]	Dimensiones [mm]	Capacidad de mezcla [kg]	Tiempo de mezclado [min]
Móviles	Mezcladora de tambor cilíndrico	2,5	1620 x 970 x1540	150	15-20
	Mezclador bicónico	2,5	1600 x 950 x1500	150	20-25
	Mezclador en V	2	1480 x 930 x1430	100	20-30
Estáticos	Mezclador horizontal	2 - 3	600 x 450 x 600	150	15-20
	Mezclador de palas planetario	1	900 x 1200 x 900	50	10-15
	Mezclador de paletas	2,5	1620 x 960x 1500	150	20-30
	Mezclador de barra Z	3	1473 x 726 x 1422	100	20-30

(Fuente: (Pulvex, 2010))

1.6. Elementos que conforman una máquina pulverizadora

El subcapítulo anterior detalló acerca de los diferentes tipos de máquinas pulverizadoras, así como las características técnicas correspondientes a cada una de ellas. El presente subcapítulo describirá los componentes principales que conforman la pulverizadora.

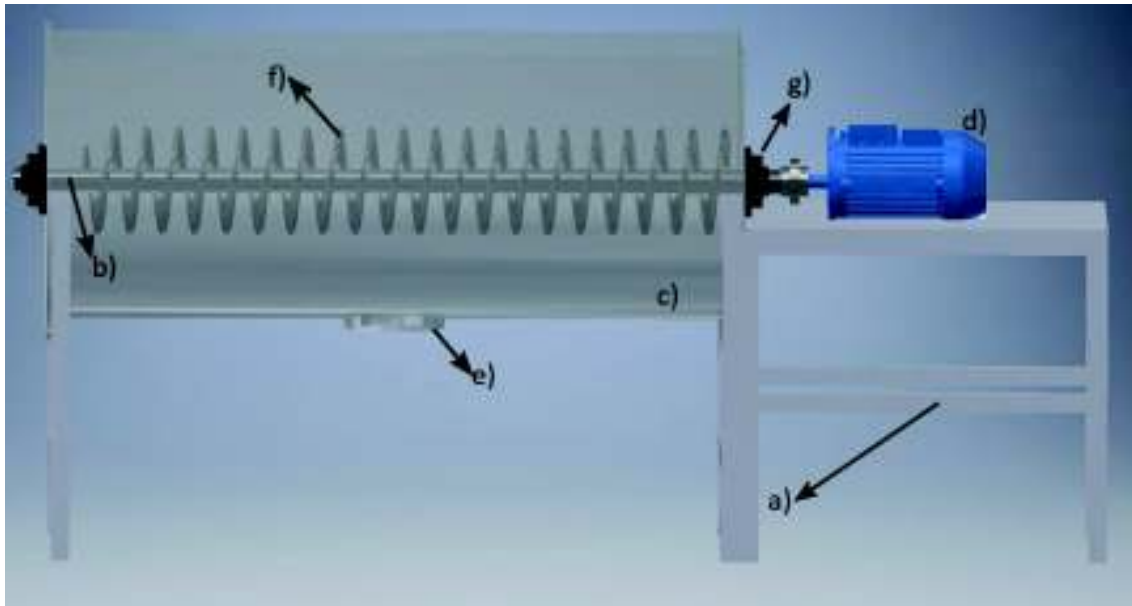


Figura 1.12. Esquema general de la máquina pulverizadora: (a) estructura soporte, (b) árboles y ejes, (c) recipiente de mezclado, (d) motorreductor, (e) sistema de vaciado, (f) agitadores y (g) chumaceras.
(Fuente: Propia)

La Figura 1.12 (a) muestra una estructura soporte, que brinda características de estabilidad, soporte y resistencia a cargas externas a las cuales se encuentra sometida la máquina. Generalmente el material empleado para la fabricación de estructuras es acero inoxidable, el cual ofrece rigidez y buena resistencia a cargas extremas y de fatiga.

Los árboles y ejes son elementos de máquinas de sección transversal circular empleado para transmitir movimiento y potencia, ver Figura 1.12 (b). Estos elementos mecánicos permiten alojar engranajes, rodamientos, poleas, bocines, etc.

La Figura 1.12 (c) muestra un recipiente, el cual es empleado para la homogenización de una sustancia sólida o líquida. En la industria alimenticia se emplean formas cilíndricas, adecuadas para procesos de mezclado.

La Figura 1.12 (d) muestra un motorreductor, que se encarga de suministrar la potencia y movimiento al eje y a los agitadores.

En la Figura 1.12 (e) se observa la zona de vaciado. Esta zona sirve para controlar el desalajo del material pulverizado.

Las chumaceras y rodamientos son elementos mecánicos que brindan soporte al eje y permiten el giro adecuado del sistema de mezcla, ver Figura 1.12 (g).

Los rodamientos se utilizan en ejes y árboles y su diseño permite soportar cargas radiales, axiales o la combinación de ambas, ver Figura 1.13.

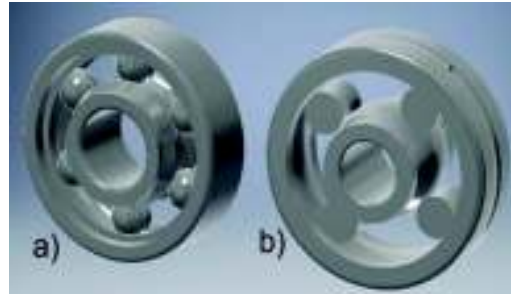


Figura 1.13. Representación esquemática de rodamientos: (a) de bolas y (b) rodillos cilíndricos.
(Fuente: Propia)

Los agitadores, ver Figura 1.12 (f), permiten la mezcla de la miel dentro del recipiente de mezclado, giran alrededor de un eje circular y varían de forma de acuerdo con el tipo de sustancia a homogenizar.

Existen tres tipos de agitadores que se clasifican de acuerdo con su forma, estos son: de paleta, turbina y hélice como se observan en la Figura 1.14.



Figura 1.14. Agitadores: (a) de paletas, (b) de turbina y (c) de hélice.
(Fuente: (Brunelli, 2013))

La Figura 1.14 (a) muestra un agitador de paleta. Este tiene forma de hoja plana, permite un mezclado relativamente suave y es ideal para sustancias cristalinas frágiles, líquidos miscibles o la disolución de productos sólidos.

El agitador de turbina como se observa en la Figura 1.14 (b) consiste en un impulsor sujeto a un eje rotatorio de cuatro o más aspas, empleado para un amplio rango de viscosidades. En líquidos de baja viscosidad la mezcla abarca la totalidad de la sustancia, lo que evita el estancamiento en el fondo del recipiente.

Los agitadores en forma de hélice, ver Figura 1.14 (c), giran a bajas y altas revoluciones y se adaptan con mayor facilidad a recipientes horizontales de mezclado.

Además, es importante mencionar que elementos mecánicos como rodamientos y válvulas, pueden contener sellos mecánicos. Estos dispositivos impiden el ingreso de suciedad, material extraño y retención de lubricante en diferentes áreas críticas de la máquina.

1.7. Superficies sumergidas de la máquina pulverizadora

Los equipos de mezclado al ser recipientes que contienen un fluido de trabajo se ven sujetos a experimentar presiones a lo largo de sus paredes, generando fuerzas de presión, es por ello que la teoría de superficies sumergidas permite determinar la fuerza generada de acuerdo a la geometría de las paredes del recipiente.

1.7.1. Superficies sumergidas de pared plana

En el análisis de superficies planas, se considera que las fuerzas de presión actúan en dirección normal a la pared.

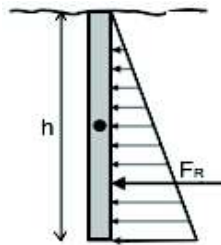


Figura 1.15. Distribución de presiones sobre una pared plana sumergida.
(Fuente: (Mott R. 2006, p.88))

La Figura 1.15 muestra una distribución triangular de presiones, donde se calcula una presión promedio como muestra la ecuación 1.1. La fuerza resultante se puede evaluar mediante la ecuación 1.2. (Mott, 2006, p.88)

$$P = \gamma \cdot \frac{h}{2} \quad (1.1.)$$

$$F_R = P \cdot A_s \quad (1.2.)$$

Donde:

P: Presión promedio [Pa]

γ : Peso específico del fluido [$\text{Kg}/\text{m}^2\text{s}^2$]

h: Altura de la superficie sumergida [m]

F_R : Fuerza resultante [N]

A_s : Área sumergida [m^2]

1.7.2. Superficies sumergidas de pared curva

La fuerza resultante en superficies curvas se calcula descomponiendo las fuerzas en sus componentes horizontal y vertical, como se observa en la Figura 1.16.

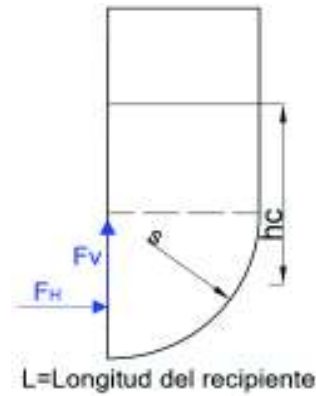


Figura 1.16. Componentes de la fuerza que actúa sobre una superficie curva.
(Fuente: Propia)

Las ecuaciones 1.3 y 1.4 (Mott, 2006, p.89) corresponden al valor de la fuerza horizontal y vertical respectivamente.

$$F_H = \gamma \cdot s \cdot L \cdot h_c \quad (1.3.)$$

$$F_v = \gamma \cdot V \quad (1.4.)$$

Donde:

F_H : Fuerza horizontal [N]

s : Radio de la superficie curva [m]

h_c : Distancia de la superficie al centroide del recipiente [m]

L : Longitud del recipiente [m]

F_v : Fuerza vertical [N]

V : Volumen que ocupa el fluido en el recipiente [m³]

1.8. Fuerzas de un fluido sobre una superficie en movimiento

Un fluido de trabajo al estar en contacto con una superficie en movimiento genera fuerzas, las cuales se producen debido a esfuerzos cortantes y la fricción propias del fluido sobre la superficie.

1.8.1. Fuerza generada por un esfuerzo cortante

La Figura 1.17 muestra el gradiente de velocidades que se forma debido al movimiento de una placa sobre un fluido, generando esfuerzos cortantes.

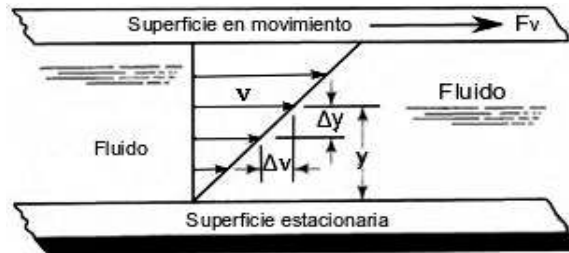


Figura 1.17. Esfuerzo cortante en una superficie.
(Fuente: (Mott, 2006, p.27))

El esfuerzo cortante en un fluido relaciona la viscosidad dinámica y el gradiente de velocidades y viene expresado por la ecuación 1.5.

$$\tau = \mu \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta y} \right) \quad (1.5.)$$

Donde:

τ : Esfuerzo cortante [N/m^2]

μ : Viscosidad dinámica de la miel de caña 10,68 [$Pa \cdot s$]

$\frac{\Delta v}{\Delta y}$: Gradiente de velocidades [$1/s$]

Una vez determinado el esfuerzo cortante se procede a encontrar la fuerza, relacionando con el área de contacto y viene expresado por la ecuación 1.6.

$$F_v = \tau \cdot A_c \quad (1.6.)$$

Donde:

F_v : Fuerza viscosa [N]

A_c : Área de contacto [m^2]

1.8.2. Fuerza de arrastre en un fluido

Se define como la fuerza generada por la fricción entre el fluido de trabajo y la superficie sólida, ver Figura 1.18 y se representa mediante la ecuación 1.7.

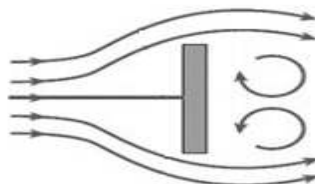


Figura 1.18. Fuerza de arrastre de un fluido sobre una placa.
(Fuente: (Cengel, 2006))

$$F_a = \frac{C_D \cdot (\rho \cdot A_a) \cdot v^2}{2} \quad (1.7.)$$

Donde:

F : Fuerza de arrastre [N]

C_D : Coeficiente de arrastre de la miel líquida

ρ : Densidad de la miel de caña 1400 [Kg/m³]

A_a : Área de arrastre [m²]

v : Velocidad [m/s]

1.9. Diseño a fatiga de ejes

Las máquinas de mezclado están compuestas por elementos que soportan cargas variables provocando que los componentes sufran un desgaste conocido como fatiga, generalmente ocurre en elementos cilíndricos como ejes.

El cálculo de los esfuerzos fluctuantes debido a la flexión y la torsión presentes en componentes medios y alternantes se pueden obtener a partir de las ecuaciones 1.8 y 1.9. Para ejes giratorios con flexión y torsión constante $M_m = 0$ y $T_a = 0$ (Shigley, 2008, p.357)

$$\sigma_a = K_f \frac{32M_a}{\pi d^3} \quad \sigma_m = K_f \frac{32M_m}{\pi d^3} \quad (1.8.)$$

$$\tau_a = K_{fs} \frac{16T_a}{\pi d^3} \quad \tau_m = K_{fs} \frac{16T_m}{\pi d^3} \quad (1.9.)$$

Donde:

M_m : Momento flexionante medio [Nm]

M_a : Momento flexionante alternante [Nm]

d : Diámetro del eje [m]

T_m : Par de torsión medio [Nm]

T_a : Par de torsión alternante [Nm]

K_f : Factor de concentración del esfuerzo por fatiga a flexión

K_{fs} : Factor de concentración del esfuerzo por fatiga a torsión

Los esfuerzos de von Mises en ejes giratorios sólidos se obtienen a partir de las ecuaciones 1.10 y 1.11.

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau_m^2} \quad (1.10.)$$

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_a^2 + 3\tau_a^2} \quad (1.11.)$$

Donde:

σ'_m : Esfuerzo medio equivalente [MPa]

σ'_a : Esfuerzo amplitud equivalente [MPa]

Para el cálculo del límite de resistencia a la fatiga es importante determinar los factores de Marin. La ecuación 1.12 permite obtener la resistencia a la fatiga corregida.

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S'_e \quad (1.12.)$$

Donde:

S_e : límite de resistencia a la fatiga corregido

k_a : factor de superficie

k_b : factor de tamaño

k_c : factor de carga

k_d : factor de temperatura

k_e : factor de confiabilidad

k_f : factor de efectos varios

S'_e : Límite de resistencia a la fatiga de la probeta

Existen diferentes criterios de falla en fatiga que permiten determinar el factor de seguridad de elementos de máquinas, tales como: ASME, Gerber, Goodman modificado y Soderberg. El criterio mayormente utilizado es el de Goodman modificado, como se muestra en la ecuación 1.13.

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} \quad (1.13.)$$

Donde:

S_{ut} : Esfuerzo último a la tracción igual a 568 [MPa]

n : Factor de seguridad a la fatiga

El criterio de Goodman modificado permite determinar el diámetro de ejes y se obtiene a partir de la ecuación 1.14.

$$d = \left(\frac{16 \cdot n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} [4(K_f \cdot M_a)^2 + 3(K_{fs} \cdot T_a)^2]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f \cdot M_m)^2 + 3(K_{fs} \cdot T_m)^2]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.14.)$$

En la ecuación 1.14, para los casos que $M_m = 0$ y $T_a = 0$, esta puede reducirse a la ecuación 1.15.

$$d = \left(\frac{16 \cdot n}{\pi} \left\{ \frac{[2(K_f \cdot M_a)]}{S_e} + \frac{[3(K_{fs} \cdot T_m)^2]^{\frac{1}{2}}}{S_{ut}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1.15.)$$

1.10. Selección de rodamientos

La máquina mezcladora trabaja mediante movimiento rotatorio de los ejes, para lo cual se emplea elementos que permitan el giro y soporte del eje para su correcto funcionamiento.

La selección de los rodamientos se realiza de acuerdo con la dirección de la carga aplicada sobre el eje y se obtiene a partir de la ecuación 1.16.

$$P = xFr + yFa \quad (1.16.)$$

Donde:

P : Carga dinámica equivalente [N]

Fr : Fuerza radial aplicada sobre el rodamiento [N]

Fa : Fuerza axial aplicada sobre el rodamiento [N]

x : Factor de carga radial

y : Factor de carga axial

Los factores de carga radial y axial se obtienen a partir de la relación $\frac{f_0 \cdot Fa}{C_0}$ que corresponde a un valor referido en el catálogo de rodamientos.

Conociendo la carga dinámica de los rodamientos se puede calcular la vida nominal del rodamiento en millones de revoluciones y viene dada por la ecuación 1.17.

$$L_{nominal} = \left(\frac{C}{P} \right)^k \quad (1.17.)$$

Donde:

$L_{nominal}$: Vida nominal básica del rodamiento 10^6 [rev]

C : Capacidad de carga dinámica del rodamiento

k : Exponente de la ecuación de la vida igual a 3 para rodamiento de bolas

La vida del rodamiento expresada en horas de funcionamiento se obtiene a partir de la ecuación 1.18, considerando ω como el número de revoluciones por minuto del eje.

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot \omega} L_{nominal} \quad (1.18.)$$

1.11. Controladores de arranque y paro para motores

Son elementos que brindan protección al equipo contra sobrecargas, bajo voltaje y sobrecalentamiento, y factores que pueden causar daños al equipo. Para controlar dichos problemas se emplean unidades de actuación directa denominadas switch ON-OFF.

Los controladores pueden ser manuales, ver Figura 1.19 (a) y son utilizados en equipos que funcionan a bajas cargas. Los controladores magnéticos, ver Figura 1.19 (b), protegen al equipo de sobrecorrientes.

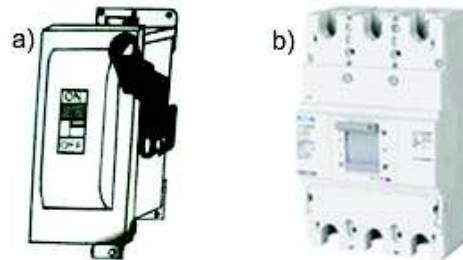


Figura 1.19. Tipos de controladores: (a) controlador manual y (b) controlador magnético.
(Fuente: (Enríquez, 2013))

1.12. Soldadura y juntas soldadas

La soldadura es un proceso de unión permanente de materiales en el cual se funden las superficies de contacto de dos o más piezas por la aplicación de calor y/o presión.

1.12.1. Proceso de soldadura para la fabricación de la máquina

El proceso de soldadura aplicable para la fabricación de la máquina pulverizadora es la soldadura de Gas Inerte con electrodo de Tungsteno (TIG). Este tipo de proceso son empleados en materiales tales como: aceros inoxidable, aceros de baja aleación, aceros al níquel etc. La Figura 1.20 muestra los elementos que intervienen en el proceso TIG.

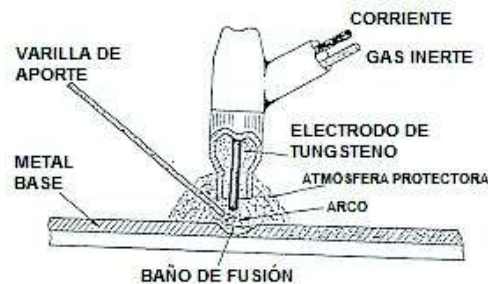


Figura 1.20. Parámetros que intervienen en el proceso TIG.
(Fuente: (AWS, 2010))

1.12.2. Juntas soldadas

Las juntas soldadas se refieren a las diferentes disposiciones como se arreglan y orientan las partes a ser soldadas.

Algunos tipos de juntas soldadas que se pueden emplear para el proceso de fabricación son: junta a tope, de esquina, de traslape y en T, ver Figura 1.21.

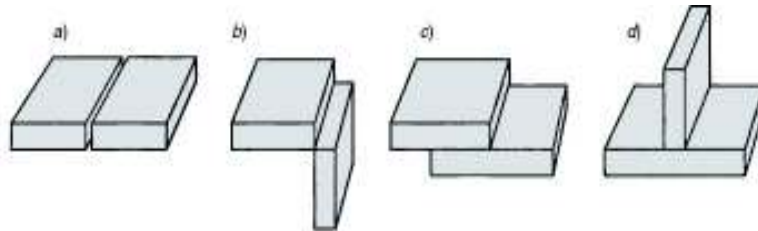


Figura 1.21. Tipos de juntas soldadas: a) a tope, (b) de esquina, (c), de traslape y (d) en T.
(Fuente: (Norton , 2011))

1.12.3. Diseño de juntas soldadas

Para un diseño adecuado de las juntas soldadas es necesario cuantificar las cargas externas y así determinar las deformaciones y esfuerzos en las partes a ser soldadas.

El tipo de carga que se aplica sobre los elementos a ser soldados pueden ser: compresión, tracción, flexión, torsión y combinadas. En caso de los componentes de la máquina pulverizadora, estos están sometidos a esfuerzos de flexión.



Figura 1.22. Esquema de la junta soldada.
(Fuente: Propia)

En la Figura 1.22 se observa un esquema del cordón de soldadura, para encontrar el tamaño de garganta geoméricamente, se obtiene a partir de la ecuación 1.19.

$$t = w \cdot \sin 45^\circ = 0.707 \cdot w \quad (1.19.)$$

Donde:

t: Garganta de la soldadura [mm]

w: Lado del cordón de soldadura [mm]

El cálculo del esfuerzo a flexión se obtiene a partir de la ecuación 1.20 y del momento de inercia a partir de la ecuación 1.21.

$$\sigma_f = \frac{M \cdot c}{I} \quad (1.20.)$$

$$I = t \cdot I_u \quad (1.21.)$$

Donde:

σ_f : Esfuerzo de flexión [MPa]

M: Momento flector en la raíz de la soldadura [Nmm]

c: Distancia del eje neutro al extremo de la sección [mm]

I_u : Segundo momento de la sección de la soldadura [mm²]

I: Momento de inercia de la sección de la soldadura [mm³]

La ecuación 1.22 muestra que para el cálculo de la garganta y lado de la soldadura se toma en cuenta el esfuerzo admisible del material base que a su vez se iguala al esfuerzo de flexión, ver ecuación 1.20.

$$\sigma_{adm} = 0,6 S_y \approx \sigma_f \quad (1.22.)$$

Donde:

σ_{adm} : Esfuerzo admisible del electrodo [MPa]

σ_f : Esfuerzo de flexión [MPa]

S_y : Esfuerzo de fluencia del material base [MPa]

1.13. Diseño de columnas y pórticos

En el diseño de la máquina, es necesario realizar un análisis estructural que garantice la estabilidad del equipo durante su funcionamiento. Existen diversos criterios que pueden aplicarse para evaluar estructuras, para el caso de estudio se aplicará un análisis por pórticos, ver Figura 1.23.

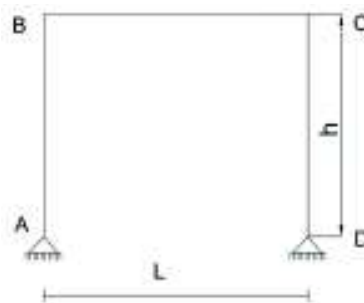


Figura 1.23. Esquema del pórtico.
(Fuente: Propia)

Existen ecuaciones que permiten determinar el momento flector máximo de acuerdo con la configuración del pórtico y viene dado por la ecuación 1.23. (Pisarenko, Yákovlev, & Matvéev, 1979, p.368)

$$M_{m\acute{a}x} = (1 + 2k) \frac{qL^2}{8n} \quad (1.23.)$$

Donde:

q : Carga distribuida en la estructura [N/m]

L : Longitud de la estructura [mm]

k : Factor de longitud efectiva debido a la flexi3n

n : Factor de fijaci3n de los extremos

Posteriormente, se determina la carga cr3tica al pandeo aplicada a la estructura y viene dada por la ecuaci3n 1.24. (Gere, 2004, p.773)

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (1.24.)$$

Donde:

P_{cr} : Carga cr3tica [N]

L_e : Longitud efectiva [mm]

E : M3dulo de rigidez de Young [GPa]

I : Momento de inercia de la secci3n [mm^4]

Finalmente, se calcula la relaci3n de esbeltez de la estructura, que involucra la longitud y radio de la secci3n cr3tica, mediante la ecuaci3n 1.25. (Gere, 2004, p.797)

$$\lambda = K \cdot \frac{h}{r} \quad (1.25.)$$

Donde:

λ : Relaci3n de esbeltez de la columna

r : Radio de giro de la secci3n [mm]

A : 3rea de la secci3n [mm^2]

h : Altura de la columna [mm]

1.14. Selecci3n de materiales

Para la fabricaci3n de los componentes de la m3quina pulverizadora es importante considerar su aplicaci3n, en el caso del presente estudio su uso es alimenticio, por tanto, un material adecuado es el acero inoxidable AISI 304, el cual es muy utilizado en la industria alimenticia.

Las caracter3sticas m3s importantes del material AISI 304 son: buena resistencia a la corrosi3n, ductilidad, soldabilidad, resistencia mec3nica y a las altas temperaturas, lo cual hace que el material sea id3neo para la construcci3n de la m3quina pulverizadora.

2. METODOLOGÍA

En el capítulo anterior se realizó una descripción general sobre la panela granulada, procesos para su elaboración y requisitos para su comercialización. A demás se realizó un estudio de los diferentes tipos de mezcladoras y los principales elementos que lo conforman. De igual manera se ha dado una descripción breve del proceso de soldadura y material idóneo para la fabricación de la maquina pulverizadora.

En este capítulo se identificarán las necesidades de Maquita en el proceso de pulverizado de miel de caña, se realizará el planteamiento del problema con el estudio del diseño concurrente implementando la casa de la calidad, una lista de especificaciones técnicas, un análisis funcional, la elección de la alternativa más adecuada, el diseño y selección de componentes de la máquina pulverizadora.

A continuación, se describe un diagrama de flujo de la metodología a implementar para la construcción de la máquina pulverizadora.

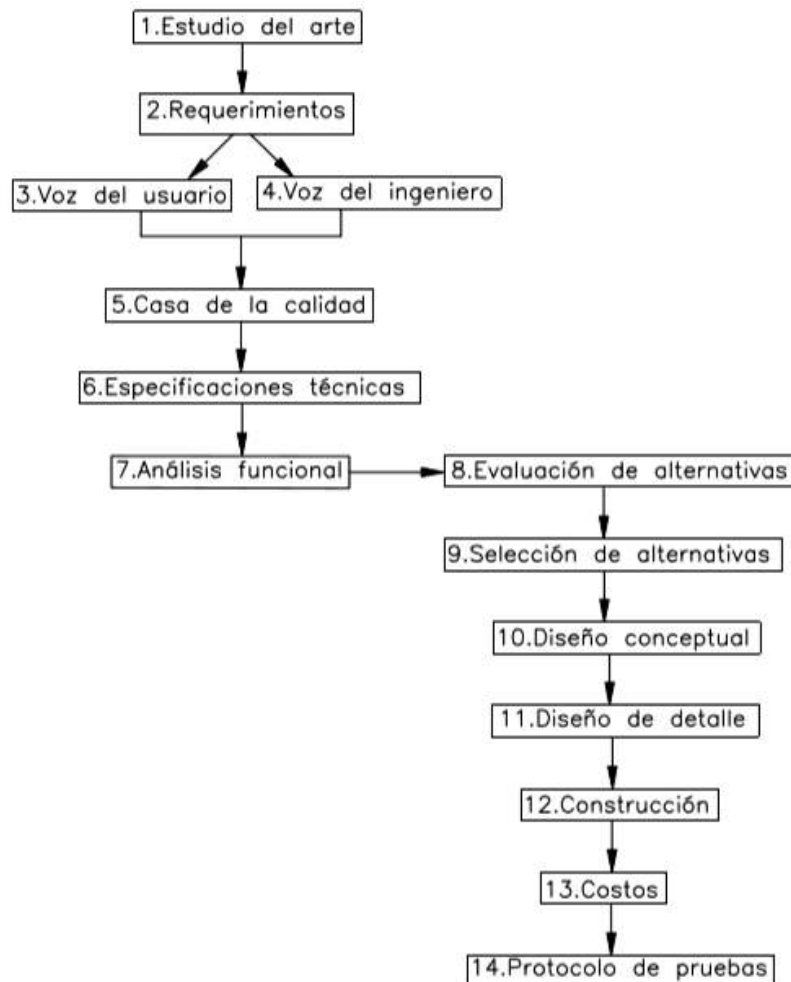


Figura 2.1. Diagrama de flujo para la implementación de la máquina pulverizadora.
(Fuente: Propia)

Para el proceso de selección, diseño y fabricación de la máquina pulverizadora se puede emplear la metodología descrita en la Figura 2.1.

El estudio del arte (paso 1) como se mencionó en el capítulo anterior, permite conocer las diferentes máquinas mezcladoras existentes en el mercado nacional y extranjero, que sirve de base para el posterior desarrollo de la máquina a implementar.

El (paso 2) corresponde a los requerimientos de Maquita para la fabricación de la máquina pulverizadora, mediante las necesidades del usuario (paso 3), traduciendo dichos requerimientos en criterios ingenieriles llamado voz del ingeniero (paso 4), mencionado en el subcapítulo 2.1.

Una vez definido los pasos 3 y 4, se procede a desarrollar la casa de la calidad (paso 5), ver Anexo I.

Posteriormente se establecerá una lista de especificaciones técnicas de la máquina pulverizadora (paso 6), ver Tabla 2.2.

A continuación, se realizará un análisis funcional de la máquina (paso 7), detallado en el subcapítulo 2.3, lo cual permitirá generar módulos y evaluar una serie de alternativas para cada uno de ellos (paso 8), descritas en el subcapítulo 2.4.

Una vez determinado los módulos se procede a la selección de la alternativa de solución (paso 9), ver Tabla 2.45. Se agrupan cada una de las soluciones y se obtiene un primer diseño conceptual (paso 10), ver Figura 2.15.

Con el diseño conceptual se procede al diseño de detalle (paso 11), correspondiente al dimensionamiento de la máquina mediante el cálculo analítico detallado en el subcapítulo 2.6.

Establecido el dimensionamiento se procede a la construcción de la máquina pulverizadora (paso 12), ver Tabla 2.51.

Finalmente, elaborada la máquina se realizará un detalle de costos (paso 13), mencionado en el subcapítulo 2.9 y a su vez se implementará un protocolo de uso y pruebas (paso 14) de la pulverizadora descrito en el subcapítulo 2.10.

2.1. Requerimientos de la máquina pulverizadora.

El presente proyecto tiene como finalidad el diseño y construcción de una máquina, que permita mediante la agitación de la miel de caña llegar a obtener un producto granulado, requerido por la asociación de pequeños productores Maquita, para lo cual se basará el presente estudio en el diseño concurrente de Carlos Riba.

2.1.1. Voz del usuario

Se recolectará información de los diferentes asociados a la empresa Maquita, obteniendo así los requerimientos y deseos a implementar en la fase del diseño y fabricación.

2.1.2. Voz del ingeniero

Los requerimientos de los asociados a Maquita se transformarán en requerimientos técnicos capaces de satisfacer en su mayoría la demanda del cliente.

2.1.3. Casa de la calidad

Herramienta del QFD (Quality Function Deployment) que permite identificar los requerimientos y deseos del cliente (voz de usuario), traduciéndolos en criterios técnicos del ingeniero que se implementarán en las diferentes fases del diseño y fabricación (Riba, 2002).

La Tabla 2.1, recopila información de la voz del usuario y del ingeniero.

Tabla 2.1. Requerimientos voz usuario / voz del ingeniero.

Voz del usuario	Voz del ingeniero
Obtener la panela en polvo	Mezclado/Pulverizado
Que sea liviana	Peso
Que sea de gran capacidad	Volumen moderado
Que sea compacta	Estabilidad
Fácil operación	Funcionamiento semiautomático
Fácil mantenimiento	Componentes de fácil acceso
Qué el proceso sea rápido	Velocidad de giro regulable
Mezcle mieles de diferentes viscosidades	Potencia
Precio moderado	Costo de la máquina
Que no gaste mucha energía	Uso de energía eléctrica
Que sea higiénica	Material inoxidable
Que reduzca riesgos	Seguridad al operador

(Fuente: Propia)

2.1.3.1. Resultados de la casa de la calidad

Los resultados obtenidos de la casa de la calidad como se muestra en el Anexo I permiten determinar los requerimientos de mayor importancia a tomar en cuenta para el desarrollo de la máquina, entre los que se tiene:

- ✓ Realizar la panela en polvo, es decir, que la pulverizadora garantice que el producto sea procesado en su totalidad.
- ✓ Fácil operación, para que el manejo de la máquina sea fácil para el operario.
- ✓ Mezcle mieles de diferentes viscosidades, es decir, que la máquina realice el pulverizado de diferentes tipos de caña sin afectar su desempeño (versatilidad).
- ✓ Higiénica, se refiere a que los materiales empleados para su construcción brinden facilidad de limpieza y no se oxiden, evitando la proliferación de bacterias.
- ✓ Reducción de riesgos, disminuyendo el contacto entre la miel de caña y el operario durante el proceso, así como en el manejo del equipo, implementando un sistema de control para su funcionamiento.

2.2. Especificaciones técnicas de la máquina pulverizadora

Una vez realizado el estudio de la casa de la calidad, se procede a describir las especificaciones técnicas como se observa en la Tabla 2.2, lo que permite establecer características y prestaciones que servirán de guía para el diseño y construcción de la máquina pulverizadora.

Tabla 2.2. Especificaciones técnicas para la máquina pulverizadora.

Empresa / Cliente: MAQUITA		Producto: Pulverizadora de miel de caña a panela en polvo			Fecha inicial: 04/01/2018
Diseñadores: Vinicio Crespo Erick Cruz					Última revisión: 30/08/2018
Especificaciones					
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción	
Función	04/01/2018	C	R	Máquina pulverizadora de miel de caña a panela en polvo	

Dimensiones	05/02/2018	C	R	Dimensiones máximas: 1200x400x500 [mm] Requerido por Maquita.
	05/02/2018	I	R	Capacidad: 150 [kg/h] Requerido por Maquita.
Movimiento	10/03/2018	I	D	Rotatorio para una correcta homogenización $\omega = 54 \text{ rpm}$ Requerido por Maquita
Potencia	15/04/2018	I	D	Potencia mínima: 2 [HP] Referido a la Tabla 1.4
Seguridad	01/05/2018	I	D	Implementación de materiales adecuado para el manejo de alimentos
	04/05/2018			Implementación de un sistema de encendido - apagado y paro de emergencia
Costo máximo	15/07/2018	C	R	\$4000 dólares Presupuestado por Maquita.
Vida útil	30/08/2018	I	D	Aproximadamente 5 años Requerido por Maquita.

Propone	C = Cliente	Requerimientos	R = Requerimiento
	I = Ingeniero		D = Deseo

(Fuente: Propia)

2.3. Análisis Funcional

Es un método que permite desglosar las funciones y subfunciones que se desea obtener de la máquina, estableciendo una estructura modular que va desde la función principal, hasta el desglose de las funciones más básicas que se estimen convenientes, generando un conjunto de diversas soluciones que permitan implantar un primer diseño conceptual de la máquina pulverizadora.

2.3.1. Niveles funcionales de la máquina pulverizadora

En el Anexo II, se muestra el análisis funcional de la máquina, que constan de tres niveles que se detallan a continuación:

El nivel 0, el cual describe el ingreso de la miel de caña mediante energía manual por el operario como flujo de entrada, pasa por un proceso de pulverizado que corresponde a la función principal de la máquina, hasta obtener la panela en polvo correspondiente al flujo de salida.

En el nivel 1, se desglosa las funciones básicas implícitas en el nivel cero. Se empieza con el depósito de la miel en el recipiente, luego pasa por un proceso de mezcla hasta lograr una correcta homogenización de la panela en polvo, que deberá ser desalojada posteriormente.

En el nivel 2, se detallan funciones más específicas como es la activación del sistema motriz de la máquina, es decir se implementa un dispositivo de accionamiento que genere el movimiento de la mezcla.

2.4. Desarrollo de módulos y alternativas de diseño

El presente subcapítulo describe el análisis funcional mencionado anteriormente, se determinarán alternativas de diseño para cada módulo, además se describen ventajas y desventajas de las opciones que posteriormente ayudarán a un análisis de selección por criterios ponderados.

Los criterios ponderados evalúan ciertos parámetros de diseño de acuerdo con el orden de importancia que el diseñador considere conveniente, desarrollando tablas de evaluación y solución hasta encontrar la opción más adecuada.

En base al Anexo II, correspondiente al desarrollo modular se procede a detallar cada uno de los módulos como se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Modularidad.

Módulo	Detalle
1	Depósito de la mezcla
2	Sistema encendido - apagado
3	Sistema motriz
4	Agitadores
5	Vaciado de la mezcla

(Fuente: Propia)

2.4.1. Depósito de la mezcla

El módulo 1 de la Tabla 2.3, se refiere al inicio del proceso donde la miel es depositada en el recipiente. Las etapas que conforman dicho módulo son:

- Ingreso de la miel
- Distribución de la mezcla en el recipiente
- Soporte y estabilidad

En la Figura 2.2 se muestra el esquema del recipiente horizontal de mezclado y su estructura soporte como alternativa de solución, además se realiza una descripción de las ventajas y desventajas, como se puede observar en la Tabla 2.4.



Figura 2.2. Recipiente de mezclado horizontal.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.4. Ventajas y desventajas del recipiente de mezclado horizontal.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">- Mayor capacidad de mezclado- Menor tiempo de mezclado- Ideal para mezcla de sustancias líquidas- Homogenización adecuada- Fácil mantenimiento	<ul style="list-style-type: none">- Disponibilidad de mayor espacio físico- Dificultad en el vaciado- Costo de fabricación relativamente elevado

(Fuente: Propia)

Como segunda alternativa de solución se tiene un recipiente de mezclado vertical, ver Figura 2.3. Las ventajas y desventajas se indican en la Tabla 2.5.



Figura 2.3. Recipiente de mezclado vertical.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.5. Ventajas y desventajas del recipiente de mezclado vertical.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Inversión inicial baja - Desgaste mínimo del recipiente y agitadores - Fácil vaciado de la mezcla - Mínimo espacio requerido 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere un mayor tiempo de mezclado - Dificultad de limpieza interna - Mezclado no homogéneo - Mayor frecuencia de mantenimiento

(Fuente: Propia)

La Figura 2.4 muestra un recipiente de mezclado de tambor giratorio, y sus ventajas y desventajas se describen en la Tabla 2.6, dando lugar a la tercera alternativa de solución.



Figura 2.4. Recipiente de mezclado de tambor giratorio.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.6. Ventajas y desventajas del recipiente rotatorio de mezclado.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Facilidad de ingreso y vaciado de la mezcla - Costo relativamente bajo - Orientación variada del recipiente de acuerdo con las necesidades 	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor desgaste del recipiente y agitadores - Baja capacidad de mezclado - Empleada mayormente para mezcla de sustancias sólidas

(Fuente: Propia)

2.4.1.1. Evaluación de alternativas para el módulo1 (Depósito de mezcla)

Las alternativas que se detallan en la sección 2.4.1, se presentan a continuación:

- Solución 1: Recipiente de mezclado horizontal
- Solución 2: Recipiente de mezclado vertical
- Solución 3: Recipiente de mezclado de tambor giratorio

En la Tabla 2.7, se describe los criterios de ponderación para el depósito de mezcla. Por ejemplo: para el módulo 1 el diseñador selecciona los parámetros de acuerdo con el orden de importancia, siendo la distribución el criterio de mayor valor con respecto a los demás pesos específicos.

Si el criterio de la fila es mayor que el de la columna, el valor es 1 (ejm: distribución > capacidad igual a 1).

Si el criterio de la fila es igual al de la columna, el valor es 0,5 (ejm: capacidad = mantenimiento igual a 0,5).

Si el criterio de la fila es menor al de la columna el valor es 0 (ejm: mantenimiento < distribución igual a 0).

Una vez evaluado cada uno de los criterios, se realiza la sumatoria de las filas, aumentando un valor de uno, para evitar que existan valoraciones nulas. Finalmente se determina la ponderación mediante la división de cada valor con respecto a la suma total.

Tabla 2.7. Pesos específicos para los criterios de selección del módulo 1 (Depósito de mezcla).

Distribución > capacidad = mantenimiento = costo						
<i>Criterio</i>	<i>Distribución</i>	<i>Capacidad</i>	<i>Mantenimiento</i>	<i>Costo</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>
Distribución		1	1	1	4	0,4
Capacidad	0		0,5	0,5	2	0,2
Mantenimiento	0	0,5		0,5	2	0,2
Costo	0	0,5	0,5		2	0,2
				Suma	10	1

(Fuente: Propia)

De la Tabla 2.8 hasta la Tabla 2.11, se evalúa a cada uno de los criterios, respecto a las alternativas de solución, se toma como referencia el mismo método de evaluación realizado anteriormente.

Tabla 2.8. Evaluación de las soluciones con respecto a la distribución.

Solución 1 > Solución 2 = Solución 3						
<i>Distribución</i>	<i>Solución 1</i>	<i>Solución 2</i>	<i>Solución 3</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>	
Solución 1		1	1	3	0,5	
Solución 2	0		0,5	1,5	0,25	
Solución 3	0	0,5		1,5	0,25	
				Suma	6	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.9. Evaluación de las soluciones con respecto a la capacidad.

Solución 1 > Solución 3 > Solución 2						
<i>Capacidad</i>	<i>Solución 1</i>	<i>Solución 2</i>	<i>Solución 3</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>	
Solución 1		1	1	3	0,5	
Solución 2	0		0	1	0,17	
Solución 3	0	1		2	0,33	
				Suma	6	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.10. Evaluación de las soluciones con respecto al mantenimiento.

Solución 1 > Solución 2 = Solución 3						
<i>Mantenimiento</i>	<i>Solución 1</i>	<i>Solución 2</i>	<i>Solución 3</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>	
Solución 1		1	1	3	0,5	
Solución 2	0		0,5	1,5	0,25	
Solución 3	0	0,5		1,5	0,25	
				Suma	6	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.11. Evaluación de las soluciones con respecto al costo.

Solución 3 > Solución 2 > Solución 1					
Costo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	0	1	0,17
Solución 2	1		0	2	0,33
Solución 3	1	1		3	0,50
			Suma	6	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.12. Conclusiones para el módulo 1 (Depósito de la mezcla).

Conclusiones	Distribución	Capacidad	Mantenimiento	Costo	Σ	Prioridad
Solución 1	0,2	0,10	0,10	0,03	0,43	1
Solución 2	0,1	0,03	0,05	0,07	0,25	3
Solución 3	0,1	0,07	0,05	0,10	0,32	2

(Fuente: Propia)

Como se observa en la Tabla 2.12 los resultados obtenidos para la evaluación total se obtienen de la suma de los productos de cada uno de los criterios por el peso específico de los mismos. La solución de mayor prioridad para este caso corresponde al recipiente de mezclado horizontal.

2.4.2. Sistema encendido – apagado

La máquina pulverizadora de acuerdo con las especificaciones técnicas mencionadas en la Tabla 2.2, requiere de la implementación de un sistema de encendido – apagado (módulo 2, Tabla 2.3), para su funcionamiento y las características a tomar en cuenta son:

- Activar el sistema encendido - apagado
- Protección del motor de la máquina

La Figura 2.5 muestra la primera alternativa de solución, correspondiente a un Switch ON – OFF, además se enlistan las ventajas y desventajas que posee, ver Tabla 2.13.



Figura 2.5. Switch ON –OFF.
(Fuente: (Powertec, 2017))

Tabla 2.13. Ventajas y desventajas del Switch ON – OFF.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Facilidad de instalación. - Bajo costo. - Fácil operación. 	<ul style="list-style-type: none"> - No brinda adecuada protección a sobrecorrientes. - No posee sistema de paro de emergencia.

(Fuente: Propia)

La Figura 2.6 muestra el tablero de control y sus principales ventajas y desventajas se describen en la Tabla 2.14.



Figura 2.6. Tablero de control.
(Fuente: (Powertec, 2017))

Tabla 2.14. Ventajas y desventajas del panel de control Encendido – Apagado.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Fácil operación - Brinda protección a sobrecorrientes - Posee paro de emergencia - Compacto 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo relativamente elevado - Requiere conocimientos especializados para la instalación

(Fuente: Propia)

2.4.2.1. Evaluación de alternativas para el módulo 2 (Sistema encendido – apagado)

De acuerdo con las alternativas que se mencionaron en la sección 2.4.2, se realizan los criterios de selección descritos de la Tabla 2.15 hasta la Tabla 2.18. A continuación se detallan las posibles soluciones a implementar en la máquina pulverizadora:

- Solución 1: Switch ON-OFF
- Solución 2: Panel de control

Tabla 2.15. Pesos específicos para los criterios del módulo 2 (Sistema encendido – apagado).

Protección > Fácil operación > costo					
<i>Criterio</i>	<i>Protección</i>	<i>Fácil operación</i>	<i>Costo</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>
Protección		1	1	3	0,5
Fácil operación	0		1	2	0,33
Costo	0	0		1	0,17
(Fuente: Propia)			Suma	6	1

Tabla 2.16. Evaluación de las soluciones con respecto a la protección.

Solución 2 > Solución 1					
<i>Protección</i>	<i>Solución 1</i>	<i>Solución 2</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>	
Solución 1		0	1	0,33	
Solución 2	1		2	0,67	
(Fuente: Propia)			Suma	3	1

Tabla 2.17. Evaluación de las soluciones con respecto a la fácil operación.

Solución 1 = Solución 2					
<i>Fácil operación</i>	<i>Solución 1</i>	<i>Solución 2</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>	
Solución 1		0,5	1,5	0,50	
Solución 2	0,5		1,5	0,50	
(Fuente: Propia)			Suma	3	1

Tabla 2.18. Evaluación de las soluciones con respecto al costo.

Solución 1 > Solución 2					
<i>Costo</i>	<i>Solución 1</i>	<i>Solución 2</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>	
Solución 1		1	2	0,67	
Solución 2	0		1	0,33	
(Fuente: Propia)			Suma	3	1

Tabla 2.19. Conclusiones para el módulo 2 (Sistema encendido - apagado).

<i>Conclusiones</i>	<i>Protección</i>	<i>Fácil operación</i>	<i>Costo</i>	Σ	<i>Prioridad</i>
Solución 1	0,17	0,17	0,11	0,44	2
Solución 2	0,33	0,17	0,06	0,56	1

(Fuente: Propia)

Los resultados obtenidos en la Tabla 2.19, de acuerdo con los criterios de protección, fácil operación y costo, muestra que la solución 2 posee un grado mayor de importancia por lo que se procede a su selección.

2.4.3. Sistema motriz

En el módulo 3 de la Tabla 2.3, se describe la generación de movimiento de la máquina pulverizadora, para ello se toman en cuenta ciertas consideraciones:

- Movimiento a bajas revoluciones por minuto (RPM).
- Compacto
- Bajo consumo energético

Como primera alternativa de solución para el módulo 3 se tiene un motorreductor como se observa en la Figura 2.7, así como sus ventajas y desventajas mencionadas en la Tabla 2.20.



Figura 2.7. Motorreductor.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.20. Ventajas y desventajas de un motorreductor

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">- Compacto- Bajo costo de mantenimiento- Transmisión de movimiento más seguro- No emite contaminantes	<ul style="list-style-type: none">- Costo relativamente elevado- Mayor peso del equipo respecto a otros sistemas de reducción de velocidad

(Fuente: Propia)

La Figura 2.8 muestra el esquema de un motor eléctrico con sistema de poleas para reducción de velocidad como segunda alternativa de solución, además se describe en la Tabla 2.21 las ventajas y desventajas que esta posee.



Figura 2.8. Motor eléctrico.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.21. Ventajas y desventajas de un motor eléctrico.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo de mantenimiento - No emite emisiones contaminantes - Puede acoplarse a diferentes mecanismos de transmisión 	<ul style="list-style-type: none"> - Trabaja a altas RPM - Dificultad de montaje - Requiere mayor espacio físico - Requiere protección en los elementos de transmisión para prevenir accidentes

(Fuente: Propia)

2.4.3.1. Evaluación de alternativas para el módulo 3 (Sistema motriz)

Las alternativas de solución para el sistema motriz mencionadas en la sección 2.4.3, permite seleccionar entre las siguientes soluciones:

- Solución 1: Motorreductor
- Solución 2: Motor eléctrico con sistema de poleas

La Tabla 2.22 hasta la Tabla 2.26, muestran la evaluación de las alternativas.

Tabla 2.22. Pesos específicos para los criterios de selección del módulo 3 (Sistema motriz).

Costo > seguridad > compacto = montaje						
<i>Criterio</i>	<i>Costo</i>	<i>Seguridad</i>	<i>Compacto</i>	<i>Montaje</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>
Costo		1	1	1	4	0,4
Seguridad	0		1	1	3	0,3
Compacto	0	0		0,5	1,5	0,15
Montaje	0	0	0,5		1,5	0,15
				Suma	10	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.23. Evaluación de soluciones con respecto al costo.

Solución 2 > Solución 1				
<i>Costo</i>	<i>Solución 1</i>	<i>Solución 2</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>
Solución 1		0	1	0,33
Solución 2	1		2	0,67
(Fuente: Propia)		Suma	3	1

Tabla 2.24. Evaluación de soluciones con respecto a la seguridad.

Solución 1 > Solución 2				
<i>Seguridad</i>	<i>Solución 1</i>	<i>Solución 2</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>
Solución 1		1	2	0,67
Solución 2	0		1	0,33
(Fuente: Propia)		Suma	3	1

Tabla 2.25. Evaluación de soluciones con respecto a lo compacto del sistema.

Solución 1 > Solución 2				
<i>Compacto</i>	<i>Solución 1</i>	<i>Solución 2</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>
Solución 1		1	2	0,67
Solución 2	0		1	0,33
(Fuente: Propia)		Suma	3	1

Tabla 2.26. Evaluación de soluciones con respecto al montaje.

Solución 1 > Solución 2				
<i>Montaje</i>	<i>Solución 1</i>	<i>Solución 2</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>
Solución 1		1	2	0,67
Solución 2	0		1	0,33
(Fuente: Propia)		Suma	3	1

Tabla 2.27. Conclusiones para el módulo 3 (Sistema motriz).

<i>Conclusiones</i>	<i>Costo</i>	<i>Seguridad</i>	<i>Compacto</i>	<i>Montaje</i>	Σ	<i>Prioridad</i>
Solución 1	0,13	0,20	0,10	0,10	0,53	1
Solución 2	0,27	0,10	0,05	0,05	0,47	2

(Fuente: Propia)

En base a los resultados obtenidos en la Tabla 2.27, tomando en cuenta los criterios de selección tales como el costo, seguridad, compacto y montaje del sistema motriz, resulta como solución idónea la utilización de un motorreductor.

2.4.4. Agitadores

El módulo 4 de la Tabla 2.3, corresponde a los diferentes tipos de agitadores como alternativas de solución para el proceso de pulverizado y deben cumplir las siguientes características:

- Mezcla homogénea
- Agitación suave
- Diseño acorde a la orientación del recipiente

La Figura 2.9 muestra la primera alternativa de solución para el módulo 4, así como las ventajas y desventajas que se detallan en la Tabla 2.28.



Figura 2.9. Agitador de turbina.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.28. Ventajas y desventajas del agitador de turbina.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none">- Trabaja para amplios rangos de viscosidades- Altas velocidades de trabajo- Mayor efectividad de mezcla en recipientes verticales	<ul style="list-style-type: none">- Barrido parcial de la mezcla- Utilizado mayormente en líquidos- Estancamiento en el fondo del recipiente

(Fuente: Propia)

Como segunda alternativa de solución se observa los agitadores tipo paleta, ver Figura 2.10, además se detalla la ventajas y desventajas en la Tabla 2.29.



Figura 2.10. Agitador de paletas.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.29. Ventajas y desventajas del agitador de paletas.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Agitación suave - Mezcla de diversas sustancias - Velocidad de trabajo moderada 	<ul style="list-style-type: none"> - Barrido parcial de la mezcla - Limitado a recipientes de eje vertical

(Fuente: Propia)

En la Figura 2.11 se observa el agitador doble hélice correspondiente a la tercera alternativa de solución del módulo 4. La Tabla 2.30 describe sus ventajas y desventajas.



Figura 2.11. Agitador doble hélice.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.30. Ventajas y desventajas del agitador doble hélice.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Agitación suave - Trabaja a bajas velocidades - Ideal para altas viscosidades - Barrido completo de la mezcla en el recipiente - Excelente homogenización 	<ul style="list-style-type: none"> - Se emplean mayormente en recipientes de eje horizontal - Potencias de trabajo elevadas - Dificultad de limpieza - Dificultad de fabricación

(Fuente: Propia)

2.4.4.1. Evaluación de alternativas para el módulo 4 (Agitadores)

La sección 2.5.4, describió las ventajas y desventajas de las alternativas de solución correspondientes a los agitadores y estas son:

- Solución 1: Agitador de turbina
- Solución 2: Agitador de paletas
- Solución 3: Agitador doble hélice

De la Tabla 2.31 hasta la Tabla 2.34, se realiza el análisis de selección para encontrar la ponderación a los criterios a evaluar en el módulo 4.

Tabla 2.31. Pesos específicos para los criterios de selección del módulo 4 (Agitadores).

Alta viscosidad > homogenización > bajas RPM						
<i>Criterio</i>	<i>Alta viscosidad</i>	<i>Homogenización</i>	<i>Bajas RPM</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>	
Alta viscosidad		1	1	3	0,5	
Homogenización	0		1	2	0,33	
Bajas RPM	0	0		1	0,17	
(Fuente: Propia)				Suma	6	1

Tabla 2.32. Evaluación de las soluciones del módulo agitadores respecto a la alta viscosidad.

Solución 3 > Solución 2 > Solución 1						
<i>Alta viscosidad</i>	<i>Solución 1</i>	<i>Solución 2</i>	<i>Solución 3</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>	
Solución 1		0	0	1	0,17	
Solución 2	1		0	2	0,33	
Solución 3	1	1		3	0,50	
(Fuente: Propia)				Suma	6	1

Tabla 2.33. Evaluación de las soluciones del módulo agitadores respecto a la homogenización.

Solución 3 > Solución 1 > Solución 2						
<i>Homogenización</i>	<i>Solución 1</i>	<i>Solución 2</i>	<i>Solución 3</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>	
Solución 1		1	0	2	0,33	
Solución 2	0		0	1	0,17	
Solución 3	1	1		3	0,50	
(Fuente: Propia)				Suma	6	1

Tabla 2.34. Evaluación de las soluciones del módulo agitadores respecto a las bajas RPM.

Solución 2 = Solución 3 > Solución 1						
Bajas RPM	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación	
Solución 1		0	0	1	0,18	
Solución 2	1		0,5	2	0,36	
Solución 3	1	0,5		2,5	0,45	
(Fuente: Propia)				Suma	5,5	1

Tabla 2.35. Conclusiones del módulo 4 (Agitadores).

Conclusiones	Alta viscosidad	Homogenización	Bajas RPM	Σ	Prioridad
Solución 1	0,08	0,11	0,03	0,22	3
Solución 2	0,17	0,06	0,06	0,28	2
Solución 3	0,25	0,17	0,08	0,49	1

(Fuente: Propia)

De acuerdo con los resultados obtenidos en base a los criterios de selección, como muestra en la Tabla 2.35, se concluye que la solución 3 correspondiente al agitador doble hélice tiene un mayor índice de prioridad respecto a las otras alternativas.

2.4.5. Vaciado de la mezcla

El módulo 5 listado en la Tabla 2.3, correspondiente al mecanismo vaciado del material y se establece ciertas consideraciones para su selección:

- Facilidad de descarga
- Rapidez en el desalojo del material
- Fácil operación

La Figura 2.12 correspondiente a la válvula mariposa, representa la primera alternativa de solución para el vaciado del recipiente, a su vez las ventajas y desventajas que posee se muestran en la Tabla 2.36



Figura 2.12. Válvula mariposa.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.36. Ventajas y desventajas de la válvula mariposa.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Hermeticidad - Compacta - Bajo costo de implementación - Facilidad de apertura - Requiere poco mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Dificultad de montaje - Dificultad de limpieza

(Fuente: Propia)

Como segunda alternativa de solución se tiene el sistema de vaciado por compuertas, ver Figura 2.13, a su vez la Tabla 2.37, describe sus ventajas y desventajas.

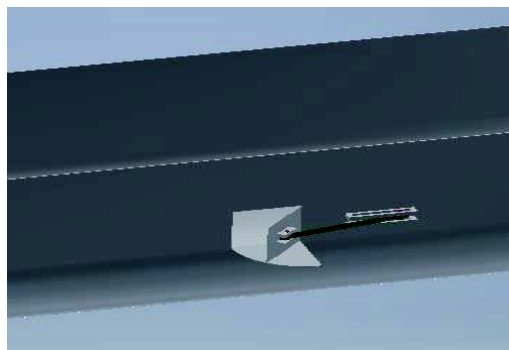


Figura 2.13. Compuerta de vaciado.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.37. Ventajas y desventajas de la compuerta de vaciado.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Facilidad de apertura - Bajo costo de implementación - Requiere poco mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - No garantiza hermeticidad - Acumulación de residuos - Dificultad en el montaje

(Fuente: Propia)

La Figura 2.14, muestra la tercera alternativa de solución correspondiente al mecanismo giratorio de vaciado, además se mencionan sus ventajas y desventajas en la Tabla 2.38

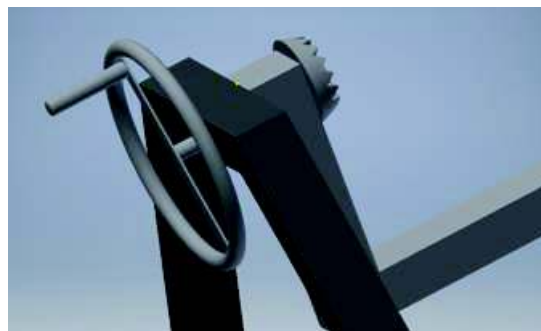


Figura 2.14. Mecanismo giratorio de vaciado.
(Fuente: Propia)

Tabla 2.38. Ventajas y desventajas del mecanismo giratorio de vaciado.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> - Menor tiempo de vaciado - No existe acumulación de residuos - Facilidad de maniobra 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo considerable en su implementación - Limitado a recipientes de eje vertical

(Fuente: Propia)

2.4.5.1. Evaluación de alternativas para el módulo 5 (Vaciado de la mezcla)

Las alternativas de solución mencionadas en la sección 2.4.5, permiten realizar el análisis de criterios ponderados, como se muestra desde la Tabla 2.39 hasta la Tabla 2.43.

A continuación, se describe las tres posibles soluciones para el módulo 5:

- Solución 1: Válvula mariposa
- Solución 2: Compuerta de vaciado
- Solución 3: Mecanismo giratorio de vaciado

Tabla 2.39. Pesos específicos para los criterios de selección del módulo 5 (Vaciado de la mezcla).

Hermeticidad > fácil apertura > costo > montaje						
Criterio	Hermeticidad	Fácil apertura	Costo	Montaje	$\Sigma+1$	Ponderación
Hermeticidad		1	1	1	4	0,4
Fácil apertura	0		1	1	3	0,3
Costo	0	0		1	2	0,2
Montaje	0	0	0		1	0,1
Suma					10	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.40. Evaluación de las soluciones del módulo de vaciado respecto a hermeticidad.

Solución 1 > Solución 2 > Solución 3					
Hermeticidad	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1	1	3	0,50
Solución 2	0		1	2	0,33
Solución 3	0	0		1	0,17
Suma				6	1

(Fuente: Propia)

Tabla 2.41. Evaluación de las soluciones del módulo de vaciado respecto a la fácil apertura.

Solución 1 = Solución 2 > Solución 3						
<i>Fácil apertura</i>	<i>Solución 1</i>	<i>Solución 2</i>	<i>Solución 3</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>	
Solución 1		0,5	1	2,5	0,42	
Solución 2	0,5		1	2,5	0,42	
Solución 3	0	0		1	0,17	
(Fuente: Propia)				Suma	6	1

Tabla 2.42. Evaluación de las soluciones del módulo de vaciado respecto al costo.

Solución 1 > Solución 2 > Solución 3						
<i>Costo</i>	<i>Solución 1</i>	<i>Solución 2</i>	<i>Solución 3</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>	
Solución 1		1	1	3	0,50	
Solución 2	0		1	2	0,33	
Solución 3	0	0		1	0,17	
(Fuente: Propia)				Suma	6	1

Tabla 2.43. Evaluación de las soluciones del módulo de vaciado respecto al montaje.

Solución 1 > Solución 2 > Solución 3						
<i>Montaje</i>	<i>Solución 1</i>	<i>Solución 2</i>	<i>Solución 3</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>	
Solución 1		1	1	3	0,50	
Solución 2	0		1	2	0,33	
Solución 3	0	0		1	0,17	
(Fuente: Propia)				Suma	6	1

Tabla 2.44. Conclusiones del módulo 5 (Vaciado de la mezcla).

<i>Conclusiones</i>	<i>Hermeticidad</i>	<i>Fácil apertura</i>	<i>Costo</i>	<i>Montaje</i>	Σ	<i>Prioridad</i>
Solución 1	0,2	0,13	0,10	0,05	0,48	1
Solución 2	0,13	0,13	0,07	0,03	0,36	2
Solución 3	0,07	0,05	0,03	0,02	0,17	3

(Fuente: Propia)

Con los resultados obtenidos en la Tabla 2.44, en base a los criterios de selección considerados, tales como: hermeticidad, fácil apertura, costos y montaje. Se concluye que la alternativa de solución 1 tiene mayor prioridad respecto a las otras.

2.5. Matriz morfológica

En el subcapítulo anterior se evaluó y seleccionó las soluciones a los diferentes módulos. El presente subcapítulo corresponde a la matriz morfológica referente a un arreglo sistemático de las alternativas, recopilando las soluciones a implementar en la conceptualización del diseño general de la máquina.

La Tabla 2.45 muestra la matriz morfológica de la máquina pulverizadora, donde las alternativas de color azul muestran las soluciones de cada módulo.

Tabla 2.45. Matriz morfológica.

Módulos	Alternativas de diseño
Depósito de la mezcla	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Recipiente de mezclado horizontal</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Recipiente de mezclado vertical</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Recipiente de mezclado de tambor giratorio</div> </div>
Sistema encendido-apagado	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Switch ON-OFF</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Panel de control Encendido-Apagado</div> </div>
Sistema motriz	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Motorreductor</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Motor eléctrico</div> </div>
Agitadores	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Agitador de Turbina</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Agitador de paletas</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Agitador doble hélice</div> </div>
Vaciado de la mezcla	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Válvula mariposa</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Compuerta de vaciado</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Mecanismo giratorio de vaciado</div> </div>

(Fuente: Propia)

La Figura 2.15, muestra el esquema final de la máquina pulverizadora, tomando en cuenta las soluciones que se obtuvieron anteriormente.

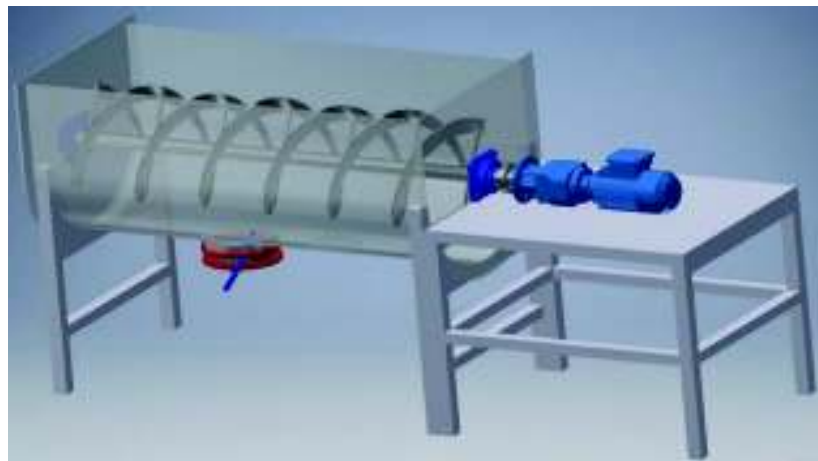


Figura 2.15. Diseño conceptual de la máquina pulverizadora.
(Fuente: Propia)

2.6. CÁLCULO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

En el capítulo anterior se desarrolló el análisis funcional de la máquina pulverizadora, se plantearon alternativas de diseño para cada módulo y mediante el análisis de criterios ponderados se determinó las soluciones, dando como resultado un primer diseño conceptual.

En el presente capítulo, basado en el diseño generado, se procede a desarrollar el cálculo de los elementos principales de la máquina, ver Figura 2.15.

2.6.1. Dimensionamiento del recipiente de mezclado

En base a los datos obtenidos experimentalmente como se muestra en la Tabla 2.46, se procede a dimensionar el recipiente de mezclado.

Los valores experimentales fueron obtenidos mediante muestras a diferentes condiciones de trabajo. Por ejemplo, de una muestra de 211,40 [gr] de miel de caña y un volumen de 150 [ml], empleando la ecuación 2.1, se obtuvo como resultado una densidad de 1400 [Kg/m³] a una temperatura de 96 [°C], dicho valor se tomará como referencia para los cálculos posteriores, debido a que la miel en el proceso de pulverizado se encuentra a una temperatura cercana a la calculada.

Tabla 2.46. Propiedades físicas de la miel de caña y panela granulada.

Propiedades físicas	
Miel de caña	Panela granulada
Densidad [Kg/m ³]	
814,28 @ 22°C	622 @ 22°C
1059,30 @ 60°C	
1115,38 @ 85°C	
1400,33 @ 96°C	

(Fuente: Propia)

El volumen del recipiente se determina a partir de la ecuación 2.1, empleando las condiciones de borde previamente obtenidas en la Tabla 2.2 y 2.46.

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (2.1.)$$

Donde:

V : Volumen del recipiente [m^3]

ρ : Densidad de la miel de caña [Kg/m^3]

m : Masa de la miel de caña [Kg]

El recipiente presenta una forma de U, con una semicircunferencia en la base y una zona rectangular en su parte superior, el área sombreada representa el espacio que ocupa la miel de caña en el recipiente, ver Figura 2.16.

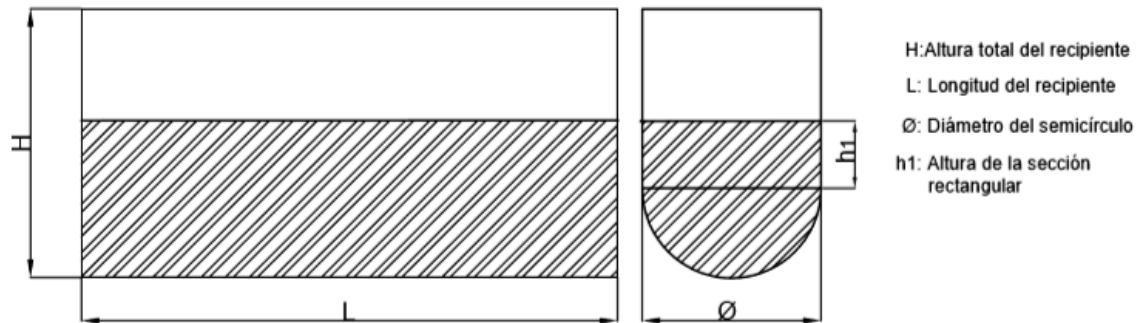


Figura 2.16. Esquema del recipiente de mezclado.
(Fuente: Propia)

Para el dimensionamiento se determina el volumen tanto de la semicircunferencia, así como de la región rectangular, obteniendo una expresión que considera los dos volúmenes como se muestra en la ecuación 2.2.

$$V = \frac{\pi \cdot \phi^2 \cdot L}{8} + \phi \cdot h_1 \cdot L ; \text{ donde: } h_1 = \frac{\phi}{4}$$

$$V = \frac{\phi^2 \cdot L}{4} \left(\frac{\pi}{2} + 1 \right) \quad (2.2.)$$

Donde:

V: Volumen del semicilindro [m³]

Ø: Diámetro del semicírculo [m]

L: Longitud del recipiente [m]

h₁: Altura de la sección rectangular [m]

Igualando las ecuaciones 2.1. y 2.2. se obtiene una expresión que permite encontrar el diámetro del recipiente de acuerdo con una longitud dada, ver ecuación 2.3

$$\phi = \sqrt{\frac{8 \cdot V}{(\pi + 2) \cdot L}} \quad (2.3.)$$

Tabla 2.47. Dimensiones del recipiente de mezclado.

Longitud [m]	Diámetro [m]	Altura total [m]
1	0,41	0,61
1,2	0,37	0,56
1,5	0,33	0,50
1,8	0,30	0,46
2	0,29	0,43

(Fuente: Propia)

La Tabla 2.47 muestra las dimensiones del recipiente de mezclado para diferentes longitudes, para el caso de estudio se han seleccionado las dimensiones resaltadas.

2.6.1.1. Cálculo del espesor del recipiente de mezclado

Para el cálculo del espesor se procede a realizar un análisis considerando al recipiente como una superficie sumergida. Se determina la fuerza de presión que ejerce el fluido, calculando las componentes vertical y horizontal sobre el recipiente, debido a su simetría se analiza la mitad del área sombreada, ver Figura 2.17.

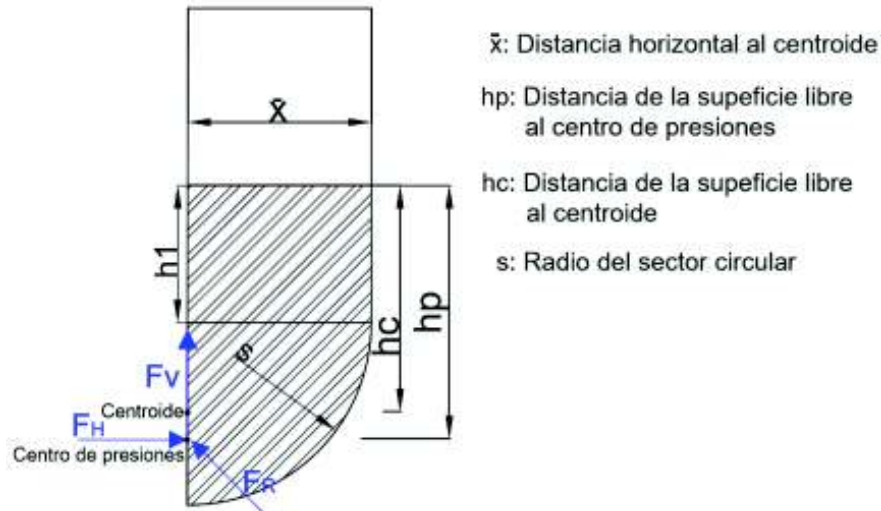


Figura 2.17. Diagrama de cuerpo libre del recipiente.
(Fuente: Propia)

Previo al cálculo de la componente vertical de la fuerza se determina el peso específico de la miel de caña mediante la ecuación 2.4.

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (2.4.)$$

Donde:

γ : Peso específico de la miel de caña [$Kg/m^2 s^2$]

ρ : Densidad de la miel @ 96 °C [Kg/m^3]

g : Gravedad [m/s^2]

Para determinar la componente horizontal de la fuerza que ejerce la presión interna se emplea la ecuación 1.3 descrita en el subcapítulo 1.7.

$$F_H = \gamma \cdot s \cdot L \cdot h_c ; \text{ donde: } h_1 = \frac{s}{2}$$

$$F_H = 658,56 \text{ [N]}$$

La fuerza vertical que ejerce el fluido sobre el recipiente se calcula mediante la ecuación 1.4 detallada en el subcapítulo 1.7.

$$F_v = \gamma \cdot V$$

$$F_v = 1687,56 \text{ [N]}$$

Conocidas las fuerzas vertical y horizontal se procede a calcular la fuerza resultante, como se muestra en la ecuación 2.5.

$$F_R = \sqrt{F_v^2 + F_H^2} \quad (2.5.)$$

Donde:

F_R : Fuerza de presión resultante sobre el recipiente [N]

$$F_R = 1811,507 \text{ [N]}$$

Una vez determinada las componentes de la fuerza que ejerce el fluido, se observa que la componente vertical es la única que puede provocar flexión en el recipiente, mientras la componente horizontal hace que el recipiente se expanda horizontalmente.

A continuación, se realiza una analogía considerando al recipiente como una viga en U empotrada en sus extremos, ver Figura 2.18, donde actúa la carga distribuida verticalmente a lo largo de la misma.

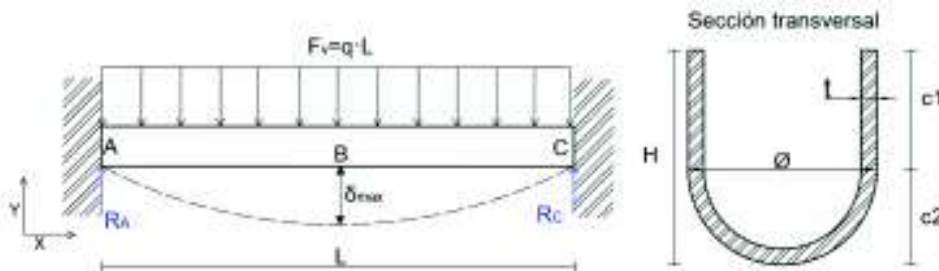


Figura 2.18. Diagrama de cuerpo libre del recipiente considerándolo como una viga en U empotrada.
(Fuente: Propia)

La Figura 2.19 muestra los diagramas de fuerza cortante y momento flector máximo que genera la carga distribuida.

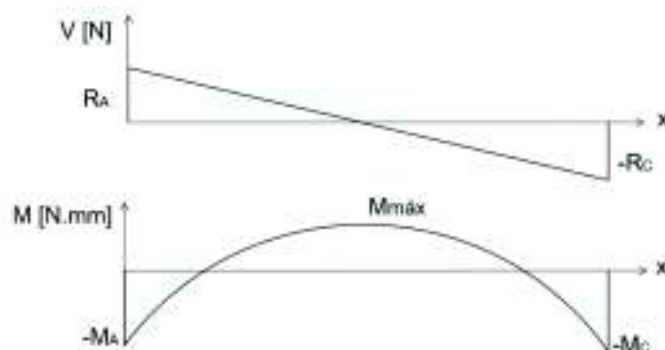


Figura 2.19. Diagrama: (a) fuerza cortante y (b) momento flector del recipiente de mezclado.
(Fuente: Propia)

Se procede al cálculo del momento flector máximo como se muestra en la ecuación 2.6. (Mott , 2009, p.741)

$$M_{max} = \frac{F_v \cdot L}{24} \quad (2.6.)$$

$$M_{max} = 84378 \text{ [Nmm]}$$

Para el cálculo del esfuerzo a flexión generado es necesario conocer la inercia de la sección y la distancia del eje neutro al extremo de la sección, ver Figura 2.18, para ello se asumió un espesor de placa de 2mm, ver Anexo III, dando como resultado los siguientes valores:

$$I = 61374868,75 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$C_1 = 260,19 \text{ [mm]}$$

$$C_2 = 242,81 \text{ [mm]}$$

Mediante la ecuación 1.20, se obtiene el esfuerzo a flexión, donde $C = C_1$.

$$\sigma_1 = \frac{M_{max} \cdot c}{I}$$

$$\sigma_1 = 0,36 \text{ [MPa]}$$

Para obtener el esfuerzo máximo a flexión, se considera un factor de cargas dinámicas, para el caso de estudio se asume un valor de $f_{CD} = 1.5$.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \sigma_1 \cdot f_{CD}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 0,54 \text{ [MPa]}$$

Conocido el esfuerzo máximo a flexión, se procede a determinar el factor de seguridad mediante la ecuación 2.7.

$$FS = \frac{S_y}{\sigma_{max}} \quad (2.7.)$$

Donde:

FS : Factor de seguridad

S_y : Esfuerzo de fluencia del acero inoxidable igual a 276 [MPa]

$$FS = 514$$

Conocido el factor de seguridad, se concluye que el recipiente no fallará debido a la flexión.

2.6.1.2. Cálculo de la deflexión en el recipiente de mezclado

El recipiente puede fallar debido a la deflexión máxima generada por el peso del fluido, ver Figura 2.18, para ello es necesario calcular dicha deflexión mediante la ecuación 2.8 (Mott, 2009, p.741) y compararla con un valor de deflexión admisible, para el caso de estudio se asume un valor de 0.5mm como criterio de aceptación.

$$\delta_{max} = \frac{F_v \cdot L^3}{384 E \cdot I} \quad (2.8.)$$

Donde:

δ_{max} : Deflexión máxima del recipiente [mm]

E: Módulo de elasticidad del acero inoxidable igual a 210 [GPa]

$$\delta_{max} = 0,0006 \text{ [mm]}$$

Una vez determinado la deflexión máxima generada en el recipiente, se procede al cálculo del factor de seguridad relacionándolo con el criterio de aceptación mencionado anteriormente.

$$FS = \frac{0,5}{\delta_{max}} = 833$$

2.6.2. Dimensionamiento del agitador doble hélice

En el diseño conceptual se determinó una geometría específica del agitador, ver Figura 2.20. A continuación se procederá al dimensionamiento de las partes que lo conforman, las cuales son: (a) hélice, (b) eje soporte (c) eje motriz y (d) tubo.

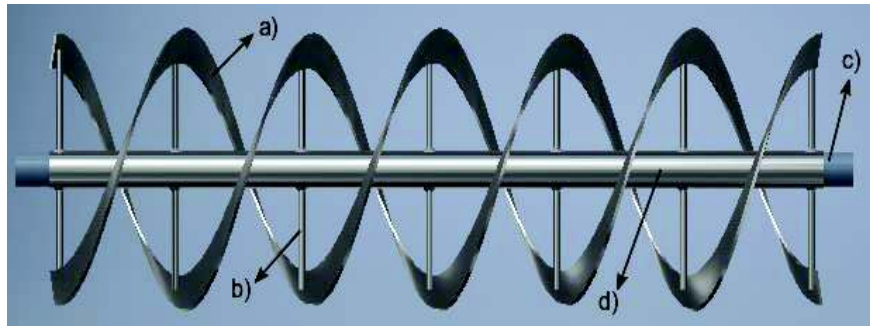


Figura 2.20. Agitador doble hélice: (a) hélice, (b) eje soporte, (c) eje motriz y (d) tubo.
(Fuente: Propia)

2.6.2.1. Dimensionamiento de la hélice

Para el diseño de la hélice se determinan las fuerzas que ejerce el fluido de trabajo en las diferentes etapas del proceso de pulverizado mencionado en el subcapítulo 1.3.

Para la etapa (a) fase líquida, ver subcapítulo 1.3, se procede a realizar un análisis considerando a la hélice como una placa inclinada, ver Figura 2.21.

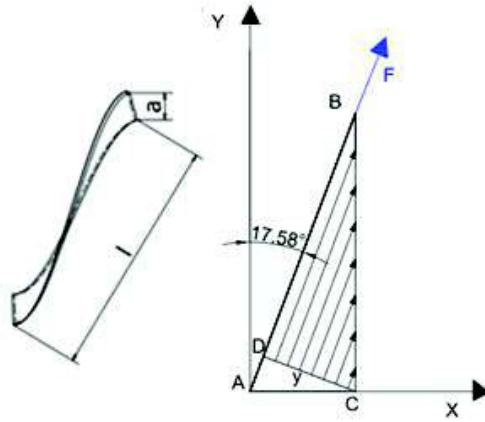


Figura 2.21. Analogía de una hélice considerándolo placa inclinada.
(Fuente: Propia)

Previo al cálculo del esfuerzo cortante del flujo laminar sobre la superficie de la hélice, se determina la velocidad lineal mediante la ecuación 2.9, relacionando la velocidad angular, ver Tabla 2.2 y el radio de giro en el recipiente.

$$v = \omega \cdot r \quad (2.9)$$

Donde:

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

ω : Velocidad angular 54 [rpm]

r : Radio de giro en el recipiente 0,20 [m]

$$v = 1,13 \left[\frac{m}{s}\right]$$

El gradiente de velocidades se determina mediante la relación de la velocidad lineal antes calculada y la distancia perpendicular de la placa al fondo del recipiente.

$$\frac{\Delta v}{\Delta y} = \frac{v - 0}{y - 0}$$

Donde:

y : Distancia perpendicular de la placa al fondo del recipiente 0,18 [m]

$$\frac{\Delta v}{\Delta y} = 6,27 \left[\frac{1}{s}\right]$$

Aplicando la ecuación 1.5 descrita en subcapítulo 1.8, se obtiene el esfuerzo cortante generado por el fluido en la placa.

$$\tau = \mu \cdot \left(\frac{\Delta v}{\Delta y}\right)$$

$$\tau = 66,96 [Pa]$$

Para hallar la fuerza viscosa se emplea la ecuación 1.6. Debido a que el fluido se encuentra en contacto tanto en la parte superior e inferior de la placa, se debe relacionar las dos áreas de contacto y multiplicar por el número de hélices que conforman el agitador.

$$F_v = 2(\tau \cdot A_c)$$

Donde:

A_c : Área de contacto 0,059 [m²]

$$F_v = 7,90 [N]$$

$$F_{vt} = N_{hélices} \cdot F_v$$

Donde:

F_{vt} : Fuerza viscosa total [N]

$N_{hélices}$: Número de hélices igual a 12

$$F_{vt} = 94,82 [N]$$

Posteriormente se determina la fuerza de arrastre generada por la separación del flujo al dejar la hélice. Se aplica la ecuación 1.7.

$$F_a = \frac{C_D \cdot (\rho \cdot A_a) \cdot v^2}{2}$$

Mediante la ecuación 2.10, se calcula el área de arrastre asumiendo una placa de 0,0508m equivalente al ancho de la hélice y una longitud característica de 0,614m correspondiente a la longitud de la hélice en una vuelta. Se asume un factor de arrastre $C_D = 3$.

$$A_a = a \cdot l \quad (2.10.)$$

Donde:

A_a : Área de arrastre [m²]

a : Ancho de la placa igual a 0,0508 [m]

l : Longitud característica igual a 0,614 [m]

$$A_a = 0,031 [m^2]$$

La fuerza de arrastre debe multiplicarse por el número de hélices que conforman el agitador, para obtener la fuerza de arrastre total.

$$F_a = 85,80 [N]$$

$$F_{at} = N_{hélices} \cdot F_a$$

Donde:

F_{at} : Fuerza de arrastre total [N]

$$F_{at} = 1029,70 [N]$$

Por lo tanto, la fuerza resultante que se requiere para mover el agitador en la fase líquida corresponde a la sumatoria de la fuerza viscosa y arrastre totales.

$$F_R = F_{vt} + F_{at}$$

$$F_R = 1124,52 [N]$$

Para las etapas (b) y (c) transición y sólida respectivamente descritas en el subcapítulo 1.3, se realizó un ensayo mediante la aplicación de una fuerza horizontal a una placa, ver Figura 2.22, con la implementación de un dinamómetro se determinó la fuerza necesaria para mover la placa.



Figura 2.22. Fases: (b) transición y (c) sólida de la panela pulverizada.
(Fuente: Propia)

Los valores de fuerzas obtenidas en las fases de transición y sólida se describen en la Tabla 2.48, se debe tener en cuenta que los ensayos se realizaron para una placa cuya área experimental es de $0,0176m^2$.

Tabla 2.48. Resultados experimentales en las fases de transición y sólida.

Fase de Transición		Fase Sólida
Experimental /Placa $A_{exp} = 0,0176 [m^2]$		
# Ensayos	Fuerza [Kgf]	Fuerza [Kgf]
1	9,5	7,5
2	9	8
3	9,5	8,5
4	10	7,5
5	10,5	8,5
6	10	8
ΣF	58,5	48
F_{exp} [Kgf]	9,75	8
F_{exp} [N]	95,55	78,4

(Fuente: Propia)

Como se observa en la Tabla 2.48, se requiere una mayor fuerza en la etapa de transición, dicho valor corresponderá a la fuerza horizontal en una hélice relacionando el área de la placa con el área de contacto de la hélice, como muestra la ecuación 2.11.

$$F_{rx} = \frac{F_{exp} \cdot A_c}{A_{exp}} \quad (2.11.)$$

Donde:

F_{rx} : Fuerza de la hélice [N]

F_{exp} : Fuerza experimental de la placa [N]

A_{exp} : Área experimental de la placa igual a 0,0176 [m²]

A_c : Área de contacto igual a 0,059 [m²]

$$F_{rx} = 320,31 \text{ [N]}$$

La fuerza determinada corresponde a la componente horizontal, para encontrar la fuerza resultante se debe tomar en cuenta el ángulo de inclinación de la hélice, como se observa en la Figura 2.23.

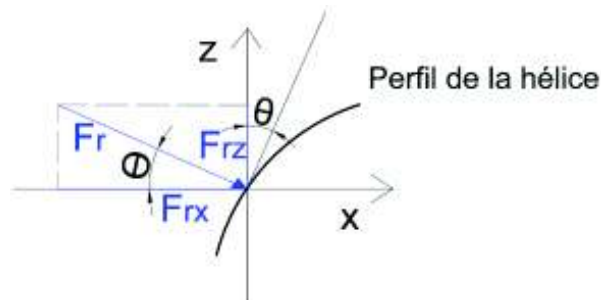


Figura 2.23. Fuerza resultante en una hélice.
(Fuente: Propia)

La fuerza resultante en una hélice se obtiene a partir de la ecuación 2.12.

$$F_r = \frac{F_{rx}}{(\cos \theta)} \quad (2.12.)$$

$$F_{hélice} = F_r = 336 \text{ [N]}$$

Por lo tanto, la fuerza total será igual a la fuerza resultante por el número de hélices.

$$F_T = N_{hélices} \cdot F_{hélice} = 4032 \text{ [N]}$$

Con los resultados teórico y experimental obtenidos se concluye que la fuerza requerida en la etapa de transición es mayor a la fuerza en las fases líquida y sólida, por lo que se empleará dicho valor para los cálculos posteriores.

2.6.2.1.1. Determinación del espesor de la hélice

Una vez determinada la fuerza total que actúa sobre la hélice, se procede a realizar una analogía considerando a la hélice como una viga empotrada en sus extremos en donde actúa una carga distribuida, ver Figura 2.24.

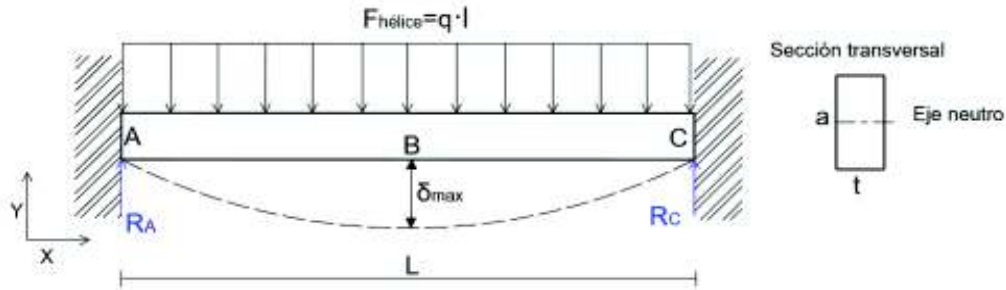


Figura 2.24. Diagrama de la hélice considerándolo viga empotrada en sus extremos. (Fuente: Propia)

La Figura 2.25 muestra los diagramas de cortante y momento flector máximo que genera la carga distribuida.

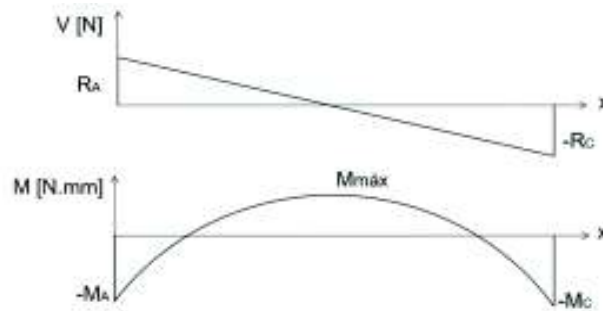


Figura 2.25. Diagramas: (a) fuerza cortante y (b) momento flector de la hélice. (Fuente: Propia)

Posteriormente, se procede al cálculo del momento flector máximo que genera la carga distribuida como se indica en la ecuación 2.13 (Shigley, 2008, p.996).

$$M_{max} = \frac{F_{hélice} \cdot l}{24} \quad (2.13.)$$

$$M_{max} = 8,6[\text{Nm}]$$

El esfuerzo máximo a flexión se obtiene mediante la ecuación 2.14 que relaciona el espesor t del material (Shigley, 2008, p.86).

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{\frac{I}{c}} ; \text{ donde: } \frac{I}{c} = \frac{a \cdot t^2}{6}$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{\frac{a \cdot t^2}{6}} \quad (2.14.)$$

Donde:

t: Espesor de la hélice [m]

Para determinar el espesor de la hélice se realiza el cálculo para diferentes valores disponibles en el mercado, empleando las ecuaciones 2.7 y 2.14, se establecen valores de espesor y se compara con su factor de seguridad correspondiente, el cual permitirá seleccionar el espesor del material, ver Tabla 2.49.

Tabla 2.49. Selección del espesor de la hélice.

Espesor [mm]	Esfuerzo admisible [MPa]	Factor seguridad
1	1032,00	0,27
2	258,00	1,07
3	114,67	2,41
4	64,50	4,28

(Fuente: Propia)

Según los criterios de selección del factor de seguridad recomendados (Mott, 2006, p.185), para materiales dúctiles como el acero AISI 304 se elige un factor de seguridad que varíe de 2 a 2.5, por lo que se selecciona un espesor de 3mm para fabricar la hélice, ver Anexo III.

2.6.2.1.2. Cálculo de la deflexión en la hélice

La hélice también puede fallar debido a la deflexión máxima generada al interactuar con el fluido de trabajo, ver Figura 2.24, para ello se calcula la deflexión de acuerdo con la ecuación 2.15 (Shigley, 2008, p.996) y compararla con un valor de deflexión admisible de 0.5mm como criterio de aceptación.

$$\delta_{max} = \frac{5 \cdot F_{hélice} \cdot l^3}{384 E \cdot I} \quad (2.15.)$$

Donde:

δ_{max} : Deflexión máxima de la hélice [mm]

I: Inercia de la sección igual a 43698,8 [mm⁴]

$$\delta_{max} = 0,11 \text{ [mm]}$$

Determinada la deflexión máxima en la hélice, se procede al cálculo del factor de seguridad relacionándolo con el criterio de aceptación mencionado anteriormente.

$$FS = \frac{0,5}{\delta_{max}}$$

$$FS = 4.5$$

2.6.2.2. Diseño a fatiga del eje soporte

El eje soporte al formar parte del agitador, trabaja bajo cargas variables que pueden producir grietas, ocasionando que el elemento de máquina falle, razón por la cual es necesario realizar un análisis a fatiga.

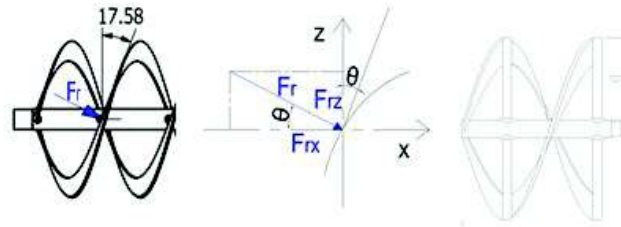


Figura 2.26. Diagrama de cuerpo libre eje soporte.
(Fuente: Propia)

La Figura 2.26, muestra las componentes de la fuerza de la hélice que actúa sobre el eje soporte en las direcciones x-z.

$$Fr_x = 320,31 \text{ [N]}$$

$$Fr_z = 101,48 \text{ [N]}$$

Posteriormente las ecuaciones 2.16 y 2.17 muestran los momentos generados por las fuerzas.

$$M_x = Fr_x \cdot d \quad (2.16.)$$

$$M_z = Fr_z \cdot d \quad (2.17.)$$

Donde:

M_x : Momento en la dirección x [Nm]

M_z : Momento en la dirección z [Nm]

d : Longitud del eje soporte 0,17 [m]

$$M_x = 54,45 \text{ [Nm]}$$

$$M_z = 17,25 \text{ [Nm]}$$

Por lo tanto,

$$M_{\text{máx}} = \sqrt{M_x^2 + M_z^2}$$

$$M_{\text{máx}} = 57,11 \text{ [Nm]}$$

Una vez determinado el momento máximo, se calcula el esfuerzo máximo generado en el eje soporte, mediante la ecuación 1.20.

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M_{\text{máx}} \cdot c}{I}$$

Los valores de c e I se determinan asumiendo un diámetro del eje soporte de $\frac{5}{8}$ pulg $\approx 15,875$ mm, dicho valor corresponde a los disponibles en el mercado.

$$c = 7,94 \text{ [mm]}$$

$$I = 3117,63 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$\sigma_{\max} = 145,45 \text{ [MPa]}$$

El esfuerzo mínimo se considera cuando la hélice se encuentra en la parte de superior y no realiza trabajo alguno.

$$\sigma_{\min} = 0 \text{ [MPa]}$$

Para el análisis a fatiga se debe determinar los esfuerzos medio y amplitud y viene dado por las ecuaciones 2.18 y 2.19.

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (2.18.)$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (2.19.)$$

Donde:

σ_m : Esfuerzo medio [MPa]

σ_a : Esfuerzo amplitud [MPa]

$$\sigma_m = 72,72 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_a = 72,72 \text{ [MPa]}$$

Posteriormente se calcula los esfuerzos equivalentes de von– Mises, dadas por las ecuaciones 1.10 y 1.11, descritas en el subcapítulo 1.9.

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau_m^2} \quad \sigma'_a = \sqrt{\sigma_a^2 + 3\tau_a^2}$$

Debido a que no existe momento torsor en el eje soporte los esfuerzos equivalentes de von – Mises son iguales a los esfuerzos medio y amplitud.

$$\sigma'_m = 72,72 \text{ [MPa]} \quad \sigma'_a = 72,72 \text{ [MPa]}$$

Para encontrar el límite de resistencia a la fatiga, es importante conocer los factores que afectan a la misma, mediante la ecuación 1.12 descrita en el subcapítulo 1.9.

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S'_e$$

Para determinar el factor de superficie se toma en cuenta el acabado superficial, en el caso del eje soporte se considera laminado en caliente, (Shigley, 2008, p.280).

$$k_a = a \cdot S_{ut}^b$$
$$k_a = 0,60$$

Para encontrar el factor de tamaño se considerará un diámetro de $\frac{5}{8}$ pulg asumido anteriormente.

$$k_b = \left(\frac{d}{7,62}\right)^{-0,107} \quad 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm}$$
$$k_b = 0,92$$

Para determinar el factor de carga que afecta en mayor medida en la fatiga se considera el valor de flexión, (Shigley, 2008, p.282).

$$k_c = 1$$

El factor de temperatura se determina considerando las condiciones de trabajo.

$$k_d = 1 \text{ Para } T \leq 450 \text{ }^\circ\text{C}$$

Para determinar el factor de confiabilidad se estima un valor de confiabilidad del 90% (Shigley, 2008, p.287).

$$k_e = 1 - 0,08 \cdot z_a$$
$$k_e = 0,89$$

Para el cálculo del valor de efectos varios, (Shigley, 2008, p.287), se recomienda un valor de 1.

$$k_f = 1$$

Una vez determinado los factores de fatiga, se procede a calcular el S'_e , (Shigley, 2008, p.274).

$$S'_e = 0,5 \cdot S_{ut}$$
$$S'_e = 284 \text{ [MPa]}$$

Finalmente se obtiene el valor de resistencia a la fatiga del eje soporte.

$$S_e = 140,20 \text{ [MPa]}$$

Aplicando el criterio de falla por fatiga de Goodman modificado se determina el factor de seguridad a partir de la ecuación 1.13, descrita en el subcapítulo 1.9

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}$$

$$n = 1,54$$

Con el factor de seguridad encontrado se procede a calcular el diámetro del eje soporte, mediante la ecuación 1.15.

$$d = \left(\frac{16 \cdot n}{\pi} \left\{ \frac{[2(Kf \cdot Ma)]}{S_e} + \frac{[3(Kfs \cdot T_m)^2]^{1/2}}{S_{ut}} \right\} \right)^{1/3}$$

$$d = 19,01 \text{ mm}$$

$$d = 19,01 \text{ [mm]} \approx 3/4 \text{ [pulg]}, \text{ ver Anexo IV}$$

2.6.2.3. Diseño a fatiga del eje motriz

Para el cálculo del eje motriz es necesario realizar un análisis general de las torsiones generadas por las hélices en el tubo, como se observa en la Figura 2.27, dichas torsiones son transmitidas al eje motriz por medio de pasadores.

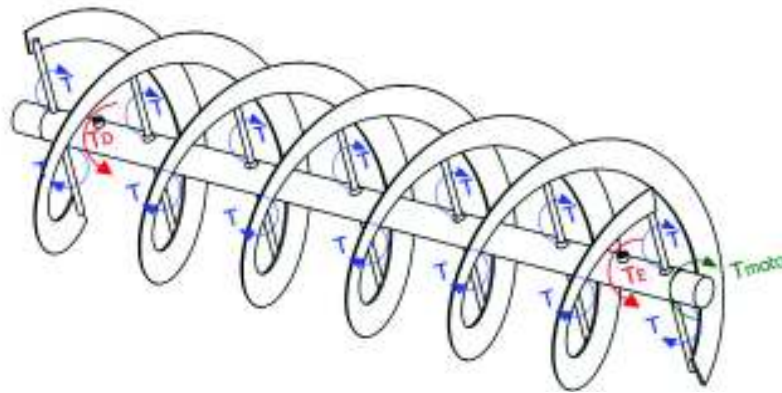


Figura 2.27. Esquema de torsiones a lo largo del agitador.
(Fuente: Propia)

Para determinar el torsor generado en el tubo, se aplica la ecuación del trabajo y energía, que relaciona la fuerza y el desplazamiento lineal con el torque y el desplazamiento angular, como indica la ecuación 2.20.

$$\text{Trabajo} = F_{\text{hélice}} \cdot \Delta x \cdot \cos \alpha = T_{\text{hélice}} \cdot \theta \quad (2.20.)$$

Donde:

Δx : Paso entre hélices igual a 0,192 [m]

$T_{\text{hélice}}$: Torque en la hélice [Nm]

α : Ángulo formado entre la $F_{\text{hélice}}$ y el Δx igual a 162,42°

θ : Desplazamiento angular de la hélice igual a 2π [rad]

$$T_{\text{hélice}} = 9,78 \text{ [Nm]}$$

Para encontrar el torque resultante se multiplica por el número de ejes soportes.

$$T_R = N_{eje\ soporte} \cdot T_{hélice}$$

Donde:

T_R : Torque resultante [Nm]

$N_{eje\ soporte}$: Número de ejes soporte igual a 14

$$T_{motor} = T_R = 137 \text{ [Nm]}$$

El torque resultante se transmite al eje motriz por medio de pasadores en los puntos D y E, como muestra la Figura 2.28.

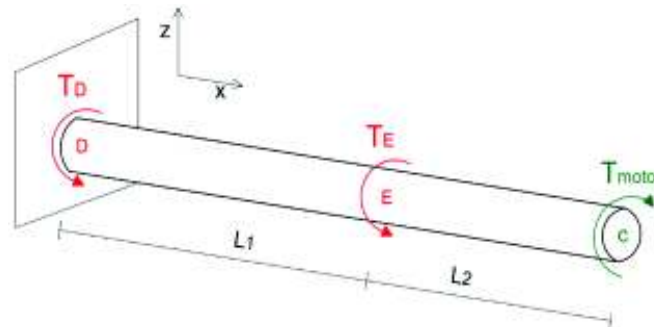


Figura 2.28. Torque resultante a lo largo del eje.
(Fuente: Propia)

Para calcular los torques en los puntos D y E, se considera al eje motriz empotrado en uno de sus extremos, ver Figura 2.28, para ello se emplearán las ecuaciones 2.21 y 2.22, correspondientes a las deformaciones angulares.

$$\phi_C = \frac{T_{motor} \cdot L_2}{GJ} \quad (2.21.)$$

$$\phi_E = \frac{(T_{motor} - T_E) \cdot L_1}{GJ} \quad (2.22.)$$

Donde:

ϕ_C, ϕ_E : Ángulos de torsión en los puntos C y E

L_1 : Distancia entre pasadores igual a 1,02 [m]

L_2 : Distancia entre pasador y el eje del motor igual a 0,27 [m]

G : Módulo de rigidez del tubo de acero inoxidable [MPa]

J : Segundo momento polar de inercia [mm⁴]

Debido que se requiere realizar un análisis estático se considera al punto D empotrado, con una deformación angular equivalente a cero, y viene dado por la ecuación 2.23.

$$\phi_D = \phi_C + \phi_E = 0 \quad (2.23.)$$

Reemplazando las ecuaciones 2.21 y 2.22 en la ecuación 2.23, se obtiene el valor del torque en el punto E del pasador.

$$\frac{T_{motor} \cdot L_2}{GJ} + \frac{(T_{motor} - T_E) \cdot L_1}{GJ} = 0$$

$$T_E = 99,40 [Nm]$$

La ecuación 2.24, correspondiente a los torques generados a lo largo del eje, permiten determinar la torsión en el punto D.

$$T_D + T_E = T_{motor} \quad (2.24.)$$

$$T_D = 37,60 [Nm]$$

La Figura 2.29, muestra el diagrama del momento torsor generado por los pasadores D y E en el eje motriz.

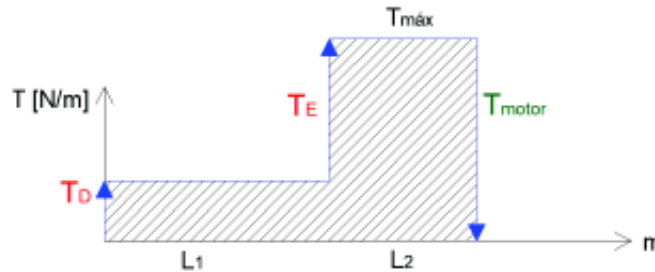


Figura 2.29. Diagrama de momento torsor.
(Fuente: Propia)

Para determinar las reacciones en el eje motriz se realiza el diagrama de cuerpo libre, como muestra la Figura 2.30.

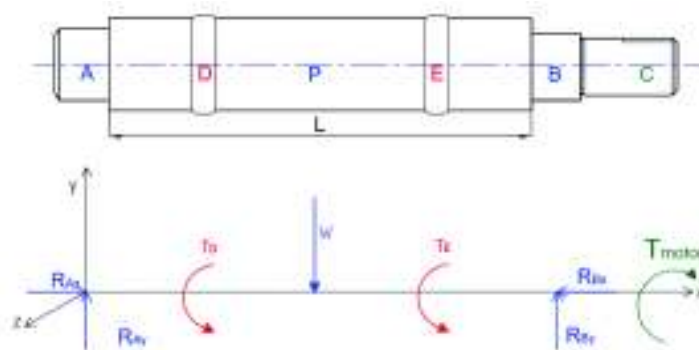


Figura 2.30. Diagrama de cuerpo libre del eje motriz.
(Fuente: Propia)

Mediante las ecuaciones 2.25 y 2.26 se procede a descomponer las reacciones que actúan en el eje motriz.

$$\sum M_z = 0$$

$$\frac{L}{2} \cdot W = AB \cdot R_{By} \quad (2.25.)$$

$$W = 316,25 [N]$$

$$R_{By} = 158,13 [N]$$

$$\sum F_y = 0$$

$$R_{Ay} + R_{By} = W \quad (2.26.)$$

$$R_{Ay} = 158,13 [N]$$

Donde:

R_{Ay} : Reacción sobre el rodamiento A en la dirección y [N]

R_{By} : Reacción sobre el rodamiento B en la dirección y [N]

W : Peso del agitador y eje [N]

A su vez se determinan las reacciones generadas en el eje x debido al empuje de las hélices y se calculan de acuerdo con la ecuación 2.27.

$$\sum F_x = 0$$

$$R_{Ax} + R_{Bx} = 0 \quad (2.27.)$$

$$R_{Ax} = 14 \cdot Fr_x = 4,48 [KN]$$

$$R_{Bx} = -4,48 [KN]$$

Donde:

R_{Ax} : Reacción sobre el rodamiento A en la dirección x [N]

R_{Bx} : Reacción sobre el rodamiento B en la dirección x [N]

Para calcular el momento máximo debido al peso del agitador, se emplea la ecuación 2.28.

$$M_{m\acute{a}x} = R_{Ay} \cdot \frac{L}{2} \quad (2.28.)$$

$$M_{m\acute{a}x} = 94,88 [Nm]$$

Con las reacciones obtenidas, se traza los diagramas de fuerza cortante y momento flector para el eje motriz, como se observa en la Figura 2.31.

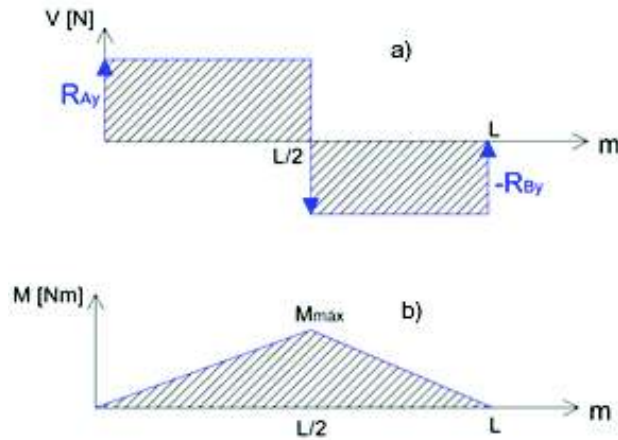


Figura 2.31. Diagramas: (a) fuerza cortante y (b) momento flector del eje.
(Fuente: Propia)

Posteriormente se realiza el diseño a fatiga considerando los esfuerzos fluctuantes debido a la flexión a partir de la ecuación 1.8. De la tabla 7.1 (Shigley, 2008, p.361) se emplea $K_f = 1,7$ como factor de concentración de esfuerzos a flexión.

$$\sigma_a = K_f \frac{32M_a}{\pi d^3} \quad \sigma_m = K_f \frac{32M_m}{\pi d^3}$$

$$\sigma_a = 29,71 \text{ [MPa]} \quad \sigma_m = 0 \text{ [MPa]}$$

Para el cálculo de los esfuerzos fluctuantes debido a la torsión se considera la ecuación 1.9. De la tabla 7.1 (Shigley, 2008, p.361) se utiliza $K_{fs} = 1,5$ como factor de concentración de esfuerzos a torsión y un $T_m = T_{motor}$

$$\tau_a = K_{fs} \frac{16T_a}{\pi d^3} \quad \tau_m = K_{fs} \frac{16T_m}{\pi d^3}$$

$$\tau_a = 0 \text{ [MPa]} \quad \tau_m = 32,78 \text{ [MPa]}$$

Para hallar los esfuerzos de von - Mises en el eje motriz se obtienen a partir de las ecuaciones 1.10 y 1.11.

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau_m^2} \quad \sigma'_a = \sqrt{\sigma_a^2 + 3\tau_a^2}$$

$$\sigma'_m = 32,78 \text{ [MPa]} \quad \sigma'_a = 29,71 \text{ [MPa]}$$

Para el cálculo del límite de resistencia a la fatiga corregida se emplea la ecuación 1.12.

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S'_e$$

Los valores de a y b se obtienen de la Tabla 6.2 (Shigley, 2008), considerando el maquinado en el eje motriz.

$$k_a = a \cdot S_{ut}^b$$

$$k_a = 0,84$$

Para determinar el factor de tamaño se debe estimar un diámetro mínimo del eje motriz de $1\frac{1}{2}$ pulg.

$$k_b = \left(\frac{d}{7,62}\right)^{-0,107} = 1,24 \cdot d^{-0,107} \quad 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm}$$

$$k_b = 0,84$$

Para el cálculo del factor de carga se considera el valor que afecte en mayor medida a la fatiga durante su funcionamiento.

$$k_c = 1$$

El factor de temperatura se determina en base a las condiciones de trabajo, aproximadamente 120°C.

$$k_d = 1 \quad \text{Para } T \leq 450 \text{ °C}$$

Para encontrar el valor de K_e , se utiliza la tabla 6.5 (Shigley, 2008), con una confiabilidad del 90%.

$$k_e = 1 - 0,08 \cdot z_a$$

$$k_e = 0,89$$

Para el cálculo del valor de efectos varios (Shigley, 2008, p.287), recomienda un valor de 1.

$$k_f = 1$$

Se determina el límite de resistencia a la fatiga de la probeta del eje motriz, (Shigley, 2008, p.274).

$$S'_e = 0,5 \cdot S_{ut}$$

$$S'_e = 284 \text{ [MPa]}$$

$$S_e = 178,34 \text{ [MPa]}$$

El cálculo del factor de seguridad a la fatiga se obtiene a partir de la ecuación 1.13, utilizando el criterio de Goodman modificado.

$$\frac{1}{n} = \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}}$$

$$n = 4,4$$

Para encontrar el diámetro del eje motriz se emplea la ecuación 1.15.

$$d = \left(\frac{16 \cdot n}{\pi} \left\{ \frac{[2(K_f \cdot M_a)]}{S_e} + \frac{[3(K_{fs} \cdot T_m)^2]^{1/2}}{S_{ut}} \right\} \right)^{1/3}$$

$$d = 33,13 \text{ [mm]}$$

$$d = 33,13 \text{ [mm]} \approx 1 \frac{1}{2} \text{ [pulg]}, \text{ ver Anexo IV}$$

2.6.2.4. Dimensionamiento del tubo

Para el dimensionamiento del tubo que forma parte del agitador, se toma en cuenta el diámetro del eje motriz calculado anteriormente, correspondiente al diámetro interno del tubo.

De acuerdo con el Anexo VIII, se selecciona un tubo de diámetro 1 1/2 [pulg] y se determina el esfuerzo cortante máximo dado por la ecuación 2.29.

$$\tau_{m\acute{a}x} = \frac{T_R \cdot c_{tubo}}{J} \quad (2.29.)$$

Donde:

$\tau_{m\acute{a}x}$: Esfuerzo cortante máximo sobre el tubo [MPa]

c_{tubo} : Distancia del eje neutro al extremo del tubo igual a 15,87 [mm]

J : Momento polar de inercia del tubo igual a 49882,1 [mm⁴]

$$\tau_{m\acute{a}x} = 66,53 \text{ [MPa]}$$

Con el valor de esfuerzo cortante máximo se procede a calcular el factor de seguridad para el tubo mediante la ecuación 2.30.

$$n = \frac{S_{Sy}}{\tau_{m\acute{a}x}} \quad (2.30.)$$

Donde:

n : Factor de seguridad del tubo

S_{Sy} : Resistencia del material al corte igual a 0,577 S_y [MPa]

$$n = 2,4$$

2.6.3. Selección de chumaceras

Conocido el diámetro del eje motriz y las reacciones en los puntos A y B en la Figura 2.30, se selecciona el rodamiento de acuerdo con el catálogo SKF, ver Anexo V.

La carga en el rodamiento se calcula a partir de la ecuación 1.16, descrita en el subcapítulo 1.10.

$$P = xF_r + yF_a$$

Previo al cálculo de la carga dinámica equivalente se determinan los factores de carga axial y radial según la relación $\frac{f_o \cdot F_a}{C_o}$ de acuerdo con el diámetro nominal del eje motriz.

$$x = 0,56 ; y = 1,04$$

$$F_r = R_{Ay} ; F_a = R_{Ax}$$

$$P = 4,75 \text{ [KN]}$$

Para seleccionar el rodamiento se debe tener en cuenta que la carga dinámica que soporta sea mayor a la carga dinámica calculada. En la Tabla 2.50 se detallan las principales características del rodamiento seleccionado.

Tabla 2.50. Características del rodamiento YET 206-102.

Rodamiento rígido de una hilera de bolas YET 206-102	
Diámetro interior (d) [mm]	28,575
Diámetro exterior (D) [mm]	62
Ancho (B) [mm]	23,8
Capacidad de carga estática (Co) [KN]	11,2
Capacidad de carga dinámica (C) [KN]	19,5

(Fuente: (SKF, 2006))

Para el cálculo de la vida nominal del rodamiento en millones de revoluciones se emplea la ecuación 1.14.

$$L_{nominal} = \left(\frac{C}{P}\right)^k$$

$$L_{nominal} = 69,18 \cdot 10^6 \text{ revoluciones}$$

Finalmente se calcula la vida expresada en años de funcionamiento según la ecuación 1.15.

$$L_{10h} = \frac{69,18 \cdot 10^6}{60 \cdot \omega}$$

$$L_{10h} = 21351,85 \text{ horas}$$

Una vez determinada las características del rodamiento, se procede a seleccionar la chumacera, mediante el catálogo SKF, ver Anexo VI.

2.6.4. Cálculo del pasador para conexión eje y tubo

Para la sujeción entre el agitador y eje motriz se utilizan pasadores cilíndricos como se muestra en la Figura 2.32.



Figura 2.32. Sujetadores agitador-eje motriz.
(Fuente: Propia)

La fuerza cortante que actúa en los pasadores es generada por el torque máximo, ver Figura 2.31 y se determina a partir de la ecuación 2.31.

$$F_{corte} = \frac{T_{m\acute{a}x}}{r_{eje\ motriz}} \quad (2.31.)$$

Donde:

F_{corte} : Fuerza cortante en los pasadores [N]

$$F_{corte} = 9530,43 \text{ [N]}$$

El esfuerzo cortante en la superficie del pasador se calcula a partir de la ecuación 2.32.

$$\tau = \frac{F_{corte}}{2A} = \frac{2 F_{corte}}{\pi d^2} \quad (2.32.)$$

Además, el esfuerzo cortante relaciona la resistencia del material al corte con el factor de seguridad y se determina a partir de la ecuación 2.33.

$$\tau_{Adm} = \frac{S_{sy}}{n} \quad (2.33.)$$

Para determinar el diámetro del pasador se igualan las ecuaciones 2.34 y 2.35, considerando la resistencia del material a corte, $S_{sy} = 0,577S_y$ y un factor de seguridad de 2, mediante la ecuación 2.34.

$$\frac{2 F_{corte}}{\pi d^2} = \frac{S_{sy}}{n} \quad (2.34.)$$

Donde:

S_y : Resistencia a la fluencia del acero inoxidable igual a 276[MPa]

$$d = 8 \text{ mm}$$

2.6.5. Diseño de chavetas

La transmisión del movimiento entre el motor y el agitador se lo realiza mediante un sistema de sujeción llamado matrimonio, ver Figura 2.33 (a), el cual permite el giro por medio de una chaveta, ver Figura 2.33 (b).

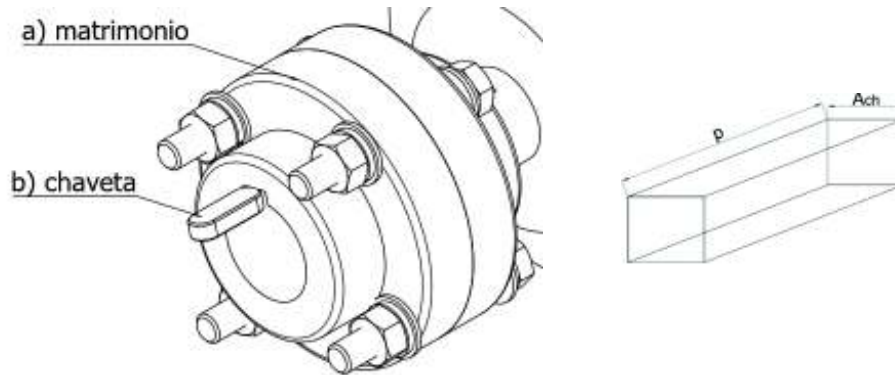


Figura 2.33. Transmisión del movimiento: (a) matrimonio y (b) chaveta.
(Fuente: Propia)

Para dimensionar la chaveta rectangular se utilizan las ecuaciones 2.32 y 2.33 que relaciona los esfuerzos cortantes en función del área de la chaveta, para ello se asume un factor de seguridad igual a 2 y un ancho mínimo de 0.01 m.

$$\tau_{Adm} = \frac{S_{sy}}{n}$$

$$\tau_{Adm} = \frac{F_{corte}}{A_{ch}} = \frac{F_{corte}}{mp}$$

Donde:

p : Profundidad mínima de la chaveta en [m]

A_{ch} : Área de la chaveta rectangular [m²]

$$p = \frac{Fn}{0,577S_y m}$$

$$p = 12 \text{ mm}$$

2.6.6. Potencia del motor

En el subcapítulo 2.6.5, se determinó el torque resultante, dicho valor permitirá encontrar la potencia nominal del motor, mediante la ecuación 2.35.

$$P_n = \frac{T_R \cdot \omega \cdot 2 \cdot \pi}{60} \quad (2.35.)$$

Donde:

P_n : Potencia nominal [W]

ω : Número de revoluciones igual a 54 [rpm]

$$P_n = 774,72 \text{ [W]}$$

$$P_n = 1,04 \text{ [Hp]}$$

Para obtener la potencia real, se debe tener en cuenta la eficiencia del motor, así como un factor de sobrecarga estimado de 1,2, dado por la ecuación 2.36.

$$P_m = f_s \cdot \frac{P_n}{\eta} \quad (2.36.)$$

Donde:

P_m : Potencia real del motor [Hp]

η : Eficiencia del motor igual a 94%

f_s : Factor de sobrecarga igual a 1,5

$$P_m = 1,7 \text{ [Hp]}$$

La potencia calculada es de 1,7[Hp], debido a las características de los motores existentes en el mercado se selecciona un motorreductor de 2[Hp], ver Anexo VII

2.6.7. Soldadura

Ciertos elementos que conforman la máquina deben ser soldados, para el presente estudio se analizará como ejemplo de cálculo la unión permanente entre el tubo y eje soporte, correspondiente al elemento principal en el funcionamiento de la máquina.

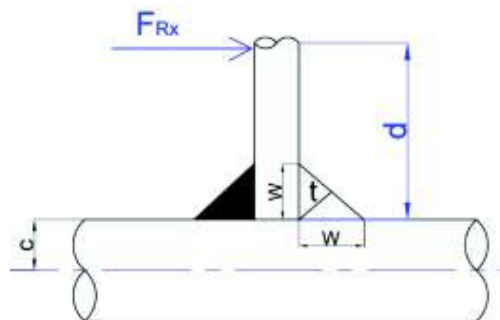


Figura 2.34. Soldadura de filete tubo-eje soporte.
(Fuente: Propia)

La Figura 2.34, muestra la fuerza horizontal aplicada al eje soporte, la cual genera el máximo esfuerzo a flexión en la junta soldada y se calcula a partir de la ecuación 1.20.

$$\sigma_{fs} = \frac{M_{\text{máx}} \cdot c}{I_s}$$

$$I_s = t \cdot I; \text{ Tabla 9.2 (Shigley, 2008)}$$

$$I = 6464,72 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$\sigma_f = \frac{113.47}{w}$$

Encontrado el esfuerzo a flexión de la soldadura en función de w, se procede a calcular el esfuerzo admisible del material base a partir de la ecuación 1.22.

$$\sigma_{\text{admisible}} = 0,6S_y = 165,6 \text{ [MPa]}$$

Para encontrar el lado y la garganta del cordón de soldadura se igualan las ecuaciones 1.20 y 1.22.

$$\sigma_{\text{admisible}} = \sigma_f$$

$$w = 0,7 \text{ mm} \quad y \quad t = 0,5 \text{ mm}$$

Conocido el valor de la garganta, se procede a seleccionar el electrodo E308L -16,

$$\phi = \frac{3}{32} [\text{pulg}] \approx 2,5 [\text{mm}], \text{ 1 pasada para acero inoxidable.}$$

2.6.8. Diseño de la estructura de soporte

El análisis se realiza considerando a la estructura como pórtico, ver Figura 2.35, donde actúa la carga total correspondiente, al peso del fluido, agitador y recipiente. Para ello se ha seleccionado un tubo cuadrado de acero inoxidable AISI 304 de dimensiones $1 \frac{1}{2} [\text{pulg}] \times 1,5 [\text{mm}]$, ver Anexo VIII.

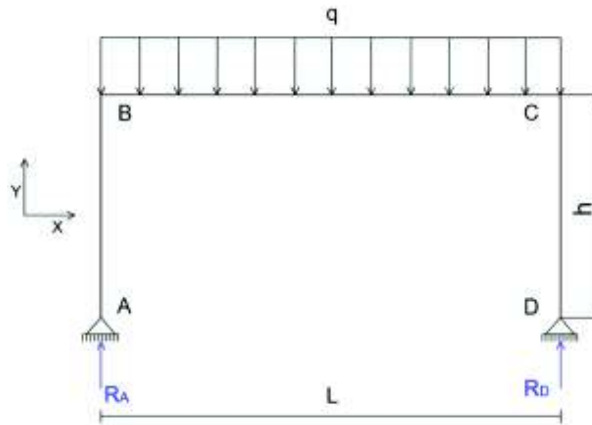


Figura 2.35. Diagrama de cuerpo libre de la estructura.
(Fuente: Propia)

La Figura 2.36 muestra el diagrama del momento flector máximo que genera la carga distribuida en la estructura.

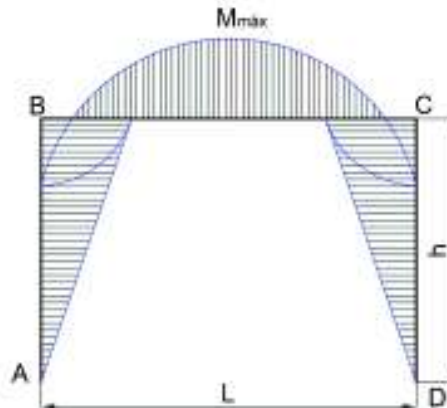


Figura 2.36. Diagrama de momento flector en la estructura.
(Fuente: Propia)

Posteriormente, se determina el momento flector máximo que genera la carga distribuida, como se indica en la ecuación 1.23.

$$M_{m\acute{a}x} = (1 + 2k) \frac{qL^2}{8n}$$

$$n = 3 + 2k ; k = \frac{h}{L}$$

$$q = \frac{Q}{2}$$

Donde:

Q : Carga total distribuida en la estructura igual a 1775,60 [N/m]

L : Longitud de la estructura igual a 1200 [mm]

k : Factor de longitud efectiva debido a la flexión

h : Altura de la columna 1100 [mm]

n : Factor de fijación de los extremos

$$k = 0,92$$

$$n = 4,83$$

$$M_{m\acute{a}x} = 93,95 \text{ [Nm]}$$

Para el cálculo del esfuerzo a flexión máximo es necesario conocer la inercia y la distancia del eje neutro de la sección.

$$I = 49110,25 \text{ [mm}^4\text{]}$$

$$C_1 = 19,05 \text{ [mm]}$$

$$\sigma_{\max} = 36,44 \text{ [MPa]}$$

Relacionando los esfuerzos de fluencia del material y la flexión máxima, se obtiene el factor de seguridad, mediante la ecuación 3.7.

$$FS = 7,5$$

A su vez se debe calcular la carga crítica que soporta la columna, ver Figura 2.37, la cual permitirá determinar la estabilidad de la estructura al pandeo y viene dada por la ecuación 1.24.



Figura 2.37. Carga crítica en una columna libre.
(Fuente: Propia)

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} ; L_e = Kh$$

Donde:

P_{cr} : Carga crítica [N]

L_e : Longitud efectiva [mm]

E : Módulo de rigidez igual a 210 [GPa]

K : Factor de longitud efectiva debido al pandeo igual a 2

I : Momento de inercia de la sección igual a 49110,25 [mm⁴]

$$L_e = 2200 \text{ [mm]}$$

$$P_{cr} = 21,03 \text{ [KN]}$$

Para determinar si la columna soportará el pandeo, se debe comparar las cargas crítica y real. Además se debe tomar en cuenta que la carga real corresponde a la cuarta parte de la carga total.

$$P_{real} = \frac{Q}{4} = 532,68 \text{ [N]}$$

$$P_{cr} > P_{real}$$

Debido a que la carga crítica es mayor a la carga real se puede establecer que la columna no experimentará pandeo.

Además, se debe analizar la relación de esbeltez de la columna, ver ecuación 1.25, para ello se toma en cuenta la longitud de la columna y radio de giro de la sección.

$$\lambda = K \cdot \frac{h}{r} ; r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

$$\lambda = 147,14$$

Para elementos estructurales que trabajan a compresión la relación de esbeltez sugerida, no debe exceder un valor de 200 (Silva, 2018, p.21).



2.7. Elaboración de planos





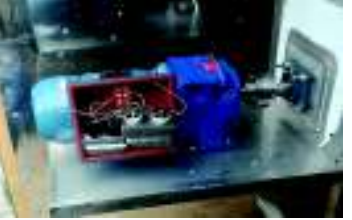
Una vez determinado los cálculos detallados en el subcapítulo 2.6, correspondientes al dimensionamiento de los componentes de la máquina pulverizadora, se procede a la elaboración de planos de conjunto y taller requeridos para su construcción, ver Anexo IX.

2.8. Construcción de la máquina pulverizadora

La construcción de la máquina se efectuó en la Mecánica Industrial Ángel María Luna C.A, su proceso se desarrolló a partir de las soluciones a los módulos descritos en la Tabla 2.45, y se detallan en la Tabla 2.51.

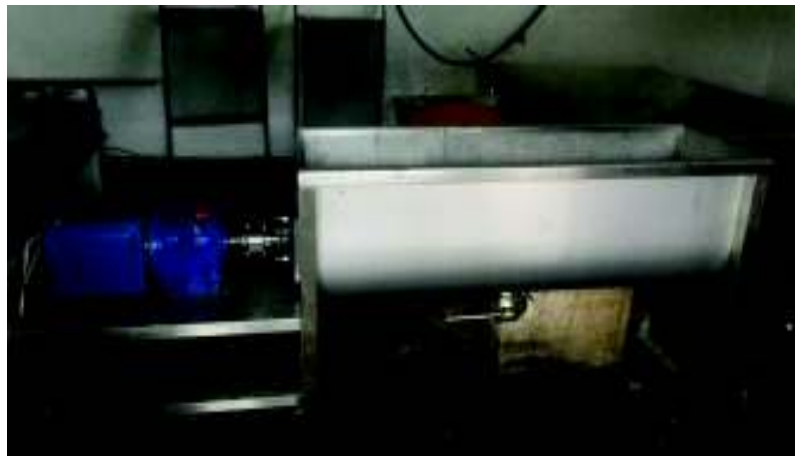
Tabla 2.51 Proceso de construcción y ensamble de la máquina pulverizadora.

Módulo	Herramientas	Procedimiento	Imagen
Recipiente de mezclado horizontal	<ul style="list-style-type: none"> • Cortadora plasma • Dobladora • Roladora • Soldadora TIG • Esmeril 	<ul style="list-style-type: none"> • Cortar la plancha de acuerdo a las medidas establecidas. • Rolar pared lateral de la plancha. • Doblar bordes. • Perforar agujeros. • Soldar las paredes del recipiente. • Eliminar aristas vivas. 	
Agitador doble hélice	<ul style="list-style-type: none"> • Cortadora plasma • Baroladora • Torno • Sierra • Soldadora TIG • Esmeril • Taladro de banco 	<ul style="list-style-type: none"> • Cortar tramos de hélice, tubo, ejes soporte y motriz. • Maquinar ejes soporte y motriz. • Barolar el tramo de hélice. • Soldar eje soporte, tramo hélice y tubo. 	

		<ul style="list-style-type: none"> • Taladrar agujeros para pasadores eje motriz- tubo. 	
Vaciado de mezcla - Válvula mariposa	<ul style="list-style-type: none"> • Cortadora plasma • Soldadora TIG • Esmeril 	<ul style="list-style-type: none"> • Perforar el agujero en el fondo del recipiente. • Soldar ferrul al recipiente. • Eliminar aristas vivas. • Colocar válvula mariposa. 	 
Instalación del motorreductor	<ul style="list-style-type: none"> • Cortadora • Taladro de banco • Soldadora TIG • Reloj comparador para alineación de ejes 	<ul style="list-style-type: none"> • Cortar tubos cuadrados. • Perforar agujeros. • Soldar tubos a la estructura. • Eliminar aristas vivas. • Colocar pernos de sujeción. 	 

<p>Instalación del panel de control</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Multímetro • Pelador de cables • Soldador de 12V • Destornillador • Alicata 	<ul style="list-style-type: none"> • Instalación de temporizadores. • Instalación relé térmico. • Conectar cableado eléctrico motorreductor – panel de control. 	
---	---	--	---

Finalmente se observa la máquina pulverizadora de miel de caña a panela en polvo



(Fuente: Propia)

2.9. Costos

Una vez determinado los componentes de la máquina pulverizadora descritos en los subcapítulos anteriores, se procede a desarrollar los costos requeridos para su fabricación.

2.9.1. Costos de materiales

Los costos de materiales se obtuvieron en base al proveedor de acero inoxidable IMPORTCOM y se detallan en la Tabla 2.52.

Tabla 2.52. Costos de materiales.

Pieza	Especificación	Cantidad (Kg)	Costo unitario (\$)	Total (\$)
Eje soporte	Eje AISI 304 Ø 19,05mm	12,84	5,2	66,77
Eje motriz	Eje AISI 304 Ø 38,1mm	5,69	5,2	29,59
Hélice	Plancha AISI 304 3mm	21,54	3,38	72,81
Recipiente	Plancha AISI 304 2mm	68,15	3,38	230,35
Tubo redondo	Tubo AISI 304 Ø 38x1,5mm	1,64	5,61	9,20
Estructura soporte	Tubo AISI 304 L38,1x38,1x1,5 mm	27,73	5,65	156,67
Matrimonio	Acero 705/Red Ø 105x45mm	4,012	5	20,06
			TOTAL	585,44

(Fuente: Propia)

2.9.2. Costos de elementos normalizados

Los costos de elementos normalizados a utilizarse en la máquina pulverizadora se describen en la Tabla 2.53.

Tabla 2.53. Costos de elementos normalizados.

Elemento	Especificación	Cantidad (Kg)	Costo unitario (\$)	Total (\$)
Caja reductora	MR3I 63 UC2A-24x200 I23.6	1	585	585
Motor bifásico 2HP	1700 RPM 220/380/480 VFRAME 90S B35	1	332	332
Brida	90FF 165 Trifásico	1	38,25	38,25
Panel de control	TRIF HP 2V 200/240 ACS150-03E-07A5-2	1	344,4	344,4
Perno cabeza hexagonal	PERNO HEX RG DIN NEGRO 12x1,75x65MM	4	0,45	1,8
Arandela plana	ARANDELA PLANA SAE NEGRA 1/2"	8	0,11	0,88
Arandela de presión	ARANDELA DE PRESIÓN SAE NEGRA 1/2"	8	0,04	0,32
Tuerca hexagonal	TUERCA GR 8.8 PASO NORMAL 12X1,75MM	4	0,1	0,4
Chumacera de pared	UCF207D1	2	31,36	62,72
Retenedor	TB 35x72x10	2	5,04	10,08
Perno cabeza hexagonal	PERNO/INOX/HEG. 14x50	8	0,52	4,16
Arandela plana	ARAND/PLANA/INOX. 5/8"	8	0,19	1,52
Arandela de presión	ARAND/PLANA/INOX. 5/8"	8	0,08	0,64
Tuerca hexagonal	TUERCA/INOX. 14MM	8	0,29	2,32
Pasadores cilíndricos	PASADOR TUBULAR/INOX. 10x40MM	2	1,69	3,38
Válvula mariposa	WAFER DISCO INOX 3 IN EMP.EPDM	1	179,12	179,12
			TOTAL	1566,99

(Fuente: Propia)

2.9.3. Costos de mano de obra

De acuerdo con la cotización realizada en la Mecánica Industria Luna C.A, se determinaron los costos de mano de obra y se indica en la Tabla 2.54.

Tabla 2.54. Costos de mano de obra.

Maquinaria Costo por hora (\$/hora)	Cantidad		Roladora		Dobladora		Torno		Taladro		Plasma		Cortadora		Rectificadora		Fresadora		Soldadora TIG		Total
	t (horas)	\$	t (horas)	\$	t (horas)	\$	t (horas)	\$	t (horas)	\$	t (horas)	\$	t (horas)	\$	t (horas)	\$	t (horas)	\$	t (horas)	\$	
Pared lateral del recipiente	2	0	0	0	0	0	0	0	1	5	1	30	0	0	0	0	0	0	0	0	97,5
Pared frontal del recipiente	1	1,5	30	1	15	0	0	0	0	0	1	30	0	0	0	0	0	0	2,5	62,5	75
Placa base estructura	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	10	0	0	0	0	1	25	35
Placa soporte chumacera	2	0	0	0	0	0	0	0	1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,5	12,5	22,5
Eje soporte	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	50	77,5
Eje motriz	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,25	1,25	0	0	1,25	31,25	0	0	72,5
Tramo de hélice	12	0	0	3	45	4	80	0	0	0	3	90	0	0	0	0	0	0	4	100	315
Estructura	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	15	0	0	0	0	3	75	90
Chavetas	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	1,5	15	37,5	0	0	0	57,5
Base del motorreductor	1	0	0	0	0	0	0	0	1	5	0,5	15	0,5	2,5	0	0	0	0	1	25	47,5
Matrimonio	1	0	0	0	0	3	60	2	10	20	0	0	0,5	2,5	1	10	4	100	0	0	182,5
TOTAL	44	1,5	30	4	60	10	200	5	25	25	5,5	165	9,75	48,75	2,5	25	6,75	168,7	14	350	1072,5

(Fuente: Propia)

2.9.4. Costo total de la máquina pulverizadora

Una vez conocido los rubros anteriores se debe considerar los costos de diseño y utilidad para obtener el costo total de la máquina, como se describe en la Tabla 2.55.

Tabla 2.55. Costos totales de la máquina pulverizadora.

Costo del material (\$)	585,44
Costo de elementos normalizados (\$)	1566,99
Costo de mano de obra (\$)	1072,50
SUBTOTAL (\$)	3224,93
Costo de diseño (10%)	322,49
Utilidad (15%)	483,74
COSTO TOTAL DE LA MÁQUINA (\$)	4031,17

(Fuente: Propia)

2.10. Protocolo de pruebas

Una vez finalizada la construcción y ensamble de la máquina pulverizadora, se procede al desarrollo del protocolo de uso y pruebas que permitirá establecer su correcto funcionamiento.

2.10.1. Protocolo de uso

Objetivo

Determinar los pasos a seguir para el uso de la máquina pulverizadora

Responsable

Operario 1

Conjunto de actividades

- Verificar que los elementos de sujeción (tuercas y pernos) de la máquina se encuentren correctamente ajustados.
- Verificar que la válvula mariposa se encuentre cerrada.
- Encender la máquina en vacío mediante el switch ON-OFF.
- Calibrar manualmente el número de giros en sentido horario y antihorario del agitador mediante los temporizadores 1 y 3, ubicados en el panel de control.
- Regular el tiempo de paro del agitador al cambio de giro mediante el temporizador 2 ubicado en el panel de control.
- Apagar la máquina mediante el switch ON-OFF

Entradas

1. Máquina pulverizadora
2. Juego de llaves inglesas
3. Cronómetro

Salida

Verificación del uso de la máquina pulverizadora

2.10.2. Protocolo de pruebas

Pulverizado de la miel de caña a panela granulada

Objetivo

Realizar el proceso de pulverizado de la miel de caña a panela granulada

Responsable

Operario 1, Operario 2

Conjunto de actividades

- Verter la miel de caña en el recipiente de mezclado.
- Verificar el nivel de miel, máximo $\frac{3}{4}$ de la altura del recipiente de mezclado.
- Encender la máquina mediante el accionamiento del switch ON-OFF
- Controlar el tiempo de procesamiento mediante un cronómetro.
- Apagar la máquina mediante el accionamiento del switch ON-OFF
- Verificar la consistencia de la panela granulada antes del vaciado.
- Abrir la válvula mariposa para el vaciado de la panela pulverizada.
- Encender la máquina pulverizadora para facilitar el vaciado con el movimiento del agitador.
- Visualizar el vaciado completo en el recipiente de mezclado.
- Apagar la máquina mediante el accionamiento del switch ON-OFF

Entrada

1. Máquina pulverizadora
2. Miel de caña
3. Cronómetro

Salida

Panela granulada

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se describen los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento de la máquina pulverizadora de miel de caña a panela granulada, a su vez se determinan los tiempos de procesamiento y vaciado de la mezcla para su posterior comparación con el proceso manual.

3.1. Resultados

En la Figura 3.1 (a), se observa el depósito de la miel de caña (fase líquida) en el recipiente de mezclado. La Figura 3.2 (b), muestra el inicio del proceso en donde el agitador comienza a mover la mezcla y mediante el enfriamiento a temperatura ambiente experimenta un cambio de fase (transición).

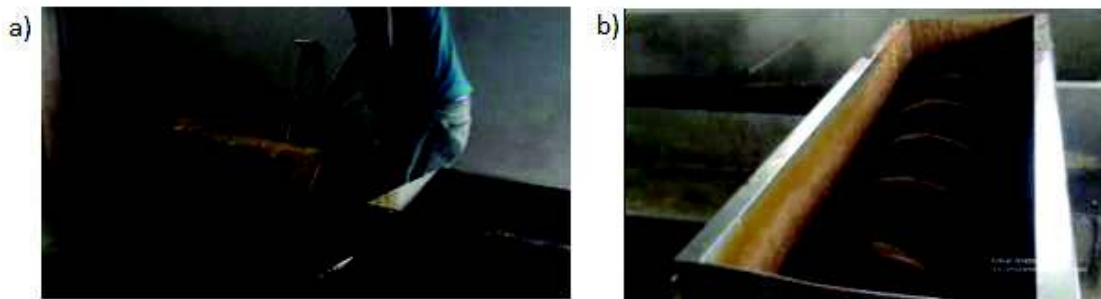


Figura 3.1. (a) depósito de mezcla y (b) inicio del proceso de pulverizado.
(Fuente: Propia)

Una vez terminado el proceso de pulverizado se obtiene la panela granulada, ver Figura 3.2 (a). Finalmente, la panela en polvo es desalojada del recipiente de mezclado por medio de una válvula mariposa, como se muestra en la Figura 3.2 (b).

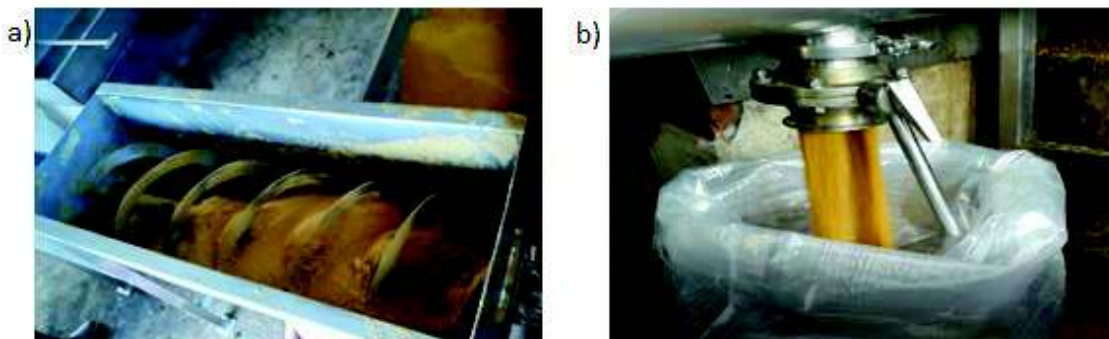


Figura 3.2. (a) obtención de la panela granulada y (b) vaciado de la panela granulada.
(Fuente: Propia)

3.2. Discusión

Dentro de las pruebas de funcionamiento de la máquina pulverizadora se obtuvo un tiempo promedio de trabajo de 15 minutos y un tiempo de vaciado de 3 minutos para la elaboración de 150 kilogramos de panela granulada, comparado con el proceso artesanal que requiere un tiempo promedio de 27 minutos para la misma cantidad de panela. Dichos resultados generarán un incremento en la capacidad de producción de la empresa, así como, disminución del tiempo de trabajo en un 50% y ocupación de mano de obra en otras actividades que generen un mayor aprovechamiento de los recursos a consecuencia de la tecnificación del proceso de pulverizado.

4. CONCLUSIONES

- Se culminó exitosamente con el objetivo del proyecto de titulación, el cual consistió en diseñar, construir, montar y realizar pruebas de funcionamiento de la máquina pulverizadora para la asociación de pequeños productores Maquita, contribuyendo así a satisfacer sus necesidades.
- El diseño concurrente de Riba permitió establecer diferentes alternativas de diseño para cada módulo, lo cual facilitó la generación de un diseño conceptual de la máquina a fabricar.
- Para el desarrollo de la máquina se tomaron en cuenta diferentes variables físicas, tales como: cambios de fase presentes en la miel a lo largo de las etapas de pulverizado, temperatura de trabajo, selección de materiales para el manejo de alimentos, capacidad de carga requerida por la empresa, factores fundamentales que intervinieron directamente en el diseño y construcción de la máquina.
- Con la implementación de la máquina en el proceso de pulverizado de la empresa, se logró mejorar las condiciones de trabajo de los operarios, reduciendo los riesgos físicos, tales como: quemaduras, inhalación de vapores y fatiga muscular, así como una mejora en la calidad e higiene del producto pulverizado.
- Con la tecnificación del proceso de pulverizado se logró una reducción del tiempo de trabajo en un 50% en comparación con el proceso manual.

- El costo total requerido para la construcción de la máquina pulverizadora alcanzó un valor de \$4031,17, el cual considera: costos de materiales, mano de obra, elementos normalizados, utilidad y diseño.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un estudio de la pulverización de la miel de caña a panela en polvo para diferentes velocidades de rotación de la hélice, con la finalidad de disminuir el tiempo de procesamiento.
- Para trabajos futuros se recomienda estudiar la implementación de sistemas de enfriamiento que optimicen el proceso de pulverizado.

Referencias Bibliográficas

- Albiz. (2010). *Albiz*. Obtenido de <https://ciudad-buenos-aires.all.biz/amasadora-y-mezcladora-m60-kg-g34929>
- ATPP. (2008). *Aplicaciones Técnicas Procesos Productivos*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2017, de [http://www.atpplleal.com/Pujat/file/ATPP%20LLEAL%20-%20MDB%20-%20MEZCLADOR%20BICONICO%20V-ESP%20\(P\).pdf](http://www.atpplleal.com/Pujat/file/ATPP%20LLEAL%20-%20MDB%20-%20MEZCLADOR%20BICONICO%20V-ESP%20(P).pdf)
- AWS. (2010). *Structural Welding Code-Steel* (Edición 22. ed.). AWS D1.1D1.1M:2010.
- Becaria. (2015). *Becaria*. Recuperado el 23 de Niviembre de 2017
- BKB. (2018). *Catálogo de motores Rossi*. Quito: Rossi.
- Brunelli, J. L. (6 de Agosto de 2013). *Slide Share*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2017, de <https://es.slideshare.net/JoseLuisBrunelli/agitadores-25010350>
- Cengel, J. (2006). *Mecánica de fluidos*. México DF: McGraw-Hill.
- Chuang, J. (2012). *Jaw Chuang Machinery*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2017, de <http://www.jawchuang.com/product/42574.html>
- Enríquez, G. (2013). *Manual de Sistemas Eléctricos Industriales y Comerciales* (1era ed.). México: Limusa S.A.
- Equipos y Herramientas. (13 de Abril de 2009). *Equipos y herramientas*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2017, de <http://eqyherramientas.blogspot.com/2009/04/operaciones-unitarias-la-reduccion-de.html>
- Gere, J. (2004). *Mechanics of Materials*. USA: Thomson.
- INEN. (2002). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2332:2002 Panela Granulada. Requisitos. Quito, Ecuador.
- Manufactura, D. (2015). *DeinMa*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2017, de <http://www.deinma.com.mx/mezcladora-horizontal.html>
- Maquita. (2017). *Convenio de comercialización proveedor - comprador*. Quito - Ecuador.
- Mott, R. (2009). *Resistencia de materiales*. México: PEARSON.

- Mott, R. L. (2006). *Diseño de elementos de máquinas* (Cuarta ed.). Naucalpan de Juárez-México: Pearson Educación.
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de máquinas* (Cuarta ed.). Naucalpan de Juárez, México: Pearson Education.
- Pisarenko, G., Yákovlev, A., & Matvéev, V. (1979). *Manual de resistencia de materiales*. Rumania: Mir.
- PremierTech. (2017). *PremierTech*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2017, de <https://www.ptchronos.com/es-ar/productos/manipulacion-y-procesamiento-a-granel/mezcladores/>
- Pulvex. (2010). *Pulvex MR*. Recuperado el 20 de Enero de 2018, de <https://maquinariapulvex.com/molino-rallador.html>
- Quezada, W. F. (2007). *Guía Técnica de Agroindustria Panelera*.
- Quizanga, V. C. (2009). *Diseño del plan y documentación para la implementación de nuevas prácticas de manufactura para la elaboración de la panela granulada en la planta INGAPI*. Quito-Ecuador .
- Riba, C. (2002). *Diseño Concurrente*. Barcelona - España: UPC.
- Shigley. (2008). *Diseño en Ingeniería mecánica de Shigley* (Octava ed.). México: McGraw-Hill.
- Silva. (20 de Julio de 2018). *Normas Técnicas complementarias para el diseño y construcción de estructuras metálicas*.
- SKF. (2006). *Catálogo General SKF*. Suecia: Grupo SKF.
- Technology, P. (21 de Diciembre de 2015). *University of bangladesh*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2017, de <https://www.slideshare.net/Reyaz007/pharmaceutical-technology-56346295>

Anexos

ANEXO I. Casa de la calidad

ANEXO II. Estructura funcional

ANEXO III. Catálogo de planchas de acero inoxidable AISI 304

ANEXO IV. Catálogo de ejes de acero inoxidable AISI 304

ANEXO V. Catálogo de rodamientos SKF

ANEXO VI. Catálogo de chumaceras SKF

ANEXO VII. Catálogo del motorreductor Rossi 2Hp

ANEXO VIII. Catálogo de tubos cuadrado y redondo de acero inoxidable AISI 304

ANEXO IX. Planos de la máquina pulverizadora