



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO
TRITURADOR HOMOGENEIZADOR DE MUESTRAS
VEGETALES CRIOGÉNICAS, PARA LOS LABORATORIOS DE
BIOTECNOLOGÍA**

AUTORES:

**CABEZAS TAPIA, WILSON GEOVANNY
DE LA CUEVA MALDONADO, CHRISTIAN ANDRÉS**

DIRECTOR: ING. TERNEUS, FRANCISCO

CODIRECTOR: DRA. PROAÑO, KARINA

SANGOLQUÍ

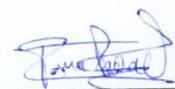
2015

CERTIFICADO DE ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO TRITURADOR HOMOGENEIZADOR DE MUESTRAS VEGETALES CRIOGÉNICAS, PARA LOS LABORATORIOS DE BIOTECNOLOGÍA” fue realizado en totalidad por Christian Andrés De la Cueva Maldonado y Wilson Geovanny Cabezas Tapia, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica.



Ing. Francisco Terneus
DIRECTOR



Dra. Karina Proaño
CODIRECTOR

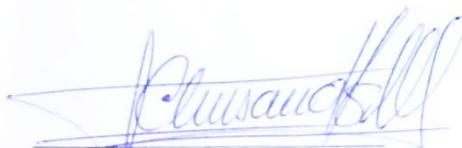
Sangolquí, julio del 2015

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

El presente proyecto titulado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO TRITURADOR HOMOGENEIZADOR DE MUESTRAS VEGETALES CRIOGÉNICAS, PARA LOS LABORATORIOS DE BIOTECNOLOGÍA.”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado el derecho intelectual de terceros considerándolos en citas y como fuentes en el registro bibliográfico.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance del proyecto en mención.

ELABORADO POR:



Christian De la Cueva M.



Wilson Cabezas Tapia

Sangolquí, julio del 2015

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros: Christian Andrés De la Cueva Maldonado y Wilson Geovanny Cabezas Tapia

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE la publicación en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO TRITURADOR HOMOGENEIZADOR DE MUESTRAS VEGETALES CRIOGÉNICAS, PARA LOS LABORATORIOS DE BIOTECNOLOGÍA” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.



Christian De la Cueva M.



Wilson Cabezas Tapia

Sangolquí, julio del 2015

DEDICATORIA

A Dios por guiar, proteger y bendecir cada paso a través de este camino que es la vida.

A mi madre quien con sacrificio, amor y cuidados incondicionales forjaron en mí ese aliento necesario para alcanzar mis sueños y confiar en mis capacidades, y muy por el contrario de lo que siempre dice, me ayudó hasta donde le fue posible, incluso mucho más que eso.

A mis tías, especialmente a mi tía Yolanda quien me acogió como un hijo más, brindándome su inseparable apoyo durante todos estos años y sobretodo me regaló la oportunidad que pocos tienen de seguir adelante en su formación académica, finalmente logramos que este día sea una realidad querida tía. Su preocupación y cariño ha sido mi constante motivación.

A mis abuelitos quienes con su dulzura y consejos sembraron en mí el compromiso al estudio, haciendo que todo esto valga la pena.

A mis hermanos, espero que de cierta manera yo sea su ejemplo de esfuerzo y perseverancia, nada les impide que ustedes también alcancen sus sueños.

Wilson Geovanny Cabezas Tapia

DEDICATORIA

“La educación no cambia el mundo, cambia a las personas que van a cambiar el mundo”

Paulo Freire

A Dios por ser luz en mi vida, y guiarme de manera correcta a su voluntad.

A toda mi familia, en especial a mis padres que con su esfuerzo y afán nunca dejaron de apoyarme, siempre supieron cómo darme una mano en las derrotas y palabras sabias en las victorias.

A mis hermanos, tíos, primos y demás que son parte fundamental de mi vida, siempre estuvieron pendientes de mí, tanto en lo personal como en lo educativo.

A mi familia, en especial a mi hijo Emilio, que me da fuerzas para seguir siendo mejor, a sus abuelos Santiago y Amada que me apoyaron incondicionalmente, a Gabi que me acompañó gran parte de este camino y fue un gran respaldo en mi vida universitaria.

A todos mis amigos y compañeros con los que compartimos varias etapas en este proceso, el sacrificio no fue de uno sino de todos así como el triunfo.

Christian Andrés De la Cueva Maldonado

AGRADECIMIENTO

A mis padres, que sin duda son los responsables del ser humano que soy hoy en día, gracias a ambos por sacar adelante a nuestra familia, y en especial apoyarme en cada decisión y proyecto. Muchas gracias desde el fondo de mi corazón por estar conmigo siempre.

A mis abuelitos, tíos y primos, tengo la fortuna de contar con ustedes, gracias por brindarme su apoyo, hemos compartido éxitos e innegablemente fracasos, ustedes son quienes a lo largo de mi vida nunca me han dejado ni un instante solo.

A mis amigos de la infancia, más que amigos son mis hermanos, hemos compartido tantos años inolvidables juntos, siempre supieron que hacer para que yo olvidara eso no tan buenos momentos universitarios, los quiero mucho mis hermanos.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, que me abrió las puertas desde el primer día de estudio y transmitió en mí valores, estímulos, experiencias, conocimientos teóricos y prácticos para formarme en el profesional que soy ahora.

A mis compañeros de la universidad, que han sido fuente de apoyo y de gratos momentos, permanecerán siempre en mis recuerdos.

A mi amigo Christian, con el cual he compartido incontables horas de labor, tanto en este proyecto como a lo largo de la carrera, gracias por los buenos y malos momentos, por aguantarme y por escucharme.

Wilson Geovanny Cabezas Tapia

AGRADECIMIENTO

“La vida recompensa de manera extraordinaria a quienes se entregan de forma extraordinaria”

Arturo Orantes

Agradezco y atribuyó este triunfo a Dios, que siempre nos abre los ojos y nos muestra que ninguna meta es inalcanzable.

A mis padres, a mi madre por toda la ayuda y amor que me ha dado, a mi padre por todo el sacrificio, conocimiento y valores que han inculcado en mí, por mostrarme que primero hay que ser una buena persona para ser un buen profesional.

A mi hijo, que me transmite esa alegría a mi vida, a Gabi que me apoyo incondicionalmente y siempre me brindo todo de ella para que alcance esta meta.

A mis amigos pero en especial a mi compañero y amigo Wilson, juntos logramos sacar a delante este proyecto.

A mis maestros, y a todos quienes forman parte de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE que siempre supieron ofrecer el apoyo y la ayuda necesaria y son fuente de conocimiento.

A todos gracias por tanto.

Christian Andrés De la Cueva Maldonado

ÍNDICE

DEDICATORIA	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
AGRADECIMIENTO	viii
ÍNDICE.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xvii
ÍNDICE DE TABLAS	xxi
LISTA DE APÉNDICES.....	xxiii
RESUMEN	xxiv
ABSTRACT	xxv
CAPÍTULO I	1
GENERALIDADES Y OBJETIVOS.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Definición del problema	2
1.3. Justificación e importancia	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
1.5. Alcance y Limitaciones	5
CAPÍTULO II.....	6
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	6
2.1. Pasos en el proceso de medición	6
2.3. Extracción de ácidos nucleicos	7
2.3.1. Pasos en preparación de muestras vegetales.....	8
2.3.2. Etapas de extracción de ácidos nucleicos	9

2.4. Mecanismos	10
2.4.1. Definiciones Fundamentales	10
2.4.1.1. Cinética	11
2.4.1.2. Cinemática	11
2.4.1.3. Análisis Cinemático	11
2.4.1.4. Eslabón	11
2.4.1.5. Mecanismo	12
2.4.1.6. Máquina	12
2.4.1.7. Par cinemático	12
2.4.1.8. Par inferior	13
2.4.1.9. Par superior	13
2.4.1.10. Grado de libertad (GDL)	13
2.4.1.11. Movimiento	14
2.4.1.12. Transmisión del movimiento	14
2.4.1.13. Diagrama Cinemático	15
2.4.1.14. Actuadores e impulsores	15
2.4.2. Movilidad en los mecanismos	16
2.4.2.1. Mecanismos de eslabones articulados	16
2.4.2.2. Mecanismo de cuatro barras	16
2.4.2.3. Ley de Grashof	16
2.4.2.4. Mecanismos Especiales	19
2.5. Materiales para la fabricación	20
2.5.1. Acero inoxidable	20
2.5.2. Metalurgia de materiales criogénicos.	23
2.6. Fatiga	24
2.6.1. Ecuación de Marín	24

2.6.2. Factor de superficie ka	25
2.6.3. Factor de tamaño kb	25
2.6.4. Factor de carga kc	25
2.6.5. Factor de temperatura kd	26
2.6.6. Factor de confiabilidad ke	26
2.6.7. Factor de efectos varios kf	26
2.7. Esfuerzos fluctuantes	27
2.8. Lógica difusa	27
2.8.1. Funciones de membresía.....	28
2.8.2. Fusificación.....	28
2.8.3. Defusificación.....	28
2.8.4. Controlador difuso	29
2.9. Equipos de trituración.....	29
2.9.1. Molino de martillos.....	30
2.9.2. Molino de bolas	31
2.9.3. Triturador de un solo rodillo	31
2.9.4. Molino de mortero	32
2.9.5. Molino de vibración.....	32
CAPÍTULO III.....	33
DISEÑO DEL TRITURADOR HOMOGENEIZADOR	33
3.1. Requerimientos	33
3.2. Diseño mecánico.....	34
3.2.1. Ángulo de oscilación	34
3.2.2. Diseño geométrico del mecanismo de cuatro barras	35
3.2.3. Movilidad en el mecanismo	37
3.2.4. Ley de Grashof	37

3.2.5. Análisis Cinemático	38
3.2.5.1. Análisis de Posición.....	38
3.2.5.2. Análisis de Velocidad	41
3.2.5.3. Análisis de aceleración	44
3.2.6. Análisis de Fuerzas dinámicas	46
3.2.6.1. Fuerzas que actúan en todas las juntas de pasador del mecanismo	47
3.2.6.1.1. Eslabón manivela	47
3.2.6.1.2. Eslabón acoplador.....	48
3.2.6.1.3. Eslabón balancín	48
3.2.6.1.4. Fuerzas eslabón de entrada o manivela	49
3.2.6.1.5. Fuerzas acoplador	49
3.2.6.1.6. Fuerzas balancín	50
3.2.7. Elección del actuador.....	50
3.2.8. Banda de transmisión.....	52
3.2.8.1. Diseño de bandas de transmisión.....	52
3.2.9. Diseño de poleas	56
3.2.9.1. Potencia transmitida (P_c).....	57
3.2.9.2. Relación de transmisión (R).....	57
3.2.9.3. Distancia entre ejes de poleas	57
3.2.9.4. Longitud de la correa	58
3.2.9.5. Factor de corrección del largo de la correa (F_{cl}).....	58
3.2.9.6. Prestación base de la correa	58
3.2.9.7. Potencia efectiva por correa.....	58
3.2.9.8. Cálculo del número de correas	59
3.2.9.9. Resultado final.....	59
3.2.10. Diseño del eje	59

3.2.10.1. Elección del material para el eje	61
3.2.10.2. Momento flector y torsión	61
3.2.10.3. Factores de Marín	61
3.2.10.3.1. Factor de superficie (ka)	61
3.2.10.3.2. Factor de tamaño kb	62
3.2.10.3.3. Factor de carga kc	62
3.2.10.3.4. Factor de temperatura kd	62
3.2.10.3.5. Factor de confiabilidad ke	62
3.2.10.4. Esfuerzos en probetas	62
3.2.10.5. Criterio ED-Goodman	62
3.2.10.5.1. Verificación	63
3.2.11. Selección de chumaceras	64
3.2.12. Análisis solicitado dinámicamente.	64
3.2.13. Selección de la chaveta	66
3.2.13.1. Fuerzas que actúan en la chaveta	67
3.2.14. Diseño de pasadores	68
3.2.15. Diseño de los rodamientos para los eslabones.....	69
3.2.16. Diseño de la Carcaza	71
3.3. Diseño eléctrico y electrónico	72
3.3.1. Fuente de alimentación	73
3.3.1.2. Rectificación	77
3.3.1.3. Filtrado.....	78
3.3.1.4. Regulación	79
3.3.2. Sistema de control y potencia	83
3.3.2.1. Diseño del circuito de control y potencia	83
3.3.3. Instrumentación	90

3.3.3.1. Final de carrera	90
3.3.3.2. Encoder	91
3.3.3.2.1. Circuito para encoder óptico.....	92
3.3.4. Sistemas auxiliares - alarmas	93
3.3.4.1. Led RGB.....	93
3.3.4.2. Buzzer	93
3.4. Conductores	94
3.4.1. Cálculo de calibre de cables eléctricos	94
3.5. Disipadores	95
3.5.1. Cálculo de disipadores.....	95
3.6. Diseño de la placa controladora.....	97
3.6.1. Diseño de la placa del circuito impreso	97
3.6.2. Cálculo de ancho de pista	100
3.6.3. Elaboración de la PCB.....	100
3.6.3.1. Esquema del circuito en el software de simulación.....	100
3.6.3.2. Diseño y simulación	101
3.7. Diseño del sistema de control.....	104
3.7.1. Variable lingüística Entrada Error	105
3.7.2. Variable lingüística Salida	105
3.7.3. Reglas de control propuesta.....	106
CAPITULO IV	109
CONSTRUCCIÓN, ENSAMBLAJE Y VALIDACION	109
4.1. Lista de materiales	109
4.1.1. Mecánica.....	109
4.1.2. Metalmecánica	110
4.1.3. Eléctrico – electrónico	111

4.1.4. Otros componentes	112
4.1.5. Máquinas e instrumentos usados	112
4.2. Construcción del diseño final	112
4.2.1. Construcción y conformado de partes mecánicas	112
4.2.1.1. Base	112
4.2.1.2. Estructuras	113
4.2.1.3. Ejes	114
4.2.1.4. Eslabones	115
4.2.1.4.1. Manivela	115
4.2.1.4.2. Acoplador	116
4.2.1.4.3. Balancín	116
4.2.1.5. Porta cápsula	116
4.2.1.6. Carcasa	118
4.2.1.7. Separadores	119
4.2.2. Implementación de componentes eléctricos y electrónicos	119
4.2.2.1. Diseño de la tarjeta controladora	119
4.3. Ensamblaje General	120
4.3.1. Montaje estructural del sistema mecánico	120
4.3.2. Montaje de componentes eléctricos y electrónicos	121
4.4. Programación	122
4.5. Prueba de Validación del equipo	123
4.5.1. Pruebas dimensionales y geométricas.	123
4.5.2. Pruebas de funcionamiento	125
4.5.3. Pruebas de laboratorio	126
4.6. Análisis de resultados	128
CAPÍTULO V	130

ANÁLISIS ECONÓMICO.....	130
5.1. Costos directos de fabricación	130
5.1.1. Costos de Materia Prima.....	130
5.1.2. Costos de Mano de Obra Directa	132
5.2. Costos indirectos.....	133
5.3. Costo total del proyecto	134
5.4. Evaluación financiera	136
5.4.1. Relación Beneficio / Costo.....	136
CAPÍTULO VI	138
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	138
6.1. Conclusiones	138
6.2. Recomendaciones	139
BIBLIOGRAFÍA	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Preparación de la muestra	6
Figura 2. Pasos en preparación de muestras	8
Figura 3. División de la Mecánica	10
Figura 4. Ejemplos de eslabones	11
Figura 5. Eslabones de diferente orden	11
Figura 6. Turbina Hidráulica	12
Figura 7. Par cinemático	13
Figura 8. Par cinemático inferior, perno y corredera	13
Figura 9. Par cinemático superior	14
Figura 10. Cuerpo rígido en el plano con 3 GDL.....	14
Figura 11. Notación esquemática para diagramas cinemáticos	15
Figura 12. División de actuadores e impulsores	15
Figura 13. Categoría de mecanismos de cuatro barras	18
Figura 14. Mecanismos de paralelogramo	20
Figura 15. Mecanismos de yugo escocés	20
Figura 16. Película de óxido de cromo	21
Figura 17. Temperatura de transición en metales	23
Figura 18. Propiedades mecánicas de aceros criogénicos	24
Figura 19. Función de membresía	28
Figura 20. Método de defusificación.....	29
Figura 21. Molino de martillos	30
Figura 22. Molino de bolas cónico con bolas de trituración	31
Figura 23. Triturador de un solo rodillo	31
Figura 24. Molino de mortero	32
Figura 25. Molino vibratorio	32
Figura 26. Angulo de oscilación	34
Figura 27. Mecanismo manivela balancín.....	36
Figura 28. Simulación de mecanismo manivela - balancín.....	37
Figura 29. Representación vectorial para el análisis de posición.....	38
Figura 30. Análisis posicional del mecanismo	40
Figura 31. Análisis posicional del mecanismo con software	41

Figura 32. Representación vectorial del mecanismo	42
Figura 33. Análisis de velocidad angular del mecanismo	43
Figura 34. Análisis de velocidad angular del mecanismo con software	44
Figura 35. Análisis de aceleración del mecanismo	45
Figura 36. Análisis de aceleración del mecanismo con software	46
Figura 37. Centro de masa del eslabón manivela.....	47
Figura 38. Centro de masa del eslabón acoplador.....	48
Figura 39. Centro de masa del eslabón balancín.....	48
Figura 40. Fuerza de reacción entre eje y manivela	49
Figura 41. Fuerza de reacción entre manivela y acoplador	49
Figura 42. Fuerza de reacción entre eslabón acoplador y balancín.....	50
Figura 43. Torque necesario para el molino.....	51
Figura 44. Tipos de bandas de transmisión.....	54
Figura 45. Tipos de bandas en V.....	55
Figura 46. Fuerza de tensión aplicada para bandas	55
Figura 47. Banda acanalada	56
Figura 48. Diseño de poleas y relación de transmisión.....	56
Figura 49. Amplitud de fuerzas fluctuantes entre eje y manivela	59
Figura 50. Diagrama de cuerpo libre para el eje.	60
Figura 51. Diagrama de carga y cortante sobre el eje	65
Figura 52. Geometría de la chaveta.....	67
Figura 53. Dimensiones de un rodamiento.....	71
Figura 54. Criterios para el diseño de carcasas	71
Figura 55. Vista posterior y anterior de la carcaza.....	72
Figura 56. Modelo de la tapa de acrílico	72
Figura 57. Proceso para el diseño eléctrico – electrónico	73
Figura 58. Diagrama de bloques de una fuente lineal	74
Figura 59. Diagrama de bloques de una fuente lineal.....	75
Figura 60. Fuente de alimentación lineal DC	75
Figura 61. Relación de un transformador.	77
Figura 62. Rectificador de onda completa.	78
Figura 63. Rectificación de onda completa con filtro capacitivo.....	79

Figura 64. Diagrama de bloques del circuito	83
Figura 65. Arduino mega 2560	84
Figura 66. Optoacoplador	84
Figura 67. Mosfet IRF740	86
Figura 68. Sistema electrónico para el control de motor DC por PWM	86
Figura 69. Simplificación de optoacoplador	86
Figura 70. Circuito aplicando nodos	88
Figura 71. Microswitch o final de carrera	90
Figura 72. Encoder a) Incremental b) absoluto	91
Figura 73. Encoder óptico incremental	91
Figura 74. Señal encoder	92
Figura 75. Circuito de acondicionamiento para encoder óptico	92
Figura 76. Terminales del integrado ITR8102	92
Figura 77. Led RGB	93
Figura 78. Buzzer	93
Figura 79. Disipadores en elementos semiconductores	95
Figura 80. Analogía para la ley de Ohm Térmica	95
Figura 81. Disipador PR140	97
Figura 82. Esquema general norma 2221	98
Figura 83. Formatos para placas	98
Figura 84. Esquema general norma 2221	99
Figura 85. Diseño de pads de soldadura	99
Figura 86. Diseño esquemático	101
Figura 87. Esquemático	101
Figura 88. Vista posterior de la PCB	102
Figura 89. Vista anterior de la PCB	102
Figura 90. Modelado de la Tarjeta electrónica	103
Figura 91. Esquemático del Encoder	103
Figura 92. Modelado de la PCB del encoder	103
Figura 93. Sistema de control en lazo cerrado	104
Figura 94. Funciones de membresía para la entrada	105
Figura 95. Funciones de membresía para la salida	105

Figura 96. Curva de control.....	106
Figura 97. Respuesta de la planta a un escalón unitario.....	107
Figura 98. Diagrama de flujo de funcionamiento	108
Figura 99. Mecanización de la base (Corte – Taladrado - Esmerilado).....	113
Figura 100. Proceso de mecanización de alzas para motor	113
Figura 101. Proceso de mecanización de estructuras	114
Figura 102. Proceso de mecanización de eje.....	115
Figura 103. Proceso de mecanización de eslabón manivela	115
Figura 104. Proceso de mecanización de eslabón acoplador	116
Figura 105. Proceso de mecanización de eslabón balancín	116
Figura 106. Proceso de mecanización del cuerpo para porta cápsula	117
Figura 107. Proceso de mecanización de tapa para porta cápsula	117
Figura 108. Porta cápsulas	118
Figura 109. Proceso de construcción de la carcaza	118
Figura 110. Separadores de nylon.....	119
Figura 111. Proceso de fabricación de PCB.....	119
Figura 112. Proceso de montaje de componentes mecánicos	120
Figura 113. Proceso de ensamblaje de molino triturador.....	120
Figura 114. Montaje de elementos eléctricos y electrónicos	121
Figura 115. Elementos de maniobra y mando.....	121
Figura 116. Ensamble de componentes eléctricos y electrónicos	121
Figura 117. Diagrama de flujo del proceso de macerado.....	122
Figura 118. Interfaz humano – máquina HMI.....	123
Figura 119. Microscopio para la medición de granulometría de muestras	126
Figura 120. Representación de la forma de grano.....	127
Figura 121. Nonio del microscopio graduado	128
Figura 122. Representación porcentual de Costos Directos e Indirectos	135

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Pasos en el proceso de medición	6
Tabla 2. Etapas para la extracción y purificación del ADN	8
Tabla 3. Extracción, aislamiento y purificación de ácidos	9
Tabla 4. Resumen de etapas de extracción de ácidos nucleicos	9
Tabla 5. Categorías de los mecanismos de cuatro barras	17
Tabla 6. Descripción de los mecanismos de cuatro barras	17
Tabla 7. Descripción de los mecanismos Especiales	19
Tabla 8. Ventajas del Acero Inoxidable	22
Tabla 9. Elementos químicos y acero inoxidable	22
Tabla 10. Factor de superficie	25
Tabla 11. Factor de temperatura	26
Tabla 12. Factor de confiabilidad	26
Tabla 13. Equipo de Trituración	30
Tabla 14. Matriz de selección para molinos de trituración	34
Tabla 15. Ángulos de oscilación	35
Tabla 16. Características del motor DC	52
Tabla 17. Características y rendimiento de bandas de transmisión	52
Tabla 18. Criterio de selección para la banda de transmisión	53
Tabla 19. Momento flector y torsión producido por el motor	61
Tabla 20. Cargas individuales	70
Tabla 21. Intensidades Nominales normalizadas de los fusibles BT	76
Tabla 22. Intensidades para corriente convencional de fusión	76
Tabla 23. Lista de componentes	82
Tabla 24. Características de Arduino mega2560	84
Tabla 25. Características de los transistores de potencias	85
Tabla 26. Matriz de selección para transistores de potencia	85
Tabla 27. Resistencias seleccionadas	90
Tabla 28. Estado / color para led RGB	93
Tabla 29. Criterio de selección para calibre de conductores eléctricos	94
Tabla 30. Criterio de selección para el lazo de control	104
Tabla 31. Conjuntos difusos	106

Tabla 32. Lista de elementos mecánicos	109
Tabla 33. Lista de elementos metalmecánicos	110
Tabla 34. Lista de material eléctrico - electrónico	111
Tabla 35. Lista de material eléctrico - electrónico	112
Tabla 36. Lista de máquinas, herramientas e instrumentos usados	112
Tabla 37. Pruebas dimensionales y geométricas de la base	123
Tabla 38. Pruebas dimensionales y geométricas de estructuras	124
Tabla 39. Pruebas dimensionales y geométricas para eslabones	124
Tabla 40. Pruebas dimensionales y geométricas para porta cápsulas	124
Tabla 41. Pruebas dimensionales y geométricas para el eje	124
Tabla 42. Pruebas de funcionamiento del mecanismo	125
Tabla 43. Pruebas de funcionamiento del sistema eléctrico y electrónico	125
Tabla 44. Pruebas de funcionamiento en vacío	126
Tabla 45. Pruebas de funcionamiento con carga	126
Tabla 46. Pruebas de granulometría de muestras	128
Tabla 47. Características del equipo	129
Tabla 48. Costos de materiales directos en la Carcasa.....	130
Tabla 49. Costos de materiales directos del mecanismo	131
Tabla 50. Costos de materiales directos en Electrónica	132
Tabla 51. Costos de Fabricación y Ensamblaje.....	133
Tabla 52. Costos de Mano de Obra Indirecta	133
Tabla 53. Costo de Materiales Indirectos	134
Tabla 54. Costos Operativos	134
Tabla 55. Costo total del equipo.....	135

LISTA DE APÉNDICES

- Apéndice A: Características de los aceros inoxidables
- Apéndice B: Gráficas y tablas para el diseño del equipo
- Apéndice C: Hojas técnicas del fabricante
- Apéndice D: Programación
- Apéndice E: Planos mecánicos, eléctricos y electrónicos
- Apéndice F: Manual de operación del equipo

RESUMEN

Este proyecto se efectúa con la finalidad de brindar una solución al proceso manual de macerado de muestras en el laboratorio de biotecnología vegetal de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, mediante el diseño y construcción de un equipo triturador de muestras criogénicas. En el presente documento se detallan los conceptos y las bases teóricas de mecánica, electrónica y sistemas de control, fundamentales e importantes para un posterior diseño conceptual. Partiendo del problema inicial se plantean una serie de alternativas, mediante una matriz de selección se escoge la mejor opción entorno a la cual se diseñarán, dimensionarán y elegirán los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que cumplan con los requerimientos establecidos para el óptimo desempeño del equipo, para ello se utilizan modelos matemáticos, ecuaciones, herramientas cálculo y software de diseño, mismos que facilitan y corroboran el diseño del conjunto. La programación del controlador y del proceso como tal se realiza en la tarjeta Arduino de la serie mega 2560, para la introducción y visualización de las variables del proceso se utiliza una pantalla táctil compatible con Arduino que actúa como una interfaz humano-máquina (HMI) permitiendo el ingreso de la frecuencia y tiempo de trituración. La tarjeta del circuito impreso permite realizar un acondicionamiento y envío de señales de los sensores, alarmas y elementos de maniobra al microcontrolador, así como, permitir el accionamiento y regulación del actuador. La máquina y sus componentes se sometieron a una serie de pruebas para determinar errores y tomar medidas correctivas pertinentes, de modo que se cumpla con los objetivos establecidos y comprobar que el macerado se lo realice de una manera efectiva. Por último se elabora un análisis económico el cual permite conocer la rentabilidad y viabilidad del proyecto.

PALABRAS CLAVES:

- **TRITURADOR**
- **MECANISMO MANIVELA-BALANCÍN**
- **MOLINO CRIOGÉNICO**
- **LISIS CELULAR**
- **EXTRACCIÓN DE MUESTRAS**

ABSTRACT

This project is effected with the aim of providing a solution to the manual process of macerated samples in the laboratory of plant biotechnology at the University of the Armed Forces ESPE, through the design and construction of a crusher equipment of cryogenic samples. In this document are detailed the concepts and the theoretical foundations of mechanics, electronics and control systems, important and fundamental to a conceptual design for later. From the initial problem posed alternatives and by a selection matrix is chosen the best option around which they shall be designed, dimensioned and choose the mechanics, electrics and electronics components that comply the established requirements for the optimum equipment performance, for this is going to be used mathematics models equations, calculation tools and design software, this will facilitate and corroborate the whole design. The driving and process programming as such is performance in the Arduino board of the series mega 2560, for the introduction and visualization of the process variables in the process is used a touch screen with Arduino which acts as a human – machine interface (HMI) allowing the entrance of the time and frequency of crushing. The printed circuit board allows realize a conditioning and the sending of signals of sensors, alarms and elements of maneuver to the microcontroller, as well as, allow the drive and control the rotary actuator. The machines and its components were subject to testing, with the purpose of determinate mistakes and take pertinent corrective measures, so as to meet the established objectives and to prove that in the macerated is made in an effective way. Finally an economic test is made, where is indicated the cost in the equipment manufacturing, besides allowing to know and interpret the profitability and viability thereof.

KEYWORDS:

- **CRUSHER EQUIPMENT**
- **CRANK – ROCKER MECANISM**
- **CRYOGENIC MILL**
- **CELL LYSIS**
- **SAMPLE EXTRACTION**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES Y OBJETIVOS

En el presente capítulo se describe de forma amplia las razones para la realización de este proyecto de grado, así como las metas, las cuales se quiere alcanzar. Inicia con la exposición de los antecedentes de la Biotecnología Vegetal, su trascendencia e importancia científica y económica, la descripción de la problemática presentada dentro del laboratorio de Biotecnología vegetal, la justificación y relevancia del proyecto y finalmente se plantean los objetivos, el alcance y limitaciones que giran en torno al proyecto de tesis.

1.1. Antecedentes

La Biotecnología Vegetal es una ciencia y tecnología que permite explotar el inmenso potencial que poseen las plantas, de una manera precisa y controlada.

Las aplicaciones de la Biotecnología Vegetal son varias, como por ejemplo la manipulación genética para el mejoramiento de cultivos en la industria alimenticia y otros sectores productivos, aplicación con herramientas moleculares para fines agrícolas, transferencia de genes que permitan a las plantas producir sustancias valiosas para la industria farmacéutica o química, biopolímeros, biocombustibles de alto valor añadido entre otras aplicaciones. Es por esto que la biotecnología se encuentra en continuo desarrollo, y necesita de un trabajo conjunto con la finalidad de satisfacer la demanda y el mercado, así como una continua inversión en la investigación por parte del sector académico, público y privado.

Uno de los procesos base en la Biotecnología Vegetal es la extracción de material genético, en donde el ADN (ácido desoxirribonucleico) y ARN (ácido ribonucleico) se separan del resto de constituyentes de la célula. Existen diferentes protocolos para la extracción de ácidos nucleicos, y estos se los utiliza dependiendo del tipo de muestra que se va a manipular y el nivel de pureza que se requiera. Los procedimientos para el aislamiento de ácidos nucleicos requieren las siguientes etapas: Lisis celular, purificación, precipitación y lavado.

La Lisis celular implica generar una ruptura de la pared celular, membrana plasmática y nuclear por medio de procesos mecánicos. El tejido del núcleo debe romperse y ser molido a un grano muy fino, es decir generar una homogenización.

Actualmente, para efectuar el procedimiento de molturación y homogenización de muestras vegetales se utiliza un mortero de porcelana y un mazo de trituración. En el mortero previamente frío se coloca la muestra vegetal junto con el nitrógeno líquido para el inicio del proceso de pulverización. El macerado termina cuando el material vegetal se convierte en un polvo muy fino y se ha evitado la oxidación. Finalmente la muestra obtenida es almacenada a -80°C para su posterior utilización.

Por estos antecedentes, es trascendental la existencia de un equipo que realice de manera automática el proceso de trituración y homogenización de muestras vegetales.

1.2. Definición del problema

En el laboratorio de Biotecnología Vegetal de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, se llevan a cabo investigaciones basadas en la extracción de ácidos nucleicos para el mejoramiento genético de especies de interés. El procedimiento de pulverización se la realiza de manera manual, lo cual consume tiempo y recursos importantes del laboratorio.

La trituración manual implica riesgos en la obtención de muestras a gran escala. La granulometría de la muestra es un factor determinante en el macerado, debido a que se logra romper las paredes celulares para obtener el material genético, el procesamiento inadecuado en la granulometría del macerado no permite la correcta homogenización con el reactivo de extracción. La rápida oxidación de los tejidos es otro problema ya que conlleva a la pérdida de muestras vegetales las cuales son muchas veces irremplazables. La dureza del tejido puede ser otro factor de pérdida de muestras.

El desperdicio de material vegetal y de nitrógeno líquido, así también la contaminación de la muestra y el riesgo que implica para la integridad del operador trabajar con nitrógeno líquido (quemaduras por contacto directo o indirecto, asfixias y lesiones pulmonares) son problemas de preocupación dentro del laboratorio.

Estos problemas son críticos para la obtención de buenos resultados. Por consiguiente, es necesario la creación, diseño y construcción de un equipo triturador homogeneizador de muestras vegetales criogénicas, para el análisis molecular en el laboratorio de Biotecnología Vegetal. En la trituración y homogenización de muestras vegetales es importante determinar los tiempos de molturación y la temperatura de trabajo para prevenir la oxidación y pérdida de las muestras.

Con todo lo expuesto, el equipo triturador homogeneizador de muestras vegetales criogénicas podrá solventar en parte las necesidades y problemas presentados en el laboratorio.

1.3. Justificación e importancia

La eficiencia y optimización de procesos es un aspecto transcendental para mejorar la productividad en cualquier campo laboral, de aquí surge la necesidad de automatizar un procedimiento primitivo, manual y peligroso como la trituración y homogenización de una muestra vegetal empleando nitrógeno líquido.

La importancia de un molino eléctrico radica en implementar nuevas tecnologías en el laboratorio para el análisis, control de calidad y pruebas de materiales, de igual modo, para la mezcla y trituración. En Biotecnología no existe una máquina que cumpla con estos requerimientos, y las que están a disposición en el mercado son costosas y no desempeñan todas las funciones ya mencionadas.

El presente proyecto de grado pretende cubrir las necesidades e inconvenientes presentados en el laboratorio. Optimizar el tiempo e insumos que intervienen en el proceso, prevenir la oxidación de la muestra para evitar pérdidas de la misma y de nitrógeno líquido, salvaguardar la integridad de los involucrados en el procedimiento y finalmente obtener un macerado homogenizado de calidad para su posterior uso.

El objetivo primordial de este trabajo, es la descripción teórica de equipos de trituración existentes que puedan producir una molienda criogénica para muestras vegetales y posteriormente realizar el diseño y construcción del mismo, con la finalidad de mejorar el procedimiento de extracción de ácidos nucleicos, el cual se lleva a cabo en el laboratorio de Biotecnología Vegetal de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Así también, es importante acotar que la operación es efectuada bajo normas de higiene y todos los instrumentos son previamente esterilizados, por lo cual esto debe ser una consideración esencial en la etapa de diseño.

El equipo tendrá las siguientes prestaciones: capacidad de reducir muestras vegetales o de otro tipo, a un polvo con granulometrías de partícula fina del orden micrométrico, realizar la extracción en cortos períodos de tiempo y optimizar los recursos, entre otros.

Además, el proyecto pretende aportar con la necesidad actual de nuestro país ya que el gobierno mediante su modelo de cambio de la matriz productiva, en uno de sus

ejes estipula, la sustitución de importaciones con el fin de fomentar la producción nacional y la motivación para los ecuatorianos a soñar con un país industrializado capaz de exportar tecnología, equipos y sistemas.

De esta manera se espera que el presente trabajo sirva como fuente bibliográfica para futuras investigaciones, permitiendo profundizar sobre temas relacionados, y que a su vez, ofrezca una guía práctica, ordenada y concisa sobre equipos de trituración en laboratorios.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar y construir un equipo triturador homogeneizador para muestras vegetales criogénicas, mediante una molienda automática, para la extracción de ácidos nucleicos en el laboratorio de Biotecnología Vegetal de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar y validar un mecanismo que permita obtener un método eficiente de trituración de muestras vegetales criogénicas, considerando los requerimientos técnicos del laboratorio de Biotecnología Vegetal.
- Analizar el diseño y construcción del sistema mecánico, verificando que cumpla con los parámetros de operación y seguridad para su correcto desempeño dentro del laboratorio de Biotecnología vegetal.
- Examinar, dimensionar y seleccionar los componentes eléctricos y electrónicos que permitan un adecuado funcionamiento y óptimo consumo de potencia para obtener el máximo rendimiento del equipo bajo parámetros de diseño.
- Desarrollar una interfaz humano-máquina, con un diseño centrado en el usuario, mediante la implementación de una pantalla táctil, a fin de que sea práctica, sencilla y comprensible para el operador.

1.5. Alcance y Limitaciones

El alcance de esta investigación radica en la optimización de tiempo y recursos valiosos para el laboratorio de Biotecnología Vegetal de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, así como la automatización y control de la molienda, trituración y homogenización de muestras vegetales las cuales utilizan nitrógeno líquido.

El equipo triturador homogeneizador presenta algunas limitaciones en su empleo. Para muestras vegetales de gran volumen, se ve restringido en relación a la capacidad y volumen del contenedor empleado. Adicionalmente, presentará limitantes en la granulometría del macerado producido por el diseño del equipo.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En el presente capítulo se introducen los conceptos básicos para la comprensión, posterior diseño y construcción del equipo triturador homogeneizador de muestras vegetales. Se desarrolla conceptos fundamentales de mecánica, sistemas de control y materiales, así como las fórmulas que se utilizarán en el diseño y las posibles alternativas para el desarrollo del equipo.

2.1. Pasos en el proceso de medición

Mitra (2003) afirma que el propósito de un estudio analítico es obtener información variada acerca de algún objeto o sustancia, la cual podría ser un sólido, un líquido, gas o inclusive material biológico. La tabla 1 indica distintos pasos para el proceso de medición de modo general.

Tabla 1

Pasos en el proceso de medición

Pasos	Descripción
Muestreo	Es la obtención de la muestra a partir del objeto a analizar
Preservación de la muestra	Se refiere a la conservación de las características físicas y químicas de manera que el análisis realmente represente el objeto en estudio
Preparación de la muestra	La mayoría de las muestras no están listas para la introducción directa al instrumento de análisis, por lo tanto, necesita algunos procesos intermedios, dependiendo de la muestra, matriz y concentración
Análisis	Finalmente la muestra es llevada a un instrumento adecuado según la información que se requiera

2.2. Preparación de la muestra

La siguiente figura muestra los pasos comunes en el proceso de preparación de cualquier muestra.

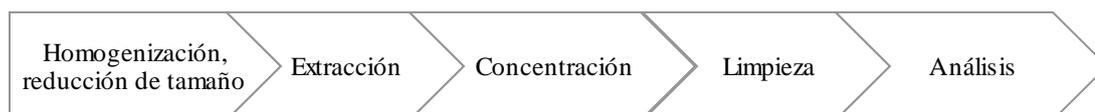


Figura 1. Preparación de la muestra

Fuente: (Mitra, 2003)

2.3. Extracción de ácidos nucleicos

Los ácidos nucleicos, tanto el ADN (ácido desoxirribonucleico) como el RNA (ácido ribonucleico) son macromoléculas indispensables para la vida, encargadas de almacenar, transmitir y expresar la información genética. Lewin en el 2008 indica que la naturaleza hereditaria de todo organismo es definido por su genoma, el cual consiste en una secuencia larga de ácido nucleico que proporciona la información necesaria para construir el organismo.

El descubrimiento de la estructura del ADN en 1953 y la posterior dilucidación de los pasos de la síntesis del ADN, ARN y las proteínas constituyen los extraordinarios logros de los tiempos iniciales de la biología molecular. El ADN es el centro de almacenamiento que contiene toda la información requerida para construir las células y los tejidos de un organismo. En el proceso de transcripción, la información almacenada en el ADN es copiada por el ARN, que lleva a cabo tres funciones diferenciadas en la síntesis proteica (Lodish, y otros, 2002).

La extracción de ácidos nucleicos es la parte inicial de todo ensayo molecular, cuyo propósito es separar al ADN o ARN del resto de componentes celulares, su correcto procesamiento permitirá disminuir problemas en análisis posteriores, ahorrando además recursos e insumos costosos.

Para la extracción de ADN vegetal se debe considerar en primer lugar el tipo de tejido que se va a emplear como fuente, así como la composición bioquímica de este.

En plantas existen múltiples protocolos para extraer y purificar el ADN. Sin embargo todos ellos incluyen cuatro pasos indispensables, tal como lo muestra la tabla 2. Estos pasos se basan en las características fisicoquímicas del ADN. Pues aparte de ser una molécula de alto peso molecular muy larga y delicada, es un ácido capaz de formar sales con iones cargados positivamente (cationes). Además, es soluble en soluciones concentrada de sales, pero insoluble en alcoholes (tipo etanol o isopropanol). Adicionalmente, el ADN debe mantener el pH óptimo y brindar una alta concentración iónica (Dellaporta, Wood, & Hicks, 1983).

“La extracción de ADN íntegro y sin contaminantes es esencial para tener éxito en la obtención de datos genéticos, es el primer paso en la lista de técnicas moleculares que nos llevarán a comprender mejor y conservar la diversidad biológica a partir del conocimiento de genes y genomas” (Cornejo, Rendón, Rocha, & Serrato, 2014).

Tabla 2

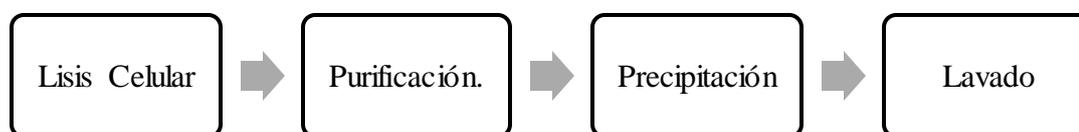
Etapas para la extracción y purificación del ADN

Etapas	Procedimientos
Ruptura de tejidos y pared celular	Se basa principalmente en la pulverización del material
Ruptura de membranas	Se libera el ADN, usando detergentes como: SDS, Triton u otro detergente comercial. Se suele emplear métodos físicos basados en ultrasonido
Inhibición de enzimas que destruyen el ADN	Como el caso de ADNasas mediante métodos físicos, mediante desnaturalización por calor (65°C aproximadamente) o métodos químicos a través de solventes orgánicos (fenol y cloroformo), antioxidantes (beta-mercaptoetanol), agentes quelantes (EDTA) o con agentes caotrópicos que actúan removiendo el agua estructural de las proteínas
Extracción de contaminantes	Se extrae proteínas y ARN mediante incubación con proteinasas, centrifugación, electroforesis, entre otros

Fuente: (Rogers & Bendish, 1988)

2.3.1. Pasos en preparación de muestras vegetales

Es difícil describir la inmensa diversidad metodológica desarrollada para la preparación de muestras, las variaciones son innumerables y están dictadas por criterios semiempíricos, aunque se base en principios generales. El primer factor que debe considerarse es la calidad de los ácidos nucleicos aislados, el siguiente protocolo separa al ADN o ARN del resto de componente celular, este procedimiento permite la obtención precisa de datos analíticos, la figura 2 proporciona una perspectiva de la secuencia de extracción, aislamiento y purificación de los ácidos nucleicos.

**Figura 2. Pasos en preparación de muestras**

Fuente (Mitra, 2003)

De igual manera, existen algunas técnicas disponibles para efectuar cada paso señalado, un resume de aquello se observa en la tabla 3.

Tabla 3***Técnicas de Extracción, aislamiento y purificación de ácidos nucleicos***

Pasos	Las técnicas disponibles
Lisis Celular	Métodos mecánicos: presión, desintegración ultrasónica, homogeneizadores de molino de bolas Métodos no mecánicos: lisis enzimática, lisis osmótica, congelación y descongelación, lisis a base de detergente y electroporación
Remoción de restos solidos	La centrifugación, filtración, separación por membrana y precipitación
Purificación de ADN	Extracción y precipitación con disolvente, electroforesis en gel, cromatografía: exclusión de tamaño, intercambio iónico, extracción en fase sólida, purificación por afinidad
Aislamiento de ADN purificado	Lavado, elución, precipitación y centrifugación

Fuente: (Mitra, 2003)

2.3.2. Etapas de extracción de ácidos nucleicos

Como se verá a continuación, las etapas de extracción de ácidos nucleicos de células vegetales se encuentran resumidas en una tabla, la misma que proveen un enfoque más delimitado.

Tabla 4***Resumen de etapas de extracción de ácidos nucleicos***

Etapas	Definición
Lisis celular	Las interacciones entre las moléculas que conforman la pared, la membrana celular y nuclear se modifican o destruyen permitiendo que los ácidos nucleicos se liberen. Se utilizan soluciones básicas, detergentes o agentes caotrópicos que permiten disolver la membrana celular, así como inhibidores para inactivar las enzimas que degradan el ADN.
Purificación	Esta etapa es opcional ya que nos permite obtener un ADN de mejor calidad libre de moléculas contaminantes.
Precipitación del ADN	Después de que son eliminados los lípidos y las proteínas, se recupera el ADN. Para ello, se adiciona etanol (95%) y soluciones con altas concentraciones de iones de sodio o amonio que se unen a los grupos fosfato, esta mezcla reduce las fuerzas repulsivas entre las cadenas y permite que el ADN se pliegue sobre sí mismo haciéndolo insoluble
Lavado	Los restos de etanol se eliminan con un lavado con etanol al 70% y el remanente se elimina por evaporación.

Fuente: (Alejos, Aragón, & Cornejo, 2008)

2.4. Mecanismos

Para el diseño de una máquina es importante el mecanismo que se elija para su operación, toda máquina tiene un mecanismo que le permite transmitir o transformar un movimiento a través de una energía de entrada a fin de realizar un trabajo. Los mecanismos son diversos y variados, y se palpan en el día a día como levas, poleas, engranajes, barras entre otras.

Norton (2009) define a un mecanismo como “un dispositivo que transforma el movimiento en un patrón deseable, y por lo general desarrolla fuerzas muy bajas y transmite poca potencia”, misma que nos permite desarrollar una acción requerida.

“La teoría de los mecanismos y las máquinas es una ciencia aplicada que sirve para comprender las relaciones entre la geometría y los movimientos de las piezas de una máquina o un mecanismo, y las fuerzas que generan tales movimientos” (Shigley & Uicker, 1998).

2.4.1. Definiciones Fundamentales

Para entender cómo funciona y se diseña un mecanismo o máquina, primero se debe entender los conceptos fundamentales entorno a los mecanismos presentados a continuación.

La rama que se encarga del análisis científico de los movimientos, el tiempo y las fuerzas involucradas es la Mecánica, la cual se divide en dos partes como se ilustra en el siguiente cuadro presentado en la figura 3.

La estática trata el análisis de sistemas estacionarios, sistemas en donde el tiempo no es un factor determinante, y la dinámica referente a sistemas cambiantes en el tiempo, dentro de este último se puede situar a los mecanismos.

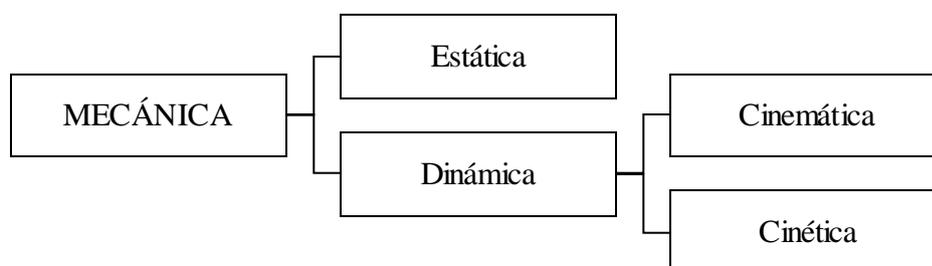


Figura 3. División de la Mecánica

2.4.1.1. Cinética

Es el estudio de las fuerzas sobre un sistema en movimiento.

2.4.1.2. Cinemática

Es el estudio del movimiento sin considerar las fuerzas inmersas en el sistema, dicho de otro modo “trata sobre la manera que se mueven los cuerpos y es el estudio de la geometría del movimiento” (Myszka, 2012).

2.4.1.3. Análisis Cinemático

Realizar un análisis cinemático de un sistema implica determinar en un mecanismo la posición, desplazamiento, velocidad y aceleración de cada uno de los componentes del mismo.

2.4.1.4. Eslabón

Es la pieza de una máquina o mecanismo completamente rígida.

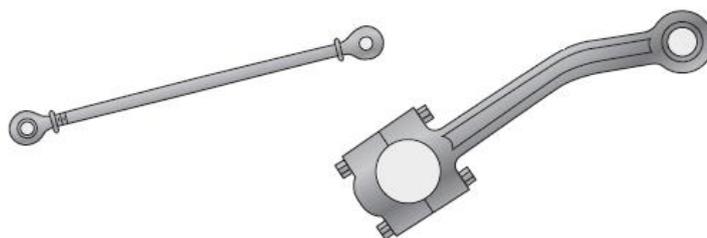


Figura 4. Ejemplos de eslabones

Fuente: (Myszka, 2012)

Existe una clasificación para los eslabones el cual es presentado en la figura 5.

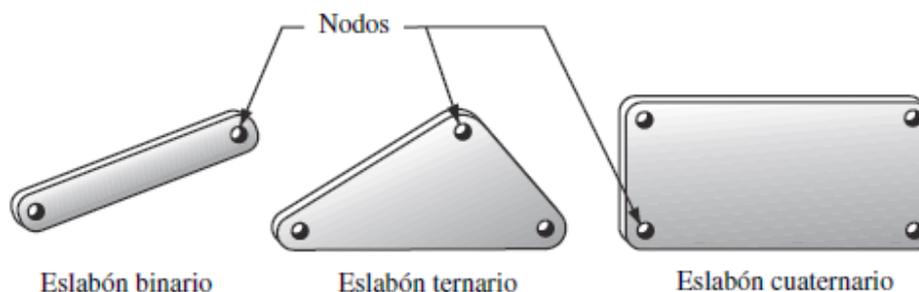


Figura 5. Eslabones de diferente orden

Fuente: (Norton, 2009)

- Eslabón binario: tiene dos nodos.
- Eslabón ternario: tiene tres nodos.
- Eslabón cuaternario: tiene cuatro nodos.

“Los eslabones de un mecanismo se deben conectar entre sí de una manera tal que transmitan movimiento del impulsor, o eslabón de entrada, al seguidor, o eslabón de salida” (Shigley & Uicker, 1998), conexión definida como cadena cinemática.

2.4.1.5. Mecanismo

Se define como una cadena cinemática cerrada en la que, al comunicar un movimiento dado mediante un actuador a uno o varios eslabones independientes, según los grados de libertad de la misma, los restantes eslabones producen movimientos completamente determinados.

El objetivo primordial de un mecanismo es efectuar un movimiento necesario para realizar una acción determinada. La dimensión, geometría y unión de los eslabones determinara cómo se comportará el mecanismo.

2.4.1.6. Máquina

Son dispositivos encargados de transformar y transmitir la energía para realizar un trabajo determinado. Un claro ejemplo de ello es turbina mostrada en la figura 6, la cual aprovecha la presión de un líquido o el aire a fin de generar fuerza motriz.

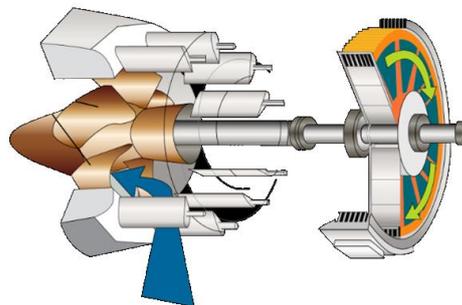


Figura 6. Turbina Hidráulica

Fuente: (Pinochet, 2014).

“Una máquina es una disposición de partes para efectuar trabajo, un dispositivo para aplicar potencia o cambiar su dirección; difiere de un mecanismo en su propósito. En una máquina, los términos fuerza, par motor, trabajo y potencia describen los conceptos predominantes” (Shigley & Uicker, 1998).

2.4.1.7. Par cinemático

“Es la unión móvil de dos cuerpos o elementos, cuyo movimiento relativo queda mutuamente limitado” (Yesipenko & Kozhevnikov, 1975), como se muestra en la figura 7.

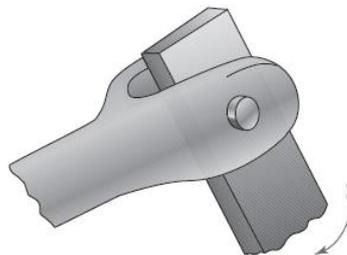


Figura 7. Par cinemático

Fuente: (Myszka, 2012)

Los pares cinemáticos o juntas pueden clasificarse de varias maneras:

- Por el tipo de contacto entre los elementos, de línea, de punto o de superficie.
- Por el número de grados de libertad permitidos en la junta.
- Por el tipo de cierre físico de la junta: cerrada por fuerza o por forma.
- Por el número de eslabones unidos (orden de la junta).

2.4.1.8. Par inferior

Término usado para describir juntas o conexiones con contacto superficial (como con un pasador rodeado por un orificio), ejemplo de ello se observa en la figura 8.

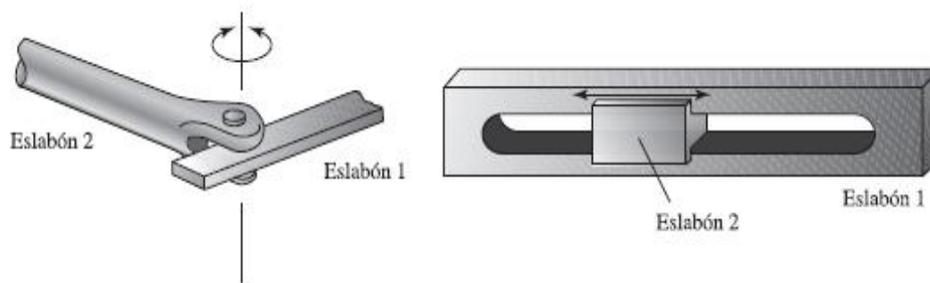


Figura 8. Par cinemático inferior, perno y corredera

Fuente: (Myszka, 2012)

2.4.1.9. Par superior

Término usado para describir juntas con contacto de punto o de línea, un ejemplo de ello se ve representado en la figura 9.

2.4.1.10. Grado de libertad (GDL)

Es cada uno de los movimientos independientes que puede efectuar un cuerpo, mecanismo y/o máquina, al unir una serie de eslabones entre sí el movimiento relativo de ellos se ve limitado por las condiciones de enlace.

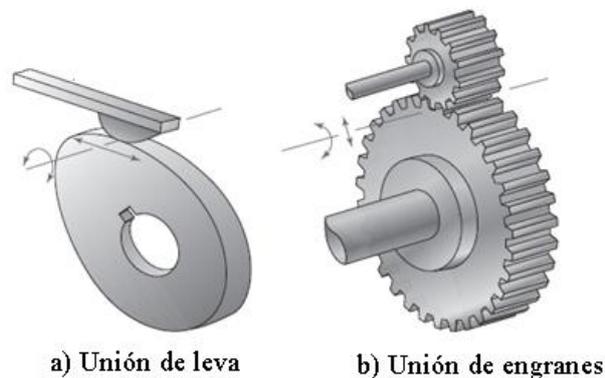


Figura 9. Par cinemático superior

Fuente: (Myszka, 2012)

2.4.1.11. Movimiento

Es un cambio de posición a lo largo de un tiempo de un cuerpo con respecto a un sistema de referencia. Existen tres tipos de movimiento: traslación pura, rotación pura y el movimiento complejo que es una combinación simultánea de traslación y rotación.

La traslación y rotación constituyen movimientos independientes del cuerpo. Si se define un sistema de coordenadas en el plano xy ilustrado en la figura 10, las componentes x e y representan el movimiento de traslación, y el término θ la rotación del cuerpo.

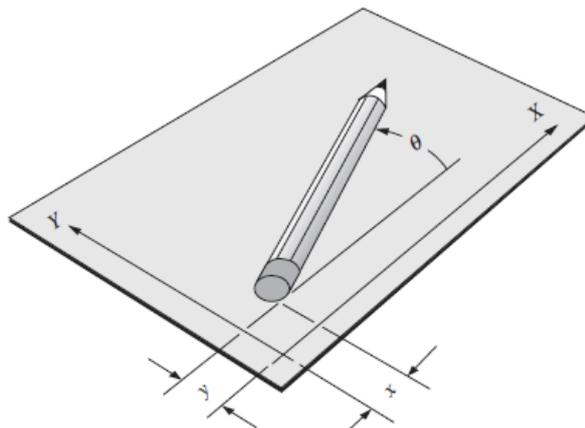


Figura 10. Cuerpo rígido en el plano con 3 GDL

Fuente: (Norton, 2009)

2.4.1.12. Transmisión del movimiento

Es un parte primordial para el mecanismo de aquí se sabrá cómo estará configurado el mecanismo y de qué tipo es, existen tres tipos de transmisión que son:

- Contacto directo entre dos miembros, ejemplos de estos son un par de engranes o una leva - seguidor como se muestran en la figura 9.

- Por medio de un eslabón, conocido como biela, encargada de transmitir el movimiento del eslabón de entrada al de salida.
- Por conector flexible tal como una banda, una correa o cadena.

2.4.1.13. Diagrama Cinemático

El diagrama cinemático es un representación esquemática de dos dimensiones que pretende simplificar la representación de un mecanismo y facilitar su entendimiento, a continuación se muestra las representaciones ejemplificadas.

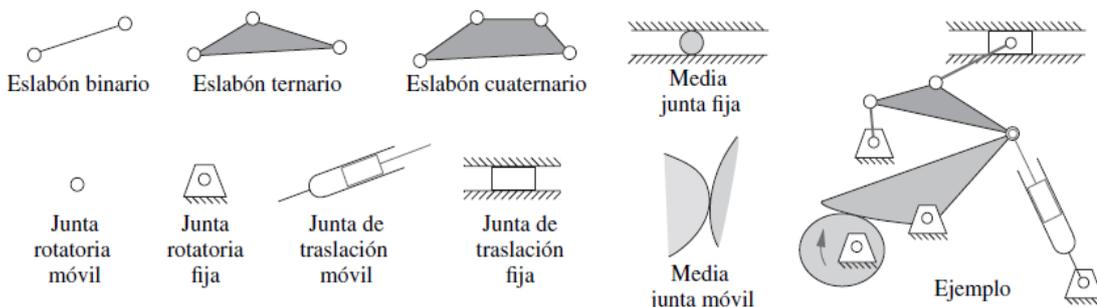


Figura 11. Notación esquemática para diagramas cinemáticos

Fuente: (Norton, 2009)

2.4.1.14. Actuadores e impulsores

Para la puesta en marcha de un mecanismo, se requiere un dispositivo a la entrada que proporcione y distribuya el movimiento y la energía.

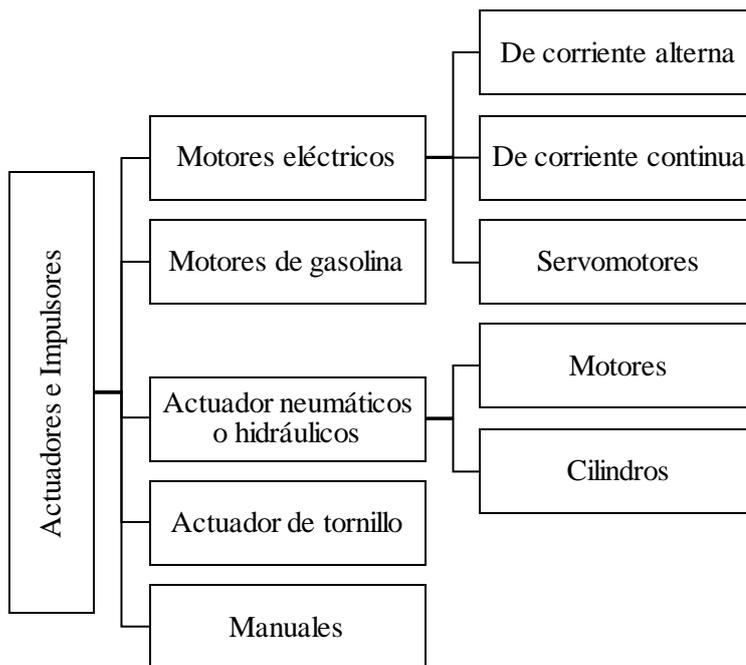


Figura 12. División de actuadores e impulsores

Se utilizan diferentes actuadores tanto industriales como comerciales, en la figura 12 se presenta un cuadro de actuadores e impulsores más comunes en el mercado. La elección de un actuador dependerá de la aplicación a la que se requiera, así como las ventajas y desventajas que proporcione cada uno de ellos.

2.4.2. Movilidad en los mecanismos

Para el cálculo de la movilidad de un mecanismo se utiliza la ecuación modificada de Kutzbach-Gruebler la cual nos permite encontrar los grados de libertad del mecanismo y es la siguiente:

$$M = 3(L - 1) - 2J_1 - J_2 \quad (1)$$

Donde:

M = grado de libertad o movilidad.

L = número de eslabones.

J_1 = número de juntas de 1 GDL (completas).

J_2 = número de juntas de 2 GDL (semijuntas).

2.4.2.1. Mecanismos de eslabones articulados

2.4.2.2. Mecanismo de cuatro barras

La cadena cinemática más sencilla es el eslabonamiento de cuatro barras y una de las más comunes. Es una combinación de cuatro barras uno designado como bancada o bastidor y conectado por cuatro uniones de pernos.

2.4.2.3. Ley de Grashof

Una de las consideraciones que tienen trascendencia en los mecanismos de cuatro barras es la Ley de Grashof, y está permite asegurarse que la manivela o eslabón de entrada pueda realizar una revolución completa, ya que los mecanismos en los que ningún eslabón gira 360° no resultan útiles para estas aplicaciones.

Con esa consideración la siguiente nomenclatura se utiliza para describir la longitud de cada uno de los cuatro eslabones (Myszka, 2012).

s = longitud del eslabón más corto

l = longitud del eslabón más largo

p = longitud de uno de los eslabones de longitud intermedia

q = longitud del otro eslabón de longitud intermedia

El teorema de Grashof establece que siempre habrá un eslabón giratorio en un mecanismo de cuatro barras si se cumple la siguiente desigualdad:

$$s + l \leq p + q \quad (2)$$

A la inversa los tres eslabones que no están fijos solamente oscilarán si:

$$s + l > p + q \quad (3)$$

Estos mecanismos caen en una de las cinco categorías mostradas en la tabla 5 para mecanismos de cuatro barras

Tabla 5

Categorías de los mecanismos de cuatro barras

Caso	Criterios	Eslabón más corto	Categoría
1	$s + l < p + q$	Triple balancín	Doble manivela
2	$s + l < p + q$	Lado	Manivela-balancín
3	$s + l < p + q$	Acoplador	Doble balancín
4	$s + l = p + q$	Cualquiera	Punto de cambio
5	$s + l > p + q$	Cualquiera	Triple balancín

Fuente: (Myszka, 2012)

A continuación se presenta una breve descripción de los mecanismos de cuatro barras que se exponen en la tabla 6.

Tabla 6

Descripción de los mecanismos de cuatro barras

Mecanismo	Descripción
Doble manivela	Se tiene el eslabón más corto del mecanismo de cuatro barras configurado como la bancada. Si uno de los eslabones que actúa como pivote gira de manera continua, el otro eslabón pivote también girará continuamente como muestra la figura 13, de modo que los eslabones pivote 2 y 4, pueden girar completamente. A este mecanismo también se lo conoce como mecanismo de eslabón de arrastre.
Manivela-balancín	Se tiene el eslabón más corto del mecanismo de cuatro barras contiguo al eslabón de tierra. Si este eslabón corto gira de manera continua, el eslabón de salida generará un arco estableciendo una trayectoria comprendida entre límites dados por el diseñador como muestra la figura 13. A este eslabón más corto se lo conoce también con el nombre de manivela, y al eslabón de salida se lo conoce también como balancín. Conforme el actuador hace girar de manera completa y continua al eslabón de entrada o manivela el eslabón de salida oscilará entre los límites designados es decir se balancea y por ello el nombre de balancín. Un claro ejemplo de este mecanismo es el limpia parabrisas del vehículo.

CONTINÚA 

Doble balancín	El eslabón más corto del mecanismo, se encuentra ubicado en el lado opuesto al escogido como bancada, en dicha configuración, ninguno de los eslabones conectados a un punto del eslabón de tierra podrá girar completamente es decir también oscilará. Razón por la cual, tanto el eslabón de entrada como el de salida están restringidos a describir una trayectoria oscilatoria entre ciertos límites establecidos como muestra la figura 13, no obstante, el eslabón que acopla al mecanismo, es decir el más corto, si girará completamente.
Mecanismo de punto de cambio	En este caso se consigue que el mecanismo de punto de cambio se posicione de tal manera que, todos los eslabones se vuelvan colineales como muestra la figura 13. Uno de los mecanismos más comunes es el eslabonamiento que forma un paralelogramo, donde la bancada y el acoplador encargado de transmitir el movimiento tienen la misma longitud, y el eslabón de entrada y salida por ende también tienen la misma longitud. Por ende los cuatro eslabones se recubrirán entre sí.
Triple balancín	Para conseguir esta configuración cualquiera de los eslabones puede ser el más corto, y en este mecanismo ninguno de los eslabones logra completar una revolución completa como muestra la figura 13, es decir todos los eslabones se balancean exceptuando la bancada.

Fuente: (Myszka, 2012)

La figura 13 ilustra los cinco casos particulares de un mecanismo de cuatro barras.

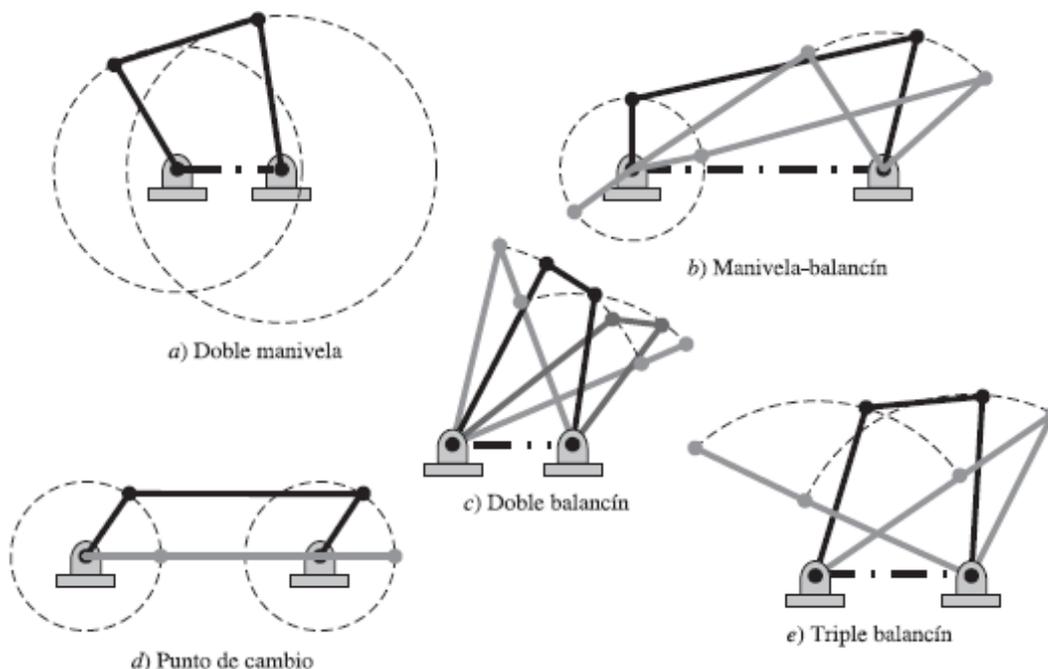


Figura 13. Categoría de mecanismos de cuatro barras

Fuente: (Myszka, 2012)

2.4.2.4. Mecanismos Especiales

Existen otro tipo de mecanismos que son útiles para otras aplicaciones industriales entre los cuales se exponen en la tabla 7.

Tabla 7

Descripción de los mecanismos Especiales

Mecanismo	Descripción
Mecanismo de Manivela – Corredera	Mecanismo de 4 barras, el más común. Está conectado por tres uniones de perno y una unión de corredera, donde el grado de libertad es de uno. El eslabón que hace pivote, conectado a la bancada, el eslabón de salida y el de acople se los conoce como manivela, corredera y biela respectivamente. Claros ejemplos de estos mecanismos son los pistones de un automóvil o un mecanismo de bombeo de agua.
Mecanismos de línea recta	Consigue tener una trayectoria en línea recta o aproximada a ella sin estar guiado por una superficie plana como es el caso de la manivela – corredera.
Mecanismo de paralelogramo	Constituido por eslabones, los mismos que forman paralelogramos. Estos mecanismos generan movimiento paralelo para aplicaciones como las persianas para ventanas, una plataforma elevadora entre otras como ilustra la figura 14.
Mecanismo de Retorno Rápido	En muchas de las aplicaciones industriales se realizan operaciones repetitivas tales como, jalar o empujar objetos a lo largo de una banda o línea de montaje, En estas aplicaciones el mecanismo se somete a una carga, llamada carrera de avance y otra de retorno en donde, en el avance se realiza un trabajo y en el retorno simplemente el mecanismo regresa a un posición inicial para nuevamente volver a repetir el ciclo, para ello resulta conveniente tener un retorno rápido para que el proceso sea más eficiente.
Mecanismo de yugo escocés	El mecanismo de yugo escocés es un mecanismo que convierte el movimiento rotacional en lineal por medio de un perno excéntrico de un eslabón giratorio que se inserta en la ranura de un yugo corredizo. Este mecanismo genera un movimiento similar a una corredera, pero frente al mecanismo de manivela – corredera presenta la ventaja de menor tamaño pero la desventaja de desgaste de las piezas. En la figura 15 se presenta un ejemplo del mecanismo presentado.

El problema inicial en el diseño de un sistema mecánico es por consiguiente, la comprensión de su cinemática.

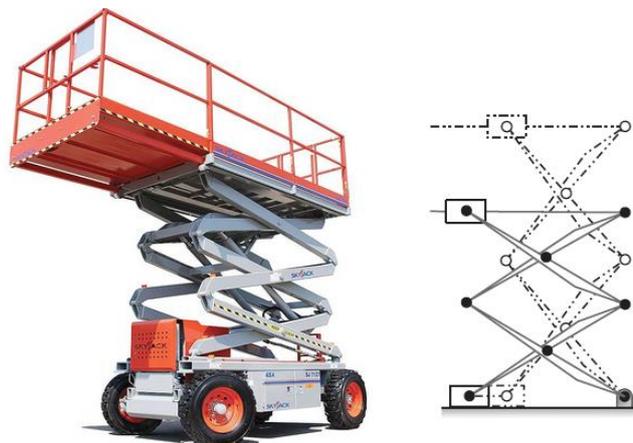


Figura 14. Mecanismos de paralelogramo

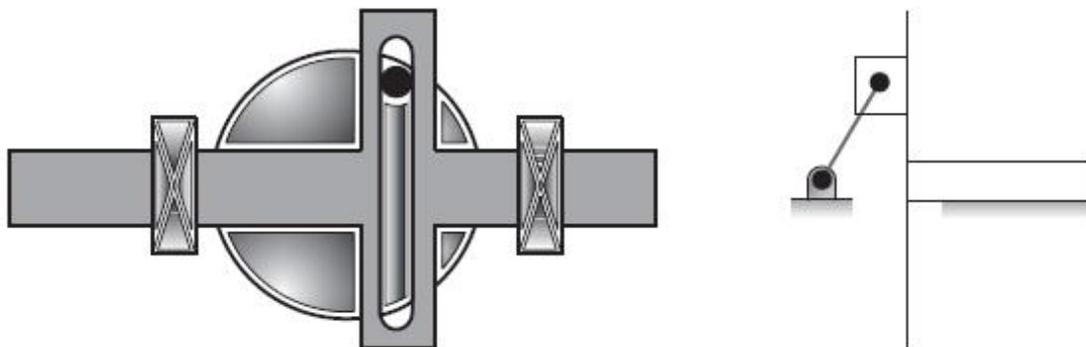


Figura 15. Mecanismos de yugo escocés

Fuente: (Myszka, 2012)

2.5. Materiales para la fabricación

2.5.1. Acero inoxidable

En la naturaleza la mayoría de metales se oxidan, la plata, el aluminio y el cobre son claros ejemplos de esta reacción química, ya sea en metales como en no metales. En el caso del acero, el hierro presente se combina con el oxígeno del aire y forman óxidos de hierro los cuales tienen sus ventajas y desventajas, una de las principales ventajas es que esta formación de óxidos son usadas en la industria en la formación de cerámicas o como pigmentos para distintos materiales como los vidrios, ya que proveen de color al ser calentados a altas temperaturas.

No obstante para otras aplicaciones el tener una oxidación en el material es perjudicial, pues dependiendo de sus usos se puede contaminar el proceso, también causa ruptura de piezas debido a que deteriora al material y por ende sus propiedades.

“El acero inoxidable es una aleación de hierro y carbono que contiene por definición un mínimo de 10,5% de cromo. Algunos tipos de acero inoxidable contienen además otros elementos aleantes” (Medina, 1999).

Cobb (2010) experto de *American Society for Testing and Materials* (ASTM) considera que “el uso del acero inoxidable es parte vital para la industria y surge de los diferentes compuestos que realizaban los metalurgistas en el siglo XX”

Para Nuñez & Huerta (2012), Su principal característica es su alta resistencia a la corrosión. Esta resistencia es debido a la formación espontánea de una capa de óxido de cromo, esta película invisible está firmemente adherida al metal y es extremadamente protectora en una amplia gama de medios corrosivos. Dicha película es rápidamente restaurada en presencia del oxígeno, y así daños por abrasión, corte o mecanizados son reparados rápidamente.



Figura 16. Película de óxido de cromo

Fuente: (Ingfilter, 2014)

Para aumentar la resistencia a la corrosión el cromo puede aumentarse y pueden añadirse otros elementos tales como níquel o molibdeno.

La tabla 8 ilustra de mejor manera una serie de características y propiedades del acero inoxidable.

Entre los principales elementos químicos con los cuales se realizan aleaciones para el acero inoxidable se tiene el cromo, níquel y molibdeno. Cada elemento provee distintas características y ventajas al acero dependiendo la composición del acero y los elementos inmersos en esta composición como muestra la tabla 9.

Tabla 8***Ventajas del Acero Inoxidable***

VENTAJAS	
Facilidad de fabricación	La mayoría pueden ser cortados, soldados, doblados, mecanizados, etc. Con resultados satisfactorios
Resistente a la alta y baja temperatura	Algunos aceros resisten grandes variaciones térmicas y mantienen alta resistencia a temperaturas muy altas, otros demuestran dureza excepcional a temperaturas criogénicas
Resistencia Mecánica	La característica de endurecimiento por trabajo en frío de algunos aceros inoxidable se usan en el diseño para reducir espesores y con ello los costos. Otros pueden ser tratados térmicamente para hacer componentes de alta resistencia
Resistente a la Corrosión	Los aceros de baja aleación resisten la corrosión en condiciones atmosféricas, los aceros inoxidable altamente aleados pueden resistir la corrosión en la mayoría de los medios ácidos, incluso a elevadas temperaturas.
Estética	Disponibles en muchas terminaciones superficiales, de alta calidad.
Propiedades Higiénicas	La facilidad de limpieza lo hace la primera opción en Hospitales, cocinas e instalaciones alimenticias y farmacéuticas entre otras.
Ciclo de trabajo	Es durable, y es la opción más barata considerando el ciclo vital

La tabla expresa las propiedades mecánicas y físicas del acero inoxidable de manera general

Tabla 9***Características que proveen los elementos químicos al acero inoxidable***

Elemento	Forma:	Características
Cromo (Cr)	Ferrita y Carburo	Principal responsable de la resistencia a la corrosión
		No presenta aporte significativo en la resistencia a altas temperaturas
Níquel (Ni)	Austenita	Mejora la resistencia general a la corrosión en líquidos no oxidantes, mejora la tenacidad y la ductilidad
		Se añade a los grados con cromo para mejorar las propiedades mecánicas
		Aumenta la resistencia eléctrica, la fatiga y la soldabilidad
		Reduce la conductividad de calor

CONTINÚA 

Molibdeno (Mb)	Ferrita carburo	y	Mejora la resistencia a temperaturas elevadas. Mejora la resistencia general a la corrosión en medios no oxidante, y la resistencia a la corrosión por picadura en todos los medios
----------------	-----------------	---	--

2.5.2. Metalurgia de materiales criogénicos.

Una de las propiedades más críticas de los metales y más específicamente de los aceros inmersos en aplicaciones criogénicas es la tenacidad.

Según Groover (1997). La tenacidad “es la energía total que absorbe un material antes de alcanzar la rotura en condiciones de impacto”.

Cuando son expuestos a bajas temperaturas los materiales ferríticos exhiben un cambio en sus propiedades mecánicas y por ende en su comportamiento, esto se ve manifestado por una reducción en la tenacidad del material, caracterizada por una transición en el comportamiento de dúctil a frágil como muestra la figura 17.

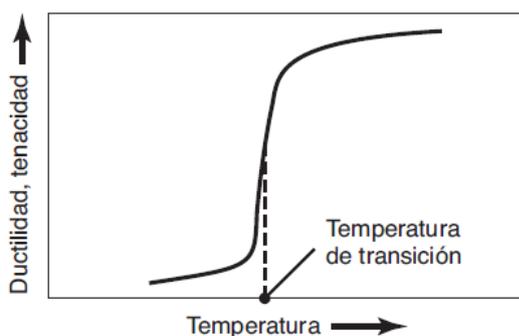


Figura 17. Temperatura de transición en metales

Fuente: (Kalpakjian, 2008)

El contenido de carbono afecta a la tenacidad y por ende a la energía de impacto; es una relación inversamente proporcional, a medida que el contenido de carbono aumenta la tenacidad disminuye.

“Para tener una mejora en la tenacidad del acero a bajas temperaturas se requiere una adición de níquel reduciendo la temperatura de transición pero solo con adiciones superiores del 13% en peso desapareciendo la temperatura de transición dúctil-frágil” (Bayo, 2009).

Por debajo de -196°C la selección cambia a aceros inoxidable austeníticos y a aluminio. Además de las propiedades de la resistencia del metal a tracción, tenacidad, hay que considerar propiedades de fluencia y esfuerzo máximo, como se aprecia en la figura 18. Los aceros ferríticos en este caso, se ha visto que ofrecen mejores características.

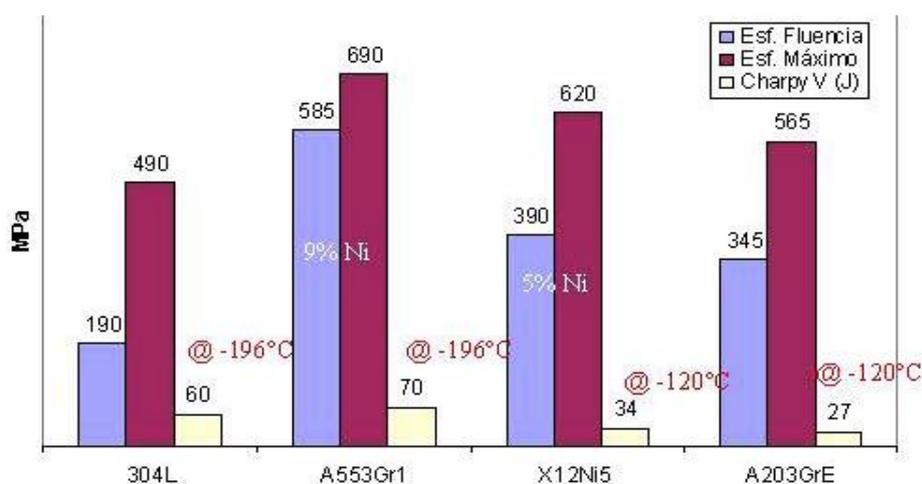


Figura 18. Propiedades mecánicas de aceros criogénicos

Fuente: (Bayo, 2009)

Para la fabricación de estas aleaciones, y asegurar el mejor equilibrio entre resistencia, tenacidad, soldabilidad, especialmente, resistencia a la fisuración en condiciones extremas se establecen normas y porcentajes de material, así como temperaturas de trabajo. (Ver figura A-1 del apéndice).

Con los criterios mostrados en las tablas A-1 y A-2 del apéndice se puede elegir el material apropiado para la aplicación y profundizar en las propiedades mecánicas del mismo a fin de tener un apropiado dimensionamiento.

2.6. Fatiga

Es evidente que no se puede generalizar la característica de los elementos de máquinas y su entorno con una probeta de ensayo. Las piezas no presentan una superficie pulida a espejo, ya que es un procedimiento costoso y además suelen tener mayores rugosidades, a su vez la temperatura de operación pueden ser o muy bajas o muy altas, los mismos que fragilizarían o reducirían la resistencia a la fluencia respectivamente. Por otro lado los elementos pueden tener concentradores de esfuerzos o pueden estar en presencia de agentes corrosivos. Para abarcar todos estos problemas, existen factores que modifican la resistencia a la fatiga (Shigley, Budynas, & Nibett, 2010).

2.6.1. Ecuación de Marín

Marín identificó factores que cuantifican los efectos de la condición superficial, el tamaño, la temperatura, entre otros, para realizar un ajuste al límite de la resistencia a

la fatiga S_e respecto al límite de resistencia a la fatiga en vigas rotatorias S'_e e introdujo factores formulando así la siguiente ecuación:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e \quad (4)$$

2.6.2. Factor de superficie k_a

Intrínsecamente relacionada con la calidad del acabado de la superficie y de la resistencia a la tensión, en general las máquinas proveen acabados que este factor cuantifica, acabados comunes como esmerilado, maquinado o estirado en frío, laminado en caliente y forjado. La fórmula que representa esta relación es:

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (5)$$

Donde S_{ut} es la resistencia mínima a la tensión y los valores de a y b se encuentran en tablas, un extracto de ellas se muestra en la tabla 10.

Tabla 10

Factor de superficie

Acabado superficial	Factor a S_{ut} [MPa]	Exponente b
Esmerilado	1,58	-0,085
Maquinado o laminado en frío	4,51	-0,265
Laminado en caliente	57,7	-0,718
Como sale de la forja	272	-0,995

Fuente: (Shigley, 2010)

2.6.3. Factor de tamaño k_b

Al ser evaluado en ensayos se puede obtener este factor para flexión y torsión mediante el uso de las siguientes expresiones:

$$k_b = \begin{cases} \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.107} = 1.24 d^{-0.107} & 2.79 < d \leq 51 \text{ mm} \\ 1.51 d^{-0.157} & 51 < d \leq 254 \text{ mm} \end{cases} \quad (6)$$

El factor de tamaño no tiene efecto en carga axial por lo que en este caso $k_b = 1$.

2.6.4. Factor de carga k_c

La límites de resistencia a la fatiga difieren con el S_{ut} cuando en un ensayo de fatiga existe carga axial o torsión como lo indica la siguiente ecuación.

$$k_c = \begin{cases} 1 & \text{flexión} \\ 0.85 & \text{axial} \\ 0.59 & \text{torsión} \end{cases} \quad (7)$$

2.6.5. Factor de temperatura k_d

La resistencia a la fluencia disminuye debido a la temperatura elevada a la que opera un material y además cualquier esfuerzo inducirá flujo plástico al opera a esa temperatura, el valor a k_d se encuentra en la tabla 11.

Tabla 11

Factor de temperatura

Temperatura, °C	k_d
20	1,000
50	1,010
100	1,020
150	1,025
200	1,020

Fuente: (Shigley, 2010)

2.6.6. Factor de confiabilidad k_e

Correspondiente a ciertas desviaciones estándar porcentuales del límite de resistencia a la fatiga. Mientras mayor sea la confiabilidad dicho factor disminuirá, si se requiere de una confiabilidad del 99.99 % este factor será del 0.702, por el contrario si requiere una confiabilidad del 90 % corresponderá un factor de 0.897.

Tabla 12

Factor de confiabilidad

Confiabilidad %	Factor de confiabilidad k_e
50	1,000
90	0,897
95	0,868
99	0,814
99,9	0,753
99,99	0,702
99,999	0,659

Fuente: (Shigley, 2010)

2.6.7. Factor de efectos varios k_f

Su finalidad es considerar la reducción del límite de resistencia a la fatiga debido a otros efectos, los aspectos más relevantes considerados son la corrosión, recubrimiento electrolítico, frecuencia cíclicas y algunos más.

2.7. Esfuerzos fluctuantes

“A menudo, los esfuerzos fluctuante sobre maquinaria adoptan la forma de un patrón sinusoidal debido a la naturaleza de algunas máquinas rotatorias” (Shigley, Budynas, & Nibett, 2010), pero también ocurren otros tipos de patrones periódicos. Si son irregulares la forma de la onda no resulta importante pero los picos máximos y mínimos son importantes. Si la fuerza mayor es $F_{m\acute{a}x}$ y la fuerza menor es $F_{m\acute{i}n}$, se construye una componente uniforme y una alternante como indica la ecuación (8).

$$F_m = \frac{F_{m\acute{a}x} + F_{m\acute{i}n}}{2} \quad F_a = \left| \frac{F_{m\acute{a}x} - F_{m\acute{i}n}}{2} \right| \quad (8)$$

Donde F_m es la componente de intervalo medio de la fuerza y F_a corresponde a la amplitud de la fuerza.

2.8. Lógica difusa

En 1965, Lotfi Zadeh introdujo los conjuntos difusos o borrosos para procesar o manipular información y datos afectados de incertidumbre o imprecisión no probabilística. “La lógica difusa hace uso de diversas variables lingüísticas que son elegidas con relación al sistema con que interactúa, en su mayoría estas variables son palabras que representan valores cualitativos” (García, Medel, & Sánchez, 2009). El concepto de lógica difusa está asociado a la manera en que se percibe el medio en el cual se formulan afirmaciones de manera ambigua y las respuestas pueden variar según quien aprecia el efecto físico acorde a su intuición, comportamiento o experiencia. Los conjuntos difusos definen justamente estas ambigüedades.

Son una extensión de los clásicos, donde se añade una función de pertenencia, definida como un número real entre 0 y 1. Así se introduce el concepto de conjunto o subconjunto borroso y se lo asocia a un determinado valor lingüístico, definido por una palabra o etiqueta lingüística, donde ésta es el nombre del conjunto o subconjunto. Por cada conjunto se define una función de pertenencia o membresía denominada $\mu_A(x)$, indica el grado en que la variable x está incluida en el concepto representado por la etiqueta A ($0 \leq \mu_A(x) \leq 1$), si esta función toma el valor cero expresa que tal valor de x no está contenido en A y si toma el valor de uno el valor de x está contenido en A . Se representa matemáticamente como indica la función a continuación.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad (9)$$

2.8.1. Funciones de membresía

Las funciones de membresía representan el grado de pertenencia de un elemento a un subconjunto definido por una etiqueta. Las formas para las funciones de membresía pueden ser de tipo trapezoidal, triangular, singleton o polinómica.

2.8.2. Fusificación

“Es el proceso de crear una cantidad difusa” (Mitra, 2003). Es necesariamente la entrada al sistema de inferencia difusa. Se define como el procedimiento matemático en el que se transforma una variable numérica a una lingüística, en este caso una función de membresía debido a que se utiliza variables lingüísticas en lugar de variables numéricas. La figura 19 muestra la función de membresía de una lectura de voltaje que representa un rango de errores típicos, es decir, una lectura ambigua.

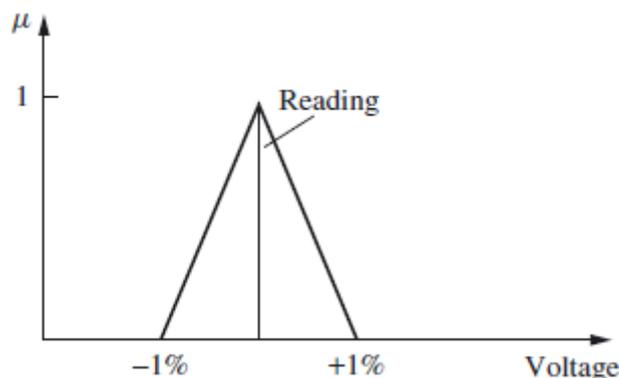


Figura 19. Función de membresía

Fuente: (Ross, 2010)

2.8.3. Defusificación

Al contrario de la fusificación este es un proceso matemático usado para transformar de un infinito número de valores a un intervalo entre $[0,1]$ dicho de otra manera un conjunto difuso en un número real. El sistema de inferencia difusa obtiene una conclusión a partir de la información de la entrada en términos difusos, esta información debe ser un número real, existen diferentes métodos de defusificación, uno de ellos y es el de centroide también llamado centro de gravedad o centro de área. Permitiendo así, transformar la salida difusa en un número z^* , el cual estará en la coordenada de las abscisas z . La figura 20 muestra un ejemplo del método de defusificación.

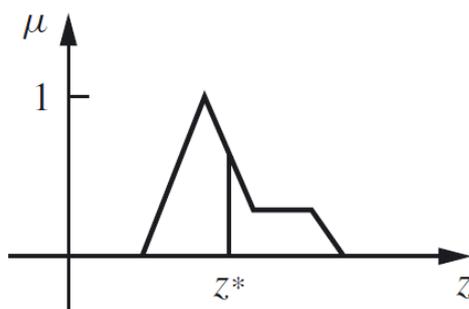


Figura 20. Método de defusificación

Fuente: (Ross, 2010)

2.8.4. Controlador difuso

La principal aplicación de la lógica difusa es el diseño de control y se enuncia que “a partir de ciertas entradas en un sistema se deberán generar salidas, para poder actuar sobre determinados mecanismos” (García, Medel, & Sánchez, 2009).

El controlador de lógica difusa utiliza leyes de control consistentes en reglas lógicas es decir expresiones condicionales “si-entonces” bajo una premisa existirá una consecuencia, las misma que estará en conjunto con funciones de pertenencias difusas para controlar un proceso y minimizar el error.

Una regla si-entonces es una declaración en la cual algunas palabras son caracterizadas por funciones de pertenencia continuas.

El controlador difuso es un sistema experto que toma decisiones y opera en un sistema de lazo cerrado, compara la entrada de referencia o deseada con la salida del sistema y entonces decide cual es la entrada a la planta y asegura la realización de los objetivos.

2.9. Equipos de trituración

Existen varios equipos que permiten la reducción del tamaño de un determinado material para diferentes aplicaciones, ya sea a nivel industrial o para laboratorio.

Coulson, Richardson, Backhurst, & Harker (2003) clasifican los trituradores en 3 subgrupos de acuerdo al tamaño el cual un material será reducido, esto se resume en la tabla 13.

De todos los tipos mencionados, se definirán aquellos relevantes que permitirán la extracción del material genético vegetal.

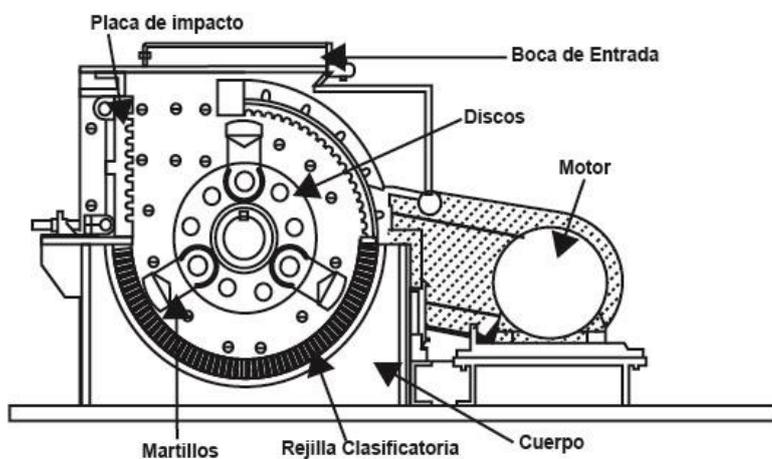
Tabla 13**Equipo de Trituración**

Trituradores primarios	Trituradores intermedios	Trituradores finos
Quebrantador de mandíbulas Blake	Triturador de rodillos	Molino de Buhrstone
	Triturador de disco	Molino de rodillos
Quebrantador de mandíbula Dodge	Molino de muelas verticales	Molino Raymond
	Triturador cónico	Molino Griffin
Triturador giratorio	Batería de bocartes	Molino de bolas centrífugo
	Molino de martillos	Molino de anillo y rodillos
	Triturador de un solo rodillo	Molino de bolas
	Molinos de agujas	Molino tubular
	Molinos de mortero	Molino vibratorio
	Triturador de jaula de ardilla	Molino Lopulco

Fuente: (Coulson, Richardson, Backhurst, & Harker, 2003)

2.9.1. Molino de martillos

Coulson, Richardson, Backhurst, & Harker (2003) indican que este tipo de molino utiliza un disco giratorio de alta velocidad, al que previamente se fija un cierto número de martillos o barras los mismos que son dirigidos hacia afuera por la fuerza centrífuga. Por lo tanto, el material es lanzado debido a esta fuerza y se tritura al ser golpeado por los martillos o al impactarse contra las placas fijas alrededor de la periferia de la carcasa.

**Figura 21. Molino de martillos**

Fuente: (Coulson, Richardson, Backhurst, & Harker, 2003)

2.9.2. Molino de bolas

La molienda se efectúa en molinos que giran alrededor de su eje horizontal y que contiene una o varias bolas, cuyo fin es moverse libremente a medida que rota el molino. Las bolas ocupan entre 30 y 50 % del volumen del molino, las cuales son de diferentes tamaños, permitiendo que las grandes traten eficazmente la alimentación mientras las pequeñas proporcionan un producto fino.

Algunos factores que influyen en el tamaño del producto son la velocidad y propiedad de la alimentación, el peso de las bolas, entre otros.

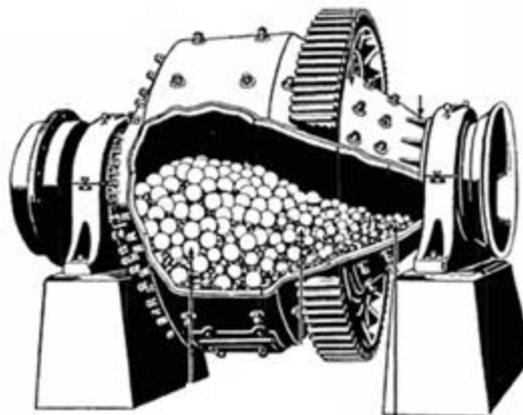


Figura 22. Molino de bolas cónico con bolas de trituración

Fuente: (Coulson, Richardson, Backhurst, & Harker, 2003)

2.9.3. Triturador de un solo rodillo

Coulson, Richardson, Backhurst, & Harker (2003) en su obra comentan que este tipo de trituradores consisten en un rodillo provisto de dientes que giran muy cerca de una placa fija. La acción de compresión y cizalla entre las dos superficies produce el efecto de la trituración.

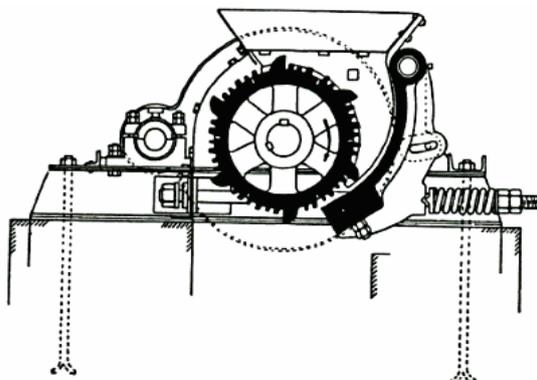


Figura 23. Triturador de un solo rodillo

Fuente: (Coulson, Richardson, Backhurst, & Harker, 2003)

2.9.4. Molino de mortero

Este tipo de molino trabaja bajo el mismo principio de un mortero y mazo tradicional, pero en este caso es un mortero giratorio.

La molturación se realiza mediante la presión y fricción contra una pieza cilíndrica montada sobre un eje vertical, para que trabaje correctamente se debe separar el material continuamente de los lados del mortero mediante una rasqueta.



Figura 24. Molino de mortero

Fuente: (Retsch RM200, 2015)

2.9.5. Molino de vibración

La principal característica es la velocidad a la que trabaja, la frecuencia de oscilación suele estar comprendidas entre 6 y 60 Hz.

Coulson, Richardson, Backhurst, & Harker (2003) recomiendan que se debe utilizar la rotación simultánea sobre un eje vertical y otro horizontal para una mejor molturación, pero esto es útil en equipos pequeños.



Figura 25. Molino vibratorio

Fuente: (Retsch MM200, 2015)

CAPÍTULO III

DISEÑO DEL TRITURADOR HOMOGENEIZADOR

En el presente capítulo se plantean una serie de alternativas que mediante una matriz de selección se escoge la mejor opción entorno a la cual se diseñarán, dimensionarán y elegirán los componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que cumplan con los requerimientos establecidos para el óptimo desempeño del equipo, haciendo uso de herramientas y software para el diseño, modelos matemáticos y fundamentos teóricos.

3.1. Requerimientos

La elaboración del equipo, está influenciado por diversas consideraciones y restricciones, las mismas que son relevantes al momento del diseño, las cuales son:

- Un recipiente de molienda (cápsula) cuyo volumen sea de 50 *ml* aproximadamente, capacidad solicitada por el laboratorio de Biotecnología Vegetal, este volumen permite obtener una cantidad de muestra necesaria para el posterior análisis molecular.
- El equipo debe permitir la trituración y homogenización de distintos tipos de materiales, como pueden ser: materiales blandos, fibrosos, duros y frágiles, en estado seco o húmedo.
- Una cápsula que contenga el material vegetal, de fácil ingreso y extracción, además debe garantizar la recuperación total de la muestra evitando su degradación u oxidación.
- El material de la cápsula estará revestido de acero inoxidable, mismo que es capaz de resistir la temperatura de $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$, a la cual el nitrógeno líquido se encuentra en su temperatura de ebullición, siendo necesaria para producir una congelación rápida, y evitando así el daño de la muestra.
- El equipo debe poseer una interfaz sencilla, clara e intuitiva, la cual permitirá una rápida familiarización en su uso, inclusive sin capacitación previa del funcionamiento del mismo.
- Seguridad al momento de la ejecución del proceso de molienda, impidiendo así que las personas sean afectadas por impactos con elementos del equipo.

Tabla 14

Matriz de selección para molinos de trituración

Criterio	Peso	De martillo	De mortero	De bolas	De un solo rodillo	Vibratorio
Costo	25%	4	9	6	4	8
Tiempo de trituración	20%	7	7	6	5	10
Granulometría de la muestra	15%	7	7	8	10	9
Nivel de Ruido	5%	5	8	4	8	6
Tamaño	10%	4	8	5	7	7
Construcción	20%	6	9	9	7	9
Capacidad volumétrica	5%	10	6	10	7	7
Total	100%	5,8	8	6,9	6,35	8,5

El molino que cumple con las características requeridas es el de tipo vibratorio.

3.2. Diseño mecánico

3.2.1. Ángulo de oscilación

El objetivo de un molino vibratorio es la reducción del tamaño de grano, obteniendo así partículas muy finas de orden micrométrico, por lo cual, unas esferas deben impactar la muestra dentro de una cápsula totalmente sellada. Es importante garantizar que la o las esferas colisionen contra las paredes de la cápsula y a su vez crear una trayectoria y longitud adecuada, que junto a una aceleración y masa de dicha esfera, generen una fuerza capaz de triturar la muestra, por lo que, considerando la longitud de la cuerda s , el radio R que representa el elemento que sostendrá y proveerá el movimiento a la cápsula, se procede a obtener un ángulo de oscilación ϕ .

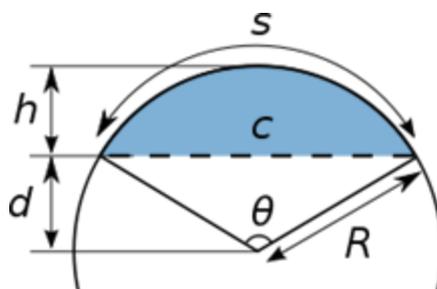


Figura 26. Ángulo de oscilación

$$\frac{c/2}{R} = \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (10)$$

$$\phi = 2 \sin^{-1}\left(\frac{c}{2R}\right) \quad (11)$$

Como se observará en la tabla 15, el ángulo de oscilación es influenciado directamente por el radio R , ya que en este caso la longitud interna de la cápsula c está determinada.

Tabla 15

Ángulos de oscilación

Longitud cápsula (c) [mm]	Radio de oscilación (R) [mm]	Longitud de cuerda (s) [mm]	Ángulo ϕ [grados]
90	275	100,56	20,95
90	250	90,49	20,74
90	225	90,61	23,07
90	200	90,78	26,01
90	175	91,02	29,80
90	150	91,41	34,92
90	125	92,07	42,20

Cabe recalcar que no se puede usar un ángulo muy amplio debido a que a mayor ángulo, mayor momento angular y la máquina produciría un excesivo desbalance, generado vibración, por lo que se opta tomar un ángulo de oscilación de $\phi = 25^\circ$.

3.2.2. Diseño geométrico del mecanismo de cuatro barras

El eslabonamiento de la figura 27 pertenece a una variedad de mecanismo manivela-balancín, en el cual el eslabón AB sea impulsor (manivela) y el CD impulsado (balancín), el eslabón BC se lo conoce como acoplador y el AD es el de referencia (bastidor). El balancín del mecanismo de la figura 27, debe oscilar un ángulo $\phi = 25^\circ$. La dimensión del balancín se la fija en función del espacio. Brodell y Soni (1970 citado por Shigley y Vicker, 1983) han desarrollado un método analítico para sintetizar el eslabonamiento de manivela y oscilador en la que la razón de tiempo sea $Q = 1$, es decir, que el tiempo de avance y de retorno del mecanismo sea similar.

En el eslabonamiento de cuatro barras es importante considerar el ángulo γ entre el acoplador y el balancín, Shigley y Vicker en 1983 aseguran que, conforme éste disminuye, la razón del momento de torsión de salida por el balancín, al momento de torsión de entrada que necesita la manivela (ventaja mecánica) se reduce e incluso causará que el mecanismo se cierre o detenga. Según el movimiento de la manivela, el ángulo γ puede ser mínimo o bien máximo.

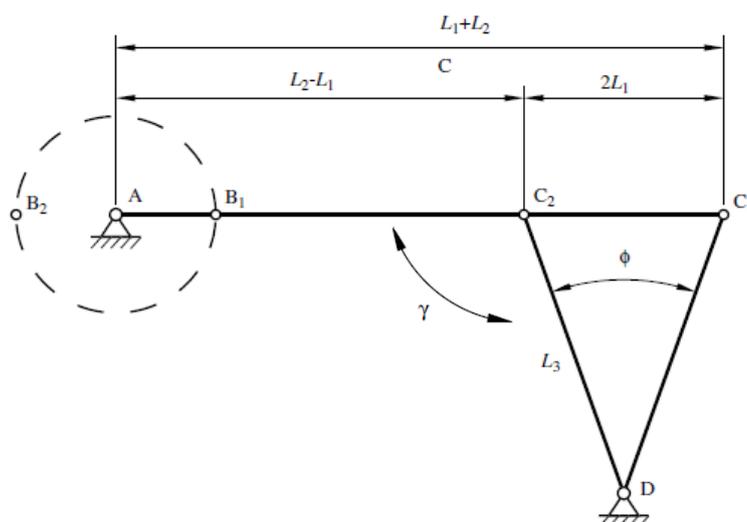


Figura 27. Mecanismo manivela balancín

Fuente: (Meja, 2014)

Con la condición de ángulo de transmisión óptimo, se tendría las siguientes relaciones:

$$\frac{L_2}{L_4} = \sqrt{\frac{1 - \cos \phi}{2 \cos^2 \gamma_{\min}}} \quad (12)$$

$$\frac{L_3}{L_4} = \sqrt{\frac{1 - (L_2/L_4)^2}{1 - (L_2/L_4)^2 \cdot \cos^2 \gamma_{\min}}} \quad (13)$$

$$\frac{L_1}{L_4} = \sqrt{\left(\frac{L_2}{L_4}\right)^2 + \left(\frac{L_3}{L_4}\right)^2} - 1 \quad (14)$$

Brodell y Soni sugieren usar un ángulo de transmisión $\gamma_{\min} = 30^\circ$ para lograr un movimiento de buena calidad e inclusive mayor cuando se maneja con velocidades elevadas.

Seleccionando como referencia $\gamma_{\min} = 50^\circ$ y $\phi = 25^\circ$, aplicando las ecuaciones (12), (13) y (14), se obtiene las siguientes relaciones para la longitud en los eslabones.

$$\frac{L_2}{L_4} = 0.337$$

$$\frac{L_3}{L_4} = 0.964$$

$$\frac{L_1}{L_4} = 0.209$$

Si se define $L_4 = 170.0 \text{ mm}$ las otras longitudes de los eslabones del mecanismo serán:

$$L_1 = 35.5 \text{ mm}$$

$$L_2 = 57.2 \text{ mm}$$

$$L_3 = 164.0 \text{ mm}$$

3.2.3. Movilidad en el mecanismo

Al utilizar la ecuación (1), de la fundamentación teórica, la movilidad resultante del mecanismo será:

$$M = 3(L - 1) - 2J_1 - J_2$$

$$M = 3(4 - 1) - 2 \cdot 4 - 0 = 1$$

El mecanismo consta de 1 grado de libertad, en consecuencia, tendrá sólo un movimiento independiente que defina el estado cinemático.

3.2.4. Ley de Grashof

Como se utilizará un motor para generar el movimiento a la manivela, se debe asegurar que dicho eslabón realice una revolución completa, mediante la aplicación de la ley de Grashof utilizando la ecuación (2) descrita en el capítulo 2.

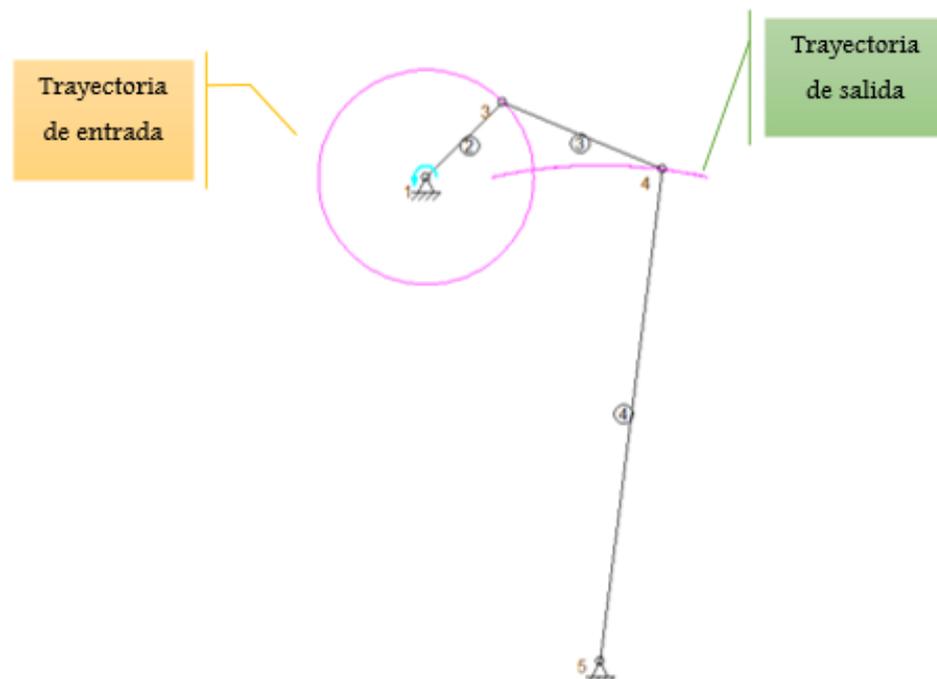


Figura 28. Simulación de mecanismo manivela - balancín

$$s + l \leq p + q$$

$$L_1 + L_4 \leq L_2 + L_3$$

$$0.209 \cdot L_4 + L_4 \leq 0.337 \cdot L_4 + 0.964 L_4$$

$$1.209 L_4 \leq 1.301 L_4$$

$$1.209 \leq 1.301$$

Por lo tanto, el eslabón más pequeño, el cual corresponde a la manivela, realizará una revolución completa y por tal motivo, se trata de un mecanismo de cuatro barras de Grashof manivela - balancín. Se puede verificar la trayectoria de entrada y de salida, mediante la simulación del mismo, en la figura 28.

3.2.5. Análisis Cinemático

3.2.5.1. Análisis de Posición

El primer paso es hallar la expresión para las posiciones angulares del acoplador y del balancín en cualquier instante de movimiento del mecanismo, en función de las dimensiones de todos los eslabones y de la posición angular del eslabón manivela. Para que un desplazamiento angular sea positivo, debe ser medido respecto al eje real en sentido antihorario, de otra forma será negativo.

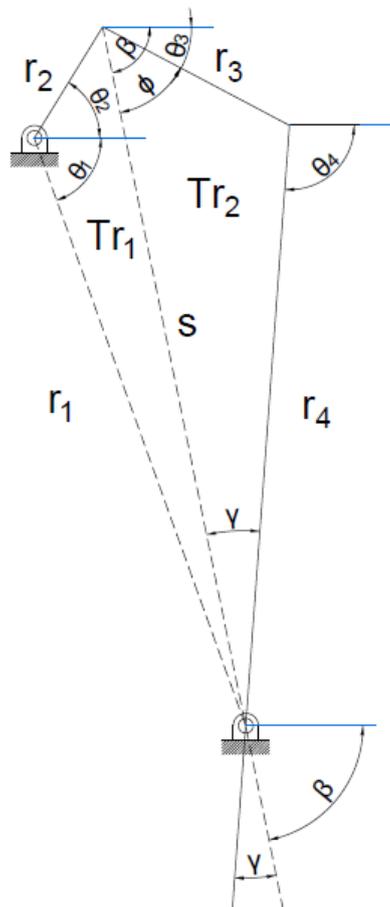


Figura 29. Representación vectorial para el análisis de posición

Considerando el mecanismo de cuatro barras mostrado en la figura 29, en la que las longitudes r_1, r_2, r_3, r_4 y los ángulos del bastidor θ_1 y eslabón manivela θ_2 son conocidas, se hallará el ángulo del acoplador θ_3 y balancín θ_4 .

A continuación se calcula el ángulo del bastidor θ_1 , mediante ley de cosenos.

$$r_4^2 = r_1^2 + (r_2 + r_3)^2 - 2 \cdot r_1 \cdot (r_2 + r_3) \cdot \cos(\theta_1) \quad (15)$$

Despejando θ_1 :

$$\theta_1 = \cos^{-1} \left(\frac{-r_4^2 + r_1^2 + (r_2 + r_3)^2}{2 \cdot r_1 \cdot (r_2 + r_3)} \right)$$

$$r_1 \cos(\theta_1) = r_2 \cos(\theta_2) + r_3 \cos(\theta_3) + r_4 \cos(\theta_4) \quad (16)$$

$$r_1 \sin(\theta_1) = r_2 \sin(\theta_2) + r_3 \sin(\theta_3) + r_4 \sin(\theta_4) \quad (17)$$

Triángulo 1 (Tr_1)

$$s^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2 r_1 r_2 \cos(\theta_2 + \theta_1)$$

$$\frac{s}{\sin(\theta_2 + \theta_1)} = \frac{r_2}{\sin(\beta - \theta_1)}$$

Triángulo 2 (Tr_2)

$$r_4^2 = s^2 + r_3^2 - 2 s r_3 \cos(\phi)$$

$$\frac{r_4}{\sin(\phi)} = \frac{r_3}{\sin(\gamma)}$$

Se obtiene así cuatro ecuaciones en función de θ_2 .

$$s = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2 r_1 r_2 \cos(\theta_2 + \theta_1)} \quad (18)$$

$$\beta = \sin^{-1} \left[\frac{r_2 \sin(\theta_2 + \theta_1)}{s} \right] + \theta_1 \quad (19)$$

$$\phi = \cos^{-1} \left(\frac{-r_4^2 + s^2 + r_3^2}{2 s r_3} \right) \quad (20)$$

$$\gamma = \sin^{-1} \left[\frac{r_3 \sin(\phi)}{r_4} \right] \quad (21)$$

Por lo tanto los ángulos que definen las posiciones de los eslabones son:

$$\theta_3(\theta_2) = \beta - \phi$$

$$\theta_4(\theta_2) = \beta + \gamma$$

Se ingresa estas ecuaciones en un procesador matemático, el cual permitirá representar las ecuaciones cinemáticas del mecanismo mediante gráficas, al hacerlo se debe considerar los siguientes datos constantes:

$$\theta_1 = -70.3^\circ$$

$$r_1 = 170 \text{ mm}$$

$$r_2 = 35.5 \text{ mm}$$

$$r_3 = 57.2 \text{ mm}$$

$$r_4 = 164.0 \text{ mm}$$

Se analiza la curva generada en el rango $0^\circ \leq \theta_2 \leq 360^\circ$, es decir una vuelta completa del eslabón manivela desde su posición inicial (0°). La figura 4 muestra la gráfica de θ_3 y θ_4 en función de θ_2 .

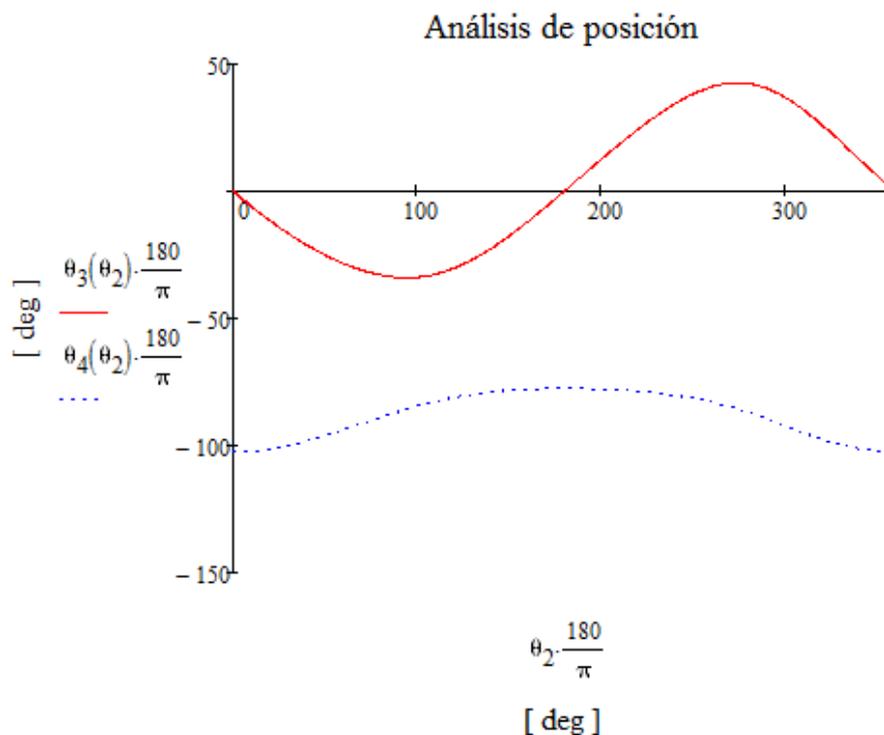


Figura 30. Análisis posicional del mecanismo

Como comparación se muestra la misma curva en un software de análisis de mecanismos, con la única finalidad de verificar la veracidad de las ecuaciones obtenidas, la figura 31 muestra la gráfica de θ_3 y θ_4 en función del tiempo necesario para que la manivela efectúe un giro completo, detallado como $A(3)$ y $A(4)$ respectivamente. Para obtener dichas curvas, no se ingresa ninguna ecuación, basta graficando el mecanismo de cuatro barras con sus dimensiones exactas.

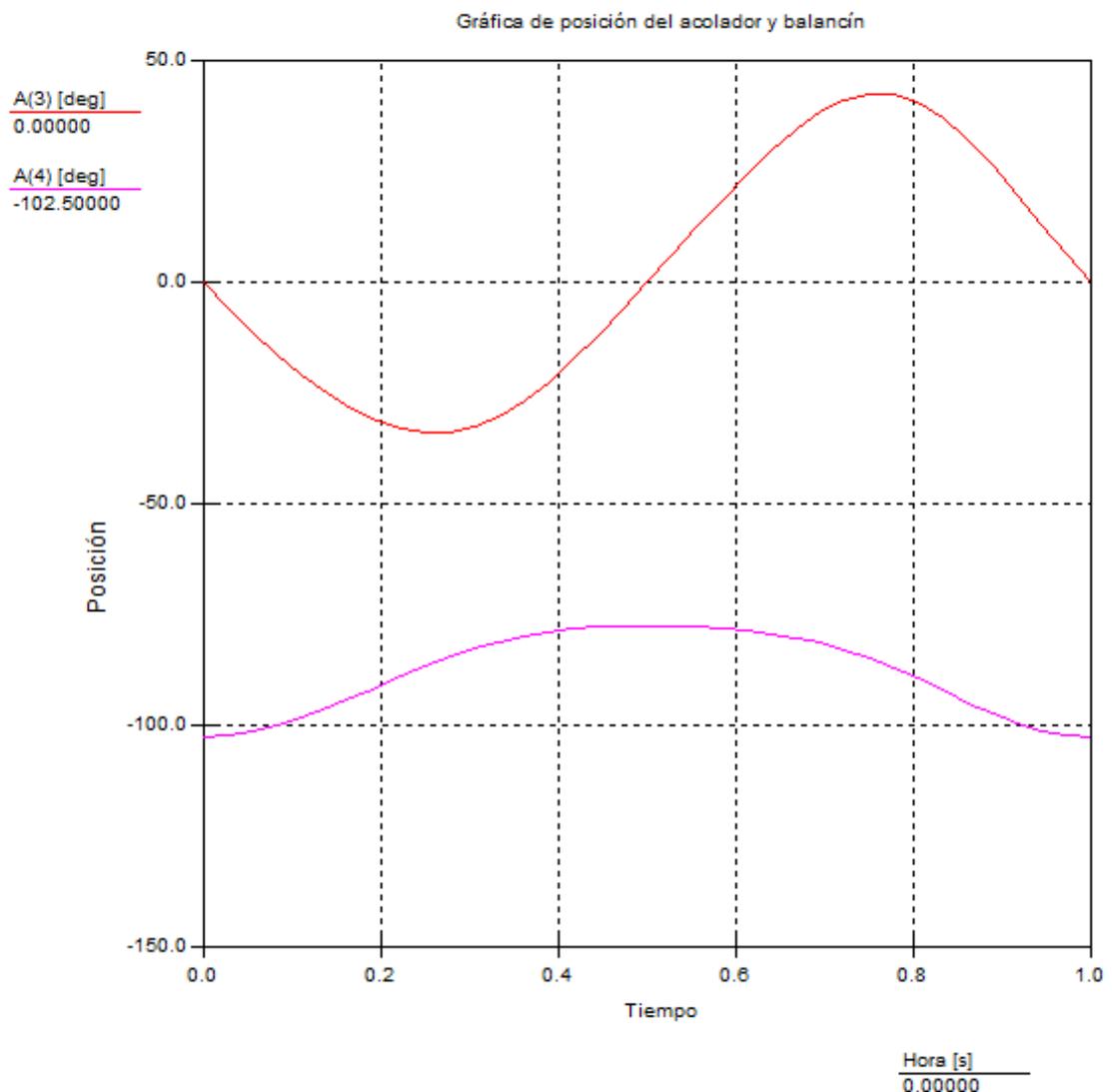


Figura 31. Análisis posicional del mecanismo con software

3.2.5.2. Análisis de Velocidad

Se encontrará las expresiones para velocidad angular del acoplador y del balancín en cualquier instante de funcionamiento del mecanismo. Para este análisis se basará en la figura 32, la cual indica la representación vectorial del mecanismo de cuatro barras.

Como primer paso se establece la ecuación de lazo cerrado del mecanismo.

$$\vec{r}_1 = \vec{r}_2 + \vec{r}_3 + \vec{r}_4 \quad (22)$$

Se sustituye en forma polar de vectores complejos la ecuación anterior y se tiene:

$$r_1 e^{i\theta_1} = r_2 e^{i\theta_2} + r_3 e^{i\theta_3} + r_4 e^{i\theta_4} \quad (23)$$

Donde:

$$e^{i\theta} = \cos \theta + i \operatorname{sen} \theta$$

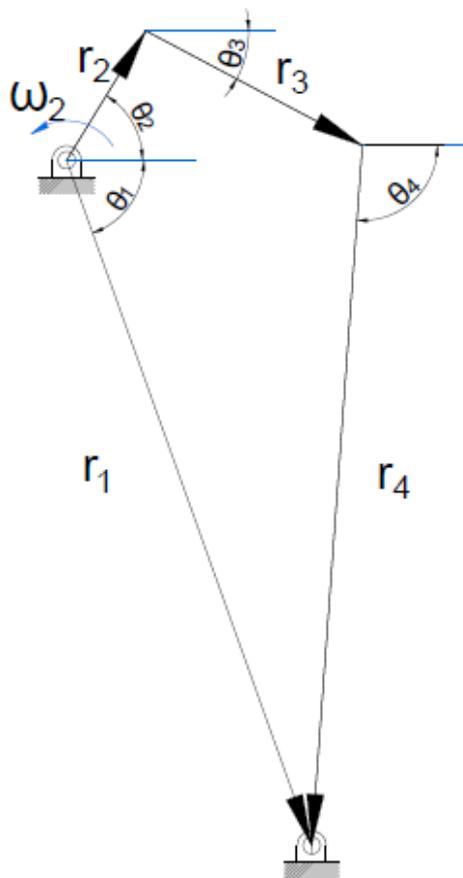


Figura 32. Representación vectorial del mecanismo

Reordenando la expresión:

$$r_1 [\cos(\theta_1) + i \operatorname{sen}(\theta_1)] = r_2 [\cos(\theta_2) + i \operatorname{sen}(\theta_2)] + r_3 [\cos(\theta_3) + i \operatorname{sen}(\theta_3)] + r_4 [\cos(\theta_4) + i \operatorname{sen}(\theta_4)]$$

Se separa en un sistema de dos ecuaciones (24.a) y (24.b), dichas ecuaciones representan el eje real e imaginario respectivamente.

$$r_1 \cos(\theta_1) = r_2 \cos(\theta_2) + r_3 \cos(\theta_3) + r_4 \cos(\theta_4) \quad (24.a)$$

$$r_1 \operatorname{sen}(\theta_1) = r_2 \operatorname{sen}(\theta_2) + r_3 \operatorname{sen}(\theta_3) + r_4 \operatorname{sen}(\theta_4) \quad (24.b)$$

Derivando las ecuaciones (24.a) y (24.b) de cierre del circuito, ya que la derivada del vector posición respecto al tiempo proporciona como resultado la velocidad. Se considera que el ángulo θ_1 y las longitudes de los eslabones r son constantes.

$$\begin{cases} r_3 \omega_3 \operatorname{sen}(\theta_3) + r_4 \omega_4 \operatorname{sen}(\theta_4) = -r_2 \omega_2 \operatorname{sen}(\theta_2) \\ r_3 \omega_3 \cos(\theta_3) + r_4 \omega_4 \cos(\theta_4) = -r_2 \omega_2 \cos(\theta_2) \end{cases} \quad (25)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones (25):

$$\omega_3(\theta_2) = -\frac{r_2 \operatorname{sen}(\theta_2 - \theta_4)}{r_3 \operatorname{sen}(\theta_3 - \theta_4)} \omega_2$$

$$\omega_4(\theta_2) = \frac{r_2 \operatorname{sen}(\theta_2 - \theta_3)}{r_4 \operatorname{sen}(\theta_3 - \theta_4)} \omega_2$$

Si:

$$\omega_2 = 1\,467 \text{ RPM} = 153.62 \text{ rad/s}$$

La curva de velocidad angular para el eslabón balancín y acoplador se muestran en la siguiente figura 33.

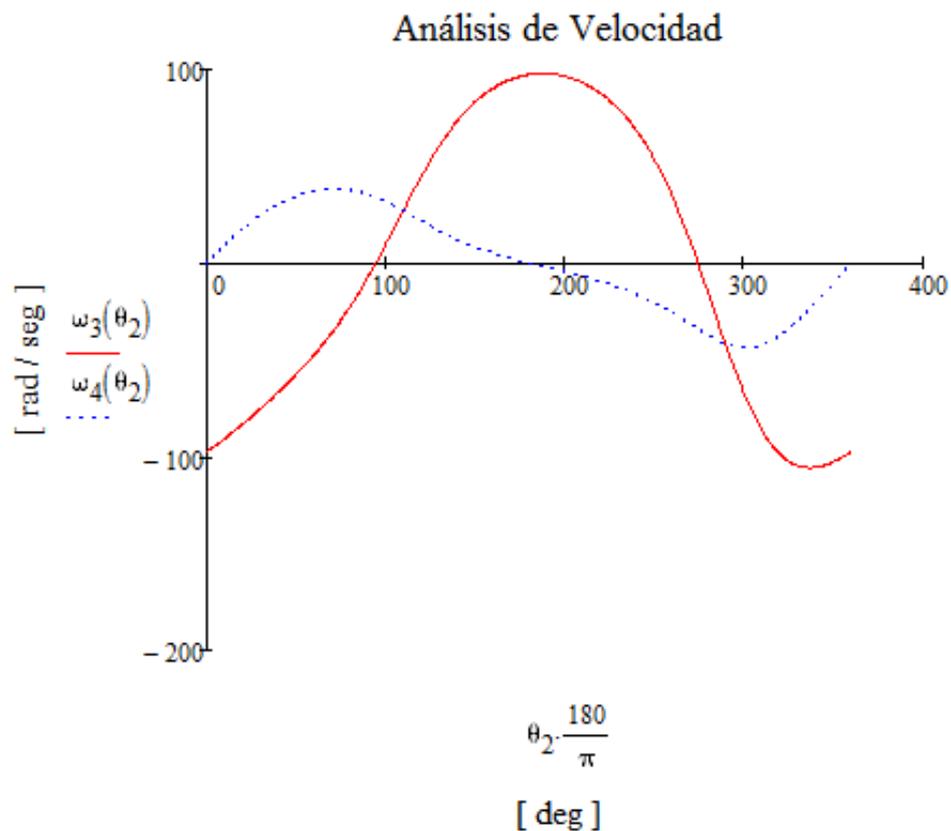


Figura 33. Análisis de velocidad angular del mecanismo

De igual forma, se obtienen las mismas gráficas con el software de análisis de mecanismos, cabe mencionar que este programa no permite el ingreso de una amplitud de velocidad mayor a $360 \frac{\text{grados}}{\text{seg}}$, cuya conversión en radianes es $2\pi \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$.

Como puede verificarse entre la figura 33 y 34, colocar una velocidad al eslabón de entrada distinta, no afecta en lo absoluto la forma de la curva, únicamente su amplitud.

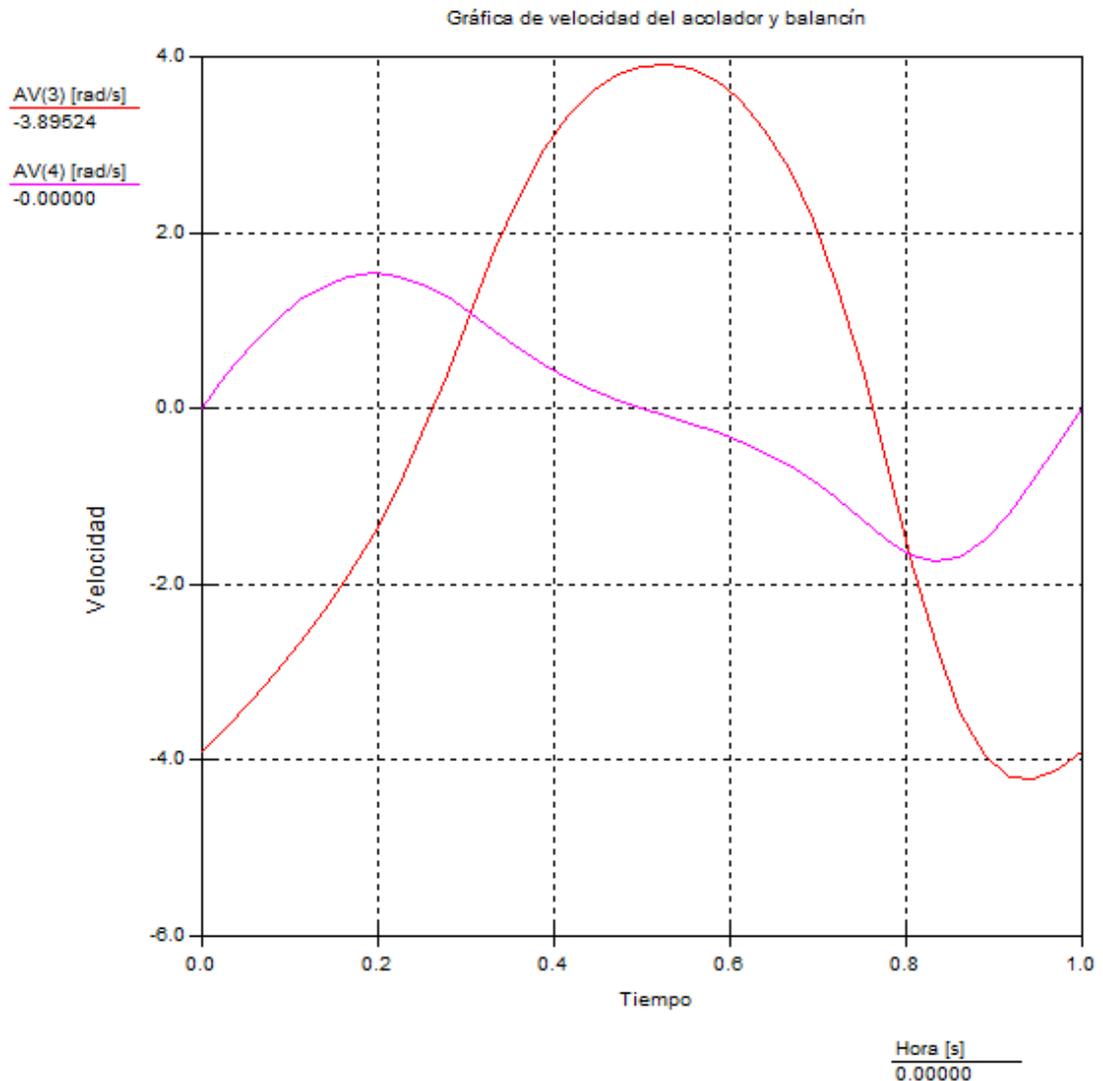


Figura 34. Análisis de velocidad angular del mecanismo con software

3.2.5.3. Análisis de aceleración

Si se vuelve a derivar el sistema de ecuaciones (25) en función del tiempo (expresión de velocidad del mecanismo) y bajo las mismas consideraciones mencionadas anteriormente se logra que:

$$r_3 \omega_3^2 \cos(\theta_3) + r_4 \omega_4^2 \cos(\theta_4) + r_3 \alpha_3 \sin(\theta_3) + r_4 \alpha_4 \sin(\theta_4) = -r_2 \omega_2^2 \cos(\theta_2) - r_2 \alpha_2 \sin(\theta_2)$$

$$-r_3 \omega_3^2 \sin(\theta_3) - r_4 \omega_4^2 \sin(\theta_4) + r_3 \alpha_3 \cos(\theta_3) + r_4 \alpha_4 \cos(\theta_4) = r_2 \omega_2^2 \sin(\theta_2) - r_2 \alpha_2 \cos(\theta_2)$$

Obteniéndose así el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} r_3 \alpha_3 \sin(\theta_3) + r_4 \alpha_4 \sin(\theta_4) = -r_2 \omega_2^2 \cos(\theta_2) - r_2 \alpha_2 \sin(\theta_2) - r_3 \omega_3^2 \cos(\theta_3) - r_4 \omega_4^2 \cos(\theta_4) \\ r_3 \alpha_3 \cos(\theta_3) + r_4 \alpha_4 \cos(\theta_4) = r_2 \omega_2^2 \sin(\theta_2) - r_2 \alpha_2 \cos(\theta_2) + r_3 \omega_3^2 \sin(\theta_3) + r_4 \omega_4^2 \sin(\theta_4) \end{cases}$$

La solución al sistema representa la aceleración angular.

$$\alpha_3 = -\frac{\alpha_2 r_2 \sin(\theta_2 - \theta_4) + r_2 \omega_2^2 \cos(\theta_2 - \theta_4) + r_3 \omega_3^2 \cos(\theta_3 - \theta_4) + r_4 \omega_4^2}{r_3 \sin(\theta_3 - \theta_4)}$$

$$\alpha_4 = \frac{\alpha_2 r_2 \sin(\theta_2 - \theta_3) + r_2 \omega_2^2 \cos(\theta_2 - \theta_3) + r_4 \omega_4^2 \cos(\theta_3 - \theta_4) + r_3 \omega_3^2}{r_4 \sin(\theta_3 - \theta_4)}$$

Simplificando y ordenando se obtiene como resultado:

$$\alpha_3 = \frac{\omega_3}{\omega_2} \alpha_2 - \frac{r_2 \omega_2^2 \cos(\theta_2 - \theta_4) + r_3 \omega_3^2 \cos(\theta_3 - \theta_4) + r_4 \omega_4^2}{r_3 \sin(\theta_3 - \theta_4)} \quad (26.a)$$

$$\alpha_4 = \frac{\omega_4}{\omega_2} \alpha_2 + \frac{r_2 \omega_2^2 \cos(\theta_2 - \theta_3) + r_4 \omega_4^2 \cos(\theta_3 - \theta_4) + r_3 \omega_3^2}{r_4 \sin(\theta_3 - \theta_4)} \quad (26.b)$$

$$\alpha_2 = 0 \text{ rad}/\text{s}^2 \quad (26.c)$$

Al ingresar las ecuaciones (26.a), (26.b) y (26.c) de aceleración en la herramienta matemática y graficando, se generan las curvas de la figura 35.

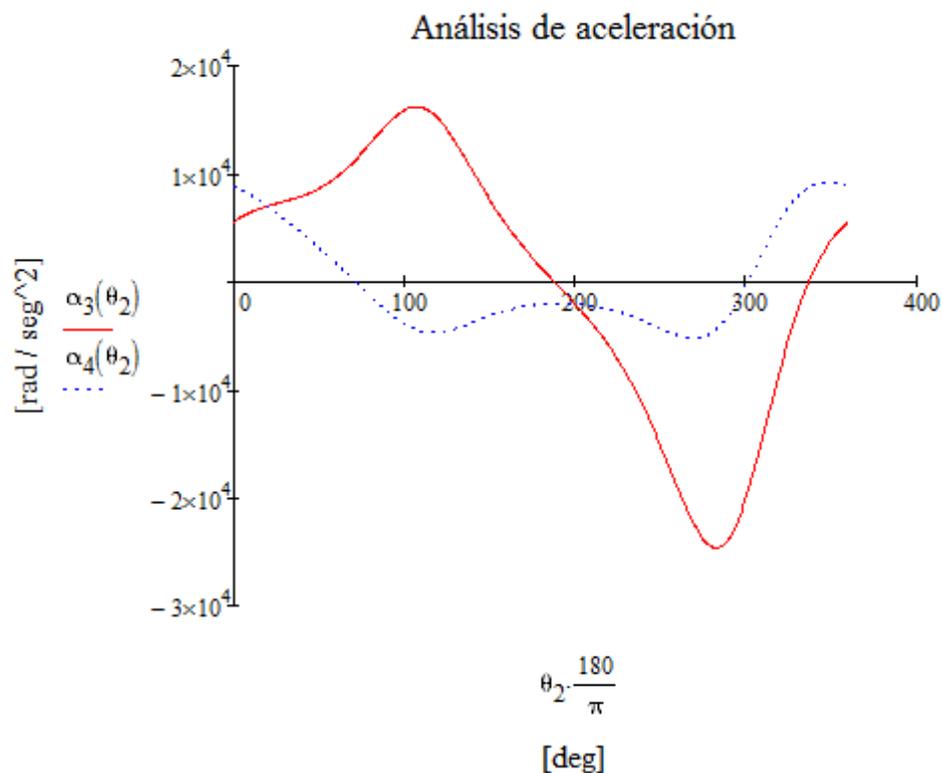


Figura 35. Análisis de aceleración del mecanismo

De igual modo, como se ha realizado con los otros análisis se obtienen las gráficas de aceleración angular con el software de mecanismos, con una amplitud de velocidad de entrada correspondiente a $2\pi \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$.

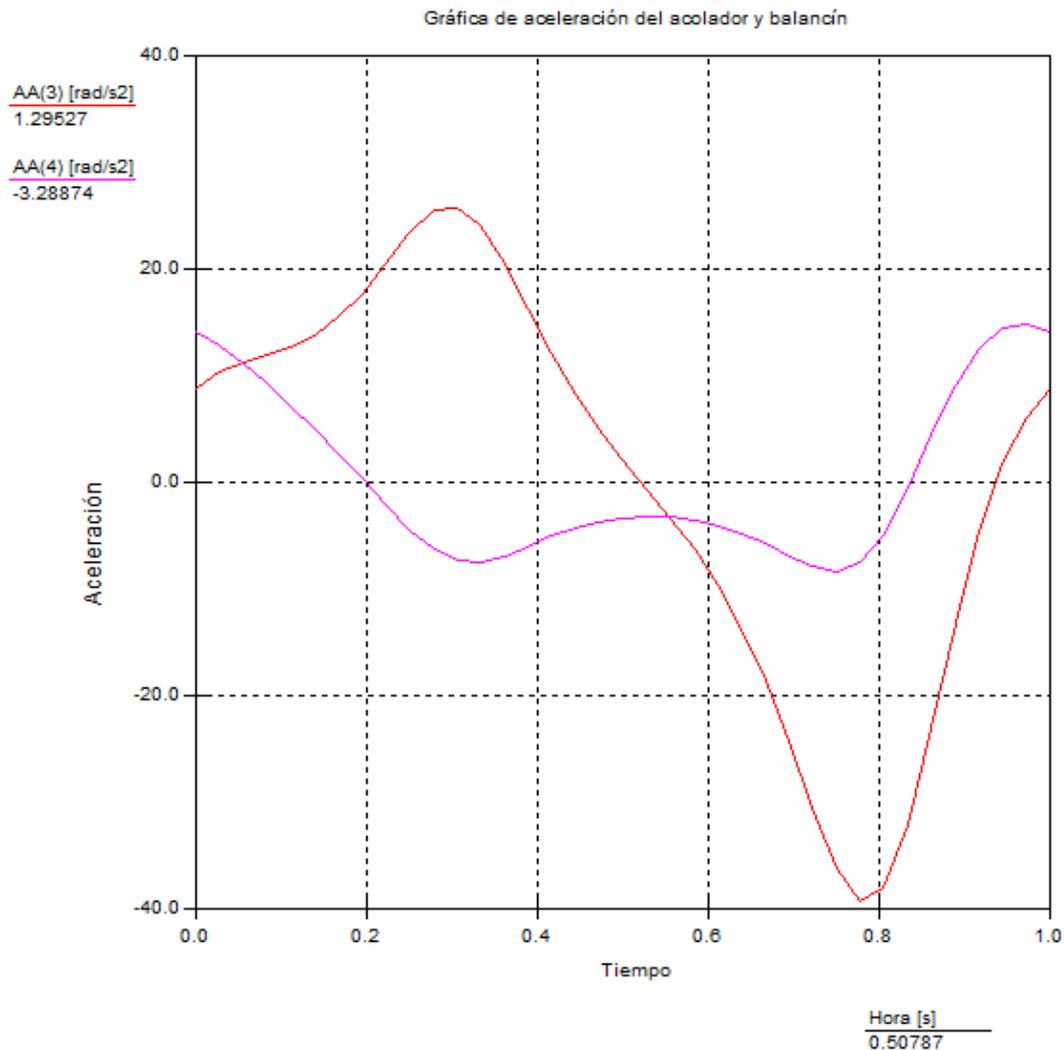


Figura 36. Análisis de aceleración del mecanismo con software

3.2.6. Análisis de Fuerzas dinámicas

Ya definido anteriormente la cinemática del mecanismo, es decir, posición, velocidad y aceleración angular de los elementos rotatorios, se procede al análisis de fuerzas dinámicas. Si bien es posible un análisis de fuerzas dinámicas con el uso de las leyes del movimiento de Newton, especialmente la segunda ley, ésta se describe como la suma de todas las fuerzas y los pares de torsión presentes en un sistema.

$$\sum F = ma \qquad \sum T = I_G \alpha$$

El trabajo que implica hacerlo manualmente es muy tedioso y demandante en tiempo, debido a la compleja geometría y consideraciones a recaudar.

3.2.6.1. Fuerzas que actúan en todas las juntas de pasador del mecanismo

Para el análisis cinemático, sólo se requieren las longitudes de los eslabones entre pasadores. Para un análisis dinámico también se requieren las aceleraciones lineales de los centros de gravedad (*CG*) de todos los miembros en movimiento, la masa de cada elemento y el momento de inercia de masa, además de considerar el peso de la cápsula, porta cápsula, esferas, material vegetal aplicado sobre el balancín. Sin olvidar que el procedimiento manual implica aislar cada elemento móvil, en un sistema coordinado local no rotatorio localizado en el *CG* y luego aplicar las ecuaciones provenientes de la segunda ley de Newton, y por último resolver el sistema simultáneamente. Por lo tanto, se optó por un paquete de modelado y análisis de sólidos CAD.

Conocer estas características abarca poseer un diseño final del equipo, por lo que se usaron valores preliminares, los cuales fueron ajustados acorde al desarrollo del proyecto, no obstante, se mostrarán algunas condiciones iniciales importantes para el análisis dinámico. Por tal motivo, las figuras 37, 38 y 39 muestran un diseño final del mecanismo, cada elemento observado será justificado posteriormente.

3.2.6.1.1. Eslabón manivela

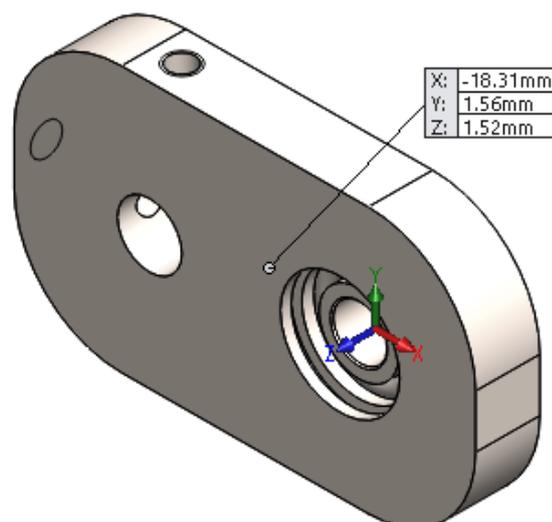


Figura 37. Centro de masa del eslabón manivela

- Masa = 317 gr
- Volumen = $4.22 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$
- Ubicación del centro de gravedad [*mm*] = (-18.3, 1.6, 1.5)
- Momento de inercia respecto al *CG* = $2.49 \cdot 10^5 \text{ gr/mm}^2$

3.2.6.1.2. Eslabón acoplador

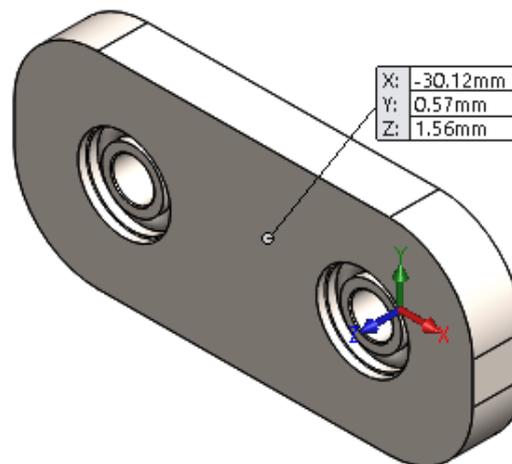


Figura 38. Centro de masa del eslabón acoplador

- Masa = 404 gr
- Volumen = $5.56 \cdot 10^4 \text{ mm}^3$
- Ubicación del centro de gravedad [mm] = (-30.1, 0.6, 1.56)
- Momento de inercia respecto al CG = $4.61 \cdot 10^5 \text{ gr/mm}^2$

3.2.6.1.3. Eslabón balancín

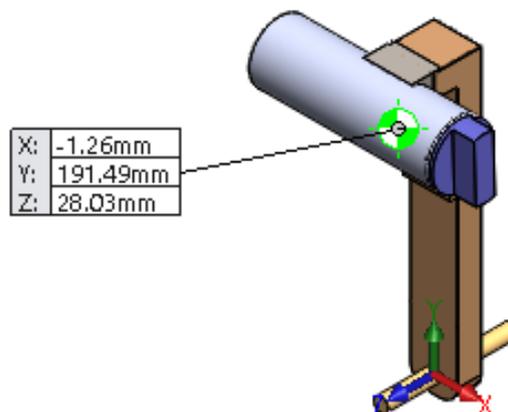


Figura 39. Centro de masa del eslabón balancín

- Masa = 2.37 Kg
- Volumen = $3.01 \cdot 10^5 \text{ mm}^3$
- Ubicación del centro de gravedad [mm] = (-1.3, 191.5, 28)
- Momento de inercia respecto al CG = $1.32 \cdot 10^7 \text{ gr/mm}^2$

3.2.6.1.4. Fuerzas eslabón de entrada o manivela

En la figura 40 se observar la fuerza de reacción entre el eslabón de entrada y el eje rotatorio. De la gráfica se puede concluir que el tipo de fuerza corresponde a una fluctuante.

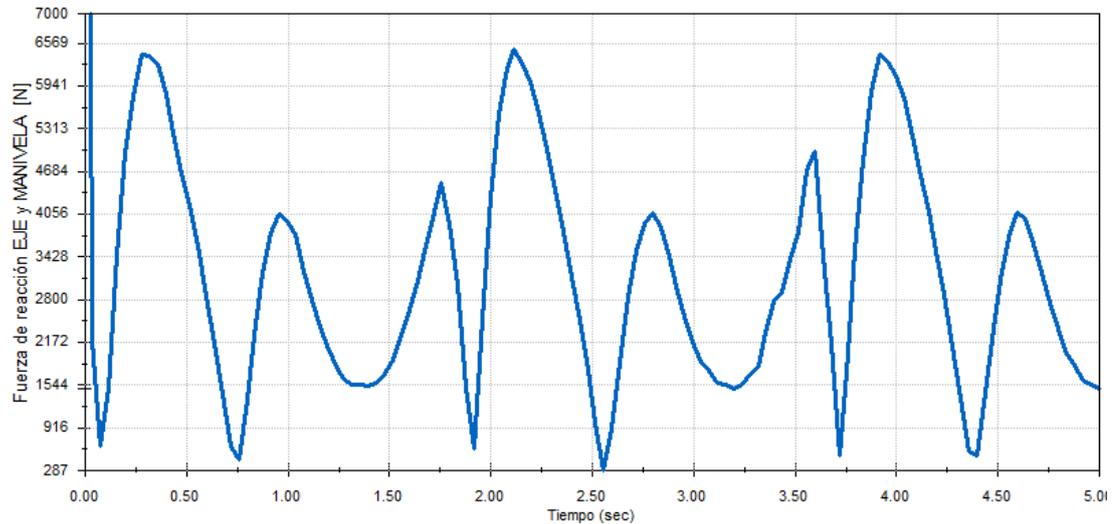


Figura 40. Fuerza de reacción entre eje y manivela

3.2.6.1.5. Fuerzas acoplador

La figura 41 indica la fuerza de reacción del pasador que une el eslabón acoplador y manivela, la curva no es completamente sinusoidal, porque trabaja a velocidades elevadas y existe una excentricidad producida por el movimiento del mecanismo.

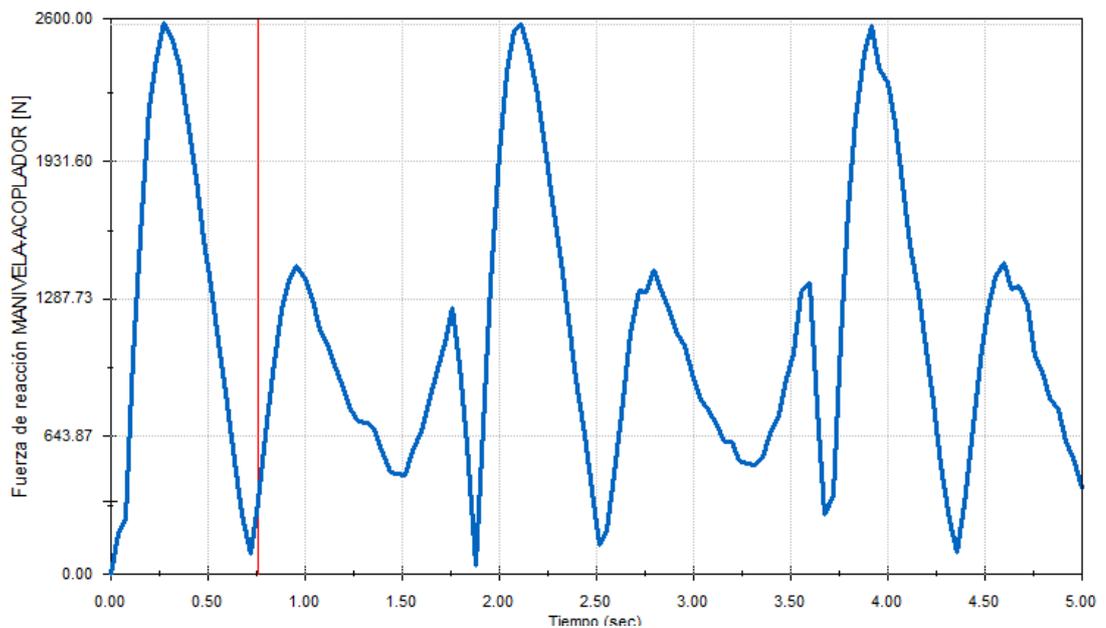


Figura 41. Fuerza de reacción entre manivela y acoplador

3.2.6.1.6. Fuerzas balancín

Por último, se observa en la figura 42 la fuerza de reacción que se produce entre el pasador y el eslabón acoplador, el valor máximo es de 6010 N.

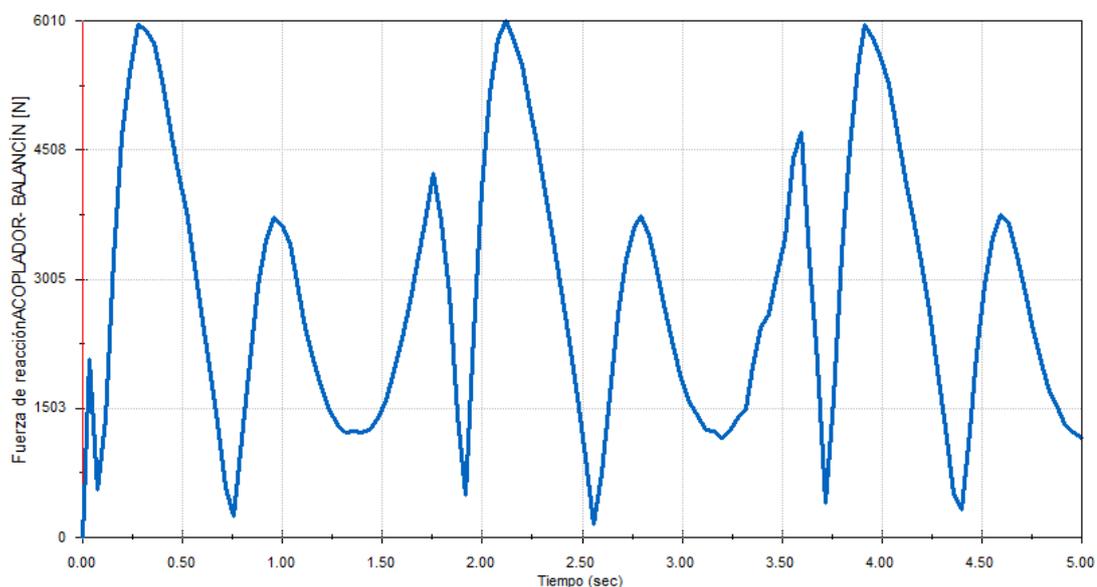


Figura 42. Fuerza de reacción entre eslabón acoplador y balancín

3.2.7. Elección del actuador

Para poder accionar todo el mecanismo se necesita de un motor eléctrico, el cual por definición es una máquina que transforma energía eléctrica de la red en energía rotacional. Para la elección del motor es necesario conocer la potencia mecánica que se necesita en el eslabonamiento de Grashof y demás elementos del molino criogénico. Se debe dimensionar la potencia eléctrica del motor con un margen de seguridad adecuado.

Se elige un motor de corriente directa (DC), debido a sus características de facilidad en la regulación de velocidad ajustando el voltaje aplicado, además que el mismo debe mantener el torque incluso si el motor se encuentra en su velocidad más baja ya que permite controlar el par torsional al variar la corriente aplicada al motor.

Para el cálculo de la potencia del motor se utiliza la ecuación 27, considerando que el molino tendrá una velocidad máxima de 1500 rpm debido que la frecuencia de oscilación propuesta es 25 Hz.

Se utiliza el software de diseño y análisis CAD, para determinar el valor del torque necesario para el equipo, la figura 43 indica el valor máximo del torque, el cual es aproximadamente 1 Nm.

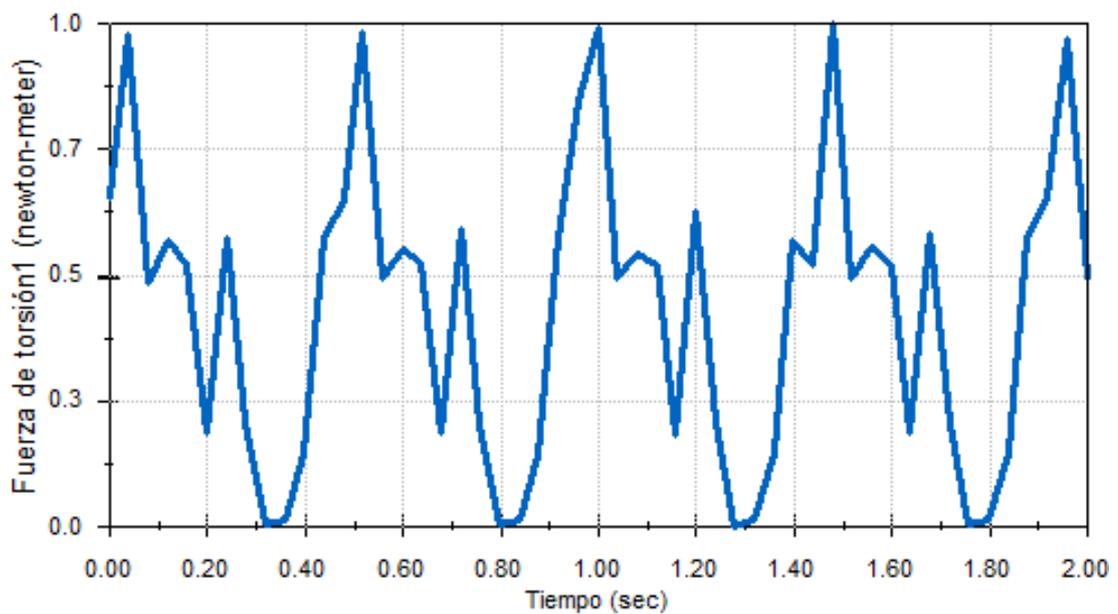


Figura 43. Torque necesario para el molino

$$P = \frac{T \cdot n}{9550} \quad (27)$$

Donde:

P = Potencia requerida por el motor [kW]

n = Velocidad [rpm]

T = Torque en el eje de entrada [$N \cdot m$]

De manera comercial los motores están clasificados por la potencia expresada en caballos de fuerza (HP), la conversión a Vatios se obtiene con la siguiente relación:

$$1.0 \text{ HP} = 0.746 \text{ kW} = 746 \text{ W}$$

Con todo lo dicho, se reemplaza los datos en la ecuación (27) para así obtener la potencia necesaria y como resultado se tiene:

$$P = \frac{T \cdot n}{9550} = \frac{(1 \text{ Nm}) \cdot (1500 \text{ rpm})}{9550} = 0.1571 \text{ kW}$$

$$P = 157.1 \text{ W} = 0.21 \text{ Hp}$$

Se decidió adquirir un motor DC cuya potencia es de 1 HP considerando las incertidumbres debido al mecanismo y otras partes del equipo, las características se encuentran resumidas en la tabla 16.

Tabla 16**Características del motor DC**

Tipo	Corriente continua
Modelo	JD5290D090A-12
Tensión nominal	90 Vdc
Corriente nominal	8,4 A
Velocidad nominal	4400 RPM
Par nominal	1,62 N.m
Potencia nominal	1 HP
Sentido de giro	CW
Ventilación	Externa
Peso	3kg

3.2.8. Banda de transmisión**3.2.8.1. Diseño de bandas de transmisión**

Existen varios tipos de bandas de transmisión (planas, trapezoidales, dentadas entre otras) las cuales tienen sus ventajas, desventajas y sus campos de aplicación. La tabla 17 muestra los criterios para la selección del tipo de banda.

Tabla 17**Características y rendimiento de tipos de bandas de transmisión**

Criterio	Plana	Trapezoidal	Eslabón	Dentada	Poly V	Redonda
Carga en los árboles	muy grande	pequeña	pequeña	mínima	grande	muy grande
Trabajo a V=25m/s	aceptable	aceptable	malo	bueno	aceptable	regular
Resistencia a los choques	muy buena	bueno	regular	aceptable	muy buena	bueno
Eficiencia %	97.... 98	96....97	95.... 96	98 99	96 97	95.. 96
Longitud de correa	libre	normalizada	libre	dependiente	normalizada	libre
Tolerancia a la desalineación	pequeña	grande	grande	pequeña	pequeña	grande
Nivel de Ruido	muy bajo	muy bajo	bajo	bajo	bajo	bajo
Sincronismo	no	no	no	si	no	no
Costo inicial	bajo	bajo	bajo	moderado	moderado	mínimo
Facilidad de montaje	si	no	si	no	no	si
Ancho reducido	no	si	si	si	no	si
Diámetro reducido	si	no	no	no	si	no

Fuente: (Cadenas YUK, 1994)

Con la ayuda de la tabla anterior se realiza una matriz de selección en base a los criterios necesarios para la aplicación a fin de elegir un tipo de banda, la tabla 18 ilustra lo antes señalado.

Tabla 18

Criterio de selección para la banda de transmisión

Criterio	Peso	Plana	Trapezoidal	Eslabón	Dentada	Poly V	Redonda
Carga en los árboles	15%	4	8	8	9	6	4
Trabajo a V=25m/s	10%	8	8	4	10	8	6
Resistencia a los choques	10%	10	8	4	6	10	8
Eficiencia %	5%	9	9	8	10	9	8
Tolerancia a desalineación	10%	6	9	9	6	6	9
Nivel de Ruido	10%	10	10	8	8	8	8
Sincronismo	0%	2	2	2	10	2	2
Costo inicial	20%	9	8	7	6	6	10
Necesidad de control del tensado	10%	8	10	8	10	8	8
Facilidad de montaje	10%	10	6	10	6	6	10
Total	100%	8,05	8,35	7,3	7,65	7,15	7,9

La tabla 18 genera como resultado que la banda trapezoidal es la mejor opción para la aplicación del equipo.

Las correas trapezoidales o de sección en "V" permiten transmitir pares de fuerzas más elevados, y una velocidad lineal de la correa más alta, que puede alcanzar sin problemas hasta los 30 m/s. "Las transmisiones por bandas en V proporcionan muchas ventajas que lo ayudan en su esfuerzo diario" (Browning, 2010) entre las cuales se tiene:

- Son corrugadas lo que proporciona una vida útil alta con respecto a otras bandas.
- No requieren lubricación para su funcionamiento.
- El promedio de eficacia comprende entre el 94% y 98%.
- Cubre rangos de potencia muy amplios, desde potencias muy bajas hasta altas.
- Amortiguan las vibraciones entre la máquina transmisora y la impulsada.
- No producen ruido.

- No transmiten una gran sobrecarga de potencia excepto por cortos periodos de tiempo, lo que lo hace actuar como fusible de seguridad.
- El mantenimiento es sencillo, tanto el correctivo como el preventivo.

Con los datos proporcionados se puede elegir la banda adecuada:

- Potencia motor: 1HP
- Velocidad nominal: 4400 RPM
- Polea conductora: $\varnothing 25.4mm$

La velocidad en la banda será

$$V_b = \omega \cdot R \quad (28)$$

Donde:

V_b = velocidad de trabajo de la banda

ω = velocidad angular aplicada a la banda

R = radio de la polea

Reemplazando en la ecuación (28):

$$V_b = 4400 \cdot \frac{25.4}{2} = 55\,880 \text{ mm/min}$$

$$V_b = 0.93 \text{ m/s} \approx 1 \text{ m/s} = 183.33 \text{ ft/min}$$

En el catálogo de Browning de bandas de transmisión indica los diversos tipos de correas trapezoidales, así como sus aplicaciones y parámetros de trabajo explicados en la figura 44.

Tipo de banda genérica (secciones transversales)	Rango hp normal	Máxima velocidad de banda (ft/min)(1)	Rango normal de temperatura (°F)		Resistencia al aceite/calor	Disipador de estática	Aplicación general
			Min.	Máx.			
Super Gripbelts® (A, B, C, D)	1-500	6,500	-35	40	Buena	✓	Transmisiones industriales de servicio pesado para usos generales
Bandas múltiples Gripnotch™ (AX, BX, CX)	1-500	6,500	-35	140	Excelente	✓	Vida prolongada, gran eficacia, diámetros pequeños
Bandas Gripbelt "358" (3V, 5V, 8V)	1-1000	6,500	-35	140	Muy buena	✓	Elevado desempeño, transmisiones industriales compactas, amplia D. C.
Gripnotch 358 (3VX, 5VX)	1-600	6,500	-35	140	Excelente	✓	Elevado desempeño, transmisiones industriales compactas, corta D. C.
Bandas dobles en V Gripbelt (AA, BB, CC, DD)	1-200	6,500	-35	140	Buena	Pedido especial	Transmisiones por serpentina
FHP (2L, 3L, 4L, 5L)	Servicio ligero	6,500	-35	140	Parcial	Pedido especial	Transmisiones de servicio ligero que utilizan una sola banda

Notas: (1) Por lo general, está limitada por los materiales de la polea.

Figura 44. Tipos de bandas de transmisión

Fuente: Browning (2010).

En base a la tabla se eligen las bandas de transmisión de la serie FPH ya que el molino criogénico utiliza un motor de 1HP considerado como servicio ligero y el empleo de una sola banda cumpliendo así con la condición de velocidad de la banda.

$$V_b = 183.33 \frac{ft}{min} \leq \frac{6500ft}{min}$$

Ahora se define el tipo de banda FHP en base a la figura 45.

Banda 3L	DIA de paso	1.25*	1.5	1.75	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	-	-
	Caballos de Potencia	0.09	0.15	0.23	0.29	0.43	0.55	0.61	0.67	0.73	0.78	-	-
Banda 4L	DIA de paso	1.25*	1.5*	2.0*	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	-
	Caballos de Potencia	0.09	0.14	0.29	0.60	0.88	1.17	1.37	1.49	1.61	1.70	1.78	-
Banda 5L	DIA de paso	2.2*	2.5*	3.0*	3.4	3.9	4.4	4.9	5.4	5.9	6.4	6.9	7.4
	Caballos de Potencia	0.36	0.45	0.71	1.07	1.52	1.95	2.26	2.39	2.50	2.59	2.68	2.71

Figura 45. Tipos de bandas en V

Fuente: (Browning, 2014)

La banda seleccionada es 4L y en base a la potencia suministrada por el motor eléctrico se elige el paso de la banda ($3.0 \leq \text{paso} \leq 3.5$) con factor de corrección de $K = 1$.

Para la tensión aplicada a la banda el fabricante sugiere los siguientes datos:

Sección transversal	Rango pequeño de D. P.	Lb	
		Min.	Máx.
3L	1.25 - 1.75	1/2	5/8
	2.00 - 2.25	5/8	7/8
	2.50 - 3.00	3/4	1 1/8
4L	2.10 - 2.80	1/8	1 5/8
	3.00 - 3.50	1/2	2 1/8
	3.70 - 5.00	1 7/8	2 5/8
5L	3.00 - 4.20	2	2 7/8
	4.50 - 5.20	2 3/8	3 3/8

Figura 46. Fuerza de tensión aplicada para bandas

Fuente: (Browning, 2010)

Siendo la tensión aplicada en libras fuerza la siguiente:

$$0.5 lb \leq T_{banda} \leq 2.125 lb$$

La correa elegida es la correa FHP 4L845, donde la longitud de la correa es 845 mm. Pero debido a la facilidad de adquisición del mercado, se utilizó la correa DONGIL 4PK845 con las mismas características de la banda 4L845. (Ver figura C-1 del apéndice).



Figura 47. Banda acanalada

Fuente: (Browning, 2010)

3.2.9. Diseño de poleas

Las poleas se adquieren en base a la selección de las bandas así que se eligen poleas acanaladas para banda tipo FHP 4L con cuatro canales para un diámetro de paso 3.56 mm y una altura h de 2.0 mm.

Para ello el motor posee una polea acanalada de 1 in de diámetro y 4400 rpm, la velocidad máxima de operación a la cual debe trabajar el mecanismo es de 1500 RPM para generar oscilaciones de 25 Hz. Para la relación de transmisión se emplea la siguiente fórmula:

$$n_1 \cdot d_1 = n_2 \cdot d_2 \quad (29)$$

Donde:

d_1 = diámetro de la polea conductora.

d_2 = diámetro de la polea conducida.

n_1 = velocidad de giro de la polea conductora (RPM).

n_2 = velocidad de giro de la polea conducida (RPM).

$$4400 \cdot 25.4 = 1500 \cdot d_2$$

$$d_2 = 74.5 \text{ mm}$$

Por motivos de normalización se eligió una polea de 3 pulgadas de diámetro.

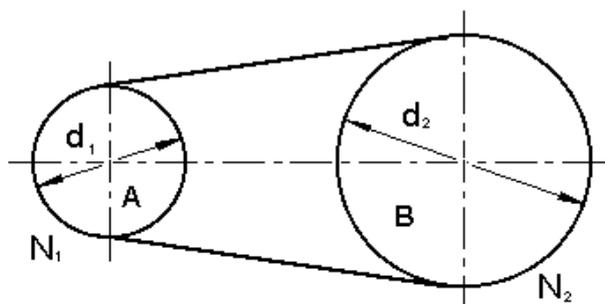


Figura 48. Diseño de poleas y relación de transmisión

3.2.9.1. Potencia transmitida (P_c)

$$P_c = P \cdot K \quad (30)$$

Donde:

$P = 1 \text{ HP}$ (potencia del motor)

$K = 1$ es el factor de corrección de la potencia

Al sustituir los datos en ecuación (30) resulta:

$$P_c = 1 \text{ Hp}$$

3.2.9.2. Relación de transmisión (R)

$$R = \frac{N}{n} \quad (31)$$

Donde:

N = velocidad del conductor

n = velocidad del conducido

$$R = \frac{4400}{1500} = 2.93$$

$$R \approx 3$$

3.2.9.3. Distancia entre ejes de poleas

$$E \geq (R + 1) \cdot \frac{d}{2} + d \quad (32)$$

Si $R \geq 3$:

Para este caso bastaría que se cumpla la condición de:

$$E \geq D$$

Donde:

E = distancia entre ejes de poleas

R = relación de transmisión

d = diámetro de la polea menor

D = diámetro de la polea mayor

$$E_{min} = 76.5 \text{ mm}$$

La distancia entre ejes de la polea conductora y conducida debe ser $E \geq 76.5 \text{ mm}$.

Se selecciona como distancia entre ejes válida $E = 300 \text{ mm}$.

3.2.9.4. Longitud de la correa

La longitud primitiva de la correa (Lp) se calcula directamente a partir de la siguiente expresión:

$$Lp = 2 \cdot E + \frac{\pi}{2} \cdot (D + d) + \frac{(D-d)^2}{4E} \quad (33)$$

Donde:

E = distancia entre ejes de poleas

d = diámetro de la polea menor

D = diámetro de la polea mayor

Aplicando los valores anteriores en la ecuación (33) resulta:

$$Lp = 761.74mm$$

3.2.9.5. Factor de corrección del largo de la correa (Fc_l)

Siendo $Fc_l = 1.1$.

$$Lp = 837.914mm$$

Para el cálculo de la velocidad lineal de la correa se emplea la siguiente expresión:

$$V_t = \frac{\pi \cdot d \cdot N}{60 \cdot 1000} \quad (34)$$

Donde:

V_t = velocidad lineal o tangencial de la correa, en m/s

d = diámetro de la polea menor, en mm

N = revoluciones por minuto (rpm) de la polea menor

$$V_t = 8.85 \text{ m/s}$$

El valor obtenido para la velocidad lineal de la correa es válido al ser inferior a los 25 m/s.

3.2.9.6. Prestación base de la correa

La prestación base o potencia base (P_b) de la correa puede ser consultada en las tablas del fabricante.

$$P_b = 1 \text{ HP}$$

3.2.9.7. Potencia efectiva por correa

La potencia efectiva por correa (Pe) se calcula a partir de la potencia base (P_b) afectada por los coeficientes correctores por longitud de correa (Fc_l) y por el arco de contacto (Fc_A) mediante la expresión:

$$Pe = P_b \cdot Fc_l \cdot Fc_A = 1 \cdot 0,99 \cdot 0,95 = 0.94 \text{ HP}$$

3.2.9.8. Cálculo del número de correas

$$N^{\circ} \text{ de correas} = \frac{Pc}{Pe} = \frac{1}{0.94} = 1.06$$

3.2.9.9. Resultado final

La transmisión resultante será la siguiente:

- Tipo correa: 4PK845
- N° de correas: 1
- Diámetro polea menor: 25.4 mm
- Diámetro polea mayor: 76.2 mm
- Distancia entre centros de poleas: 300 mm

3.2.10. Diseño del eje

Para el diseño del eje se toma en consideración que se trata de un elemento rotario en el cual, los esfuerzos varían o fluctúan, si el eje rotatorio es sometido a cargas cíclicas como es el caso, por ende sufre tensión y compresión por cada revolución, en otras palabras, si la velocidad entregada por el motor es de 1467 rpm, la fibra del eje rotatorio se la somete a esfuerzos de tensión y compresión 1467 veces en cada minuto. Para evitar que este elemento de máquina falle por esfuerzos repetidos, fluctuantes o alternantes se debe hacer un diseño el cual impida la falla por fatiga como ilustra la ecuación (8), que no es más que la falla de un material por rotura como resultado de esfuerzos cíclicos repetidos.

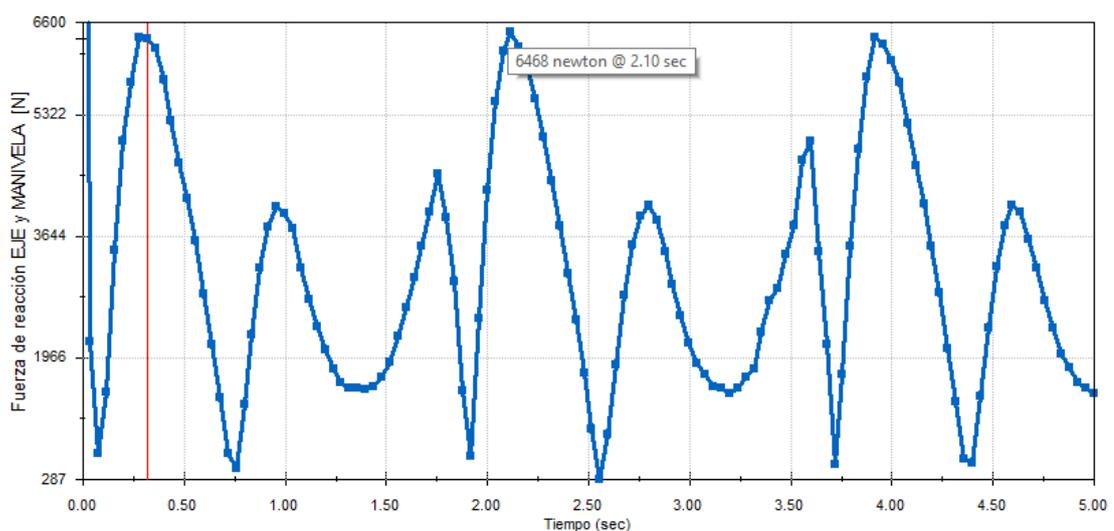


Figura 49. Amplitud de fuerzas fluctuantes entre eje y manivela

La amplitud de las cargas a flexión aplicadas está relacionada con la aceleración y masa de los eslabones, por lo tanto, tomando la gráfica de aceleración de la manivela o eslabón de entrada y de manera conservadora empleando la amplitud máxima y mínima del gráfico de fuerzas fluctuantes de la figura 49, se obtiene que :

$$F_{medio} = \frac{F_{max} + F_{min}}{2} = \frac{6468 + 287}{2} = 3\,377.5\text{ N}$$

$$F_{alternante} = \frac{F_{max} - F_{min}}{2} = \frac{6468 - 287}{2} = 3\,090.5\text{ N}$$

Para determinar el momento flector que ocasiona el eslabón de entrada en el eje rotatorio, se emplea la ecuación de momentos extraída de la figura B-1 del apéndice, la cual corresponde al momento máximo en el centro geométrico de una viga en voladizo con carga uniforme, dado el tipo de ubicación de la manivela en el eje rotatorio.

$$M = \frac{w}{2}(l - x)^2 = \frac{w}{2}\left(l - \frac{l}{2}\right)^2 = \frac{w}{2}\left(\frac{l}{2}\right)^2 = \frac{(wl) \cdot l}{8}$$

$$M_{medio} = \frac{(3\,377.5\text{ N}) \cdot (0.012\text{ m})}{8} = 5.066\text{ N m}$$

$$M_{alternante} = \frac{(3\,090.5\text{ N}) \cdot (0.012\text{ m})}{8} = 4.636\text{ N m}$$

$$T_{motor} = \frac{P}{\omega} = \frac{1\text{ hp}}{4400\text{ rpm}} \cdot \left(\frac{746\text{ W}}{1\text{ hp}}\right) \cdot \left(\frac{1\text{ rev}}{2\pi\text{ rad}}\right) \cdot \left(\frac{60\text{ s}}{1\text{ min}}\right) = 1.619\text{ N m}$$

Debido a la reducción de velocidad mediante poleas el torque verdadero correspondiente al eje es:

$$T_{incidente} = T_{motor} \cdot R = (1.619\text{ Nm}) \cdot 3 = 4.857\text{ N m}$$

En el cálculo del eje rotatorio se considera un par de torsión constante de $T_m = 4.857\text{ Nm}$, la figura 50 muestra esta y otras reacciones sobre el eje.

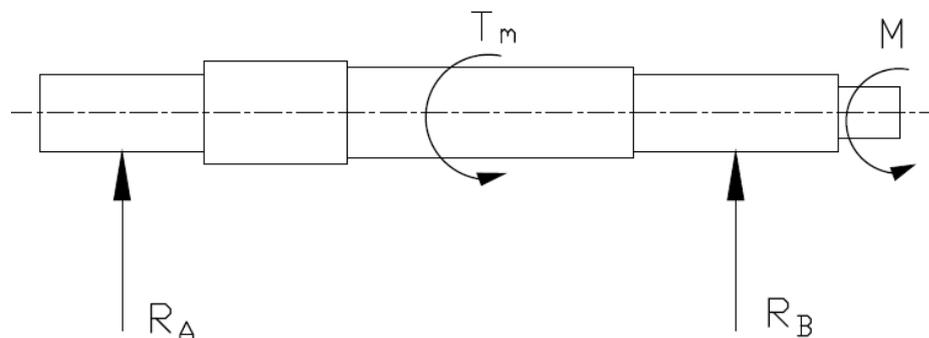


Figura 50. Diagrama de cuerpo libre para el eje.

3.2.10.1. Elección del material para el eje

Por las propiedades, facilidad de construcción y costo, se elige un acero SAE1018, conocido comercialmente como acero de transmisión.

La resistencia a la tensión S_{ut} y a la fluencia S_y del acero SAE 1018 HR (Laminado en caliente) según la tabla B-1 del apéndice es:

$$S_{ut}: 400 \text{ MPa} \qquad S_y: 220 \text{ MPa}$$

Tabla 19

Resumen del Momento flector y torsión producido por el motor

Momento alternante M_a	Momento medio M_m	Torsión alternante T_a	Torsión medio T_m
4.636 Nm	5.066 Nm	0	4.86 Nm

3.2.10.2. Momento flector y torsión

Para iniciar el dimensionamiento del elemento, se realizará en el lugar donde mayor incidencia tendrán los esfuerzos, es decir, se efectuará en el extremo donde se ubicará el eslabón de entrada, además en este lugar existe un hombro o resalto necesario para soportar la carga axial que causa la manivela, por lo tanto, hay un elemento concentrador de esfuerzos dado que se produce un incremento de tensiones alrededor del mismo.

Se asume un filete de hombro bien redondeado, para lo cual, de acuerdo a la figura B-2 del apéndice se elige los siguientes factores de concentración K_t y K_{ts} de manera conservadora para iniciar el cálculo del diámetro del eje.

$$K_t = 1.7 \qquad K_{ts} = 1.5$$

Utilizando un concepto conservador se suponen los siguientes factores de concentración de esfuerzos en el hombro.

$$K_f = k_t = 1.7 \qquad K_{fs} = k_{ts} = 1.5$$

3.2.10.3. Factores de Marín

3.2.10.3.1. Factor de superficie (k_a)

Al usar un acero maquinado, de acuerdo a la tabla 10 se eligen los factores.

$$a = 4.51 \qquad b = -0.265$$

$$k_a = aS_{ut}^b = 4.51 \cdot 400^{-0.265}$$

$$k_a = 0.922$$

3.2.10.3.2. Factor de tamaño (k_b)

Para la primera iteración se usará un factor de tamaño $k_b = 0.9$, el cual será verificado cuando se conozca el valor del diámetro d .

3.2.10.3.3. Factor de carga (k_c)

Al tratarse de flexión, el factor de carga es: $k_c = 1$

3.2.10.3.4. Factor de temperatura (k_d)

Asumiendo que el eje trabajará en un ambiente con temperatura normal alrededor de 20°C se obtiene un $k_d = 1$ según la tabla 11.

3.2.10.3.5. Factor de confiabilidad (k_e)

Se elige una confiabilidad del 99%, para lo cual se usa $k_e = 0.814$

3.2.10.4. Esfuerzos en probetas

$$S'_e = 0.5 \cdot S_{ut} = 0.5 \cdot 400$$

$$S'_e = 200 \text{ MPa}$$

Reemplazando datos en la ecuación (4), de Marín:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e = 0.922 \cdot 0.9 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.814 \cdot 200$$

$$S_e = 135.09 \text{ MPa}$$

Para calcular el diámetro del eje se elige un factor de seguridad de $n = 2$

3.2.10.5. Criterio ED-Goodman

Mediante el Criterio ED-Goodman se obtiene un diámetro aproximado.

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (35)$$

$$d = \left\{ \frac{16n}{\pi} \left(\frac{2(1.7 \cdot 368)}{120\,000\,000} + \frac{[3(1.5 \cdot 4.86)^2]^{\frac{1}{2}}}{400\,000\,000} \right) \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 0.01201 \text{ m} = 12.01 \text{ mm}$$

Finalmente, se designa un diámetro de $\frac{1}{2}$ in o 12.7 mm , permitiendo así la unión con la manivela.

Una relación típica en el hombro es.

$$\frac{D}{d} = 1.2$$

$$D = 1.2 \cdot 12.7 = 15.24 \text{ mm}$$

Suponiendo un radio de filete.

$$r = \frac{d}{10} = \frac{12.7}{10} = 1.27 \text{ mm}$$

3.2.10.5.1. Verificación

Con el diámetro ya establecido, se procede a calcular el factor de seguridad real. Para ello se supone usar una chumacera con medida estándar de $3/4 \text{ in}$, esta elección será posteriormente sustentada, por lo que el diámetro $D = 19.05 \text{ mm}$.

Antes de ingresar a la figura B-2 del apéndice respecto a concentradores de esfuerzos bajo momento flector y torsión, k_t y k_{ts} respectivamente, es necesario el cálculo de los siguientes parámetros.

$$\frac{D}{d} = \frac{19.05}{12.7} = 1.5$$

$$\frac{r}{d} = 0.1; \quad r = 1.27 \text{ mm}$$

De dichas gráficas se obtuvo los siguientes valores $k_t = 1.7$ y $k_{ts} = 1.45$.

Se necesita los valores de la sensibilidad a la muesca bajo efecto del momento flector q y torsión q_s , por lo que la figura B-3 del apéndice proporciona que:

$$q = 0.95 \qquad q_s = 0.95$$

$$k_f = 1 + q(K_t - 1) = 1 + 0.95 \cdot (1.7 - 1) = 1.665$$

$$k_{fs} = 1 + q_s(K_{ts} - 1) = 1 + 0.95 \cdot (1.45 - 1) = 1.428$$

Los esfuerzos de Von Mises son:

$$\sigma'_a = \frac{32K_f M_a}{\pi d^3} = 46.34 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = \left[\left(\frac{32 K_f M_m}{\pi d^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{16 K_{fs} T_m}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 62.79 \text{ MPa}$$

Con la dimensión del diámetro conocida, se calcula el factor de tamaño real k_b .

$$k_b = 1.24 \cdot d^{-0.107} = 1.24 \cdot 12.7^{-0.107} = 0.945$$

Los demás factores permanecen inalterables, por lo que el límite de resistencia a la fatiga es:

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e = 0.922 \cdot 0.945 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0.814 \cdot 200 = 142.67 \text{ MPa}$$

El factor de seguridad real según el criterio de Goodman es:

$$\frac{1}{n_f} = \frac{\sigma_a'}{S_e} + \frac{\sigma_m'}{S_{ut}}$$

$$\frac{1}{n_f} = \frac{46.34}{142.67} + \frac{62.79}{400} \therefore n_f = 2.076$$

El valor obtenido de 2.076, consolida la selección del eje.

3.2.11. Selección de chumaceras

Una vez dimensionado el diámetro del eje, se procede a la elección de las chumaceras. El diámetro resultó ser de 12.7 mm, en consecuencia, se considera que la sección transversal del eje rotatorio que soporta a la chumacera sea mucho más grande que este valor y por motivo de la facilidad de adquisición en el mercado y montaje de los elementos, se selecciona una chumacera de piso de diámetro ¾ in y a continuación se validará esta elección.

Se usarán chumaceras de piso, puesto que, en el equipo no existe una zona para colocar rodamientos o chumaceras de pared. La elección del rodamiento puede basarse en el diámetro nominal del eje o en las cargas a las que será sometido, ya sean estas dinámicas o estáticas. El tipo de mecanismo y velocidad a la que trabaja origina que el diseño dinámico sea considerado más importante, además, el diseño estático no se considera porque la fuerza estática resultante entre el peso del eje y poleas son bajas, en consecuencia, se analizará por cargas dinámicas.

3.2.12. Análisis solicitado dinámicamente.

Mediante un cálculo de dimensionamiento, se comprueba las exigencias de vida y principalmente las de cargas dinámicas y se inspecciona la seguridad contra la fatiga prematura del material de los cuerpos rodantes.

Usando los diagramas de carga y cortante de la figura 51 se obtiene el valor en la reacción A_y y B_y .

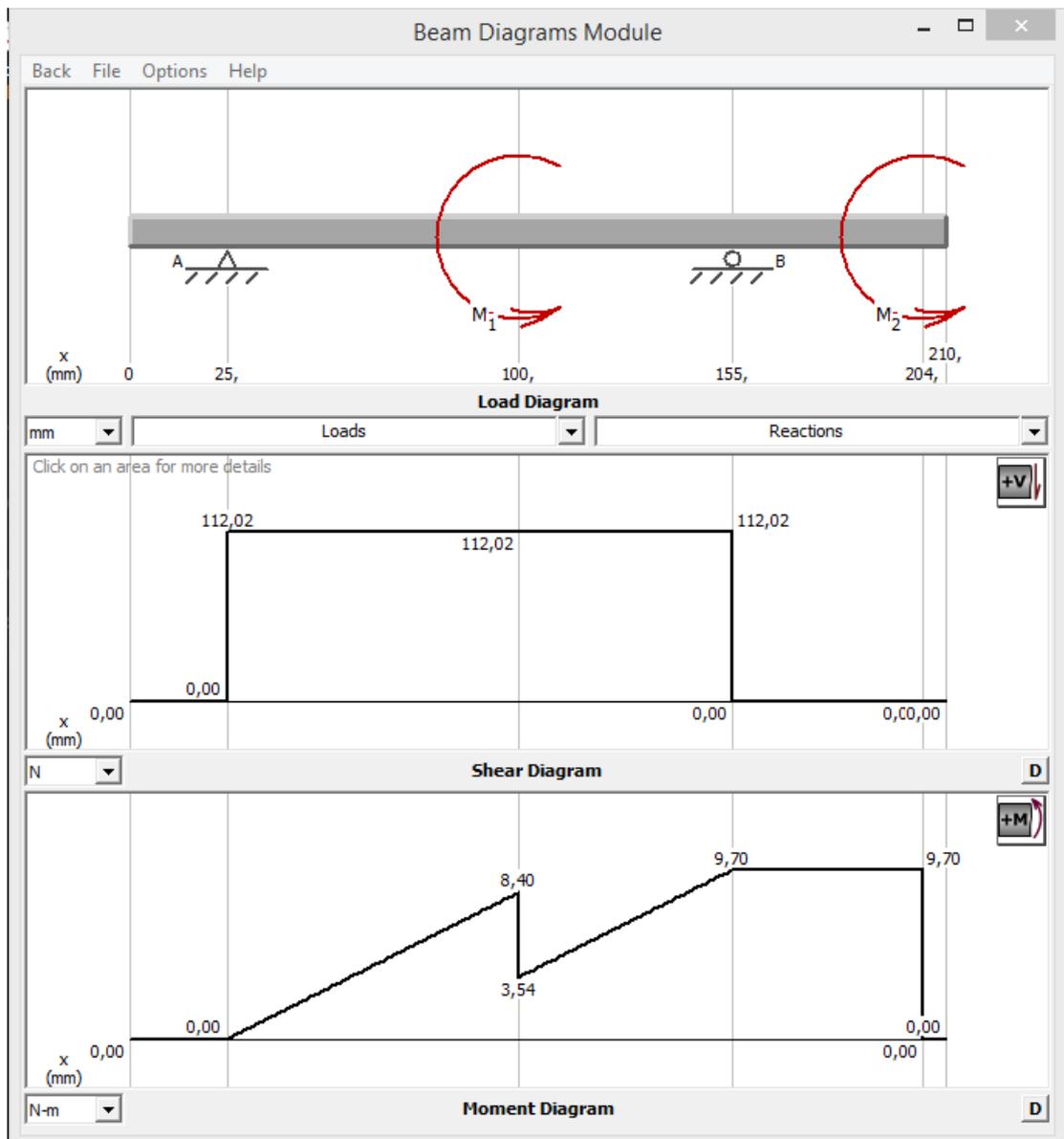


Figura 51. Diagrama de carga y cortante sobre el eje

Se calcula la capacidad de carga dinámica, con el valor de la carga $P = 112.02 \text{ N}$.

$$C_d = \frac{f_L \cdot P}{f_n}$$

Dónde:

P =carga

f_n =factor de velocidad

f_L =factor de esfuerzos dinámicos

Por medio de la velocidad angular máxima a la que gira el eje la misma que corresponde a 1467 rpm se obtiene el factor f_n . Mediante la tabla B-2 (ver en el apéndice) se obtiene el factor:

$$f_n = 0.281$$

Con la ayuda de la tabla B-3, correspondiente a valores de orientación del factor f_L la cual se encuentra en el apéndice, se obtiene que:

$$f_L = 3$$

$$C_d = \frac{3 \cdot 112.02}{0.281} = 1195.94 \text{ N}$$

Consecuentemente se compara este valor con el de carga dinámica que es de 1.2 KN y la del fabricante a es decir 12.7 KN y se verifica que la chumacera cumple con las características necesarias.

En la figura B-4 del apéndice se puede apreciar un tipo de aplicación similar a la tratada, referente a un aparato de uso frecuente para servicio de 0.5 horas, expresado de otro modo, no tiene un uso diario excesivo.

$$\text{Vida (kh)} = 0.5 = 500 \text{ horas}$$

La vida en revoluciones puede expresarse como:

$$L = (500 \text{ h}) \left(60 \frac{\text{min}}{\text{h}}\right) \left(1500 \frac{\text{rev}}{\text{min}}\right)$$

$$L = 45\,000\,000 = 45 \times 10^6 \text{ rev.}$$

La vida que tendrá el rodamiento será:

$$p = 3 \text{ (Rodamientos de bolas)}$$

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p [10^6 \text{ rev.}]$$

$$L_{10} = \left(\frac{3202.8}{112.02}\right)^3 = 23\,372.4 \cdot 10^6 \text{ rev.}$$

3.2.13. Selección de la chaveta

Se procede a especificar la dimensión apropiada de la chaveta. Su geometría y dimensiones son mostradas en la figura 52. Con el diámetro del eje establecido, el cual es $D = 22.75 \text{ mm}$, permite seleccionar la dimensión recomendadas de la altura h y el ancho b por la tabla B-4 del apéndice.

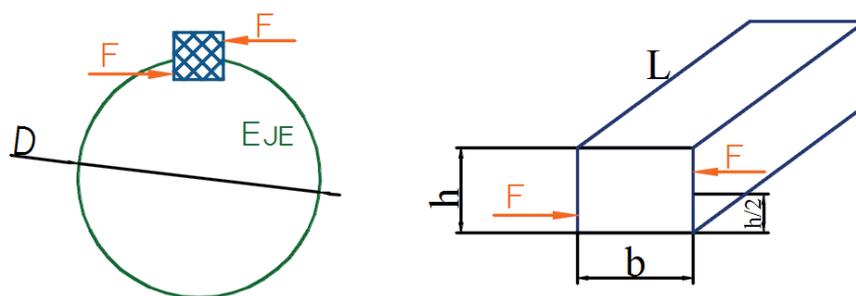


Figura 52. Geometría de la chaveta

Para un diámetro del eje comprendido entre $22 - 30 \text{ mm}$ se elige una chaveta de $b = 8 \text{ mm}$ y $h = 7 \text{ mm}$.

3.2.13.1. Fuerzas que actúan en la chaveta

La chaveta debe ser diseñada y seleccionada para que soporte fuerzas que ocasionen cortante, en diferentes palabras, la fuerza F sobre la chaveta en la superficie del eje.

Diseño por esfuerzos cortantes: Para el diseño por esfuerzos cortantes se usa la siguiente expresión:

$$\tau_c = \frac{0.5 \cdot S_y}{n} \quad (36)$$

El material de la chaveta es de acero SAE 1018 por lo tanto:

$$S_y = 220 \text{ Mpa}$$

Se considera un factor de seguridad de $n = 4$.

$$\tau_c = \frac{0.5 \cdot S_y}{n} = 27.5 \text{ Mpa}$$

Remplazando el valor de esfuerzo obtenido en la ecuación (37) facilitada por Mott (2006), se tiene que:

$$L = \frac{2 \cdot T}{\tau_c \cdot b \cdot D} \quad (37)$$

$$L = \frac{2 \cdot 8.40}{27.5 \text{ Mpa} \cdot 0.008 \cdot 0.02275} = 3.4 \text{ mm}$$

Diseño para esfuerzos por aplastamiento: La verificación por fallas debido a aplastamiento concentra la atención en la mitad de la cara de la chaveta. El diseño para esfuerzos por aplastamiento utiliza la siguiente expresión:

$$\tau_a = \frac{S_y}{n} = \frac{220 \text{ Mpa}}{4} = 55 \text{ Mpa}$$

A continuación se obtiene la longitud de la chaveta, considerando el esfuerzo por aplastamiento:

$$L = \frac{4 \cdot T}{\tau_a \cdot h \cdot D} = \frac{4 \cdot 8.40}{55 \text{ Mpa} \cdot 0.008 \cdot 0.02275} = 3.4 \text{ mm}$$

Por estabilidad, la longitud de un eje es más grande que la longitud de una polea. Además, si las longitudes de la chaveta y la polea son similares, existiría una resistencia amplia entre la chaveta y los dos elementos mencionados, favoreciendo de esta manera la transmisión del momento torsor, con todo lo indicado y considerando las respuestas obtenidas, tanto por esfuerzos de aplastamiento y esfuerzos cortantes, es conveniente incrementar la longitud de la chaveta a 50 mm.

3.2.14. Diseño de pasadores

Para unir los eslabones es necesario la utilización de pasadores, por esta razón se debe dimensionarlos correctamente.

Las fuerzas por motivo de la acción de los esfuerzos cortantes fluctuantes sobre el pasador producido por las cargas aplicadas son:

$$F_{medio} = F_m = \frac{F_{max} + F_{min}}{2} = \frac{6010 + 30}{2} = 3020 \text{ N}$$

$$F_{alternante} = F_a = \frac{F_{max} - F_{min}}{2} = \frac{6010 - 30}{2} = 2990 \text{ N}$$

Los esfuerzos cortantes medio τ_m y alternante τ_a se calcularán considerando que el pasador estará sometido a cortantes dobles, por lo que el área de contacto es doble ($2 \cdot A$), estos esfuerzos son:

$$\tau_m = \frac{F_m}{2A} \quad (38)$$

$$\tau_a = \frac{F_a}{2A} \quad (39)$$

Se recomienda el método de Goodman cuando existen esfuerzos cortantes fluctuantes, la ecuación (40) indica el factor de seguridad de diseño bajo este criterio, el subíndice s indica cortante (Mott, 2006).

$$\frac{1}{n} = \frac{\tau_m}{S_{su}} + \frac{\tau_a}{S'_{sn}} \quad (40)$$

S_{su} representa la resistencia última a la tensión en cortante y S'_{sn} la resistencia de fatiga en cortante bajo condiciones reales.

Mott (2006) explica que al no contar con datos de resistencia al cortante, se estime con las siguientes relaciones:

$$S_{su} = 0.75 \cdot S_{ut} = 0.75 \cdot 400 = 300 \text{ MPa}$$

$$S'_{sn} = 0.577 \cdot S'_n$$

$$S'_n = S_n \cdot C_m \cdot C_{st} \cdot C_R \cdot C_s$$

S'_n corresponde a la resistencia de fatiga del material bajo condiciones reales y S_n se obtiene de la figura B-5 mostrada en el apéndice, la misma que relaciona la resistencia a la tensión, entonces:

$$S_n = 175 \text{ MPa}$$

Es necesario el conocimiento de los siguientes factores para estimar la resistencia de fatiga del material bajo condiciones reales, Mott (2006) proporciona estos valores.

$$C_m = 1 \text{ (acero colado)}$$

$$C_{st} = 1 \text{ (esfuerzos flexionantes)}$$

$$C_R = 0.90 \text{ (90\% de confiabilidad)}$$

$$C_s = 0.97 \text{ (diámetro entre 12 y 8 mm)}$$

$$S'_n = S_n C_m C_{st} C_R C_s = 175 \cdot 0.90 \cdot 0.97 = 152.76 \text{ MPa}$$

$$S'_{sn} = 0.577 \cdot S'_n = 0.577 \cdot 152.76 = 88.15 \text{ MPa}$$

$$A = \frac{n}{2} \left(\frac{F_m}{S_{su}} + \frac{F_a}{S'_{sn}} \right)$$

$$A = \frac{3}{2} \left(\frac{3\,020}{300 \cdot 10^6} + \frac{2\,990}{88.15 \cdot 10^6} \right) = 65.98 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Y por último el diámetro del pasador será:

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4(65.98 \times 10^{-6})}{\pi}} = 9.17 \text{ mm}$$

3.2.15. Diseño de los rodamientos para los eslabones

Para el dimensionamiento de rodamientos se considera que el mismo estará sometido a cargas variables, es decir no funcionará simplemente con una sola carga de diseño, un procedimiento muy común y el cual explica Mott (2006), se trata de la regla de Palmgren-Miner o regla de Miner, se basa en que si el rodamiento se somete a una serie de cargas de distintas magnitudes, durante tiempos conocidos, cada carga contribuye eventualmente a la falla del rodamiento, en proporción a la relación de la

carga entre la duración esperada que tendría el rodamiento bajo esa carga. Por lo tanto, el efecto acumulado de la serie de carga efectiva media es:

$$F_m = \left(\frac{\sum_i (F_i)^p N_i}{N} \right)^{1/p} \quad (41)$$

Donde:

F_i = carga individual de una serie de i cargas

N_i = número de revoluciones a las cuales opera F_i

N = número total de revoluciones en un ciclo completo

$p = 3$, para rodamientos de bolas

En la tabla 20 se indican las diferentes cargas individuales que se obtienen en un ciclo de la gráfica de amplitud máxima y mínima de fuerzas fluctuantes entre eje y manivela de la figura 49.

Tabla 20

Cargas individuales

Condición	Tiempo [seg]	F_i [N]
1	0,1	325
2	0,3	6500
3	0,75	280
4	1	3750
5	1,3	1800
6	1,75	4300

Con estas condiciones se adquiere una carga media $F_m = 3\,784.5\text{ N}$.

En la tabla B-4 de recomendaciones de vida de cojinetes del apéndice, se propone que el rodamiento tenga una vida de $L_D = 500$ horas y $L_D \cdot n_D \cdot 60 = 10^6$.

La ecuación (42) se utiliza para convertir de una situación de diseño con una carga y vida deseada, a una carga nominal de catálogo.

$$C_{10} = F_m \left[\frac{L_D \cdot n_D \cdot 60}{L_R \cdot n_R \cdot 60} \right]^{\frac{1}{a}} \quad (42)$$

$$C_{10} = 3784 \left[\frac{500 \cdot 1467 \cdot 60}{10^6} \right]^{\frac{1}{3}} = 13.36\text{ KN}$$

Con la ayuda del catálogo de rodamientos (tabla B-5 del apéndice) e ingresando con el valor de carga nominal, se escoge un rodamiento de las siguientes características.

$$d = 10\text{ mm}$$

$$D = 26\text{ mm}$$

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

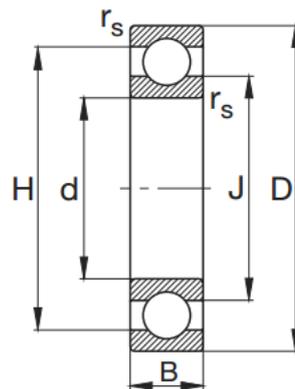


Figura 53. Dimensiones de un rodamiento

Fuente: (Rodamientos FAG, 2000)

Cabe mencionar que además se consideró el diámetro del pasador es decir 10 mm y que el diámetro exterior no exceda la geometría de los eslabones.

3.2.16. Diseño de la Carcaza

Se toma en cuenta los criterios mostrados en el siguiente cuadro.

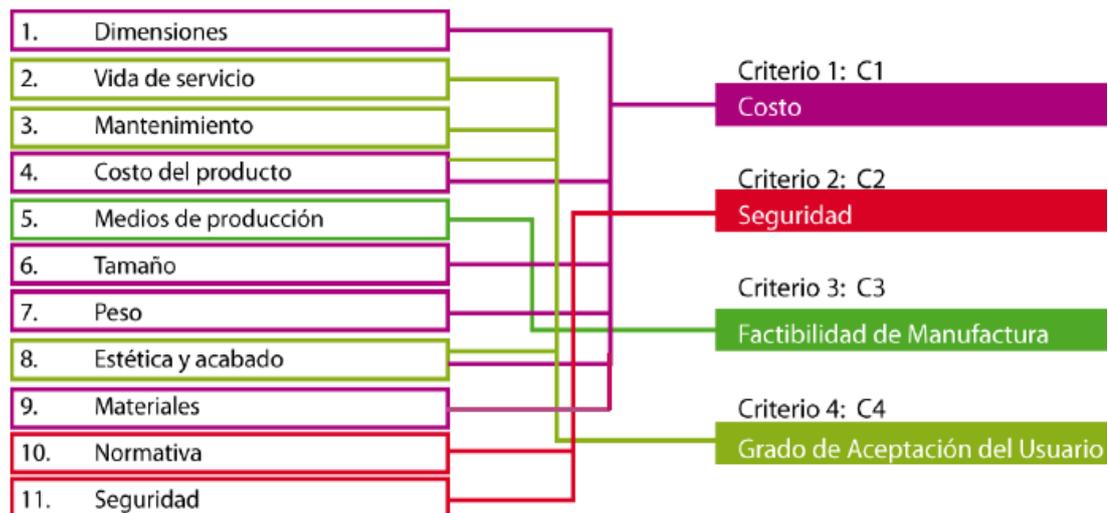


Figura 54. Criterios para el diseño de carcasas

Fuente: (Legaria, 2011)

Con los criterios expuestos se modela la carcaza en el software CAD, se observa en las figuras 55 y 56 lo antes expuesto.

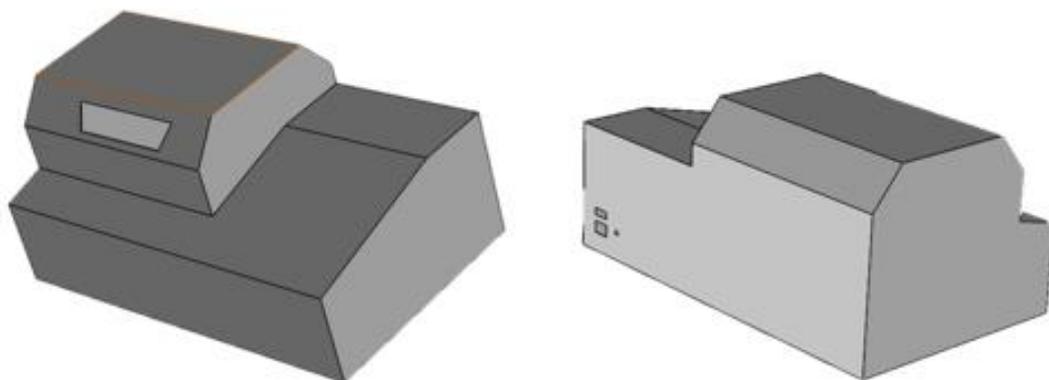


Figura 55. Vista posterior y anterior de la carcaza

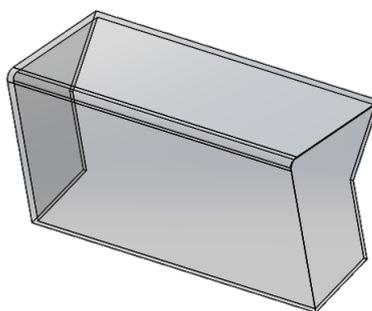


Figura 56. Modelo de la tapa de acrílico

El material de fabricación es tol negro de acero de 1 mm de espesor. Los planos se encuentran disponibles en el apéndice E.

3.3. Diseño eléctrico y electrónico

Un sistema eléctrico es un conjunto de componentes eléctricos (resistencias, capacitores, etc.) conectados entre sí, se caracterizan por estar formados por una fuente de energía, conductores y actuadores que se encargan de transformar la energía eléctrica en otro tipo de energía, lumínica (lámparas), mecánica (motores), térmica (niquelinas) entre otras.

Un sistema electrónico se compone por sensores y transductores capaces de cuantificar diferentes tipos de variables, para que posteriormente una unidad de control, adquiera, interprete y transforme las señales obtenidas de los sensores y transductores a fin de generar acciones. Todo el conjunto de elementos interactúan entre sí para conseguir un resultado deseado.

Para el diseño del sistema eléctrico y electrónico se debe seguir un orden preestablecido, como ilustra la figura 57.

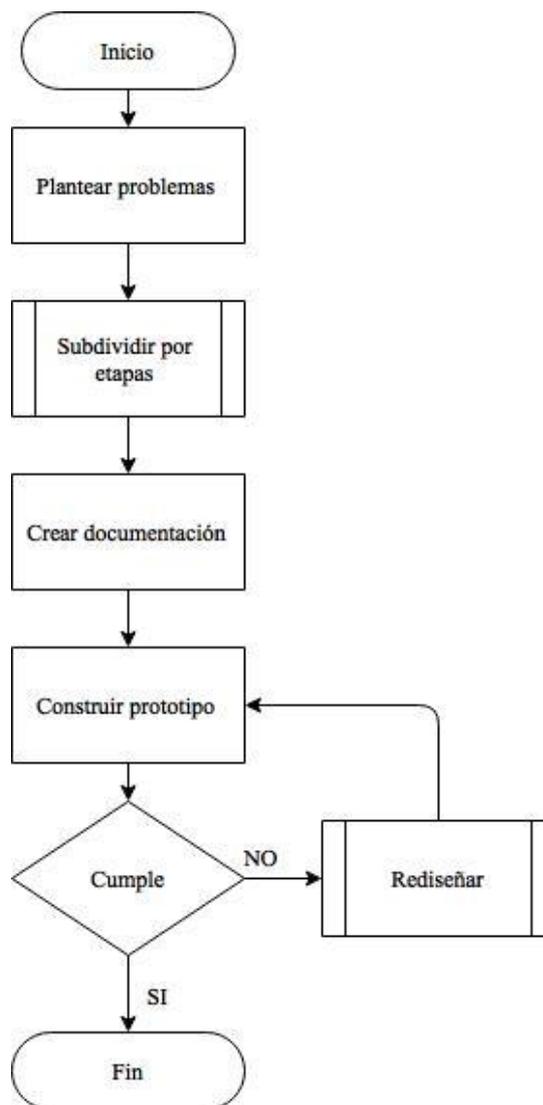


Figura 57. Proceso para el diseño eléctrico – electrónico

3.3.1. Fuente de alimentación

Previamente se ha mencionado la necesidad de una fuente de corriente continua DC para la alimentación del motor.

Boylestad & Nashelsky (2006), señalan en su libro de teoría de circuitos y dispositivos electrónicos dos tipos de fuentes de alimentación: lineales y conmutadas, las lineales constan de un transformador, rectificador, filtro y un regulador de voltaje, se usan principalmente cuando se requiere una salida de voltaje de corriente continua constante, mientras que las fuentes conmutadas tienen un esquema de rectificado, conmutación y salida en donde la conmutación se la realiza mediante transistores, se usa principalmente en fuentes variables de corriente continua.

En el diseño se eligió una fuente lineal de corriente continua con transformador reductor debido a que el motor requiere un voltaje constante para su funcionamiento de 90 voltios y por el costo que implica la fuente, ya que al tener menos elementos y una baja complejidad el costo es menor que el de una fuente conmutada.

Para el diseño de una fuente de alimentación DC (corriente continua) se debe tener presente que estas fuentes parten de un voltaje AC (corriente alterna) y mediante la rectificación se obtiene la señal DC que posteriormente se filtra y finalmente se regula para obtener un voltaje DC constante a la salida de la fuente. En la figura 58 se muestran las etapas necesarias para una fuente de alimentación.

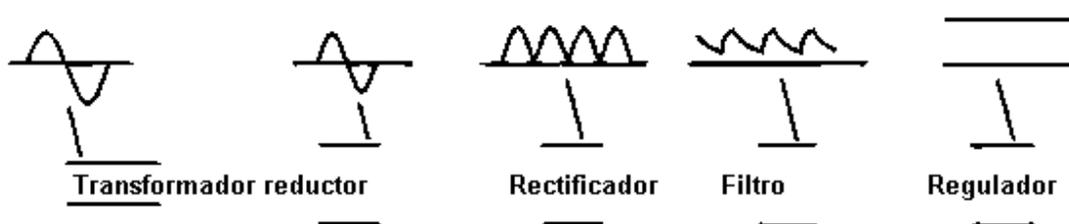


Figura 58. Diagrama de bloques de una fuente lineal

Fuente: (Boylestad & Nashelsky, 2006)

Hay que tener en cuenta las características requeridas como el voltaje necesario y la corriente máxima que puede soportar. Estas consideraciones son fundamentales en el dimensionamiento de la fuente, y se basan en las características y funcionamiento del motor:

- Motor de corriente continua
- Modelo JD5290D090A-12
- Voltaje de operación: 90 VDC
- Corriente nominal $I_{nominal\ del\ motor} = 8.4\ A$
- RPM: 4400
- Rotación: CW (sentido horario)
- Corriente Arranque $I_a = 1.5 \cdot I_{nominal\ motor}$

Así los requerimientos para la fuente son:

- Voltaje: 90VDC (elegido a partir de las características del motor)
- Corriente máxima: $12.6\ A \approx 13\ A$ (Corriente de arranque del motor)

Para la fuente DC se parte de un voltaje de corriente alterna (AC), en Ecuador el voltaje AC es de 120Vrms y 60 Hz por lo que para llegar a la fuente DC se deben considerar las siguientes etapas en el diseño:

- Protecciones
- Rectificación
- Filtrado
- Regulación

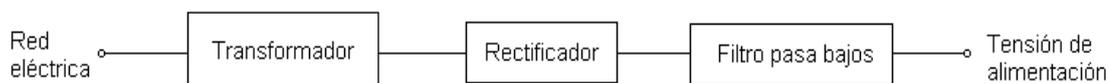


Figura 59. Diagrama de bloques de una fuente lineal

La fuente lineal se regirá bajo el siguiente esquema:

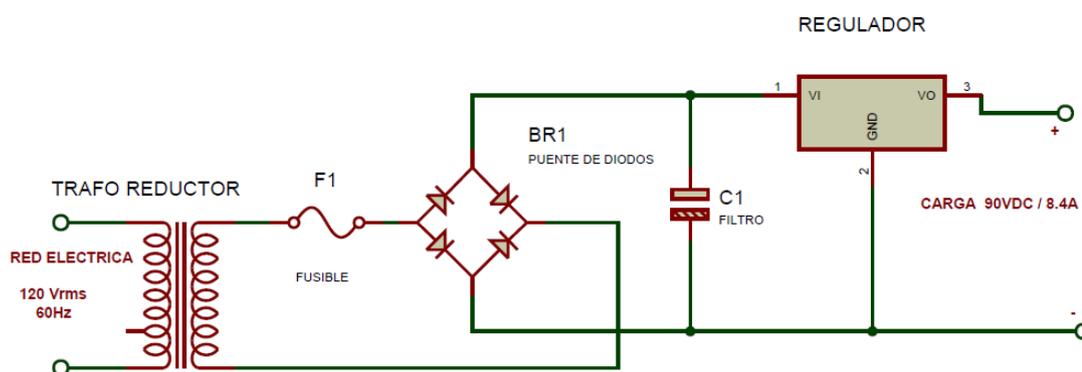


Figura 60. Fuente de alimentación lineal DC

3.3.1.1. Protecciones

Generalmente se colocan fusibles para cortar el suministro de la fuente cuando exista una sobre corriente en el sistema. Su valor se lo elije en función de la corriente de arranque y la máxima corriente de operación.

Franco (2003) propone dos condiciones que se deben cumplir para la elección correcta de un fusible y son:

Condición 1:

$$I_b \leq I_n \leq I_z \quad (43)$$

Condición 2:

$$I_f \leq I_z \cdot 1.45 \quad (44)$$

Donde:

I_b = corriente del circuito

I_n = corriente nominal del fusible

I_z = corriente máxima admisible del conductor protegido

I_f = corriente que garantiza el funcionamiento efectivo de la protección

“Esta condición indica físicamente que el fusible debe dejar pasar la corriente necesaria para que la instalación funcione según la demanda prevista, pero no debe permitir que se alcance una corriente que deteriore el cable, concretamente, su aislamiento, que es la parte débil” (Franco, 2003).

I_b es la corriente nominal del motor e I_z se extrae de la tabla B-6 mostrada en el apéndice, de la cual también se obtiene un conductor de sección 1.5mm^2 .

Aplicando ambas condiciones para el caso práctico se obtiene:

$$8.4A \leq I_n \leq 13.5A$$

En la tabla 21 se muestran los valores normalizados para fusibles.

Tabla 21

Intensidades Nominales normalizadas de los fusibles BT

In [A]							
2	4	6	10	16	20	225	35
40	50	63	80	100	125	160	200
250	315	400	425	500	630	800	1000

Nota: Valores comerciales de fusibles expresados en Amperios

Se elige un fusible de 10A para cumplir con la condición 1, entonces:

$$I_n = 10A$$

Para la condición 2 el valor de I_f se obtiene de la tabla 22.

Tabla 22

Intensidades para corriente convencional de fusión

In [A]	Tiempo convencional [horas]	Corriente convencional de fusión (If) [A]
$I_n \leq 4$	1	2,1 In
$4 \leq I_n \leq 16$	1	1,9 In
$16 \leq I_n \leq 63$	1	1,6 In
$63 \leq I_n \leq 160$	2	1,6 In
$160 \leq I_n \leq 400$	3	1,6 In
$400 \leq I_n$	4	1,6 In

Se reemplaza los valores en la ecuación (44) y se verifica que cumpla la desigualdad:

$$1.9 \cdot 10 \leq 13.5 \cdot 1.45$$

$$19A \leq 19.58A$$

La condición 2 se relaciona con la sobrecarga transitoria que puede soportar el conductor protegido (Franco, 2003).

El fusible BT de 10 A es el elemento elegido ya que cumple con las condiciones impuestas.

3.3.1.2. Rectificación

Se usa un transformador para disminuir el voltaje AC y un puente de diodos para eliminar la parte negativa de la onda (rectificación de media onda u onda completa) produciendo una señal de voltaje DC (Estrella, 2009).

Para el cálculo del transformador se parte de la propiedad de la fuerza electromotriz (FEM), debido a que los embobinados de un transformador están sobre el mismo circuito magnético, el flujo magnético (Φ) es el mismo de modo que:

$$\frac{V_p}{N_p} = \frac{V_s}{N_s} \quad (45)$$

Donde:

V_p = voltaje del primario

N_p = número de vueltas del embobinado primario

V_s = voltaje del secundario

N_s = número de vueltas del embobinado secundario

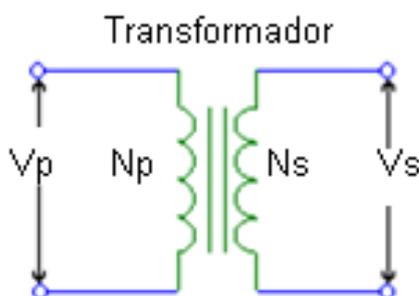


Figura 61. Relación de un transformador.

Los fabricantes proporcionan el voltaje (rms) raíz media cuadrada que es un valor medio constante o eficaz de voltaje, siendo el voltaje pico el mostrado en la siguiente ecuación:

$$V_m = \sqrt{2} \cdot V_{(rms)} \quad (46)$$

$V_{(rms)}$ representa a la tensión de alimentación.

Para la rectificación se empleará un puente de diodos (rectificador de onda completa) puesto que tiene una mayor eficiencia al aprovechar los dos ciclos de la onda sinusoidal.

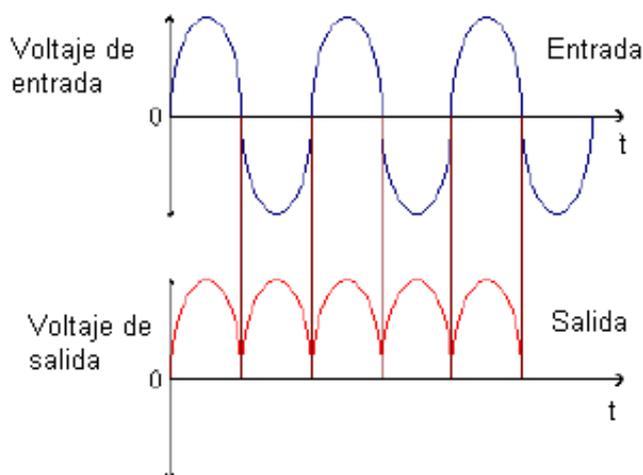


Figura 62. Rectificador de onda completa.

“Con esta configuración se obtiene una componente continua aproximada de 63% del valor pico, y un rendimiento cercano al 81%” (Boylestad & Nashelsky, 2006).

Para el puente rectificador se debe considerar el voltaje en polarización inversa sin entrar en avalancha (V_D) y también el valor máximo de corriente que podrá entregar el puente rectificador, estos valores se especifican en las hoja de datos de los elementos distribuidos por los fabricantes.

$$V_D = 2 \cdot V_{pico} \quad (47)$$

$$I_{FMS} = I_{in} = I_{CEmax} \quad (48)$$

Con estos dos parámetros se podrá elegir un puente rectificador de valores comerciales apropiados.

3.3.1.3. Filtrado

El filtro más básico y sencillo es un filtro que consta de un capacitor en paralelo a la carga para el filtrado de la señal, aquí se usa un condensador electrolítico ya que posee buenas características para reducir el rizado a la salida de la fuente.

El valor del capacitor viene dado por la ecuación (49):

$$C = \frac{I_{dc}}{4 \cdot \sqrt{3} \cdot f \cdot V_{r(rms)}} \quad (49)$$

Siendo:

C = valor del capacitor en faradios [F]

I_{dc} = corriente de consumo del circuito en amperios [A]

f = frecuencia de la red en Hertz [Hz] (para rectificador de onda completa la frecuencia es el doble)

V_r = voltaje de rizado (para el diseño de fuentes de potencia se tiene como un valor máximo de rizado entre 1 y 2.5V)

El factor de rizado o rizo es la relación entre el voltaje de rizo y el voltaje DC y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$r = \frac{V_r}{V_{dc}} \cdot 100\% \quad (50)$$

$$r = \frac{2 \cdot I_{dc}}{C \cdot V_{dc}} \cdot 100\% \quad (51)$$

Donde:

r = porcentaje de rizado, correspondiente a la variación de voltaje en la salida

I_{dc} = corriente DC de consumo, correspondiente a la carga, expresado en [mA]

V_{dc} = voltaje de salida a la carga

C = valor del capacitor expresado en microfaradios [μF]

Para conocer el voltaje de rizado, se aplica las siguientes ecuaciones:

$$V_{r(rms)} = \frac{I_{dc}}{4\sqrt{3} \cdot f \cdot C} \quad (52)$$

$$V_{r(rms)} = \frac{V_r(p-p)}{2\sqrt{3}} \quad (53)$$

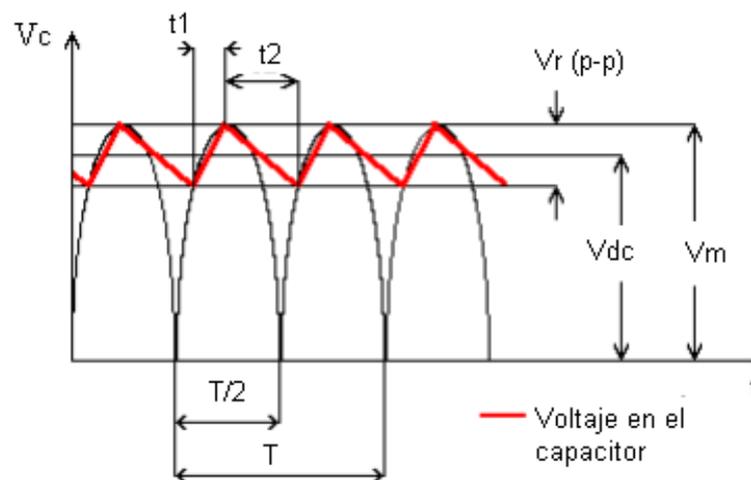


Figura 63. Rectificación de onda completa con filtro capacitivo

3.3.1.4. Regulación

Se elige un regulador acorde a las características de la fuente, para ello se elige un regulador comercial basado en las hojas de datos técnicos del fabricante.

Para todas las etapas se deben fijar ciertos parámetros para su diseño como el rizado y voltaje de salida, ya que se diseñará a partir de la carga que se tiene, en este caso el motor DC, así como el consumo de corriente del circuito (Boylestad & Nashelsky, 2006).

Con la información del rizo y de la elección de una rectificación de onda completa, se tiene:

$$r(\%) \leq 5\%$$

$$I_{dc} = 8.4 \text{ A}$$

$$V_{dc} = 90 \text{ V}$$

Partiendo de la ecuación (51) y reemplazando los valores:

$$5\% = \frac{2.4 \cdot 8400}{C \cdot 90} \cdot 100\%$$

$$C = 4480 \mu F$$

El valor de $V_{r(rms)}$ a la salida de la fuente, utilizando la ecuación (52) es:

$$V_{r(rms)} = \frac{8.4}{4 \cdot \sqrt{3} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 4480 \mu}$$

$$V_{r(rms)} = 2.26 \text{ V}$$

Se calcula el voltaje pico-pico para determinar el valor máximo de voltaje que se tendrá a la salida del puente de diodos, si se considera como una onda triangular mostrada en la figura 63 y usando la ecuación (53).

$$2.26 = \frac{V_{r(p-p)}}{2\sqrt{3}}$$

$$V_{r(p-p)} = 7.81 \text{ V}$$

De la figura 63 se observa que el voltaje máximo V_m , es la suma de los voltajes V_{dc} y la mitad de $V_{r(p-p)}$, denotado por la siguiente ecuación.

$$V_m = V_{dc} + \frac{V_{r(p-p)}}{2}$$

$$V_m = 90 + \frac{7.81}{2} = 93.90 \text{ V}$$

Conociendo el valor máximo se puede determinar el voltaje AC en el secundario del transformador con la ecuación (46).

$$V_m = \sqrt{2} \cdot V_{s(rms)}$$

$$V_{s(rms)} = 66.40 \text{ V}$$

Si el voltaje del primario es la red eléctrica $V_p = 120 V$, se determina la relación de reducción y el número de espiras del transformador empleando la ecuación (45).

$$\frac{V_p}{V_s} = \frac{120}{66.4}$$

$$\frac{V_p}{V_s} = 1.8$$

Para determinar la potencia P del transformador, se parte de la potencia del motor (1 Hp o 746 W) y el factor de potencia (0.85) establecido por el fabricante.

$$P(VA) = \frac{\text{consumo}}{\text{factor de potencia}}$$

$$P(VA) = \frac{746}{0.85} = 877.64 VA$$

Pero el rendimiento de los transformadores varía entre 80% y 90%, por lo cual:

$$P(VA)_{real} = \frac{P(VA)}{80\%}$$

$$P(VA)_{real} = \frac{877.64}{80\%} \approx 1 KVA$$

Con esto se procede a la selección de los componentes comerciales, se optó por un transformador reductor 120V/60V y de 1 KVA de potencia, con ello se realiza nuevamente el cálculo en base a este dato, partiendo del voltaje del lado secundario se conoce el voltaje DC a la salida del puente de diodos.

$$V_{dc} = 2 \cdot \frac{V_m - V_{diodo}}{\pi}$$

$$V_{dc} = 2 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot V_{s(rms)} - 2 \cdot 1}{\pi}$$

$$V_{dc} = 2 \cdot \frac{\sqrt{2} \cdot 60 - 2}{\pi}$$

$$V_{dc} = 52.74 V$$

EL diodo será seleccionado considerando las ecuaciones (47) y (48).

$$V_D = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot 60$$

$$V_D = 169.7 V$$

$$I_{FMS} = I_{in} = I_{CEmax}$$

En base a la hoja de datos se escoge un puente de diodos de la serie G5SBA20 que cumple las características deseadas.

Se selecciona un capacitor de valor comercial para la etapa de filtrado aproximado al calculado.

$$V_c = \sqrt{2} \cdot V_{red}$$

$$V_c = \sqrt{2} \cdot 120 = 169.70 \text{ V}$$

El capacitor será de 4700 μF y 200 V.

Se procede a calcular el voltaje de rizo definitivo fundamentado en la ecuación (52) y (53).

$$V_{r(rms)} = \frac{8.4}{4 \cdot \sqrt{3} \cdot 2 \cdot 60 \cdot 4700 \cdot 10^{-6}}$$

$$V_{r(rms)} = 2.15 \text{ V}$$

Siendo el valor pico:

$$2.15 = \frac{V_{r(p-p)}}{2\sqrt{3}}$$

$$V_{r(p-p)} = 7.45 \text{ V}$$

Finalmente para el voltaje de salida de la fuente se utiliza la ecuación (46) para su cálculo:

$$\sqrt{2} \cdot 60 = V_{dc} + \frac{7.45}{2}$$

$$V_{dc} = 81.12 \text{ V}$$

Este será el voltaje que suministre la fuente y con un rizado de:

$$r = \frac{2.15}{81.12} \cdot 100\%$$

$$r = 2.65\% \leq 5\%$$

La tabla 23 muestra los componentes elegidos para la fabricación de la fuente.

Tabla 23

Lista de componentes

Componentes	Características	Serie	Fabricante
Transformador	120/60V, 60Hz y 1KVA	RCA900N	Honeywell
Puente de diodos	200V / 6A	G5SBA20	Vishay
Capacitor	electrolítico a 200V	4470 μF	GHC
Fusible	10 A	-	ABB

3.3.2. Sistema de control y potencia

3.3.2.1. Diseño del circuito de control y potencia

Para el circuito de control de un motor DC los cuales se controlan por modulación de ancho de pulso (PWM) cuando son de media y baja potencia, en el caso del motor de 1 Hp se lo considera de potencia media. Esta modulación se la realiza mediante un tren de pulsos múltiples, donde todos los pulsos tienen el mismo ancho, que es directamente proporcional al ciclo de trabajo del motor.

Una vez definido el sistema de control se inicia con la identificación de variables: controlada, manipulada y de carga.

- Variable controlada: Velocidad angular del motor DC
- Variable manipulada: Caída de tensión en el motor controlada por el ciclo de trabajo del PWM enviado por el microcontrolador
- Variable de carga: Perturbaciones del sistema, las cuales son el peso de la carga en el porta cápsulas, voltaje de la red eléctrica y el balanceo del motor

Al definir las variables se tiene claro el comportamiento del sistema de control, la entrada será introducida por el usuario, el microcontrolador proporcionará una señal de mando mediante la señal del sensor y empleando un circuito de potencia se controlará la planta (motor DC) con el fin de regular la frecuencia de oscilación del mecanismo manivela balancín.

Para el diseño del circuito de control se toma en consideración la estructura de diagrama de bloques y a partir del esquema, elegir y dimensionar al circuito. En la figura 64 se denota que el sistema está dividido en dos etapas, cada una con dos bloques.

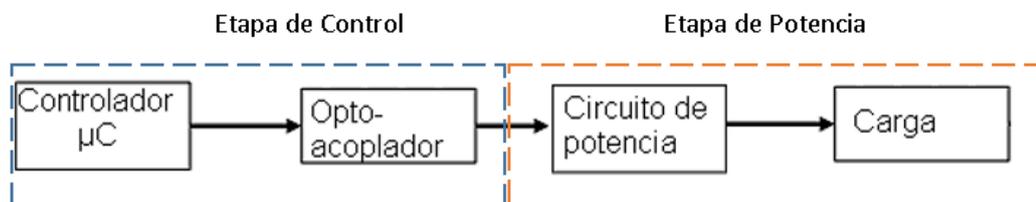


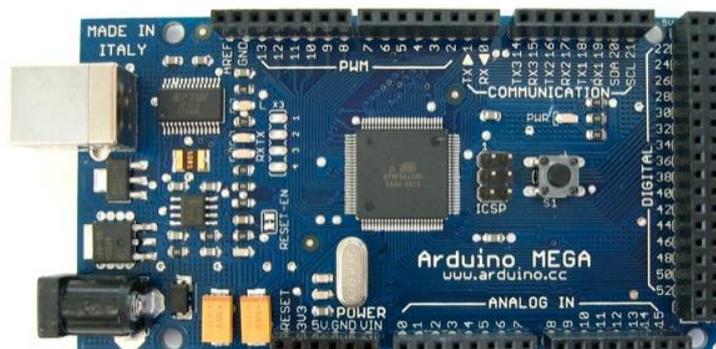
Figura 64. Diagrama de bloques del circuito

El microcontrolador (μC), es la plataforma Arduino, para el equipo se escoge un Arduino MEGA 2560 por su mayor número de entradas y salidas tanto digitales como analógicas que satisfacen los requerimientos del proyecto.

Tabla 24**Características de Arduino mega2560**

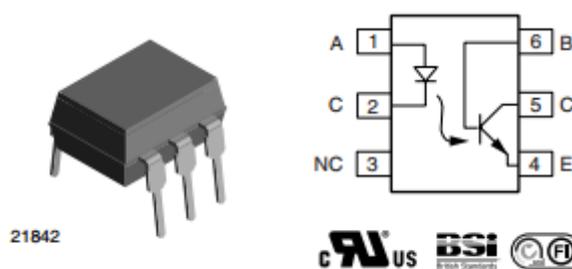
Microcontroladores Atmega2560	
Voltaje de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada	7-12V
Voltaje de entrada (límites)	6-20V
Pines E / S digitales	54 (15 PWM)
Pin es de entrada analógica	16
DC Corriente por I / O Pin	40 mA
Corriente CC para Pin 3.3V	50 mA
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad del reloj	16 MHz

Fuente: Arduino (2013)

**Figura 65. Arduino mega 2560**

Fuente: (Arduino, 2015)

Para operar un circuito de potencia mediante un microcontrolador se debe tener ciertas consideraciones, dentro de las cuales están las características de la carga, del microcontrolador y los voltajes de alimentación que requieren cada elemento dentro del sistema eléctrico-electrónico, para tener una separación entre la etapa de control y la de potencia.

**Figura 66. Optoacoplador**

Fuente: (Vishay, 2012)

Por lo tanto, para aislar se utilizan relés y optoacopladores (figura 66), en este caso al tener un control por PWM, la velocidad de conmutación que requiere el sistema es alta, por lo cual se descarta la opción de relé y se escoge un optoacoplador que como muestra el fabricante VISHAY (tablas C-1 y C-2 del apéndice) el tiempo de conmutación es de 10 μ s.

Para la elección del transistor de potencia que controlará el motor, se basa en los siguientes criterios de selección, fundamentados en las características de los transistores.

Tabla 25

Características de los transistores de potencias

Criterio	MOSFET	Bipolar
Impedancia de entrada	Alta (1010 ohmios)	Media (104 ohmios)
Ganancia en corriente	Alta (107)	Media (10-100)
Resistencia ON (saturación)	Media / alta	Baja
Resistencia OFF (corte)	Alta	Alta
Voltaje aplicable	Alto (1000 V)	Alto (1200 V)
Máxima temperatura de operación	Alta (200°C)	Media (150°C)
Frecuencia de trabajo	Alta (100-500 Khz)	Baja (10-80 Khz)
Costo	Alto	Medio

Fuente: (Savant, 2010)

Para ello se realiza una matriz de selección en base a las características de interés en la aplicación como se muestra en la tabla 26.

Tabla 26

Matriz de selección para transistores de potencia

Criterio	Peso	MOSFET	Bipolar
Impedancia de entrada	10%	10	8
Ganancia en corriente	15%	9	7
Voltaje aplicable	10%	8	10
Máxima temperatura de operación	10%	9	7
Frecuencia de trabajo	20%	10	6
Disponibilidad en el mercado	20%	8	9
Costo	15%	5	9
Total	100%	8,4	7,9

La matriz de selección indica que el transistor de potencia más adecuado es el tipo Mosfet, por su velocidad de conmutación y baja corriente necesaria para el disparo. El MOSFET seleccionado es de la serie IRF740 (para consultar sus características ver tablas C-3 y C-4 del apéndice) de canal N como se muestra en la figura 67.

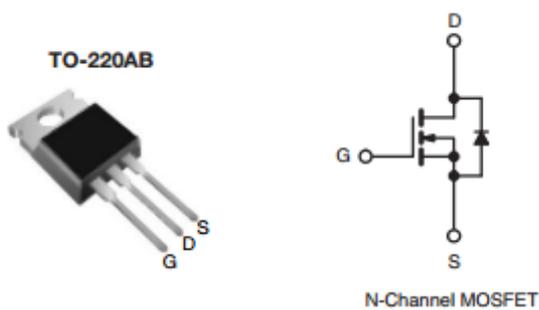


Figura 67. Mosfet IRF740

Fuente: (Vishay, 2012)

El circuito queda definido como se ilustra en la figura 68, donde hace falta calcular los valores de las resistencias y sus respectivas potencias.

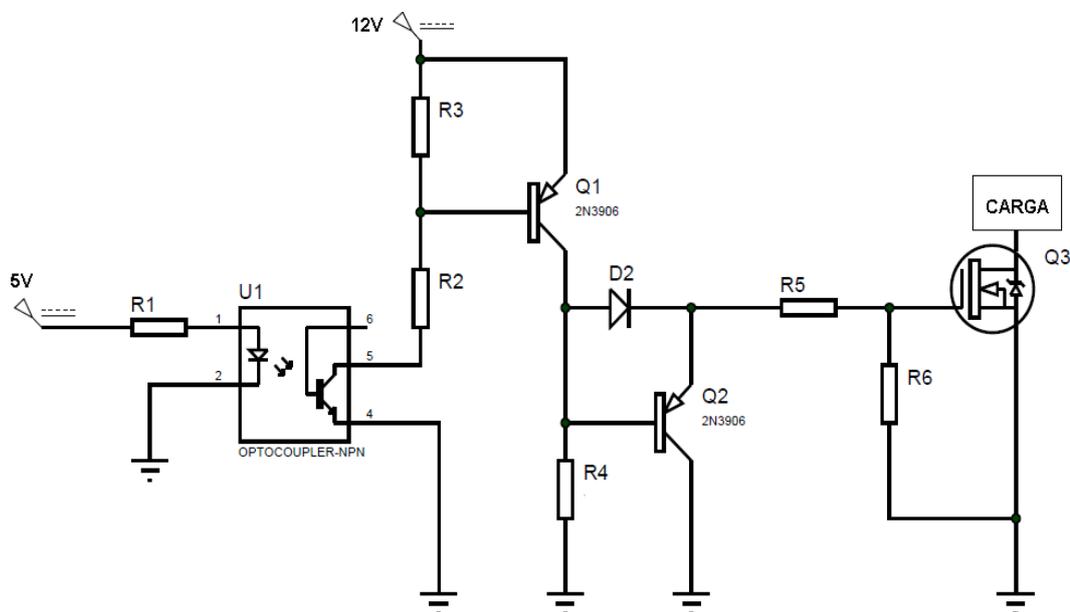


Figura 68. Sistema electrónico para el control de motor DC por PWM

Para el cálculo de la resistencia $R1$ se simplifica el circuito a uno más sencillo como muestra la figura 69.

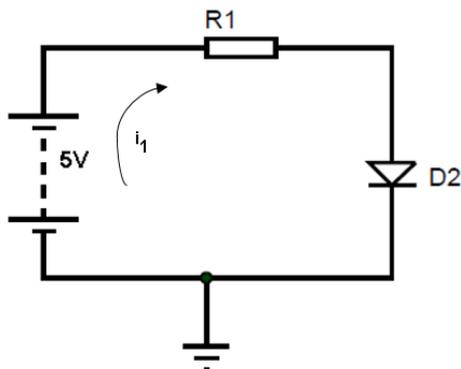


Figura 69. Simplificación de optoacoplador

Aplicando la primera ley de Kirchhoff para voltajes (LKV):

$$\sum V_i = 0$$

$$-5V + i_1 R_1 + V_{D1} = 0$$

Las especificaciones del elemento indican que la corriente que debe circular por el fotodiodo para su correcto funcionamiento debe ser aproximadamente 15mA y el voltaje de consumo de diodo es de 0,7 V (ver tabla C-5 del apéndice), se tiene que:

$$-5V + 0.015R_1 + 0.7 = 0$$

$$R1 = 287\Omega$$

Antes del cálculo hay que definir parámetros de voltajes y corrientes tanto para el diodo como para los transistores.

Para los transistores pnp 2n3906 se tienen los siguientes datos determinados por el fabricante. (Tabla C-6 del apéndice).

$$\text{Voltaje colector emisor: } V_{CE}(sat) = -0.25V$$

$$\text{Voltaje base emisor: } V_{BE}(sat) = -0.85V$$

$$\text{Ganancia: } H_{FE} = \beta = 10$$

$$\text{Corriente de colector: } I_c = 10mA$$

En el transistor se conoce que las corrientes están relacionadas por la ganancia (β) de la siguiente manera:

$$I_c = \beta \cdot I_B \quad (54)$$

$$I_E = (\beta + 1) \cdot I_B \quad (55)$$

Conociendo el valor de I_c y β se procede a calcular las corrientes en la base y el emisor en cada transistor BJT.

$$I_B = 1 mA$$

$$I_E = 11 mA$$

Para el diodo 1n4001 (mostrada en la tabla C-5 del apéndice), los datos son:

$$\text{Voltaje diodo } V_D = 0.7 V$$

Para el transistor de potencia MOSFET IRF740. (Ver tabla C-3 del apéndice).

$$\text{Corriente gate source: } I_{GSS} = 100 \mu A$$

$$\text{Corriente de mínima de activación: } I_{DS} = 25 \mu A$$

Corriente máxima de drenaje: $I_D = 10 \text{ A}$

Voltaje drain source: $V_{DS} = 400 \text{ V}$

Voltaje gate source: $V_{GS} = 10 \text{ V}$

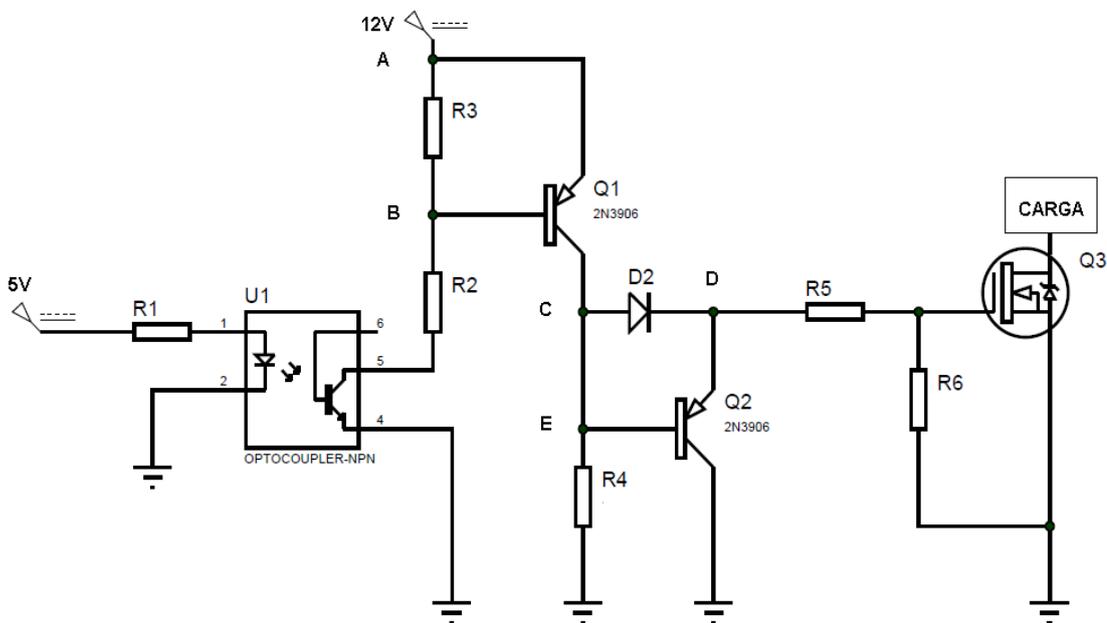


Figura 70. Circuito aplicando nodos

Aplicando la segunda ley de Kirchhoff para corrientes (LKC) en la figura 70, se tiene que:

$$\sum I_{entran} = \sum I_{salen} \quad (56)$$

Nodo A:

$$i_1 = i_{R3} + I_{E(Q1)}$$

$$i_1 = i_{R3} + 11 \text{ mA}$$

Nodo B:

$$i_{R3} + I_{B(Q1)} = i_{R2}$$

$$i_{R2} = I_{C(opto)} = 10 \text{ mA}$$

$$i_{R3} + 1 \text{ mA} = 10 \text{ mA}$$

$$i_{R3} = 9 \text{ mA}$$

Aplicando voltaje:

$$V_{BE(sat Q1)} + V_{R2} + V_{CE(sat opto)} = 12 \text{ V}$$

$$0.85 + 0.01 \cdot R2 + 0.25 = 12 \text{ V}$$

$$R2 = 1090 \Omega$$

$$V_{R3} + V_{R2} + V_{CE(sat opto)} = 12 \text{ V}$$

$$0.009 R3 + 0.01(1090) + 0.25 = 12 V$$

$$R3 = 94.44 \Omega$$

Nodo C:

$$I_{C(Q1)} = i_2 + i_{D2}$$

$$10 mA = i_2 + i_{D2}$$

El transistor actúa en corte por ende sus corrientes son nulas.

Nodo D:

$$i_{D2} = I_{E(Q2)} + i_{R5}$$

$$i_{R5} = I_{DSS(Q3)} = 25 \mu A$$

$$i_{D2} = 0 + 25 \mu A$$

$$i_{D2} = 25 \mu A$$

Reemplazando i_{D2} en nodo C:

$$10 mA = i_2 + 25 \mu A$$

$$i_2 = 9.975 mA$$

Nodo D:

$$i_2 + I_{B(Q2)} = i_{R4}$$

$$i_{R4} = 9.975 mA + 0$$

$$i_{R4} = 9.975 mA$$

Aplicando voltajes:

$$V_{CE(sat Q1)} + V_{R4} = 12 V$$

$$0.25 + 0.009975 \cdot R4 = 12 V$$

$$R4 = 1177 \Omega$$

Para el voltaje en el Nodo C:

$$V_C - V_{GND} = V_{R4} = 9.975 mA \cdot 1177$$

$$V_{GND} = 0 V$$

$$V_C = 11.74 V$$

Para la Resistencia R5:

$$V_{R5} = i_{R5} \cdot R5$$

$$V_C - V_{GS} = 25 \mu A \cdot R5$$

$$11.74 - 10 = 25 \mu A \cdot R5$$

$$R5 = 69.6 K\Omega$$

Para drenar la corriente entre los terminales gate (G) y source del IRF740 se debe colocar una resistencia de valor alto para la correcta conmutación y evitar que la carga quede enclavada, se recomiendan valores del orden de los mega ohmios por lo cual:

$$R6 = 10 \text{ M}\Omega$$

Al elegir las resistencias se consideran los valores comerciales, así también, se debe conocer la potencia de las mismas. La potencia de una resistencia se la calcula con la corriente que circula y el valor de la resistencia, aplicando la ecuación:

$$P = I^2 \cdot R \quad (57)$$

En la siguiente tabla se ilustra la lista de valores comerciales para cada resistencia y su respectiva potencia.

Tabla 27

Resistencias seleccionadas

Símbolo	Valor Comercial [Ω]	Potencia elegida [W]
R1	330	1/8
R2	1K	1/8
R3	100	1/8
R4	1,2K	1/8
R5	68K	1/8
R6	10M	1/8

3.3.3. Instrumentación

3.3.3.1. Final de carrera

Es un dispositivo mecánico, que actúa como interruptor enviando señales al microcontrolador con el objetivo de modificar el estado de un sistema o realizar una acción programada, se lo ubica al final del recorrido de un elemento móvil, para el caso específico se lo colocará de tal manera que el microcontrolador interprete que la compuerta de seguridad está cerrada o abierta.



Figura 71. Microswitch o final de carrera

Fuente: (SoloStocks, 2014)

3.3.3.2. Encoder

Es un codificador óptico, “se utilizan para la medida de posición y velocidad angular y lineal” (Pérez, Alvarez, Campo, Ferrero , & Grillo , 2012). Los encoders ópticos se dividen en dos subgrupos, incrementales (compuesto por un disco ranurado solidario al movimiento el cual mide la cantidad de pulsos o flancos en determinado tiempo) y absolutos (codificados digitalmente por un código binario).

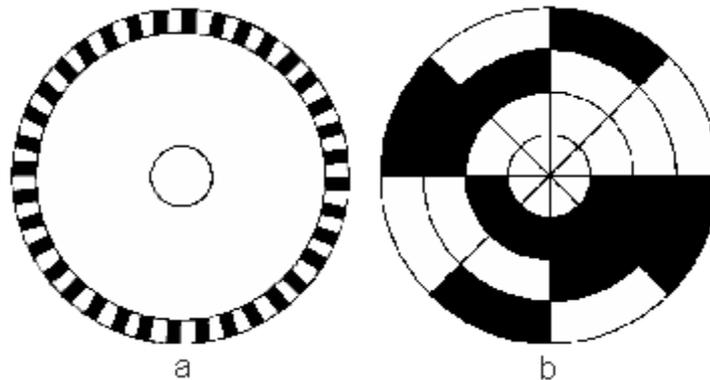


Figura 72. Encoder a) Incremental b) absoluto

El encoder seleccionado mostrado en la figura 73 es de tipo incremental, de menor costo y complejidad razón por la cual es el elegido para la aplicación.

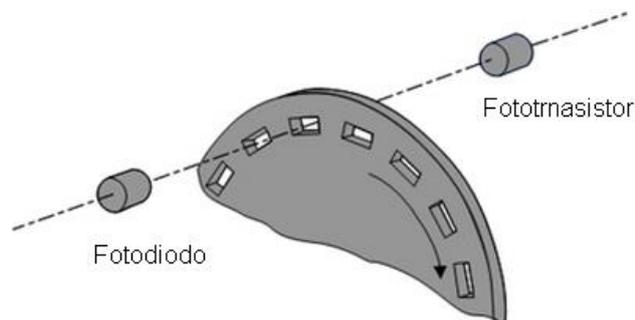


Figura 73. Encoder óptico incremental

Fuente: (Unileón, 2008)

La medida de velocidad se la efectúa en el motor a partir de la frecuencia obtenida en base a la señal del fotodetector como ilustra la figura 74, el cual actúa como un interruptor. La resolución se determina por el número de ranuras en el disco, para el caso particular será de 50 pulsos por cada revolución, lo que significa que el disco debe contener 50 ranuras (simétricas y equidistantes).

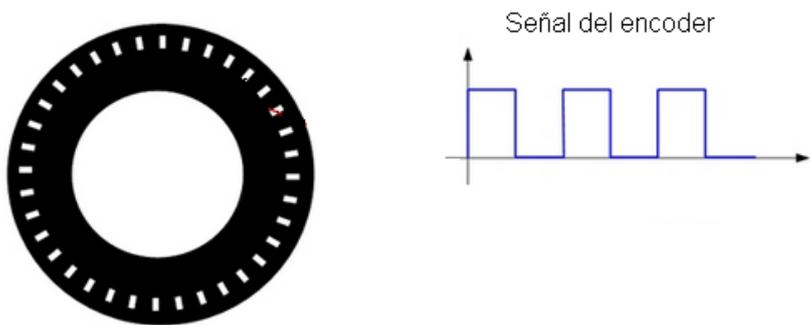


Figura 74. Señal encoder

Fuente: (Unileón, 2008)

3.3.3.2.1. Circuito para encoder óptico

Pérez (2012), en su obra plantea un circuito de acondicionamiento para el encoder óptico mostrado en la figura 75, usando el integrado ITR8102 de la figura 76, cuyas características están en la tabla C-7 del apéndice.

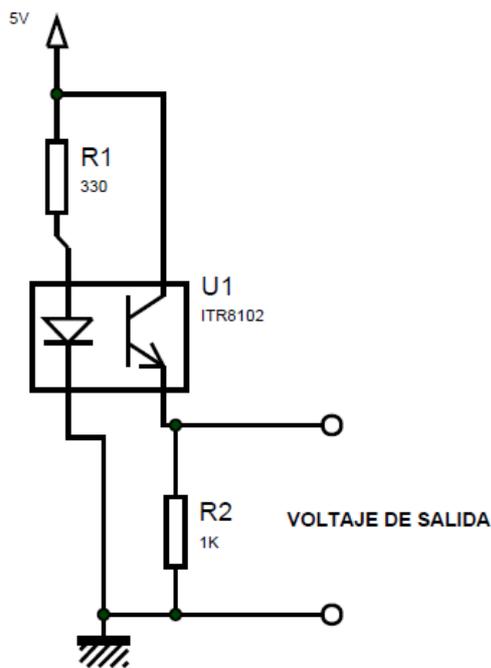


Figura 75. Circuito de acondicionamiento para encoder óptico

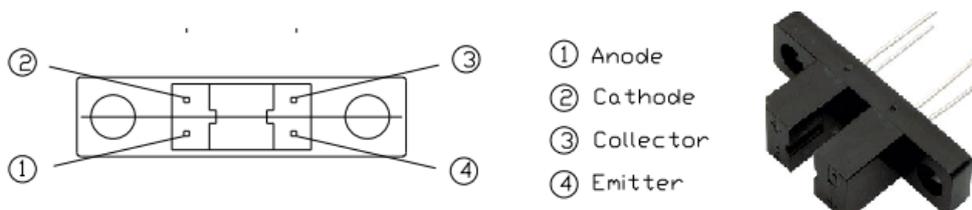


Figura 76. Terminales del integrado ITR8102

Fuente: (Everlight, 2010)

3.3.4. Sistemas auxiliares - alarmas

3.3.4.1. Led RGB

Es un dispositivo electrónico, consta de tres diodos emisores de luz (rojo, verde y azul) el cual permite configurar cualquier color mediante el voltaje que se envíe a cada uno de sus terminales.

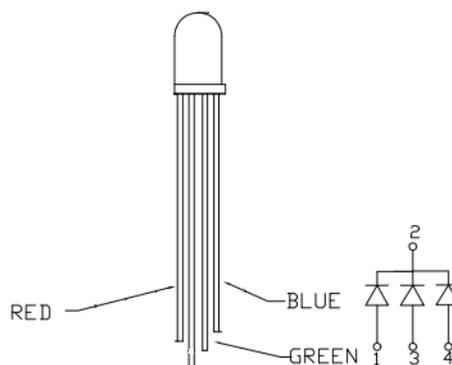


Figura 77. Led RGB

Fuente: (100LED, 2012)

La tabla 28 muestra el color y estado de cada uno de ellos.

Tabla 28

Estado / color para led RGB

ESTADO	COLOR	OBSERVACIONES
Habilitado	Verde	Ingreso de parámetros
Paro	Rojo	Finalización proceso
Marcha	Azul	En funcionamiento

3.3.4.2. Buzzer

Es un dispositivo electrónico de audio, conocido también como timbre, tiene el objetivo de dar una señal audible de diferentes frecuencias configurables en un microcontrolador. Indicará el final del proceso de trituración y homogenización de las muestras vegetales.



Figura 78. Buzzer

Fuente: (Shallowsky, 2014)

3.4. Conductores

3.4.1. Cálculo de calibre de cables eléctricos

Las dimensiones del cable eléctrico parten de la potencia que debe tener el conductor, concretamente de la corriente que circulara por el cable hacia la carga, para cada etapa del sistema se debe considerar la corriente de consumo, cabe recalcar que al ser un equipo compacto de laboratorio el cableado no será extenso y no se considera pérdidas de tensión en los conductores.

Para calcular la sección transversal del conductor (calibre), se aplica la ecuación (58) para las líneas de corriente continua (DC) y la ecuación (59) para las líneas de corriente alterna monofásica (AC):

$$S = \frac{2 \cdot \rho \cdot L \cdot I}{\Delta V} \quad (58)$$

$$S = \frac{2 \cdot \rho \cdot L \cdot I \cdot \cos\phi}{\Delta V} \quad (59)$$

Donde:

S = la sección del conductor [mm^2]

ρ = resistividad del material [Ω/mm^2]

L = longitud del cable [m]

I = intensidad de corriente eléctrica en amperios [A]

$\cos\phi$ = factor de potencia, adimensional []

ΔV = caída de tensión [V]

En la tabla 29 se muestran las etapas del circuito de manera general y el consumo de intensidad de cada una de ellas, así como el calibre seleccionado (ver tablas B-7 y B-8 en el apéndice).

Tabla 29

Criterio de selección para calibre de conductores eléctricos

Etapa	Tipo de corriente	ΔV [V]	Corriente de operación [A]	Calibre AWG	Corriente máxima para conductor [A]
Alimentación	AC	110	11	16	13
Carga	DC	90	10	16	13
Control	DC	5	0,5	24	0,57
Disparo	DC	12	0,5	24	0,57

No se considero caídas de tensión debido a que la longitud del cable es muy pequeña, casi despreciable, y un factor de seguridad de 1,2.

3.5. Disipadores

3.5.1. Cálculo de disipadores

Para el correcto funcionamiento de los elementos de potencia, los cuales se calientan por la corriente que fluye en sus terminales, se colocan disipadores que evitan el calentamiento excesivo del dispositivo mediante la emisión de calor a un bloque de metal (generalmente aluminio), el cual por conducción al estar en contacto con el dispositivo, absorbe calor del mismo y lo emana al ambiente por convección.

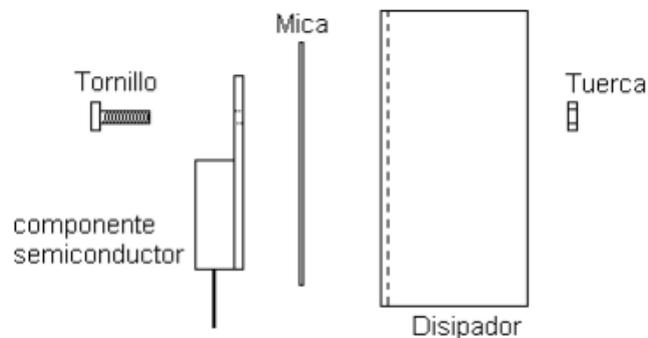


Figura 79. Disipadores en elementos semiconductores

Fuente: (Trujillo , Pozo, & Triviño, 2011)

“Al igual que en los circuitos eléctricos, se puede definir una Ley de Ohm en los circuitos de flujo de calor” (Trujillo, Pozo, & Triviño, 2011) y se establece una analogía entre un circuito eléctrico y un sistema térmico, como muestra la figura 80.

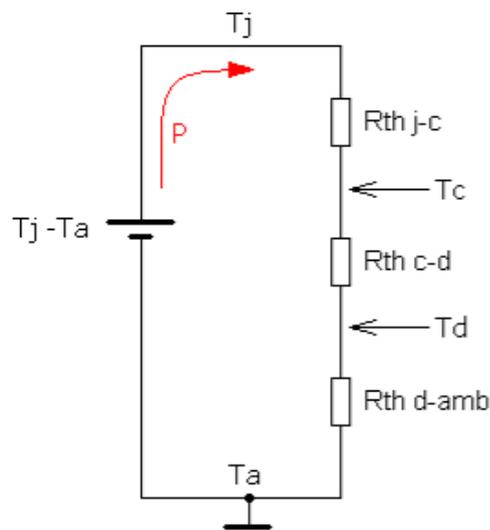


Figura 80. Analogía para la ley de Ohm Térmica

Fuente: (Trujillo, Pozo, & Triviño, 2011)

Donde:

T_j = temperatura de la unión semiconductor

T_a = temperatura del aire circundante

T_c = temperatura de la cápsula del transistor

T_d = Temperatura del disipador

$R_{th_{j-c}}$ = resistencia térmica entre la unión y la cápsula

$R_{th_{c-d}}$ = resistencia térmica entre la cápsula y el disipador

$R_{th_{d-amb}}$ = resistencia térmica entre el disipador y el ambiente

P = potencia disipada en forma de calor por el transistor

La ley de Ohm térmica se expresa en la ecuación:

$$T_j - T_a = P \cdot (R_{th_{j-c}} + R_{th_{c-d}} + R_{th_{d-amb}}) \quad (60)$$

Vishay fabricante del integrado IRF740, proporciona en su hoja técnica los siguientes datos:

$$R_{th_{j-c}} = 1^\circ C/W$$

$$T_j = 150^\circ C$$

La unión se la realizará directa con silicona termo conductora por lo cual:

$$R_{th_{c-d}} = 1^\circ C/W$$

$$P = 30W$$

La temperatura ambiente del circuito será la temperatura de operación del circuito:

$$T_j = 50^\circ C$$

Se reemplaza los datos en la ecuación (60) y se obtiene la resistencia térmica que debe tener el disipador.

$$R_{th_{d-amb}} = \frac{150^\circ C - 50^\circ C}{30W} - 1^\circ C/W - 1^\circ C/W$$

$$R_{th_{d-amb}} = 1.33^\circ C/W$$

Hay que tener en cuenta un factor de seguridad para su elección el cual será de 1.2

$$R_{th_{d-amb}(FS)} = 1.6^\circ C/W$$

Para seleccionar el disipador hay que referir esta resistencia térmica a catálogos, SGS-THOMSON, propone en su tabla (ver tabla C-8 del apéndice) una selección adecuada para el disipador, así como el fabricante y el tipo de montaje al PCB.

El modelo seleccionado es Alutronic PR140 de montaje horizontal y colocación por tornillo con una resistencia térmica de $2^{\circ}\text{C}/\text{W}$.

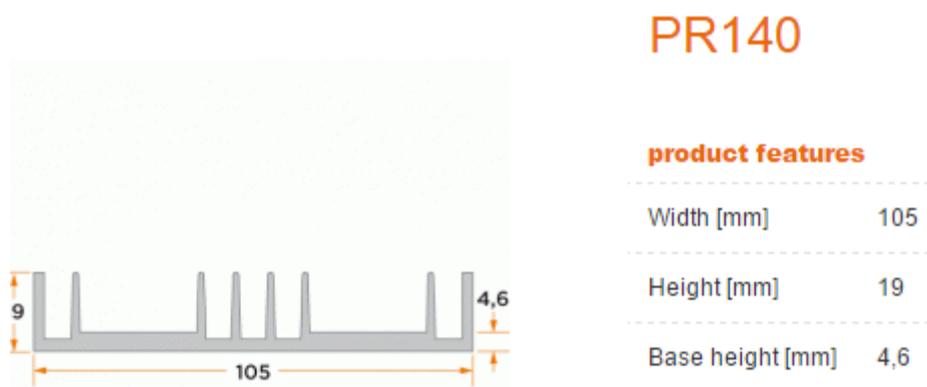


Figura 81. Disipador PR140

Fuente: (ALUTRONIC, 2015)

3.6. Diseño de la placa controladora

3.6.1. Diseño de la placa del circuito impreso

Para el diseño de la placa de circuito impreso o PCB, se inicia realizando el modelo esquemático en el software de simulación (ver figura E-1 del apéndice), seleccionando los elementos calculados.

Utilizando las normas del IPC2221 para el diseño de la PCB se crea el esquema y se traza el circuito.

De acuerdo a la norma IPC 2221 y a la simulación, el área adecuada para la PCB es una placa formato A2 ($120 \times 80 \text{ mm}$), como se presenta en la figura 82.

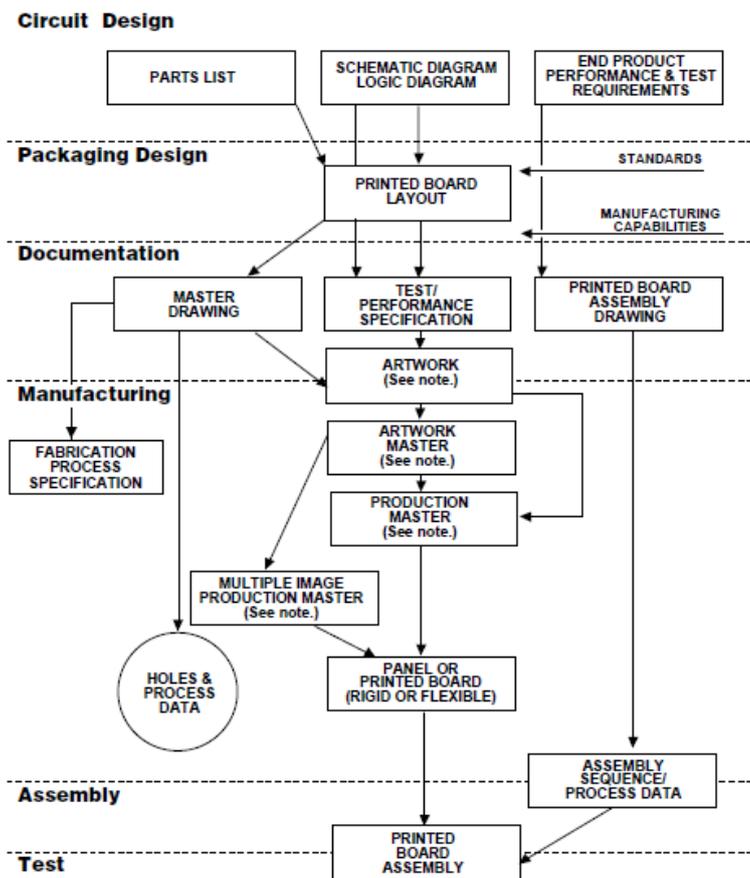


Figura 82. Esquema general norma 2221

Fuente: (Norma IPC2221, 2010)

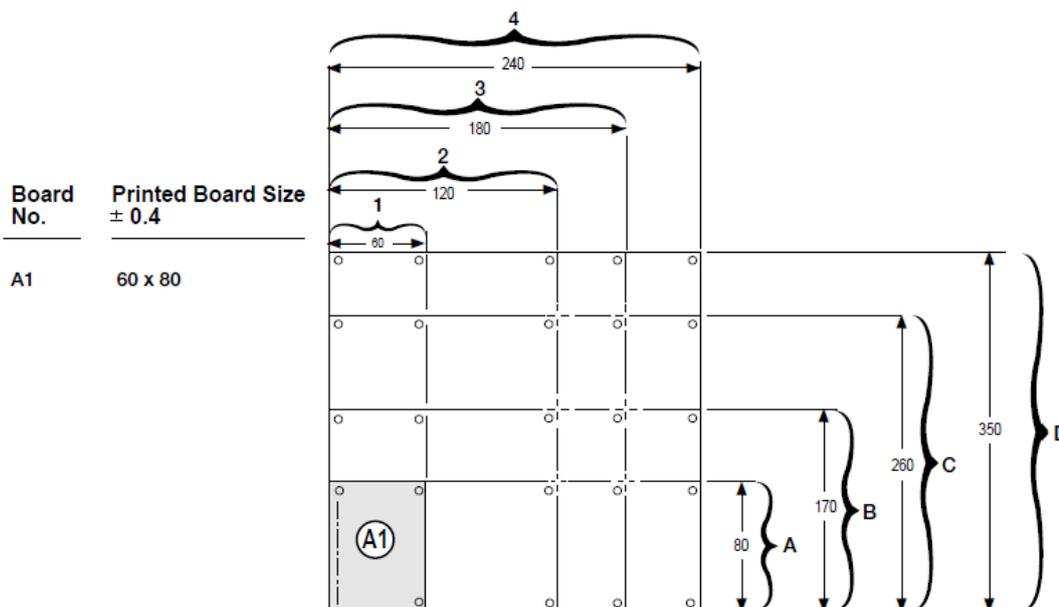


Figura 83. Formatos para placas

Fuente: (Norma IPC2221, 2010)

Para el ruteado de las pistas se toma en cuenta las tolerancias en los agujeros, el tamaño de los pads de soldadura, la colocación de los elementos, la separación entre pistas y los anchos de pistas.

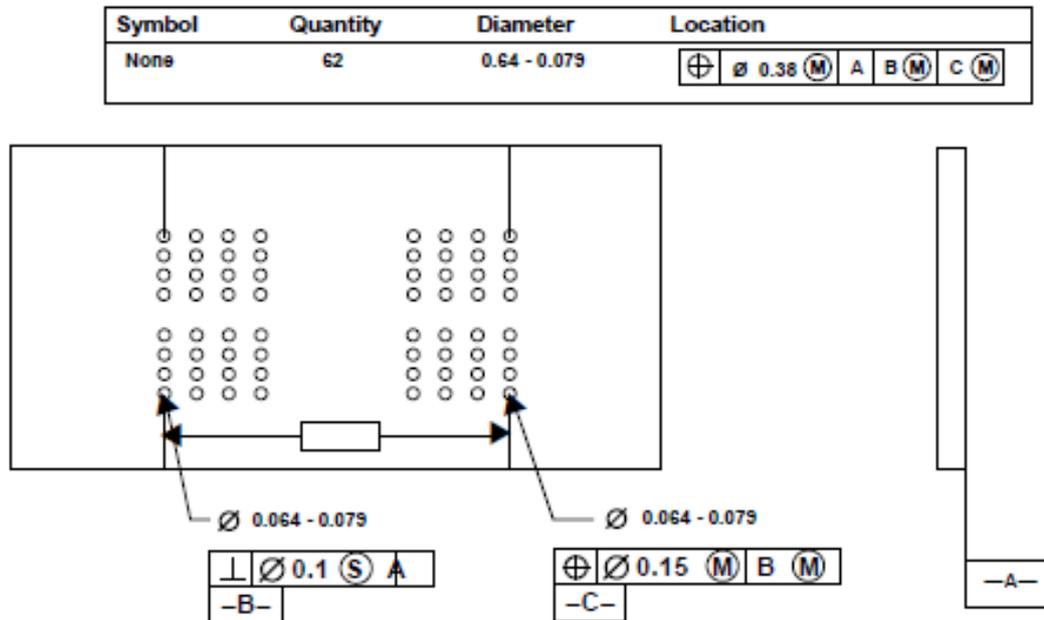


Figura 84. Esquema general norma 2221

Fuente: (Norma IPC2221, 2010)

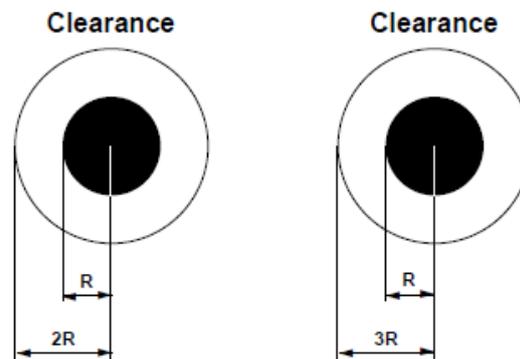


Figura 85. Diseño de pads de soldadura

Fuente: (Norma IPC2221, 2010)

3.6.2. Cálculo de ancho de pista

La temperatura a la que operará la placa, es decir la temperatura de trabajo será de 50 °C.

El material elegido por costo y funcionalidad es una fibra de vidrio FR4 con una temperatura de operación entre (129 – 140 °C) y de $1 \text{ }^{\circ}\text{Z}/f_t^2$, lo que significa que tiene una onza y una capa (1/0).

$$T_r = T_{FR-4} - T_{op} \quad (61)$$

Donde:

T_r = temperatura de subida

T_{FR-4} = temperatura de operación para FR-4

T_{op} = temperatura de operación para el circuito

$$T_{op} = 50^{\circ}\text{C}$$

$$T_{FR-4} = 129^{\circ}\text{C}$$

$$T_r = 129 - 50 = 79^{\circ}\text{C}$$

La corriente máxima a la que trabajará el circuito de potencia es 8.4 A y el de control es 500 mA entonces se encuentra el área con la ayuda de la gráfica para pistas de capas externas localizada en la figura C-2 del apéndice.

Por lo tanto, el área asignada para la parte de potencia es 85 mils y para la de control es 2 mils, con estos valores se ingresa a la figura C-3 del apéndice hallando así los anchos de pista.

El espesor obtenido es de 120 th (milésimas de pulgada) para la parte de potencia y para la de control es de 4 th, pero para los circuitos digitales se asigna un valor recomendado de 30 th.

3.6.3. Elaboración de la PCB

3.6.3.1. Esquema del circuito en el software de simulación

En la figura 86 se aprecia un diseño esquemático del circuito desarrollado en un software de simulación.

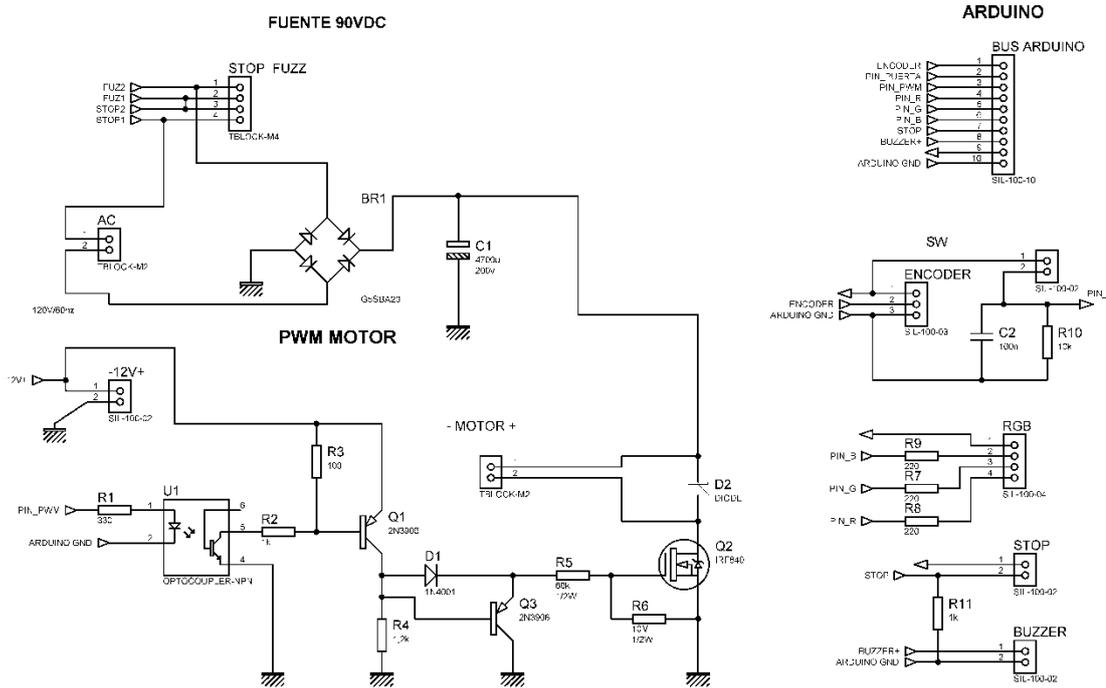


Figura 86. Diseño esquemático

3.6.3.2. Diseño y simulación

La placa fue ruteada en una sola capa como muestra la figura 87 siguiendo la norma IPC2221.

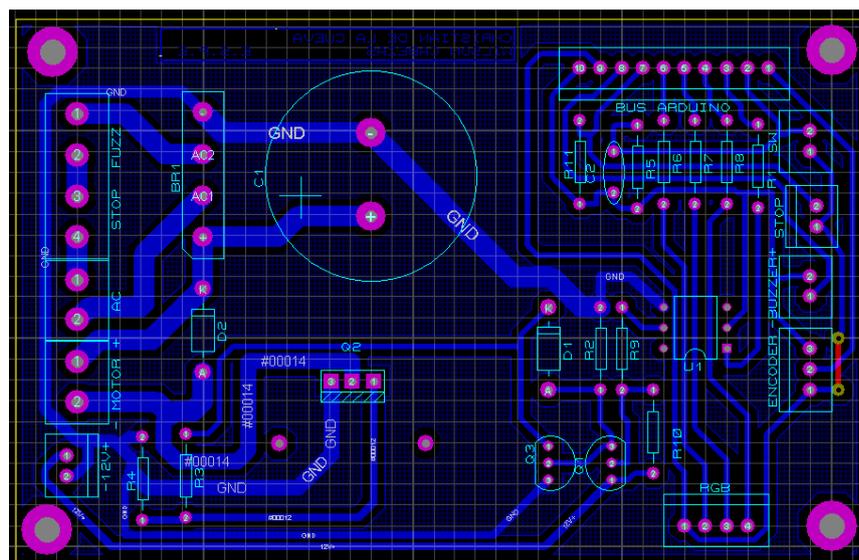


Figura 87. Esquemático

Las figura 88 y 89 muestran las diferentes vistas de la tarjeta electrónica y la figura 90 su modelado. En las figuras 91 y 92 se aprecia el esquema y modelado del encoder.

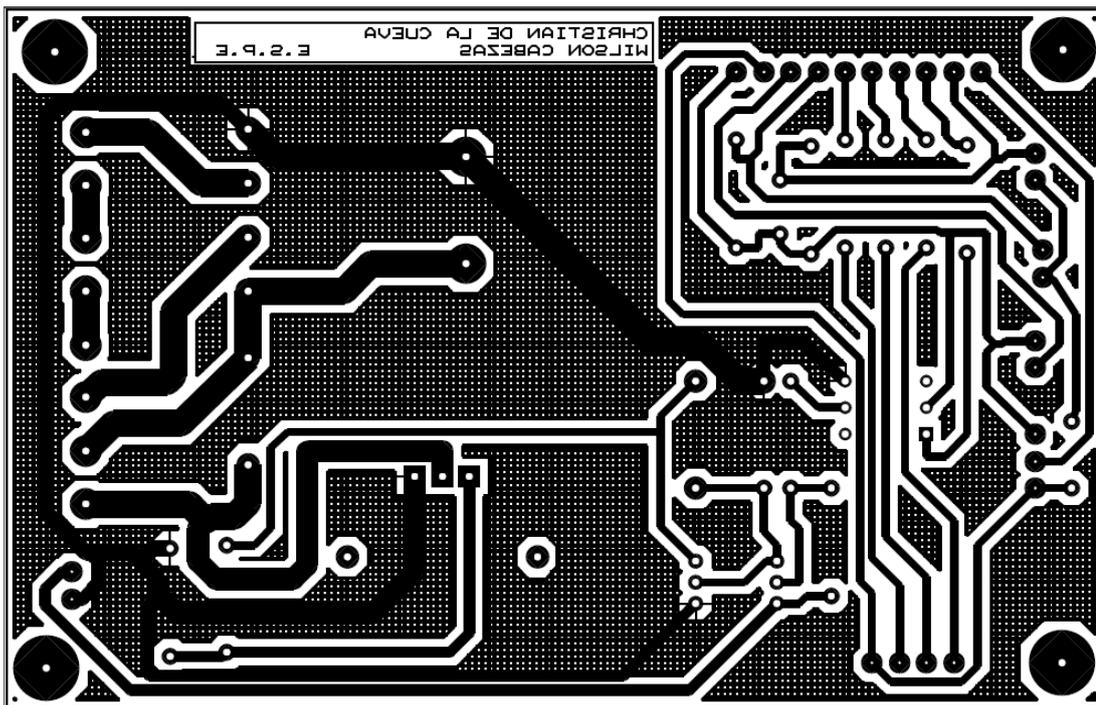


Figura 88. Vista posterior de la PCB

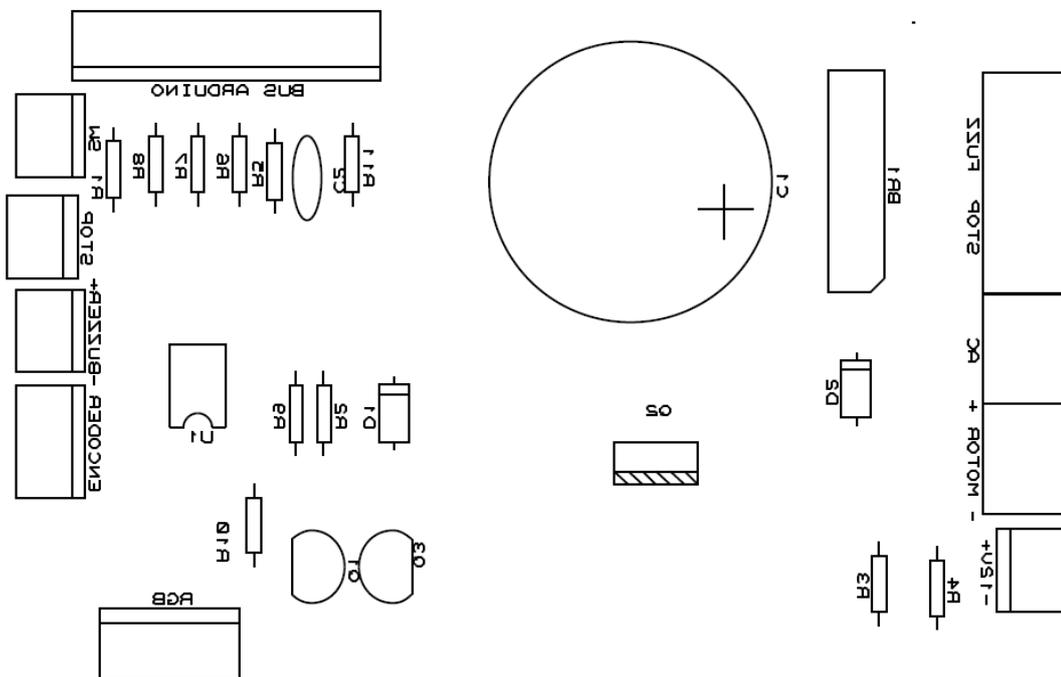


Figura 89. Vista anterior de la PCB

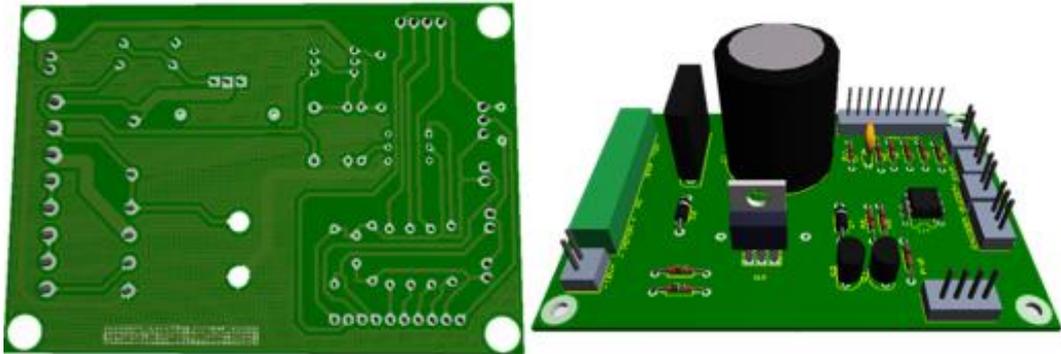


Figura 90. Modelado de la Tarjeta electrónica

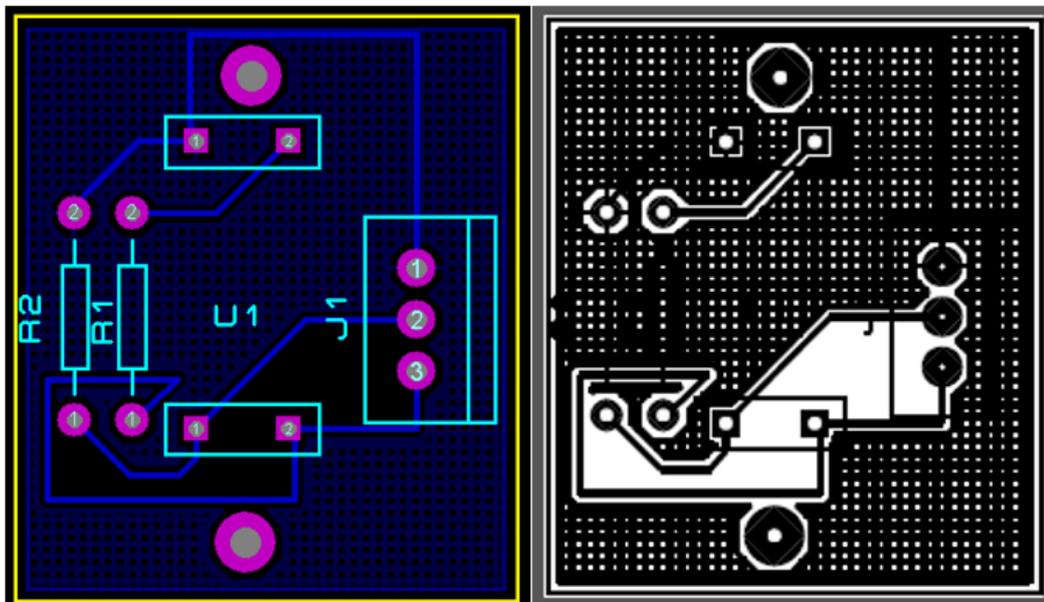


Figura 91. Esquemático del Encoder

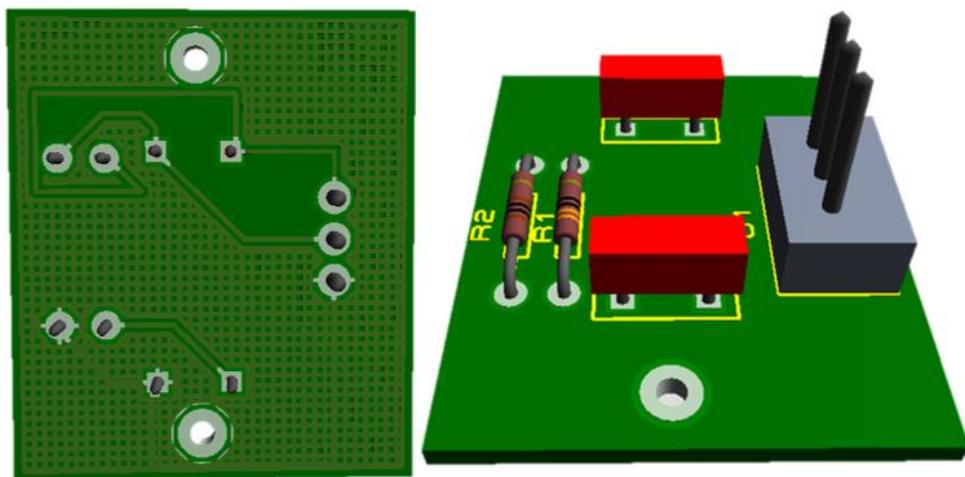


Figura 92. Modelado de la PCB del encoder

3.7. Diseño del sistema de control

Para obtener un determinado control sobre algún proceso es importante conocer cuál será el sistema de control, tomando como soporte el capítulo de fundamentación teórica, se procede a realizar una tabla de selección para establecer el lazo a emplearse:

Tabla 30

Criterio de selección para el lazo de control del molino criogénico

Criterio	Peso	Sistema de Control	
		Lazo Abierto	Lazo Cerrado
Costo	10 %	9	6
Estabilidad	10 %	9	7
Exactitud	40 %	5	9
Sensibilidad a perturbaciones	20 %	6	9
Velocidad de respuesta	20 %	6	9
TOTAL:	100 %	6,2	8,5

La tabla 30 indica que el sistema de control en lazo cerrado es la mejor alternativa, por lo tanto, el diagrama del mismo se encuentra en la figura 93.

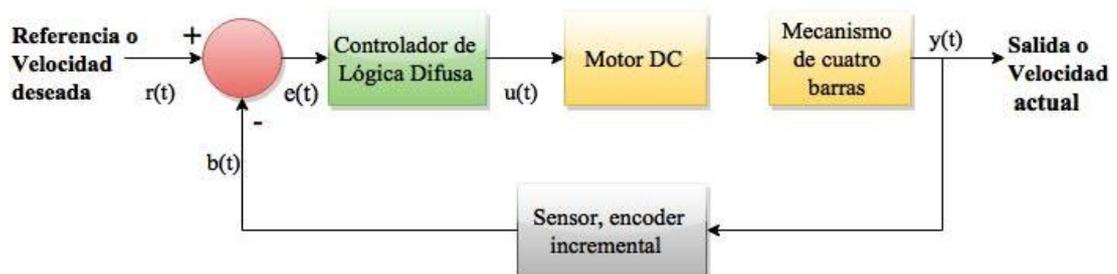


Figura 93. Sistema de control en lazo cerrado

Esta elección permite regular la velocidad del motor de forma rápida y precisa, para ello se utilizará la teoría de lógica difusa. Se establece la variable de entrada, en este caso se utilizará el error como variable de entrada, esto se debe a que el error posee información de la referencia y las revoluciones del motor. La salida es la señal de control que actúa sobre el motor. Una vez definido las variables, es necesario determinar los conjuntos difusos y el grado de pertenencia de cada una de ellas. Para la entrada y salida se utilizará cuatro conjuntos difusos denotados como:

- NG: Negativo
- Z: Cero
- PP: Positivo Pequeño
- PG: Positivo Grande

3.7.1. Variable lingüística Entrada Error

Esta variable corresponde a la señal de error en velocidad, representa la diferencia entre el valor ingresado (referencia) y la señal del sensor. El rango máximo de velocidad del motor del equipo para la trituración de las muestras criogénicas vegetales es 4400 *rpm*, entonces los valores de entrada constarán entre -4400 y 4400 , los cuales representan los errores máximos que pueden existir con la ayuda de la lectura del sensor. Los cuatro términos lingüísticos se observan en la figura a continuación.

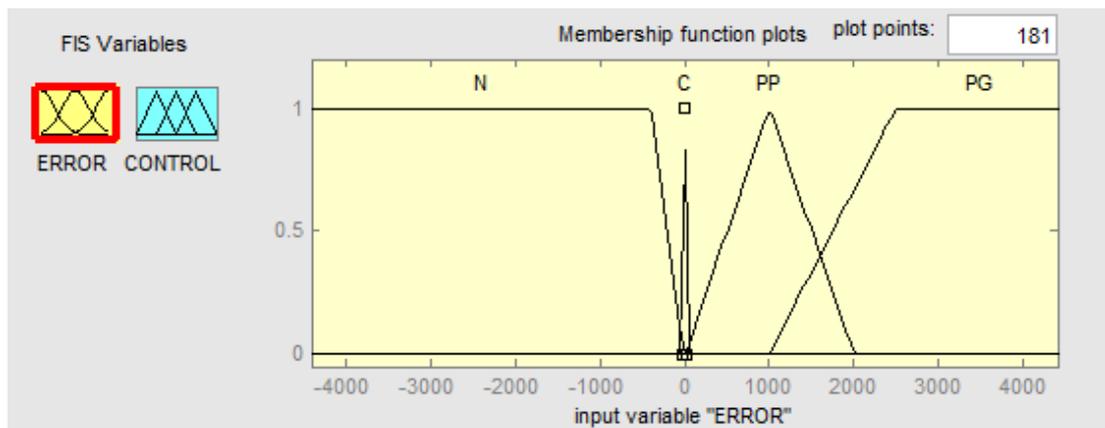


Figura 94. Funciones de membresía para la entrada

3.7.2. Variable lingüística Salida

La variable de salida que corresponde a la señal de control está definida por cuatro términos lingüísticos.

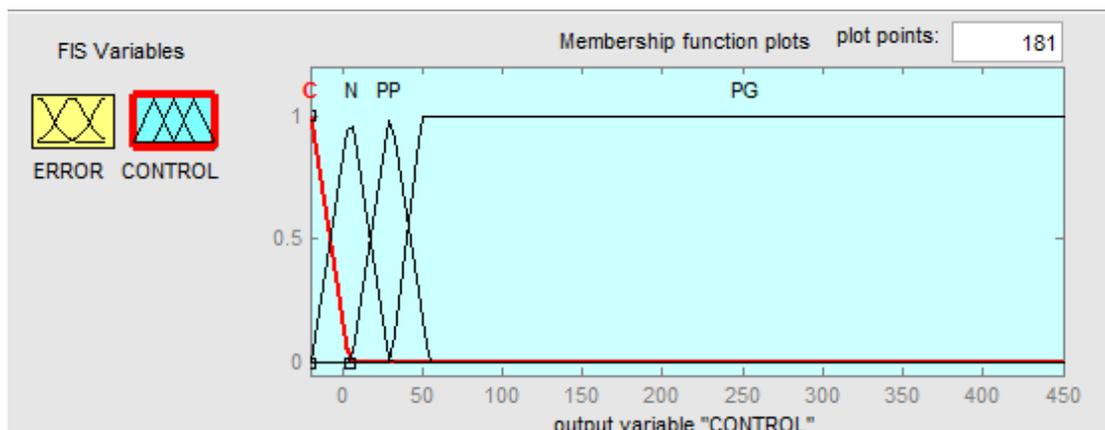


Figura 95. Funciones de membresía para la salida

Una vez definido los conjuntos difusos se fijan las reglas de control. Es necesario entender que estas reglas de control son puramente intuitivas y que depende únicamente del conocimiento del sistema y de la acción de control que efectúa para cada acción de entrada. Por ejemplo, si la señal de error es *PG*, implica que la velocidad

está por debajo de la referencia, por lo que la acción de control correspondería ser *PG*. Es así que se plantea las reglas de control resumidas en la siguiente tabla.

Tabla 31

Conjuntos difusos

Entrada (Error)	N	Z	PG	PP
Acción (PWM)	N	Z	PG	PP

3.7.3. Reglas de control propuesta.

Mediante las reglas antes indicadas, se logra que cada vez que el error disminuya, la acción de control también disminuye y a su vez si aumenta el error, la acción de control también aumenta, de manera gráfica en la figura 96 se observa la acción de control respecto al error, el rango de salida está entre 0 y 255, lo que representa el ciclo de trabajo del motor.

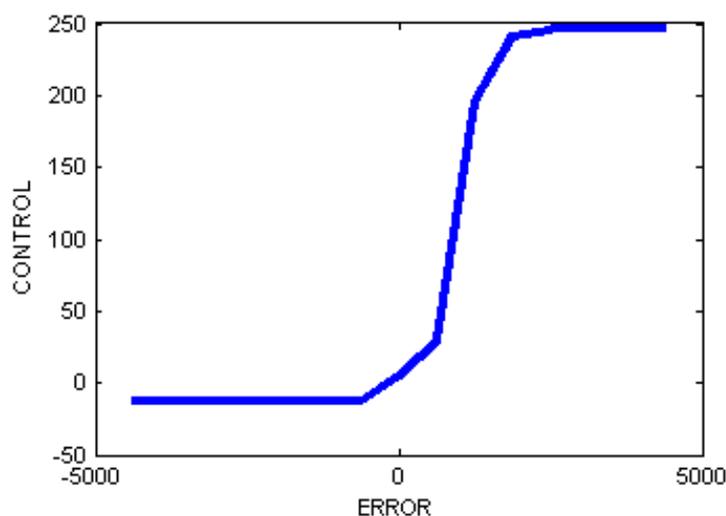


Figura 96. Curva de control

En la figura 97 se indica la curva de respuesta del motor DC controlado por lógica difusa, a diferencia de controladores convencionales (P, PI, PID) este tipo de controlador puede implementar estrategias no lineales usando reglas lingüísticas e igualmente, su diseño no necesitó el modelo matemático del sistema a controlar. La figura confirma el buen desempeño del controlador, pues como se puede observar, el error en estado estacionario es nulo, la curva no presenta un sobre pico, además, el tiempo de establecimiento es de 0.25 segundos aproximadamente, indicando que el tiempo necesario para alcanzar la velocidad deseada es bastante corto.

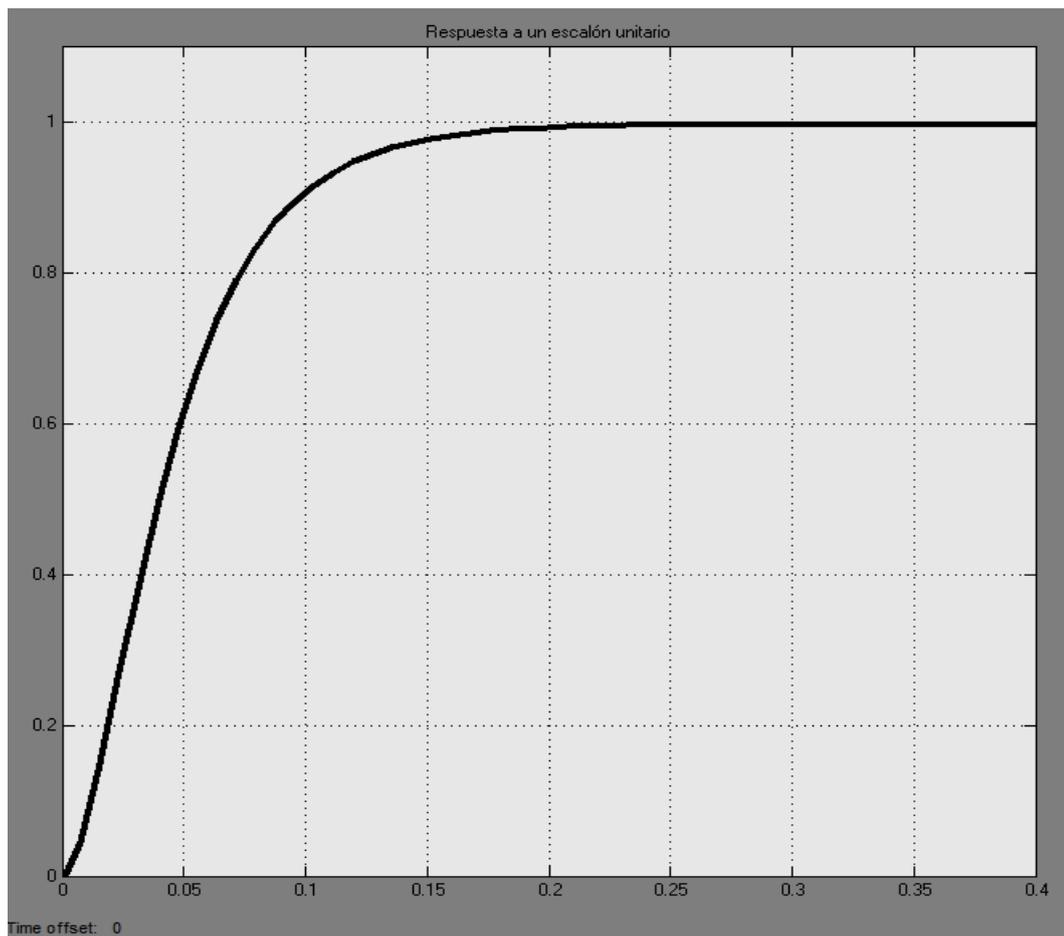


Figura 97. Respuesta de la planta a un escalón unitario

Una vez diseñado y simulado el controlador, y se disponga de las funciones de membresías de entrada y salida, el error y PWM respectivamente, se implementa en el microcontrolador. El código de programación se encuentra en el apéndice D.

El procedimiento de encendido, configuración y funcionamiento del equipo, se ha sintetizado en el siguiente diagrama de flujo de la figura 98.

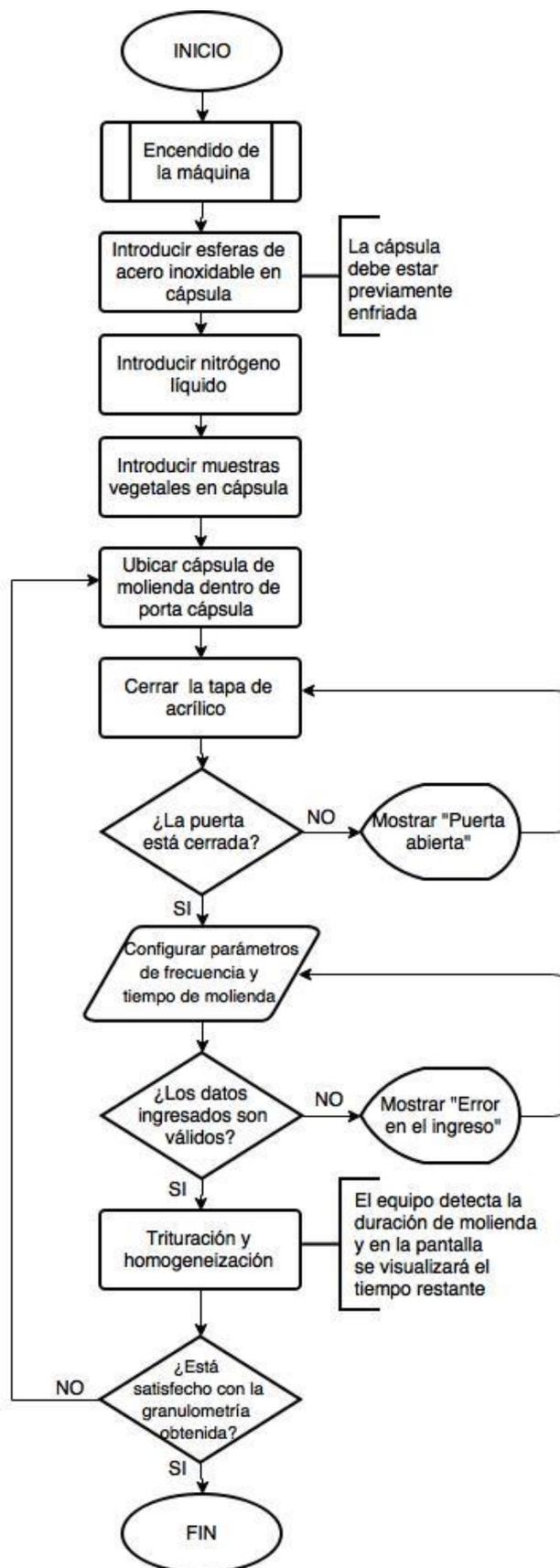


Figura 98. Diagrama de flujo de funcionamiento

CAPITULO IV

CONSTRUCCIÓN, ENSAMBLAJE Y VALIDACION

El presente capítulo describe de manera general, los procesos y procedimientos implementados para la construcción y ensamblaje del equipo triturador homogeneizador de muestras vegetales criogénicas, además se validará los resultados mediante pruebas y ensayos.

4.1. Lista de materiales

4.1.1. Mecánica

Tabla 32

Lista de elementos mecánicos

ITEM	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANTIDAD
Banda de transmisión	Dongil 4PK845	Caucho natural	1
Chumacera	De piso 3/4" KBR	Hierro fundido	2
Chumacera	De piso 1/2" KBR	Hierro fundido	2
Chaveta	8x7x50 mm	SAE 1018	1
Prisionero	M6 x 20 mm	SAE 1020	2
Rodamiento	De bolas 10-26	AISI 52100	2
Polea	4x2" Tipo A	Aluminio 6061	1
Neplo	De acero inoxidable 1"x5"	AISI 304	2
Tapón para neplo	De acero inoxidable 1"	AISI 304	4
Esferas	De acero inoxidable 1"	AISI 304	1
Esferas	De acero inoxidable 3/4"	AISI 304	2
Esferas	De acero inoxidable 1/2"	AISI 304	3
Patas de la base	Patas cuadradas 50x50x30mm	Caucho natural	4

4.1.2. Metalmecánica

Tabla 33

Lista de elementos metalmecánicos

ITEM	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANTIDAD
BASE	Plancha 600x360x15mm	ASTM A36	1
	Pernos M8x25mm	SAE 1020	15
	Pernos M8x60mm	SAE 1020	4
	Pernos M10x60mm	SAE 1020	8
	Pernos 1/2"x60mm	SAE 1020	8
	Tuerca M8	SAE 1020	19
	Tuerca M10	SAE 1020	4
	Tuerca 1/2" UNC	SAE 1020	8
ESTRUCTURA	Tubo rectangular 40x20mm (1mts)	ASTM A500	2
	Pletina 200x50x12 mm	ASTM A36	1
	Pletina 60x60x5 mm	ASTM A36	1
	Pletina 200x50x12,7mm	ASTM A36	1
	Pletina 600x76,2x5mm	ASTM A36	1
	Eje 2"x 250 mm	SAE 1018	1
	Eje 1/2"x120mm	SAE 1018	1
	Eje 1"x 250 mm	SAE 1018	1
	Disco Ø70 x2 mm	ASTM A36	1
	Perno M10x75	SAE 1020	2
Tuercas de seguridad M10	SAE 1020	2	
CARCASA	Plancha de acero (e=1mm)	TOL NEGRO	1
	Pernos M3x10mm	SAE 1020	25
	Tuercas M3	SAE 1020	25
	Bisagra de simple acción cuadrada ST-150	AISI 304	2
PORTA CÁPSULA	Tubo 1,5" x250mm e=6mm	ASTM A36	1

4.1.3. Eléctrico – electrónico

Tabla 34

Listado de material eléctrico - electrónico

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
ENCODER	Emisor infrarrojo NPN ITR8102	1
	Resistencia 330Ω y 1 KΩ 1/8w	1
	Bornera TBLOCK-M3	1
PANEL DE CONTROL	Pantalla táctil 3.6" compatible con Arduino	1
	Buzzer 5V 8Ω	1
	Led RGB ánodo común	1
	Botón de emergencia Camsco	1
	Bloque NC 110/220V 10A Camsco	2
	Micro switch de palanca 1A	1
	Bornera TBLOCK-M2	4
	Terminales molex SIL100-2	4
	Terminales molex SIL100-3	1
	Terminales molex SIL100-4	1
PCB	Terminales molex SIL100-10	1
	Transistor BJT 3906	2
	Capacitor electrolítico 4700uF 200V	1
	Capacitor cerámico 104	1
	Opto transistor NPN 4n35	1
	Mosfet IRF740 vishay	1
	Disipador PR140	1
	Puente de diodos G5SBA20	1
	Fusible 10A	1
	Porta fusibles para chasis	1
	Diodo Rectificador 1N1582	1
	Resistencia 330Ω, 1 kΩ, 100Ω, 1.2 kΩ, 68 kΩ 10 MΩ 1/8w	1
	Socket para integrado x6	1
	Transformador RCA900N Honeywell 1KVA	1
	Fuente 5V-12V RJ 300w	1
ALIMENTACIÓN	Interruptor 110/220V AC 15A con luz piloto	1
	Conector IEC C14 de chasis	1
	Cable de alimentación Hembra (IEC C13) Macho	1
CONTROLADOR	Arduino Mega 2560	1

4.1.4. Otros componentes

Tabla 35

Lista de materiales varios

ITEM	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANTIDAD
Acrílico	Plancha de	Acrílico	1
Manija	Manija plástica de cajón	ABS	1
Separadores	Eje de duralón 1”x 250mm	Nylon	1

4.1.5. Máquinas e instrumentos usados

Tabla 36

Lista de máquinas, herramientas e instrumentos usados

Máquinas	Herramientas e instrumentos	
Torno	Cuchillas	Escuadra
Fresadora	Fresa	Granete
Taladro de banco	Brocas	compas de puntas secas
Taladro de mano	Limas y lijas	Machuelos
Esmeril	Calibrador	Disco de corte
Soldadoras (SMAW, GMAW)	Electrodos	Nivel
Oxicorte	boquillas	Amoladora
Dobladora	Rayador	Arco de Sierra
Cizalla	Piqueta	

4.2. Construcción del diseño final

Aquí se mencionan aspectos sobre los procesos de fabricación de las partes, así como el montaje del conjunto para el equipo triturador homogeneizador de muestras vegetales.

Se podrá encontrar los planos mecánicos en el Apéndice E.

4.2.1. Construcción y conformado de partes mecánicas

4.2.1.1. Base

Se utilizó una placa de acero ASTM A36, que posteriormente se la cortó mediante oxicorte para dejarla de las dimensiones mostradas en los planos mecánicos, el peso de la base debe ser elevado ya que debe soportar el peso del equipo y principalmente las vibraciones producidas por el mecanismo, motivo por el cual se designó un espesor de 15mm.

Se realizan las perforaciones en base al plano y se elimina cualquier rebaba existente, finalmente se comprueba las dimensiones y geometría de la misma.

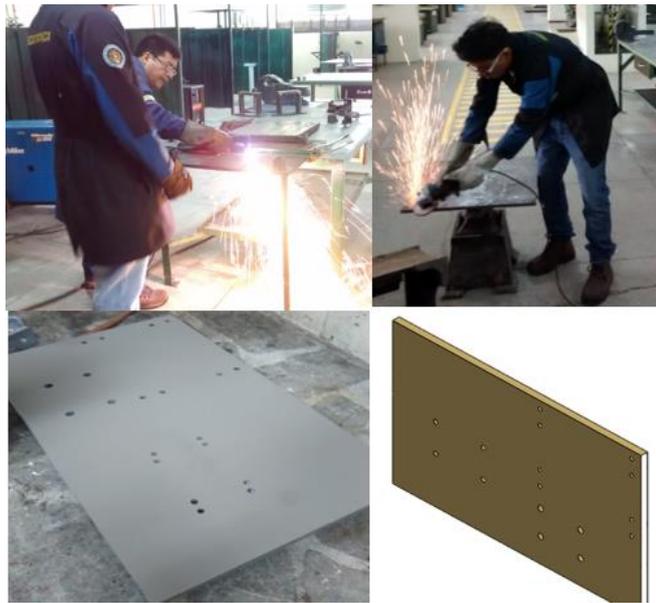


Figura 99. Mecanización de la base (Corte – Taladrado - Esmerilado)

4.2.1.2. Estructuras

Se realizaron las estructuras indicadas en los planos partiendo de un tubo rectangular 40x20 y las pletinas mostradas en la lista de materiales de la sección anterior.

Para el apoyo donde irá asentado el motor se dispuso unas alzas para evitar el golpe de la polea conductora con la base. Se corta a medida para luego realizar los canales con una fresa de 8m, mismos que sirven para el montaje y ajuste de la banda.

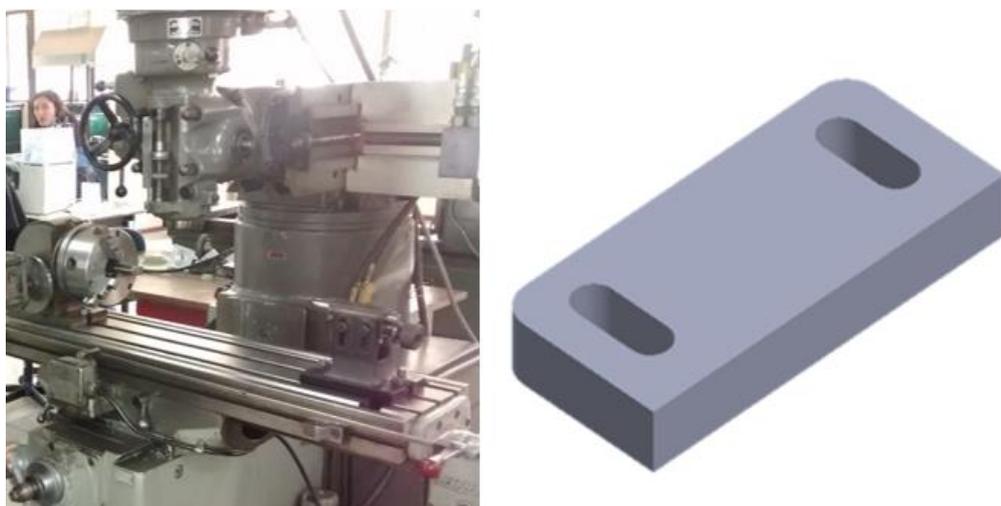


Figura 100. Proceso de mecanización de alzas para motor

Debido a la configuración del mecanismo manivela – balancín y el diseño como tal, se dispuso de una estructura para las chumaceras, las cuales sirven de apoyo para el eje, logrando alcanzar las dimensiones del diseño y que sean de fácil montaje y desmontaje para el reemplazo de los componentes.

Para la estructura se parte de un tubo cuadrado que posteriormente será cortado, doblado y soldado formando un arco que se soldará a una pletina como se muestra en la figura 101.



Figura 101. Proceso de mecanización de estructuras

4.2.1.3. Ejes

Para la mecanización del eje que transmite el movimiento a los eslabones mediante la polea conducida se parte de un eje de $\varnothing 2$ in. A dicho eje se lo somete a un proceso de desbaste (torneado) siguiendo el plano mecánico (ver apéndice E), una vez torneado el eje se procede al fresado del mismo para la mecanización del chavetero, finalmente se corroboran las medidas y se inspecciona el ajuste entre los componentes mecánicos que van al eje (chumaceras, polea y eslabón manivela).



Figura 102. Proceso de mecanización de eje

4.2.1.4. Eslabones

4.2.1.4.1. Manivela

Se parte de una pletina de 12mm de espesor realizando un corte a medida, se marcan los centros para las perforaciones y se las realiza en el torno con el uso del mandril de cuatro muelas y el porta brocas debido a que en el eslabón se colocarán los rodamientos y al tener un ajustaje se requiere cierto grado de precisión, mismo que provee el torno. En último lugar se colocan los rodamientos en el eslabón y se realizan los redondeos en el esmeril.



Figura 103. Proceso de mecanización de eslabón manivela

4.2.1.4.2. Acoplador

Se sigue el mismo proceso que con el eslabón manivela basándose en los planos mecánicos.



Figura 104. Proceso de mecanización de eslabón acoplador

4.2.1.4.3. Balancín

Para la construcción del balancín se usó un tubo rectangular de 40x20, el cual fue cortado, doblado, perforado y soldado a una pletina de 50,8x40 de 5mm de espesor y al eje de $\text{Ø } \frac{1}{2}$ " previamente refrentado. Finalmente se realizó los redondeos y la comprobación dimensional del eslabón.



Figura 105. Proceso de mecanización de eslabón balancín

4.2.1.5. Porta cápsula

El porta cápsulas consta de dos partes: un cuerpo y una tapa. Para la mecanización del cuerpo se parte de un tubo de $\text{Ø } 1,5$ ". A dicho tubo se lo somete a un proceso de desbaste (torneado) siguiendo el plano mecánico (ver apéndice E), una vez torneado se realiza la rosca interna con una cuchilla de interiores basándose en el plano.

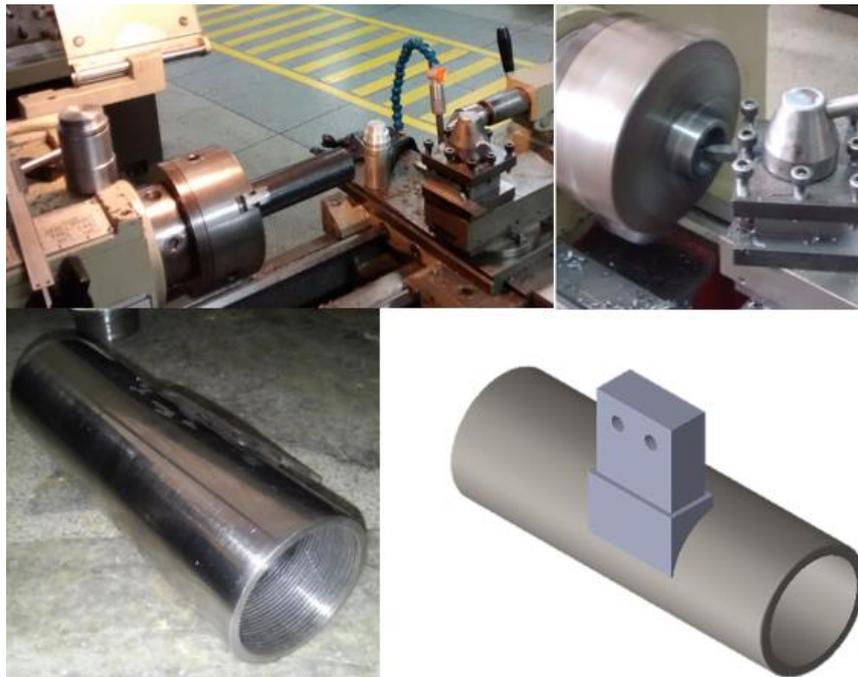


Figura 106. Proceso de mecanización del cuerpo para porta cápsula

Para la tapa se corta el eje de $\text{Ø } 2''$ a medida, se realiza un desbaste, para luego realizar el roscado externo del mismo, se fresa la tapa para el fácil ajuste con el cuerpo y finalmente se corroboran las medidas, se inspecciona el ajuste y roscado entre los componentes.

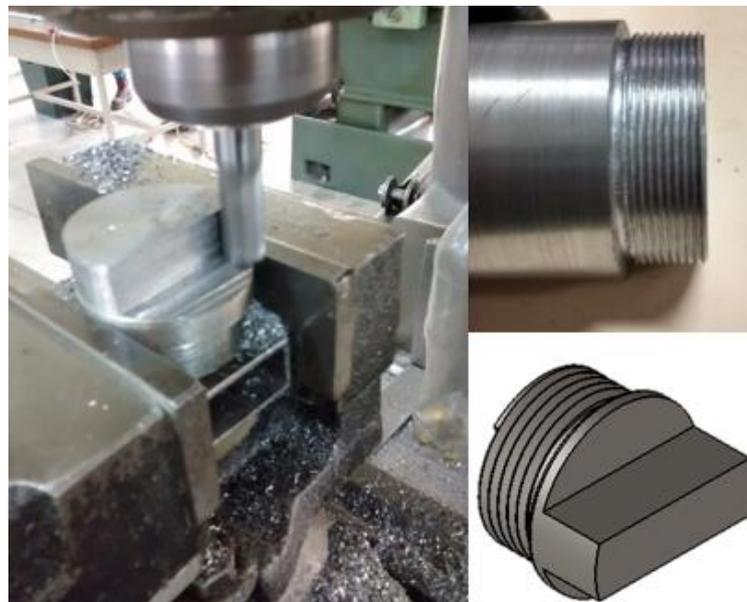


Figura 107. Proceso de mecanización de tapa para porta cápsula



Figura 108. Porta cápsulas

4.2.1.6. Carcasa

Para la construcción de la carcasa se fundamenta en los planos mecánicos, el diseño de la carcasa se lo realizó en el software CAD con la herramienta de chapa metálica, la cual nos permite realizar un esquema tridimensional para posteriormente obtener un plano bidimensional de manera que se pueda doblar para conformar la carcasa, se obtuvieron 5 partes las cuales fueron obtenidas a partir de una cortadora de plasma CNC por motivos de precisión, se ejecutó el doblado y suelda de las partes siguiendo los planos mecánicos, por último se perforó y se sometió a una prueba dimensional, de montaje entre las dos partes: tapa posterior y anterior de la carcasa.



Figura 109. Proceso de construcción de la carcasa

4.2.1.7. Separadores

Los separadores, que van entre eslabón y eslabón, evitan la fricción entre los mismos. Se diseñan de nylon debido a que es un material auto lubricante. Los separadores fueron torneados y cortados a medida.



Figura 110. Separadores de nylon

4.2.2. Implementación de componentes eléctricos y electrónicos

Aquí se mencionan aspectos sobre la fabricación de la tarjeta controladora, así como el montaje de los elementos.

Planos eléctricos- electrónicos: Apéndice E

4.2.2.1. Diseño de la tarjeta controladora

En base al esquema y especificaciones presentadas en el capítulo 3, se procede al desarrollo de la PCB. El material base de la placa es fibra de vidrio con un recubrimiento de estaño en las pista de potencia.

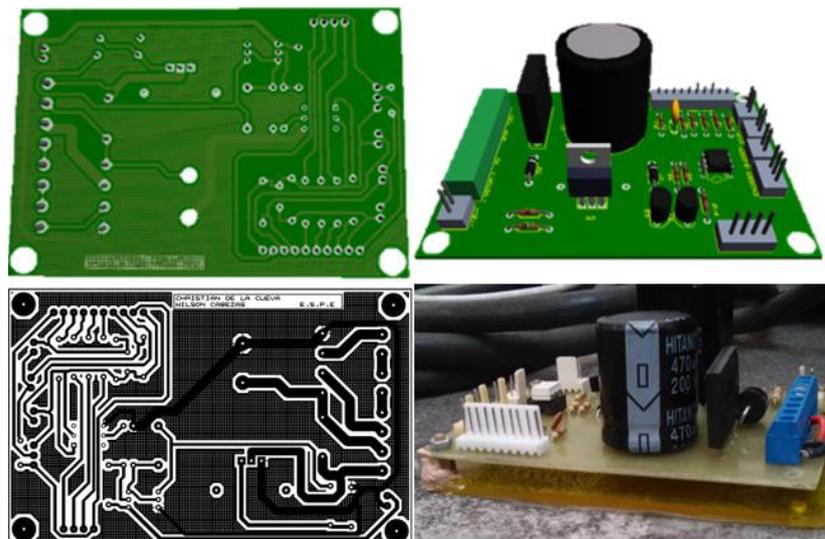


Figura 111. Proceso de fabricación de PCB

4.3. Ensamblaje General

4.3.1. Montaje estructural del sistema mecánico

Para el montaje del sistema mecánico se lo realizó mediante el uso de instrumentos de medición y calibración (escuadra, nivel, flexómetro y calibrador), con el fin de asegurar el correcto montaje y funcionamiento del mecanismo.



Figura 112. Proceso de montaje de componentes mecánicos



Figura 113. Proceso de ensamblaje de molino triturador

Nota: Ver apéndice E para observar el plano de ensamble y la posición y colocación de los elementos mecánicos en la base.

4.3.2. Montaje de componentes eléctricos y electrónicos

En la PCB se procede a soldar los elementos eléctricos y electrónicos.

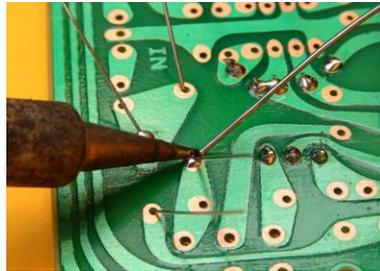


Figura 114. Montaje de elementos eléctricos y electrónicos

Una vez soldada la placa y comprobado su funcionamiento se la coloca en la carcasa, como también los componentes eléctricos y electrónicos dispuestos para la alimentación y mando del equipo.



Figura 115. Elementos de maniobra y mando

Se usan canaletas y etiquetas en cada uno de los componentes para la conexión, orden e identificación de los mismos.

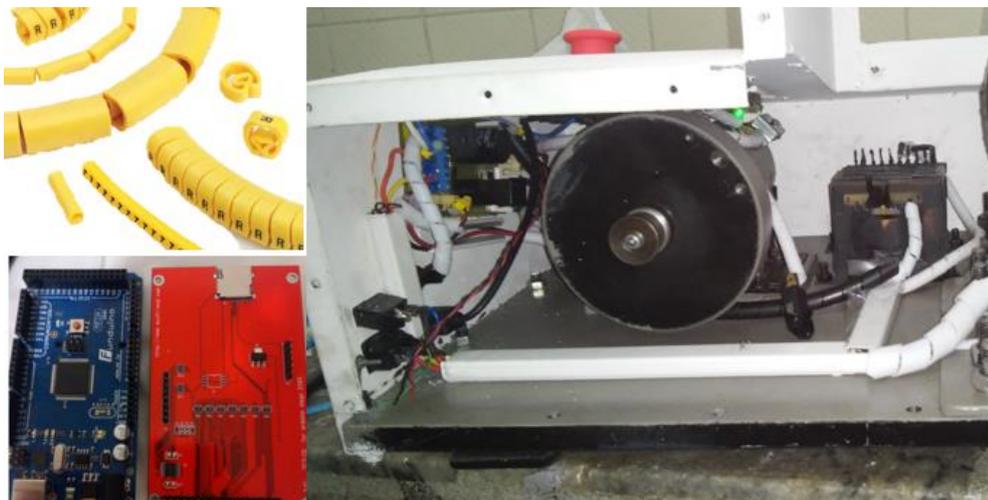


Figura 116. Ensamble de componentes eléctricos y electrónicos

4.4. Programación

La programación se la realizó en la plataforma Arduino, basado en el diagrama de flujo presentado en la figura 114.

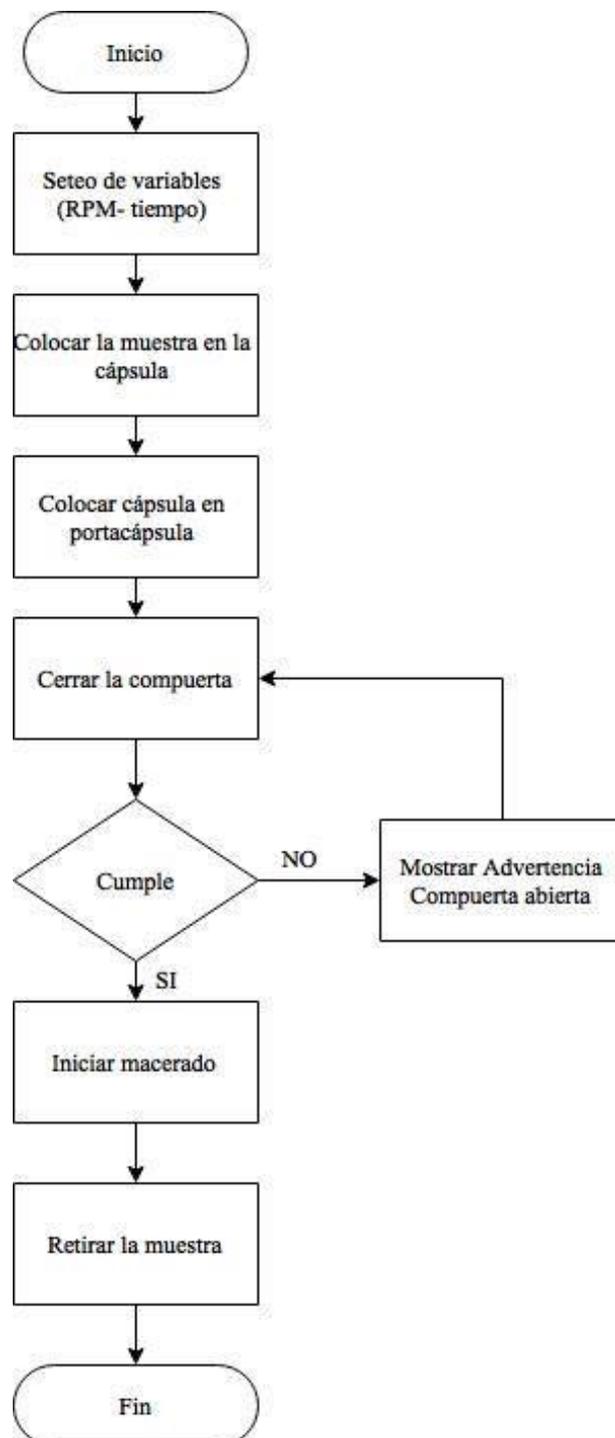


Figura 117. Diagrama de flujo del proceso de macerado

El proceso es un sistema en lazo cerrado, en el proceso se controla la velocidad regido por un controlador difuso, el sensor cuantifica la velocidad del motor que

mediante el microcontrolador se obtiene la señal de error. El controlador difuso mide el error y envía una señal de control PWM misma que es dirigida a la placa controladora para la regulación de la velocidad.

La interfaz humano-máquina permite, un fácil manejo e ingreso de las variables de entrada al equipo, en la pantalla se introduce la frecuencia de oscilación del mecanismo y el tiempo de trituración.



Figura 118. Interfaz humano – máquina HMI

Una vez terminado el proceso se tendrán alarmas visuales y audibles como se presentó en el capítulo 3.

4.5. Prueba de Validación del equipo

Una vez concluida la fabricación del equipo se procede a realizar una serie de pruebas, para garantizar el correcto desempeño de la máquina. Las pruebas se dividen en tres: pruebas dimensionales, de funcionamiento y de laboratorio.

4.5.1. Pruebas dimensionales y geométricas.

Tabla 37

Pruebas dimensionales y geométricas de la base

PRUEBA	N° DE PRUEBA	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SI	NO	
Dimensiones	1	X		
Superficie	1		X	Eliminar rebabas y escoria con la amoladora
Superficie	2	X		
Perforaciones	1	X		

Tabla 38***Pruebas dimensionales y geométricas de estructuras***

PRUEBA	N° DE PRUEBA	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SI	NO	
Dimensiones	1	x		
Paralelismo y perpendicularidad	1		x	Rectificar con escuadra y nivel
Paralelismo y perpendicularidad	2	x		

Tabla 39***Pruebas dimensionales y geométricas para eslabones***

PRUEBA	N° DE PRUEBA	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SI	NO	
Dimensiones	1	X		
Ajuste con rodamientos	1		X	Verificar medidas de ajustaje
Ajuste con rodamientos	2		X	
Ajuste con eje	2	X		

Tabla 40***Pruebas dimensionales y geométricas para porta cápsulas***

PRUEBA	N° DE PRUEBA	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SI	NO	
Dimensiones	1	X		
Roscado	1	X		
Peso	1		X	Eliminar peso mediante perforaciones
Peso	2	X		

Tabla 41***Pruebas dimensionales y geométricas para el eje***

PRUEBA	N° DE PRUEBA	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SI	NO	
Dimensiones	1	X		
Ajuste	1		X	Verificar medidas y cilindrar
Ajuste	2	X		

4.5.2. Pruebas de funcionamiento

Tabla 42

Pruebas de funcionamiento del mecanismo

PRUEBA	N° DE PRUEBA	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SI	NO	
Dimensionales	1	X		
Tolerancias geométricas	1	X		Verificar medidas y cilindrar
Ajustaje	1	X		
Ángulo de oscilación	1	X		
Transmisión del movimiento	1		X	Templar la banda
Transmisión del movimiento	2	X		
Alineación del eje	1		X	Alinear los rodamientos de las chumaceras
Alineación del eje	2	X		
Vibración	1		X	Aislar la vibración con patas de caucho a la base
Vibración	2	X		

Tabla 43

Pruebas de funcionamiento del sistema eléctrico y electrónico

PRUEBA	N° DE PRUEBA	CUMPLE		OBSERVACIONES
		SI	NO	
Encendido/Apagado	1	X		
Voltajes en elementos	1	X		
corrientes en elementos	1	X		
Disparo Mosfet	1	X		
Control de velocidad	1	X		
Paro de emergencia	1	X		
Alarmas visuales	1	X		
Alarmas Audibles	1	X		
Ingreso de variables	1	X		
Funcionamiento de la pantalla	1		X	Calibrar los ejes x e y
Funcionamiento de la pantalla	2	X		

Tabla 44***Pruebas de funcionamiento en vacío***

PRUEBA	DATOS TÉCNICOS	OBSERVACIONES
Emisión de ruido		Mínimo
Consumo de corriente	1.65 A	Mínimo
Consumo de potencia	165 W	Mínimo
Vibración	Mínima	Mínimo

Tabla 45***Pruebas de funcionamiento con carga***

PRUEBA	DATOS TÉCNICOS	OBSERVACIONES
Emisión de ruido		Moderado
Consumo de corriente	3.2 A	Moderado
Consumo de potencia	352 W	Moderado
Vibración	Alta	Trabajar a bajas frecuencias o empotar el equipo a una estructura fija

4.5.3. Pruebas de laboratorio

Se utilizó el microscopio graduado para corroborar el tamaño de grano en las muestras obtenido mediante el molino triturador, la apreciación del instrumento es de 0.000001 m , con ello se pueden medir granos de hasta $1\ \mu\text{m}$. Se realizaron varias pruebas con los diferentes tamaños de bolillas dispuestos para el equipo y con una misma muestra.

**Figura 119. Microscopio para la medición de granulometría de muestras**

Para medir la granulometría de una muestra hay que tomar en cuenta que el grano no es totalmente circular, presenta una forma elíptica, razón por la cual se calcula un radio en el eje x e y como muestra la figura 120, sacando un valor medio cuadrático de estas dos medidas.

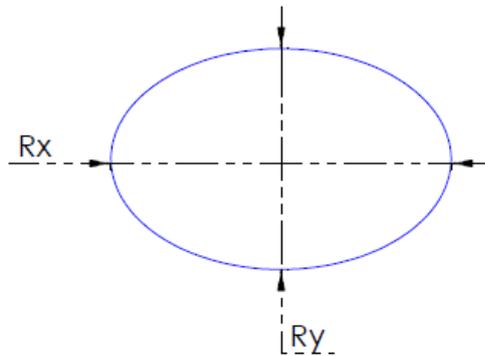


Figura 120. Representación de la forma de grano

Las medidas se las toma de los nonios dispuestos en el microscopio ilustrado en la figura 121, con ellas se obtiene R_x y R_y , posteriormente se saca la media cuadrática de estos valores que será el valor final del tamaño de grano.

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$$

Para el caso particular la ecuación quedará determinada por la siguiente expresión

$$R = \sqrt{\frac{1}{2}(R_x^2 + R_y^2)} \quad (62)$$

Donde:

N = colección de valores

x = variable discreta

R = valor de la granulometría

R_x = radio medido en el eje x

R_y = radio medido en el eje y



Figura 121. Nonio del microscopio graduado

Tabla 46

Pruebas de granulometría de muestras

	Granulometría [μm]								
	N° de Prueba 1			N° de Prueba 2			N° de Prueba 3		
Esferas	Rx	Ry	R	Rx	Ry	R	Rx	Ry	R
1/2"	6	6	6	6	8	7.07	5	6	5.52
3/4"	8	10	9.05	9	8.5	8.75	9	7	8.06
1"	10	8,5	9.28	9	8	8.51	7	10	8.63

De la tabla 46 se observa que se obtienen granulometrías en el rango de [6 – 10 μm], es decir el tamaño de grano es adecuado para los procesos posteriores.

4.6. Análisis de resultados

Al finalizar la construcción del molino triturador se sometió a pruebas tanto con y sin carga al equipo para determinar parámetros en el funcionamiento del equipo, posterior a las pruebas mecánicas, eléctricas y electrónicas se procede a tomar medidas correctivas.

El resultado final del equipo se expresa en la tabla 47.

Tabla 47***Características del equipo***

Parámetros	
Área de aplicación	triturar, mezclar, homogeneizar, ruptura celular
Material	Duro, semiduro, blando, frágil, fibroso, vegetal
Granulometría Final	Aprox. [6-10 μm]
Capacidad volumétrica	Máx. 50 ml
Molienda criogénica	Si
Alimentación	Manual
Recipiente disponible	Acero inoxidable 50 ml
Frecuencia de oscilación	1 - 10 Hz
Velocidad de operación	60 - 600 Hz
Tiempo de molienda	5s - 5min
Datos técnicos	
Consumo de potencia	746 W
Dimensiones del equipo	60x36x30 cm
Peso neto	Aprox. 62Kg
Voltaje de alimentación	110V

Los resultados de la granulometría dependen de varios factores uno de ellos es el tiempo de trituración y el juego de esferas que se utilicen para el mismo, así como la frecuencia de trituración.

Como resultado final se cumplió con los objetivos previamente establecidos de manera satisfactoria.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS ECONÓMICO

El presente capítulo tiene como objetivo mostrar el monto de recursos económicos necesarios para la realización del equipo, determinando así la viabilidad económica del mismo. Se comenzará enunciando los siguientes parámetros: Costos directos de fabricación, los Costos indirectos de fabricación y por último la evaluación financiera.

5.1. Costos directos de fabricación

Los costos directos de fabricación se los fija del valor exacto del material, estos materiales son parte fundamental para llegar a obtener un producto terminado. Además, dentro de los costos directos, se ve involucrado la mano de obra directa de aquellas partes o piezas que fueron sometidas a un procesos de maquinado o de manufactura.

5.1.1. Costos de Materia Prima

Involucra el costo de la materia prima, se presentarán tablas correspondientes a estos rubros, las cuales se encuentran separadas en tres partes, correspondientes a la carcasa, el mecanismo de cuatro barras y la electrónica.

Tabla 48

Costos de materiales directos en la Carcasa

Material	Cant.	Valor unitario (USD)	Valor Total (USD)
Plancha de tol: 1220x2440x1,1 mm	1	32,05	32,05
Plancha de acero: 600x350x18 mm	1	76,80	76,80
Regatones de caucho natural	4	4,00	16,00
Tapa en acrílico	1	23,62	23,62
Panel en acrílico de pantalla táctil	1	6,50	6,50
Bisagras metálicas	2	1,10	2,20
Manija plástica	1	0,50	0,50
Pernos M15	15	0,36	5,40
Tuercas M15	15	0,11	1,65
Arandelas de presión M15	15	0,06	0,90
Pintura esmalte mate blanca	1	4,50	4,50
Pintura esmalte anticorrosiva marrón	1	12,35	12,35
Pintura esmalte brillante blanca	1	9,55	9,55
Pernos M6	30	0,12	3,60
Tuercas M6	30	0,40	12,00

Tabla 49***Costos de materiales directos referente al Mecanismo de cuatro barras***

Material	Cantidad	Valor unitario (USD)	Valor Total (USD)
Pletina A36: 120x80x12 mm	1	4,35	4,35
Perfil Cuadrado AISI 1020: 20x20 mm	1	6,64	6,64
Pletina A36: 300x100x6 mm	1	3,85	3,85
Pernos A304: M10	6	0,23	1,38
Tuercas A304: M10	6	0,06	0,36
Pernos A304: M10	6	0,05	0,30
Tuerca de seguridad	2	0,25	0,50
Rodamientos de bolas	3	3,40	10,20
Chumaceras de piso: 3/4 in	2	9,40	18,80
Chumaceras de piso: 1/2 in	2	8,50	17,00
Eje acero transmisión: ϕ 1 in x 250 mm	1	3,90	3,90
Eje acero transmisión: ϕ 1/2 in x 100 cm	1	1,55	1,55
Eje duralón: ϕ 1/2 in x 100 cm	1	4,50	4,50
Banda de transmisión	1	4,00	4,00
Polea Aluminio: ϕ 75 mm	1	5,60	5,60
Pernos acero: M12	8	0,28	2,24
Tuercas acero: M12	8	0,07	0,56
Arandelas acero: M12	8	0,05	0,40
Tapa A304: ϕ 1 in	4	3,35	13,40
Neplo A304: ϕ 1 in x 100 mm	2	6,85	13,70
Esferas A302 ϕ 1 in	1	8,00	8,00
Esferas A302 ϕ 3/4 in	1	5,50	5,50
Esferas A302 ϕ 1/2 in	3	2,00	6,00
Tubo acero cédula 40: ϕ 1,5 in	1	4,20	4,20
Eje AISI 1018: ϕ 2 in x 100 mm	1	3,19	3,19

Por último la tabla 50 detalla los costos de materiales directos correspondiente a la parte de electrónica de control y de potencia, el valor final del costo de materia prima es \$666.84.

Tabla 50***Costos de materiales directos en Electrónico de Control y Potencia***

Material	Cantidad	Valor unitario (USD)	Valor Total (USD)
Motor DC	1	120,00	120,00
Transformador	1	10,00	10,00
Fusible	1	0,35	0,35
Cable AWG 16	2	0,80	1,60
Fuente de voltaje DC	1	35,00	35,00
Cable para fuente DC	1	6,00	6,00
Arduino	1	33,00	33,00
Extensión cable Arduino	1	3,00	3,00
Pantalla táctil arduino: 3,5 in	1	36,00	36,00
Botón Paro de emergencia	1	4,25	4,25
Switch de dos estados	1	0,65	0,65
Buzzer o Zumbador	1	0,80	0,80
Led RGB	1	0,90	0,90
Placa PCB circuito de control y de potencia	1	46,00	46,00
Encoder de herradura	1	4,80	4,80
Espiral para protección de cables	1	8,00	8,00
Canaleta plástica	1	5,70	5,70
Termoencogible : ϕ 4 mm x 1 m	1	1,35	1,35
Termoencogible : ϕ 2 mm x 1 m	1	0,90	0,90
Termoencogible : ϕ 1 mm x 1 m	1	0,80	0,80
TOTAL:			\$ 666,84

5.1.2. Costos de Mano de Obra Directa

Para obtener los costos de mano de obra directa se relaciona la operación con el precio estándar que se maneja actualmente en el mercado, depende básicamente del costo hora máquina-hombre, costo del equipo eléctrico y el tiempo de mecanizado obtenido al realizar los procesos constructivos de cada parte de la máquina.

Tabla 51***Costos de Fabricación y Ensamblaje***

Operación	Tiempo [hora]	Costo normal [USD/hora]	Costo Total [USD]
Corte con plasma	0,5	60,00	30,00
Doblado	4	7,00	28,00
Soldadura Eléctrica	4	4,00	16,00
Soldadura MIG	1	8,50	8,50
Trabajo en acrílico	3	8,75	26,25
Oxicorte	0,5	15,00	7,50
Amolado y corte	2	10,00	20,00
Pintado	3	14,00	42,00
Torneado	20	12,00	240,00
Fresado	4	12,00	48,00
Taladrado	8	4,00	32,00
Ensamblaje, Montaje electrónico	24	4,00	96,00
TOTAL:			\$ 594,25

5.2. Costos indirectos

El hablar de costos indirectos es referirse a aquellos costos que no intervienen de manera directa en la construcción del equipo. Estos incluyen los materiales indirectos, mano de obra indirecta y otros costos que son producto de la paga de servicios básicos, personal administrativo, depreciación de los equipos y cualquier gasto extra.

Tabla 52***Costos de Mano de Obra Indirecta***

Detalle	Tiempo [horas]	Costo [USD/h]	Costo Total [USD]
Ingeniería y Diseño	120	5,00	600,00
Dibujo Planos Mecánicos	20	4,50	90,00
Programación y Control	16	5,00	80,00
TOTAL:			\$ 770,00

Tabla 53**Costo de Materiales Indirectos**

Elemento	Cantidad	Costo Unitario [USD]	Costo Total [USD]
Electrodo AGA 6013 (Kg)	2	2,80	5,60
Electrodo AGA 6011 (Kg)	1	3,10	3,10
Gas mezcla mixta (m3)	1	16,80	16,80
Disco de corte	1	3,50	3,50
Lija de grano fino (unidad)	4	0,60	2,40
Lija de grano medio (unidad)	3	0,90	2,70
Hoja de Sierra (unidad)	1	1,40	1,40
Cinta aislante (unidad)	1	0,60	0,60
Broca acero al carbono ϕ 1 in	1	19,99	19,99
Fresa ϕ 8 mm	1	12,60	12,60
Cuchilla para torno HSS 1/4 in	1	9,40	9,40
TOTAL:			\$ 78,09

La tabla 54 revela los costos operativos a lo largo de la realización del proyecto.

Tabla 54**Costos Operativos**

Concepto	Costo [USD]
Agua Potable	25,00
Telefonía Celular	20,00
Energía eléctrica	100,00
Transporte o Movilización	250,00
Alimentación	200,00
Internet	50,00
TOTAL: \$ 645,00	

5.3. Costo total del proyecto

Para el costo total del proyecto se consideran los costos directos de fabricación y costos de mano de obra, la mano de obra de instalación y los imprevistos, se incluye también el margen de utilidad el cual se sugiere adoptar un valor entre el 15% y 30% adicional del costo de inversión del equipo, cabe recalcar que al asignar este porcentaje

es relevante la oferta de productos similares en el mercado, es decir, la calidad, precio o promociones para no exagerar ni tampoco minimizar la utilidad. En este caso se opta por un margen del 20%. La tabla 55 indica el resumen de costos de todo el proyecto, que de manera general es representada por la siguiente ecuación.

$$Costos_{Total} = Costos_{Directos} + Costos_{Indirectos} + \% Utilidad \quad (63)$$

Tabla 55

Costo total del equipo

Rubro	Costo
Costo de Materiales Directos	\$ 666,84
Costo de Mano de Obra Directa	\$ 594,25
Costo de Materiales Indirecta	\$ 78,04
Costo de Mano de Obra Indirectos	\$ 770,00
Costos Operativos	\$ 645,00
SUBTOTAL	\$ 2 754,13
Utilidad 20%	\$ 550,83
COSTO TOTAL	\$ 3,304,96

En la figura 122 se observa la representación porcentual de Costos Directos e Indirectos, en el cual el rubro más alto es el costo de manos de obra indirecta representando así el 27.96% del subtotal.

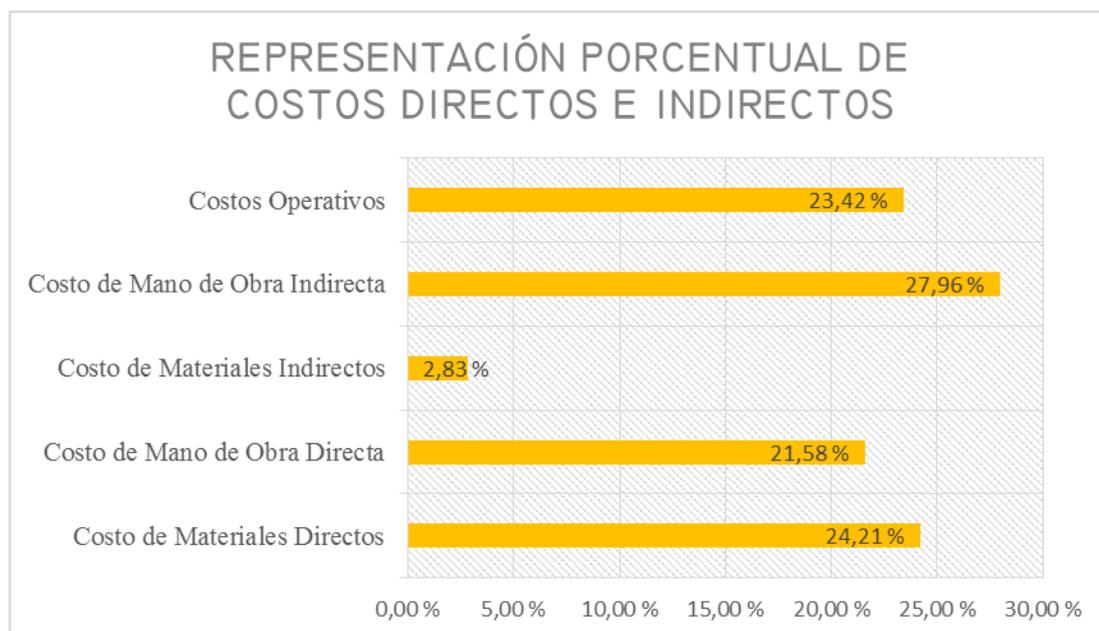


Figura 122. Representación porcentual de Costos Directos e Indirectos

5.4. Evaluación financiera

Es importante calcular e interpretar los índices de eficiencia económica los cuales permiten conocer el costo relativo de los recursos utilizados, dicho de otra manera, saber con cuanta eficiencia se ha utilizado el capital. La relación beneficio/costo muestra la cantidad de dinero que retorna por cada unidad monetaria invertida.

5.4.1. Relación Beneficio / Costo

Es aquella relación en la que tanto el flujo de beneficios como el de costos se actualizan a una tasa de interés que se considera próxima al costo de oportunidad del capital. Se determina así la relación entre el valor actualizado de los beneficios y el valor actualizado de los costos.

$$B/C = \frac{\text{Valor actualizado de los beneficios}}{\text{Valor actualizado de los costos}} \quad (64)$$

Proporcionar una conclusión acerca de la viabilidad de un proyecto bajo este enfoque implica discurrir mediante la comparación de la relación B/C hallada con el valor uno, teniendo así las siguientes relaciones:

- $B/C > 1$: indica que los beneficios superan los costos, por consiguiente el proyecto debe ser considerado.
- $B/C = 1$: aquí no hay ganancias, pues los beneficios son iguales a los costos.
- $B/C < 1$: muestra que los costos son mayores que los beneficios.

En el mercado ecuatoriano existen pocos proveedores de este tipo de equipos para trituración de muestras, se elige como ejemplo el precio de venta de un equipo similar el cual es de \$8,480.00 en Estados Unidos, tomando como base este valor se calcula la relación B/C a partir de la ecuación (64).

$$B/C = \frac{8,480.00}{3,304,96}$$

$$B/C = 2,56$$

Cabe mencionar que el precio de este equipo no considera el costo de envío y tasas de importaciones, pero proporciona una idea del precio.

Como conclusión del indicador financiero el cual expresa rentabilidad en términos relativos, obteniendo así que por cada dólar de inversión se consigue \$1.56 de retorno generando de esta forma un aporte económico.

El equipo de trituración y homogeneización será donado a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y los gastos incurridos en la elaboración del mismo fueron cubiertos por los dos estudiantes a cargo de este proyecto de titulación, tratándose de un proyecto de interés social, por lo que la relación beneficios/costo es discutible pues como en toda obra social algunos beneficios intangibles no son cuantificados.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se presentan las conclusiones finales y las recomendaciones para garantizar la correcta operatividad del equipo.

6.1. Conclusiones

- Se diseñó y construyó un molino para la preparación de muestras en el laboratorio que permite una trituración y homogeneización rápida, y efectiva de pequeños volúmenes de muestra por efectos de impacto y fricción, siendo apropiados para moliendas por vía seca y húmeda, así como moliendas criogénicas y ruptura celular.
- El eslabonamiento manivela-balancín de cuatro barras de Grashof representó una solución óptima y práctica por su desempeño al generar una trayectoria oscilatoria deseada y por su factibilidad desde el punto de vista de manufactura.
- El proceso de diseño mecánico, la elección de materiales, la prevención de falla bajo cargas variables y características de elementos fueron validados por análisis e iteraciones mediante fundamentación matemática, síntesis gráfica y optimización del diseño por software de ingeniería.
- Se diseñó un sistema electrónico microcontrolado y embebido, compuesto por varias etapas como: generación de corriente continua, control automático del motor y adquisición de datos, todo esto fue verificado individualmente, integrado y esquematizado en un sólo circuito, y posteriormente fabricado en una placa de circuito impreso.
- La elección de componentes eléctricos y electrónicos se fundamentó en el control por PWM, determinando que la velocidad de conmutación en los integrados es fundamental en el proceso, razón por la cual los transistores tipo MOSFET son la mejor alternativa tanto por fiabilidad como por robustez.
- Para la visualización y mando de las variables del proceso se utilizó una pantalla táctil como interfaz humano-máquina permitiendo al usuario manejar las variables controladas, detectar fallas, habilitar y deshabilitar el equipo de manera simple, práctica e intuitiva.
- Se realizaron los planos mecánicos de construcción y ensamble de cada una de las partes diseñadas para el equipo bajo la norma ecuatoriana CPE INEN

003:1989, además se realizaron planos eléctricos y electrónicos representativos del circuito de control y potencia del molino triturador, todo esto con la ayuda de software de diseño y simulación.

- El análisis financiero revela que el costo de mano de obra indirecta es el mayor rubro dentro del proyecto representando el 27.96% del costo total del equipo, debido a que exclusivamente se realiza sólo un molino criogénico, no obstante, si se produce en serie los equipos, el porcentaje de este costo disminuirá y generará un rédito económico adicional.

6.2. Recomendaciones

- La trayectoria y velocidad del mecanismo manivela-balancín, produce vibraciones en la máquina, siendo este un efecto perjudicial para su funcionamiento por lo que se recomienda usar una velocidad baja o media.
- Es importante dirigirse al manual de operación del equipo en el apéndice F de este documento previo a su funcionamiento y cumplir con todos los requerimientos, seguridades e instrucciones.
- Para la correcta molturación de la muestra se debe elegir apropiadamente los parámetros de tiempo y frecuencia de trituración siguiendo el procedimiento descrito por el manual de usuario, garantizando un adecuado tamaño de grano.
- La preparación previa de la muestra vegetal debe ser realizada de manera apropiada, tal que reduzca la probabilidad de pérdidas y errores posteriores en la extracción de ADN íntegro y sin contaminantes.
- Es importante recubrir los transistores Mosfet con silicona termo conductora a fin de evitar que dichos integrados se quemen por corrientes estáticas externas o entre sus terminales.
- Para utilizar el equipo a mayores frecuencias que la expuesta en el manual se debe fijar la máquina a una estructura firme, ya que la vibración generada por el mecanismo es elevada y no se la puede aislar simplemente con soportes de caucho natural o neopreno.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcántara, J. (2008). *Diseño práctico de un Molino de bolas*. México: ESIME.
- Alejos, L., Aragón, M., & Cornejo, A. (2008). *Extracción y purificación de ADN*. México: Universidad Autónoma de México.
- Bayo, J. (26 de Abril de 2009). *Ingeniería de materiales*. Obtenido de <https://ingenieriademateriales.wordpress.com/2009/04/26/soldadura-de-aceros-para-aplicaciones-criogenicas/>
- Boylestad, R., & Nashelsky, L. (2006). *Electrónica: Teoría de circuito y dispositivos electrónicos* (8va ed.). México D.F: Prentice Hall.
- Cobb, H. (2010). *The History of Stainless Steel*. Ohio: ASM Internacional.
- Cornejo, A., Rendón, B., Rocha, G., & Serrato, A. (2014). *Herramientas moleculares aplicadas en ecología: aspectos teóricos y prácticos*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Coulson, J., Richardson, J., Backhurst, J., & Harker, J. (2003). *Ingeniería Química: Operaciones básicas*. España: Reverté.
- Dellaporta, S., Wood, J., & Hicks, J. (1983). *Plant Molecular Biology report: A plantDNA minipreparation*. Estados Unidos .
- Estrella, D. (2009). *Diseño de un inversor monofásico de baja frecuencia ajustable mediante Bus DC*. Madrid: Universidad Carlos III. Departamento de Ingeniería Eléctrica.
- Franco, M. (2003). *Nuevo manual de instalaciones eléctricas*. Madrid: Vicent.
- García, J., Medel, J., & Sánchez, J. (2009). *Sistemas de lógica difusa*. México: Instituto Politécnico Nacional.
- Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna 3ed*. México: Mc Graw Hill.
- Ibarra, M., Nuñez, E., & Huerta, J. (12 de Julio de 2012). *INDURA*. Obtenido de http://www.indura.cl/_file/file_1774_manualdeacerosinoxidables%20indura.pdf
- Kozhevnikov, S., Yesipenko, Y., & Raskin, Y. (1975). *Mecanismos: Descripción de más de 200 mecanismos utilizados en la mayoría de ramas de la industria* (3 ed.). Barcelona: Gustavo Gili S.A.

- Lodish, H., Berck, A., Zipursky, L., Matsudaira, P., Baltimore, D., & Darnell, J. (2002). *Molecular Cell Biology*. Estado Unidos: W.H. Freeman and Company.
- Meja, L. (11 de Enero de 2013). *Síntesis De Mecanismos*. Obtenido de <http://blog.utp.edu.co/adriamec/sintesis-de-mecanismos/>
- Mitra, S. (2003). *Sample Preparation Techniques in Analytical Chemistry*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de máquinas*. México: Pearson Educación.
- Myszka, D. (2012). *Máquinas y mecanismos* (4 ed.). México: Pearson Educación.
- Norton, R. (2009). *Diseño de maquinaria: Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos* (4 ed.). México: Mc Graw Hill.
- Pérez, M., Alvarez, J., Campo, J., Ferrero, F., & Grillo, G. (2012). *Intrumentación Electrónica*. Madrid: Thomson.
- Retsch. (12 de Abril de 2014). *Mixer Mill MM 200*. Obtenido de <http://www.retsch.com/products/>
- Retsch. (10 de Febrero de 2014). *Mortar Grinder RM 200*. Obtenido de <http://www.retsch.com/>
- Rogers, S., & Bendish, A. (1988). *Plant Molecular Biology Manual*. Bélgica: Kluwer Academic Publishers.
- Ross, T. (2010). *Fuzzy Logic With Engineering Applications*. United Kingdom: Jhon Wiley and Sons.
- Sadiku, M. (2006). *Fundamentos de circuitos eléctricos* (3ra ed.). México: McGraw-Hill Interamericana.
- Savant, C., Roden, M., Carpenter, G., & Nagore, G. (2000). *Diseño electrónico* (2da ed.). México: Pearson Educación.
- Shigley, J., & Uicker, J. (1998). *Teoría de máquinas y mecanismos* (1 ed.). México: Mc Graw Hill.
- Shigley, J., & Vicker, J. (1983). *Teoría De Máquinas Y Mecanismos*. México: Mc Graw-Hill.
- Shigley, J., Budynas, R., & Nibett, K. (2010). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. México: McGraw-Hill.

Trujillo, F., Pozo, A., & Triviño, A. (7 de Junio de 2011). *Universidad de Málaga*. Recuperado el 2015, de http://ocw.uma.es/ingenierias/electronica-de-potencia/ejercicios-proyectos-y-casos-1/calculo_de_disipadores.pdf