DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE UNA PLANTA DESTINADA A LA PRODUCCIÓN DE EXTRACTOS VEGETALES MEDIANTE EL MÉTODO DE EXTRACCIÓN DE DISPERSIÓN EN LA FASE SÓLIDA – MSPD, CON SISTEMA DE RECUPERACIÓN DEL SOLVENTE

JUAN DAVID ARGÜELLO PLATA

ÓSCAR ALFONSO GÓMEZ SEPÚLVEDA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECANICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2017

DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE UNA PLANTA DESTINADA A LA PRODUCCIÓN DE EXTRACTOS VEGETALES MEDIANTE EL MÉTODO DE EXTRACCIÓN DE DISPERSIÓN EN LA FASE SÓLIDA – MSPD, CON SISTEMA DE RECUPERACIÓN DEL SOLVENTE

JUAN DAVID ARGÜELLO PLATA

ÓSCAR ALFONSO GÓMEZ SEPÚLVEDA

Trabajo de Grado para optar al título de

INGENIERO MECÁNICO

Director

OMAR A. GÉLVEZ AROCHA

Ingeniero Mecánico

Codirectores

JAIRO RENÉ MARTÍNEZ

Químico Ph.D.

DIEGO CAMILO DURÁN GARCÍA

Químico Ph.D.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECANICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA

2017

DEDICATORIA

A mis padres y hermano: Ángel Argüello, Martha Plata y Daniel Argüello. Les dedico esta humilde obra a ustedes, mi familia, el motor de mi vida.

Finalmente a ti, el lector de esta obra. Deseo que mi esfuerzo y dedicación a este trabajo te sirva para mejorar la calidad de vida de nuestra sociedad.

Juan David Argüello Plata

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi madre Zoraida Sepúlveda Jaimes y mi padre Alfonso Gómez Campos quienes con su esfuerzo y sacrificio me apoyaron en todo momento.

A mi hermana Marisol Gómez Sepúlveda que a pesar de las diferencias que tuvimos, me ofreció buenos consejos para ser una mejor persona.

A mis amigos quienes me mostraron mejores maneras de hacer las cosas y aprender en la senda de la vida.

A Alejandra Torres, una gran mujer, quien me enseñó el camino de Dios, iluminó mis noches con su bella sonrisa y edificó mi personalidad.

Alejandra Torres….

Para todas las personas que me apoyaron….obrigado.

Óscar Alfonso Gómez Sepúlveda

AGRADECIMIENTOS

A Dios por su eterna compañía en el camino de mi vida.

A mis padres, por su amor y apoyo constante e incondicional. Gracias por ayudarme a definir el tipo de hombre que soy.

A Óscar Alfonso, amigo y compañero de lucha.

Al profesor Omar, que gracias a su alta exigencia y a su aporte en este trabajo, pude alcanzar este sueño.

A todos mis profesores, sin los conocimientos adquiridos gracias a ustedes, el desarrollo de este proyecto habría sido imposible.

A nuestros codirectores: Camilo y Jairo, por orientarnos en la realización de nuestro proyecto de grado.

A mis amigos, por su alegría y buena vibra.

Finalmente a mis compañeros, por su ayuda y apoyo.

Juan David Argüello Plata

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primeramente a Dios, por su apoyo incondicional, por indicarme el camino correcto y llevarme hasta donde estoy.

A la universidad, por permitirme ser parte de esta gran institución y ser un profesional.

A mi compañero de proyecto, que con un trabajo mancomunado logramos sacar adelante este proyecto.

Muchas gracias a mis padres, que con su dedicación fue posible alcanzar este logro.

Finalmente agradecer a todas esas personas que me acompañaron en este camino, por todas esas experiencias compartidas, por el conocimiento aportado y su afecto entregado.

Óscar Alfonso Gómez Sepúlveda

CONTENIDO

Pág.

INTRODUCCIÓN 22
1. ALCANCE DEL PROYECTO 23
1.1 OBJETIVO GENERAL 23
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 23
2. GENERALIDADES DE LOS EXTRACTOS VEGETALES 25
2.1 COMPOSICIÓN DE LOS EXTRACTOS 26
2.2 EXTRACCIÓN POR EL MÉTODO MSPD 26
2.2.1 Principios generales del método MSPD (Matrix Solid Phase Dispersion). ... 27
2.3 EXTRACCIÓN POR SOXHLET 28
2.4 OTROS MÉTODOS PARA OBTENER EXTRACTOS VEGETALES 29
2.4.1 Extracción asistida por ultrasonido (USAE). 29
2.4.2 Extracción en fase sólida (SPE) 30
2.4.3 Extracción con fluido supercrítico (SFE) 30
3. SISTEMAS DE TRITURACIÓN 31
3.1 MÉTODOS DE TRITURACIÓN 31
3.1.1 Molino de bolas 31
3.1.2 Molino de martillos 32
3.1.3 Molino de rodillos 32
3.2 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE TRITURACIÓN 33
3.3 COMPONENTES DE UN MOLINO DE BOLAS 33
3.3.1 Sistema de trituración y extracción por solvente 34
3.3.2 Sistema de transmisión de potencia 34
3.3.3 Sistema de almacenamiento y separación 35

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 36
4.1 RESTRICCIONES 37
4.1.1 Restricciones del sistema de trituración 37
4.1.2 Restricciones del sistema de transmisión de potencia 37
4.1.3 Restricciones sistema de separación de sustancias 37
4.1.4 Restricciones del recuperador de solvente 37
4.2 ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE TRITURACIÓN 38
4.2.1 Especificaciones de criterio 38
4.2.2 Concretización de los criterios de diseño 38
4.3 ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE SOLVENTE 39
4.3.1 Especificaciones de criterio 39
4.3.2 Concretización de los criterios de diseño 39
5. DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE TRITURACIÓN 40
5.1 DISEÑO DEL PROTOTIPO 40
5.1.1 Dimensionamiento funcional del molino 40
5.1.2 Diseño de la transmisión de potencia 46
5.1.3 Diseño estructural del molino 64
5.1.4 Diseño de las aletas del molino 74
5.2 DISEÑO DE LA PLANTA DE TRITURACIÓN 76
5.2.1 Diseño funcional 76
5.2.2 Diseño de la transmisión 78
5.2.3 Diseño estructural 82
5.3 SELECCIÓN DEL FILTRO 87
6. DISEÑO DEL SISTEMA TÉRMICO DE RECUPERACIÓN DEL ETANOL 88
6.1 DISEÑO TÉRMICO 89

6.1.1 Evaporador 90
6.1.2 Condensador 93
6.1.3 Torre de enfriamiento 96
6.1.4 Calentamiento por resistencia eléctrica 96
6.2 DISEÑO MECÁNICO 98
7. PROCESOS DE MANUFACTURA 101
7.1 SISTEMA DE TRITURACIÓN 101
7.1.1 Tambor 102
7.1.2 Aletas. 103
7.1.3 Tapas. 103
7.1.4 Estructura del tambor 104
7.1.5 Estructura del sistema 104
7.2 EVAPORADOR AL VACÍO 105
7.2.1 Evaporador. Las partes del evaporador al vacío son: 106
7.2.2 Condensador 107
8. PRUEBAS Y ENSAYOS 108
8.1 PRUEBAS SOBRE EL EQUPO 108
8.1.1 Funcionalidad 108
8.1.2 Consumo energético 109
8.1.3 Confiabilidad 109
8.2 PRUEBAS SOBRE EL PRODUCTO 112
8.2.1 Masa del extracto 112
8.2.2 Composición Química 114
9. VIABILIDAD ECONÓMICA 116
9.1 ANÁLISIS ECONÓMICO 117

9.1.1 Tasa interna de retorno (TIR) 119
10. CONCLUSIONES 120
11. RECOMENDACIONES 122
BIBLIOGRAFÍA 123
ANEXOS 125

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Componentes de los extractos. 26

Tabla 2. Valores típicos de densidad, viscosidad y coeficiente de difusión, para el CO2. 30

Tabla 3. Resultados del diseño funcional 46

Tabla 4. Etapas de la transmisión 48

Tabla 5. Factor de servicio. 49

Tabla 6. Diámetros dados recomendados de las poleas pequeñas según el tipo de correa. 50

Tabla 7. Valor del factor “j” según el tipo de correa. 51

Tabla 8. Cálculo de los diámetros primitivos y exteriores de las poleas.....51

Tabla 9. Resultados diseño conceptual de la transmisión por correas.....55

Tabla 10. Tipos de poleas por cada perfil de garganta en función del diámetro exterior de la polea. 56

Tabla 11. Dimensiones de la llanta para el tipo de correa especificado.....59

Tabla 12. Resultados del dimensionamiento funcional. 77

Tabla 13. Etapas de la transmisión de la planta.....78

Tabla 14. Granulometría de la arena de río. 87

Tabla 15. Datos de proceso 90

Tabla 16. Diseño térmico evaporador 91

Tabla 17. Convección externa forzada.....91

Tabla 18. Ebullición.....92

Tabla 19. Proceso iterativo evaporador 92

Tabla 20. Resultados del evaporador 93

Tabla 21. Diseño térmico del condensador.....94

Tabla 22. Flujo turbulento en tubo de cobre.....94

Tabla 23. Proceso iterativo condensador condensador 95

Tabla 24. Resultados del proceso iterativo 95

Tabla 25. Composición química de las muestras de extractos vegetales de Lippia alba 115

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Proceso realizado por el sistema. 24

Figura 2. Esquema general de la técnica de extracción por dispersión de la matriz en fase sólida. 28

Figura 3. Extractor de Soxhlet. 28

Figura 4. Diferencia de concentración. 29

Figura 5. Muestra el funcionamiento básico de un molino de bolas. 32

Figura 6. Interior del molino de martillos. 32

Figura 7. Molino de Rodillos. 33

Figura 8. Molino de bolas. 34

Figura 9. Transmisión de potencia por banda y caja reductora. 35

Figura 10. Tanque de almacenamiento. 35

Figura 11. Relación de volumen de carga con respecto al volumen del tambor. 40

Figura 12. Análisis dinámico de una bola dentro del molino 42

Figura 13. Diagrama de cuerpo libre del molino de bolas. 44

Figura 14. Muestra el centro de masa de la carga. 45

Figura 15. Transmisión. 47

Figura 16. Tipos de correas.....50

Figura 17. Factor “j” de una polea. 51

Figura 18. Distancia entre centros.....52

Figura 19. Dimensiones de la correa tipo “A”. 53

Figura 20. Muestra los tipos de poleas seleccionadas junto con sus casos particulares. 56

Figura 21. Muestra las dimensiones del chavetero. 58

Figura 22. Dimensiones de la llanta. 58

Figura 23. Dimensiones del cubo y de los brazos. 60

Figura 24. Boceto del prototipo del sistema de trituración. 61

Figura 25. Distribución de fuerzas. 62

Figura 26. Diagrama de momento torsor con respecto a la longitud del eje., fuerza cortante y momento flector, respectivamente. 63

Figura 27. Distribución de longitud del eje. 64

Figura 28. Distribución de fuerzas producidas por las bolas y el material sobre el molino junto con un esquema simplificado del desarrollo del molino en los puntos A y E. 65

Figura 29. Análisis cinemático de una bola. 65

Figura 30. Vector posición inicial junto con sus componentes. 66

Figura 31. Vector velocidad inicial junto con sus componentes. 66

Figura 32. Plano cartesiano de la tendencia de distribución del material. 67

Figura 33. Diagrama de cuerpo libre de la viga. 69

Figura 34. Dimensiones de la lámina relacionadas con el cálculo de la inercia. . 71

Figura 35. Interfaz gráfica del software desarrollado 72

Figura 36. Resultados del problema para la primera iteración. 73

Figura 37. Resultados de la simulación 74

Figura 38. Aletas del molino en la segunda iteración. 75

Figura 39. Trayectoria realizada por una bola en un molino con 6 aletas (izquierda) y la realizada por 8 aletas (derecha). 76

Figura 40. Eje principal de la planta de trituración 80

Figura 41. Esquema del tambor con todas las cargas a soportar y resultados de la simulación 85

Figura 42. Trayectoria de la bola a través del molino. 86

Figura 43. Dimensiones de la aleta. 86

Figura 44. Esquema básico 88

Figura 45. Esquema detallado del sistema 89

Figura 46. Esquema evaporador 90

Figura 47. Esquema del condensador 93

Figura 48. Esquema general del sistema térmico 97

Figura 49. Geometría de recipientes a presión 98

Figura 50. Gráfica de los componentes geométricos sometidos a presión externa o cargas de compresión (para todos los materiales) 99

Figura 51. Gráfica para determinar el espesor del casco o de componentes sometidos a presión externa desarrollados para aceros al carbono y aleaciones de acero con esfuerzos de fluencia específicos mínimos o superiores a 260 MPa y para temperaturas de 150 °C e inferiores 100

Figura 52. Movimientos de giro del prototipo.....102

Figura 53. Proceso de rolado 102

Figura 54. Rosca interna 103

Figura 55. Proceso de corte. 103

Figura 56. Corte por plasma.....104

Figura 57. Taladrado manual 104

Figura 58. Soldadura de arco eléctrico.....105

Figura 59. Prototipo para triturar 1[kg] de material por lote 105

Figura 60. Prensa hidráulica.....107

Figura 61. Mirilla del molino.....108

Figura 62. Material vegetal sin triturar (izquierda), material triturado después de 30 minutos (centro) y material triturado después de 2,5 horas (derecha).....109

Figura 63. Diferencia de tamaño de partículas desde 0,016 mm a 2 mm 110

Figura 64. Plataforma vibratoria de tamices.....110

Figura 65. Sistema de evaporación al vacío con bomba de calor 111

Figura 66. Comparación entre el etanol ingresado y el obtenido después de la separación 111

Figura 67. Extracto vegetal de Lippia alba 112

Figura 68. Rotaevaporador.....112

Figura 69. Rendimiento vs Relación másica 113

Figura 70. Diagrama de flujo 118

LISTA DE ANEXOS

Pág.

ANEXO A CATÁLOGO DE CAJAS REDUCTORAS NMRV……126.

ANEXO B. CATÁLOGO DE ACOPLES FLEXIBLES – LOVEJOY……..127.

ANEXO C. PLANOS PROTOTIPO….....128.

ANEXO D. CATÁLOGO CAJAS REDUCTORA RAMFE……..129.

ANEXO E. CATÁLOGO DE ACOPLES FLEXIBLES – MARTIN-FLEX……..130.

ANEXO F. CATÁLOGO DE TORRES DE ENFRIAMIENTO CTS……..……131.

ANEXO G. FACTORES DE FATIGA……..132.

ANEXO H. CÁLCULOS……...……...133.

ANEXO I. ANÁLISIS TUBERÍA DE COBRE...……..134.

ANEXO J. PLANOS DE LA PLANTA……...……...135.

ANEXO K. COSTOS DE INVERSIÓN DEL PROTOTIPO……..136.

ANEXO L. COSTOS DE INVERSIÓN DE LA PLANTA……..137.

ANEXO M. CROMATOGRAMAS……138.

ANEXO N. OPERACIÓN DEL EQUIPO ……142.

INTRODUCCIÓN

Uno de los procesos de producción de extractos es el método manual conocido como MSPD (dispersión de la matriz en fase sólida). Se trata de una metodología a escala de laboratorio que ha dado buenos resultados en la obtención de extractos con propiedades biológicas. En el caso de los extractos vegetales procedentes de la planta *Lippia alba* (*Familia Verbenaceae*) cuenta con el valor agregado de ser ampliamente utilizado para la elaboración de fármacos debido a que se caracterizan por sus propiedades antibióticas, antimicrobianas y antifúngicas, entre otras.

El CENIVAM (Centro Nacional de Investigaciones para la Agroindustrialización de especies vegetales aromáticas y medicinales tropicales) requiere realizar pruebas a una mayor escala para verificar la viabilidad técnica de obtener extractos mediante MSPD. Esto implica el desarrollo experimental de estudios en equipos diseñados para este proceso, los cuales no existen actualmente en el mercado, con el objetivo de aumentar la producción de extractos.

Además de automatizar este proceso, también se desea desarrollar un sistema que permita reutilizar el solvente empleado en la producción de extractos, en aras de optimizar los costos de producción.

1. ALCANCE DEL PROYECTO

1.1 OBJETIVO GENERAL

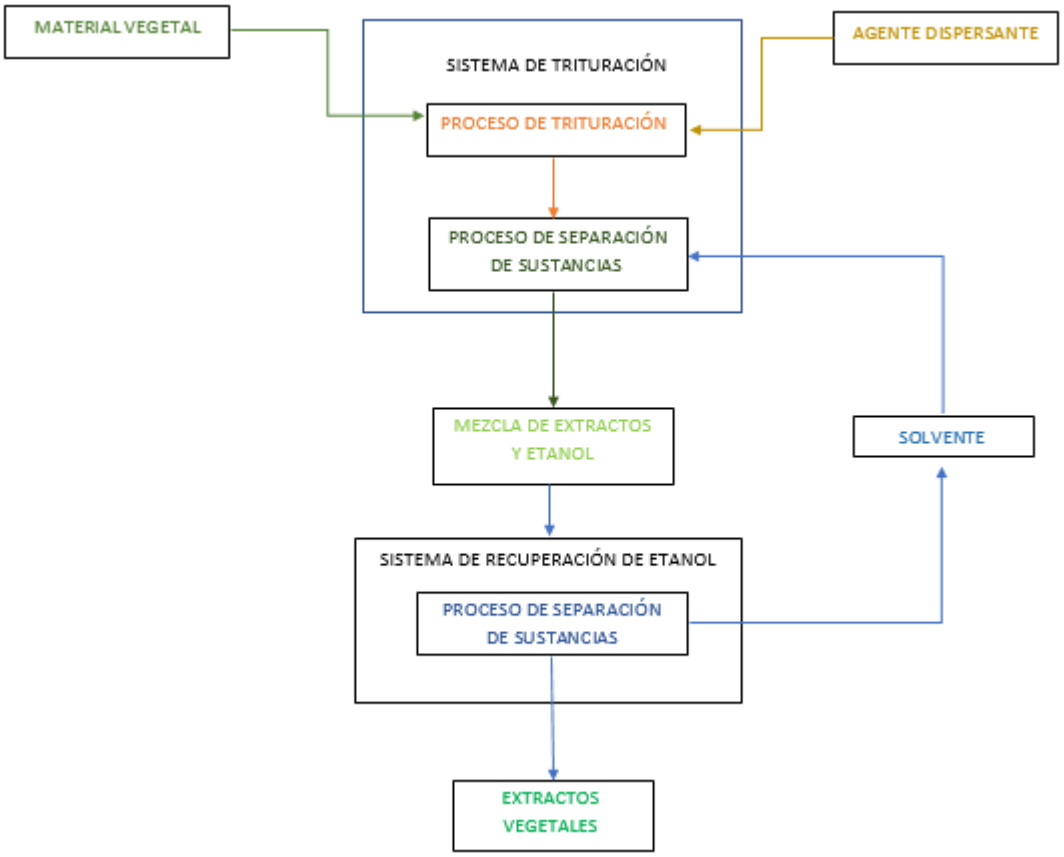
- Contribuir con el desarrollo de procesos agroindustriales relacionados con la optimización de las técnicas referentes a la obtención de extractos vegetales de las distintas plantas endémicas, cumpliendo con los objetivos misionales de la Universidad Industrial de Santander que permita incentivar el emprendimiento de la región.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un prototipo de un sistema mecánico de trituración de plantas aromáticas y de un sistema de recuperación de solvente para obtener extractos vegetales, con capacidad de trituración de 10 kg del material por lote, el cual contará con:
    - ✓ Sistema de trituración con capacidad de reducir a un tamaño uniforme de partícula.
    - ✓ Sistema de ingreso de solvente. Se ingresa en una proporción de 20 cm^3 de etanol por cada gramo de material vegetal.
    - ✓ Sistema de filtrado y descarga para separar los líquidos aprovechables de los residuos sólidos.
    - ✓ Sistema de evaporación al vacío para separar el solvente de los extractos vegetales, y poder así ser reutilizado.
- Realizar el diseño conceptual y detallado de la planta a escala real con una capacidad de 100 kg/lote de 4 lote/día.

- Desarrollar los planos de construcción y los procesos de manufactura necesarios tanto para el prototipo como para la planta.
- Construcción de un prototipo de un sistema de trituración de 1 kg/lote que permita corroborar la funcionalidad de los diseños realizados anteriormente.
- Realizar pruebas y ensayos tanto al sistema (funcionabilidad, consumo energético y confiabilidad) como al producto (masa del extracto y composición química), variando el tipo de agente dispersante utilizado.
- Desarrollar un análisis de la viabilidad en cuanto a la relación beneficio-costo; en donde se comparará el potencial económico de los extractos con respecto al valor de la inversión.

Figura 1. Proceso realizado por el sistema.



2. GENERALIDADES DE LOS EXTRACTOS VEGETALES

Las metodologías analíticas basadas en GC (*Gas Chromatography*) y HPLC (*High Performance Liquid Chromatography*) se han empleado para la separación y cuantificación de metabolitos presentes en plantas aromáticas y medicinales; entre ellas se encuentra el ácido carnósico, ácido ursólico, ácido caféico y el ácido *p*-cuomarico entre otros. Estos métodos fueron utilizados para caracterizar los aceites esenciales. Los extractos obtenidos con solvente (metanol) y mediante la extracción con fluidos supercríticos (CO_2), a partir de ramas y hojas de las plantas aromáticas pertenecientes a la familia Verbenaceae. La extracción con solvente posee una variación en su composición que incluye apigenina, quercetina y luteolina 1.

Lippia es un género que pertenece a la familia Verbenaceae que contiene alrededor de 250 especies, en su gran mayoría son hierbas y arbustos distribuidos en centro y sur América y África tropical. Estas especies tienen un valor económico, debido a que son fuente para la producción de aceites esenciales y de extractos que cuentan con varias propiedades biológicas interesantes, entre ellas: antimicrobiana, antibacterial, antifúngica, antioxidante, larvicida e insecticida, entre otras. A pesar del gran número de reportes farmacológicos que demandan estas sustancias, debido a sus propiedades, son muy pocas las plantas que han sido incluidas en las farmacopedias norteamericanas y europeas. La mayoría de los estudios sobre composición química de la *Lippia*, se encuentran enfocados hacia los aceites esenciales, y en menor proporción el estudio de los extractos, los cuales también presentan utilidad en la medicina popular 1.

---

[1]STASHENKO, Elena E., et al. Chromatographic and mass spectrometric characterization of essential oils and extracts from Lippia (Verbenaceae) aromatic plants. Bucaramanga, UIS, 2012. P. 192-202.

2.1 COMPOSICIÓN DE LOS EXTRACTOS

La Tabla 1 presenta los resultados de la cuantificación de los polifenoles mediante cromatografías líquida y gaseosa presente en los extractos obtenidos mediante la extracción con fluido supercrítico (SFE).

Tabla 1. Componentes de los extractos.

Extract	Quercetin		Naringenin		Luteolin		Apigenin		Pinocembrin	
	LC	GC	LC	GC	LC	GC	LC	GC	LC	GC
L. alba, CTa1, MeOH extract					1.41 ± 0.03	1.2 ± 0.1				
L. alba, CTa2, MeOH extract					1.86 ± 0.06	1.69 ± 0.09				
L. origanoides, CTo1, MeOH extract	0.5 ± 0.3	0.21 ± 0.4	5.56 ± 0.07	3.85 ± 0.02	3.08 ± 0.04	2.87 ± 0.06			0.7 ± 0.1	0.5 ± 0.1
L. origanoides, CTo1, CO_2 extract			0.11 ± 0.02	0.11 ± 0.02					0.05 ± 0.02	
L. origanoides, CTo2, MeOH extract carvacrol	0.57 ± 0.02	0.38 ± 0.07	5.67 ± 0.05	6.7 ± 0.3	2.92 ± 0.07	2.13 ± 0.05			0.48 ± 0.03	0.31 ± 0.04
L. origanoides, CTo2, CO_2 extract			0.09 ± 0.02	0.06 ± 0.02					0.029 ± 0.004	
L. origanoides, CTo3, MeOH extract			1.26 ± 0.02	1.1 ± 0.8	3.2 ± 0.1	2.8 ± 0.5			30 ± 1	27.3 ± 0.5
L. origanoides, CTo3, CO_2 extract			0.032 ± 0.004						0.98 ± 0.05	0.74 ± 0.05
L. citriodora, MeOH extract					0.26 ± 0.03	0.26 ± 0.03				
L. graveolens, MeOH extract	0.18 ± 0.02	0.11 ± 0.05	1.06 ± 0.02	0.91 ± 0.04	2.9 ± 0.6	2.1 ± 0.3	0.51 ± 0.01	0.11 ± 0.09		
L. micromera, MeOH extract			0.24 ± 0.05	0.11 ± 0.03			1.03 ± 0.07	0.95 ± 0.08		

Fuente: STASHENKO, Elena E., et al. Chromatographic and mass spectrometric characterization of essential oils and extracts from Lippia (Verbenaceae) aromatic plants. Bucaramanga, UIS, 2012. P. 192-202.

2.2 EXTRACCIÓN POR EL MÉTODO MSPD

La dispersión de la matriz en fase sólida (MSPD) es un proceso de preparación de muestras introducido inicialmente, en 1989 para la extracción de drogas residuales procedentes de animales. La facilidad y versatilidad de la extracción por MSPD, hacen de este método de extracción uno de los más empleados y aplicables a una larga variedad de muestras 2.

---

[2]CAPRIOTTI, Anna L., et al. Recent advances and developments in matrix solid-phase dispersion. Roma, Università di Roma, 2015. P. 186-191.

Las metodologías basadas en el empleo de sorbentes (sustancias que tienen la propiedad de extraer moléculas de otras sustancias mediante absorción) son las más empleadas para obtener un alto nivel de limpieza, alta eficiencia y análisis de rastreo de objetivos presentes en matrices complejas. Generalmente, la MSPD requiere un bajo consumo de solventes orgánicos. A pesar de que la extracción basada en esta técnica es bastante rápida, no puede ser automatizada 2. Sin embargo, el presente proyecto tiene como objetivo diseñar los equipos requeridos para emplear este método a una mayor escala ($\geq 100[kg]$).

El éxito de esta técnica se debe a su simplicidad (no requiere ninguna instrumentación o de algún equipo específico), flexibilidad y rigidez comparada con otros métodos de preparación de muestras 2.

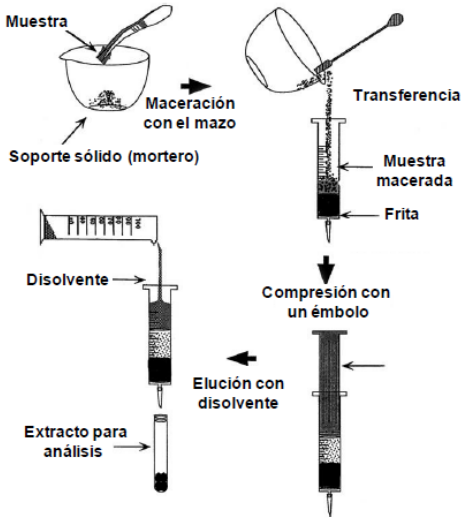
2.2.1 Principios generales del método MSPD (Matrix Solid Phase Dispersion).

El procedimiento consiste de tres pasos, como se muestra en la Figura 2. El primer paso consiste en adicionar un co-sorbente al fondo de la columna de extracción, el cual cumple la función de limpiar la muestra de SPE (extracción de fase sólida) 2.

Un gran número de materiales dispersantes han sido empleados en el método MSPD. Los soportes sólidos inertes, como la arena, tienen un rol abrasivo simple para asegurar una disrupción completa de la matriz. Materiales usados comúnmente como las fases de SPE pueden mejorar la técnica selectiva y el desempeño de limpieza en la etapa de extracción. Materiales de fase reservada (RP), como el C18 y el C8 (compuestos de sílice), son usados en la mayoría de los trabajos. La alúmina, el gel de sílice y el florisil son típicamente usados como materiales de fase normal (NP) 2.

Un parámetro crítico es la reducción entre muestra y el material sólido (1:1 a 1:4), el cual depende del tipo de muestra y las propiedades físicoquimicas del material.

Figura 2. Esquema general de la técnica de extracción por dispersión de la matriz en fase sólida.



Fuente: Barker, 2007.

El segundo paso consiste en mezclar el material triturado con un material dispersante en un mortero. Finalmente, a través de la mezcla dispersada se eluye un solvente adecuado para extraer los analitos de interés.

2.3 EXTRACCIÓN POR SOXHLET

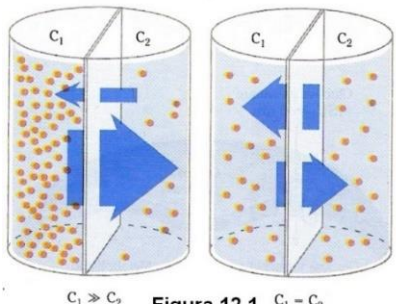
El extractor Soxhlet (Figura 3) es un sistema utilizado para la extracción de compuestos, generalmente de naturaleza lípidica, contenidos en un sólido, mediante un solvente afín.

Figura 3. Extractor de Soxhlet.

Fuente: http://www.ictsl.net/productos/vidrio/extractorsoxhlet250mlvidrioqmb.html

El extractor se utiliza para separar mezclas homogéneas sólido-líquidas (como sal y agua, por ejemplo). La mezcla homogénea se produce filtrando un disolvente mezclado con una muestra de material orgánico, donde éste atrae la sustancia de interés por diferencia de concentración, como se muestra en la Figura 4. A esta mezcla entre la sustancia de interés y el disolvente, se le incrementa su temperatura hasta que alcance el punto de ebullición, produciendo vapor saturado de disolvente; el cual llega a una unidad condensadora para su recuperación. Este disolvente recuperado se vuelve a mezclar con la muestra de material, repitiendo el proceso hasta separar, en la mayor medida posible, la sustancia de interés de la muestra.

Figura 4. Diferencia de concentración.



2.4 OTROS MÉTODOS PARA OBTENER EXTRACTOS VEGETALES

Entre los procesos de obtención de extractos destacan las nuevas tecnologías, entre las que se encuentra la extracción con fluidos supercríticos y con otros procesos extractivos convencionales, como los de extracción con solventes y por centrifugación.

2.4.1 Extracción asistida por ultrasonido (USAE). Una muestra del material vegetal seco se extrae con una cantidad aplicada de solvente en un baño ultrasónico con temperatura regulada. Se realiza un proceso de filtrado y se repite la operación dos veces o más con la misma muestra. Posteriormente, se filtran y se combinan las fracciones. Al final el solvente se evapora hasta obtener un extracto seco 3.

---

[3]ONISZCZUK, Anna., et al. Extraction methods for the determination of phenolic compounds form *Equisetum arvense* L. Herb. Lublin University, Poland, 2014.P. 378.

2.4.2 Extracción en fase sólida (SPE). La extracción en fase sólida tiene gran popularidad en la comunidad científica debido a su utilidad cromatográfica. Consiste en impregnar una muestra orgánica a un soporte sólido inerte. El método SPE realizado sobre un soporte impregnado, también conocido como extracción cromatográfica, combina las ventajas de la extracción líquido-líquido con los métodos de intercambio de iones.

2.4.3 Extracción con fluido supercrítico (SFE). Los fluidos supercríticos son sustancias cuya condición termodinámica de presión y temperatura está por encima de su punto crítico (Rosa et al.,2009). Esto les confiere propiedades que están entre las de los gases y los líquidos (Luque et al., 1993) (Véase Tabla 2). La extracción con SF-CO_2, puede ser el proceso convencional más eficaz para recuperar extractos vegetales con actividad antioxidante (Domínguez et al., 2006) 4.

Tabla 2. Valores típicos de densidad, viscosidad y coeficiente de difusión, para el CO2.

Propiedad física	CO_2		Naftaleno en CO_2
	Densidad, kg m^{-3}	Viscosidad, µPa s	Coeficiente de difusión, m^2 s^{-1}
Gas, 313 K - 0,1 MPa.	2	16	$5,1 \times 10^{-6}$
Supercrítico, 313 K.- 10 MPa.	632	17	$1,4 \times 10^{-8}$
Líquido, 300 K, - 50 MPa.	1029	133	$8,7 \times 10^{-9}$

*Adaptada de Williams y Cliford, 2000.

[4]ARIAS V., Anderson J. y RAMÍREZ P., Edwin A. Obtención de extractos con CO_2 supercrítico a escala piloto de las especies: *Rosmarinus officinalis, Salvia officinalis* y *Psidium guajava*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Bucaramanga, UIS, 2012. P. 22.

3. SISTEMAS DE TRITURACIÓN

La trituración es el nombre que reciben los distintos métodos de procesamiento de materiales que consisten en disminuir el tamaño de las partículas de un material sólido. En la química orgánica, la trituración trata sobre la purificación de los compuestos químicos brutos que contienen impurezas solubles. Los sistemas de trituración ayudan a incrementar la productividad industrial, debido a que disminuye drásticamente el trabajo manual; en la antigüedad, para realizar el proceso de trituración se requería de un numeroso grupo de trabajadores, los cuales incrementaban los costos relacionados a los productos que necesitaban de este proceso para su venta.

A continuación, se mostrarán los diferentes sistemas de trituración presentes en la industria y se evaluarán cada uno de ellos como posible solución al problema en cuestión.

3.1 MÉTODOS DE TRITURACIÓN

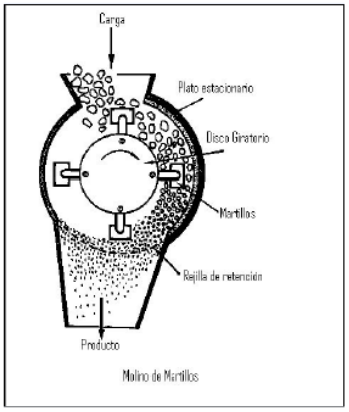
3.1.1 Molino de bolas. El molino de bolas es un sistema de trituración usado comúnmente en la industria civil para la trituración de diversos minerales para la construcción de distintos tipos de estructuras. Se caracteriza por realizar una trituración uniforme del material de interés. Consta básicamente de: un motor eléctrico, un sistema reductor de velocidad y un tambor; adentro del tambor se encuentra una cámara en la cual está tanto el material que se busca triturar como unas esferas de un material dúctil y tenaz (preferiblemente acero).

Figura 5. Muestra el funcionamiento básico de un molino de bolas.

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Molino_de_bolas

3.1.2 Molino de martillos. El molino de martillos "usa serie de masas para triturar el material, usualmente ubicados horizontalmente sobre un eje que rota. La fractura del material se produce por el choque y corte entre martillos y el material. El material molido sale a través de orificios ubicados debajo del molino".

Figura 6. Interior del molino de martillos.



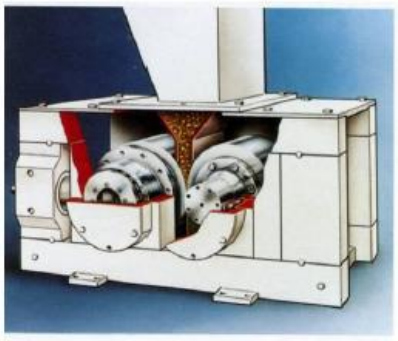
Fuente: https://www.google.com.co/search?q=molino+de+martillos

3.1.3 Molino de rodillos. El molino de rodillos es uno de los sistemas de trituración más comunes en la actualidad. Su sistema convencional está formado por dos rodillos. Los rodillos cuentan con una superficie estriada, los cuales deben girar a bajas velocidades.

"Los rodillos son regulables a precisión, con esto poco a poco se reduce la separación entre los rodillos para de esta manera ir reduciendo el tamaño de grano. Todo el proceso de molienda consiste en hacer pasar el grano a través de una serie de molinos en sección".

“Generalmente esta sección está formada por 10 molinos. El producto de cada fase es pasado por tamices de diferentes diámetros hasta llegar a la granulometría del producto final”.

Figura 7. Molino de Rodillos.



Fuente: http/www.quiminet.com/pr8Martillo%2Bde%2BReflejos.htm.

3.2 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE TRITURACIÓN

De los sistemas de trituración estudiados, se seleccionó el molino de bolas como sistema de trituración debido a que es un sistema de trituración por lotes, y no de operación de continua. Los sistemas de trituración de operación continua requieren de un proceso de pre-mezcla entre el material vegetal y el agente dispersante, lo que se traduce en mayor trabajo por parte de los operarios; mientras que el molino de bolas no lo necesita porque cuenta con la ventaja de realizar la trituración y la mezcla al mismo tiempo.

3.3 COMPONENTES DE UN MOLINO DE BOLAS

El molino de bolas es el sistema mecánico que permite una conminución acorde a las especificaciones de trituración y mezcla con solvente, por esta razón, se decidió utilizar este mecanismo para la planta de obtención de extractos vegetales.

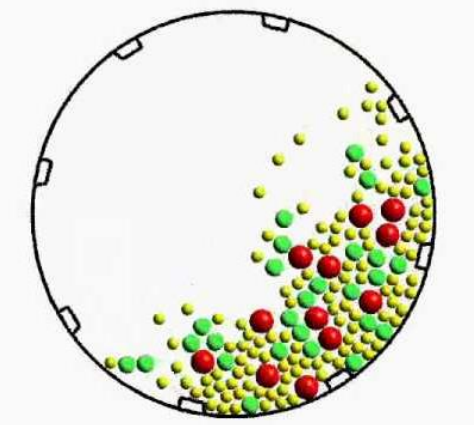
La planta a diseñar está compuesta principalmente por los siguientes subsistemas, los cuales serán objeto de diseño o selección en los siguientes capítulos.

- Sistema de trituración y extracción por solvente.
- Sistema de transmisión de potencia.
- Sistema de almacenamiento y separación.

El producto es mezclado y aplastado en el medio moledor (bolas de acero) como resultado de la rotación. Si la velocidad del molino es demasiado grande, el cilindro actuará como una centrífuga, causando que las bolas permanezcan en el perímetro del molino en lugar de caer de vuelta. El punto en el que un molino de bolas actúa como una centrífuga es llamado "Velocidad crítica".

3.3.1 Sistema de trituración y extracción por solvente. Consiste de un barril cilíndrico que contiene bolas y aletas, además de compuertas para el ingreso y salida del producto y aditivos. La rotación produce fuerzas centrifugas que levantan las bolas a una altura dada haciéndolos caer de vuelta al cilindro y sobre el material que es molido.

Figura 8. Molino de bolas.



Fuente: https://www.youtube.com/watch?v=PiPXKIhTuwU

3.3.2 Sistema de transmisión de potencia. La transmisión de potencia es la encargada de intercambiar energía mecánica utilizando el movimiento de cuerpos sólidos, como lo son los engranajes y las correas de transmisión. El sistema recomendado para transmitir la potencia en molinos de bolas es el compuesto por bandas, que reducen las vibraciones que se producen en el molino aumentando la

vida útil del equipo, y una caja reductora de engranajes que permite obtener el torque necesario para cumplir el trabajo.

Figura 9. Transmisión de potencia por banda y caja reductora.

Fuente: http://apuntes-ing-mecanica.blogspot.com.co/2016/05/friccion-en-bandas.html

3.3.3 Sistema de almacenamiento y separación. Es el encargado de almacenar la mezcla sólido-líquido que se retira del molino de bolas, además de permitir la separación de los componentes por densidades.

Consiste de un tanque de acero donde los materiales se separan por decantación y se podrá separar la parte sólida de la líquida.

Figura 10. Tanque de almacenamiento.

Fuente: http://www.ingeniarinoxidables.com/component/virtuemart/industrial/tanques-1/tanque-para-almacenamiento-rectangular-acero-inoxidable.html?Itemid=0

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para lograr un mejor desempeño en la obtención de extractos vegetales, es necesario que la conminución del material vegetal tenga la menor granulometría posible, debido a que gran parte de los extractos se encuentran dentro de las hojas y tallos de la planta. Actualmente, el centro de investigación realiza la maceración del material vegetal procedente de la *Lippia alba* de forma manual, donde se combina una pequeña cantidad del material con un agente dispersante, para luego realizar la dispersión de la matriz sólida empleando una solución acuosa de etanol; los procesos posteriores involucran el uso de medios de separación de fluidos. Se necesita de una planta de trituración cuya capacidad sea de 100 kg de material vegetal por lote, 4 lotes/día; la solución es la implementación de un molino de bolas que triture el material vegetal por impacto y fricción en un medio arenoso. La planta de trituración consta de los siguientes subsistemas:

- Sistema de trituración y extracción por solvente.
- Sistema de transmisión de potencia.

Para facilitar el diseño de la planta requerida se desarrolla un prototipo que triture 1 kg por lote y se evalúa su desempeño mediante pruebas de funcionalidad, consumo energético y confiabilidad; mientras que al producto obtenido se le realizarán pruebas que evalúe la masa del extracto y la composición química.

Para mejorar la capacidad de la planta y obtener la mayor cantidad de extractos se realiza el diseño de un sistema recuperador de solvente que permita purificar el etanol para su posterior reutilización en el mismo proceso. El sistema consta de los siguientes componentes:

- Evaporador
- Condensador
- Tanques intermedios
- Bomba de Vacío
- Bombas centrífugas

- Torre de enfriamiento

4.1 RESTRICCIONES

4.1.1 Restricciones del sistema de trituración

- La planta debe triturar 100 kg/lote, y el prototipo diseñado debe triturar 10 kg/lote.
- La cantidad de arena ingresada al sistema de trituración debe tener cinco veces el peso del material vegetal ingresado 1.

4.1.2 Restricciones del sistema de transmisión de potencia

- La transmisión debe ser por correas y por trenes de engranajes, debido a que la transmisión por correas puede absorber las vibraciones producidas en el proceso de trituración.

4.1.3 Restricciones sistema de separación de sustancias

- Después de la trituración, el molino se debe colocar en posición vertical para verter el solvente y obtener una mezcla de etanol con extractos.

4.1.4 Restricciones del recuperador de solvente

- Se debe usar una proporción de $20[cm^3]$ de etanol por cada gramo de material vegetal 1.
- La temperatura de evaporación del solvente no debe exceder los 40 grados Celsius, debido a la degradación de los extractos a una temperatura mayor 1.
- Fácil desmontaje para recuperación de producto adherido a las paredes del evaporador y mejorar las operaciones de mantenimiento.
- Para disminuir la temperatura del agua se empleará una torre de enfriamiento.

---

[5]PERRY, Robert H., GREEN, Den W., MALONEY, James O. Manual del ingeniero químico: Tomo II. Sexta edición. P. 8-22 – 8-40.

4.2 ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE TRITURACIÓN

Las especificaciones de la planta de trituración por impacto en un medio arenoso son:

4.2.1 Especificaciones de criterio

Se tienen en cuenta las siguientes consideraciones.

- El tamaño más grande de las bolas, del molino, es de 5 pulgadas de diámetro5.
- La relación longitud-diámetro del molino está en un rango entre 1,5 y 3.
- Los materiales más utilizados en la industria son bolas de acero y de alúmina recubiertas en caucho dependiendo de la aplicación 5.
- Se sugiere que el volumen ocupado por la carga (material vegetal, bolas y arena) dentro del molino se encuentre entre el 40% y el 60% del volumen total del mismo 5.
- El volumen ocupado por las bolas debe estar entre el 10% y el 30% del volumen del molino 5.
- Se recomienda que la velocidad rotacional de operación sea del 80% del valor de la velocidad crítica 5.
- La densidad de las hojas secas de la *Lippia alba* es de $300[kg/m^3]$ 6.
- Para garantizar el óptimo funcionamiento del sistema, se recomiendan factores de seguridad que estén entre 2 y 4.

4.2.2 Concretización de los criterios de diseño

- La relación longitud-diámetro del molino será de 2.
- Se utilizarán bolas de aluminio debido a que se trabajará con material orgánico.
- La carga del molino ocupará la mitad del diámetro del molino.
- El volumen de las bolas ocupará el 10% del volumen del molino.
- La velocidad de rotación será 0,8 veces la velocidad de rotación máxima del molino.
- Se utilizará un factor de seguridad de 2.

---

[6]LÓPEZ A., Edinson y CARVAJAL A.,]Jose Diseño y construcción de una planta para la extracción de aceites esenciales con capacidad para 300 kg de material vegetal. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga, UIS, 2014. P. 3-20.

4.3 ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE SOLVENTE

Las especificaciones de sistema de recuperación de solvente(etanol) son las siguientes:

4.3.1 Especificaciones de criterio

- Las condiciones ambientales promedio (según el Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales – IDEAM) del lugar (Bucaramanga, Colombia) donde se desarrolla el proyecto son las siguientes:
  - ✓ Presión atmosférica: 90,66 [KPa].
  - ✓ Temperatura media: 28[°C]
  - ✓ Humedad promedio: 70%
  - ✓ Temperatura de bulbo húmedo promedio: 23[°C]
- La temperatura de evaporación debe estar entre 28 [ºC] y 40[°C].
- El flujo másico de vapor de solvente es de $250[kg/h]$ debido a que se necesitan evaporar 400 litros de solvente por lote.

4.3.2 Concretización de los criterios de diseño. Se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- La temperatura de evaporación seleccionada para el diseño es del sistema recuperador de solvente es de 34 grados Celsius.

5. DISEÑO DE LOS SISTEMAS DE TRITURACIÓN

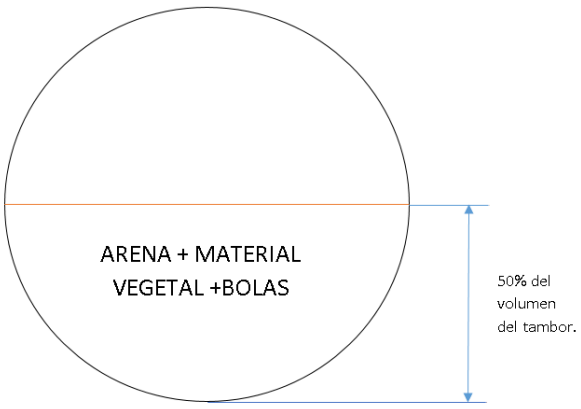
5.1 DISEÑO DEL PROTOTIPO

El diseño detallado busca definir el dimensionamiento funcional del molino de bolas, el sistema de transmisión de potencia y el diseño estructural del mismo.

5.1.1 Dimensionamiento funcional del molino. El dimensionamiento funcional tiene por objeto determinar la potencia mínima que garantice el funcionamiento del sistema, para ello es necesario conocer: el número de bolas del molino, el diámetro y la longitud de la planta de trituración y la velocidad de rotación óptima del mismo.

5.1.1.1 Determinación del número de bolas, diámetro y longitud del molino. Para conocer el número de bolas del sistema de trituración, el diámetro y la longitud del molino, es necesario, primero, conocer la distribución del material dentro del mismo.

Figura 11. Relación de volumen de carga con respecto al volumen del tambor.



$$V = 2 * (V_{arena} + V_{m.v.} + V_{Tb}) \ \ (Ecuación\ 1)$$

Donde: V_{arena} es el volumen ocupado por la arena, $V_{m.v.}$ el volumen ocupado por el material vegetal y V_{Tb} es el volumen ocupado por todas las bolas.

Teniendo en cuenta los criterios de diseño mostrados en la sección 4.2.2, y tomando la densidad del material vegetal de $300[kg/m^3]$, se tiene que:

$$V_{m.v.} = \frac{m_{m.v.}}{\rho_{m.v.}} = \frac{10[kg]}{300[kg/m^3]} \rightarrow V_{m.v.} = 33{,}33[L]$$

Conociendo la cantidad de arena ingresada al sistema, se tiene que:

$$V_{arena} = \frac{m_{arena}}{\rho_{arena}} = \frac{50[kg]}{1500[kg/m^3]} \rightarrow V_{arena} = 33{,}33[L]$$

Teniendo en cuenta que uno de los criterios de diseño seleccionados fue que el volumen ocupado por las bolas es del 10% del volumen del molino, se tiene lo siguiente:

$$V_{Tb} = 0{,}1V \Longrightarrow V_{Tb} = 0{,}2(V_{arena} + V_{m.v.} + V_{Tb})$$

$$\Longrightarrow V_{Tb} = 0{,}25(V_{arena} + V_{m.v.}) = 0{,}25(96{,}15 + 33{,}33) \rightarrow V_{Tb} = 16{,}67[L]$$

Para determinar el número de bolas del molino (de 7 centímetros de diámetro), se utiliza la siguiente relación matemática.

$$V_{Tb} = N_b * \left[\frac{4}{3}\pi\left(\frac{D_b}{2}\right)^3\right] \Longrightarrow N_b = \frac{6V_{Tb}}{\pi D_b^3} \rightarrow N_b = 92{,}8 \approx 93$$

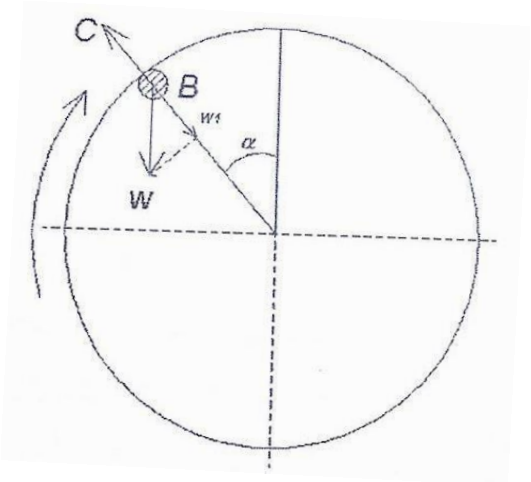
Retomando la Ecuación 1, el volumen total del molino es de 323,7[L]. Teniendo en cuenta que se tomó una relación longitud-diámetro de 2 para el tambor, y recordando que el volumen del molino es $\frac{\pi}{4}D^2L$, se obtiene lo siguiente.

$$V = \frac{\pi}{4}D^2(2D) \Longrightarrow V = \frac{\pi}{2}D^3 \Longrightarrow D = \sqrt[3]{\frac{2V}{\pi}} \rightarrow D = 47{,}34[cm]$$

$$L = 94{,}68[cm]$$

5.1.1.2 **Velocidad de rotación del molino.** El siguiente análisis dinámico se realiza para obtener la relación matemática que permita conocer la velocidad crítica de rotación del molino y con ella obtener la velocidad óptima del mismo.

Figura 12. Análisis dinámico de una bola dentro del molino



Fuente: CARREÑO GUTIERREZ, Jaime Alberto y FLOREZ MARTÍNEZ, Ramón A. Diseño y construcción de un molino para pequeña minería de oro. Bucaramanga, 2002. P. 6. Trabajo de grado (Ingeniero Mecánico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físicomecanicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.

El análisis para determinar la velocidad de rotación óptima se basa en principio de que la velocidad de rotación mínima debe hacer que las bolas se mantengan adheridas a la superficie del molino, de acuerdo a la Figura 12, para que esto se cumpla, la fuerza centrífuga debe ser igual a la componente del peso en la dirección radial contraria.

$$C = W_1 \ \ (Ecuación\ 2)$$

La fuerza centrífuga es el producto de la masa de la partícula con respecto a la aceleración de la misma 7.

$$\vec{C} = m\vec{a}_p \ (Ecuación\ 3)$$

La aceleración absoluta implica la suma de tres aceleraciones: aceleración rotacional, aceleración relativa y la aceleración de Coriolis 7.

$$\vec{a}_p = \ddot{\vec{V}}_p = \dot{\vec{\omega}}x\vec{r} + \vec{\omega}x(\vec{\omega}x\vec{r}) + 2\vec{\omega}x\left(\dot{\vec{r}}\right)_{rot} + \left(\ddot{\vec{r}}\right)_{fijo} \quad (Ecuación\ 4)$$

[7]BEER, F., JOHNSTON, R., CORNWELL, P. Mecánica vectorial para ingenieros: Dinámica. P. 977-978. McGraw-Hill.

La velocidad de rotación del molino es constante, lo que implica que la aceleración de la partícula se comporte bajo la siguiente relación matemática.

$$\vec{a}_p = \vec{\omega} x (\vec{\omega} x \vec{r}) \ \ (Ecuación\ 5)$$

La magnitud del vector fuerza centrífuga es:

$$C = m(\omega^2 r) \Rightarrow C = \left(\frac{W}{g}\right)\left[\left(\frac{V}{r}\right)^2 r\right] \Rightarrow$$

$$C = \frac{W * V^2}{r * g} \ \ (Ecuación\ 6)$$

De la Ecuación 6, C es la magnitud de la fuerza centrífuga mostrada en la Figura 12, W es el peso de la esfera, V es la magnitud de la velocidad, r es el radio del tambor y g es la magnitud de la aceleración gravitacional.

$$W_1 = W * cos\,\alpha \ \ (Ecuación\ 7)$$

La ecuación 7 muestra la componente del peso en dirección radial. Retomando la ecuación 2, y relacionándola con las ecuaciones 6 y 7, se tiene:

$$\frac{W * V^2}{r * g} = W * \cos\alpha \rightarrow \frac{W * [2 * \pi * r * N(\alpha)]^2}{r * g} = W * \cos\alpha \ \Rightarrow$$

$$\Rightarrow N(\alpha) = \sqrt{\frac{g * \cos\alpha}{4 * \pi^2 * r}}\ (Ecuación\ 8)$$

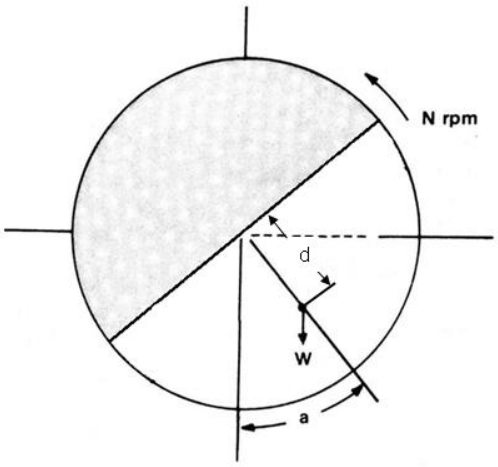
Observando la ecuación 8, se puede detallar que el valor máximo al que debe girar el molino de bolas se encuentra cuando α es cero.

$$N_{máx} = \sqrt{\frac{g}{4 * \pi^2 * r}} \ \ (Ecuación\ 9)$$

De la ecuación 9, se tiene que la velocidad máxima de rotación es de 62 [rpm]. Retomando el criterio planteado en la sección 4.2.2, la velocidad de rotación del molino es de 49 [rpm].

5.1.1.3 Potencia teórica y distancia al centro de masa desde el centro geométrico. Para el cálculo de la potencia mínima que garantice el funcionamiento del sistema de trituración, se realiza el siguiente análisis dinámico.

Figura 13. Diagrama de cuerpo libre del molino de bolas.



Fuente: https://www.911metallurgist.com/blog/ball-mill-design-power-example-calculation

$$Pot = T * \omega; T \equiv [N * m] \ (Ecuación\ 10)$$

$$\omega = N * \left(\frac{\pi}{30}\right) \ [rad/s]; N \equiv [rpm] \ (Ecuacón\ 11)$$

$$T = F.S * W * d * \sin(a)\,; W \equiv [N] y\ d \equiv [m] \ (Ecuación\ 12)$$

De la ecuación 12, F.S es el factor de seguridad necesario para garantizar el arranque del sistema, W es el peso de la carga y d es la distancia desde el centro geométrico hasta el centro de masa de la carga. La acumulación del material mostrado en la Figura 13 ocurre a un ángulo (a) de 22,5 grados.

Reemplazando las ecuaciones 11 y 12 en la ecuación 10, se obtiene lo siguiente.

$$Pot = F.S * W * d * \sin(a) * N * \left(\frac{\pi}{30}\right) \ (Ecuación\ 13)$$

La carga total del molino se determina sumando la carga producida por las bolas, por el material vegetal y por la arena. Conociendo la masa tanto del material vegetal

como de la arena (relación másica 5:1), y multiplicándola por el valor de la gravedad (se tomará un valor de $9{,}81[m/s^2]$) se obtiene el valor de las cargas proporcionadas por éstas. El peso de las bolas se obtiene de la siguiente forma.

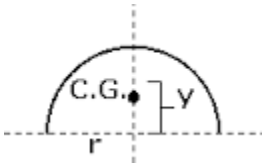
$$W_b = N_b \rho_b V_b \quad (Ecuación\ 14)$$

Dónde: $W_b$es la carga producida por las bolas; N_b es el número de bolas; ρ_b es la densidad promedio de las bolas en g/cm^3 (lb/ft^3) y V_m es el volumen de las bolas $\left(V_b = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{D_b}{2}\right)^3\right)$.

De esta manera, el valor de la carga proporcionada por el material vegetal y la arena es de 588,6 [N] cada uno; mientras que el peso de las bolas del molino es de 392,4[N]. Es por ello que la carga total del molino es de 981[N].

Teniendo en cuenta que la carga ocupa el 50% del volumen del tambor, se puede utilizar la siguiente expresión matemática para el cálculo del centro de masa de la carga.

Figura 14. Muestra el centro de masa de la carga.



Fuente: http://www.geocities.ws/davidfisica/centrog.html

$$d = \frac{4r}{3\pi} \quad (Ecuación\ 15)$$

De la ecuación 15, r es el radio del molino.

Del sistema de ecuaciones mostrado anteriormente (Ecuaciones 13 a 15), se tiene que el valor de la potencia mínima que garantizará que el sistema funcione es de 0,52[hp].

5.1.1.4 Resultados del diseño funcional. Finalmente, los resultados obtenidos del dimensionamiento funcional son:

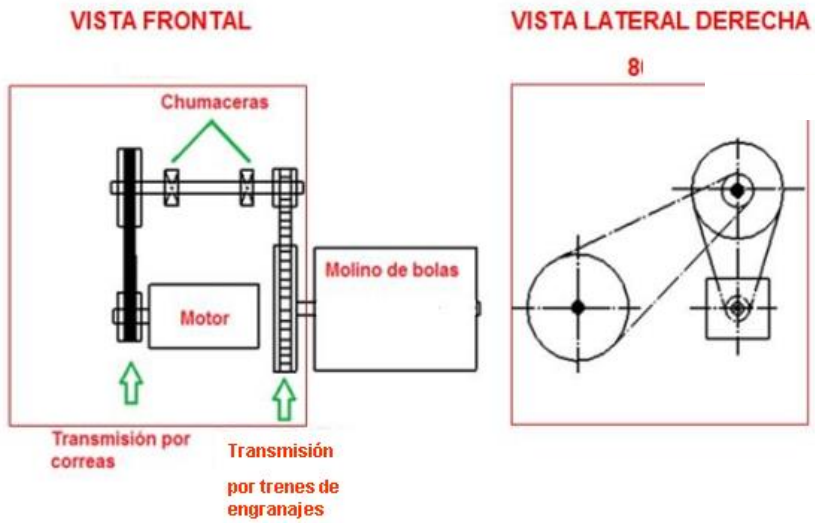
Tabla 3. Resultados del diseño funcional

RESULTADOS	
Diámetro de las bolas [cm]	7
Número de bolas	93
Diámetro del tambor [cm]	47,34
Longitud del tambor [cm]	94,68
Velocidad de operación del molino [rpm]	49
Potencia mínima [hp]	0,52

5.1.2 Diseño de la transmisión de potencia. El diseño de la transmisión tiene por objeto, primero: escoger los medios de transmisión óptimos que garanticen las demandas energéticas de la planta de trituración, y segundo: definir el diseño detallado de los medios de transmisión de potencia escogidos (transmisión por cadenas, bandas, trenes de engranajes, etc).

5.1.2.1 Planteamiento del problema. Se desea diseñar un sistema de transmisión de potencia para el prototipo de un molino de bolas el cual trabajará bajo los parámetros establecidos y mostrados en la sección 5.1.1.4. Para ello se utilizará un motor eléctrico de 1 [hp] a 1800 [rpm]. Se asumirá que la eficiencia de la transmisión por correas es del 94%, mientras que la eficiencia de la transmisión por trenes de engranajes es del 85% (Tornillo sin fin – corona). Como se muestra en la figura 15.

Figura 15. Transmisión.



5.1.2.2 Requerimientos del sistema de transmisión de potencia. Los requerimientos del sistema son los siguientes:

- La potencia a transmitir es de 1[hp] a 1800 [rpm] con un motor eléctrico.
- La velocidad de rotación de salida de la transmisión debe ser de 48[rpm]; de modo que la reducción es de 37,5.
- Se debe realizar la reducción en 2 etapas: 1). Transmisión por correas, absorbe las vibraciones producidas en el proceso de trituración; 2). Transmisión por trenes de engranajes, permite una transmisión de alto torque y presenta un diseño robusto lo que prolonga su vida útil.

5.1.2.3 Diseño conceptual de la transmisión por correas. La transmisión por correas cuenta con la ventaja de que pueden transmitir potencia a altas velocidades, además de ser un sistema de transmisión de bajo costo de inversión y mantenimiento.

Para obtener una velocidad de 48 rpm en el eje que moverá al molino, se requiere de la siguiente relación de transmisión.

$$Rel.velocidades = \frac{1800[rpm]}{48[rpm]} \rightarrow Rel.Velocidades = 37{,}5$$

Esta relación debe repartirse entre la transmisión por correas y la transmisión por trenes de engranajes. Teniendo en cuenta que se recomienda una relación de transmisión baja en la transmisión por correas para garantizar un ángulo de contacto apropiado entre la polea y la correa menor, se sugiere la relación que se muestra a continuación.

$$Rel.\ velocidades = \ i_1 * i_2 \ (Ecuación\ 16)$$

Dónde:

$i_1 =$ relación de transmisión de la primera etapa (correas).

$i_2 =$ relación de transmisión de la segunda etapa (tren de engranajes).

$i_1 = 3, i_2 = 12{,}5$

Potencia de diseño:

La potencia de diseño es el parámetro que se utiliza para dimensionar la transmisión, esta potencia es superior a la nominal y considera condiciones de funcionamiento como tipo de motor, tipo de máquina conducida y horas de servicio.

$$P_d = F_s * P_n \quad (Ecuación\ 12)$$

Dónde:

$P_d =$ Potencia de diseño.

$F_s \ =$ Factor de servicio.

$P_n \ =$ Potencia a transmitir.

Tabla 4. Etapas de la transmisión

	CORREAS	TREN DE ENGRANAJES
Relación de transmisión	3	12,5
Velocidad de entrada [rpm]	1800	600
Velocidad de salida [rpm]	600	48

Tabla 5. Factor de servicio.

MAQUINAS CONDUCIDAS	MAQUINAS CONDUCTORAS	
	Motores eléctricos *C.A. fase partida* *C.A. de jaula ardilla par normal, y sincrónicos* *C.C. devanado en derivación* *Ruedas hidráulicas Turbinas hidráulicas y de vapor* *Motores de combustión interna (transmisión hidráulica)*	*Motores eléctricos* *C.A. monofásicos devanado serie* *C.A. alto par o alto deslizamiento* *C.A. anillos rozantes* *C.A. inducción de repulsión* *C.A. con condensador* *C.C. devanado compuesto* *Máquinas de vapor y ejes de transmisión* *Embrague sobre eje conductor o conducido*
Agitadores, líquido Fresadoras para levas Transportadores, empaquetadoras Taladradoras, tornos Tornos o máquinas de roscar Pequeños ventiladores hasta 10 CV	1,1	1,2
Compresores y sopladores (giratorios) Transportadores de mineral, arena Dínamos y alternadores Ejes de transmisión o de línea Máquinas-herramientas (otras) Máquinas de imprimir Bombas (giratorias) Cizalladoras	1,2	1,4
Molinos de bolas Mezcladoras (papel) Sierras circulares Compresores (alternativos) Transportadores, de cangilones, de banda articulada, de tornillo sinfín, de cadena sinfín con arrastre Trituradoras, machacadoras, etc Molinos de martillos Pulverizadores Bombas (alternativas) Punzonadoras, prensas Hélices Tambores clasificadores, cribadoras Molinos tubulares	1,5	1,6
Cabrestantes o tornos izadores Ventiladores de minas Ventiladores de acción directa Continuas de hilar Tambores o barriles de frotación Retorcedoras (textiles)	1,6	1,8

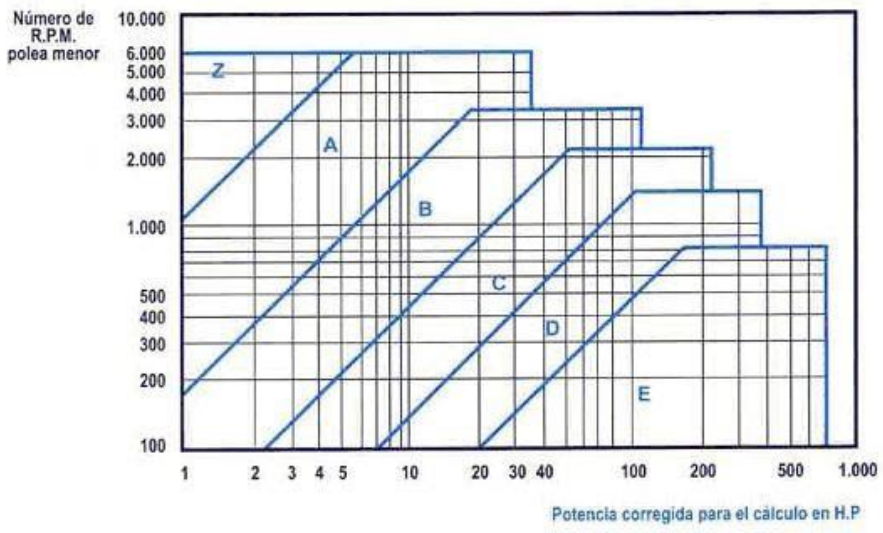
Para este caso en particular (motor eléctrico de jaula de ardilla normal y molino de bolas), el factor de servicio es de 1,5.

$$P_d = 1{,}5[hp]$$

Selección del perfil de la correa:

Con la velocidad de giro del motor (1800 rpm) y la potencia de diseño, se selecciona el perfil adecuado de la correa.

Figura 16. Tipos de correas.



Fuente: http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn121.html

A partir de los datos obtenidos y contrastándolos con la Figura 16, el tipo de correa seleccionada es la A.

Cálculo del diámetro de las poleas:

Tabla 6. Diámetros dados recomendados de las poleas pequeñas según el tipo de correa.

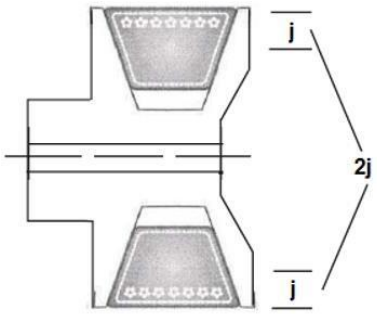
	DIÁMETRO EXTERIOR DE LA POLEA PEQUEÑA (d) EN mm	
	NORMAL	MÍNIMO
O 10 X 6	80	51
A 13 X 8	90	76
B 17 X 11	140	127
C 22 X 14	224	203
D 32 X 19	355	330
E 38 X 25	560	533

Fuente: DUNLOP. Correas de transmisión industrial [online]. Citado el 10 mayo, 2012. Extraído de internet:< http://www.martinezgambino.com.ar/catalogo_correas.pdf>.

Según la Tabla 6, para una correa tipo A, el diámetro exterior recomendado para la polea más pequeña es de 90 mm (3,5pulgadas, aproximadamente).

Las correas no trabajan sobre los diámetros exteriores de la polea, sino sobre el diámetro primitivo de las mismas, el cual depende del denominado factor "j".

Figura 17. Factor "j" de una polea.



Fuente: Rexon.

Tabla 7. Valor del factor "j" según el tipo de correa.

Tipo de correa	Valor de "j" en m.m.
O	2,5
A	3,3
B	4,2
C	5,7
D	8,1
E	9,6

Fuente: Rexon.

$$d_{pp} = d_p - 2j \rightarrow d_{pp} = 90 - 2 * 3{,}3 = 83{,}4[\boldsymbol{mm}]$$

Teniendo en cuenta la siguiente relación matemática, se obtuvieron los siguientes resultados.

$$i_1 = \frac{D_{pp}}{d_{pp}} \ (Ecuación\ 13)$$

Tabla 8. Cálculo de los diámetros primitivos y exteriores de las poleas

ítem	Descripción	Ecuaciones	Resultados	Resultados normalizados
1	Diámetro primitivo de la polea motriz [mm]	$d_{pp} = d_p - 2j = 90 - 2 * 3{,}3$	83,4	95
2	Diámetro primitivo de la polea conducida [mm]	$D_{pp} = i_1 * d_{pp} = 3 * 83{,}4$	250,2	272,8
3	Diámetro exterior de la polea motriz [mm]	(Ver Tabla 5)	90	101,6
4	Diámetro exterior de la polea conducida [mm]	$D_p = D_{pp} + 2j = 250{,}2 + 2 * 3{,}3$	256,8	279,4

$$i_{1;normalizado} = \frac{272{,}8}{95} = 2{,}87$$

Porcentaje de error:

$$i_{1;normalizado} = \frac{RPM_{motor}}{RPM_{real}} \rightarrow RPM_{real} = 626{,}8[rpm]$$

$$\%Error = \left[1 - \frac{RPM_{diseño}}{RPM_{real}}\right] * 100 \rightarrow \%Error = 4{,}28\%$$

Longitud de la correa:

El cálculo de la longitud de la correa depende de qué tan alejado estén los ejes entre sí. “Para una relación de transmisión $i_1 > 3$ la distancia entre centros mínima para garantizar un ángulo de abrace mayor a 120º $C \geq D_p$ es $C \geq 279{,}4[mm]$. Como no se tienen restricciones geométricas, se tomará una distancia entre centros de 300 [mm].

Figura 18. Distancia entre centros

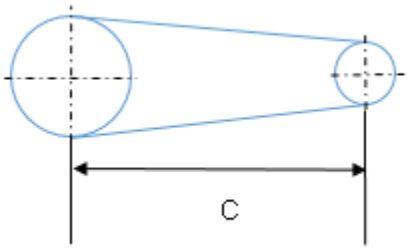
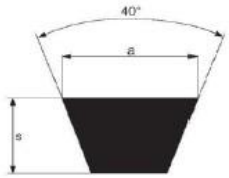


Figura 19. Dimensiones de la correa tipo “A”.



LEYENDA:
a= ancho de la base mayor
s= espesor de la correa

TABLA

SECCIÓN	a mm.	s mm.
Z	10	6
A	13	8
B	17	11
C	22	14
D	32	19
E	40	25

	Z	A	B	C	D	E
X'	13	17	26	26	43	52
X"	25	33	43	62	76	105

LEYENDA:
X' = DIFERENCIA ENTRE EL DESARROLLO EXTERNO Y EL DESARROLLO PRIMITIVO
X" = DIFERENCIA ENTRE EL DESARROLLO INTERNO Y EL DESARROLLO PRIMITIVO

EL NÚMERO QUE ACOMPAÑA A LA SECCIÓN ES EL DESARROLLO INTERNO NOMINAL EN PULGADAS.

Fuente: DAYCO. Catálogo de correas industriales. P. 5.

$$L = 1{,}57\left(d_{pp} + D_{pp}\right) + 2C + \frac{\left(D_{pp} - d_{pp}\right)^2}{4C} \Longrightarrow$$

$$L = 1{,}57(95 + 272{,}8) + 2 * 300 + \frac{(272{,}8-95)^2}{4*300} \Longrightarrow L = 1204[mm]$$

Para 1204 [mm], la *longitud normalizada de la correa es de 1214 [mm]*, correspondiente a una correa tipo A46,50 (según el catálogo de Dayco®).

Distancia entre centros corregida:

Reemplazando la longitud de la correa seleccionada en la ecuación, se obtiene:

$$1214[mm] = 1{,}57(95 + 272{,}8) + 2C + \frac{(272{,}8 - 95)^2}{4C}$$

$$1214[mm] = 577{,}45 + 2C + \frac{7903{,}21}{C}$$

$$C^2 - 318{,}275C + 3951{,}605 = 0$$

$$C = 12{,}94[mm] \; o \; \boldsymbol{C = 305{,}33[mm]}$$

Se puede observar una pequeña variación en la distancia entre centros debido a la longitud de la correa normalizada.

Velocidad tangencial de la correa:

$$V_c = \frac{\pi * d_{pp} * N}{60000} \Rightarrow V_c = \frac{\pi * 95 * 1800}{60000} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow V_c = 8{,}95[m/s]$$

La velocidad de la correa no debe exceder los 25m/s.

Cálculo del número de correas:

$$N^{\circ}_{correas} = \frac{P_d}{P_{nominal_{corregida}}} \ (Ecuación\ 13)$$

$$P_{nominal_{corregida}} = k_\theta k_L * Pot_{nominal} \ (Ecuación\ 14)$$

$$Pot_{nominal} = \left[2{,}98a\left(\frac{10^3}{v_m}\right)^{0{,}09} - \frac{8{,}43c}{k_d d_p} - 35{,}72e\left(\frac{v_m^2}{10^6}\right)\right] * \frac{v_m}{10^3}\,[hp] \ (Ecuación\ 15)$$

Dónde:

Vm es la velocidad de la correa en m/min; dp es el diámetro primitivo de la polea menor en centímetros; a, c y e son constantes cuyo valor depende del tipo de sección de la correa y k_d es un coeficiente de diámetro pequeño.

$$\frac{D_p - d_p}{C} = \frac{272{,}8 - 95}{305{,}33} = 0{,}58 \rightarrow k_\theta = 0{,}83$$

$$\frac{D_p}{d_p} = \frac{272{,}8}{95} = 2{,}87 \rightarrow k_d = 1{,}14$$

Para una correa tipo A y de longitud normalizada de 1214[mm] el factor de corrección k_L tiene un valor de 1.

Valores de las constantes:

$$a = 2{,}684, c = 5{,}326, e = 0{,}0136$$

De la Ecuación 15, se tiene que:

$$Pot_{nominal} = \left[2{,}98 * 2{,}684\left(\frac{10^3}{8{,}95 * 60}\right)^{0{,}09} - \frac{8{,}43 * 5{,}326}{1{,}14 * 95} - 35{,}72 * 0{,}0136 * \left(\frac{(8{,}95 * 60)^2}{10^6}\right)\right] * \frac{8{,}95 * 60}{10^3}$$

$$Pot_{nominal} = 4{,}25[hp]$$

De la Ecuación 14 se tiene lo siguiente.

$$Pot_{nominal_{corregida}} = 0{,}81 * 1 * 4{,}25 \rightarrow Pot_{nominal_{corregida}} = 3{,}44[hp]$$

De la Ecuación 14, se tiene que:

$$N^{\circ}_{correas} = \frac{1{,}5[hp]}{3{,}44[hp]} \Rightarrow N^{\circ}_{correas} \approx 0{,}44 \rightarrow N^{\circ}_{correas} = 1$$

Resultados:

Tabla 9. Resultados diseño conceptual de la transmisión por correas

RESULTADOS	
Tipo de correa	A46,50
Cantidad de correas	1
Diámetro polea motriz [in]	4
Diámetro polea conducida [in]	11
Distancia entre centros [mm]	305,33
Longitud de la correa [mm]	1214

5.1.2.4 Diseño detallado de la transmisión por correas.

En el diseño detallado se busca dimensionar el cubo de la polea, el cuerpo, el chavetero y la garganta.

Selección del tipo de polea:

Dependiendo del diámetro exterior de las poleas y del perfil de correa que se utilice, se determina el tipo de poleas que se desean construir.

Tabla 10. Tipos de poleas por cada perfil de garganta en función del diámetro exterior de la polea.

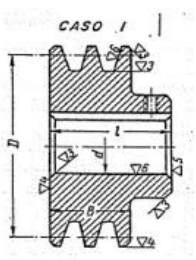
PERFIL DE GARGANTA	CALIDAD DE GARGANTAS							DIAMETROS CALCULADOS DE N mm. DE POLEAS DE DISTINTOS TIPOS Y EN CUALQUIER CASO																			
O	1	2	3	4				63	71	80	90	100	112	125	140	160	180	200	224	250	280	315	355	400	450	500		
								I	I	I	I	I	II	II	II	II	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III		
								1 2 3 4					1 4				1											
A	1	2	3	4	5						90	100	112	125	140	160	180	200	224	250	280	315	355	400	450	500	560	630
											I	I	I	I, II	II	II	II	II	III	III	III	III	III	III	III	III	III	III
											1 3 4								1 3									

Fuente: VASQUEZ CHAPARRO, Leonidas. Teoría de transmisión por correas. UIS. P. 11.

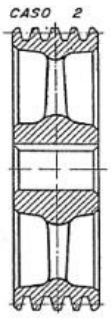
Como se puede detallar en la Tabla 10, los tipos de poleas seleccionados han sido: tipo I para la polea transmisora de potencia (polea pequeña) y tipo III para la polea conducida (polea grande).

Figura 20. Muestra los tipos de poleas seleccionadas junto con sus casos particulares.

Tipo I



Tipo III



Dimensionamiento de la polea motriz:

El diámetro del cubo debe estar entre 1,8 a 2,0 veces el diámetro del eje.

$$d_1 = (1{,}8\ a\ 2{,}0) * d$$

Como el diámetro del eje del motor eléctrico es de 22,22 mm, entonces:

$$d_1 = 2 * 22{,}23 \rightarrow d_1 = 44{,}46[mm]$$

La longitud L para el cubo está entre 1,2 y 1,5 veces el diámetro

$$L = 1{,}5 * d_1 \rightarrow L = 66{,}69[mm]$$

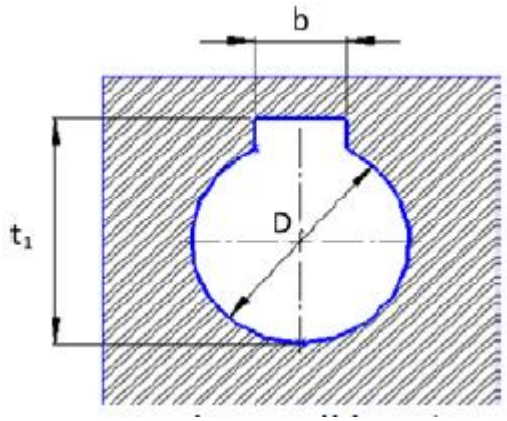
Dimensionamiento del alma:

En este caso la polea motriz es monolítica (maciza), el ancho del alma es el ancho de la llanta.

Dimensionamiento del chavetero:

Para un diámetro del eje de 25 [mm], corresponde las siguientes dimensiones.

Figura 21. Muestra las dimensiones del chavetero.



D = 22,23[mm]

b=8[mm]

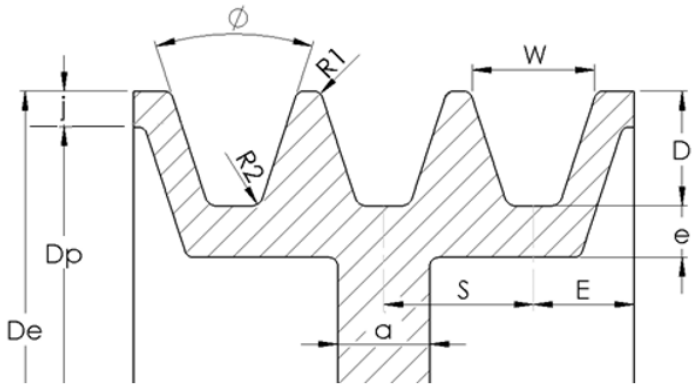
$t_1 = 25{,}73[mm]$

Para este eje corresponde un diámetro de prisionera de 8 [mm].

Dimensionamiento de la llanta:

Para perfilar la llanta se recurre a las especificaciones de la norma DIN 217, que ilustra las dimensiones de las canales de acuerdo a la sección de la correa seleccionado.

Figura 22. Dimensiones de la llanta.



Fuente: Normal ISO 4183.

Tabla 11. Dimensiones de la llanta para el tipo de correa especificado.

	RANURAS NORMALES						RANURAS PROFUNDAS			
TIPO DE CORREA	Z	A	B	C	D	E	SPZ	SPA	SPB	SPC
Ancho de canal W	10	13	17	22	32	38	9,7	12,7	16,3	22
Altura mínima j	2,5	3,3	4,2	5,7	8,1	9,6	2,5	3,3	4,2	5,7
Profundidad de canal D	9,5	12,5	15	20	28	33	11	14	18	24
Radio r_1	0,5	1	1	1,5	2	2	0,5	1	1	1,5
Radio r_2	1	1	1,5	2	3	4	1	1	1,5	2
Espesor e	5	6	8	9	10	14	5	6	8	9
Paso S	12	16	19	25,5	36,5	44,5	12	16	19	25,5
Tolerancia T_S	±0,3	±0,3	±0,4	±0,5	±0,6	±0,7	±0,3	±0,4	±0,4	±0,5
Distancia al borde E	8	9,5	12,5	17,5	22,2	28,5	8	9,5	12,5	17,5
Tolerancia T_E	+1 -1	+2	+3,8	+3,8	+6,35	+6,35	+1 -1	+2	+3,8	+3,8
Diámetro para 34° d	50 a 80	75 a 118	125 a 190	--	--	--	50 a 80	75 a 118	125 a 190	200 a 280
Diámetro para 36° d	--	--	--	200 a 280	355 a 475	500 a 600	--	--	--	--
Diámetro para 38° d	≥ 90	≥ 125	≥ 200	≥ 300	≥ 500	≥ 630	≥ 90	≥ 125	≥ 200	≥ 300

Fuente: http://www.martinezgambino.com.ar/catalogo_correas.pdf

***d** es el diámetro primitivo de la polea.

Las dimensiones del canal para la polea motriz y la conducida son las mismas puesto que usan el mismo tipo de correas y en la misma cantidad.

Dimensiones de la polea conducida:

Dimensionamiento del cubo:

Se debe utilizar la Ecuación 16 para determinar el diámetro del cubo, para ello se utilizará el diámetro del eje de la caja reductora seleccionada $(d = 25[mm])$, cuyos parámetros de selección se justifican a continuación.

$$d_1 = 50[mm]$$

$$L = 75[mm]$$

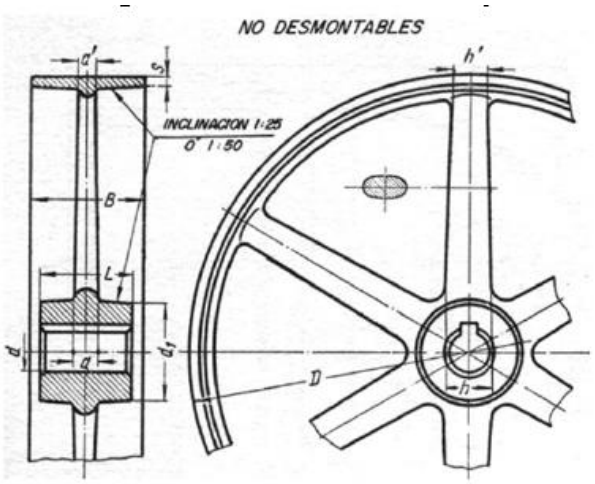
Dimensionamiento del chavetero:

Las dimensiones del chavetero son: D = 25 [mm], b = 8[mm] y $t_1 = 28{,}5[mm]$

Dimensionamiento de los brazos:

El número de brazos para poleas con diámetro externo menos a 700 milímetros es de 4; para diámetros entre 700 y 2200 milímetros es de 6 y para poleas mayores a 2200 milímetros es de 8. De esta manera, para este caso, el número de brazos es de 4.

Figura 23. Dimensiones del cubo y de los brazos.



Las dimensiones de los brazos dependen del diámetro del eje y su forma se recomienda como se muestra en la Figura 23.

El ancho de la parte del cubo es: $h = \ (1\ a\ 1{,}2)d \Rightarrow h = 1{,}2 * 25 \rightarrow h = 30[mm]$

El ancho de la llanta es: $h' = (0{,}7\ a\ 0{,}8)h \Rightarrow h' = 0{,}8 * 30 \rightarrow h' = 24[mm]$

El espesor se toma como: $e = (0{,}4\ a\ 0{,}5)h \Rightarrow e = 0{,}5 * 30 \rightarrow e = 15[mm]$

5.1.2.5 Selección de la caja reductora

Se elige como elemento de transmisión de potencia una caja reductora debido que el molino requiere alto torque y una baja velocidad. La selección de la caja se realiza con base en la potencia transmitida (1[hp]) y la relación de velocidad de la transmisión por trenes de engranajes (1:12,5). Para ello, al dirigirse al catálogo de “Reductores y motorreductores de velocidad a tornillo sin fin corona”, mostrado en el Anexo A, se selecciona la NMRV 075.

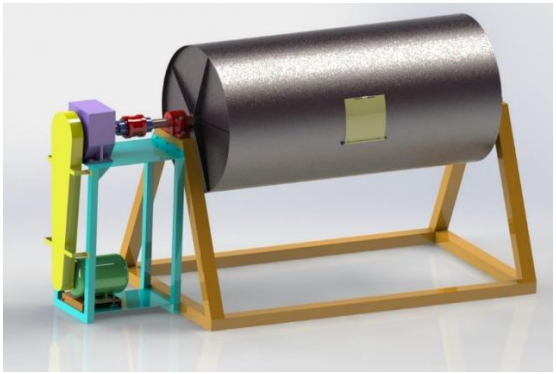
5.1.2.6 Selección del acople

Se necesita un acople flexible para unir el eje de salida de la caja reductora con el eje del molino, debido a que se requiere disminuir posibles desalineamientos. El diámetro de salida del eje de la caja reductora (25 [mm]), que ya está preestablecido en el catálogo. El diámetro de salida del acople, lo define el eje transmisor de potencia, el cual se determina en la siguiente sección (20 [mm]). Con base en lo anterior, el tipo de acople que permite unir estos dos ejes es un acople LoveJoy L110 de Hytrel (Anexo B), debido a que es de fácil mecanizado para adaptarlo al diseño.

5.1.2.7 Diseño del eje

Para conocer la distribución de cargas, se propone que la transmisión tenga la siguiente forma.

Figura 24. Boceto del prototipo del sistema de trituración.



Fuente: https://grabcad.com/library/molino-de-bolas-1

De la figura 24, el componente de color violeta es una caja reductora de velocidad, cuyo eje de salida se encuentra acoplada a un *eje transmisor* que se encuentra soldado al molino.

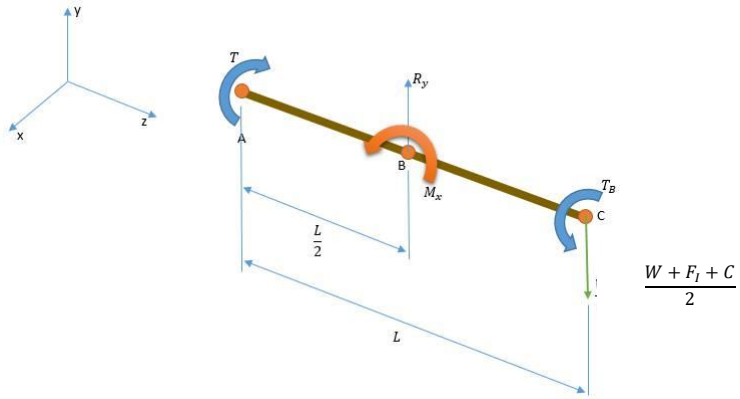
Para el prototipo, el material seleccionado es el acero SAE 4140; cuyas propiedades son:

- Dureza 275 – 320 HB (29-34 HRc)
- Esfuerzo a la fluencia: 690 MPa (100 KSI)

- Esfuerzo máximo: 900-1050 MPa (130-152 KSI)
- Elongación mínima: 12%.
- Reducción de área mínima: 50%
- Densidad: $7{,}85[g/cm^3]$ $(0{,}284[lb/in^3])$

El eje transmisor presenta la siguiente distribución de fuerzas.

Figura 25. Distribución de fuerzas.



Retomando la ecuación 6, el valor de la fuerza centrífuga C es:

$$C = \frac{981[N] * \left(48[rpm] * \left(\frac{2\pi[rad/rev]}{60[s/min]}\right) * \left(\frac{47{,}34[cm]}{2} * \left(\frac{1}{100}[m/cm]\right)\right)\right)^2}{(9{,}81[m/s^2]) * \left(\frac{47{,}34[cm]}{2} * \left(\frac{1}{100}[m/cm]\right)\right)} \rightarrow$$

$$\rightarrow C = 598{,}1[N]$$

$$\sum F_y = 0;\ R_y = \frac{W + F_I + C}{2} = \frac{(981 + 57{,}19 + 598{,}1)[N]}{2} \rightarrow R_y = 818{,}15[N]$$

$$\sum M_{B_x} = 0;\ M_x = \frac{(W + F_I + C)L}{4}\ \ (Ecuación\ 16)$$

La fuerza F_I corresponde a la magnitud de la fuerza de impacto producido por las bolas cuyo valor se encuentra en la sección 5.1.3.1 del presente documento.

Para encontrar la sección crítica que defina el diámetro del eje, se utilizaron los diagramas que se muestran a continuación.

Figura 26. Diagrama de momento torsor con respecto a la longitud del eje., fuerza cortante y momento flector, respectivamente.

De los esquemas mostrados en la figura 26, se puede observar que, evidentemente, la sección crítica del eje se encuentra en el punto B.

$$\tau_{xy} = \frac{Tc}{J} \quad (Ecuación\ 17)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{Mc}{I} \quad (Ecuación\ 18)$$

$$J = \frac{\pi}{2}c^4 \quad (Ecuación\ 19)$$

$$I = \frac{\pi r^4}{4} \quad (Ecuación\ 20)$$

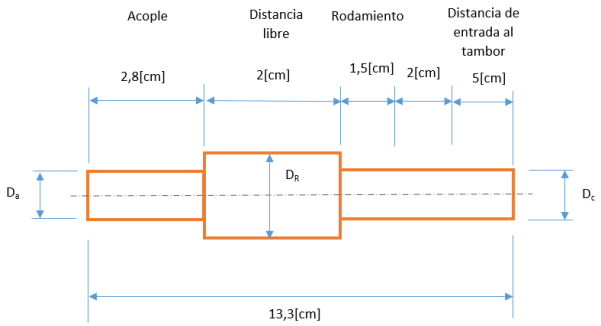
Dónde c es la distancia desde el eje neutro de la sección crítica hasta el punto más lejano de la geometría. Tratándose de un eje, c tendrá el valor del radio. Según el teorema de Von Misses:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{xy}^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq S_y \quad (Ecuación\ 21)$$

Se asume que la longitud del eje debe de ser 10 centímetros más largo que los elementos estructurales (rodamientos, chumaceras, acople y longitud de éste que entrará en el molino).

De modo que se propone una longitud cuya distribución sea como se muestra a continuación.

Figura 27. Distribución de longitud del eje.



De la Figura 27, el diámetro Da es el de la salida del acople, el diámetro D_R es el diámetro calculado a partir del rodamiento y D_c es el diámetro crítico calculado mediante el análisis de esfuerzos a partir de Von Misses.

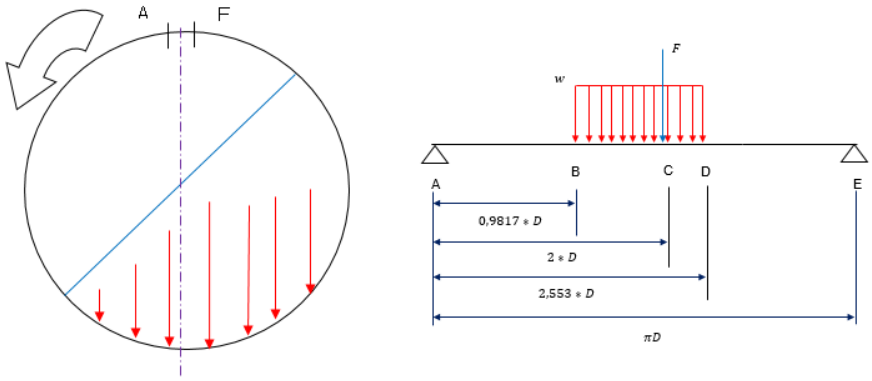
Resultados:

El eje diseñado tiene un diámetro mínimo de 1,64[cm], una longitud de 13,3[cm] y está hecho de acero SAE 4140.

NOTA: Los planos de los elementos diseñados de la transmisión se encuentran Anexo C del presente documento.

5.1.3 Diseño estructural del molino. Para el diseño del molino se desarrollará un análisis en ANSYS®, el cual permitirá obtener el diseño óptimo del molino. Sin embargo, para conocer si los resultados dados por ANSYS® son coherentes, se sugiere la comparación de los resultados obtenidos por el software con respecto a los obtenidos por el siguiente modelo teórico simplificado.

Figura 28. Distribución de fuerzas producidas por las bolas y el material sobre el molino junto con un esquema simplificado del desarrollo del molino en los puntos A y E.



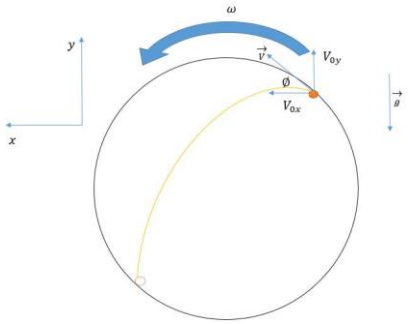
5.1.3.1 Fuerza de impacto. La fuerza de impacto se aproxima mediante la siguiente relación matemática.

$$\vec{F} = m * \left(\frac{\overrightarrow{V_f} - \overrightarrow{V_0}}{\Delta t} \right) (Ecuación\ 22)$$

Para ello, se asumirá que el impacto será completamente inelástico.

De esta forma, la velocidad de la bola después del impacto será la misma que la del molino.

Figura 29. Análisis cinemático de una bola.



Sabiendo que le valor de la aceleración en la componente vertical es el de la gravedad, y asumiendo que la aceleración en sentido horizontal tiene un valor constante, el análisis cinemático será el que se muestra a continuación.

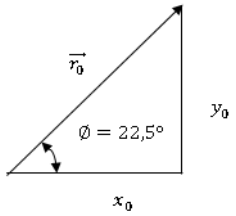
$$\vec{a} = -g\hat{j}\ (Ecuación\ 24)$$

$$\vec{V} = V_x(t)\hat{\imath} + V_y(t)\hat{j} = (V_{0x})\hat{\imath} + \left(V_{0y} - g * t\right)\hat{j}\ \ (Ecuación\ 25)$$

$$\vec{r} = x(t)\hat{\imath} + y(t)\hat{j} = (-x_0 + V_{0x} * t)\hat{\imath} + \left(y_0 + V_{0y} * t - \frac{g * t^2}{2}\right)\hat{j}\ \ (Ecuación\ 26)$$

El eje coordenado se tomará como el centro del molino y el ángulo $\emptyset$ mostrado en la Figura 29, tiene un valor de 22,5 grados como se mencionó en la sección de teoría.

Figura 30. Vector posición inicial junto con sus componentes.

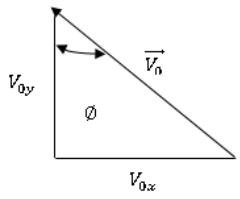


La magnitud del vector $\overrightarrow{r_0}$ es el radio del molino $(0{,}2367[m])$; de esta manera:

$$x_0 = r_0 \cos\emptyset\ \rightarrow x_0 = 0{,}2187[m]$$

$$y_0 = r_0 \sin\emptyset\ \rightarrow y_0 = 0{,}09058[m]$$

Figura 31. Vector velocidad inicial junto con sus componentes.



La magnitud del vector $\overrightarrow{V_0}$ es la velocidad tangencial del molino.

$$\left(V_0 = \omega * r_0 = 48 * \frac{2\pi}{60} * 0{,}1563 \rightarrow V_0 = 1{,}19[m/s]\right)$$

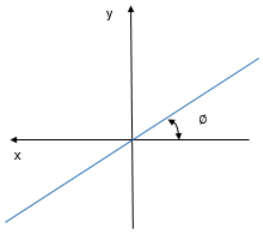
$$V_{0x} = V_0 \sin \emptyset \ \rightarrow V_{0x} = 0{,}4553[m/s]$$

$$V_{0y} = V_0 \cos \emptyset \ \rightarrow V_{0y} = 1{,}099[m/s]$$

$$\overrightarrow{V_0} = 0{,}4553\hat{\imath} + 1{,}099\hat{\jmath}\ [m/s]$$

Es necesario conocer la posición en donde cae la bola; para ello es necesario conocer primero la función donde podría caer la bola.

Figura 32. Plano cartesiano de la tendencia de distribución del material.



$$y(\Delta t) = -\tan(\emptyset) * x(\Delta t) \ \ (Ecuación\ 27)$$

A partir de la Ecuación 26.

$$y(\Delta t) = -\tan(\emptyset) * (-x_0 + V_{0x} * \Delta t)$$

$$\Rightarrow y(\Delta t) = x_0 \tan(\emptyset) - V_{0x} \tan(\emptyset) * \Delta t$$

$$y(\Delta t) = y_0 + V_{0y} * \Delta t - \frac{g * \Delta t^2}{2}$$

$$\Rightarrow x_0 \tan(\emptyset) - V_{0x} \tan(\emptyset) * \Delta t = y_0 + V_{0y} * \Delta t - \frac{g * \Delta t^2}{2}$$

$$\Longrightarrow \Delta t^2 - \frac{2 * \left(V_{0y} + V_{0x} \tan(\emptyset)\right)}{g} * \Delta t - \frac{2}{g} * (y_0 - x_0 \tan(\emptyset)) = 0 \ \ (Ecuación\ 28)$$

Resolviendo la Ecuación 28.

$$\Delta t = -6{,}101 * 10^{-20}[s] \; o \; \Delta \boldsymbol{t} = \boldsymbol{0{,}2626}[\boldsymbol{s}]$$

$$V_y(\Delta t) = V_{0y} - g * \Delta t \rightarrow V_y(\Delta t) = -1{,}476[m/s]$$

$$\overrightarrow{V_f} = 0{,}4553\hat{\imath} - 1{,}476\hat{\jmath}\ [m/s]$$

Suponiendo que una línea de bolas impacta, al mismo tiempo, sobre las paredes del molino, la masa de las bolas será la siguiente:

$$m = N * m_i$$

$$N = \frac{L}{D_i} = \frac{0{,}9468[m]}{0{,}07[m]} = 13{,}53 \rightarrow N \approx 14$$

$$m = N * \rho * \forall_i = N * \rho * \left[\frac{4}{3}\pi\left(\frac{D_i}{2}\right)^3\right] \rightarrow m = 5{,}83[kg]$$

De esta manera:

$$\vec{F} = 5{,}83 * \left[\frac{(0{,}4553\hat{\imath} - 1{,}476\hat{\jmath}) - (0{,}4553\hat{\imath} + 1{,}099\hat{\jmath})}{0{,}2626}\right] \rightarrow \vec{F} = -57{,}19\hat{\jmath}[N]$$

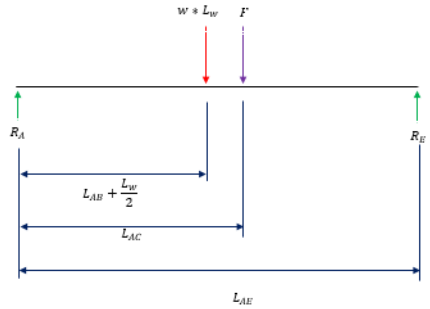
5.1.3.2 Carga distribuida. El valor de la carga distribuida se calcula a partir del peso total de la carga como se muestra a continuación.

$$w = \frac{W_T}{L_{BD}} = \frac{(981 + 627{,}8)[N]}{[(2{,}553 - 0{,}9817) * 0{,}4734][m]} \rightarrow w = 2162{,}95[N]$$

5.1.3.3 Modelo teórico. Para la simplificación de cálculo del modelo teórico, se desarrollará una interfaz en Matlab® que facilite el proceso de cálculo donde sus parámetros de entrada serán: el valor de la carga distribuida; el valor de la fuerza de impacto; el módulo de Young y el momento de inercia; la longitud total de la viga y la ubicación de todos los puntos mostrados en la Figura 28, y sus parámetros de salida serán: las gráficas de fuerza cortante, momento flector y deflexión contra la longitud de la viga; el valor del esfuerzo máximo y el valor de la deflexión máxima de la viga.

Análisis estático:

Figura 33. Diagrama de cuerpo libre de la viga.



$$\sum M_A = 0; w * L_w * \left(L_{AB} + \frac{L_w}{2}\right) + F * L_{AC} - R_E * L_{AE} = 0$$

$$\rightarrow R_E = \frac{1}{L_{AE}}\left[w * L_w * \left(L_{AB} + \frac{L_w}{2}\right) + F * L_{AC}\right] \ (Ecuación\ 29)$$

$$\sum F_y = 0;\ R_A = w * L_w + F - R_E$$

Los diagramas de fuerza cortante y momento flector contra la longitud serán mostrados en el software. Los esfuerzos por flexión se calcularán mediante la Ecuación 18.

Análisis de deformaciones:

Las deformaciones producidas se calculan mediante la siguiente ecuación diferencial.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \ (Ecuación\ 30)$$

Para este caso:

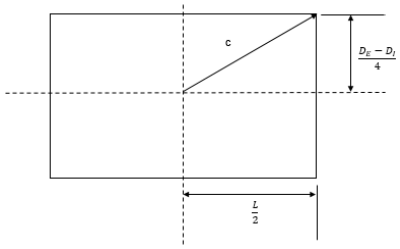
$$c_1 = \frac{1}{24}w(L_{AE} - L_{AB})^4 + \frac{F}{6}(L_{AE} - L_{AC})^3 - \frac{1}{24}w(L_{AE} - L_{AD})^4 - \frac{R_A}{6}{L_{AE}}^3$$

$$y(x) = \frac{1}{EI}\left[\frac{R_A}{6}x^3 - \frac{1}{24}w\langle x - L_{AB}\rangle^4 - \frac{F}{6}\langle x - L_{AC}\rangle^3 + \frac{1}{24}w\langle x - L_{AD}\rangle^4 + c_1 * x\right] \ (Ecuación\ 31)$$

Sección transversal de la viga:

La sección transversal depende del perfil de la lámina con la que se vaya a construir el tambor del molino. Para el primer proceso iterativo, se seleccionó del catálogo la siguiente lámina de acero inoxidable AISI 304 $\left(S_y = 310[MPa]; E = 200[GPa]; elon.máx = 30\%\right)$, con un espesor de $e = 3[mm]$; $D_E = D_I + 2e \rightarrow D_E = 0{,}3189[m]$.

Figura 34. Dimensiones de la lámina relacionadas con el cálculo de la inercia.



A partir de la Figura 34:

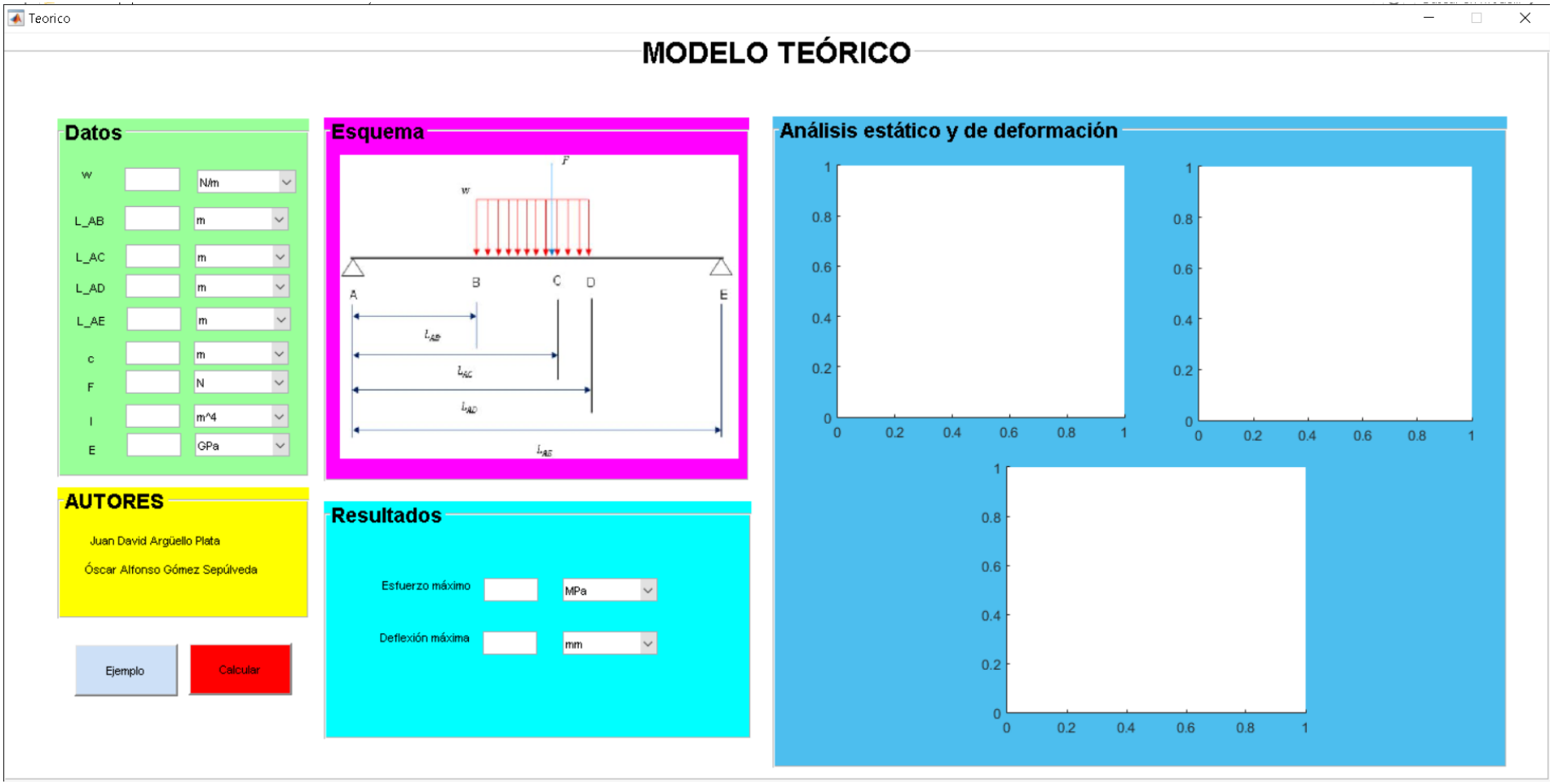
$$c = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + \left(\frac{D_E - D_I}{4}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0{,}9468}{2}\right)^2 + \left(\frac{0{,}4834 - 4734}{4}\right)^2} \rightarrow c = 0{,}4734[m]$$

$$I = \frac{1}{12}bh^3 = \frac{1}{12}\left(\frac{D_E - D_I}{2}\right)L^3 \rightarrow I = 2{,}122 * 10^{-4}[m^4]$$

Solución:

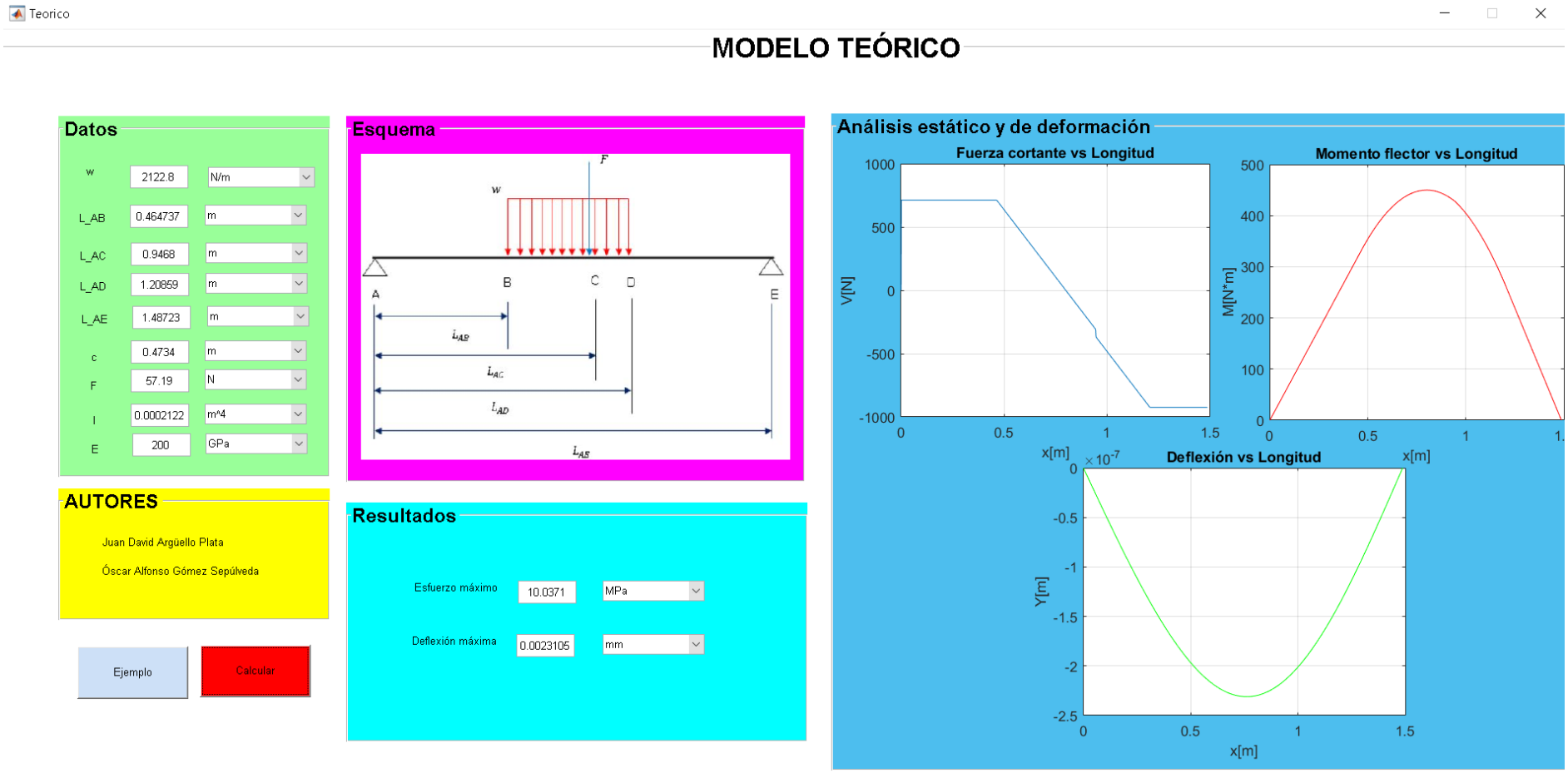
A partir de la interfaz gráfica realizada en Matlab® y mostrada a continuación.

Figura 35. Interfaz gráfica del software desarrollado.



Reemplazando con los datos del problema, se obtiene lo siguiente:

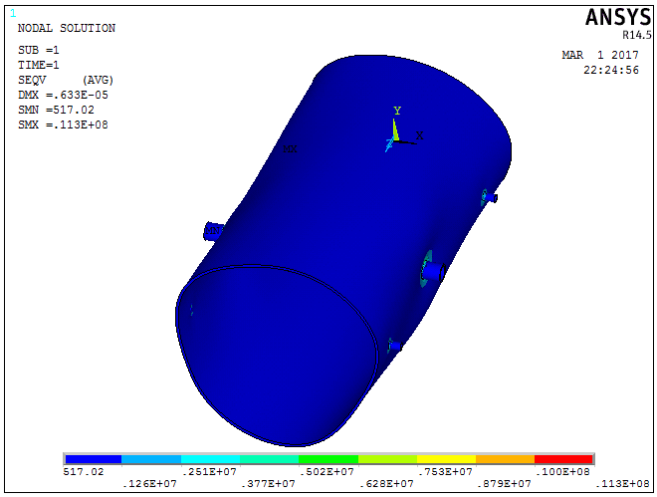
Figura 36. Resultados del problema para la primera iteración.



5.1.3.4 Simulación en ANSYS

A continuación, se mostrará el modelo con el que se realizó la simulación en ANSYS®.

Figura 37. Resultados de la simulación



De los resultados obtenidos tanto por el modelo teórico simplificado como de la simulación realizada, se puede apreciar que el espesor y material seleccionados están sobredimensionados, debido a que los esfuerzos a los que está sometido el tambor se encuentran muy alejados del esfuerzo de fluencia y por ende no fallará. El error de la simulación se encuentra alrededor del 22%. La fabricación se realizará con láminas de acero AISI 304 de 3 mm, con bujes de 20 mm de diámetro interno, longitud de 3 cm y del mismo espesor de la lámina, y bujes de rosca interna de 10 mm de diámetro interno, longitud de 2 cm y del mismo espesor que la lámina.

5.1.4 Diseño de las aletas del molino. En los cálculos desarrollados hasta ahora se ha despreciado los efectos de fricción que sufren las bolas al estar en contacto con el material vegetal. De modo que se hace necesario el uso de aletas sobre el molino que sirvan de soporte a las bolas y que les permita de esta manera alcanzar la posición inicial en las que deben ser lanzadas para garantizar el máximo valor de la fuerza de impacto posible. Por otro lado, en al análisis de la fuerza de impacto se desarrolló un análisis cinemático de una partícula, de modo que para este caso:

$$x_0 = x_{0;partícula} - r_{bola} = 218{,}7 - 35\ [mm] \rightarrow x_0 = 183{,}7[mm]$$

$$y_0 = y_{0;partícula} \rightarrow y_0 = 90{,}58[mm]$$

Para obtener tanto el número de aletas como sus dimensiones geométricas, se realiza un proceso iterativo con el estudio de movimiento de SolidWorks® que permite conocer la trayectoria de la bola durante la operación estacionaria del molino, al igual que los valores tanto de velocidad como de aceleración con respecto al tiempo. El material de las aletas será también de acero AISI 304 de 3 [mm] de espesor.

Figura 38. Aletas del molino en la segunda iteración.

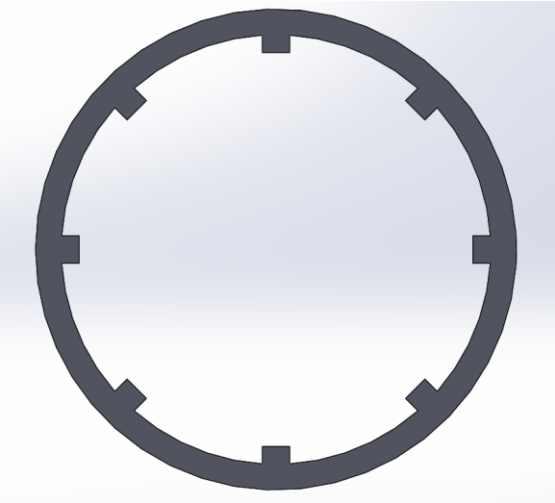
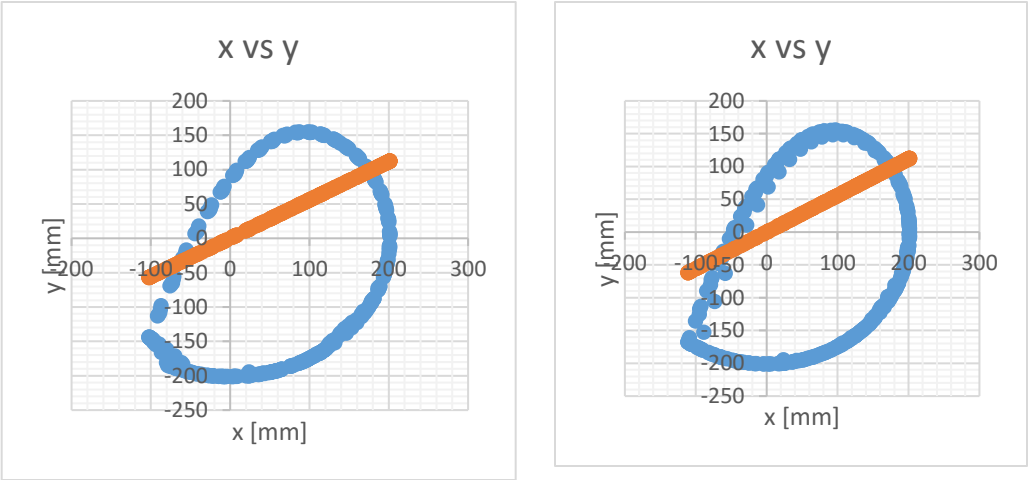


Figura 39. Trayectoria realizada por una bola en un molino con 6 aletas (izquierda) y la realizada por 8 aletas (derecha).



En la figura 39, se puede detallar una trayectoria bien definida, pero con ciertas irregularidades. La ventaja es que las irregularidades se presentan en zonas de impacto a donde las bolas dentro del molino jamás llegarán debido a la presencia del material vegetal.

Se puede observar una trayectoria más suave, comparándola con la iteración de 6 aletas, de modo que se concluye que el mejor desempeño será con 8 aletas de 26 mm de alto espaciadas a 45° cada una.

Los planos del prototipo se encuentran en el Anexo C.

5.2 DISEÑO DE LA PLANTA DE TRITURACIÓN

El diseño de la planta de trituración, al igual que el diseño del prototipo, comprende las siguientes partes: diseño funcional, diseño de la transmisión y el diseño estructural.

5.2.1 Diseño funcional. Siguiendo el procedimiento descrito en la sección 5.1.1, utilizando las Ecuaciones 1-15, y con respecto a los siguientes datos se tiene:

5.2.1.1 Datos. A diferencia del prototipo, cabe resaltar que la planta de trituración requiere de una capacidad 10 veces mayor, como se menciona en el capítulo 1.

- La cantidad de material a triturar son 100 kg/lote.
- El porcentaje de volumen que ocupan las bolas será del 20%.
- El diámetro de las bolas de acero inoxidable será de 4, de 7 y de 12 [cm], debido a que se busca ampliar la trituración a ramas de tamaño considerable, de modo que las bolas de 7 y 12 [cm] podrán disminuir el tamaño de éstas de tal forma que las de 4 [cm] puedan triturarlas hasta el tamaño de partícula deseado (como se muestra en la Figura 8).
- Los demás datos de interés son los mismos mostrados en la sección 4.2.

5.2.1.2 Resultados del diseño funcional

Tabla 12. Resultados del dimensionamiento funcional.

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$a = 22,5$ [Degrees]	$D = 1,123$ [m]	$dist = 0,2382$ [m]	$D_{b1} = 0,07$ [m]
$D_{b2} = 0,04$ [m]	$D_{b3} = 0,12$ [m]	$D_{cm} = 112,3$	$FS = 2$
$g = 9,81$ [m/s^2]	$hp = 13,37$ [hp]	$L = 2,245$ [m]	$L_{cm} = 224,5$
$masa_{aplauda} = 600$	$m_{arena} = 500$ [kg]	$m_{bolas} = 1067$ [kg]	$m_{vegetal} = 100$ [kg]
$N_{bolas1} = 824,9$	$N_{bolas2} = 4421$	$N_{bolas3} = 163,7$	$n_{crit} = 39,92$ [rev/min]
$n_{real} = 31,94$ [rev/min]	$\omega = 3,344$ [rad/s]	$Pot = 9970$ [w]	$\rho_{arena} = 1500$ [kg/m^3]
$\rho_{bolas} = 2400$ [kg/m^3]	$\rho_{vegetal} = 300$ [kg/m^3]	$r_{b1} = 0,035$	$r_{b2} = 0,02$
$r_{b3} = 0,06$	$T = 2981$ [N*m]	$V_{arena} = 0,3333$ [m^3]	$V_{arena,cm} = 333,3$
$V_{b1} = 0,1481$	$V_{bolas} = 0,4444$ [m^3]	$V_{bolas,cm} = 444,4$	$V_{tambor} = 2,222$ [m^3]
$V_{Tambor,cm} = 2222$	$V_{T,carga} = 1,111$ [m^3]	$V_{vegetal} = 0,3333$ [m^3]	$V_{vegetal,cm} = 333,3$
$W_{arena} = 4905$ [N]	$W_{bolas} = 10464$ [N]	$W_T = 16350$ [N]	$W_{vegetal} = 981$ [N]

Los resultados de la Tabla 12 mostrados en color celeste son las dimensiones del molino, mientras que las resaltadas en amarillo son las características técnicas mínimas que garantizarán que el sistema funcione. Cabe resaltar que el número de bolas es de 4 [cm] son 4421, las de 7 [cm] son 825 y las 12 [cm] son 164.

5.2.2 Diseño de la transmisión. El procedimiento de cálculo y selección será el mismo utilizado en la sección 5.1.2. El motor eléctrico que se utilizará la planta de trituración debe ser de 25[hp] a 1800 [rpm]. Tomando en cuenta los resultados obtenidos y mostrados en la tabla 12, se tiene que:

$$Rel.Vel = \ i_1 * i_2 = \frac{1800}{30} \rightarrow Rel.Vel = 60$$

Se tomará una relación de transmisión de 3 para la transmisión por poleas, de esta manera: $i_1 = 3;\ i_2 = 15$

Tabla 13. Etapas de la transmisión de la planta.

	CORREAS	**TREN DE ENGRANAJES**
Relación de transmisión	3	20
Velocidad de entrada [rpm]	1800	600
Velocidad de salida [rpm]	600	30

El factor de servicio para la potencia de diseño (Tabla 5) tendrá el mismo valor, de modo que:

$$P_d = 1{,}5 * 5 \rightarrow P_d = 30[hp]$$

Retomando la Figura 16, el tipo de correa seleccionada es A.

Realizando el procedimiento de cálculo de la sección 5.1.2.3, el tipo de correa debe ser tipo B (ver figura 16), de modo que el diámetro de la polea motriz recomendada es de 140 mm y el factor j es de 4,2 mm. La potencia nominal corregida es de 3,2 [hp].

$$N^0_{correas} = \frac{30[hp]}{3{,}2[hp]} \approx 9{,}375 \rightarrow N^0_{correas} = 10$$

5.2.2.1 Resultados de la transmisión por poleas

- Tipo de correa: B65.
- Cantidad de correas: 10.
- Diámetro de las poleas: $d'_p = 142{,}2[mm](5{,}6)''y\ D_p = 391{,}2[mm]\ (15{,}4)''$
- Distancia entre centros: $C = 400{,}6[mm]$

- Longitud de la correa: L=1651[mm].

5.2.2.2 Selección de la caja reductora. Los requerimientos de selección son: potencia de 20[hp] y relación de transmisión de 1:20. Con base en el catálogo mostrado en el Anexo D, la caja seleccionada es la F00 A25 (página 124 del catálogo de RAMFE).

5.2.2.3 **Selección del acople.** A diferencia del acople seleccionado para el prototipo, para la planta de trituración se requiere un acople de diferentes características debido a la potencia transmitida (un torque mayor a una menor velocidad). El acople seleccionado es de la serie Martin Flex, tipo F160, el cual se encuentra en el Anexo E, donde al interpolar los datos mostrados en la segunda tabla del catálogo, se obtiene un torque de 1313[N*m], valor superior a 890 [N*m] (valor del torque que mueve el molino).

5.2.2.4 Diseño del eje. El eje transmisor de potencia es el que va de la salida del acople al molino. El material utilizado para la elaboración del eje será SEA 4140, cuyas propiedades físicas son las siguientes:

- Esfuerzo de fluencia (S_y): 690[MPa].
- Esfuerzo máximo (S_{ut}): 1000[MPa].
- Densidad (ρ): 7,85$[g/cm^3]$.

El diagrama de cuerpo libre es el mismo mostrado en la figura 25, de modo que:

$$C = \frac{16350[N] * \left(30[rpm] * \left(\frac{2\pi[rad/rev]}{60[s/min]}\right) * \left(\frac{1{,}123[m]}{2}\right)\right)^2}{(9{,}81[m/s^2]) * \left(\frac{1{,}123[m]}{2}\right)} \rightarrow$$

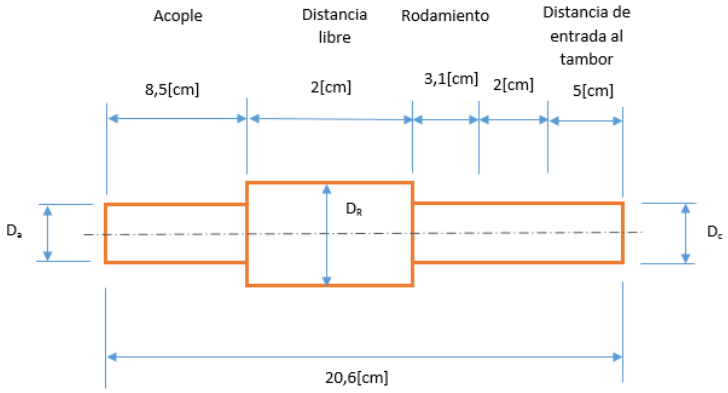
$$\rightarrow C = 9236[N]$$

La fuerza de impacto se encuentra calculada en la siguiente sección.

$$\sum F_y = 0;\ R_y = \frac{W + F_I + C}{2} = \frac{(16350 + 398{,}5 + 9236)[N]}{2} \rightarrow R_y = 12992{,}25[N]$$

A diferencia del prototipo, para el dimensionamiento del eje principal de la planta de trituración es necesario tener en cuenta los efectos de la fatiga. Para ello, después de un proceso iterativo en EES® (debido a que algunos factores dependen del valor del diámetro del eje, además de que la longitud del eje cambia debido al tipo de rodamiento seleccionado entre otros parámetros cambiantes) se determinó que el diámetro del eje es de 6,65 centímetros, como se muestra a continuación.

Figura 40. Eje principal de la planta de trituración.



De la Figura 40, el diámetro D_a es el diámetro definido por el acople, D_R es el diámetro externo del rodamiento y D_c es el diámetro crítico.

El análisis de fatiga presenta un ligero cambio en la ecuación utilizada para determinar el esfuerzo equivalente sobre el eje (ecuación 21, ecuación de Von Misses).

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\left(\sigma_m^{Fl} + \frac{S_y}{S_e^{Fl}}\sigma_a^{Fl} + \sigma_m^{Ax} + \frac{S_y}{S_e^{Ax}}\sigma_a^{Ax}\right)^2 + 3\left(\tau_m^T + \frac{S_{sy}}{S_{se}^T}\tau_a^T\right)^2} \quad (Ecuación\ 32)$$

Para este caso, el momento flector produce un esfuerzo alternante por flexión, mientras que el torque transmitido produce un esfuerzo torsional constante, de modo que la ecuación 32 queda de la siguiente forma:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\left(\frac{S_y}{S_e^{Fl}}\sigma_a^{Fl}\right)^2 + 3(\tau_m^T)^2} \quad (Ecuación\ 33)$$

Para el cálculo del esfuerzo normal por flexión (esfuerzo alternante), se utilizan las ecuaciones 16, 18 y 20.

$$I = \frac{\pi(0{,}0665[m]/2)^2}{4} \rightarrow I = 9{,}598 * 10^{-7}[m^4]$$

$$M_x = \frac{(16350 + 398{,}5 + 9236)[N] * 20{,}6[cm] * \left(\frac{1[m]}{100[cm]}\right)}{4} \rightarrow M_x = 1338[N * m]$$

$$\sigma_a^{Fl} = \frac{1338[N * m] * \left[\left(6{,}65[cm] * \left(\frac{1[m]}{100[cm]}\right)\right)/2\right]}{9{,}598 * 10^{-7}[m^4]} * \left[\frac{1[N/m^2]}{10^6[MPa]}\right] \rightarrow \sigma_a^{Fl} = 46{,}36[MPa]$$

Para el cálculo del esfuerzo cortante medio por torsión, se utilizan las ecuaciones 17 y 19.

$$J = \frac{\pi\left[\left(6{,}65[cm] * \left(\frac{1[m]}{100[cm]}\right)\right)/2\right]^4}{2} \rightarrow J = 19{,}2 * 10^{-6}[m^4]$$

$$Pot_s = \eta_{trans;pol} * \eta_{caja} * Pot_{en} = 0{,}94 * 0{,}85 * 20[hp] \rightarrow Pot_s = 16[hp]$$

$$T = \frac{Pot_s}{\omega} = \frac{16[hp] * \left[\frac{745{,}7[N * m/s]}{1[hp]}\right]}{30[rev/min] * \left(\frac{2\pi}{60}\left[\frac{rad/s}{rev/min}\right]\right)} \rightarrow T = 3793[N * m]$$

$$\tau_m^T = \frac{3793[N * m] * \left[\left(6{,}65[cm] * \left(\frac{1[m]}{100[cm]}\right)\right)/2\right]}{19{,}2 * 10^{-6}[m^4]} * \left[\frac{1[N/m^2]}{10^6[MPa]}\right] \rightarrow \tau_m^T = 65{,}7[MPa]$$

Ahora, es necesario calcular el esfuerzo de fatiga.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S_e' \ \ (Ecuación\ 34)$$

Para el acero se estima el límite de fatiga como:

$$S_e' = 0{,}5 S_{ut} \rightarrow S_e' = 500[MPa]$$

Los factores se calcularon en base a la información mostrada en el Anexo G.

$$k_a = 0{,}7231;\ k_b = \ 0{,}7915;\ k_c = \ 0{,}868;\ k_d = \ 1;\ k_e = \ 0{,}9$$

$$S_e = 221[MPa]$$

El factor de seguridad utilizado en el proceso iterativo fue de 1,2, de modo que:

$$\sigma_{vm} = \frac{S_e}{N} = \frac{221[MPa]}{1{,}2} \rightarrow \sigma_{vm} = 184{,}1[MPa]$$

Utilizando la ecuación 33:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\left(\frac{690[MPa]}{221[MPa]} * 46{,}36[MPa]\right)^2 + 3(65{,}7[MPa])^2} \rightarrow \sigma_{vm} = 184{,}1[MPa]$$

Como se puede observar, el esfuerzo equivalente es lejano al esfuerzo de fatiga y se encuentra aún más lejano del esfuerzo de fluencia, lo que garantizará que el eje tenga una vida de operación larga y duradera.

5.2.3 Diseño estructural. Al igual que en el diseño del prototipo, el diseño estructural se desarrollará el mismo modelo teórico para compararlo con la simulación en Ansys®. A su vez, también se realizará una simulación cinemática para el diseño de las aletas del molino en SolidWorks®.

5.2.3.1 Fuerza de impacto. Para el análisis de la fuerza de impacto es necesario conocer la velocidad inicial de donde parten las bolas y la velocidad final a la que impactan el material vegetal.

La magnitud del vector posición es el radio del molino, el cual tiene un valor de 0,5615[m].

$$x_0 = r_0 \cos \emptyset \rightarrow x_0 = 0{,}5188[m]$$

$$y_0 = r_0 \sin \emptyset \rightarrow y_0 = 0{,}2149[m]$$

La magnitud del vector velocidad inicial es: $V_0 = \omega * r \rightarrow V_0 = 1{,}764[m/s]$

$$V_{0x} = V_0 \sin \emptyset \rightarrow V_{0x} = 0{,}6751[m/s]$$

$$V_{0y} = V_0 \cos \emptyset \rightarrow V_{0y} = 1{,}63[m/s]$$

$$\overrightarrow{V_0} = 0{,}6751\hat{\imath} + 1{,}63\hat{\jmath}\ [m/s]$$

Utilizando la ecuación 28, se obtiene que el tiempo de caída es:

$$\Delta t = 0{,}3893[s]$$

$$V_y(\Delta t) = V_{0y} - g * \Delta t \rightarrow V_y(\Delta t) = -2{,}189[m/s]$$

$$\overrightarrow{V_f} = 0{,}6751\hat{\imath} - 2{,}189\hat{\jmath}\ [m/s]$$

Suponiendo que una línea de bolas impacta, al mismo tiempo, sobre las paredes del molino, la masa de las bolas será la siguiente:

$$m = N * m_i$$

$$N = \frac{L}{D_i} = \frac{2{,}245[m]}{0{,}12[m]} = 18{,}71 \rightarrow N \approx 19$$

$$m = N * \rho * \forall_i = N * \rho * \left[\frac{4}{3}\pi\left(\frac{D_i}{2}\right)^3\right] \rightarrow m = 40{,}62[kg]$$

De esta manera:

$$\vec{F} = 40{,}62 * \left[\frac{(0{,}675\hat{\imath} - 2{,}189\hat{\jmath}) - (0{,}675\hat{\imath} + 1{,}63\hat{\jmath})}{0{,}3893}\right] \rightarrow \vec{F} = -398{,}5\hat{\jmath}[N]$$

5.2.3.2 **Modelo teórico.** A diferencia del prototipo, se debe identificar cuál fase es más crítica: la fase de trituración o la fase de separación de sustancias. En la fase de separación de sustancias se utilizará un compresor de aire para incrementar el diferencial de presión y, a su vez, el flujo de solvente, tratándose entonces de un recipiente a presión. Para ello, se utilizará el capítulo UG – 27 de la sección VIII de la ASME.

El capítulo UG-27 trata sobre la determinación del espesor de recipientes sometidos a presión internas. El espesor de los recipientes no puede ser, bajo ninguna circunstancia, inferior al calculado por las siguientes fórmulas.

$$t = \frac{PR}{SE - 0{,}6P} \quad (Ecuación\ 35)$$

Para utilizar la ecuación 35 cuando el espesor no excede de un medio del radio interior, o P no excede de 0,385SE. Dónde: t es el espesor del recipiente (mm), P es el valor de la presión al que está sometido (KPa), R es el radio interior del recipiente (mm), S es el esfuerzo permisible (KPa) y E es la eficiencia de la junta.

$$P = P_{comp} + P_{carga} = 101{,}325[KPa] + \frac{4970[N]}{(\pi/4) * (0{,}7409[m])^2} * \left[\frac{1[N/m^2]}{1000[KPa]}\right]$$

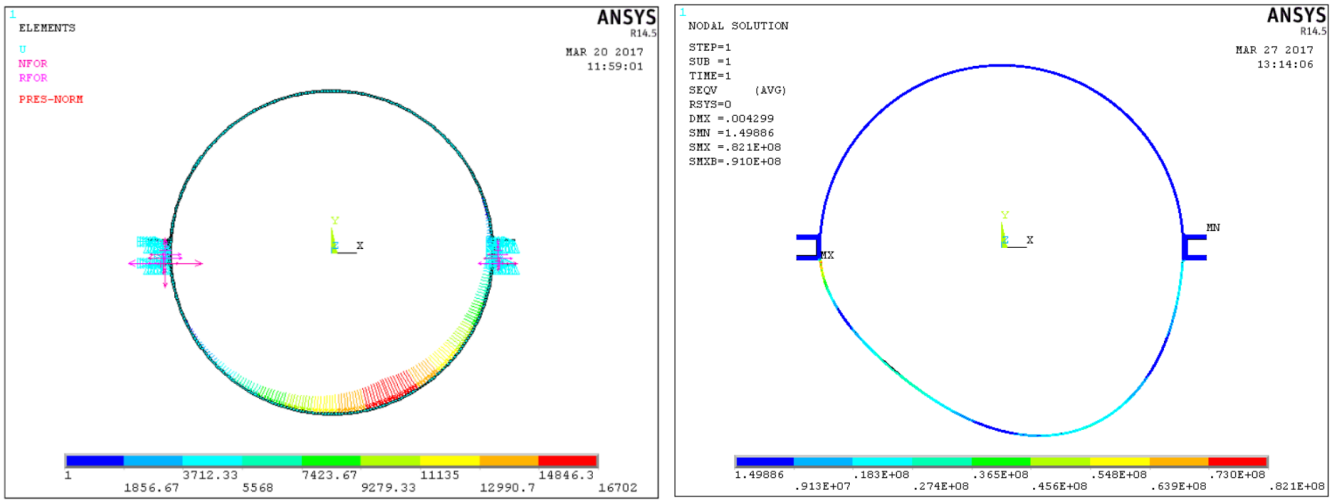
$$\rightarrow P = 1012[KPa]$$

El valor de la eficiencia se obtuvo de la UW-12 de la sección VIII de la norma ASME y tiene un valor de 0,85. Con respecto al esfuerzo permisible, tendrá un valor del esfuerzo de fluencia del material (AISI 304) dividido en un factor de seguridad de 3.

$$t = \frac{1012[KPa] * (740{,}9[mm]/2)}{(310000[KPa]/3) * 0{,}85 - 0{,}6 * 1012[KPa]} \rightarrow t = 4{,}3[mm]$$

5.2.3.3 Simulación en ANSYS. La simulación se realizó sobre un corte posicionado en la mitad del tambor.

Figura 41. Esquema del tambor con todas las cargas a soportar y resultados de la simulación

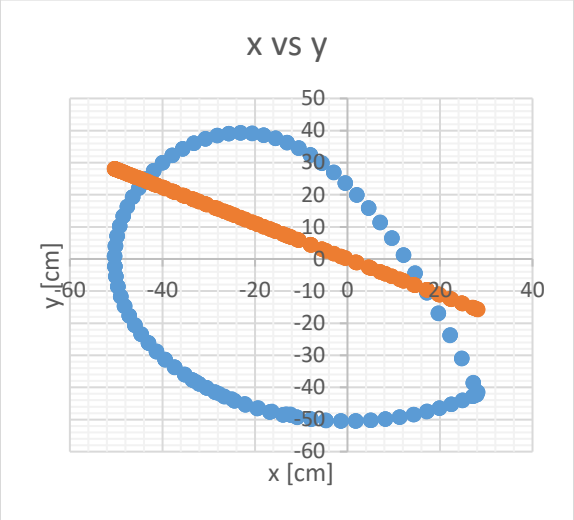


De los resultados obtenidos en la simulación, la cual tuvo un 13,7% de error, se debe emplear una lámina de acero AISI 304 de 5 mm de espesor con bujes de diámetro externo de 1.5 in, de longitud de 7 cm, de espesor de media pulgada y con redondeo de 1 cm del mismo material. Los bujes con rosca interna tendrán un diámetro interno de media pulgada, con un espesor 0.25 in y de longitud de 5 cm.

5.2.3.4 **Diseño de las aletas del molino.** Las aletas del molino influyen directamente en el desempeño y la calidad de trituración del mismo debido a que garantizan que la bola cumpla con la trayectoria óptima, permitiendo el mayor impacto posible sobre el material a triturar.

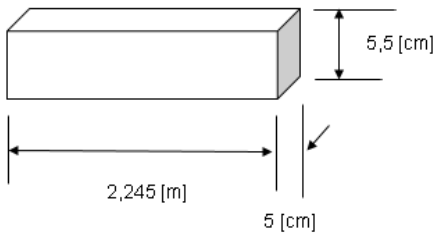
Al igual que en el diseño del prototipo (figura 38), se utilizarán ocho aletas, cada una de 55 [mm] de alto.

Figura 42. Trayectoria de la bola a través del molino.



A partir de la figura 42, se puede detallar que la bola cumple con la trayectoria deseada, de modo que se emplearán 8 aletas separadas cada una a 45° y presentan las siguientes dimensiones.

Figura 43. Dimensiones de la aleta.



5.3 SELECCIÓN DEL FILTRO

Tanto la planta de trituración como el prototipo requieren de un filtro que permita separar los residuos sólidos de la mezcla líquida entre el solvente y los extractos vegetales. El filtro se determina mediante el valor de la granulometría del residuo sólido de menor tamaño, en este caso es la arena de río.

Tabla 14. Granulometría de la arena de río.

PORCENTAJE ADMISIBLE					
TAMIZ			Arena de río		
			Opciones		
N°	pulg.	cm.	min.	max.	Prom.
3	3,0	7,62	100	100	100
2	2,0	5	100	100	100
1 1/2	1,5	3,75	100	100	100
1	1,0	2,5	100	100	100
3/4	0,750	1,91	100	100	100
3/8	0,375	0,95	100	100	100
4	0,250	0,48	95	100	97,5
8	0,125	0,32	81,8	100	90,9
10	0,100	0,2	76	99,2	87,6
16	0,063	0,16	60	90,5	75,25
20	0,050	0,13	48	81,1	64,55
30	0,033	0,08	26,8	60	43,4
40	0,025	0,06	19	43,4	31,2
50	0,020	0,05	13	34,8	23,9
80	0,013	0,03	4	18,1	11,05
100	0,010	0,03	2	11,6	6,8
120	0,008	0,02	1	5,8	3,4
200	0,005	0,01	0	2,2	1,1

Fuente: http://www.idrd.gov.co/

A partir de la Tabla 14, se puede detallar que la granulometría de la arena más fina tiene un valor de 100 micras, de modo que el filtro seleccionado es de 5 micras y de 1 [in] de diámetro.

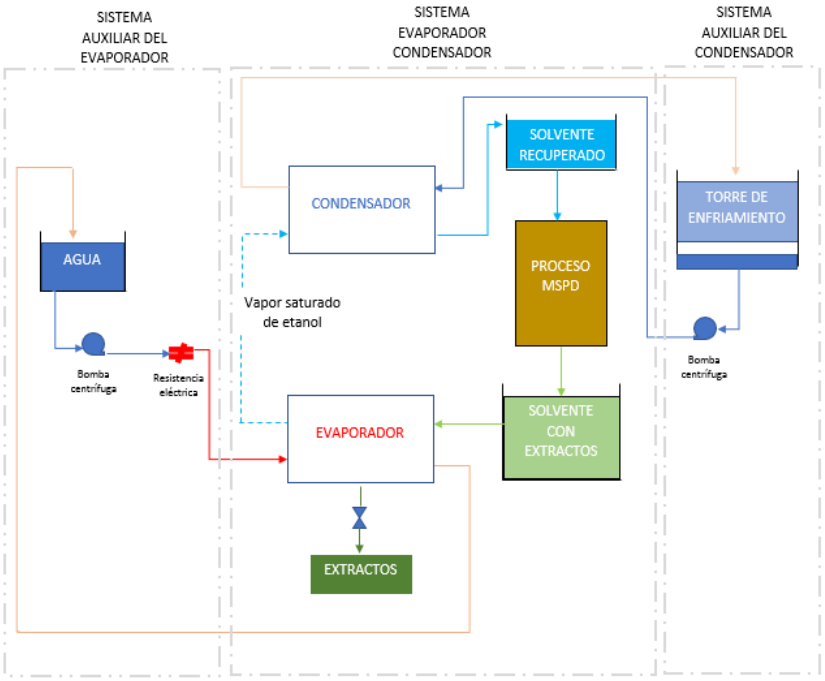
6. DISEÑO DEL SISTEMA TÉRMICO DE RECUPERACIÓN DEL ETANOL

El CENIVAM (Centro Nacional de Investigaciones para la Agroindustrialización de especies vegetales aromáticas y medicinales tropicales), además de obtener los aceites esenciales de la planta *Lippia alba*, también obtiene otros productos de gran valor a partir de la misma, definidos como extractos vegetales (flavonoides, con altos contenidos de plifenoles en general, y otros compuestos orgánicos), que se obtienen mediante el método MSPD, descrito en la sección 2.2, que separa los extractos vegetales de los residuos, mediante la utilización de un solvente (etanol), el cual queda relativamente contaminado después del proceso de separación, denominado de ahora en adelante como solvente con extracto, como se muestra en la Figura 44.

Figura 44. Esquema básico

Es necesario separar la mezcla del solvente con extracto por dos razones. Primero para obtener el solvente recuperado y segundo, para obtener el producto útil que cuente con un aceptable rendimiento de extracción y contenido de moléculas con actividad biológica; El sistema a diseñar consta de un sistema de evaporación (trabaja a bajas temperaturas de ebullición para evitar la degradación de los compuestos orgánicos) y condensación (se obtiene etanol recuperado), como el sistema Soxhlet, descrito en la sección 2.3.

Figura 45. Esquema detallado del sistema



Como se puede observar en la Figura 45, la fuente de calor para el evaporador es una resistencia eléctrica que calienta agua, la cual intercambia calor a la mezcla de solvente con extractos, produciendo vapor saturado de etanol e incrementando la concentración de extractos vegetales dentro del evaporador. Luego, el vapor de etanol se condensa debido a que le transfiere su energía al agua, obteniendo así solvente recuperado.

6.1 DISEÑO TÉRMICO

El diseño térmico tiene como finalidad definir las dimensiones básicas del evaporador y del condensador y las características de la torre de enfriamiento con base en las diferentes teorías de transferencia de calor y termodinámica, siguiendo las restricciones y especificaciones dadas en la sección 4.1.4 y 4.3, respectivamente. Para el desarrollo de cálculo, se usó el software EES®.

6.1.1 **Evaporador.** Los requerimientos para el diseño del evaporador son: generar un flujo másico de vapor de etanol de 250 $[kg/h]$ mediante la vaporización a una temperatura de 34 [°C]. El tipo de intercambiador utilizado para realizar este proceso es un intercambiador de tipo calandria, como se muestra en la Figura 46. El cual es un recipiente con unos tubos (intercambiador de múltiples tubos internos) donde el etanol con extractos fluye por el lado de los tubos y por el exterior el agua de calentamiento que se utiliza para generar energía de vaporización.

Figura 46. Esquema evaporador

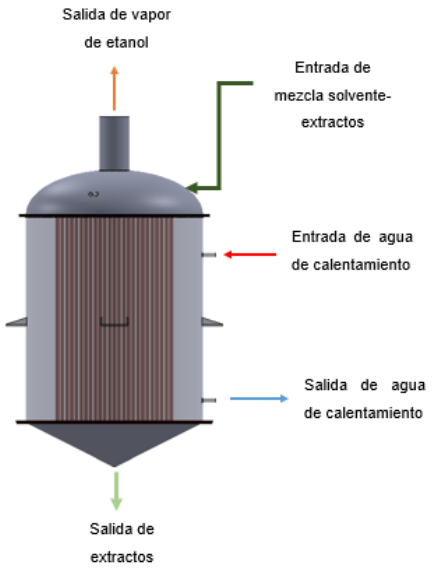


Tabla 15. Datos de proceso

Datos de proceso		
Variables	**Lado de los tubos**	**Lado del casco**
Flujo másico [kg/h]	250	5476
Temperatura [°C]	34	55

Las ecuaciones empleadas para el dimensionamiento funcional del evaporador son las siguientes.

Tabla 16. Diseño térmico evaporador

Ecuaciones	Descripción
$\dot{Q}_{ev} = \dot{m}_v h_{fg}$	Calor del evaporador
$\dot{Q}_w = \dot{Q}_{ev}$	Calor del agua de calentamiento igual al del evaporador
$\dot{Q}_w = \dot{m}_w C_{pw}(T_e - T_s)$	Calor del agua
$LMTD = \frac{(T_e - T_{ev}) - (T_s - T_{ev})}{ln\left(\frac{T_e - T_{ev}}{T_s - T_{ev}}\right)}$	Diferencia de temperatura media logarítmica

Para determinar la temperatura de entrada y de salida, las cuales a su vez definen la longitud de los tubos mediante un proceso iterativo (se inicia la iteración con un número de tubos de 81), se determinan mediante las siguientes ecuaciones.

Tabla 17. Convección externa forzada

Ecuaciones	Descripción
$V_{máx} = \left(\frac{S_T}{S_T - D_{ext}}\right) * V$	Velocidad máxima
$A_{trans} = 23 * S_T * L_t$	Área transversal
$\dot{m}_w = \rho * V * A_{trans}$	Flujo másico de agua
$R_e = \frac{V_{máx} * D_{ext} * \rho}{\mu}$	Reynolds
$N_u = 0{,}52 * R_e^{0,5} * Pr^{0,36}(Pr/Pr_s)^{0,25}$	Nusselt
$h_{conv} = \frac{N_u * k_w}{D_{ext}}$	Coeficiente de transferencia de calor por convección forzada

El calor de evaporación es el mismo que el de ebullición.

Tabla 18. Ebullición

Ecuaciones	Descripción
$\dot{Q}_{ebu} = \mu_l * h_{fg} * \sqrt{\frac{g*(\rho_l - \rho_v)}{\sigma}} * \left[C_{pl} * \left(\frac{T_{superficial} - T_{eva}}{C_{sf} * h_{fg} * Pr_l^n}\right)\right]^3 * A_{eva}$	Calor de ebullición
$A_{eva} = N_{tubos} * \pi * D_{int} * L_t$	Área del evaporador
$h_{ebu} = \frac{\dot{Q}_{ebu}}{A_{eva} * (T_{superficial} - T_{eva})}$	Coeficiente de transferencia de calor de ebullición

Tabla 19. Proceso iterativo evaporador

Ecuaciones	Descripción
$\dot{Q}_{ev} = U_{as} * A_s * LMTD$	Área superficial
$U * A_s = \frac{1}{R_T}$	Coeficiente global de transferencia de calor
$R_T = \frac{1}{h_{conv} * A_{ext}} + R_{cond} + \frac{1}{h_{ebu} * A_{int}}$	Resistencia térmica total
$R_{cond} = \frac{ln(D_{ext}/D_{int})}{2\pi k_{cu} * L_t * N_T}$	Resistencia térmica por conducción

De los resultados obtenidos con base en los datos proporcionados y en las ecuaciones presentadas en las tablas 16-19, se obtuvieron los siguientes resultados.

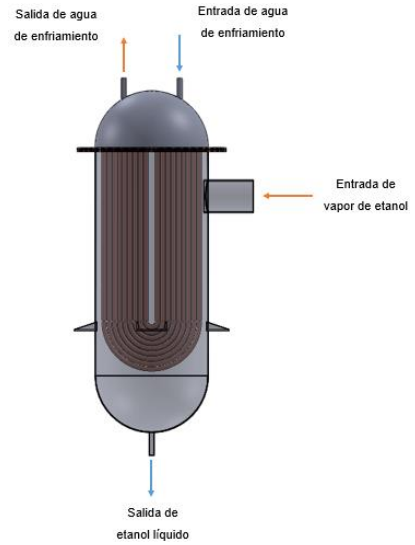
Resultados:

Tabla 20. Resultados del evaporador

Nombre Variable	**Variable**	**Valor**
Número de tubos	N_T	576
Diámetro de la tubería de cobre [in]	D_{ext}	1
Longitud de los tubos [m]	L_t	0,5
Área de transferencia de calor $[m^2]$	A_s	24,24
Coeficiente global de transf. De calor $[W/m^2 * °C]$	U	170
Calor de evaporación [KW]	Q_{eva}	63,31
Temperatura de salida [°C]	T_s	45
Temperatura superficial [°C]	$T_{superficial}$	45,5
Espaciamiento entre tubos [m]	S_T	0,035

6.1.2 **Condensador.** Este sistema térmico cumple la función de condensar el solvente recuperado. Dentro de los tubos irá agua que se encargará de recibir la energía térmica del vapor, mientras que por el casco pasará el vapor de etanol (figura 47). Es importante que la cantidad de vapor que entra sea la misma que la cantidad de etanol que se condensa, debido al incremento de presión que se genera por una acumulación de vapor, situación que cambia la temperatura de ebullición del evaporador. Hay flujo de sustancias inmiscibles y por ello el tipo de intercambiador de calor es de carcaza y tubos.

Figura 47. Esquema del condensador



Datos:

- $\dot{m}_{cond} = \dot{m}_v = 250[kg/h]$
- $\dot{V}_w = 73[gpm]$

Tabla 21. Diseño térmico del condensador

Ecuaciones	**Descripción**
$\dot{Q}_{conv} = \dot{m}_w * C_{pw} * (T_{sal} - T_{en})$	Transferencia de calor por convección forzada.
$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{cond} * h_{fg}$	Transferencia de calor por cambio de fase
$\dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{conv}$	

Tabla 22. Flujo turbulento en tubo de cobre

Ecuaciones	**Descripción**
$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * log\left(\frac{\varepsilon/D_{int}}{3{,}7} + \frac{2{,}51}{R_e\sqrt{f}}\right)$	Factor de fricción
$N_u = 0{,}125 * f * R_e * Pr^{1/3}$	Nusselt
$h_{conv} = \frac{N_u * k_l}{D_{int}}$	Coeficiente de transferencia de calor por convección

La relación matemática utilizada para definir el valor de la transferencia de calor por condensación es:

$$h_{cond} = 0{,}943\left[\frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)h_{fg}^{*}k_l^3}{\mu_l(T_{sat} - T_{sup})L_t}\right]^{1/4} \quad (Ecuación\ 36)$$

Tabla 23. Proceso iterativo condensador condensador

Ecuaciones	Descripción
$\dot{Q}_{cond} = U_{as} * A_s * LMTD$	Área superficial
$U * A_s = \frac{1}{R_T}$	Coeficiente global de transferencia de calor
$R_T = \frac{1}{h_{conv} * A_{int}} + R_{cond} + \frac{1}{h_{cond} * A_{ext}}$	Resistencia térmica total
$R_{cond} = \frac{ln(D_{ext}/D_{int})}{2\pi k_{cu} * L_t * N_T}$	Resistencia térmica por conducción

Siguiendo el proceso de cálculo de las ecuaciones planteadas en las tablas 17, 21, 22, 23 y mediante la ecuación 36, se obtienen los siguientes resultados:

- Número de tubos: 100
- Longitud de los tubos: 2[m]
- $A_{superficial} = 16{,}83[m^2]$
- $U = 340[W/m^2 * °C]$

Tabla 24. Resultados del proceso iterativo

Parámetro	EVAPORADOR	CONDENSADOR
Tipo de intercambiador de calor	Calandria	Carcaza y tubos
Fluido dentro de la carcaza	Agua caliente	Vapor de etanol
Fluido dentro de los tubos	Etanol líquido	Agua fría
Número de tubos	576	100
Longitud de los tubos [m]	0,5	2
Diámetro de los tubos [in]	1	1
Área de transferencia de calor $[m^2]$	24,24	16,83
Coeficiente Global de transferencia de calor $[W/m^2 * °C]$	170	340
Valor de la transferencia de calor $[KW]$	63,31	63,31

6.1.3 Torre de enfriamiento. Para el enfriamiento del agua utilizada por el condensador, es necesario implementar una torre de enfriamiento que garantice una temperatura de entrada constante. Para la selección de la torre se necesitan los siguientes parámetros:

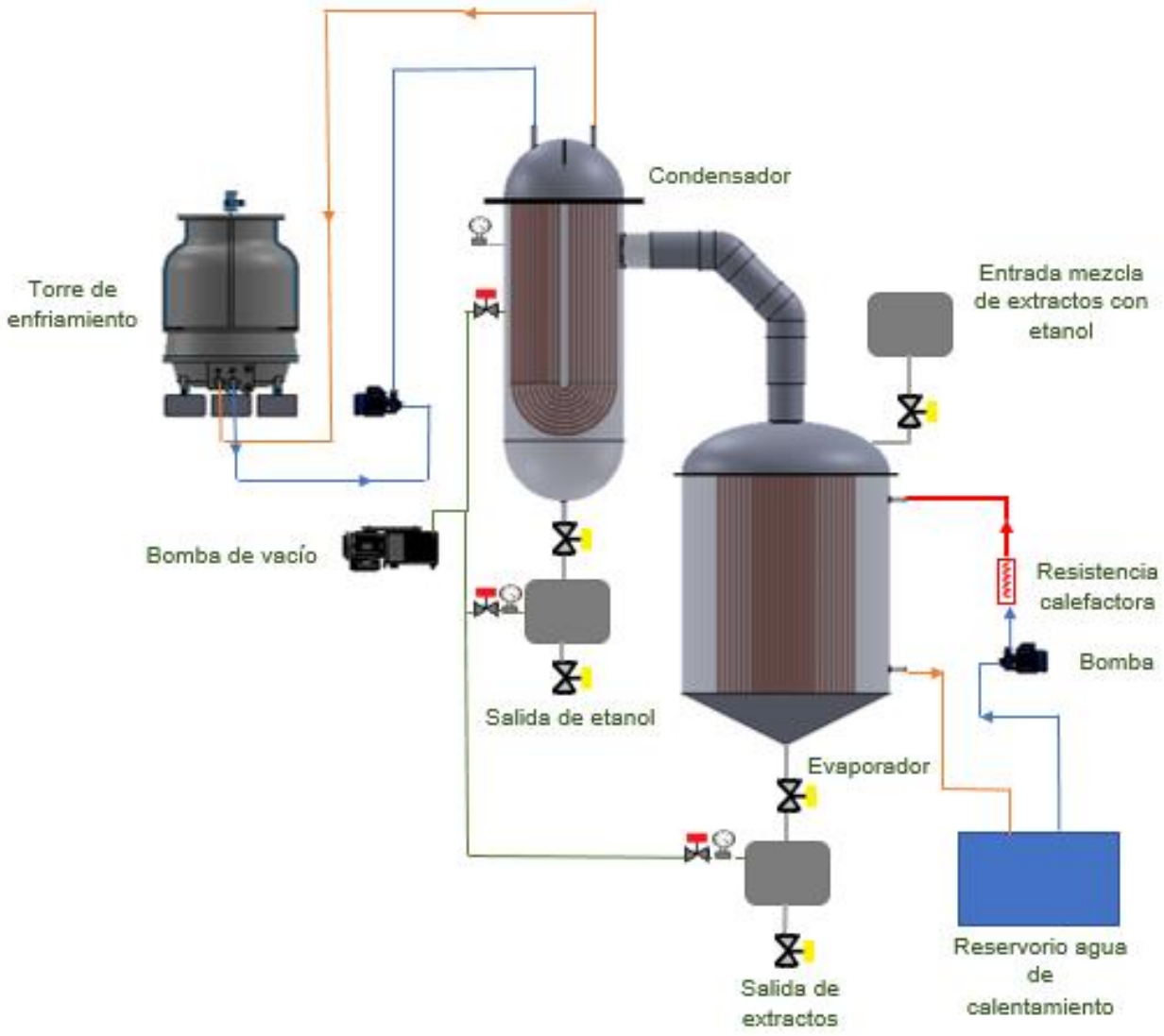
- Presión atmosférica: 90,66[KPa]
- Temperatura de entrada: 24,6[°C]
- Temperatura de salida: 21[°C]
- Caudal del condensador: 73[gpm]

La torre de enfriamiento que cumple con estas condiciones, según el catálogo de CTS (ver Anexo F), es la torre T-225.

6.1.4 **Calentamiento por resistencia eléctrica.** Para el calentamiento del agua, se debe utilizar una resistencia eléctrica, la cual se encuentra entre la salida de la bomba centrífuga y la entrada del serpentín del evaporador. Dicha resistencia debe elevar la temperatura del agua a 55[°C]. El sistema de calentamiento debe tener un control de temperatura que mantenga la temperatura de entrada constante, por la importancia del equipo se recomienda el uso de un pirómetro.

En cuanto a la resistencia eléctrica que se debe seleccionar, se debe tener en cuenta que la cantidad de calor requerida por el evaporador es de 63,31 [KW], de modo que el consumo de la misma debe ser superior a este valor debido a que el control de temperatura evita que el agua alcance valores de temperatura superiores al deseado. Con base en lo anterior, se seleccionan dos resistencias eléctricas Cetal (del catálogo de CRN®) de 16 mm de diámetro, de 225 [mm] en acero inoxidable; cuenta con una capacidad energética máxima de 750[V] a 60[A] (45[KW]) cada una.

Figura 48. Esquema general del sistema térmico



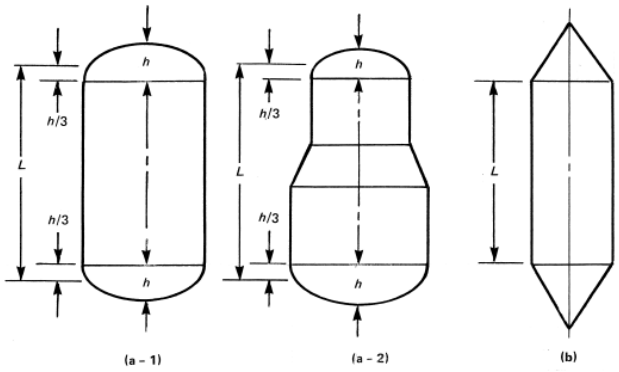
6.2 DISEÑO MECÁNICO

Debido a que tanto el evaporador como el condensador estarán a presión externa por encontrarse en condiciones de vacío, es necesario realizar el cálculo del espesor para evitar una implosión. La norma ASME SECCIÓN VIII - PARTE UG 28, trata sobre proceso iterativo de cálculo del espesor de casco y tubos sometido a presión externa. Para este caso en particular, la presión externa es definida por la diferencia de presiones entre la presión atmosférica y la presión interna del recipiente.

$$P = P_{atm} - P_{vacío} = 90{,}66 - 13{,}18 \rightarrow P = 77{,}48[KPa]$$

Como los valores de presión y de temperatura $(T = 40[°C])$ son iguales tanto para el evaporador como para el condensador, el espesor de los recipientes será el mismo para los dos, de modo que el recipiente crítico (el de mayor área superficial afectada por la presión de vacío) es el evaporador.

Figura 49. Geometría de recipientes a presión



Fuente: ASME Sección VIII – Parte UG 28

De la figura 49, se definen las geometrías de los recipientes: el condensador tendrá la forma del recipiente (a-1), mientras que el evaporador tendrá una forma combinada entre las figuras (a-1) y (b).

De los resultados obtenidos en la sección 6.1.1, se determinó que el diámetro interno del casco del condensador es de 0,76 m y una longitud de tubos de 2 m, el cual es un parámetro inicial del proceso iterativo.

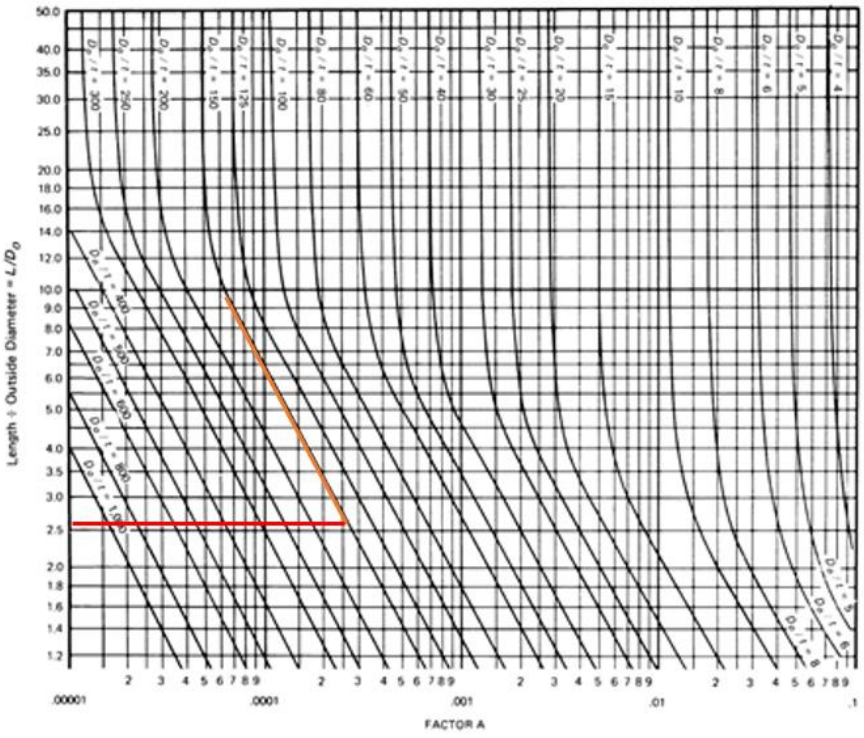
1. El espesor del casco se asume de 5 mm y una relación de diámetro externo.

$$\frac{D_{ext}}{t} = \frac{0{,}76[m]}{0{,}005[m]} = 152 \geq 10$$

$$\frac{L}{D_{ext}} = \frac{3[m]}{1{,}814[m]} = 2{,}632$$

2. Determinación del factor A: Tomando las relaciones calculadas en el paso 1, se contrastan en la siguiente gráfica.
3.

Figura 50. Gráfica de los componentes geométricos sometidos a presión externa o cargas de compresión (para todos los materiales)

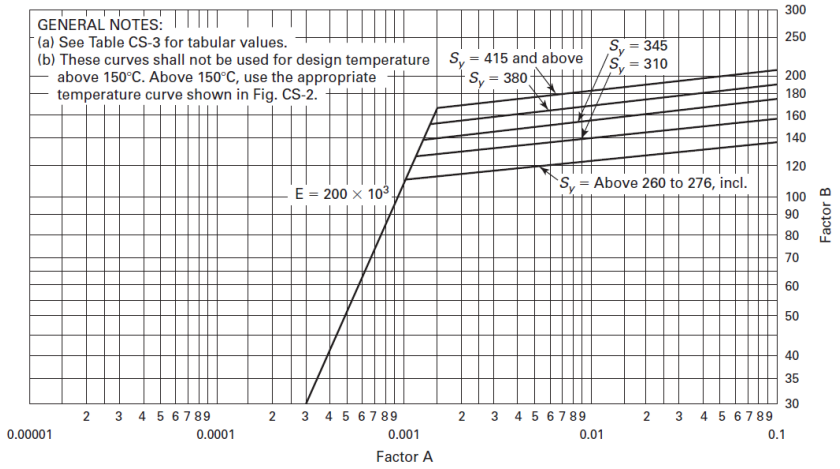


Fuente: Figura G, subparte 3 de la sección II, parte D de la ASME.

De la figura 50, el valor del factor A es de 0,00025.

4. Cálculo del factor B: con base en el factor A calculado en el paso anterior y mediante el uso de la siguiente gráfica se obtiene el valor del factor B.

Figura 51. Gráfica para determinar el espesor del casco o de componentes sometidos a presión externa desarrollados para aceros al carbono y aleaciones de acero con esfuerzos de fluencia específicos mínimos o superiores a 260 MPa y para temperaturas de 150 °C e inferiores



Fuente: Figura CS-3, subparte 3 de la sección II, parte D de la ASME.

El acero seleccionado es un acero AISI 304 ($S_y = 310[MPa]\ y\ E = 200[GPa]$). Como no se encuentra ninguna intersección entre el factor A y la línea que define las propiedades del material, se procede al siguiente paso.

5. Cálculo de la presión P_a:

$$P_a = \frac{2AE}{3(D_{ext}/t)} = \frac{2 * 0{,}00025 * (200 * 10^6[KPa])}{3(152)} \rightarrow P_a = 219{,}3[KPa]$$

Como $P_a \geq P$ el espesor seleccionado resistirá la presión externa sometida.

7. PROCESOS DE MANUFACTURA

La planta realiza dos operaciones: operación de trituración y operación de separación de sustancias. La operación de trituración se realiza por impacto por medio de un molino de bolas, mientras que la operación de separación de sustancias se realiza por medio de un filtro, donde se produce un flujo a partir de una diferencia de presiones y posteriormente se desarrolla una separación con un evaporador - condensador.

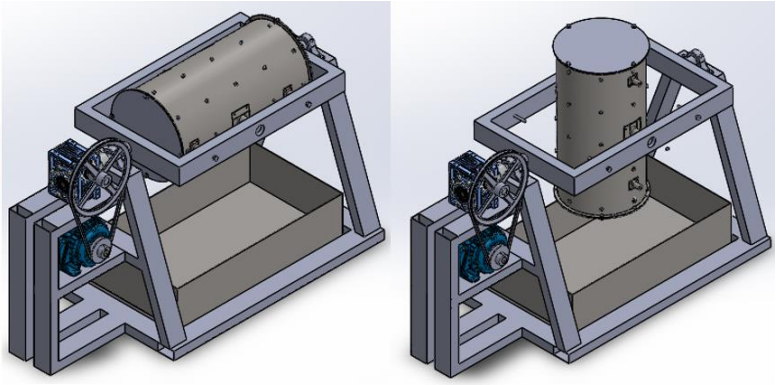
A continuación, se explicarán los procesos de manufactura necesarios para la construcción tanto del prototipo como de la planta.

7.1 SISTEMA DE TRITURACIÓN

Las partes que componen el sistema de trituración son las siguientes:

- Tambor: lámina de acero inoxidable rolada y soldada. Debe soportar tanto el peso de la carga (material vegetal, esferas macizas de aluminio y arena) como las cargas inerciales (fuerza centrífuga).
- Aletas: tubos cuadrados huecos soldados dentro del tambor. Se encargan de garantizar la cinemática del molino (trayectoria que deben seguir las bolas).
- Tapas: lámina de acero inoxidable en forma de disco. Evita que la carga salga del molino cuando esté en operación.
- Estructura del tambor: Tubos cuadrados huecos soldados. Permiten al molino girar en dos direcciones distintas; el primer sentido de giro es para la trituración, y el otro es para la operación de separación de sustancias como se muestra en la Figura 52.

Figura 52. Movimientos de giro del prototipo



- Estructura del sistema: Tubos cuadrados macizos soldados. Cumplen la función mantener fijos los distintos componentes.

7.1.1 **Tambor.** El tambor del sistema de trituración de la planta es de acero AISI 304, de 2,328 [m] de ancho por 1,482 [m] de largo y de 5 [mm] de espesor. A esta lámina se le debe aplicar un proceso de rolado que garantice la forma cilíndrica del tambor, finalmente se une la lámina mediante un cordón de soldadura de 5 mm de diámetro como se muestra en la Figura 53.

Figura 53. Proceso de rolado

Fuente: http://www.maximus.com.mx/?cat=32

El tambor presenta dos bujes sencillos (separados a 180° entre sí) y cuatro bujes roscados (dos parejas equidistantes separadas a 180° entre sí). Los bujes se unen al tambor mediante soldadura de arco eléctrico y el proceso de roscado interno se realiza como se muestra en la Figura 54.

Figura 54. Rosca interna

7.1.2 Aletas. El tubo hueco cuadrado se consigue normalmente por metros, de modo que se deben comprar 12 metros de tubo y cortarlo en ocho partes de 1,482 metros de longitud, como se muestra en la siguiente figura. Después se une al tambor mediante 6 puntos de soldadura de 5 mm de diámetro, distribuidos de manera uniforme sobre toda la longitud.

Figura 55. Proceso de corte.

7.1.3 Tapas. A dos láminas de acero de 0,75 metros de largo por 0,75 metros de ancho de 5 mm de espesor se les realiza un proceso de corte por plasma que garantice una circunferencia de 0,7409 metros de diámetro. Las imperfecciones superficiales se mejoran con un proceso de esmerilado.

Figura 56. Corte por plasma

Fuente: Logismarket

7.1.4 **Estructura del tambor.** Los tubos cuadrados huecos se compran por metros, se cortan como se muestra en la figura 55 y finalmente se unen mediante soldadura de arco eléctrico. Los agujeros de la estructura se realizaron mediante taladro manual (Figura 57).

Figura 57. Taladrado manual

7.1.5 **Estructura del sistema.** Los tubos macizos de acero estructural se cortan a las dimensiones deseadas de longitud (Figura 55) y luego se juntan mediante un proceso de soldadura de arco eléctrico (Figura 58).

Figura 58. Soldadura de arco eléctrico

Fuente: ttps://es.wikipedia.org/wiki/Soldadura_manual_de_metal_por_arco

Después de realizar los procesos de manufactura descritos con anterioridad, y después de ensamblar cada una de las partes, se obtiene el siguiente resultado.

Figura 59. Prototipo para triturar 1[kg] de material por lote

Finalmente, se procede a pintar el sistema para mejorar su estética.

7.2 EVAPORADOR AL VACÍO

Los subsistemas que componen el evaporador al vacío son:

- Evaporador: se encarga de realizar el proceso de ebullición entre la mezcla de etanol con extractos vegetales con el fin de separarlos.
- Condensador: se encarga de condensar el vapor de etanol. Se obtiene el etanol recuperado.
- Tanques auxiliares: cumplen la función de almacenamiento.

7.2.1 Evaporador. Las partes del evaporador al vacío son:

- Casco: lámina rolada de acero inoxidable (AISI 304) de 5 mm de espesor. Permite el intercambio de calor entre el agua y el solvente - extractos.
- Reservorio: lámina cortada a láser y rolada de acero inoxidable. Tiene la función de acumular los extractos después de la separación y permite la completa ebullición del etanol.
- Tapa: lámina de acero inoxidable de 5 mm prensada. Permite que el sistema sea hermético y que el vapor de etanol se dirija al condensador.
- Tubería de cobre: tubos de cobre de 1'' de diámetro nominal de 1,5 metros de largo. Tubería en la que se encuentra el etanol.
- Bridas: Láminas de acero inoxidable cortadas y perforadas. Mantienen fija la posición de los tubos de cobre.

7.2.1.1 **Casco .** El casco del evaporador está hecho de acero inoxidable de 5 [mm] de espesor. A una lámina de acero de 4,115 [m] de ancho por 1,5 [m] de largo de 5 [mm] de espesor se le realiza un proceso de rolado que garantice un casco de 1,5 metros de alto con un diámetro de 1,8 metros como se muestra en la figura 53. Finalmente se une la lámina mediante un cordón de soldadura de 20 [mm] de diámetro.

7.2.1.2 Reservorio. El reservorio está hecho de acero inoxidable de 5 [mm] de espesor. A una lámina de acero, se le realiza un proceso de corte por láser, luego se rola y finalmente se une mediante un cordón de soldadura.

7.2.1.3 **Tapa.** Una lámina de acero de 5 [mm] de espesor se le realiza un corte por plasma, luego se desarrolla un proceso de prensado, con prensa hidráulica, que garantice la forma de medio cascarón esférico. Finalmente se realiza un proceso de pulido para mejorar los acabados superficiales.

Figura 60. Prensa hidráulica

Fuente: http://machinerychina.es/14h-single-action-press.html

7.2.1.4 **Tubería de cobre.** La tubería de cobre de 1'' de diámetro nominal se consigue en el mercado, normalmente por metros. Para obtener la longitud deseada, se les realiza un proceso de corte como se muestra en la Figura 55.

7.2.1.5 **Bridas .** Las bridas están hechas de láminas de acero inoxidable de 5 [mm] de espesor. Se les realiza un proceso de corte por plasma, como se muestra en la Figura 56, que garantice que tengan el diámetro externo deseado, luego se realizan las perforaciones por las cuales pasará las tuberías de cobre.

7.2.2 **Condensador.** El condensador está compuesto de las mismas partes que el evaporador, con sus mismos procesos de manufactura, con la diferencia de que no posee reservorio y de que las tuberías de cobre presentan un proceso adicional: soldadura de cobre, proceso que garantiza la forma en U de los tubos.

8. PRUEBAS Y ENSAYOS

Las pruebas a realizar son tanto al sistema construido (planta con capacidad de 1 [kg]/lote) como al producto obtenido: extractos vegetales. Para la planta se realizaron ensayos de funcionalidad, consumo energético y confiabilidad. Al producto se le realizaron pruebas de masa del extracto y de composición química.

8.1 PRUEBAS SOBRE EL EQUPO

8.1.1 **Funcionalidad.** El ensayo de funcionalidad consistió en definir qué tan bien funciona el sistema construido, respecto a los cálculos teóricos realizados. El sistema construido por los autores trata sobre un sistema de trituración con capacidad de 1 kg/lote, de modo que el ensayo consiste en lo siguiente: tiempo de trituración y el movimiento de las bolas a través del sistema.

Figura 61. Mirilla del molino

Con la mirilla del molino (figura 61), se pudo observar que las bolas cumplen la trayectoria calculada, de modo que el dimensionamiento de las aletas y su espaciamiento es correcto. Los tiempos de trituración se definieron con base la relación másica de material vegetal – arena.

Figura 62. Material vegetal sin triturar (izquierda), material triturado después de 30 minutos (centro) y material triturado después de 2,5 horas (derecha)

La relación másica manejada en la Figura 62 fue 5:1 (por cada gramo de material vegetal ingresado al molino, se ingresaron 5 gramos de arena fina de río). La trituración con esta relación duró 4[h], la relación 8:1 duró 3,5[h] y la relación 12:1 duró 2,5[h].

8.1.2 Consumo energético. El ensayo consistió en determinar la cantidad de energía que consume el sistema mediante la determinación de la corriente promedio consumida durante el tiempo de operación del molino con la ayuda de un multímetro.

El motor eléctrico funcionó con 18[V] a 1,1[A], por ley de Ohm:

$$Pot = V * i \approx 20[W]$$

Para la relación 5:1, se consumieron 288000[J], la de 8:1 consumieron 252000[J] y la de 12:1 consumieron 180000[J].

8.1.3 Confiabilidad. La prueba de confiabilidad consistió en determinar la calidad del material triturado y definir cualitativamente la reducción de las partículas del material antes y después del proceso, mediante una columna de tamices. También, se determinó la cantidad de etanol recuperado.

Figura 63. Diferencia de tamaño de partículas desde 0,016 mm a 2 mm

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Clasificaci%C3%B3n_granulom%C3%A9trica

Las pruebas de granulometría se hicieron con tamices desde $53[\mu m]$ hasta $100[\mu m]$, donde las partículas más finas pasaron el tamiz de 53 micrómetros. El equipo consiste en una plataforma vibratoria donde se ajustan los tamices como se muestra en la figura 64.

Figura 64. Plataforma vibratoria de tamices

Se empleó el sistema de evaporación al vacío, utilizado para pruebas de recuperación de solvente, del laboratorio de sistemas térmicos de la UIS (véase Figura 63).

Figura 65. Sistema de evaporación al vacío con bomba de calor

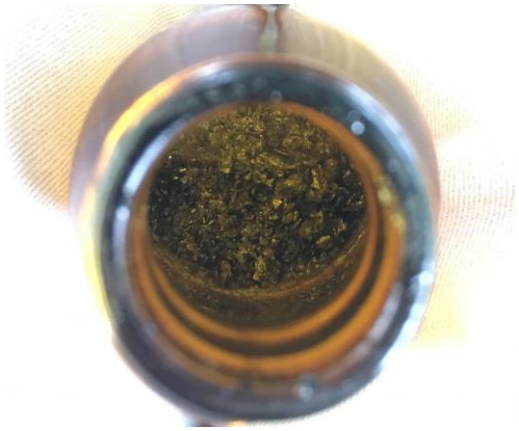
Al sistema se ingresó 4,2 [L] de solvente con extracto. En la Figura 66 se puede detallar que alrededor del 75% del volumen ingresado al sistema de evaporación al vacío fue recuperado.

Figura 66. Comparación entre el etanol ingresado y el obtenido después de la separación

8.2 PRUEBAS SOBRE EL PRODUCTO

8.2.1 Masa del extracto. La prueba consistió en determinar la cantidad de producto obtenido (extracto) partiendo de la cantidad de materia prima suministrada. Éste ensayo es de vital importancia debido a que define la viabilidad económica del proceso.

Figura 67. Extracto vegetal de *Lippia alba*



Después de recuperar el etanol, se procede a retirar el etanol excedente presente en la mezcla de solvente con extracto mediante un rotaevaporador (Figura 68) y se realiza un proceso de liofilización para deshidratar el extracto (Figura 67).

Figura 68. Rotaevaporador

Fuente: http://www.elementosquimicos.com.co/equipos/equipos-importados/rotaevaporadores.html

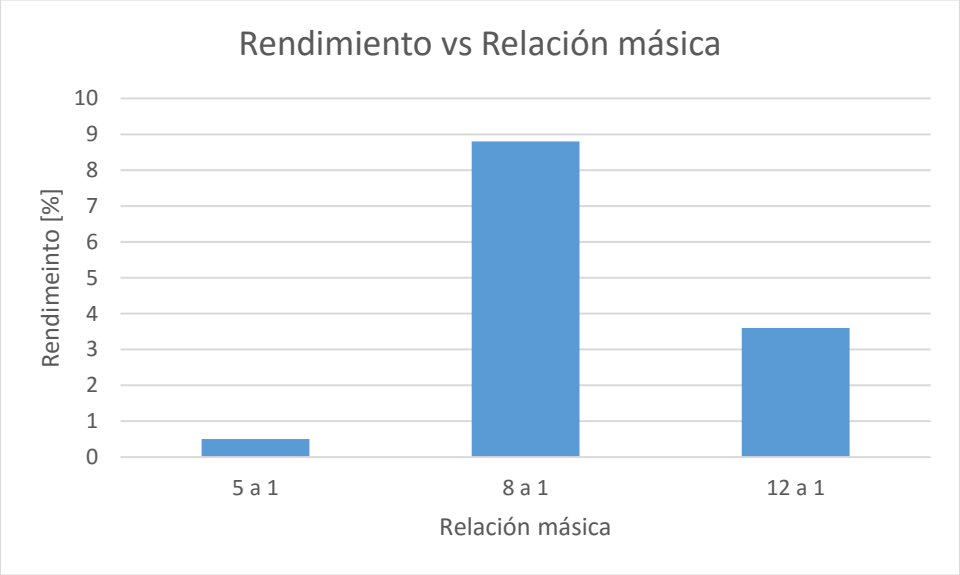
Se pesaron los extractos obtenidos de muestras de 5 gramos para cada relación. Para la relación másica de 5 a 1, la cantidad de extracto obtenido fue de 5 [mg]; mientras que de la relación 8 a 1 se obtuvieron 55[mg] y de la 12 a 1: 15[mg]. La cantidad de masa de material vegetal es de 1 gramo para la relación 5 a 1, 0.625 gramos para la 8 a 1 y 0,42 gramos para la 12 a 1.

$$Rendimiento = \frac{m_{extracto}}{m_{MV}} * 100 \ (Ecuación\ 37)$$

Dónde: $m_{extracto}$ es la masa del extracto y m_{MV} es la masa del material vegetal (ambas variables en las mismas unidades de masa).

Utilizando la Ecuación 37, el rendimiento para la relación 5 a 1 es 0,5%, para la 8 a 1 es 8,8% y para la 12 a 1 es 3,6%. Con base en los rendimientos calculados, para la planta de trituración de $100[kg_{MV}/lote]$, la cantidad de extracto que se esperaría producir es: $0{,}5\ [kg_{ext}/lote]$ para la relación 5 a 1, $8{,}8\ [kg_{ext}/lote]$ para la relación 8 a 1 y $3{,}6[kg_{ext}/lote]$ para la relación 12 a 1.

Figura 69. Rendimiento vs Relación másica



8.2.2 Composición Química. La Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (High Performance Liquid Cromatography – HPLC) es una técnica utilizada para separar, e identificar, los compuestos pertenecientes a una mezcla. Esta prueba es esencial para caracterizar el producto y define qué tan bien fue la separación entre el solvente y el mismo, además de las impurezas que éste pueda llegar a tener.

De las pruebas realizadas, se obtuvieron los resultados cromatográficos mostrados en el Anexo M y en la tabla 25.

Tabla 25. Composición química de las muestras de extractos vegetales de *Lippia alba*

Curva de calibración			Relación 5:1	Relación 8:1	Relación 12:1
name	**Area**	**ExpRetTime**	**area**	**area**	**area**
ÁCIDO GÁLICO	790,13	1,92	0,00	0,00	0,00
TEOBROMINA	223,67	3,50	0,00	0,00	0,00
TEOFILINA	666,95	5,59	0,00	0,00	0,00
ÁCIDO p-HIDROXIBENZOICO	3480,85	6,66	46,05	0,00	0,00
EPIGALOCATEQUINA	350,05	10,26	0,00	0,00	0,00
CATEQUINA	624,30	10,47	0,00	0,00	0,00
ÁCIDO VANÍLICO	1049,60	11,50	0,00	0,00	0,00
ÁCIDO CAFEÍCO	2199,68	11,73	0,00	0,00	0,00
CAFEÍNA	41,43	12,39	0,00	0,00	0,00
EPICATEQUINA	261,87	16,48	0,00	0,00	9,46
EPIGALOCATEQUINA GALATO	656,96	16,76	0,00	0,00	27,90
ÁCIDO p-CUMÁRICO	859,70	17,03	0,00	0,00	15,45
ÁCIDO FELÚRICO	1988,60	18,55	0,00	0,00	79,90
EPICATEQUINA GALATO	488,29	19,64	0,00	0,00	24,03
ÁCIDO ROSMARÍNICO	1400,62	22,00	0,00	0,00	10,74
ÁCIDO trans-CINÁMICO	2070,96	25,36	270,51	57,89	72,46
LUTEOLINA	1673,67	26,84	0,00	0,00	0,00
QUERCETINA	3946,30	27,11	0,00	0,00	0,00
NARINGENINA	918,07	30,45	0,00	0,00	104,58
APIGENINA	1063,89	30,62	0,00	154,53	532,75
KAEMPFEROL	1848,65	30,67	0,00	0,00	129,67
PINOCEMBRINA	487,07	31,18	864,13	7304,69	346,81
ÁCIDO CARNÓSICO	672,09	31,83	2424,27	0,00	113,98
ÁCIDO URSÓLICO	10,09	31,95	0,00	0,00	356,18
TOTAL	-	-	3604,96	7517,11	1823,92

9. VIABILIDAD ECONÓMICA

La relación beneficio-costo se estimó con base en los costos de construcción y de operación contrastando con el valor del producto obtenido.

Los compuestos mayoritarios mostrados en la Tabla 25 son: apigenina, pinocembrina, ácido carnósico y ácido ursólico; compuestos que también se encuentran en un producto artificial conocido como BHT (Butylated Hydroxytoluene), cuyo valor en el mercado es de $€23{,}35[EUR/500\ g] \approx €46{,}7[COP/Kg]$ (según Aliexpress.com). El precio del euro hoy (25 de abril de 2017) es de $3168 (COP); de modo que un kilogramo de BHT cuesta $147.946 (COP).

Suponiendo que el valor del compuesto artificial BHT sea el mismo que el del extracto y que la ganancia para el productor del 15% por gramo de extracto, se obtiene el siguiente beneficio monetario por lote para una relación másica de 8 a 1.

$$Producción = 0{,}15 m_{MV} * Precio$$

$$\rightarrow Producción = 0{,}15 * (8{,}8[Kg_{ext}/lote]) * (\$147946[COP/Kg_{ext}])$$

$$\rightarrow Producción \approx \$800.000\ [COP/día]$$

Al producir $4[lote/día]$,la producción es de $\$800.000\ [COP/día]$. La potencia utilizada para producción diaria es de 28[hp] por 20 horas, de modo que:

$$Consumo\ energético = Pot * tiempo = 28[hp] * \left(\frac{0{,}7457[KW]}{1[hp]}\right) * 20[h]$$

$$\rightarrow Consumo\ energético = 418[KWh]$$

Si el precio de la energía está, en promedio, en $400[\$/KWh]$ (según la electrificadora de Santander – ESSA), el precio de la energía por día está en $167.200 (COP).

La rentabilidad diaria es de $632.800 (COP) de modo que, trabajando 20 días al mes, se estima que la rentabilidad mensual es de $12’656.000 (COP). Si la inversión a realizar es de $123’617.782 (COP), como se muestra en el Anexo L, entonces se puede decir que la inversión se recupera en 9,8 meses o en 195,4 días de trabajo.

9.1 ANÁLISIS ECONÓMICO

Para obtener la relación costo-beneficio se realiza un análisis económico que incluye la inversión, el mantenimiento y operación.

Datos:

- Se invierten 123,618 millones de pesos.
- Se comienza a trabajar a partir del segundo mes.
- Al tercer mes se tiene una ganancia de $12’656.000. (COP).
- A partir del tercer mes se obtiene las ganancias mensuales (cuotas fijas mensuales).
- Tiempo de producción de 5 años.
- Práctica de mantenimiento: limpieza de los equipos a los 7 días de operación.
- El equipo trabaja 20 días al mes.
- Egresos en función de las prácticas de mantenimiento.

$$i_a = 33{,}5\%$$

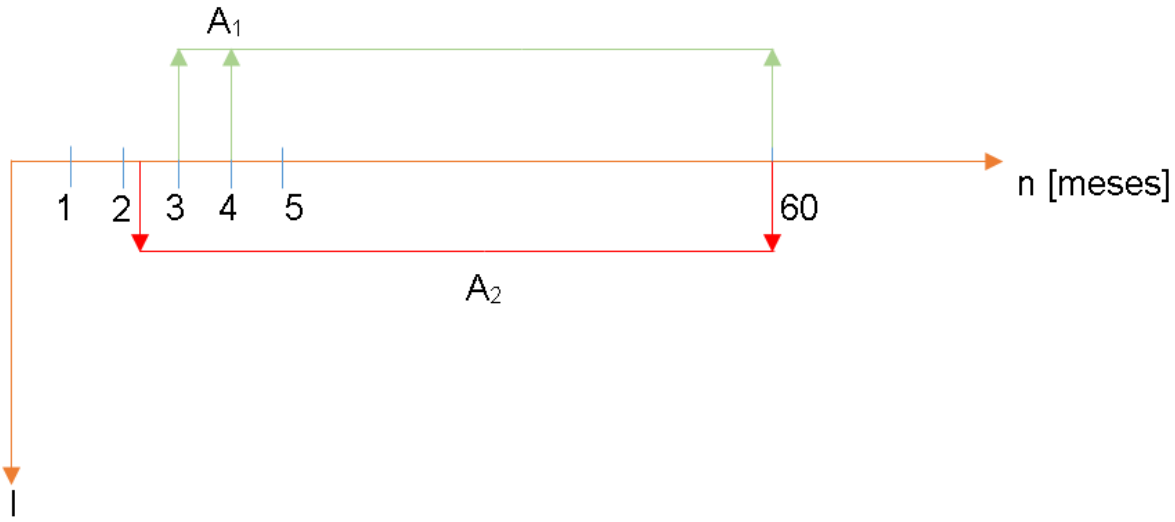
$$i_m = 2{,}4\%$$

$$i_d = 0{,}079\%$$

$A_1 = \$12'656.000$ Anualidad de ingresos.

$A_2 = \$40.000$ Anualidad perteneciente a los gastos por mantenimiento.

Figura 70. Diagrama de flujo



Cálculos:

$$Ingreso = A_1 * \left[\frac{(1+i_m)^{n_m}-1}{i_m*(1+i_m)^{n_m}}\right] * (1+i_m)^{-2} - I$$

$$Ingreso = 12.656.000 * \left[\frac{(1+0{,}024)^{58}-1}{0{,}024*(1+0{,}024)^{58}}\right] * (1+0{,}024)^{-2} - 123.617.782$$

$$\rightarrow Ingreso = \$252.203.367$$

$$Egreso = A_2 * \left[\frac{(1+i_d)^{n_d}}{i_d*(1+i_d)^{n_d}}\right] * (1+i_d)^{-66}$$

$$Egreso = A_2 * \left[\frac{(1+0{,}00079)^{1759}}{0{,}00079*(1+0{,}00079)^{1759}}\right] * (1+0{,}00079)^{-66}$$

$$\rightarrow Egreso = \$48'061.545$$

$$BC = \frac{Ingreso}{Egreso} \rightarrow BC \approx 5[\$Ganados/\$Invertidos]$$

En una proyección a 5 años, por cada peso invertido hoy se obtiene una ganancia de 5 pesos.

9.1.1 **Tasa interna de retorno (TIR).** La tasa interna de retorno es una herramienta económica que indica qué tan viable es la ejecución de un proyecto: consiste en encontrar el valor de la tasa de interés periódico que produzca un valor presente neto de cero.

$$VPN = \sum_{j=0}^{60} VP_j = 0 \ (Ecuación\ 38)$$

$$VP_j = \frac{VF}{(1+TIR)^j}; j \geq 3 \ \ (Ecuación\ 39)$$

Dónde: VPN es el valor presente neto, VP_j es el valor presente del período determinado, VF es el valor del flujo de caja esperado, j es el número del período de tiempo (en meses) que va desde 0 hasta 60 y TIR es el valor de la tasa de interés que garantiza que el VPN sea cero.

Para este caso, se espera que los flujos de caja tengan un valor de $13’095.820 por mes durante 57 meses, a partir del tercer mes de haberse realizado la inversión. En el mes 0, se realiza la inversión, en el primer mes no se obtiene ninguna ganancia y desde el segundo mes se inician labores de mantenimiento del equipo (limpieza de los serpentines), como se muestra en la figura 70.

Realizando un proceso iterativo por medio de las ecuaciones 38 y 39, se obtiene que el valor del TIR es del 8,51%.

10. CONCLUSIONES

- Se diseñó una planta de operación continua para la extracción con solvente de compuestos químicos, procedentes de especies vegetales, de gran valor en el mercado (ácido trans-cinámico, pinocembrina, ácido carnósico, apigenina y ácido ursólico, entre otros), cuya funcionalidad fue comprobada mediante la construcción de un modelo a escala $(1[kg/lote])$ del sistema de trituración y la utilización de un sistema de extracción al vacío con bomba de calor existente en la escuela de ingeniería mecánica.
- En la prueba de funcionalidad realizada sobre el sistema de trituración se obtuvieron los siguientes resultados:
  - ✓ Nivel granulométrico del material vegetal triturado se encuentra entre $53\ a\ 100[\mu m]$.
  - ✓ La trituración del material vegetal define la cantidad de extracto producido.
  - ✓ La muestra de mayor rendimiento (relación adimensional entre la masa de extracto obtenido con respecto a la masa de material vegetal) es la que tiene una relación 8 a 1 que fue del 8,8%.
- De las pruebas de funcionalidad realizadas sobre el sistema de recuperación de solvente, se obtuvo que se recuperó 3,2[L] de solvente de los 4,2 [L] de solvente con extracto. El sistema existente tuvo que ser modificado para permitir la recolección del extracto acumulado dentro de las paredes internas del evaporador y esa modificación se tuvo en cuenta para el diseño de la planta de $100[kg/lote]$.
- Se desarrollaron los planos tanto para el prototipo como para la planta y se encuentran en los anexos C y J, respectivamente.
- A partir del estudio de la relación beneficio-costo, se puede detallar que el potencial económico de los extractos es lo suficientemente alto como para invertir en la construcción de los diseños mecánicos realizados en el presente trabajo, debido a que se obtuvo una tasa interna de retorno del 8,51%.

- El extracto obtenido por el método MSPD, con el prototipo, mostró la presencia de algunos compuestos antioxidantes de interés reportados para la especie de *Lippia alba* (Véase Cromatograma Anexo M). Esto demuestra la viabilidad técnica preliminar del equipo diseñado. En los cromatogramas se puede observar que la relación másica entre el material vegetal y el compuesto abrasivo, generó una diferencia entre los compuestos químicos obtenidos, en donde la relación 12 a 1 (Figura M-4) presentó mayor cantidad de compuestos antioxidantes, que en las relaciones 5 a 1 (Figura M-2) y 8 a 1 (Figura M-3).
- De los resultados obtenidos, se concluye que el objetivo general del proyecto se cumplió debido a que se logró automatizar un proceso que hasta el momento se realiza a nivel de laboratorio. Además, los diseños realizados se pueden considerar como un primer paso al desarrollo de un nuevo mercado en auge.

11. RECOMENDACIONES

- La trituración se debe realizar con material poco húmedo, debido a que al realizar la trituración con material húmedo se pega en las paredes del molino y no logra alcanzar la granulometría deseada.
- El evaporador debe estar lleno de solvente con extractos para garantizar un flujo de vapor constante.
- Para garantizar una trituración uniforme, es importante que el material esté distribuido a través de todo el molino.
- Es necesario un mantenimiento riguroso en el sistema de recuperación de solvente para evitar la formación de óxidos de cobre que contaminen el producto.

BIBLIOGRAFÍA

- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERING. ASME SECTION VIII: Part UG 27 – 28. 2010. P. 23-27.
- ARIAS V., Anderson J. y RAMÍREZ P., Edwin A. Obtención de extractos con CO2 supercrítico a escala piloto de las especies: Rosmarinus officinalis, Salvia officinalis y Psidium guajava. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Químico. Bucaramanga, UIS, 2012. P. 22.
- BEER, Ferdinand P., JOHNSTON, JR., E. Russel y CORNWELL, Phillip J. Mecánica vectorial para ingenieros: Dinámica. Novena edición. McGraw-Hill. P. 977-988.
- CAPRIOTTI, Anna L., *et al*. Recent advances and developments in matrix solid-phase dispersion. Roma, Università di Roma, 2015. P. 186-191.
- CENGEL, Yunus A. y GHAJAR, Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones. Cuarta Edición. McGraw Hill, 2012. P. 417-492 y P.581-644.
- CHO, Heechan *et al*. Optimum choice of the make-up ball sizes for maximum throughput in tumbling ball mills. Republic of Korea, Seoul National University, 2013. P. 625-634.
- ONISZCZUK, Anna., et al. Extraction methods for the determination of phenolic compounds form Equisetum arvense L. Herb. Lublin University, Poland, 2014.P. 378.
- INCROPERA, Frank P., *et al*. Fundamentals of heat and mass transfer. Seventh Edition. John Wiley & Sons. P. 433-544 y P. 653-722.
- LÓPEZ A., Edinson y CARVAJAL A., Jose Diseño y construcción de una planta para la extracción de aceites esenciales con capacidad para 300 kg de material vegetal. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga, UIS, 2014. P. 3-20.
- PEDRAZA R., Claudia Lorena y ESPINOSA S., German. Diseño y construcción de un prototipo de evaporador al vacío para depuración de

aguas residuales industriales. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga, UIS, 2014. P. 95-131.

- PERRY, Robert H., GREEN, Den W., MALONEY, James O. Manual del ingeniero químico: Tomo II. Sexta edición. P. 8-22 – 8-40.
- ROJAS R., Andrés Felipe, ROJAS R., Oscar Javier y VEGA N., Oscar M. Diseño y construcción de un prototipo de evaporador al vacío por bomba de calor para depuración de aguas residuales industriales. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico. Bucaramanga, UIS, 2014. P- 79-95.
- STASHENKO, Elena E., *et al*. Chromatographic and mass spectrometric characterization of essential oils and extracts from *Lippia* (Verbenaceae) aromatic plants. Bucaramanga, UIS, 2012. P. 192-202.
- SUN Yi, LI Ning, *et al*. A finite element analysis on effects of alternating load on cylinder of a vibrating ball milling. Hangzhou, Zhejiang University of Technology, 2011. P. 95-100.

ANEXOS

Nota: ver otros anexos en la carpeta adjunta al CD.

Anexo A. CATÁLOGO DE CAJAS REDUCTORAS NMRV

Tabla de Potencia

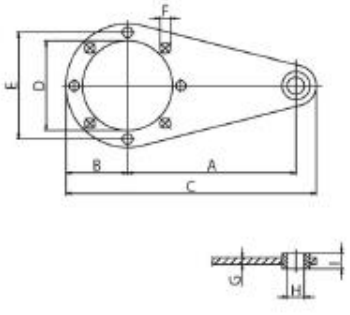
Relación Nominal	RPM de salida		Velocidad de entrada n1=1500 rpm								
I	n2(rpm)		NMRV-25	NMRV-30	NMRV-40	NMRV-50	NMRV-63	NMRV-75	NMRV-90	NMRV-110	NMRV-130
7.5	200	Hp	0.12	0.25	0.5	1	2	4	5.5	10	12.5
		M2	0.14	0.90	2	3.17	6.80	12.51	17.67	32.20	40.28
		η	0.85	0.85	0.89	0.89	0.87	0.87	0.90	0.90	0.90
10	150	Hp	0.12	0.3	0.75	1	2	4	5.5	10	12.5
		M2	0.5	1.17	3.05	4.11	9.02	16.80	23.27	42.47	53.11
		η	0.85	0.82	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.89	0.89
15	100	Hp	0.12	0.25	0.5	1	2	3	4	7.5	10
		M2	0.73	1.37	2.84	5.88	11.84	17.78	24.56	46.19	62.3
		η	0.85	0.77	0.79	0.82	0.83	0.83	0.86	0.86	0.87
20	75	Hp	0.12	0.25	0.5	1	2	3	4	7.5	10
		M2	0.85	1.74	3.69	7.51	15.40	23.38	31.94	60.90	81.16
		η	0.82	0.73	0.77	0.79	0.81	0.82	0.84	0.85	0.85
25	60	Hp	0.12	0.25	0.34	0.75	1	1.75	3	5.5	10
		M2	1.15	2.02	2.95	6.67	9.24	16.33	29.30	55.15	100.26
		η	0.80	0.68	0.73	0.74	0.77	0.78	0.82	0.84	0.84
30	50	Hp	0.12	0.16	0.34	0.75	1	1.5	3	5.5	7.5
		M2	1.26	1.46	3.43	7.66	10.17	16.23	33.02	62.17	85.94
		η	0.80	0.64	0.70	0.71	0.71	0.76	0.77	0.79	0.8
40	37.5	Hp		0.16	0.34	0.5	1	1.5	2	4	5.5
		M2		1.80	4.19	6.24	13.35	20.62	28.56	58.89	81.93
		η		0.59	0.65	0.65	0.70	0.72	0.75	0.77	0.78
50	30	Hp		0.12	0.25	0.5	0.75	1	2	3	5.5
		M2		1.54	3.70	6.91	11.74	16.42	34.44	52.50	97.16
		η		0.54	0.62	0.58	0.66	0.69	0.72	0.73	0.74
60	25	Hp		0.12	0.16	0.34	0.75	1	1.5	3	4
		M2		1.16	2.66	5.71	13.48	18.66	29.69	61.88	82.50
		η		0.51	0.58	0.59	0.63	0.65	0.69	0.72	0.72
80	18.7	Hp		0.08	0.16	0.25	0.5	0.75	1	2	3
		M2		1.37	3.19	5.11	10.81	17.23	24.05	49.60	76.98
		η		0.45	0.52	0.53	0.56	0.60	0.63	0.65	0.67
100	15	Hp			0.12	0.16	0.5	0.75	1	1.5	2
		M2			2.70	3.63	11.38	17.18	25.20	44.14	60.16
		η			0.47	0.48	0.48	0.48	0.53	0.62	0.63

n2: rpm en eje de salida
Hp: Potencia del motor
M2(kgm): Momento de torsión máxima en el eje de salida
η : Rendimiento mecánico

Nota: Los valores de rpm (n2) indicados corresponden a la velocidad nominal del motor.

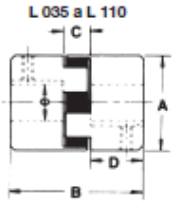
Brazo de reacción BR

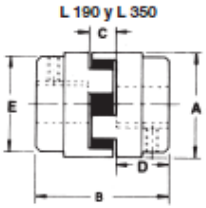
Tamaño	A	B	C	D	E	F	G	H	I
25	70	35	119	45	55	7	4	8	14
30	85	38	138	55	65	7	4	8	14
40	100	44	162	60	75	7	4	10	14
50	100	50	168	70	85	9	4	10	14
63	150	55	223	80	95	9	6	10	14
75	200	70	300	95	115	9	6	20	25
90	200	80	310	110	130	11	6	20	25
110	250	100	385	130	165	11	6	25	30
130	250	125	410	180	215	14	6	25	30

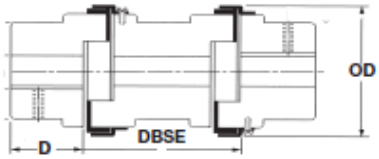


Anexo B. CATÁLOGO DE ACOPLES FLEXIBLES – LOVEJOY

SERIE JAW LOVEJOY - MARTIN - RATHI







DBSE - 100 mm - 140 mm - 180 mm
QFS (2 cubos + 1 kit de anillo QF + 1 kit espaciador QFS)

DESCRIPCIÓN

Los acabados son cubos simétricos y con agujeros H7, chavetero standard y prisioneros. Espaciadores de aluminio. La superficie de los cubos Martin es pavonada en color azul.

CARACTERÍSTICAS Y DIMENSIONES EN MM							PAR NOMINAL Nm		
							E + A	U	H
Tipo	A	OD	B	D	E	Máx. agujero	NBR	URETANO	HYTREL
L. 035	15,9	-	20,6	6,7	15,9	10	0,46	0,60	1
L. 050	27,4	-	43,6	15,9	27,4	16	4	6	11
L. 070	34,5	-	50,8	19,1	34,5	19	6	8	14
L. 075	44,5	-	54,0	20,6	44,5	24	12	15	27
L. 090	53,6	65	54,0	20,6	53,6	25	20	32	47
L. 095	53,6	65	63,5	25,4	53,6	28	26	32	64
L. 100	64,3	78	89,0	34,9	64,3	35	47	70	141
L. 110	84,1	96	108,0	42,9	84,1	42	89	134	256
L. 150	95,3	111	114,3	44,4	95,3	48	141	212	405
L. 190	114,3	129	123,8	49,2	101,6	55	190	285	512
L. 225	127,0	142	136,5	55,6	108,0	65	265	398	768
L. 276	-	173	200	80	127	75	532	798 (E)	1330 (QF)
L. 295	-	253	238	95	162	95	1279	1919 (E)	3197 (QF)
L. 2955	-	253	264	108	180	105	2132	3198 (E)	5330 (QF)
L. 300	-	272	283	115	180	105	3047	4570 (E)	7617 (QF)
L. 350	-	323	309	128	200	115	4308	6462 (E)	10770 (QF)

(E) Acabado forma estrella Uretano (Modelos L. 276 a L. 350)
(QF) Acabado forma Hytrel (Modelos L. 276 a L. 350)

Programa de fabricación de cubos mecanizados

○ Agujero acabado + chavetero + tornillos prisioneros

Disponible mecanizados en pulgadas

● Agujero acabado sin chavetero

	ESTRELLAS																														
Tipo	E	H	B	U	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	19	20	22	24	25	28	30	32	35	38	40	42	45	48	50	55	60	65	Diámetro agujero
035	•				●																												
050	•	•	•	•	●	○	○	○	○	○	○	○																					
070	•	•	•	•			○	○	○	○	○	○	○		○																		
075	•	•	•	•			○	○	○	○	○	○		○	○	○		○															
090	•	•	•	•			○		○	○	○	○		○	○	○		○	○														
095	•	•	•	•					○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○													
100	•	•	•	•							○	○		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○										
110	•	•	•	•											○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○							
150	•	•	•	•														○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○				
190	•	•	•	•																	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			
225	•	•		•																		○				○				○	○	○	○

Indicar en el pedido los agujeros de cada uno y la estrella elegida.

Anexo C. PLANOS PROTOTIPO

Anexo D. CATÁLOGO CAJAS REDUCTORA RAMFE

TAMAÑO REDUCTOR	n_2 [1/min]	M_2 [Nm]	η [-]	$i_{trans.}$ [-]	Fs [-]	Codigo Equipo
	Kw / Hp **3.73 / 5** - Frame - Polos **112 - 4**					
05	28.52	749.28	60	61.00	1.2	2405 M00 A17
	24.51	784.90	54	71.00	1.0	2405 N00 A17
SB06	71.02	391.22	78	24.50	2.6	2406 G00 A17
	54.38	471.68	72	32.00	2.8	2406 H00 A17
	48.33	508.53	69	36.00	2.8	2406 I00 A17
	39.55	594.51	66	44.00	2.2	2406 K00 A17
	35.51	642.01	64	49.00	1.9	2406 L00 A17
	31.07	722.26	63	56.00	2.0	2406 M00 A17
	25.22	833.42	59	69.00	1.6	2406 N00 A17
	Kw / Hp **4.92 / 6.6** - Frame - Polos **112 - 4**					
04	232.00	180.25	89	7.50	1.7	2404 B00 A18
	186.50	221.71	88	9.33	1.4	2404 C00 A18
SB05	158.18	252.48	85	11.00	3.0	2405 C00 A18
	116.00	328.09	81	15.00	2.4	2405 D00 A18
	91.58	400.19	78	19.00	2.0	2405 F00 A18
	68.24	523.33	76	25.50	1.1	2405 G00 A18
	56.13	577.60	69	31.00	1.4	2405 H00 A18
	49.71	633.23	67	35.00	1.3	2405 I00 A18
	45.79	666.99	65	38.00	1.3	2405 J00 A18
SB06	80.93	458.65	79	21.50	2.9	2406 F00 A18
	71.02	516.04	78	24.50	2.0	2406 G00 A18
	54.38	622.16	72	32.00	2.1	2406 H00 A18
	48.33	670.77	69	36.00	2.1	2406 I00 A18
	39.55	784.18	66	44.00	1.7	2406 K00 A18
	35.51	846.83	64	49.00	1.4	2406 L00 A18
	31.07	952.68	63	56.00	1.5	2406 M00 A18
	25.22	1099.31	59	69.00	1.2	2406 N00 A18
SB07	37.83	857.09	69	46.00	2.9	2407 K00 A18
	28.06	1054.75	63	62.00	2.5	2407 M00 A18
	24.51	1207.86	63	71.00	2.2	2407 N00 A18
	Kw / Hp **5.6 / 7.5** - Frame - Polos **112 - 4**					
04	232.00	205.16	89	7.50	1.5	2404 B00 A19
	217.50	216.38	88	8.00	3.0	2405 B00 A19
SB05	158.18	287.38	85	11.00	2.6	2405 C00 A19
	116.00	373.44	81	15.00	2.1	2405 D00 A19
	91.58	455.50	78	19.00	1.7	2405 F00 A19
	68.24	595.66	76	25.50	1.0	2405 G00 A19
	56.13	657.44	69	31.00	1.3	2405 H00 A19
	49.71	720.75	67	35.00	1.2	2405 I00 A19
	45.79	759.17	65	38.00	1.2	2405 J00 A19
SB06	80.93	522.04	79	21.50	2.5	2406 F00 A19
	71.02	587.36	78	24.50	1.7	2406 G00 A19
	54.38	708.15	72	32.00	1.9	2406 H00 A19
	48.33	763.47	69	36.00	1.9	2406 I00 A19
	39.55	892.56	66	44.00	1.5	2406 K00 A19
	35.51	963.87	64	49.00	1.3	2406 L00 A19
	31.07	1084.35	63	56.00	1.3	2406 M00 A19
	25.22	1251.25	59	69.00	1.1	2406 N00 A19
SB07	37.83	975.55	69	46.00	2.5	2407 K00 A19
	28.06	1200.53	63	62.00	2.2	2407 M00 A19
	24.51	1374.80	63	71.00	1.9	2407 N00 A19
	Kw / Hp **7.5 / 10** - Frame - Polos **132 - 4**					
SB05	218.75	288.14	88	8.00	2.3	2405 B00 A21
	159.09	382.68	85	11.00	2.0	2405 C00 A21
	116.67	497.28	81	15.00	1.6	2405 D00 A21
TAMAÑO REDUCTOR	n_2 [1/min]	M_2 [Nm]	η [-]	$i_{trans.}$ [-]	Fs [-]	Codigo Equipo

TAMAÑO REDUCTOR	n_2 [1/min]	M_2 [Nm]	η [-]	$i_{trans.}$ [-]	Fs [-]	Codigo Equipo
	Kw / Hp **7.5 / 10** - Frame - Polos **132 - 4**					
05	92.11	606.56	78	19.00	1.3	2405 F00 A21
	109.38	536.98	82	16.00	2.3	2406 D00 A21
SB06	81.40	695.17	79	21.50	1.9	2406 F00 A21
	71.43	782.15	78	24.50	1.3	2406 G00 A21
	54.69	942.99	72	32.00	1.4	2406 H00 A21
	48.61	1016.67	69	36.00	1.4	2406 I00 A21
	39.77	1188.57	66	44.00	1.1	2406 K00 A21
	31.25	1443.96	63	56.00	1.0	2406 M00 A21
SB07	76.09	762.50	81	23.00	2.9	2407 G00 A21
	48.61	1060.87	72	36.00	2.4	2407 I00 A21
	38.04	1299.07	69	46.00	1.9	2407 K00 A21
	28.23	1598.67	63	62.00	1.6	2407 M00 A21
	24.65	1830.74	63	71.00	1.4	2407 N00 A21
	Kw / Hp **9 / 12** - Frame - Polos **132 - 4**					
SB05	218.75	345.76	88	8.00	1.9	2405 B00 A22
	159.09	459.22	85	11.00	1.6	2405 C00 A22
	116.67	596.74	81	15.00	1.3	2405 D00 A22
	92.11	727.87	78	19.00	1.1	2405 F00 A22
SB06	169.41	441.39	87	10.33	2.6	2406 C00 A22
	109.38	644.38	82	16.00	1.9	2406 D00 A22
	81.40	834.21	79	21.50	1.6	2406 F00 A22
	71.43	938.57	78	24.50	1.1	2406 G00 A22
	54.69	1131.59	72	32.00	1.2	2406 H00 A22
	48.61	1220.00	69	36.00	1.2	2406 I00 A22
SB07	76.09	915.00	81	23.00	2.5	2407 G00 A22
	48.61	1273.04	72	36.00	2.0	2407 I00 A22
	38.04	1558.89	69	46.00	1.6	2407 K00 A22
	28.23	1918.40	63	62.00	1.4	2407 M00 A22
	24.65	2196.88	63	71.00	1.2	2407 N00 A22
	Kw / Hp **11.2 / 15** - Frame - Polos **132 - 4**					
05	218.75	430.28	88	8.00	1.5	2405 B00 A23
	159.09	571.47	85	11.00	1.3	2405 C00 A23
SB06	169.41	549.29	87	10.33	2.1	2406 C00 A23
	109.38	801.89	82	16.00	1.6	2406 D00 A23
	81.40	1038.12	79	21.50	1.3	2406 F00 A23
	116.67	760.94	83	15.00	3.0	2407 D00 A23
SB07	76.09	1138.67	81	23.00	2.0	2407 G00 A23
	48.61	1584.23	72	36.00	1.6	2407 I00 A23
	38.04	1939.95	69	46.00	1.3	2407 K00 A23
	28.23	2387.35	63	62.00	1.1	2407 M00 A23
	24.65	2733.90	63	71.00	1.0	2407 N00 A23
	Kw / Hp **14.9 / 20** - Frame - Polos **160 - 4**					
SB06	170.38	726.60	87	10.33	1.8	2406 C00 A25
	110.00	1060.74	82	16.00	1.2	2406 D00 A25
	81.86	1373.23	79	21.50	1.0	2406 F00 A25
	170.38	734.95	88	10.33	3.0	2407 C00 A25
SB07	117.33	1006.58	83	15.00	2.3	2407 D00 A25
	76.52	1506.22	81	23.00	1.5	2407 G00 A25
	48.89	2095.62	72	36.00	1.2	2407 I00 A25
	38.26	2566.16	69	46.00	1.0	2407 K00 A25
	Kw / Hp **18.7 / 25** - Frame - Polos **160 - 4**					
SB07	169.89	925.02	88	10.33	2.4	2407 C00 A26
	117.00	1266.89	83	15.00	1.8	2407 D00 A26
	76.30	1895.75	81	23.00	1.2	2407 G00 A26
	48.75	2637.56	72	36.00	1.0	2407 I00 A26
TAMAÑO REDUCTOR	n_2 [1/min]	M_2 [Nm]	η [-]	$i_{trans.}$ [-]	Fs [-]	Codigo Equipo

I14

Anexo E. CATÁLOGO DE ACOPLES FLEXIBLES – MARTIN-FLEX

SERIE MARTIN-FLEX

Sus principales características son:

- Desalineaciones axiales, radiales y angulares.
- Gran torsión elástica.
- Fácil montaje.
- Fijación con casquillo cónico.
- Absorción de vibraciones y oscilaciones.

El acoplamiento Martinflex es ideal para absorber vibraciones, choques y sacudidas bruscas, permitiendo ciertos niveles de desalineación.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS CUBIERTAS FLEXIBLES

Características	TIPO DE ACOPLAMIENTO														
	F40	F50	F60	F70	F80	F90	F100	F110	F120	F140	F160	F180	F200	F220	F250
Velocidad máx. rev/min.	4500	4500	4000	3600	3100	3000	2600	2300	2050	1800	1600	1500	1300	1100	1000
Par nominal Nm Tkn	24	66	127	250	375	500	675	875	1330	2325	3770	6270	9325	11600	14675
Par max. Nm Tk máx.	64	160	318	487	759	1096	1517	2137	3547	5642	9339	16455	23508	33125	42740
Ángulo de torsión Nm/º	5	13	26	41	63	91	126	178	296	470	778	1371	1959	2760	3562
Desalineamiento máx.	1,1	1,3	1,6	1,9	2,1	2,4	2,6	2,9	3,2	3,7	4,2	4,8	5,3	5,8	6,6
Masa aproximada Kg.	0,1	0,3	0,5	0,7	1,0	1,1	1,1	1,4	2,3	2,6	3,4	7,7	8,0	10	15
Par alternativo +- Nm 10Hz Tkw	11	26	53	81	127	183	252	356	591	940	1556	2742	3918	5521	7124
Factor de resonancia V	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Coeficiente de amortiguación	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9

VALORES DE POTENCIA (Kw)

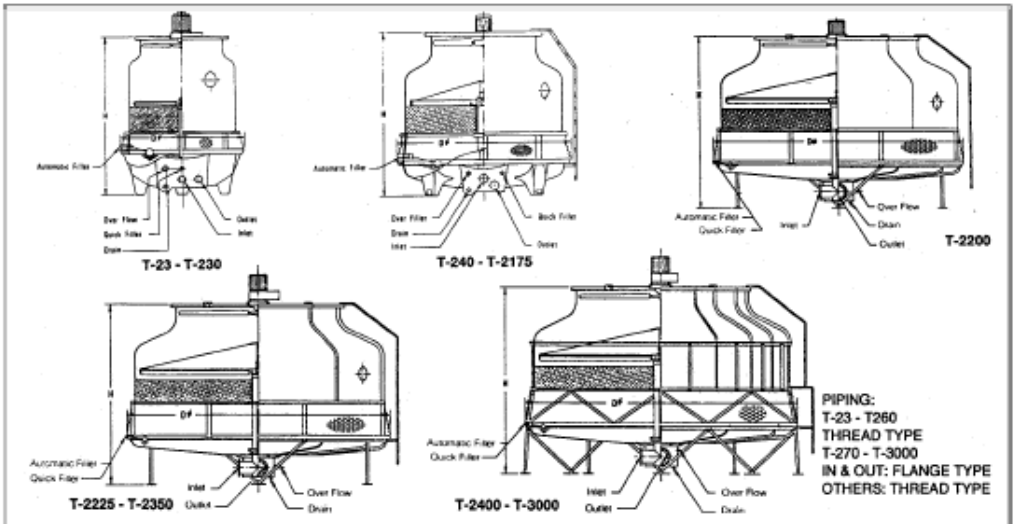
Velocidad rev/min.	TIPO DE ACOPLAMIENTO														
	F40	F50	F60	F70	F80	F90	F100	F110	F120	F140	F160	F180	F200	F220	F250
100	0,25	0,69	1,33	2,62	3,93	5,24	7,07	9,16	13,9	24,3	39,5	65,7	97,6	121	154
200	0,50	1,38	2,66	5,24	7,85	10,5	14,1	18,3	27,9	48,7	79,0	131	195	243	307
300	0,75	2,07	3,99	7,85	11,8	15,7	21,2	27,5	41,8	73,0	118	197	293	364	461
400	1,01	2,76	5,32	10,5	15,7	20,9	28,3	36,6	55,7	97,4	158	263	391	486	615
500	1,26	3,46	6,65	13,1	19,6	26,2	35,3	45,8	69,6	122	197	328	488	607	768
600	1,51	4,15	7,98	15,7	23,6	31,4	42,4	55,0	83,6	146	237	394	586	729	922
700	1,76	4,84	9,31	18,3	27,5	36,6	49,5	64,1	97,5	170	276	460	684	850	1076
720	**1,81**	**4,98**	**9,57**	**18,8**	**28,3**	**37,7**	**50,9**	**66,0**	**100**	**175**	**284**	**473**	**703**	**875**	**1106**
800	2,01	5,53	10,6	20,9	31,4	41,9	56,5	73,3	111	195	316	525	781	972	1229
900	2,26	6,22	12,0	23,6	35,3	47,1	63,6	82,5	125	219	355	591	879	1093	1383
960	**2,41**	**6,63**	**12,8**	**25,1**	**37,7**	**50,3**	**67,9**	**88,0**	**134**	**234**	**379**	**630**	**937**	**1166**	**1475**
1000	2,51	6,91	13,3	26,2	39,3	52,4	70,7	91,6	139	243	395	657	976	1215	1537
1200	3,02	8,29	16,0	31,4	47,1	62,8	84,8	110	167	292	474	788	1172		
1400	3,52	9,68	18,6	36,6	55,0	73,3	99,0	128	195	341	553	919			
1440	**3,62**	**9,95**	**19,1**	**37,7**	**56,5**	**75,4**	**102**	**132**	**201**	**351**	**568**	**945**			
1600	4,02	11,1	21,3	41,9	62,8	83,8	113	147	223	390	632				
1800	4,52	12,4	23,9	47,1	70,7	94,2	127	165	251	438					
2000	5,03	13,8	26,6	52,4	78,5	105,5	141	183	279						
2200	5,53	15,2	29,3	57,6	86,4	115	155	202							
2400	6,03	16,6	31,9	62,8	94,2	126	170								
2600	6,53	18,0	34,6	68,1	102	136	184								
2800	7,04	19,4	37,2	73,3	110	147									
2880	**7,24**	**19,9**	**38,3**	**75,4**	**113**	**151**									
3000	7,54	20,7	39,9	78,5	118	157									
3600	9,05	24,9	47,9	94,2											

Las figuras en tipo pesado son para motores de velocidad estandar. Todos estos valores de potencia han sido calculados a par constante. Para velocidades inferiores a 100 rev/min. o intermedias usar el par nominal.

Anexo F. CATÁLOGO DE TORRES DE ENFRIAMIENTO CTS

Dimensions and Pipe Connections

CTS Cooling Tower Systems
The best just got better.



T MODEL	DIMENSIONS (IN.)		PIPE CONNECTIONS (IN.)						FAN MOTOR (HP)	FAN DIAMETER (INCH)	AIR VOLUME (CFM)	NOMINAL WATER FLOW (GPM)
	HEIGHT	DIA.	IN	OUT	O	Dr	FLOAT	Q				
T-25	52	33 1/2	1 1/2	1 1/2	1	3/4	1/2	-	1/6 *	19 1/2	2118	15
T-28	56	33 1/2	1 1/2	1 1/2	1	3/4	1/2	-	1/6 *	19 1/2	2648	23
T-210	54	41 3/4	1 1/2	1 1/2	1	3/4	1/2	-	1/4 *	26 3/8	3531	30
T-215	59	46	2	2	1	1	1/2	-	1/4 *	26 3/8	4767	44
T-220	63	54 3/8	2	2	1	1	1/2	-	1/2 **	30 1/4	6356	58
T-225	70 15/16	54 3/8	2 1/2	2 1/2	1	1	1/2	-	3/4 ***	30 1/4	7000	73
T-230	68 3/8	62 1/4	2 1/2	2 1/2	1	1	1/2	-	1 ***	30 1/4	8100	88
T-240	74 1/2	71 5/8	2 1/2	2 1/2	1	1	3/4	-	1 1/2***	38 1/4	9800	118
T-250	74 1/2	78 3/4	3	3	1	1	3/4	-	1 1/2 ***	38 1/4	11500	148
T-260	74 11/16	78 3/4	3	3	1	1	3/4	-	1 1/2 ***	46	14700	177
T-270	79 3/8	85 5/8	4	4	1	1	3/4	-	1 1/2 ***	46	17500	207
T-280	79 3/8	85 5/8	4	4	1	1	3/4	-	2 ***	46	18900	237
T-2100	85 1/16	104 3/8	4	4	1	1	1	-	3 ***	57 7/8	24500	295
T-2125	87	120 1/8	6	6	2	1	1	-	3 ***	57 7/8	29060	369
T-2150	90	130	6	6	2	2	1	-	5 ***	68 7/8	33260	446
T-2175	97 7/8	130	5	5	2	2	1	-	5 ***	68 7/8	40250	518
T-2200	117 3/4	148 3/8	6	6	2	2	1 1/4	1 1/4	5 ***	68 7/8	43760	592
T-2225	125 5/8	148 3/8	6	6	2	2	1 1/4	1 1/4	7 1/2***	93	61270	656
T-2250	125 5/8	148 3/8	8	8	2	2	1 1/4	1 1/4	7 1/2 ***	93	61270	737
T-2300	131 7/8	174 3/4	8	8	2	2	1 1/4	1 1/4	10 ***	93	77020	883
T-2350	133 1/2	188 5/8	8	8	2	2	1 1/4	1 1/4	10 ***	93	77020	1036
T-2400	153 1/8	203 7/8	8	8	4	2	2	2	15 ***	117	91030	1190
T-2500	154 11/16	219 5/8	10	10	4	2	2	2	15 ***	117	91030	1505
T-2600	171 5/8	259 7/8	10	10	4	2	2	2	20 ***	133 1/8	125000	1777
T-2700	181 5/16	259 7/8	10	10	4	2	2	2	20 ***	133 1/8	125000	2101
T-2800	194 11/16	299 1/4	12	12	4	3	2	2	30 ***	141	175000	2370
T-3000	202 1/2	299 1/4	12	12	4	3	2	2	30 ***	141	175000	3011

Electrical specifications: *110/220/1/60, 220/3/60, ** 110/220/1/60, 220/440/3/60, ***220/440/3/60
Tri-voltage fan motors (208-230-460-3-60) are available for ¾ h.p. and larger. Special order 50 cycle fan motors also available.
Nominal flow is defined as rate of water cooled from 95° to 85°, with 75° wet bulb temperature.

Anexo G. FACTORES DE FATIGA

Para el acero se estima el límite de fatiga como:

$S'_e = 0.5\ S_{ut}$ ($S_{ut} \le 1400$ MPa) $\quad S'_e = 700$ MPa ($S_{ut} > 1400$ MPa)

Para aceros, en 10^3 ciclos se estima la tensión de fatiga como 0.9 Su.

Factores modificativos del límite de fatiga: $S_e = k_a\ k_b\ k_c\ k_d\ k_e\ S'_e/k_f$

Factor de superficie: Para aceros y vida infinita: $k_a = a\ S_u^{\ b}$

ACABADO SUPERFICIAL	Factor a (MPa)	Exponente b
Rectificado	1.58	-0.085
Mecanizado o laminado en frío	4.51	-0.265
Laminado en caliente	57.7	-0.718
Forjado	272.0	-0.995

Factor de tamaño k_b en flexión rotativa y torsión en 10^6: $k_b = \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.1133}$ $\quad 2.79 \le d \le 51$ mm

Para tamaños superiores, k_b varía entre 0.6 y 0.75

Factor de tipo de carga k_c

$$k_c = \begin{cases} 0.923 & \text{Carga axial } S_u \le 1520\text{MPa} \\ 1 & \text{Carga axial } S_u > 1520\text{MPa} \\ 1 & \text{Flexión} \\ S_{sy}/S_y & \text{Torsión y cortante} \begin{cases} \text{von Mises} \rightarrow 0.577 \\ \text{Tresca} \rightarrow 0.500 \end{cases} \end{cases}$$

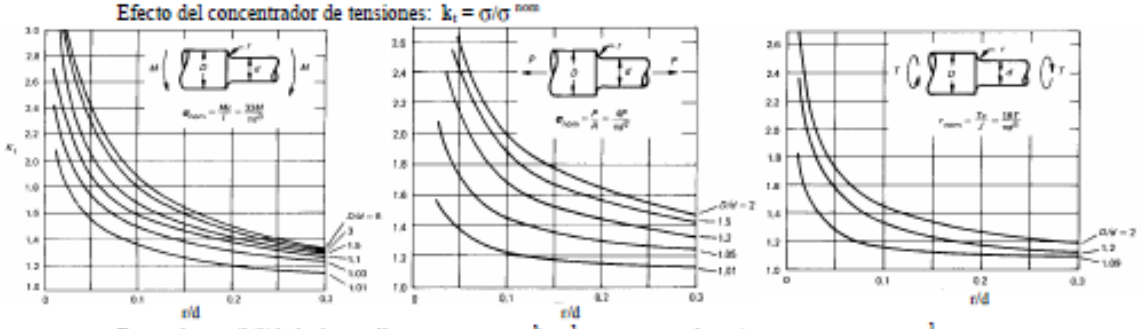
Factor de temperatura k_d para aceros:

T, °C	20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600
k_d	1.000	1.010	1.020	1.025	1.020	1.00	0.975	0.927	0.922	0.840	0.766	0.670	0.546

Confiabilidad k_e

Confiabilidad	0.5	0.9	0.95	0.99	0.999
Factor de corrección	1.0	0.897	0.868	0.814	0.753

Efecto del concentrador de tensiones: $k_t = \sigma/\sigma^{nom}$



Factor de sensibilidad a la entalla: $q = \frac{k_f - 1}{k_t - 1}$ se puede estimar como: $q = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\rho}}$

Para carga axial o de flexión:

$\alpha = 0.51$ mm (aleaciones de aluminio)

$\alpha = 0.25$ mm (aceros de bajo contenido en carbono recocidos o normalizados)

$\alpha = 0.064$ mm (aceros templados y revenidos)

$\alpha = 0.025\,(2070\ \text{MPa}/S_u)$ mm (aceros con $S_u \ge 550$ Mpa)

Para torsión se multiplican los valores anteriores por 0.6

Anexo H. CÁLCULOS

Cálculo del diseño del eje

Datos

$Pot_{entrada} = 1$ [hp]

$Pot_{salida} = \eta_{trans;poleas} \cdot \eta_{caja} \cdot Pot_{entrada}$

$\eta_{trans;poleas} = 0,94$

$\eta_{caja} = 0,85$

$N_{salida} = 60$ [rev/min]

$\omega = N_{salida} \cdot \left| 0,1047 \cdot \frac{rad/s}{rev/min} \right|$

$Pot_{salida} \cdot \left| 745,7 \cdot \frac{W}{hp} \right| = T \cdot \omega$

$Sy = 690$ [MPa] $\cdot \left| 1000000 \cdot \frac{Pa}{MPa} \right|$

$W = 981$ [N]

$F_I = 57,19$ [N]

$C = 627,8$ [N]

$L = 13,3$ [cm] $\cdot \left| 0,01 \cdot \frac{m}{cm} \right|$

$N = 3$

Sistema de ecuaciones

$$J = \frac{\pi}{2} \cdot \left[\frac{D}{2}\right]^4$$

$$I = \frac{\pi \cdot \left[\frac{D}{2}\right]^4}{4}$$

$$\sigma_{xy} = \frac{Mx \cdot \frac{D}{2}}{I}$$

$$\tau_{xy} = \frac{T \cdot \frac{D}{2}}{J}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{xy}^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{eq} = \frac{Sy}{N}$$

$$Mx = \frac{(W + F_I + C) \cdot L}{4}$$

$$D_{cm} = D \cdot \left| 100 \cdot \frac{cm}{m} \right|$$

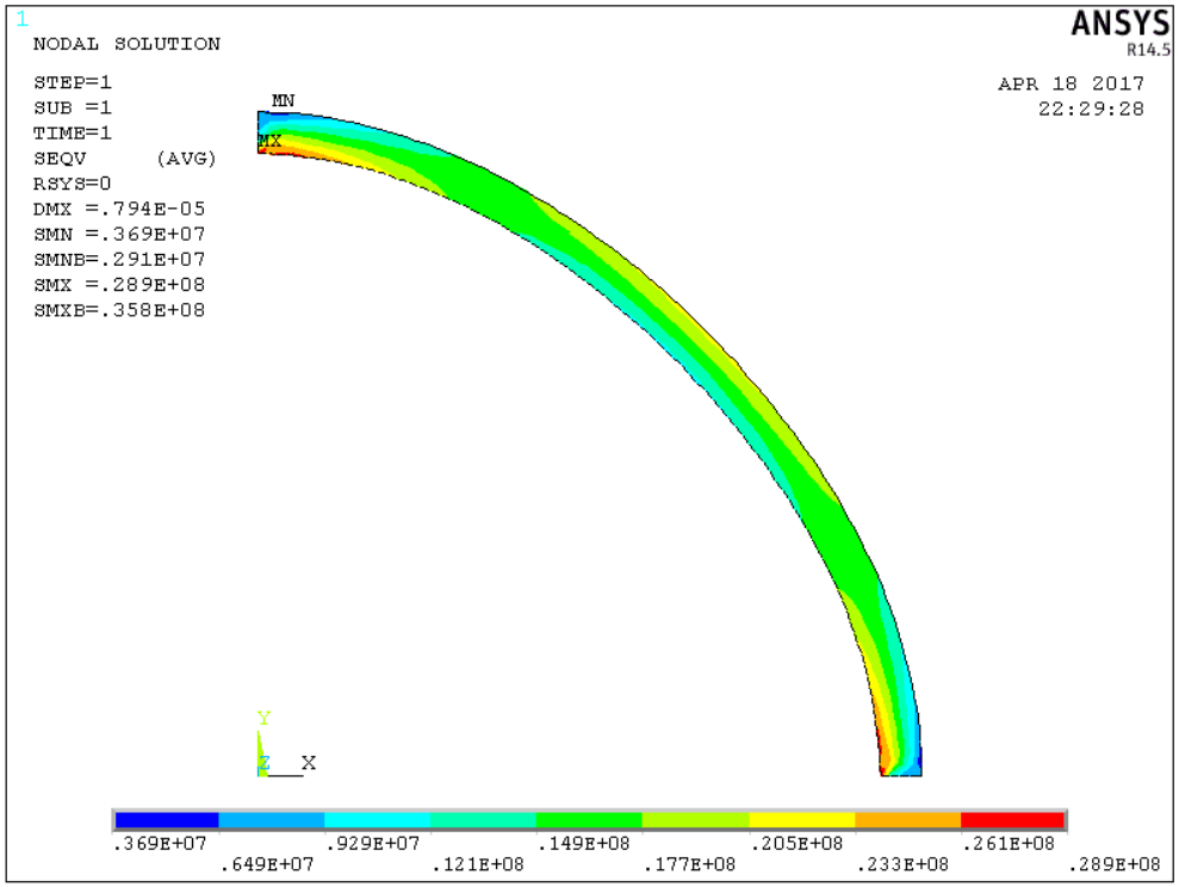
Resultados del diseño del eje

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

C = 627,8 [N]	D = 0,01637 [m]	D_{cm} = 1,637 [cm]	η_{caja} = 0,85
$\eta_{trans,poleas}$ = 0,94	F_I = 57,19 [N]	I = 3,525E-09 [m^4]	J = 7,050E-09 [m^4]
L = 0,133 [m]	Mx = 55,39 [N*m]	N = 3	N_{salida} = 60 [rev/min]
ω = 6,283 [rad/s]	$Pot_{entrada}$ = 1 [hp]	Pot_{salida} = 0,799 [hp]	σ_{eq} = 2,300E+08 [Pa]
σ_{xy} = 1,286E+08 [Pa]	Sy = 6,900E+08 [Pa]	T = 94,83 [N*m]	τ_{xy} = 1,101E+08 [Pa]
W = 981 [N]	x = 0,635 [cm]		

Anexo I. ANÁLISIS DE LA TUBERÍA DE COBRE

Tubería de cobre rígida de 1[in] de diámetro nominal, tipo M.



Propiedades mecánicas del cobre:

- $\boldsymbol{S_y = 250[MPa]}$
- $\boldsymbol{E = 110[GPa]}$
- $\boldsymbol{\nu = 0.34}$ $\boldsymbol{(Coeficiente\ de\ Poisson)}$

Anexo J. PLANOS DE LA PLANTA

Anexo K. COSTOS DE INVERSIÓN DEL PROTOTIPO

Imagen Eléctrica

Bucaramanga , Febrero 17 de 2017

Cotizacion No. 2601

Señores
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
Atn. JUAN DAVID ARGUELLO
Estudiante de Ingenieria Mecanica
Bucaramanga

ITEM	DESCRIPCIÓN	CAN	V/R UNITARIO	V/R TOTAL
1	CAJA REDUCTORA NMRV 050	1	715.000	715.000
2	MOTOR TRIFASICO 1 HP /1800 RPM , 220-440V WEG	1	345.000	345.000
3	LAMINAS DE ACERO AISI 304, 1,5 X 0.75(M) DE 3MM	1	415.000	415.000
4	CILINDRO DE ACERO SAE 4140, 44.5 (mm) , de diametro y 1 (M) DE LARGO	1	120.000	120.000
5	POLEAS DE 4 IN DE DIAMETRO EXTERIOR	1	18.000	18.000
6	POLEAS DE 11 IN DE DIAMETRO EXTERIOR	1	48.000	48.000
7	ESFERAS DE 38mm, FUNDICION DE	200	3.500	700.000
8	ACOPLE TIPO ARAÑA	1	75.000	75.000
9	PERFILES DE ACERO DE 76X38X 6 MTS TUBO RECTANGULAR	2	85.000	170.000
10	CHUMACERA DE PISO DE 1 1/8	2	28.000	56.000
11	PERNOS 0.25 , 1/4 DE DIAMETRO , LONGITUD 0.75 (3/4), LONGITUD ROSCA 3/4 , 20 HILOS POR PULGADA	8	700	5.600
12	PERNOS 0.25 , 1/4 DE DIAMETRO , LONGITUD DE 1" , LONGITUD ROSCA 3/4 , 20 HILOS POR PULGADA	42	900	37.800
13	ARANDELAS 0.25 DIAMETRO DE 1/4	50	300	15.000
14	TUERCAS 0.25 DE DIAMETRO 1/4	50	300	15.000
15	TORNILLOS 10MM DE DIAMETRO , 100mm DE LONGITUD	4	6.000	24.000
16	ARRANCADOR DIRECTO 5.5-8 AMP WEG	1	75.600	75.600

SUBTOTAL	$	2.835.000
IVA 19%	$	538.650
TOTAL	$	3.373.650

CONDICIONES COMERCIALES:

VALIDEZ OFERTA : 15 DIAS

FORMA DE PAGO: CREDITO

FECHA DE ENTREGA: 1 DIA HABIL

Cordialmente, Gloria Stella Díaz

Cra 18 No. 24 - 32

Anexo L. COSTOS DE INVERSIÓN DE LA PLANTA

Artículo	Especificaciones	Cantidad	Valor Total	Datos del vendedor
Caja reductora	Caja reductora 20 [hp], reducción de 1 a 20	1	$ 10.166.000	Sensomatic del oriente Cra 25 No. 40A - 08 6434399
Motor eléctrico	Motor de 20[hp] a 1800[rpm]	1	$ 3.256.000	Sensomatic del oriente Cra 25 No. 40A - 08 6434400
Bomba de vacío	Marca: Mountain, Modelo: 850-8406	1	$ 732.000	Simaro Colombia 3014585229 simaro.co@gmail.com
Bombas centrífugas	Bomba de agua periférica 1[hp] Toolcraft Tc2665	3	$ 750.000	Toolcraft Autop Medellin Km 1.5 - Bog (57)(1) 8766838
Torre de enfriamiento	Torre T-25, de 15 [gpm]	1	$ 4.812.500	Comtecol Cra 7 # 33-29 Bog (57)(1) 2874200
Compresor de aire	Compresor de 10 [bar] , de 2.5 [hp]	1	$ 768.000	Einhell Cra 106 #15-25 Manzana 16 Bog (57)(1) 6092133
Láminas de acero	1 Lámina de 1,5x3 [m] de 4,5 [mm] de espesor Acero AISI 304	18	$ 24.264.000	Imporinox Cll 23#10-24 Bga 6972777
Cilindros de acero	Acero SAE 4140, 9 [cm] de diámetro de 4 [m] de largo	1	$ 1.293.066	Metalcort Cra 13 No. 22-32 3165208927 - Milton Javier
Esferas	4421 esferas de 4[cm] de diámetro 825 esferas de 7[cm] de diámetro 164 esferas de 12[cm] de diámetro Material: Aluminio	-	$ 10.820.000	Fundiciones García Cra 11 No. 30-61 6160483
Acople	Martin Flex - F160	1	$ 300.000	Imporlubel Cll 22 No. 14-38 6713653
Perfiles de acero	Perfil cuadrado de 3[in] de 6[mm] de espesor y de 6[m] de longitud Acero ASTM A 500 Grado C	15	$ 2.682.016	Soluciones Tubulares Cra 22 #3A-100 Villavicencio 3153136938
Tubería de cobre	1[in] de diámetro con 6 [m] de longitud	178	$ 19.562.200	Homecenter
Chumaceras	NSK 16018, eje de 90 [mm] de diámetro, 20 [hp] a 30[rpm]. Tipo abierto	2	$ 492.000	Rolicol S.A.S. Cra 15 No. 19A-50 6710070
Vacúometro	60 mm de diámetro, Dial 1/4 NPT	2	$ 220.000	Simaro Colombia 3014585229 simaro.co@gmail.com
Manómetro	0 a 200 PSI Dial 4 Inox Vertical 1/2 Winters	1	$ 100.000	Simaro Colombia 3014585229 simaro.co@gmail.com
Filtro	Acero sinterizado de 2 micrómetros y de 1 [in] de diámetro	1	$ 1.400.000	Hengko
Mano de obra	Incluye los procesos de manufactura y de construcción	-	$ 42.000.000	Felmaq S.A.S Cra 13#17-25 6960875
TOTAL	-	-	**$ 123.617.782**	-

Anexo M. CROMATOGRAMAS

Figura M-1. Cromatograma obtenido de la mezcla de sustancias de referencia antioxidantes.

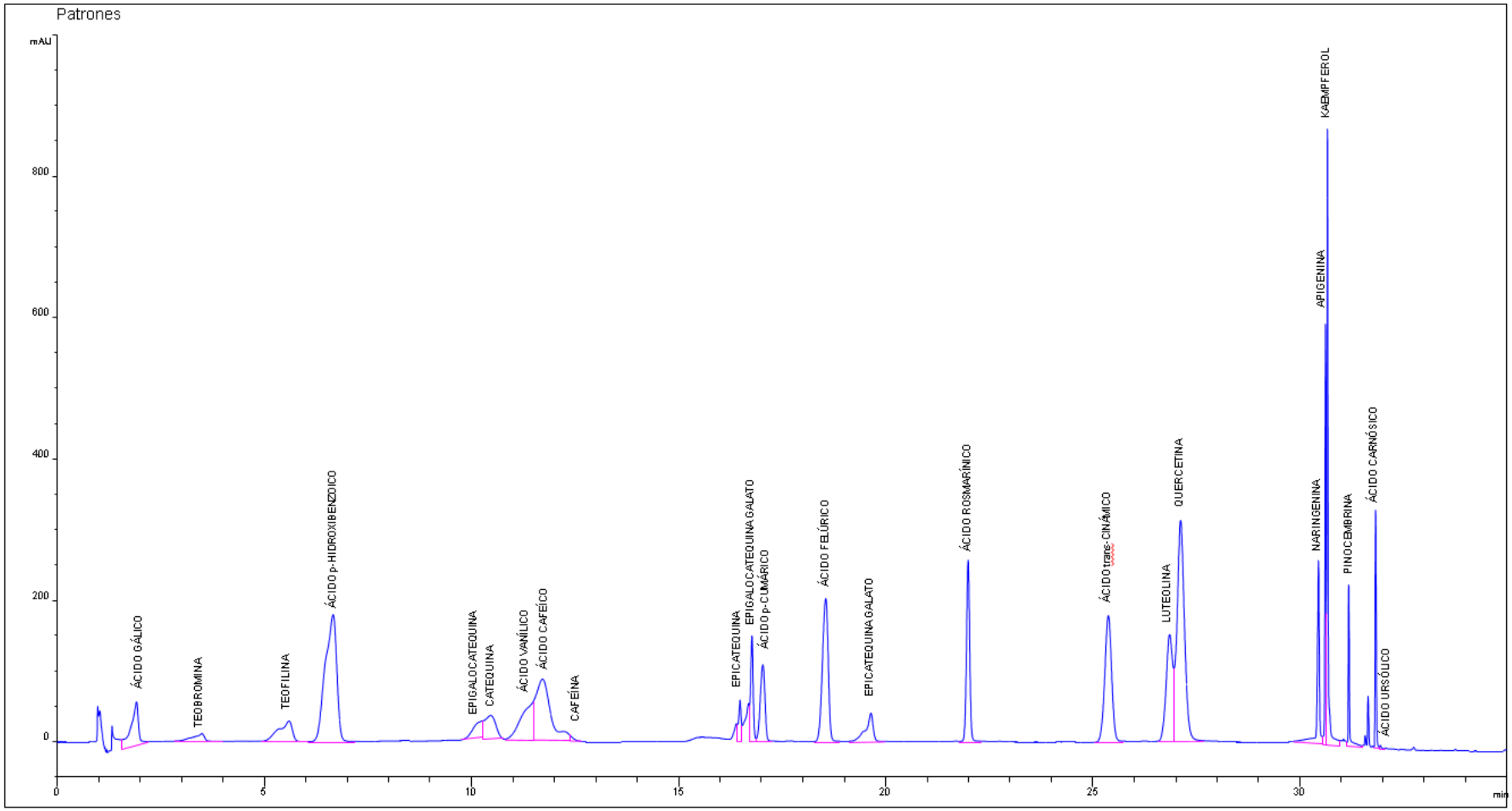


Figura M-2. Relación 5 a 1.

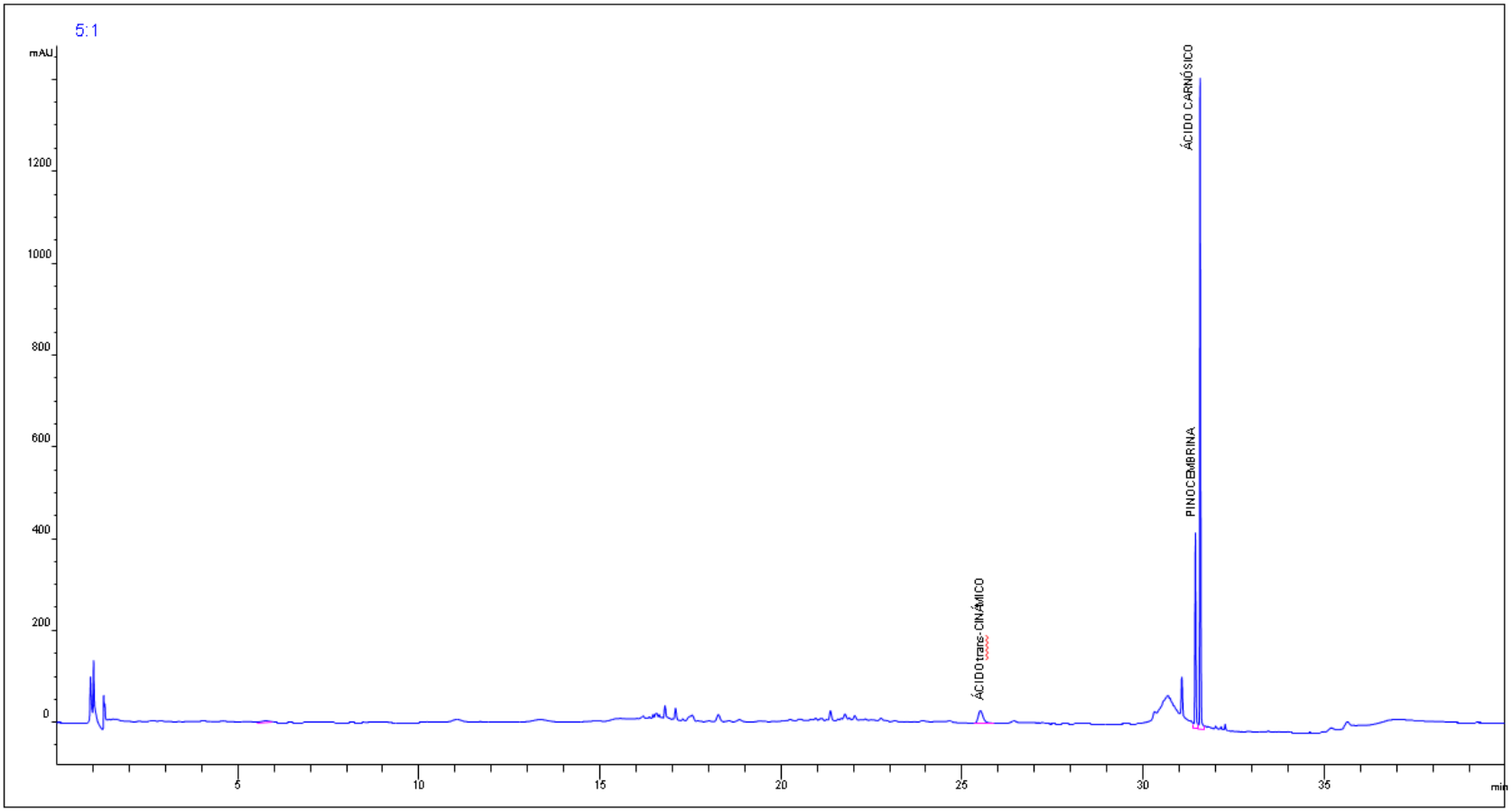


Figura M-3. Relación 8 a 1.

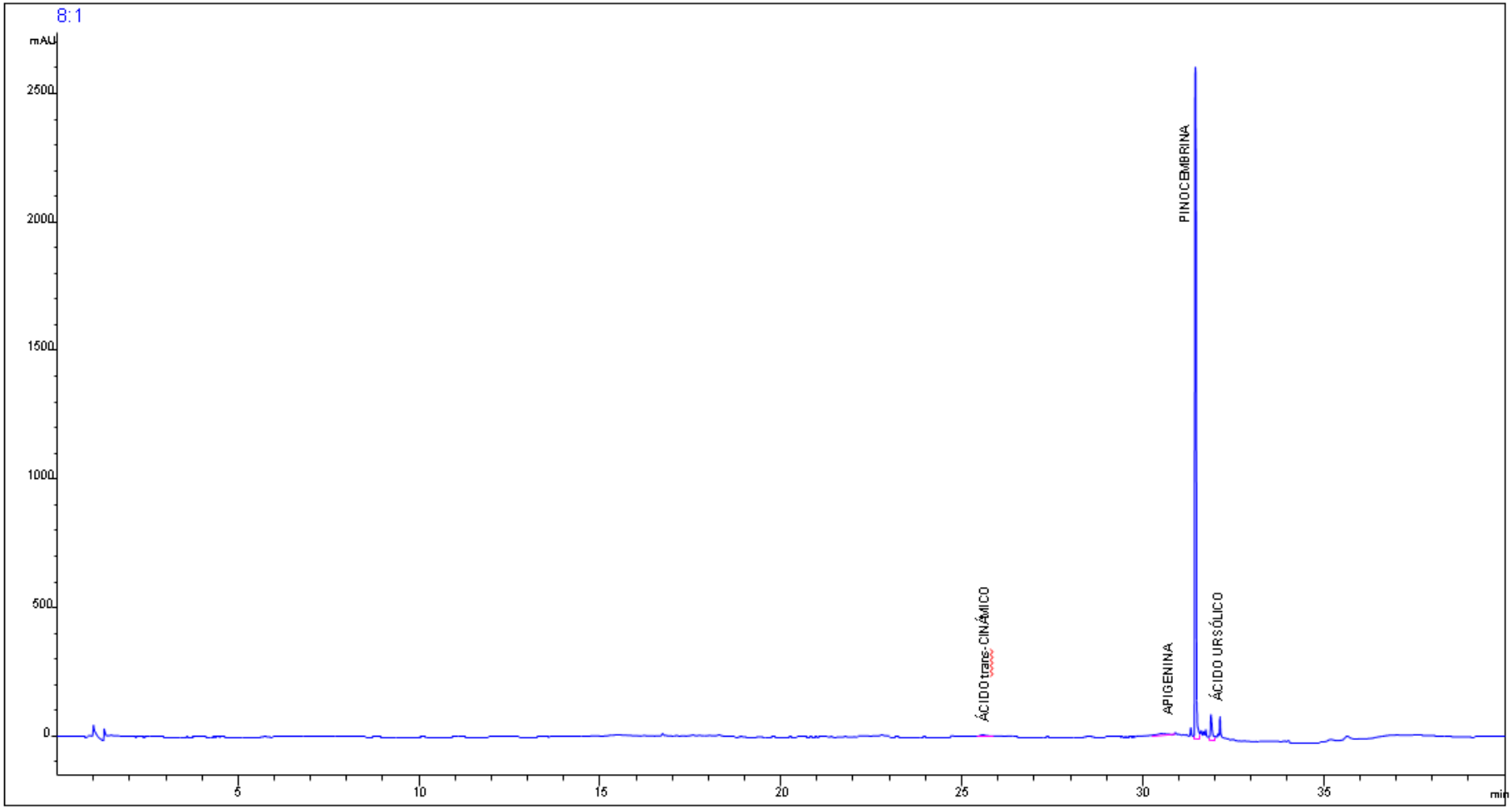
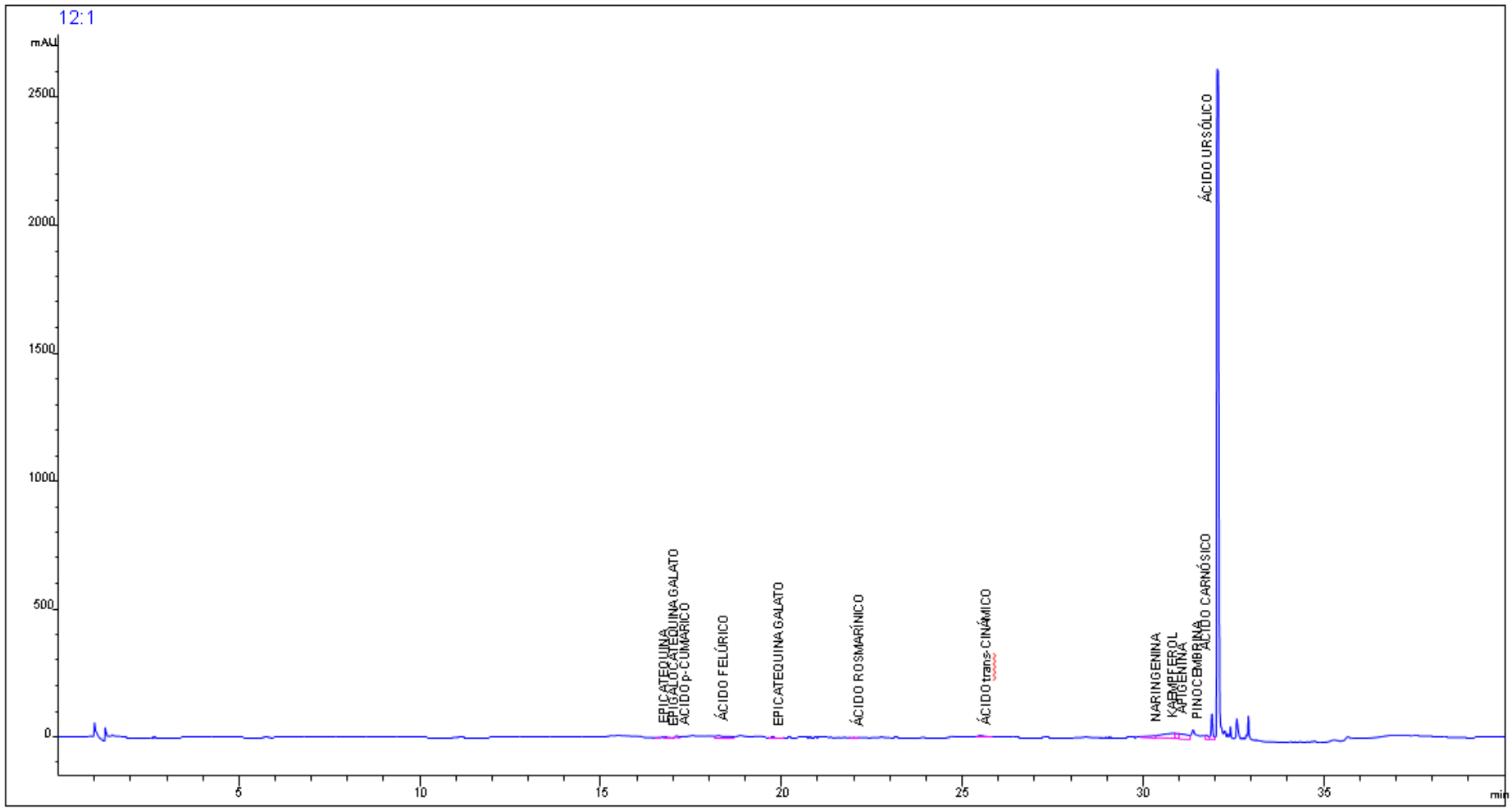


Figura M-4. Relación 12 a 1.



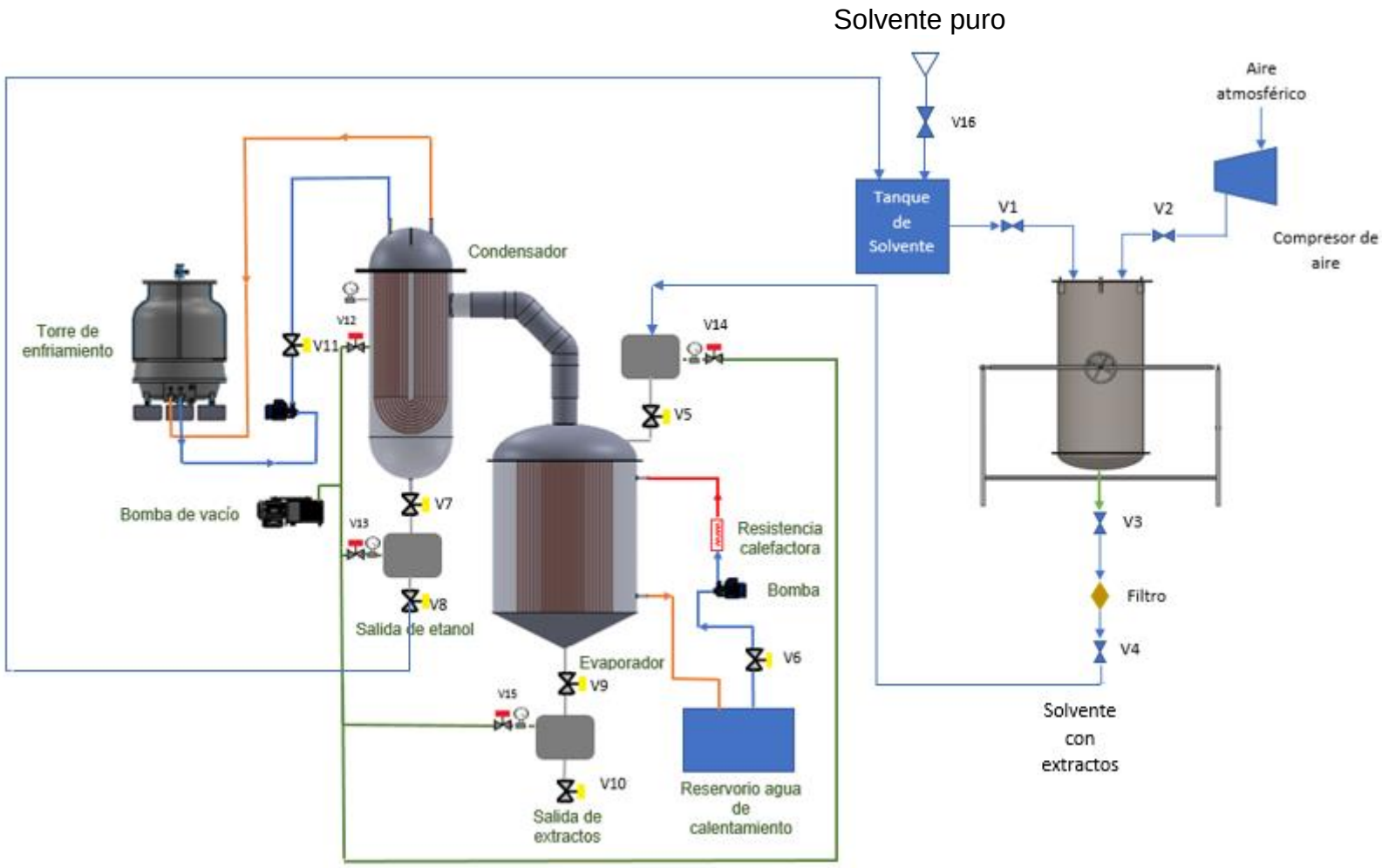
Anexo N. OPERACIÓN DEL EQUIPO

Sistema MSPD:

1. Pese tanto el material vegetal como el agente dispersante y asegúrese de mantener una relación másica de 1 a 5, respectivamente.
2. Ingrese el material al molino.
3. Cierre la tapa.
4. Coloque el tambor en posición horizontal, mediante el juego de poleas, y asegúrelo sobre la plataforma del molino.
5. Encienda el motor y déjelo operar durante 4 horas.
6. Apague el motor.
7. Desajuste el molino de la plataforma, el peso lo hará girar y lo posicionará automáticamente en posición vertical.
8. Ajuste la manguera del tanque de etanol, la del compresor de aire y la manguera de egreso de la mezcla.
9. Asegúrese de que la válvula V3 esté cerrada.
10. Abra la válvula V1.
11. Cuando el tambor tenga todo el etanol que se necesita, cierra la válvula V1, abra la válvula V2 y encienda el compresor.
12. Cuando el manómetro marque 145 [PSI], cierra la válvula V2 y apague el compresor rápidamente.
13. Asegúrese de las válvulas V4, V5 y V14 estén cerradas.
14. Conecte la manguera de la bomba de vacío al tanque auxiliar, abra la válvula V14 y encienda la bomba hasta que el vacuómetro alcance una presión de 58,1[cmHg], cierre la válvula y apague la bomba rápidamente.
15. Abra las válvulas V3 y V4, hasta que la presión se estabilice en el manómetro del molino, luego cierre las válvulas.
16. Repita el paso 14 y abra la válvula de alivio del molino, hasta que alcance la presión atmosférica, luego ciérrela.

Sistema de recuperación de solvente:

1. Asegúrese de que todas las válvulas estén cerradas, excepto la válvula V7.
2. Conecte la manguera de la bomba de vacío al tanque de salida de etanol, abra la válvula V13 y encienda la bomba hasta que el vacuómetro alcance una presión de 58,11 [cmHg], cierre la válvula y apague la bomba rápidamente.
3. Abra la válvula V5 hasta que el nivel alcance la mirilla del evaporador, luego cierre la válvula.
4. Cierre la válvula V7.
5. Encienda el sistema de bombeo de agua de calentamiento.
6. Enciende la resistencia eléctrica, habiendo ajustado anteriormente la temperatura del pirómetro en 50[°C] (temperatura de entrada del agua).
7. Encienda el sistema de bombeo de agua de enfriamiento.
8. Prepare el siguiente lote de trituración siguiendo el procedimiento mostrado para el sistema MSPD (pasos 1 a 9).
9. Cada 30 minutos, repita el paso 3.
10. Cada 2 horas, abra durante 10 minutos la válvula V7, y luego ciérrela.
11. Al haber completado las 4 horas, desconecte la manguera de la válvula V13 y ábrala hasta que éste llegue a la presión atmosférica, y proceda a abrir la válvula V8 y la válvula V1 para alimentar el sistema MSPD. El volumen restante debe ser suministrado con etanol puro (válvula V16).
12. Continúe con los pasos descritos en sistema MSPD; pasos 10 a 16.
13. Repita los pasos 9 a 12, hasta completar los 4 lotes del día.
14. Finalizados los 4 lotes, proceda a apagar los sistemas de bombeo y la resistencia eléctrica. Abra las válvulas V7 y V15 hasta que el sistema alcance la presión atmosférica.
15. Abra la válvula V10 y almacene los extractos vegetales en un recipiente limpio.
16. Desmonte el cono inferior del evaporador para recuperar los extractos adheridos a las paredes internas del evaporador.
17. Proceda con el mantenimiento del equipo.
18. Monte la tapa del evaporador y del condensador.


Solvente puro
V16
Aire atmosférico
Tanque de Solvente
V1
V2
Compresor de aire
Condensador
Torre de enfriamiento
V12
V11
V14
V5
V7
Bomba de vacío
V13
Resistencia calefactora
Bomba
V8
Salida de etanol
Evaporador
V9
V6
V15
V10
Salida de extractos
Reservorio agua de calentamiento
V3
Filtro
V4
Solvente con extractos