



UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR

**FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍAS
APLICADAS**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA BOBINADORA
SEMIAUTOMÁTICA DE 4 EJES PARA LA FABRICACIÓN DE
TANQUES DE FIBRA DE VIDRIO MEDIANTE LA TÉCNICA
FILAMENT WINDING**

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

CARLOS ANDRÉS ENCALADA ZAPATA

DIRECTOR: ING. ESTEBAN GABRIEL MONTÚFAR AYALA, M.Sc.

D.M. QUITO,

2017

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

Yo, Carlos Andrés Encalada Zapata, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que se ha investigado las referencias bibliográficas que se incluyen en el documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Internacional del Ecuador, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por normativa institucional vigente.



Carlos Andrés Encalada Zapata

C.C. 171247270-1

CERTIFICACIÓN

El docente de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías Aplicadas, Ingeniero Esteban Montúfar, M.Sc.

CERTIFICA QUE:

El proyecto de investigación "Diseño y Construcción de una máquina bobinadora semiautomática de 4 ejes para la fabricación de tanques de fibra de vidrio mediante la técnica Filament Winding", fue desarrollado por Carlos Andrés Encalada Zapata, ha sido previamente revisado y está en condiciones de ser entregado para que siga lo dispuesto por la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías Aplicadas, correspondiente a la sustentación y defensa del mismo.



Ing. Esteban Montúfar, M.Sc.

C.C. 171294941-9

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres por demostrar su apoyo incondicional durante todo el proceso, y al personal docente de la Facultad de Ingeniería Mecatrónica, por compartir conmigo conocimiento técnico, financiero, humano y moral, que representa un aporte significativo dentro de mis emprendimientos personales a futuro.

Agradezco también a Ramiro Brito, decano y amigo que siempre supo canalizar los medios para mantener el nivel de exigencia y curiosidad por la ciencia a lo largo de la carrera.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Contenido

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS	ii
CERTIFICACIÓN.....	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ABREVIATURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN.....	xvi
CAPÍTULO I.....	1
GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS BOBINADORES	1
1.1 TEMA.....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.3 OBJETIVOS.....	1
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	1
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	1
1.4 JUSTIFICACIÓN	2
1.4.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA.....	2
1.4.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA	3
1.4.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA	3
1.5 HIPÓTESIS.....	3
1.6 MARCO TEÓRICO	3
1.6.1 FIBRA DE VIDRIO.....	3
1.6.2 RESINAS TERMOESTABLES	4
1.6.3 ACELERADORES Y CATALIZADORES.....	4
1.6.4 TÉCNICA FILAMENT WINDING.....	5
1.6.5 PROCESO ACTUAL DE CONSTRUCCIÓN DE TANQUES EN LA EMPRESA	7

1.7 ESTADO DEL ARTE	10
1.7.1 ANTECEDENTES DE LA TÉCNICA FILAMENT WINDING.....	10
1.7.2 MÁQUINAS BOBINADORAS EN EL ECUADOR	10
CAPÍTULO II	11
SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	11
2.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	11
2.1.1 CASA DE LA CALIDAD	11
2.1.2 ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LA CASA DE LA CALIDAD	12
2.1.3 FORMULACIÓN DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	15
2.2 DISEÑO CONCEPTUAL	16
2.2.1 ANÁLISIS FUNCIONAL.....	16
2.2.2 MÓDULOS FUNCIONALES	16
2.2.3 SOLUCIONES PARA CADA MÓDULO	18
2.2.4 MATRIZ MORFOLÓGICA.....	20
2.3 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	21
2.3.1 REQUISITOS FUNCIONALES.....	21
2.3.2 REQUISITOS DE DISEÑO	21
2.3.3 SUBSISTEMAS, ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	22
CAPÍTULO III.	44
DISEÑO MECATRÓNICO	44
3.1 DISEÑO MECÁNICO	44
3.1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL	44
3.1.2 CÁLCULOS Y DISEÑO	50
3.2 DISEÑO ELECTRÓNICO.....	72
3.2.1 DISPOSITIVOS DE ENTRADA Y SALIDA.....	72
3.2.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS	74
3.2.3 TABLA DE ESTADOS	78
3.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	79

3.3.1 ALGORITMO GENERAL DEL PROCESO	79
3.3.2 ALGORITMO DE FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA	79
3.3.3 DESCRIPCIÓN DE OPERACIONES MANUALES	82
3.3.4 HMI	83
CAPÍTULO IV	86
CONSTRUCCIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS	86
4.1 CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	86
4.1.1 ESTRUCTURA.....	86
4.1.2 EJE ROTACIONAL (EJE 1)	89
4.1.3 EJE DISTRIBUIDOR (EJE 2)	93
4.1.4 EJE DE OJO (EJE 3)	97
4.1.5 EJE RADIAL (EJE 4).....	100
4.1.6 SISTEMA BOBINADOR DE FILAMENTOS	104
4.1.7. CONSTRUCCIÓN DE UN TANQUE CILÍNDRICO DE TAPA TORIESFÉRICA .	111
4.2 RESULTADOS	120
4.2.1 SISTEMA DE SOPORTE Y ROTACIÓN DEL MANDRIL	120
4.2.2 DISTRIBUIDOR MÓVIL.....	120
4.2.3 HOMOGENEIZADOR DE FIBRAS.....	120
4.2.4 SISTEMA DE AVANCE RADIAL.....	121
4.2.5 SISTEMA BOBINADOR DE FILAMENTOS	121
4.2.6 CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE DE FIBRA DE VIDRIO.....	121
CONCLUSIONES.....	122
RECOMENDACIONES.....	123
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema de la técnica Filament Winding	5
Figura 1.2. Esquemmatización de los métodos de bobinado	7
Figura 1.3. Tanques de P.R.F.V. con tapa toriesférica	8
Figura 1.4. Proceso manual de construcción de un tanque de fibra de vidrio.....	8
Figura 2.1. Casa de la calidad del proyecto.....	13
Figura 2.2. Nivel 0 del sistema	16
Figura 2.3. Nivel 1 del sistema	17
Figura 2.4. Nivel 2 del sistema	17
Figura 2.5. Matriz morfológica.....	20
Figura 2.6. Estructura de la máquina ENTEC FW750, [3]	23
Figura 2.7. Estructura de la máquina VIDATEK, [4]	24
Figura 2.8. Estructura de la máquina CNC Technics, [5].....	25
Figura 2.9. Motor a pasos, [6].....	30
Figura 2.10. Motor DC, [7].....	31
Figura 2.11. Servomotor DC, [8]	32
Figura 2.12. Controlador lógico programable OMRON CP1H, [9].....	37
Figura 2.13. Controlador lógico programable Allen Bradley ControlLogix 5580, [10].....	38
Figura 2.14. Controlador lógico programable Siemens S7-1200, [11].....	39
Figura 3.1. Modelo 3D del sistema bobinador	44
Figura 3.2. Componentes principales de la máquina	45
Figura 3.3. Modelo de la estructura.....	46
Figura 3.4. Modelo del molde	47
Figura 3.5. Modelo del sistema de soporte y rotación del mandril	47
Figura 3.6. Modelo del distribuidor móvil	48
Figura 3.7. Modelo del homogeneizador de fibras.....	49
Figura 3.8. Modelo del eje radial.....	49
Figura 3.9. Reacciones en la viga de mayor longitud.....	51
Figura 3.10. Diagrama cuerpo libre, diagrama de cortantes y momentos	53
Figura 3.11. Simulación de deflexión en la estructura.....	56
Figura 3.12. Gráfico para selección de paso de correas dentadas, [15]	60
Figura 3.13. Diagrama de selección del módulo del dentado, [17]	67
Figura 3. 14. Torque en función de la frecuencia para máquinas bobinadoras, [22]	75

Figura 3.15. Diagrama de flujo del algoritmo de funcionamiento	80
Figura 3. 16. Diagrama de flujo subrutina 1	81
Figura 3. 17. Diagrama de flujo subrutina 2	81
Figura 3.18. Interfaz de inicio	83
Figura 3.19. Pantalla principal	84
Figura 3.20. Pantalla de instrucciones	84
Figura 3.21. Pantalla “acerca de”	85
Figura 4.1. Posicionamiento de los primeros elementos	87
Figura 4.2. Estructura de la máquina	87
Figura 4.3. Pintura de fondo color gris	88
Figura 4.4. Ubicación de los perfiles para el distribuidor móvil	88
Figura 4.5. Estructura pintada	89
Figura 4.6. Poleas 36H100 con banda 750H100	90
Figura 4.7. Poleas 36H100	90
Figura 4.8. Ejes del sistema de rotación del mandril y mordaza	91
Figura 4.9. Ubicación de poleas y chumaceras en los ejes.....	91
Figura 4.10. Ubicación de la mordaza	92
Figura 4.11. Ubicación del sistema de soporte y rotación del mandril.....	93
Figura 4.12. Estructura del distribuidor móvil.....	94
Figura 4.13. Base de pintura color gris	94
Figura 4.14. Ruedas de poliuretano en el distribuidor móvil	95
Figura 4.15. Ubicación del distribuidor móvil en la estructura.....	95
Figura 4.16. Ubicación de la cremallera del eje distribuidor	96
Figura 4.17. Posicionamiento del motor a pasos	96
Figura 4.18. Piezas cortadas mediante chorro de agua.....	97
Figura 4.19. Estructura del homogeneizador de fibras.....	98
Figura 4.20. Poleas 36L050 y polea 285L050	98
Figura 4.21. Homogeneizador de fibras.....	99
Figura 4.22. Ubicación del homogeneizador de fibras en la estructura.....	99
Figura 4.23. Carro de avance radial	100
Figura 4.24. Sistema de avance radial saliendo del distribuidor móvil	101
Figura 4.25. Vista aérea del carro de avance radial, contenedor de resina y homogeneizador de fibras	101
Figura 4.26. Pintura del carro de avance radial.....	102

Figura 4.27. Ubicación de la cremallera para el sistema de avance radial.....	102
Figura 4.28. Ubicación del motor en el sistema piñón-cremallera.....	103
Figura 4.29. Contenedor de resina sin pintar.....	104
Figura 4.30. Contenedor de resina pintado.....	104
Figura 4.31. Cableado de motores a pasos	105
Figura 4.32. Ubicación de elementos en el tablero de control	105
Figura 4.33. Cableado de componentes del gabinete.....	106
Figura 4.34. Sistema en funcionamiento	106
Figura 4.35. Secuencia de bobinado helicoidal, posición 1.....	107
Figura 4.36. Secuencia de bobinado helicoidal, posición 2.....	107
Figura 4.37. Secuencia de bobinado helicoidal, posición 3.....	108
Figura 4.38. Secuencia de bobinado helicoidal, posición 4.....	108
Figura 4.39. Secuencia de bobinado helicoidal, posición 5.....	109
Figura 4.40. Secuencia de bobinado helicoidal, posición 6.....	109
Figura 4.41. Secuencia de bobinado helicoidal, posición 7.....	110
Figura 4.42. Filamento de fibra de vidrio entre la máquina y el molde	112
Figura 4.43. Baño de resina en el contenedor.....	112
Figura 4.44. Interfaz de inicio	113
Figura 4.45. Construcción del tanque, etapa inicial	113
Figura 4.46. Construcción del tanque, patrones de bobinado.....	114
Figura 4.47. Carrete de filamentos posicionado durante el bobinado	114
Figura 4.48. Contenedor de resina, dosificación	115
Figura 4.49. Construcción del tanque, 30 minutos transcurridos	115
Figura 4.50. Construcción del tanque, 1 hora transcurrida.....	116
Figura 4.51. Construcción del tanque, tiempo: 2 horas.....	116
Figura 4.52. Construcción del tanque, tiempo: 3 horas.....	117
Figura 4.53. Construcción del tanque, tiempo: 4 horas.....	117
Figura 4. 54. Tanque construido, desmontado de la máquina.....	118
Figura 4.55. Tanque de poliéster reforzado con fibra de vidrio.....	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Patentes de la técnica Filament Winding.....	10
Tabla 2.1. Requerimientos y deseos.....	15
Tabla 2.2. Soluciones módulo 1.....	19
Tabla 2.3. Soluciones módulo 2.....	19
Tabla 2.4. Requisitos de diseño.....	22
Tabla 2.5. Ventajas y desventajas de la estructura ENTEC.....	23
Tabla 2.6. Ventajas y desventajas de la estructura VIDATEK.....	24
Tabla 2.7. Ventajas y desventajas de la estructura CNC Technics.....	25
Tabla 2.8. Evaluación del peso específico de cada criterio, subsistema A.....	26
Tabla 2.9. Análisis de alternativas subsistema A con respecto a la complejidad de fabricación.....	27
Tabla 2.10. Análisis de alternativas subsistema A con respecto a la rigidez.....	27
Tabla 2.11. Análisis de alternativas subsistema A con respecto al montaje.....	28
Tabla 2.12. Análisis de alternativas subsistema A con respecto a las dimensiones.....	28
Tabla 2.13. Análisis de alternativas subsistema A con respecto al atractivo visual.....	29
Tabla 2.14. Selección de alternativas en base a la ponderación de criterios, subsistema A.....	29
Tabla 2.15. Ventajas y desventajas del motor a pasos.....	30
Tabla 2. 16. Ventajas y desventajas del motor DC.....	31
Tabla 2. 17. Ventajas y desventajas del servomotor DC.....	32
Tabla 2.18. Evaluación del peso específico de cada criterio, subsistema B.....	33
Tabla 2.19. Análisis de alternativas subsistema B con respecto a la disponibilidad.....	34
Tabla 2.20. Análisis de alternativas subsistema B con respecto al torque.....	34
Tabla 2.21. Análisis de alternativas subsistema B con respecto a la estabilidad.....	35
Tabla 2.22. Análisis de alternativas subsistema B con respecto al costo.....	35
Tabla 2.23. Análisis de alternativas subsistema B con respecto al mantenimiento.....	36
Tabla 2.24. Selección de alternativas en base a la ponderación de criterios, subsistema B.....	36
Tabla 2.25. Ventajas y desventajas del PLC OMRON.....	37
Tabla 2.26. Ventajas y desventajas del PLC Allen Bradley.....	38
Tabla 2.27. Ventajas y desventajas del PLC Siemens.....	39
Tabla 2.28. Evaluación del peso específico de cada criterio, subsistema C.....	40
Tabla 2.29. Análisis de alternativas subsistema C con respecto al costo.....	40
Tabla 2.30. Análisis de alternativas subsistema C con respecto a la compatibilidad.....	41
Tabla 2.31. Análisis de alternativas subsistema C con respecto a la disponibilidad.....	41

Tabla 2.32. Análisis de alternativas subsistema C con respecto a la confiabilidad	42
Tabla 2.33. Análisis de alternativas subsistema C con respecto al soporte técnico	42
Tabla 2.34. Selección de alternativas en base a la ponderación de criterios, subsistema C.	43
Tabla 3.1. Parámetros del homogeneizador de fibras.....	60
Tabla 3.2. Transmisión estándar para el homogeneizador de fibras	61
Tabla 3.3. Parámetros de la transmisión del eje 1.....	64
Tabla 3.4. Transmisión estándar para el eje 1	65
Tabla 3.5. Dispositivos de entrada del sistema bobinador	73
Tabla 3.6. Dispositivos de salida del sistema bobinador	74
Tabla 3.7. Lógica del circuito y acciones a ejecutarse	78
Tabla 4.1. Pruebas del sistema de soporte y rotación del mandril.....	93
Tabla 4.2. Pruebas con el distribuidor móvil	97
Tabla 4.3. Pruebas con el homogeneizador de fibras	100
Tabla 4.4. Pruebas del sistema de avance radial	103
Tabla 4.5. Pruebas del sistema bobinador.....	111
Tabla 4.6. Pruebas con fibra de vidrio y resina en el sistema.....	119
Tabla 4.7. Rango de velocidades de rotación del mandril	120
Tabla 4.8. Resultados obtenidos en el distribuidor móvil.....	120
Tabla 4.9. Resultados obtenidos en el homogeneizador de fibras.....	120
Tabla 4.10. Resultados obtenidos en las pruebas del sistema de avance radial	121
Tabla 4.11. Resultados del sistema bobinador de filamentos.....	121
Tabla 4.12. Resultados de la construcción del tanque de fibra de vidrio	121

ABREVIATURAS

AGMA.	Asociación de fabricantes de engranes de los Estados Unidos
HMI.	Interfaz Humano-Máquina
PLC.	Controlador Lógico Programable
PRFV.	Poliéster Reforzado con Fibra de Vidrio
MEK.	Peróxido de metil etil cetona
RPM.	Revoluciones por minuto
kgf.	Kilogramo fuerza
TFF.	Alambre termoplástico flexible
AWG.	Escala de calibres americanos para alambres y cables
rpm.	Revoluciones por minuto

RESUMEN

Por medio del presente proyecto de titulación, se implementa en la empresa STRONGPLAST S.C.C. una máquina bobinadora semiautomática de 4 ejes para la construcción de tanques de fibra de vidrio. El sistema se encarga de bobinar filamentos de vidrio impregnados de resina poliéster, a fin de obtener un tanque de tapa toriesférica hecho de P.R.F.V., un material compuesto con excelentes propiedades mecánicas.

El desarrollo del proyecto se basa en el análisis de alternativas y uso de herramientas de gestión de la calidad para seleccionar los parámetros de mayor importancia que permitan diseñar una máquina apta para competir con modelos similares del mercado. Una vez definidos los parámetros, se da inicio a la etapa de diseño y modelamiento del sistema.

Dentro del diseño mecánico interviene el dimensionamiento de la máquina, cálculo de fuerzas que actúan sobre la misma y selección de componentes necesarios para la construcción de la estructura y ejes de movimiento (transmisiones). Por otro lado, el diseño electrónico permite determinar los requerimientos de voltaje y corriente para alimentar los circuitos, la cantidad de entradas y salidas, seleccionar el controlador lógico programable y elementos electrónicos de control del sistema. Finalmente, el diseño en el área de sistemas y control permite establecer la lógica de funcionamiento de la máquina durante el proceso y la sincronización de velocidades de motores y ángulos de incidencia para obtener patrones de bobinado en un molde.

Los resultados principales del diseño son los planos y el listado de materiales necesarios para llevar a cabo la construcción de la máquina.

La etapa final del proyecto consistió en el proceso de construcción y pruebas de la máquina. Luego de construir la estructura mecánica y ensamblar los componentes que permiten el movimiento libre de la máquina, se realizaron pruebas de verificación del movimiento en los ejes y se procedió a ensamblar y conectar los elementos electrónicos del sistema. Una vez finalizada la construcción, se realizaron las pruebas de funcionamiento en base a la lógica de control del sistema.

ABSTRACT

With this Project, the company STRONGPLAST S.C.C. implemented a semiautomatic filament winding machine with 4 axes for the construction of fiberglass tanks, moving coil impregnated glass filaments with polyester resin, to obtain a torispherical tank made of a composite material with excellent mechanical properties.

The project development was based on the analysis of alternatives and the use of tools of quality management to select the most important parameters of the machine's design, which when defined, initiated the design and modeling stage.

Within the mechanical design intervenes dimensioning of the machine, calculation of forces acting on the machine and selection of components needed for the construction of the structure and motion axes. On the other hand, the electronic design determines voltage and current requirements in order to power circuits. It also includes the selection of the programmable logic controller and electronic circuits. Finally, the information systems and control area allows the machine to synchronize engine speeds and rotation angles to obtain different winding patterns in a mold.

The main results of the design stage were the construction plans and a list of materials needed to carry out the construction process.

As mentioned, the final stage of the project involved the construction and testing of the machine. After building the mechanical structure and assembling the components that allow free movement of the machine, the movement verification tests were performed on the 4 axes. After that, electronic elements were connected in order to start the operation tests based on the control logic previously done on the design stage.

INTRODUCCIÓN

La empresa ecuatoriana STRONGPLAST S.C.C. se dedica al diseño y fabricación de tanques de almacenamiento con materiales fibroreforzados. Actualmente, la construcción de tanques es un proceso manual que requiere de 2 a 5 operadores, quienes construyen un cilindro mediante el bobinado de fibra de vidrio en un molde, y posteriormente construyen y acoplan las secciones extremas, creando un tanque de P.R.F.V. cilíndrico de tapa toriesférica.

Los tanques son fabricados con el propósito de brindar soluciones a la problemática que involucra el almacenamiento y tratamiento de agua o sustancias líquidas en general, tratamiento de desechos, almacenamiento de agentes químicos y toda aplicación que requiera un tanque con el fin de almacenar sustancias.

La empresa requiere convertir el proceso manual de fabricación de tanques en un proceso semiautomático a través de una máquina que, mediante la técnica Filament Winding, pueda bobinar moldes de tapa toriesférica con filamentos de fibra de vidrio impregnados de resina poliéster. Es necesario que la máquina disponga de 4 ejes de movimiento con la finalidad de que los patrones de bobinado puedan abarcar toda la superficie del molde.

Una de las ventajas principales de la implementación de la máquina es la disminución del tiempo de fabricación de cada tanque, factor que incrementa la capacidad de producción de la empresa. Además se genera una reducción del costo de fabricación de cada tanque gracias a que disminuye el desperdicio de materia prima.

CAPÍTULO I

GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS BOBINADORES

1.1 TEMA

“Diseño y Construcción de una máquina bobinadora semiautomática de 4 ejes para la fabricación de tanques de fibra de vidrio mediante la técnica Filament Winding”

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La empresa STRONGPLAST S.C.C. se dedica a la fabricación de tanques de almacenamiento con materiales fibroreforzados. La construcción de tanques actualmente es una operación manual que requiere de 2 a 5 operadores, los cuales construyen el cilindro y las tapas para su posterior acople.

La empresa requiere convertir el proceso manual de fabricación de tanques en un proceso semiautomático a través de una máquina que, mediante la técnica Filament Winding, pueda bobinar moldes de tapa toriesférica.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir una máquina bobinadora semiautomática de 4 ejes para la fabricación de tanques de fibra de vidrio mediante la técnica Filament Winding.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Investigar y documentar la técnica Filament Winding.
- II. Diseñar e implementar el sistema electrónico para el funcionamiento y el control de la máquina bobinadora.
- III. Construir la máquina bobinadora semiautomática basándose en el diseño en ingeniería mecatrónica.
- IV. Desarrollar y programar la lógica de control del sistema bobinador.
- V. Realizar las pruebas de funcionamiento de la máquina bobinadora.

1.4 JUSTIFICACIÓN

1.4.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

La implementación de una máquina semiautomática para la fabricación de tanques de fibra de vidrio genera beneficios en comparación con el proceso de fabricación manual. Las ventajas del bobinado semiautomático son las siguientes:

- Reducción del tiempo de construcción de cada tanque
- Mayor precisión en los patrones de bobinado de filamentos
- Mejor acabado superficial
- Optimización de materia prima, reducción de desechos
- Disminución del costo de fabricación de cada tanque

1.4.1.1 Mecánica

- Análisis estático y dinámico de la estructura de la máquina
- Diseño y selección de elementos mecánicos (rodamientos, poleas, electrodos y patrones de soldadura, dimensiones, material y espesor de la estructura)
- Fundamentación teórica del diseño de tanques según los ángulos y patrones de bobinado
- Elaboración de planos mecánicos

1.4.1.2 Electrónica

- Acondicionamiento de señales provenientes de sensores para el inicio, paro y alertas de la máquina
- Selección de la fuente de alimentación para los motores y el control de la máquina en base al requerimiento de voltaje y corriente
- Elaboración de planos eléctricos y electrónicos

1.4.1.3 Control

- Sincronización de motores para el movimiento de los 4 ejes según los ángulos y patrones de bobinado requeridos
- Implementación de la interfaz humano-máquina (HMI)

1.4.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA

Se realizará una recopilación, análisis y síntesis de información referente a máquinas similares, a fin de comparar los tipos de estructuras utilizadas, tamaño y capacidad de producción de las máquinas. A través de dicha comparación se evaluarán las alternativas que más se ajusten al requerimiento de la empresa.

Adicionalmente se analizará el costo de los componentes necesarios para construir la máquina, de modo que se establezca una relación costo-beneficio óptima.

1.4.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

El tiempo de construcción de un tanque es variable y directamente proporcional a sus dimensiones y número de capas del bobinado.

Las dimensiones de los tanques fabricados por la empresa son 1m de diámetro y 1.50m de longitud, con 1 capa de bobinado. El proceso actual de producción permite construir 2 tanques como el mencionado anteriormente en una jornada de trabajo de 8 horas, mientras que la implementación de la máquina permite construir al menos 4 tanques en el mismo período.

1.5 HIPÓTESIS

La máquina bobinadora semiautomática diseñada y construida para la fabricación de tanques de fibra de vidrio con capacidad para montar mandriles con diámetro de cuerpo variable entre 10cm y 1m, y longitud máxima de molde de 1.50m, mecaniza tanques con una capacidad de producción de 10 tanques por cada jornada de 8 horas de trabajo.

1.6 MARCO TEÓRICO

1.6.1 FIBRA DE VIDRIO

De acuerdo con las lecturas complementarias sobre materiales compuestos de S. Poveda [1], la fibra constituye el refuerzo de un material compuesto, es decir, resiste la acción de las cargas que están presentes en la estructura. Son elementos en forma de hilo formados a partir de sílice, cuya relación longitud/diámetro es mayor a 100.

La fibra de vidrio además de ser dura y flexible, es resistente al ataque químico, actúa como aislante térmico y presenta una gran resistencia a la tracción.

Se clasifica según las propiedades que tendrá la estructura del material compuesto que va a conformar:

- Vidrio C. Cuando el material compuesto requiere resistencia a la acción de compuestos químicos como ácido sulfúrico.
- Vidrio D. Cuando el requerimiento sea una baja constante dieléctrica.
- Vidrio E. Se utiliza para aplicaciones generales (en el caso de los tanques, el almacenamiento de agua se considera una aplicación general).
- Vidrio S. Este tipo de fibra se utiliza cuando se requiere que el material compuesto tenga mejores prestaciones mecánicas en cuanto a resistencia y rigidez.

1.6.2 RESINAS TERMOESTABLES

De acuerdo con [1], la resina termoestable es el elemento que actúa como matriz en un material compuesto; es decir, se presenta en fase continua y cumple con las siguientes funciones:

- Transferir las cargas hacia el refuerzo
- Evitar la propagación de grietas en la estructura del material compuesto
- Proteger la estructura del deterioro químico

El tipo de resina a utilizarse dependerá de las condiciones de temperatura en las que se utilizará el tanque que se requiere construir. De manera general, para todas las regiones del Ecuador se utiliza resina poliéster; sin embargo, si se requiere operar con temperaturas de trabajo de hasta 300°C, se utiliza resina poliamidas.

1.6.3 ACELERADORES Y CATALIZADORES

Según el manual de uso de la fibra de vidrio [2], la resina termoestable requiere del uso de un acelerador y un catalizador para endurecer el compuesto si el proceso de curado se realiza a temperatura ambiente. El acelerador disminuye el tiempo en el que se efectúa la reacción química, mientras que el catalizador permite formar una estructura tridimensional del compuesto.

El procedimiento realizado en la empresa para tratar la resina consiste en acelerarla utilizando cobalto y catalizar el compuesto con MEK.

La combinación de elementos debe realizarse de forma secuencial y ordenada. No se debe combinar el peróxido con cobalto directamente, debido a que la mezcla directa de ambos compuestos genera una explosión. Las proporciones recomendadas en el compuesto son:

- Cobalto: De 0.05% a 0.5%
- MEK: De 0.5% a 3%

1.6.4 TÉCNICA FILAMENT WINDING

La técnica de bobinado de filamentos (Filament Winding) es un método para la fabricación de estructuras de materiales compuestos.

El proceso se lleva a cabo enrollando filamentos de un material de refuerzo en un molde con la geometría deseada y recubriendo los mismos con una matriz orgánica. Luego de realizar un proceso de curado, la combinación matriz-refuerzo da origen a un material compuesto conocido como poliéster reforzado con fibra de vidrio.

Para llevar a cabo la construcción de una estructura mediante la técnica Filament Winding, es necesario sincronizar 2 movimientos de rotación con 2 de traslación como se muestra en la Figura 1.1.

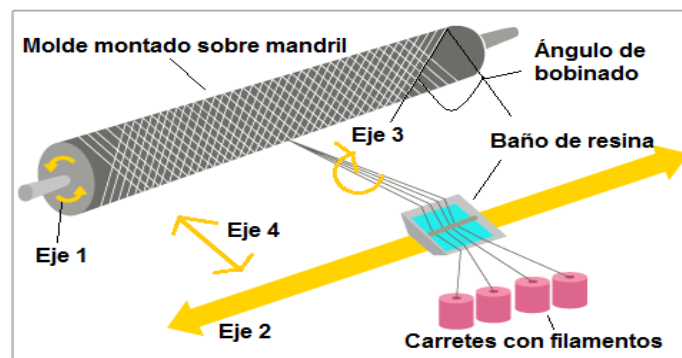


Figura 1.1. Esquema de la técnica Filament Winding

El movimiento de los ejes funciona de la siguiente manera:

- Rotación del mandril (Eje 1). Su principio de operación es similar al de un torno, que permite la rotación continua del mandril durante el proceso.
- Movimiento axial (Eje 2). En este caso la línea de acción es paralela a la dirección del eje rotacional del mandril. Su función es mover un carro longitudinal donde se impregnan los filamentos con resina durante el proceso.

- Movimiento de ojo (Eje 3). Consiste en un eje de rotación del acople que sostiene el filamento, paralelo al eje del carro transversal. Su función consiste en girar cuando el carro transversal ha avanzado al centro del mandril.
- Movimiento radial (Eje 4). Constituye el eje de traslación del carro transversal, perpendicular a la línea de acción del carro longitudinal. Este eje permite el avance del filamento hacia el centro de la sección transversal del mandril.

De acuerdo con los patrones y ángulos de bobinado, la técnica Filament Winding se puede llevar a cabo mediante 3 métodos diferentes:

- Bobinado helicoidal. Se trata del método más utilizado para la fabricación de tanques de poliéster reforzado con fibra de vidrio. Consiste en realizar un patrón de espiral a lo largo del molde; esto se consigue sincronizando el movimiento de los ejes 1 y 2 de modo que por cada revolución del eje 1, el eje 2 avance la distancia equivalente a la longitud del mandril. El movimiento de ambos ejes es continuo, mientras que el movimiento de los ejes 3 y 4 es discreto. El eje 4 avanza hacia el centro de la sección transversal del mandril cada vez que el eje 2 llega a uno de los extremos del mismo, y a continuación el eje 3 debe dar una revolución para que el eje 4 regrese a su posición inicial y el proceso se repita hasta finalizar el bobinado. El ángulo de bobinado aumenta o disminuye dependiendo de la velocidad de movimiento de los ejes; si el ángulo aumenta, también lo hace la resistencia a la compresión del material compuesto, y si el ángulo disminuye, aumenta la resistencia a la tracción.
- Bobinado circunferencial. Es un método similar al bobinado helicoidal, sin embargo en este caso la velocidad de movimiento de los ejes se debe sincronizar de modo que el ángulo de bobinado sea igual a 90° .
- Bobinado polar. Este método requiere de 2 ejes de movimiento que realizan la función de los ejes 1 y 2 del bobinado helicoidal y circunferencial; sin embargo, en el bobinado polar los movimientos son realizados por el mandril mientras el contenedor con filamentos impregnados de resina se mantiene estático. En este caso, por cada revolución que gira el mandril, otro eje de rotación hace que el mandril se desplace hacia un lado, generando así el patrón de bobinado.

Los métodos de bobinado se muestran a continuación en la Figura 1.2.

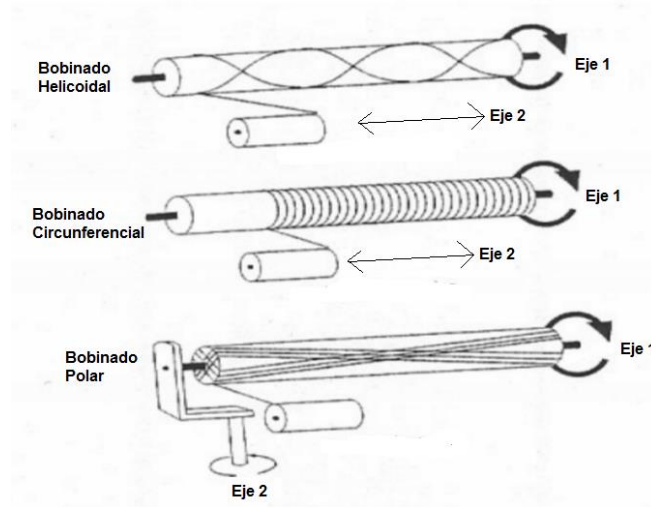


Figura 1.2. Esquematzación de los métodos de bobinado

La combinación matriz-refuerzo para crear el material compuesto se puede realizar mediante 3 procedimientos:

- Bobinado seco. Para llevar a cabo este procedimiento es necesario realizar un proceso de curado parcial a la matriz (resina) y el precalentamiento del mandril. Luego de esto los filamentos son impregnados de resina y se realiza el proceso de bobinado.
- Bobinado húmedo. Es el procedimiento que la empresa requiere implementar para el presente proyecto. Consiste en impregnar los filamentos con la mezcla resina-catalizador un instante antes del bobinado, es decir, dentro del mismo proceso continuo.
- Bobinado post impregnación. En este caso primero se realiza el bobinado de filamentos y luego la impregnación de resina por medio de rodillos si se realiza de forma manual, o mediante un aspersor si se realiza de forma automática.

1.6.5 PROCESO ACTUAL DE CONSTRUCCIÓN DE TANQUES EN LA EMPRESA

El proceso de construcción de tanques de tapa toriesférica como los que se muestran en la Figura 1.3, utiliza una matriz orgánica (resina termoestable) y un refuerzo de hilos de fibra de vidrio, formando tanques de P.R.F.V. después de un tiempo de polimerización



Figura 1.3. Tanques de P.R.F.V. con tapa toriesférica

El procedimiento que actualmente se lleva a cabo en la empresa STRONGPLAST S.C.C. para la fabricación de tanques de poliéster reforzado con fibra de vidrio requiere de 2 a 5 operadores como se muestra en la Figura 1.4 e implica el desarrollo de las siguientes etapas:



Figura 1.4. Proceso manual de construcción de un tanque de fibra de vidrio

- Montaje del molde o matriz en una superficie elevada al alcance de los operadores. Esta etapa requiere colocar el molde sobre bases que permitan a los operadores alcanzar toda la superficie del cilindro.
- Corte y preparación de los filamentos de vidrio. Durante esta etapa se calcula la superficie del cilindro y se corta fibra de vidrio suficiente para cubrir la superficie requerida por el número de capas de revestimiento. La fibra cortada se acomoda en un lugar cercano a los operadores.
- Preparación de la mezcla. Implica la combinación de la resina poliéster con un acelerador y un catalizador para llevar a cabo la combinación matriz-refuerzo a temperatura ambiente.
- Bobinado manual de hilos de fibra de vidrio y recubrimiento manual de resina por medio de brochas y rodillos.
- Espera del tiempo de polimerización del tanque (proceso en el cual los elementos se convierten en un material compuesto).
- Desmontaje del mandril. Separación del compuesto bobinado del molde en el que fue laminado.

La implementación de una máquina bobinadora semiautomática mejora el proceso de construcción de tanques de fibra de vidrio, de manera que un operador se encarga de montar el mandril, verter la resina con el catalizador en un recipiente y posicionar los filamentos de vidrio, para finalmente activar la máquina.

En este caso, el proceso no se realiza por capas sino de forma continua debido a que los filamentos de fibra de vidrio son tensados mediante un sistema de poleas que pasa por el contenedor de resina. De este modo, la máquina bobina los filamentos que han sido previamente sumergidos en la mezcla y el proceso concluye directamente con el desmontaje del molde en un lugar donde permanecerá hasta que finalice el proceso de polimerización del tanque.

Este proceso disminuye el desperdicio de material debido a que la máquina utiliza filamentos provenientes de un carrete, por lo cual el único material desperdiciado es el que queda en el baño de resina luego de finalizar el bobinado.

1.7 ESTADO DEL ARTE

1.7.1 ANTECEDENTES DE LA TÉCNICA FILAMENT WINDING

La técnica Filament Winding constituye uno de los procesos más antiguos de manufactura para materiales compuestos. Se originó en la década de 1940 y debido a su versatilidad se ha utilizado a lo largo del tiempo para fabricar tanques, partes de cohetes, carcasas de motores, componentes de aviones, entre otros.

Desde los inicios de la técnica existen patentes para máquinas bobinadoras de filamentos que a pesar de utilizar el mismo procedimiento, registran ciertos cambios en la forma de controlar el bobinado, número de ejes, entre otros factores. La tabla 1.1 muestra 3 patentes sobre la técnica Filament Winding.

Tabla 1.1. Patentes de la técnica Filament Winding

ID Patente	No. Patente	Nombre	Características
US006096164A	6096164	Multiple Axes fiber placement machine	2 ejes de rotación y 2 de traslación; control de temperatura en el almacenamiento de resina
US4172562	4172562	Process for winding filaments on a mandrel	Paro de la máquina en tiempos establecidos para retirar excesos de material
US3245624	3245624	Filament Winding apparatus	Varios filamentos son agrupados formando una sola cinta

1.7.2 MÁQUINAS BOBINADORAS EN EL ECUADOR

Actualmente en el país no se comercializan este tipo de máquinas. Las empresas que se dedican a la construcción de tanques en fibra de vidrio en el Ecuador realizan el proceso manual o han construido maquinaria de forma independiente.

CAPÍTULO II

SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

2.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

El análisis de requerimientos técnicos se aborda de forma específica utilizando el método QFD (despliegue de la función de calidad), el cual permite recolectar los deseos y expectativas del cliente y transformarlos en especificaciones técnicas de la máquina. La representación gráfica del análisis corresponde al diagrama “casa de la calidad” mostrado en la Figura 2.1.

2.1.1 CASA DE LA CALIDAD

2.1.1.1 Voz del usuario

Dentro del proyecto, la voz del usuario representa los requerimientos del cliente, tomando en cuenta las necesidades del operador. Los requerimientos del usuario son los siguientes:

Demandas básicas (son los requerimientos que necesariamente deben ser cumplidos para satisfacer al cliente):

- Estabilidad de la estructura
- Posicionamiento manual del molde, filamentos y baño de resina

Demandas estimulantes (aquellas que mejoran el grado de satisfacción del usuario, pero de no darse, no producen insatisfacción):

- Tamaño compacto
- Capacidad para bobinar tomando filamentos de múltiples carretes

Demandas unidimensionales (a medida que se mejoran tienden a aumentar de forma proporcional la satisfacción del usuario):

- Manejo sencillo e intuitivo de la máquina
- Fácil mantenimiento

2.1.1.2 Voz del ingeniero

El ingeniero es el encargado de hacer factibles los requerimientos del cliente a través de especificaciones técnicas. Las características obtenidas en base al requerimiento del cliente son las siguientes:

- Diseño por rigidez con elementos de precisión moderada (deflexión máxima entre longitud/2000 y longitud/10000)
- Parámetros de inicio definibles por el usuario
- Partes desmontables, uniones empernadas y estandarizadas
- Alimentación de 1 a 5 carretes
- Diseño de HMI amigable con el usuario
- Volumen máximo disponible (3000 x 2200 x 2200)mm

2.1.2 ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LA CASA DE LA CALIDAD

En la Figura 2.1 se muestra el desarrollo de la casa de la calidad. Los requerimientos jerarquizados según su importancia son los siguientes:

- Capacidad de bobinar con múltiples carretes de filamentos, factor que se convierte en especificaciones técnicas de complejidad operativa, cantidad de carretes aceptados, cantidad de parámetros de inicio y volumen de la máquina.
- La estabilidad se traduce en especificaciones de robustez, volumen y complejidad operativa.
- Posicionamiento manual del molde, filamentos y resina, requerimiento que se convierte en especificaciones de complejidad operativa y cantidad de parámetros de inicio.
- El requerimiento de que la máquina tenga un tamaño compacto se transforma en especificaciones de volumen, robustez, cantidad de carretes aceptados y mantenibilidad.
- Manejo sencillo e intuitivo de la máquina, necesidad que se convierte en especificaciones de complejidad operativa, cantidad de parámetros de inicio y mantenibilidad.
- Fácil mantenimiento, se convierte en especificaciones de mantenibilidad y volumen.

- La correlación positiva entre robustez y volumen quiere decir que al aumentar las características de volumen de la máquina, ésta tiende a ser más robusta.
- Mientras mayor sea el volumen, la mantenibilidad tiende a ser mejor debido a que el operador dispone del espacio necesario para manipular los elementos de la máquina que requieran mantenimiento.
- Existe una correlación positiva con beneficios bilaterales entre la cantidad de carretes aceptados y parámetros de inicio; esto implica que ambas especificaciones pueden verse beneficiadas a partir de una misma decisión; por ejemplo, disminuir la cantidad de carretes aceptados también disminuye la cantidad de parámetros de inicio de la máquina.

Además, las conclusiones con respecto a la competencia son las que se mencionan a continuación:

- La cantidad de carretes aceptados es la especificación con mayor incidencia para ser tomada en cuenta al momento de diseñar una máquina competitiva; esto quiere decir que la máquina necesariamente debe estar en la capacidad de mecanizar con varios carretes de filamentos.
- Disminuir la complejidad operativa de la máquina representa una ventaja fundamental ante la competencia.
- Adicionalmente, se debe tomar en cuenta la robustez y el volumen como especificaciones fundamentales en el diseño de la máquina para asegurar que sea competitiva.

Como conclusión general, es necesario diseñar la estructura de la máquina considerando que se busca robustez sin afectar negativamente el requerimiento de volumen o la cantidad de carretes aceptados. Dado que la máquina es controlada por un PLC, uno de los requisitos es diseñar una interfaz humano-máquina (HMI) amigable con el operador. Además, el posicionamiento del molde y baño de resina se realiza de forma manual.

Finalmente, para que la máquina sea competitiva, su diseño y construcción debe considerar un enfoque global que asegure la sinergia de todas las especificaciones según su importancia, sin desechar las menos importantes.

2.1.3 FORMULACIÓN DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Las especificaciones técnicas son el conjunto de características que fundamentan el diseño y desarrollo del proyecto. Pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Requerimiento (R). Especificación necesaria para cumplir los objetivos del proyecto.
- Deseo (D). Especificación que a pesar de no ser estrictamente necesaria, tiende a mejorar las características de la máquina.

A continuación la Tabla 2.1 muestra los requerimientos y deseos de la empresa STRONGPLAST S.C.C.

Tabla 2.1. Requerimientos y deseos

Empresa: STRONGPLAST S.C.C.		Producto: Máquina bobinadora semiautomática de 4 ejes		Fecha inicial: 03/07/2016 Fecha última revisión: 03/07/2016	
Diseñador: Carlos Encalada				Página 1	
ESPECIFICACIONES					
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción	
Función	1/7/2016	C+I	R	Sistema semiautomático	
	1/7/2016	C	R	Uso de energía eléctrica	
	1/7/2016	C	R	Bobinado de moldes de tapa toriesférica	
	1/7/2016	C	D	Adaptabilidad para bobinar mayor longitud	
Dimensión	1/7/2016	C+I	R	Mecanizar tanques de 1m de diámetro, 1.50m de longitud	
	1/7/2016	I	D	Ser compacta	
Material	1/7/2016	I	R	Acero, determinación del tipo de acero y espesor en el diseño	
Ergonomía	1/7/2016	I	R	Espacio suficiente para que el operador realice su trabajo	
	1/7/2016	C+I	R	Mantenimiento programado	
		Propone: Cliente (C), Ingeniero (I)			
		R/D: Requerimiento (R), Deseo (D)			

Las especificaciones a partir de los requerimientos permiten determinar que la máquina debe ser semiautomática, utilizar energía eléctrica y bobinar moldes de tapa toriesférica de 1m de diámetro por 1.50m de longitud. Además, se requiere suficiente espacio para que el operador realice su trabajo y se realicen mantenimientos programados. De ser posible se busca que sea compacta y adaptable para mecanizar longitudes variables.

2.2 DISEÑO CONCEPTUAL

El diseño conceptual busca clasificar e interpretar conjuntos de soluciones para cada problemática involucrada en construir la máquina bobinadora. Para esto, el sistema se descompone en bloques o módulos funcionales, y mediante una matriz morfológica se establece el mejor camino en la toma de decisiones.

2.2.1 ANÁLISIS FUNCIONAL

Consiste en estudiar las características del elemento de salida mediante módulos funcionales, es decir, subdividiendo el proceso en bloques que representen las etapas más importantes en la construcción de una máquina bobinadora. Estudiar las funciones de cada bloque facilita la toma de decisiones en el diseño.

2.2.2 MÓDULOS FUNCIONALES

Para plantear los bloques en los que se basa el proyecto, es necesario organizar módulos funcionales en 3 niveles; el primero describe el comportamiento general del sistema y los otros consisten en el detalle del proceso realizado por la máquina para construir tanques de fibra de vidrio.

2.2.2.1 Nivel 0: Esquema general del análisis

El nivel 0 del análisis es el que se muestra en la Figura 2.2. Las entradas del sistema son: materia prima, energía y señales. El proceso se lleva a cabo poniendo en marcha la implementación, y el elemento de salida es la máquina bobinadora semiautomática para la construcción de tanques de fibra de vidrio.



Figura 2.2. Nivel 0 del sistema

2.2.2.2 Nivel 1: Implementación

El nivel 1 constituye la implementación del sistema para obtener las salidas requeridas. Se plantea de acuerdo a 3 procesos: construcción de la máquina, monitoreo y control, y bobinado. El esquema se muestra en la Figura 2.3.

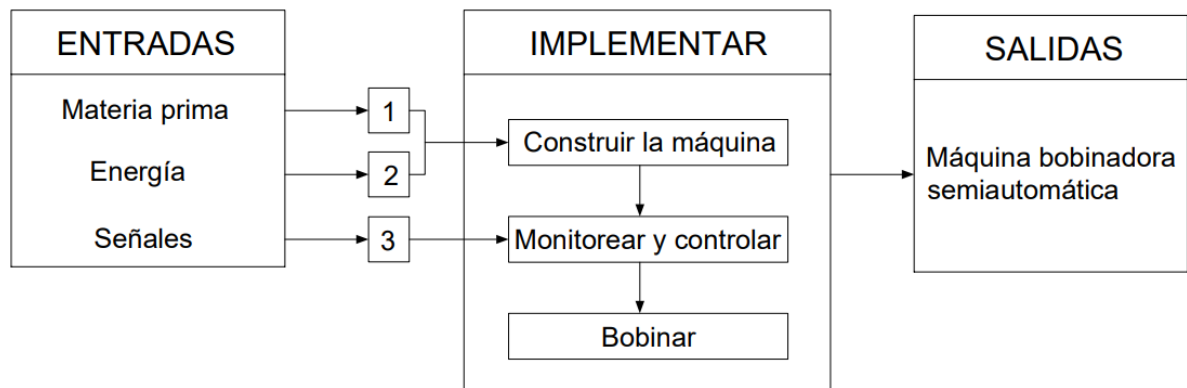


Figura 2.3. Nivel 1 del sistema

2.2.2.3 Nivel 2: Esquema detallado

A fin de establecer alternativas referentes a los procesos del sistema, el nivel 2 muestra el detalle de los módulos y sus funciones principales. El esquema del detalle mostrado en la Figura 2.4 descompone las funciones de monitoreo, control y bobinado en procesos secuenciales.

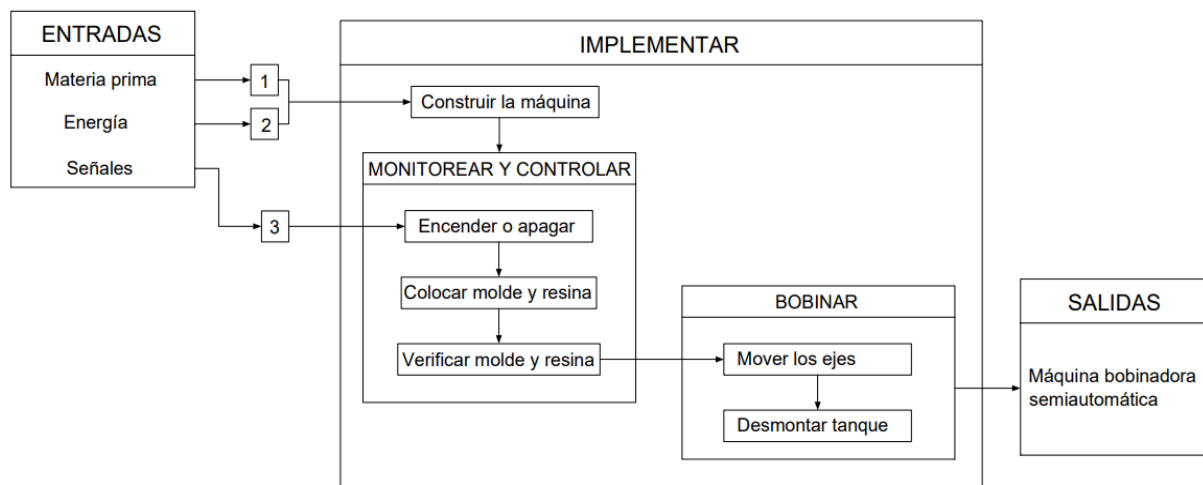


Figura 2.4. Nivel 2 del sistema

2.2.2.3.1 Módulo 1: Monitorear y controlar

El módulo indicado en la Figura 2.4 está formado por los procesos que se llevan a cabo desde el encendido de la máquina hasta que ésta se encuentra lista para iniciar el proceso de bobinado. Las funciones del módulo 1 son las siguientes:

- Encender o apagar la máquina
- Colocar el molde del tanque y vaciar el baño de resina en el contenedor (operaciones manuales)
- Verificar la ubicación del molde y el baño de resina

2.2.2.3.2 Módulo 2: Bobinar

El módulo 2 indicado en la Figura 2.4 abarca los procesos necesarios para construir el tanque, desde el inicio del proceso de bobinado hasta el desmontaje del tanque. Las funciones del segundo módulo son las siguientes:

- Mover los ejes de la máquina
- Desmontar el tanque (operación manual)

2.2.3 SOLUCIONES PARA CADA MÓDULO

2.2.3.1 Soluciones módulo 1

A continuación la tabla 2.2 muestra las soluciones planteadas para cumplir con las funciones del módulo 1.

Tabla 2.2. Soluciones módulo 1

Función	Solución 1	Solución 2
Encender o apagar la máquina	Interruptor 	Botón 
Verificar colocación del molde	Sensor de peso 	Interruptor 
Verificar existencia de baño de resina	Sensor de nivel 	Interruptor 

2.2.3.2 Soluciones módulo 2

Las soluciones consideradas para cumplir adecuadamente la función del módulo 3 son las que se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Soluciones módulo 2

Función	Solución 1	Solución 2
Mover los ejes de la máquina	Enviar las señales desde el PLC hacia cada motor 	Utilizar controladores para los motores 

2.2.4 MATRIZ MORFOLÓGICA

La matriz morfológica es una herramienta que permite visualizar las posibles combinaciones de soluciones para cada módulo, a fin de definir una solución general para la construcción de la máquina. La figura 2.5 muestra la matriz morfológica del proyecto, de la cual se obtiene un total de 8 soluciones enunciadas a continuación.

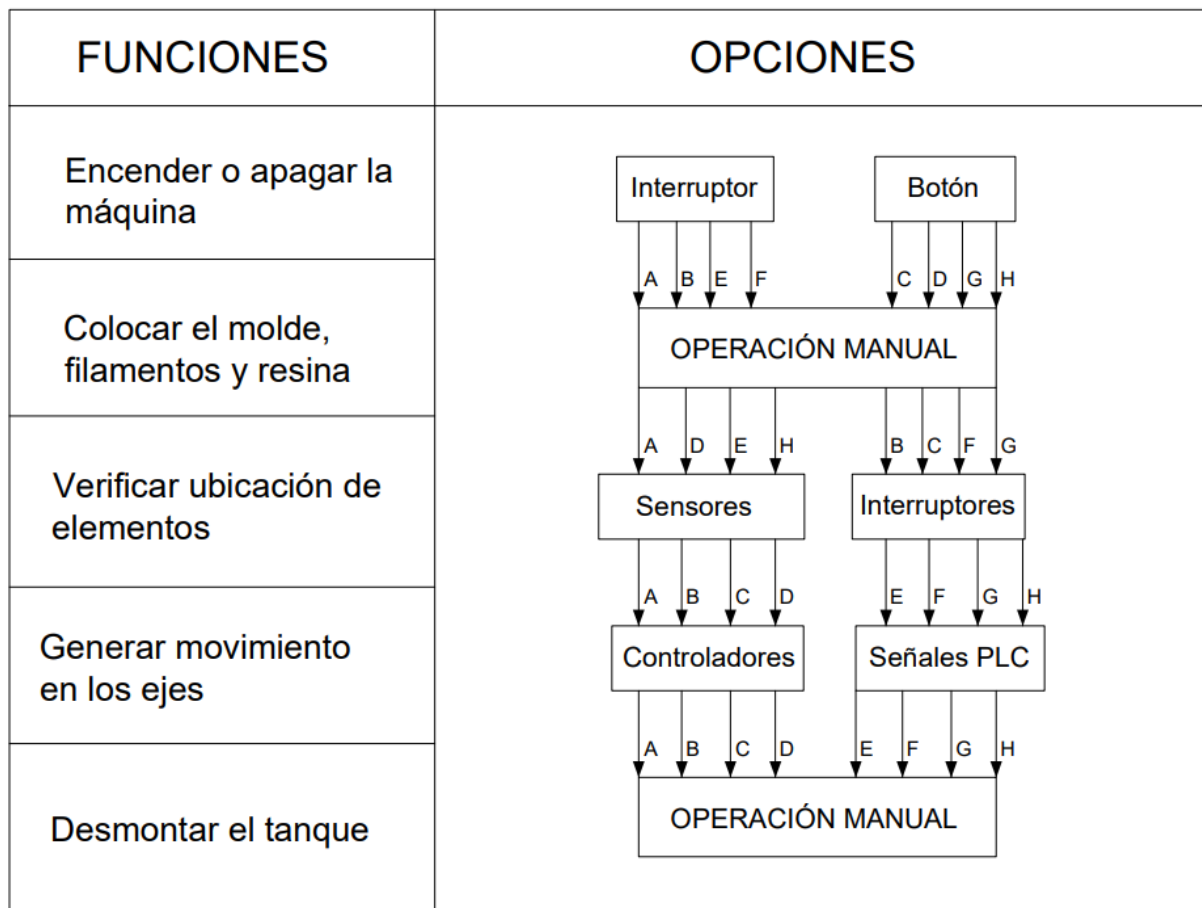


Figura 2.5. Matriz morfológica

- Solución A. La máquina se enciende o se apaga mediante un interruptor, la verificación de elementos utiliza sensores y los ejes se mueven por medio de controladores.
- **Solución B.** La máquina se enciende o se apaga mediante un interruptor, la verificación de elementos utiliza interruptores y los ejes se mueven por medio de controladores.
- Solución C. La máquina se enciende o se apaga mediante un botón, la verificación de elementos utiliza interruptores y los ejes se mueven por medio de controladores.

- Solución D. La máquina se enciende o se apaga mediante un botón, la verificación de elementos utiliza sensores y los ejes se mueven por medio de controladores.
- Solución E. La máquina se enciende o se apaga mediante un interruptor, la verificación de elementos utiliza sensores y los ejes se mueven por medio de señales directas del PLC.
- Solución F. La máquina se enciende o se apaga mediante un interruptor, la verificación de elementos utiliza interruptores y los ejes se mueven por medio de señales directas del PLC.
- Solución G. La máquina se enciende o se apaga mediante un botón, la verificación de elementos utiliza interruptores y los ejes se mueven por medio de señales directas del PLC.
- Solución H. La máquina se enciende o se apaga mediante un botón, la verificación de elementos utiliza sensores y los ejes se mueven por medio de señales directas del PLC.

2.3 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

2.3.1 REQUISITOS FUNCIONALES

Los requisitos funcionales que debe cumplir la máquina para que sea capaz de bobinar filamentos de forma semiautomática y construir tanques de fibra de vidrio son los siguientes:

- Transmitir movimiento lineal a través de 2 ejes
- Transmitir movimiento rotacional a través de 2 ejes
- Controlar ángulos de giro y velocidad de 4 motores
- Dar un baño de resina a los filamentos un instante antes de ingresar al bobinado

2.3.2 REQUISITOS DE DISEÑO

Las consideraciones necesarias para llevar a cabo el diseño de la máquina se muestran a continuación en la Tabla 2.4:

Tabla 2.4. Requisitos de diseño

Parámetro	Descripción
Diámetro del molde o matriz	1m
Longitud del molde	1.50m
Técnica de bobinado	Filament Winding
Material del filamento	Fibra de vidrio

2.3.3 SUBSISTEMAS, ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

A fin de realizar un análisis más detallado, se procede a dividir la máquina en subsistemas sobre los cuales estarán basadas las alternativas. Los subsistemas son los siguientes:

- Subsistema A. Estructura de la máquina
- Subsistema B. Motores
- Subsistema C. Controlador lógico programable

2.3.3.1 Subsistema A: Estructura de la máquina

La construcción del subsistema A debe tener una geometría simple, robustez, bajo costo, utilizar el menor número de piezas e involucrar la menor cantidad de procesos de mecanizado. Adicionalmente, sus piezas necesitan tener el menor número de secciones críticas para simplificar el cálculo.

Las funciones más relevantes de la estructura son: soportar el resto de componentes y mantenerlos ubicados a través del tiempo.

2.3.3.1.1 Alternativa 1: Estructura ENTEC FW750

La máquina bobinadora ENTEC FW750 que se muestra en la Figura 2.6, posee un tablero de control con HMI integrado, ruedas giratorias para desplazar la máquina y un sistema tensor de filamentos móvil.



Figura 2.6. Estructura de la máquina ENTEC FW750, [3]

Las principales ventajas y desventajas del uso de este tipo de estructura se muestran a continuación en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5. Ventajas y desventajas de la estructura ENTEC

Ventajas	Desventajas
• Rigidez • Movilidad en el área de trabajo • Elementos protegidos dentro de la estructura • Atractivo visual	• Debido a la robustez, el peso de la máquina tiende a ser mayor • Debido al tipo de control (CNC), el panel debe ser lo suficientemente grande como para almacenar una computadora

2.3.3.1.2 Alternativa 2: Estructura VIDATEK

VIDATEK es un fabricante cuya estructura presenta un diseño simple y minimalista, con la capacidad de montaje de mandriles de un diámetro de hasta 2.5m y control mediante PLC. La estructura se muestra en la Figura 2.7.



Figura 2.7. Estructura de la máquina VIDATEK, [4]

Las ventajas y desventajas de este tipo de estructura se muestran a continuación en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Ventajas y desventajas de la estructura VIDATEK

Ventajas	Desventajas
• Diseño simple • El tablero de control y módulos electrónicos ocupan poco espacio • Rigidez	• Elevado peso debido al espesor de la estructura • No considera el baño de resina • No posee mayor atractivo visual

2.3.3.1.3 Alternativa 3: Estructura CNC Technics

El fabricante CNC Technics se caracteriza por presentar un diseño simple y robusto con pocos elementos y de fácil acceso para mantenimiento y reparaciones. La estructura es la que se muestra en la Figura 2.8.

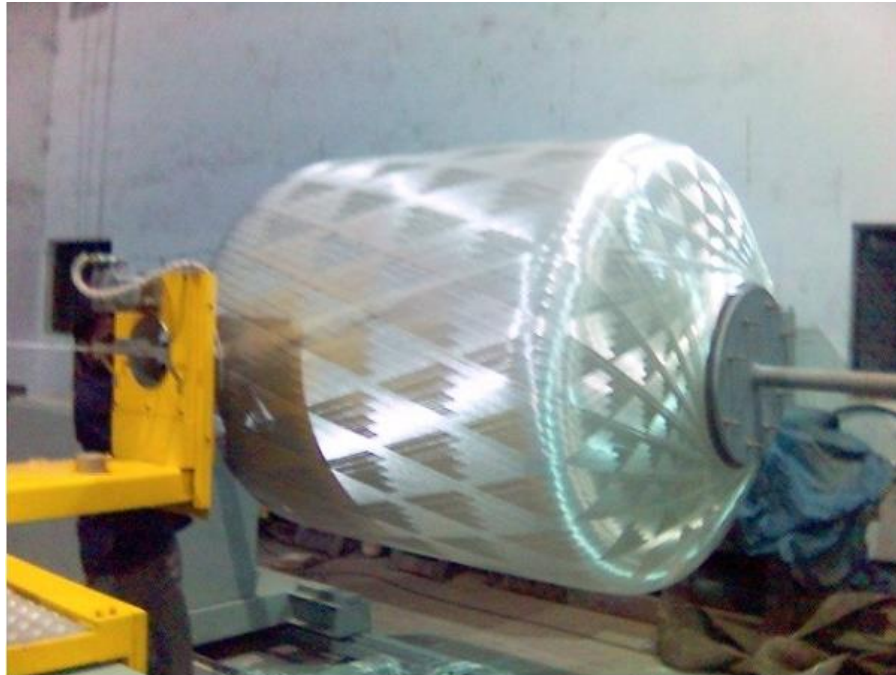


Figura 2.8. Estructura de la máquina CNC Technics, [5]

Las ventajas y desventajas del uso de este tipo de estructura se muestran a continuación en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Ventajas y desventajas de la estructura CNC Technics

Ventajas	Desventajas
• Diseño simple • Robustez • Menor número de piezas • Fácil acceso a los elementos para mantenimiento y reparación • Los elementos de control ocupan poco espacio	• Peso • Movilidad (la máquina queda fija al lugar de trabajo)

2.3.3.1.4 Criterios de selección de la estructura

Los criterios que se toman en cuenta para seleccionar la mejor alternativa son los siguientes:

- Complejidad en los procesos de fabricación (MA)
- Rigidez (RI)

- Montaje (MO)
- Dimensiones (DI)
- Atractivo visual (AV)

2.3.3.1.5 Verificación de criterios

La importancia de los criterios seleccionados se evalúa a través de una ponderación como se muestra en la Tabla 2.8, considerando su peso dentro del proyecto de acuerdo a la siguiente relación:

$$(MA) = \text{Montaje} > \text{Rigidez} > \text{Atractivo visual} = \text{Dimensiones}$$

Tabla 2.8. Evaluación del peso específico de cada criterio, subsistema A

Criterio	MA	RI	MO	DI	AV	$\sum_{+1}$	Ponderación
MA	-	1	0.5	1	1	4.5	0.3
RI	0	-	0	1	1	3	0.2
MO	0.5	1	-	1	1	4.5	0.3
DI	0	0	0	-	0.5	1.5	0.1
AV	0	0	0	0.5	-	1.5	0.1
					SUMA	15	1

2.3.3.1.6 Análisis de alternativas con respecto a la complejidad en los procesos de fabricación

En los procesos que involucran la fabricación o implementación de piezas de la máquina, se busca la menor cantidad de procesos de mecanizado que tengan que ser llevados a cabo para construir la estructura. El análisis se realiza ponderando la mejor alternativa si se tomase en cuenta solamente el criterio mencionado. Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 2.9, considerando el orden de importancia que se muestra a continuación:

$$\text{Alternativa 1 (A1)} > \text{Alternativa 2 (A2)} > \text{Alternativa 3 (A3)}$$

Tabla 2.9. Análisis de alternativas subsistema A con respecto a la complejidad de fabricación

MA	A1	A2	A3	$\sum +1$	Ponderación
A1	-	1	1	3	0.5
A2	0	-	1	2	0.33
A3	0	0	-	1	0.17
			SUMA	6	1

2.3.3.1.7 Análisis de alternativas con respecto a la rigidez

La ponderación mostrada en la Tabla 2.10 indica la importancia de las alternativas consideradas si solamente se tomase en cuenta la rigidez de la estructura de acuerdo al siguiente orden de importancia:

Alternativa 2 (A2) = Alternativa 1 (A1) > Alternativa 3 (A3)

Tabla 2.10. Análisis de alternativas subsistema A con respecto a la rigidez

RI	A1	A2	A3	$\sum +1$	Ponderación
A1	-	0.5	1	2.5	0.417
A2	0.5	-	1	2.5	0.417
A3	0	0	-	1	0.166
			SUMA	6	1

2.3.3.1.8 Análisis de alternativas con respecto al montaje

El análisis con respecto al montaje busca elegir la estructura cuyo ensamble requiera procesos de menor complejidad y pueda ser realizada en menor tiempo. Los resultados se muestran en la Tabla 2.11 de acuerdo al siguiente orden de importancia:

Alternativa 1 > Alternativa 2 = Alternativa 3

Tabla 2.11. Análisis de alternativas subsistema A con respecto al montaje

MO	A1	A2	A3	$\sum_{+1}$	Ponderación
A1	-	1	1	3	0.5
A2	0	-	0.5	1.5	0.25
A3	0	0.5	-	1.5	0.25
			SUMA	6	1

2.3.3.1.9 Análisis de alternativas con respecto a las dimensiones

Analizar las dimensiones implica buscar la estructura que ocupe el menor espacio de trabajo. Los resultados se muestran en la Tabla 2.12 y fueron obtenidos en base al siguiente orden de prioridades entre alternativas:

Alternativa 1 > Alternativa 3 > Alternativa 2

Tabla 2.12. Análisis de alternativas subsistema A con respecto a las dimensiones

DI	A1	A2	A3	$\sum_{+1}$	Ponderación
A1	-	1	1	3	0.5
A2	0	-	0	1	0.17
A3	0	1	-	2	0.33
			SUMA	6	1

2.3.3.1.10 Análisis de alternativas con respecto al atractivo visual

A través del criterio de atractivo visual se busca una estructura estética y de preferencia simétrica, que mantenga un diseño simple y disminuya los concentradores de esfuerzo. Los resultados se muestran en la Tabla 2.13; el análisis se basa en el siguiente orden de prioridades:

Alternativa 2 > Alternativa 1 > Alternativa 3

Tabla 2.13. Análisis de alternativas subsistema A con respecto al atractivo visual

AV	A1	A2	A3	$\sum +1$	Ponderación
A1	-	0	1	2	0.33
A2	1	-	1	3	0.5
A3	0	0	-	1	0.17
			SUMA	6	1

2.3.3.1.11 Selección de alternativas Subsistema A

Luego de analizar los criterios de selección, la mejor alternativa es la que según las prioridades asignadas tiene mayor ponderación; es decir, la que obtiene una mayor suma de productos en las ponderaciones por criterio. Los resultados se muestran en la Tabla 2.14.

Tabla 2.14. Selección de alternativas en base a la ponderación de criterios, subsistema A

	MA	RI	MO	DI	AV	$\sum$	Prioridad
A1	0.3*0.5	0.2*0.417	0.3*0.5	0.1*0.5	0.1*0.33	0.4664	1
A2	0.3*0.33	0.2*0.417	0.3*0.25	0.1*0.17	0.1*0.5	0.3244	2
A3	0.3*0.17	0.2*0.166	0.3*0.25	0.1*0.33	0.1*0.17	0.2092	3

Por medio del análisis de alternativas realizado, se concluye que la mejor alternativa en cuanto a estructura de la máquina es la alternativa 1 (estructura ENTEC).

2.3.3.2 Subsistema B: Motores

En la construcción de este tipo de máquinas generalmente se utilizan motores de corriente continua, servomotores y servomotores de corriente continua. La función del motor es generar el movimiento del eje.

2.3.3.2.1 Alternativa 1: Motor a pasos

El motor a pasos es un actuador electromecánico de alta precisión. Se encarga de convertir pulsos eléctricos en desplazamientos angulares, por lo que el movimiento

del motor es controlado por un tren de pulsos. La Figura 2.9 muestra un motor a pasos.

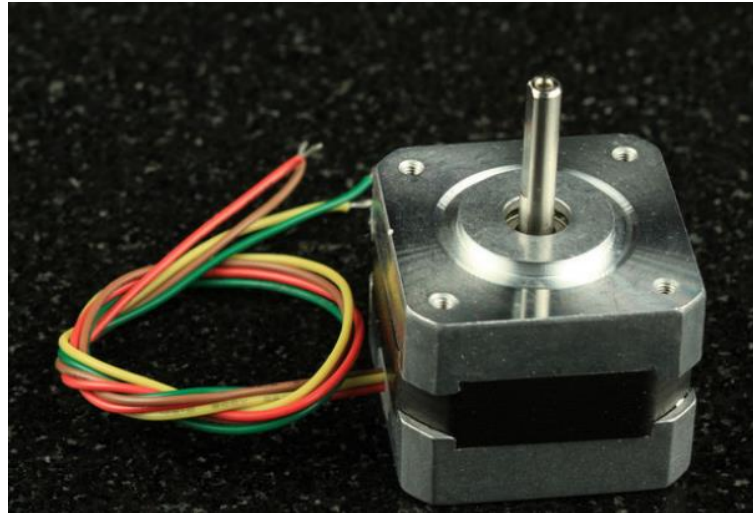


Figura 2.9. Motor a pasos, [6]

Las principales ventajas y desventajas del uso de este tipo de actuadores se muestran a continuación en la Tabla 2.15.

Tabla 2.15. Ventajas y desventajas del motor a pasos

Ventajas	Desventajas
• Disponibilidad en el mercado nacional • Menor probabilidad de daño ante altos torques • Sus bobinas quedan enclavadas cuando se detiene (mayor seguridad)	• En caso de perder pasos, el error es acumulativo • Bajas velocidades de trabajo al aumentar el torque

2.3.3.2.2 Alternativa 2: Motor DC

El motor de corriente continua que se muestra en la Figura 2.10, es un elemento que genera movimiento a partir de la transformación de energía eléctrica en energía mecánica. Se caracterizan por trabajar a velocidades altas y poseer una gran eficiencia.



Figura 2.10. Motor DC, [7]

Las ventajas y desventajas que implican el uso de motores de corriente continua se muestran en la Tabla 2.16.

Tabla 2. 16. Ventajas y desventajas del motor DC

Ventajas	Desventajas
• Amplio rango de variación de velocidad • Baja relación peso/potencia • Alta eficiencia • Bajo nivel de ruido	• Costo elevado • Disponibilidad limitada

2.3.3.2.3 Alternativa 3: Servomotor DC

Es un motor de corriente continua que posee una caja reductora con sistema de control en lazo cerrado, lo que permite controlar su velocidad y posición. La Figura 2.11 muestra un servomotor de corriente continua.



Figura 2.11. Servomotor DC, [8]

Las ventajas y desventajas del uso de este tipo de actuadores se presentan a continuación en la Tabla 2.17.

Tabla 2. 17. Ventajas y desventajas del servomotor DC

Ventajas	Desventajas
• Repetitividad • Altas velocidades y gran aceleración	• Costo elevado si se desea obtener torque a una velocidad nula • Las escobillas se deben cambiar cada 2000 horas de trabajo • No pueden mantenerse estables en una posición si se les aplica fuerzas

2.3.3.2.4 Criterios de selección del tipo de motor

Los criterios que se toman en cuenta para seleccionar la mejor alternativa son los siguientes:

- Estabilidad (ES)
- Torque (TO)
- Disponibilidad (DI)
- Mantenimiento (MA)
- Costo (CO)

2.3.3.2.5 Verificación de criterios

La importancia de los criterios seleccionados se evalúa a través de una ponderación como se muestra en la Tabla 2.18, considerando su peso dentro del proyecto de acuerdo a la siguiente relación:

$$\text{Disponibilidad} > \text{Torque} = \text{Estabilidad} > \text{Costo} = \text{Mantenimiento}$$

Tabla 2.18. Evaluación del peso específico de cada criterio, subsistema B

Criterio	ES	TO	DI	MA	CO	$\sum_{+1}$	Ponderación
ES	-	0.5	0	1	1	3.5	0.23
TO	0.5	-	0	1	1	3.5	0.24
DI	1	1	-	1	1	5	0.33
MA	0	0	0	-	0.5	1.5	0.1
CO	0	0	0	0.5	-	1.5	0.1
					SUMA	15	1

2.3.3.2.6 Análisis de alternativas con respecto a la disponibilidad

La disponibilidad es un criterio que busca seleccionar el tipo de motor que se consiga en el mercado nacional en el menor tiempo posible. Los resultados se muestran en la Tabla 2.19, y se basan en el siguiente orden de prioridades:

$$\text{Alternativa 1} > \text{Alternativa 3} > \text{Alternativa 2}$$

Tabla 2.19. Análisis de alternativas subsistema B con respecto a la disponibilidad

DI	A1	A2	A3	$\sum_{+1}$	Ponderación
A1	-	1	1	3	0.5
A2	0	-	0	1	0.17
A3	0	1	-	2	0.33
			SUMA	6	1

2.3.3.2.7 Análisis de alternativas con respecto al torque

El torque del motor es una característica que se relaciona con la carga que éste puede soportar. Los resultados del análisis de muestran en la Tabla 2.20 y están sujetos al siguiente orden de prioridades:

Alternativa 1 > Alternativa 3 > Alternativa 2

Tabla 2.20. Análisis de alternativas subsistema B con respecto al torque

TO	A1	A2	A3	$\sum_{+1}$	Ponderación
A1	-	1	1	3	0.5
A2	0	-	0	1	0.17
A3	0	1	-	2	0.33
			SUMA	6	1

2.3.3.2.8 Análisis de alternativas con respecto a la estabilidad

Al analizar el criterio de estabilidad en el tipo de motores, se busca seleccionar un motor que pueda conservar su posición ante la acción de cargas. Los resultados se muestran en la Tabla 2.21 y están basados en las siguientes prioridades:

Alternativa 1 > Alternativa 3 = Alternativa 2

Tabla 2.21. Análisis de alternativas subsistema B con respecto a la estabilidad

ES	A1	A2	A3	$\sum +1$	Ponderación
A1	-	1	1	3	0.5
A2	0	-	0.5	1.5	0.25
A3	0	0.5	-	1.5	0.25
			SUMA	6	1

2.3.3.2.9 Análisis de alternativas con respecto al costo

Es importante considerar el costo debido a que se requieren 4 motores para el funcionamiento de la máquina, por lo cual se debe seleccionar un tipo de motor económico que se ajuste a la necesidad. Los resultados se muestran en la Tabla 2.22 y se obtienen en base al siguiente orden de prioridades entre alternativas:

Alternativa 1 > Alternativa 3 > Alternativa 2

Tabla 2.22. Análisis de alternativas subsistema B con respecto al costo

CO	A1	A2	A3	$\sum +1$	Ponderación
A1	-	1	1	3	0.5
A2	0	-	0	1	0.17
A3	0	1	-	2	0.33
			SUMA	6	1

2.3.3.2.10 Análisis de alternativas con respecto al mantenimiento

El criterio de mantenimiento se basa en la selección del motor que pueda trabajar la mayor cantidad de horas sin realizar mantenimiento preventivo o correctivo. Los resultados se muestran en la Tabla 2.23 y están basados en el siguiente orden de prioridades:

Alternativa 2 = Alternativa 1 > Alternativa 3

Tabla 2.23. Análisis de alternativas subsistema B con respecto al mantenimiento

MA	A1	A2	A3	$\sum +1$	Ponderación
A1	-	0.5	1	2.5	0.417
A2	0.5	-	1	2.5	0.417
A3	0	0	-	1	0.166
			SUMA	6	1

2.3.3.2.11 Selección de alternativas Subsistema B

Los resultados del análisis de alternativas se muestran en la Tabla 2.24. A través de la prioridad se concluye que la mejor alternativa en cuanto al tipo de motor a utilizarse es la alternativa 1 (motor a pasos).

Tabla 2.24. Selección de alternativas en base a la ponderación de criterios, subsistema B

	ES	TO	DI	MA	CO	$\sum$	Prioridad
A1	0.23*0.5	0.24*0.5	0.33*0.5	0.1*0.417	0.1*0.5	0.5	1
A2	0.23*0.25	0.24*0.17	0.33*0.17	0.1*0.417	0.1*0.17	0.2	3
A3	0.23*0.25	0.24*0.33	0.33*0.33	0.1*0.166	0.1*0.33	0.3	2

2.3.3.3 Subsistema C: Controlador lógico programable

El controlador lógico programable (PLC) es una computadora de uso industrial cuya unidad central de procesamiento posee entradas y salidas en las que se puede programar la lógica de control de un sistema.

Los criterios más relevantes a tomar en cuenta para seleccionar el PLC son el costo, soporte técnico y confiabilidad.

2.3.3.3.1 Alternativa 1: Controlador OMRON

El fabricante OMRON ofrece un controlador como el que se muestra en la Figura 2.12. El PLC es compacto y posee 4 salidas de pulsos, lo cual resulta beneficioso para el control de varios ejes de movimiento. Utiliza su propio software con licencia

de propietario, el cual incluye funciones de monitoreo de velocidad y posición de hasta 4 motores de forma simultánea.



Figura 2.12. Controlador lógico programable OMRON CP1H, [9]

Las ventajas y desventajas que implican utilizar este controlador se muestran en la Tabla 2.25.

Tabla 2.25. Ventajas y desventajas del PLC OMRON

Ventajas	Desventajas
• Compatibilidad con el requerimiento del proyecto • Compacto • Bajo costo	• No existe soporte técnico especializado del fabricante a nivel nacional • Disponibilidad local limitada; solamente bajo importación

2.3.3.3.2 Alternativa 2: Controlador Allen Bradley

Son controladores de alto rendimiento que integran sinérgicamente la gestión de software, control, entradas y salidas, de modo que el usuario puede programar la lógica de forma intuitiva. La Figura 2.13 muestra el controlador Allen Bradley ControlLogix 5580.



Figura 2.13. Controlador lógico programable Allen Bradley ControlLogix 5580, [10]

Las ventajas y desventajas del uso de este controlador son mencionadas en la Tabla 2.26.

Tabla 2.26. Ventajas y desventajas del PLC Allen Bradley

Ventajas	Desventajas
• Confiabilidad • Pantalla incorporada • Puerto de programación USB • Comunicaciones de alta velocidad	• No existe soporte técnico especializado del fabricante a nivel nacional • Costo elevado

2.3.3.3.3 Alternativa 3: Controlador Siemens

La familia de controladores Siemens representa soluciones óptimas para el control industrial, ofreciendo una gama de productos de última tecnología, robustos y libres de mantenimiento. El controlador Siemens S7 1200 se muestra en la Figura 2.14.



Figura 2.14. Controlador lógico programable Siemens S7-1200, [11]

Las principales ventajas y desventajas del uso del Siemens en el proyecto se muestran en la Tabla 2.27.

Tabla 2.27. Ventajas y desventajas del PLC Siemens

Ventajas	Desventajas
• Confiabilidad • Soporte técnico a nivel nacional • Disponibilidad inmediata • No necesitan ningún tipo de mantenimiento	• Costo elevado • Programación y comunicación no intuitiva ni amigable con el usuario

2.3.3.3.4 Criterios de selección del tipo de controlador

Los criterios que representan las necesidades en cuanto al controlador lógico programable más adecuado para el proyecto son los siguientes:

- Costo (CO)
- Compatibilidad (CM)
- Disponibilidad (DI)
- Confiabilidad (CF)
- Soporte técnico (ST)

2.3.3.3.5 Verificación de criterios

La importancia de los criterios seleccionados dentro del proyecto se determina mediante una ponderación como se muestra en la Tabla 2.28, considerando su peso dentro del proyecto de acuerdo a la siguiente relación:

Costo > Compatibilidad > Disponibilidad > Confiabilidad > Soporte técnico

Tabla 2.28. Evaluación del peso específico de cada criterio, subsistema C

Criterio	CO	CM	DI	CF	ST	$\sum_{+1}$	Ponderación
CO	-	1	1	1	1	5	0.33
CM	0	-	1	1	1	4	0.27
DI	0	0	-	1	1	3	0.2
CF	0	0	0	-	1	2	0.13
ST	0	0	0	0	-	1	0.07
					SUMA	15	1

2.3.3.3.6 Análisis de alternativas con respecto al costo

El costo del controlador es un factor fundamental debido a que tiende a incrementar considerablemente el costo total del proyecto. Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 2.29, y se basan en el siguiente orden de prioridades:

Alternativa 1 > Alternativa 2 > Alternativa 3

Tabla 2.29. Análisis de alternativas subsistema C con respecto al costo

CO	A1	A2	A3	$\sum_{+1}$	Ponderación
A1	-	1	1	3	0.5
A2	0	-	1	2	0.33
A3	0	0	-	1	0.17
			SUMA	6	1

2.3.3.3.7 Análisis de alternativas con respecto a la compatibilidad

La compatibilidad del controlador es un criterio que busca la alternativa más adecuada para una aplicación de 4 ejes de movimiento mediante motores a pasos. Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 2.30, y son determinados en base al siguiente criterio de prioridades:

$$\text{Alternativa 1} > \text{Alternativa 2} > \text{Alternativa 3}$$

Tabla 2.30. Análisis de alternativas subsistema C con respecto a la compatibilidad

CM	A1	A2	A3	$\sum_{+1}$	Ponderación
A1	-	1	1	3	0.5
A2	0	-	1	2	0.33
A3	0	0	-	1	0.17
			SUMA	6	1

2.3.3.3.8 Análisis de alternativas con respecto a la disponibilidad

La disponibilidad implica buscar un controlador que pueda ser adquirido en el menor tiempo posible. Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 2.31 y están basados en el siguiente orden de importancia:

$$\text{Alternativa 3} = \text{Alternativa 2} > \text{Alternativa 1}$$

Tabla 2.31. Análisis de alternativas subsistema C con respecto a la disponibilidad

DI	A1	A2	A3	$\sum_{+1}$	Ponderación
A1	-	0	0	1	0.166
A2	1	-	0.5	2.5	0.417
A3	1	0.5	-	2.5	0.417
			SUMA	6	1

2.3.3.3.9 Análisis de alternativas con respecto a la confiabilidad

El objetivo de analizar la confiabilidad entre las alternativas presentadas es elegir un controlador que garantice el funcionamiento ininterrumpido de la máquina por el mayor tiempo posible. Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 2.32, y están basados en el siguiente orden de importancia:

Alternativa 3 = Alternativa 2 > Alternativa 1

Tabla 2.32. Análisis de alternativas subsistema C con respecto a la confiabilidad

CF	A1	A2	A3	$\sum_{+1}$	Ponderación
A1	-	0	0	1	0.166
A2	1	-	0.5	2.5	0.417
A3	1	0.5	-	2.5	0.417
			SUMA	6	1

2.3.3.3.10 Análisis de alternativas con respecto al soporte técnico

El soporte técnico es un criterio que busca seleccionar un controlador que disponga del servicio de asistencia a nivel nacional, necesario para solventar las dudas y posibles inconvenientes del sistema de control. Los resultados del análisis se muestran en la Tabla 2.33 y se rigen al siguiente orden de importancia entre alternativas:

Alternativa 3 > Alternativa 2 > Alternativa 1

Tabla 2.33. Análisis de alternativas subsistema C con respecto al soporte técnico

ST	A1	A2	A3	$\sum_{+1}$	Ponderación
A1	-	0	0	1	0.17
A2	1	-	0	2	0.33
A3	1	1	-	3	0.5
			SUMA	6	1

2.3.3.3.11 Selección de alternativas Subsistema C

Los resultados del análisis de alternativas se muestran en la Tabla 2.34. La prioridad indica que la mejor alternativa en cuanto al controlador a utilizarse es la alternativa 1 (PLC OMRON) o dispositivos muy similares que se ajusten a las necesidades del proyecto.

Tabla 2.34. Selección de alternativas en base a la ponderación de criterios, subsistema C

	CO	CM	DI	CF	ST	Σ	Prioridad
A1	0.33*0.5	0.27*0.5	0.2*0.166	0.13*0.166	0.07*0.17	0.367	1
A2	0.33*0.33	0.27*0.33	0.2*0.417	0.13*0.417	0.07*0.33	0.359	2
A3	0.33*0.17	0.27*0.17	0.2*0.417	0.13*0.417	0.07*0.5	0.275	3

CAPÍTULO III.

DISEÑO MECATRÓNICO

3.1 DISEÑO MECÁNICO

3.1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

El diseño mecánico permite determinar con certeza los materiales y dimensiones de todos los elementos de la máquina que se encuentran sujetos a cargas. Adicionalmente facilita la cuantificación de los parámetros necesarios para la selección de motores (potencia, torque, rpm).

Esta etapa inicia con la creación de un modelo 3D cuya finalidad es definir la geometría de los elementos que conforman la máquina. El modelo que se muestra en la Figura 3.1 fue desarrollado mediante el software Autodesk Inventor 2017 con licencia estudiantil.

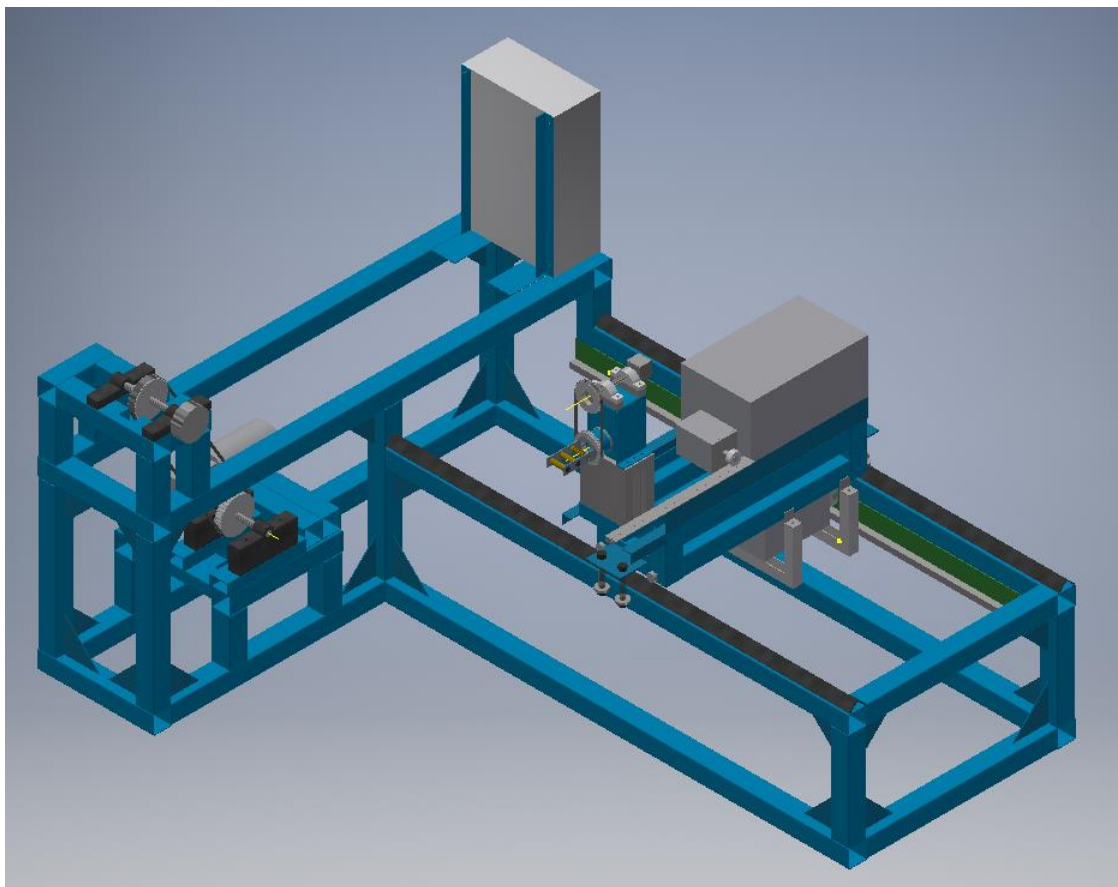


Figura 3.1. Modelo 3D del sistema bobinador

3.1.1.1 Elementos principales de la máquina

La Figura 3.2 muestra un modelo con los componentes principales del sistema bobinador, correspondiente a la siguiente numeración:

- (1) Bancada o estructura
- (2) Eje distribuidor
- (3) Contenedor de resina
- (4) Gabinete de control
- (5) Eje rotacional
- (6) Eje radial
- (7) Eje de ojo

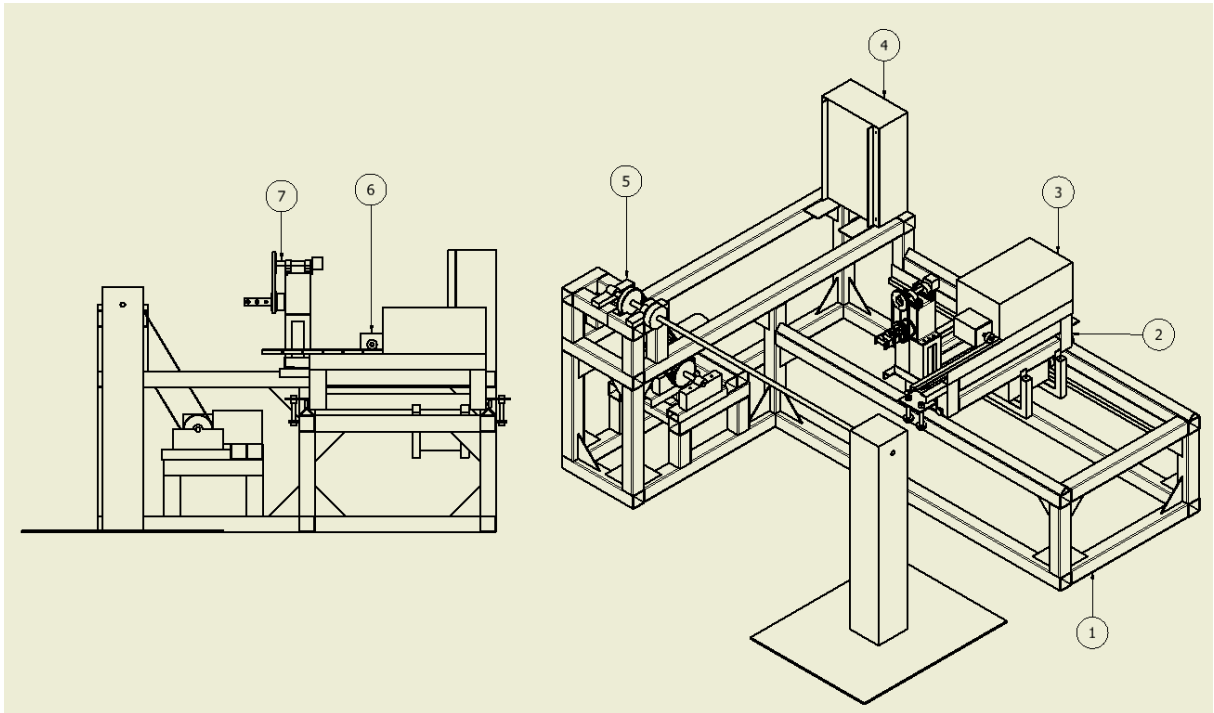


Figura 3.2. Componentes principales de la máquina

3.1.1.1 Bancada o estructura

Constituye el soporte de todos los elementos que conforman la máquina. El esquema del dimensionamiento geométrico de la bancada se muestra en la Figura 3.3 a continuación.

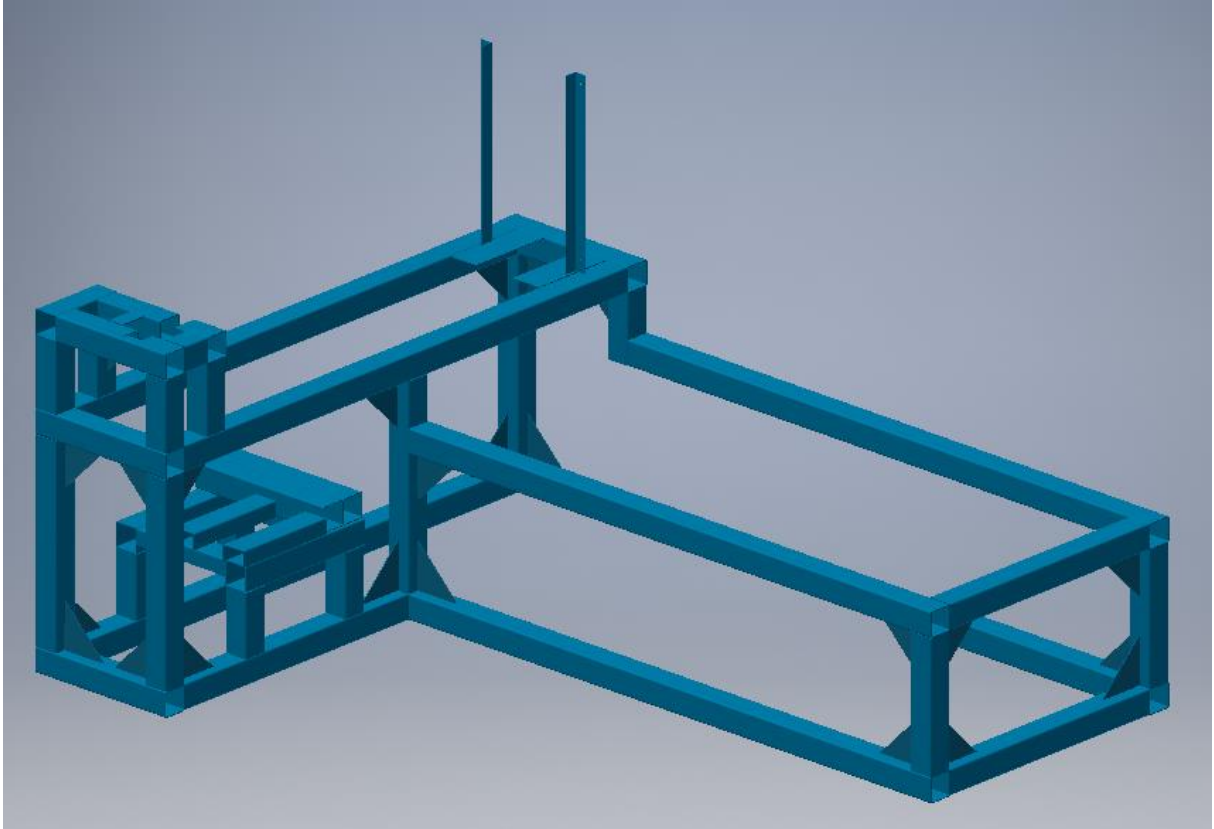


Figura 3.3. Modelo de la estructura

Las dimensiones generales de la estructura son las siguientes:

- Longitud 2500mm
- Altura 800mm
- Profundidad 1980mm

3.1.1.2 Molde

El molde es el elemento que proporciona la geometría del tanque a bobinar. La máquina debe estar en la capacidad de bobinar moldes cilíndricos de tapa toriesférica de 1.50m de largo y 1m de diámetro como el que se muestra a continuación en la Figura 3.4.

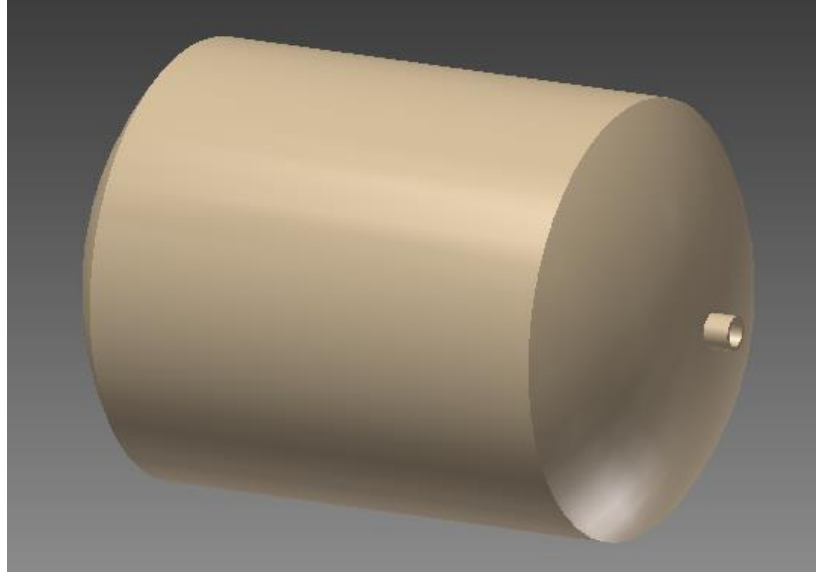


Figura 3.4. Modelo del molde

3.1.1.3 Eje rotacional (eje 1)

El sistema está constituido por el motor, mecanismo y soporte, situados a los extremos de la máquina en sentido longitudinal como se muestra en el esquema de la figura 3.5 a continuación.

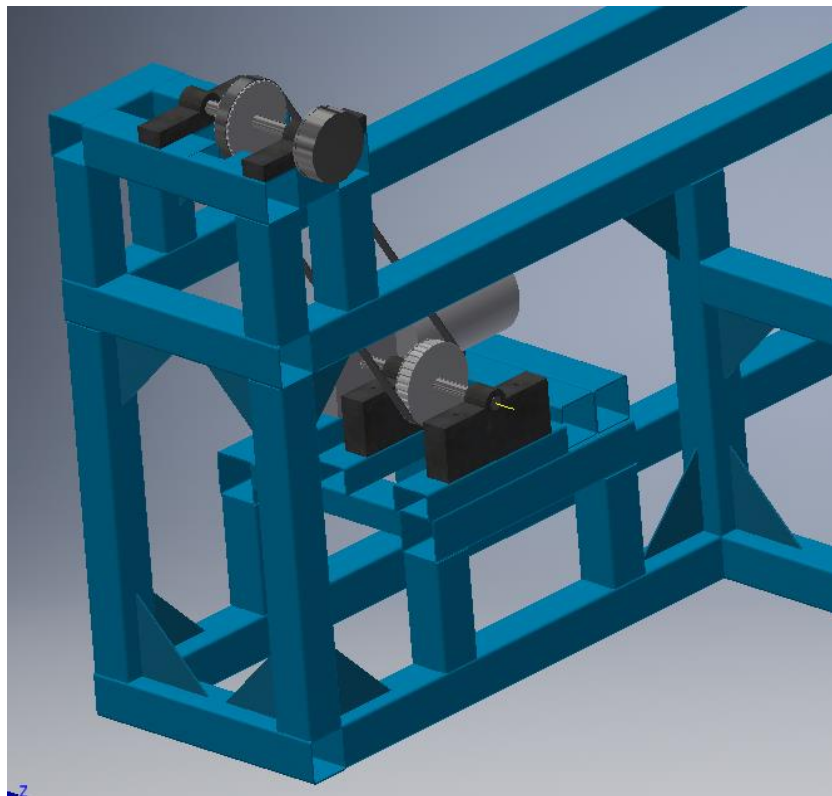


Figura 3.5. Modelo del sistema de soporte y rotación del mandril

3.1.1.4 Eje distribuidor (eje 2)

La función principal del distribuidor móvil es dirigir los filamentos a lo largo del molde. Al sincronizar el movimiento de traslación del distribuidor con el de rotación del mandril, se obtienen los patrones de bobinado circular y helicoidal. El esquema del distribuidor móvil en relación con la estructura de la máquina se muestra a continuación en la Figura 3.6.

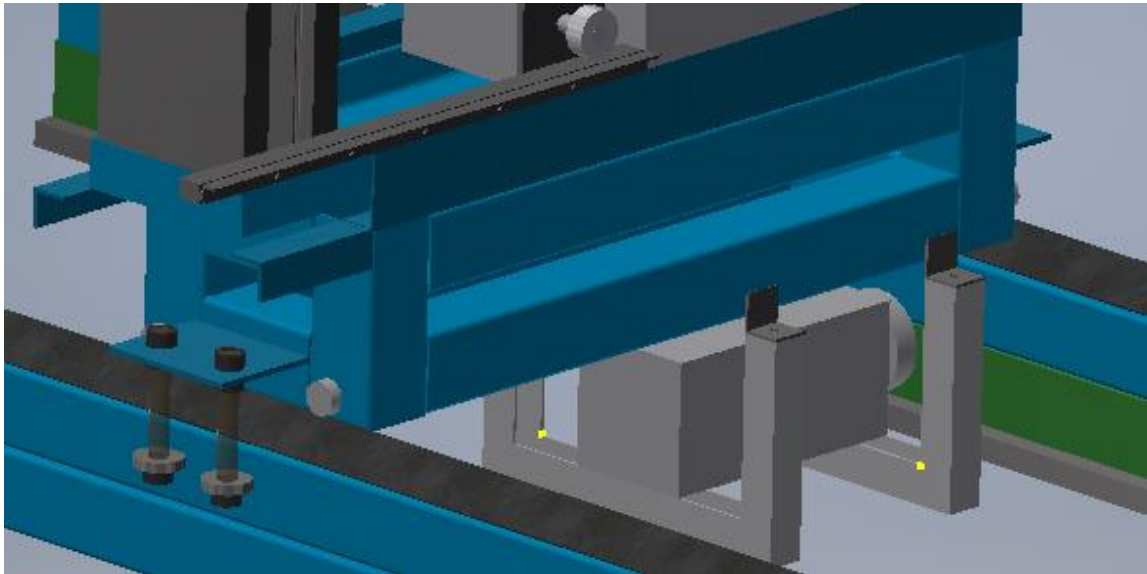


Figura 3.6. Modelo del distribuidor móvil

3.1.1.5 Eje de ojo (eje 3)

El homogeneizador de fibras es el elemento encargado de separar los filamentos provenientes de distintos carretes y mantenerlos fijos a medida que rota cada vez que ha alcanzado uno de los extremos longitudinales del tanque. El modelo del homogeneizador para la máquina se muestra en la Figura 3.7.

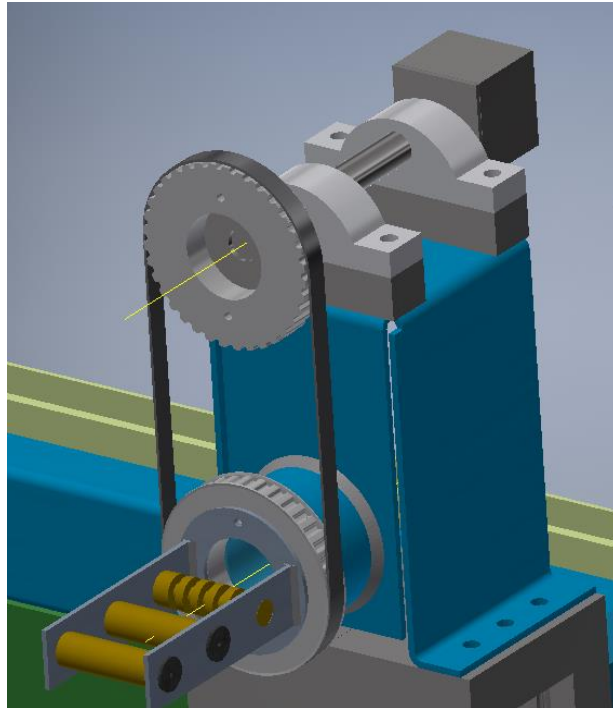


Figura 3.7. Modelo del homogeneizador de fibras

3.1.1.6 Eje radial (eje 4)

Este sistema proporciona el avance del homogeneizador hacia el centro del tanque, permitiendo que los filamentos recorran hasta la entrada y salida del mismo en sus extremos. La Figura 3.8 muestra el modelo del sistema de avance radial.

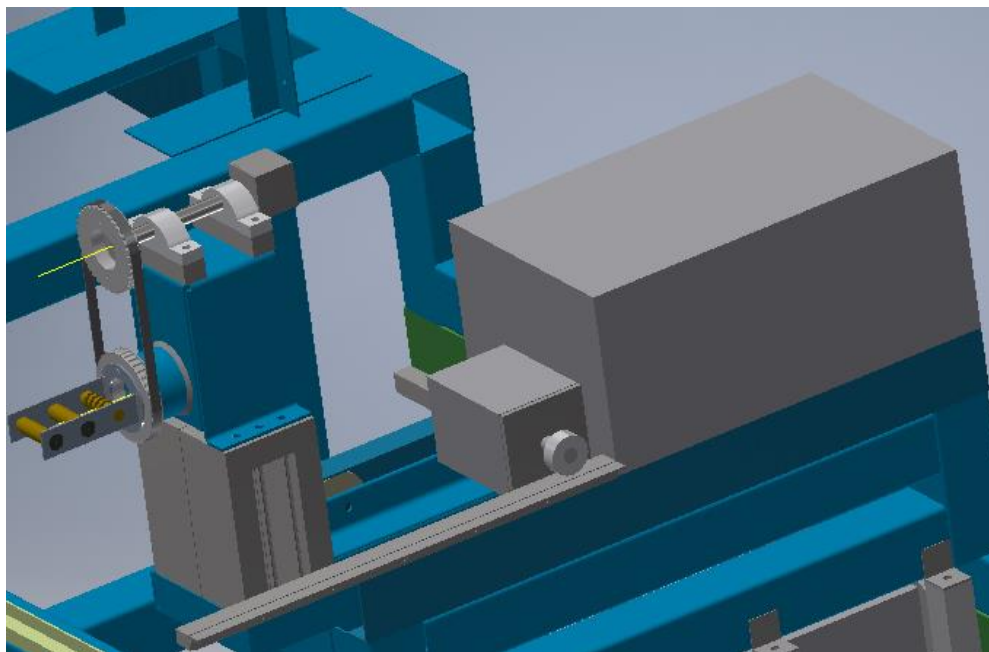


Figura 3.8. Modelo del eje radial

3.1.2 CÁLCULOS Y DISEÑO

3.2.1.1 Selección del perfil de la bancada

El cálculo para la selección del perfil de la bancada se basa en la concentración de todas las cargas que soporta la estructura, en un punto de la sección más crítica; en este caso se considera que la sección más crítica es el perfil de mayor longitud. Las cargas se concentran en el centro geométrico de la longitud del perfil y se escoge aquel cuya inercia permita una deflexión entre longitud/2000 y longitud/10000. Los elementos considerados dentro del peso que soporta la estructura son los siguientes:

- Mandril y eje rotacional (50kg)
- Tanque a mecanizar (100kg)
- Sistema de soporte y rotación del mandril (30kg)
- Distribuidor móvil (30kg)
- Homogeneizador de fibras (20kg)
- Sistema de avance radial (20kg)
- Cargas adicionales (160kg)

El peso total que soporta la estructura se obtiene sumando los pesos parciales como se indica en (1).

$$P = W_m + W_t + W_r + W_d + W_h + W_a + W_o \quad (1)$$

Donde:

W_m Es el peso del molde o mandril

W_t Es el peso del tanque a mecanizar

W_r Es el peso del sistema de soporte y rotación del mandril

W_d Es el peso del distribuidor móvil

W_h Es el peso del homogeneizador de fibras

W_a Es el peso del sistema de avance radial

W_o Es el peso de 2 operadores que podrían apoyarse en la máquina

$$P = (50 + 100 + 30 + 30 + 20 + 20 + 160)kg = 410kg$$

El peso se ubica de forma puntual en la viga de mayor longitud de la estructura considerando un empotramiento doble como se muestra en la Figura 3.9.

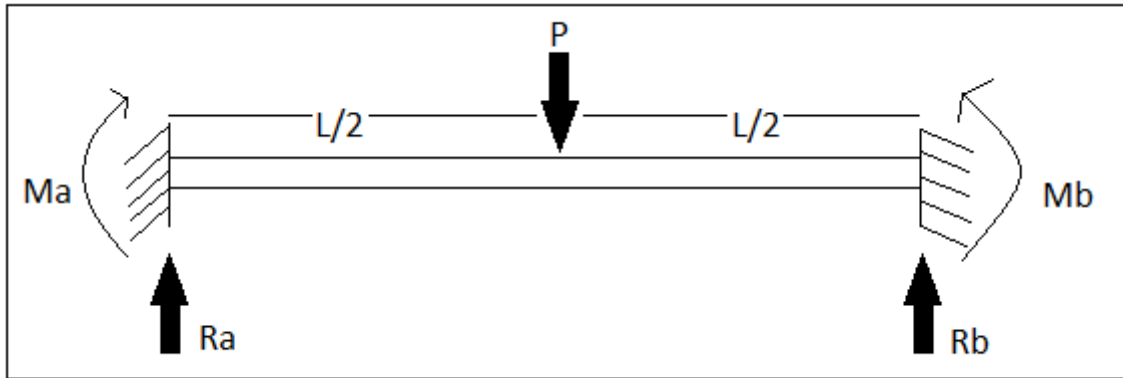


Figura 3.9. Reacciones en la viga de mayor longitud

Las condiciones de equilibrio del sistema se indican en (2) y (3):

$$\sum F_y = 0 \quad (2)$$

$$\sum M_a = 0 \quad (3)$$

Donde:

$\sum F_y$ representa la sumatoria de fuerzas que actúan en el sistema,

$\sum M_a$ es la sumatoria de momentos desde el punto a.

Al reemplazar las ecuaciones del sistema de equilibrio con las fuerzas y momentos que actúan en la viga se obtienen (4) y (5).

$$P = R_a + R_b \quad (4)$$

$$P \cdot \left(\frac{L}{2}\right) = R_b \cdot L \quad (5)$$

Donde:

P es el peso total que soporta el sistema en kgf,

Ra y Rb son las reacciones generadas en kgf,

L es la longitud de la viga en m.

Al conocer los valores de P y L, se busca representar las ecuaciones que describen el sistema en función de ambos parámetros. A partir de (5) se puede conocer el valor de la reacción en el punto b, como se indica en (6).

$$R_b = \frac{P}{2} \quad (6)$$

El valor de la reacción en el punto a se puede conocer reemplazando (6) en (4):

$$R_a = \frac{P}{2} \quad (7)$$

La ecuación de carga del sistema, mostrada en (8) es el resultado de sumar las funciones de singularidad asociadas a cada reacción que actúa sobre la viga, desde el punto a hacia un valor x que tiende a b.

$$q(x) = M_a x^{-2} - R_a x^{-1} + P \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^{-1} \quad (8)$$

La ecuación de cortantes mostrada en (9) se obtiene al integrar (8); no se toma en cuenta la constante de integración debido a que la ecuación de carga está completa.

$$V(x) = \int q(x) dx = M_a x^{-1} - R_a x^0 + P \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^0 \quad (9)$$

Realizando el mismo proceso de integración en (9) se obtiene la ecuación de momentos de la viga mostrada en (10).

$$M(x) = \int V(x) dx = M_a x^0 - R_a x^1 + P \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^1 \quad (10)$$

Los diagramas de cuerpo libre, cortantes y momentos se muestran a continuación en la Figura 3.10.

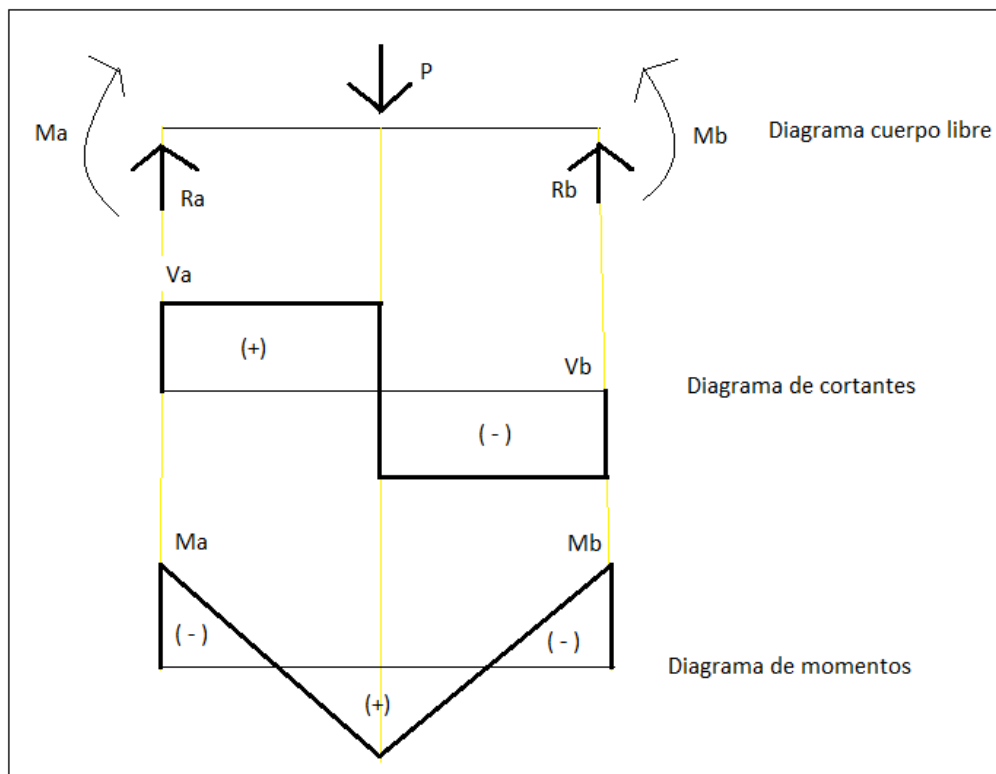


Figura 3.10. Diagrama cuerpo libre, diagrama de cortantes y momentos

A partir del diagrama de cortantes se determina que para la magnitud de P ubicada en medio de la viga, cada cortante equivale a $P/2$, como se indica en (11).

$$V_a = \frac{P}{2} = -V_b \quad (11)$$

El valor de los momentos se obtiene al sumar el área de los triángulos mostrados en el diagrama de momentos, de acuerdo a la ecuación (12).

$$M_a = 2 \cdot \left(\frac{\frac{L}{4} \cdot \frac{P}{2}}{2} \right) = \frac{P \cdot L}{8} = M_b \quad (12)$$

El ángulo máximo de deflexión se obtiene al integrar la ecuación (10):

$$EI\theta = \int M(x)dx = M_a x - \frac{R_a x^2}{2} + \frac{P \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^2}{2} + C_1 \quad (13)$$

Donde:

E es el módulo de elasticidad del material en kg/m^2 ,

I es la inercia de la viga en m^4

θ es el ángulo máximo de deflexión.

Finalmente, la deflexión máxima se obtiene al integrar la ecuación (13):

$$EIY = \int M(x)dx = \frac{M_a x^2}{2} - \frac{R_a x^3}{6} + \frac{P \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^3}{6} + C_1 x + C_2 \quad (14)$$

El valor de las constantes de integración es igual a cero; esto se obtiene a través del principio de continuidad, analizando las condiciones de frontera del sistema. Se divide la viga en 2 tramos, el primero desde el punto a hasta antes del punto de aplicación de la fuerza, generando la siguiente ecuación de momento:

$$M(x) = M_a x^0 - R_a x^1 \quad (15)$$

Al integrar la ecuación (15) se obtienen el ángulo máximo de deflexión (16) y deflexión máxima (17) para el primer tramo:

$$EI\theta = M_a x - \frac{R_a x^2}{2} + C_3 \quad (16)$$

$$EIY = \frac{M_a x^2}{2} - \frac{R_a x^3}{6} + C_1 x + C_4 \quad (17)$$

Las condiciones de frontera son las siguientes:

$$\text{Cuando } \theta = 0, x = 0 \rightarrow C_3 = 0$$

$$\text{Cuando } Y = 0, x = 0 \rightarrow C_4 = 0$$

Las condiciones de frontera para el tramo desde $L/2$ en adelante (13) y (14), se dan cuando $x=L/2$, anulando la expresión $\left(x - \frac{L}{2}\right)$, como consecuencia, el valor de las constantes C_1 y C_2 es igual a cero.

Al reemplazar (7) y (12) en (14) se obtiene la expresión de deflexión máxima de la viga en función de los parámetros conocidos.

$$EIY = \frac{PLx^2}{16} - \frac{Px^3}{12} - \frac{P \cdot \left(x - \frac{L}{2}\right)^3}{6} \quad (18)$$

La deflexión máxima se da cuando x toma el valor de $L/2$, por lo cual la ecuación de deflexión para la viga es la que se muestra en (19).

$$EIY = \frac{PL^3}{192} \quad (19)$$

La longitud de la viga más larga de la estructura es de 1.982m

La carga máxima que soporta la estructura es de 410kg

El módulo de elasticidad del acero es de $2.1 \cdot 10^{10} \frac{kg}{m^2}$

La deflexión máxima permitida se encuentra en el rango $L/2000 - L/10000$, por lo cual el valor de Y es de $9.91 \cdot 10^{-4}m$ para $L/2000$.

Con los valores numéricos reemplazados en (19), el valor de la inercia que se requiere en el perfil es el siguiente:

$$I = \frac{PL^3}{192EY} \quad (20)$$

$$I = 7.989 \cdot 10^{-7}m^4 = 79.89cm^4$$

De acuerdo con el catálogo de tubo estructural de acero del Grupo Condesa [12], los perfiles cuadrados que cumplen con el requerimiento de inercia son los siguientes:

- Tubo cuadrado de 70x70x5 mm
- Tubo cuadrado de 80x80x3 mm

Para finalizar, por medio del software Autodesk Inventor 2017 con licencia estudiantil, se realiza la simulación de la deflexión aplicando la carga máxima en todas las vigas y considerando una aceleración de la gravedad de $9.81m/s^2$. Como se muestra en la Figura 3.11, la deflexión máxima se da en la zona roja con un valor de 0.1478mm, es decir $1.478 \cdot 10^{-4}m$. Este valor es más bajo que el obtenido a través del cálculo, por lo tanto la estructura soporta las cargas para las que está diseñada.

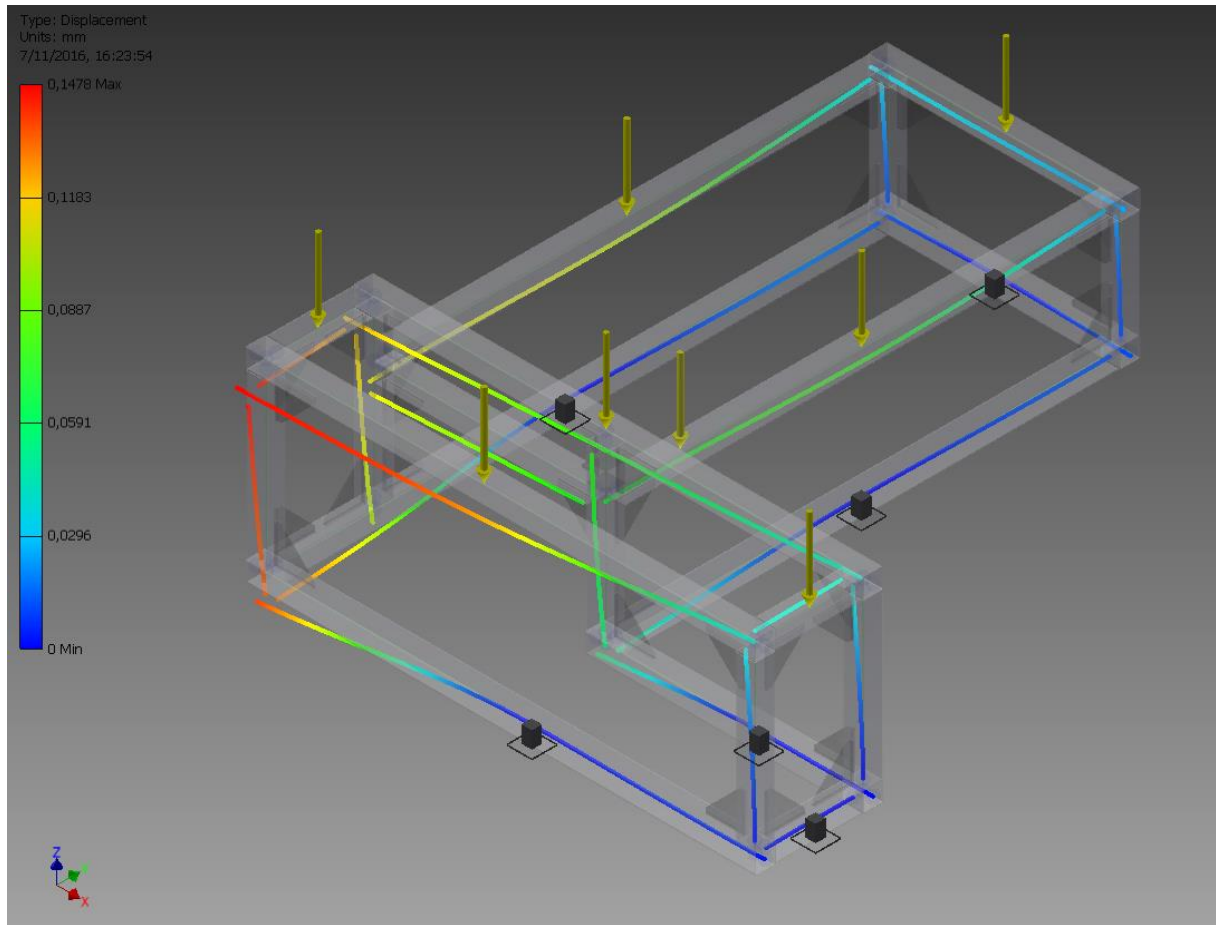


Figura 3.11. Simulación de deflexión en la estructura

3.1.2.2 Velocidad de bobinado

De acuerdo con la publicación de incremento de eficiencia en la técnica Filament Winding [13], la velocidad óptima de bobinado oscila entre 60m/min y 90m/min. Con la finalidad de obtener la cantidad de revoluciones por minuto a las que debe girar el eje 1 de la máquina, se debe transformar la velocidad según la ecuación (21).

$$w = \frac{v}{2\pi r} \quad (21)$$

Donde:

v es la velocidad óptima de bobinado, en m/min

r es el radio del molde o mandril, en m

$$w_1 = \frac{60}{2\pi(0.50)} = 19.1rpm \cong 19rpm$$

$$w_2 = \frac{90}{2\pi(0.50)} = 28.65rpm \cong 29rpm$$

Por lo tanto, eje 1 de la máquina debe moverse a velocidades en el rango de 19 a 29rpm.

3.1.2.3 Velocidad de distribución de fibras

Representa la velocidad a la que se desplaza el eje 2 de la máquina. Esta velocidad, para cumplir con el algoritmo de funcionamiento de la máquina, debe ser equivalente por lo menos a la mitad de la velocidad lineal del mandril, por lo que se considera un rango de valores de 30 a 45 m/min. El valor de las revoluciones por minuto se obtiene mediante la ecuación (2), pero considerando el valor del radio del piñón de la transmisión del eje 2

$$w_3 = \frac{30}{2\pi(0.05)} = 95.5rpm \cong 96rpm$$

$$w_4 = \frac{45}{2\pi(0.05)} = 143.24rpm \cong 144rpm$$

Por lo tanto, el rango de velocidades de funcionamiento para el eje 2 de la máquina varía entre 96 y 144 rpm.

3.1.2.4 Tiempo de bobinado

Es el tiempo que tarda la máquina en bobinar un tanque de 1m de diámetro por 1.50m de altura. Los metros de fibra enrollados por minuto se obtienen a partir de la velocidad máxima de bobinado y su valor equivale a 90m/min. La empresa utiliza carretes con 5000m de fibra cuyo peso es de 21kg.

El peso del tanque es de 100kg. De acuerdo con [14], un tanque de fibra de vidrio bobinado mediante la técnica Filament Winding, presenta una distribución de peso del 70% en fibras y 30% de resina. Esto quiere decir que 70kg representan el peso de fibra contenido en un tanque con las características mencionadas, de lo que se puede concluir que se requieren 4 carretes de fibra para fabricar el tanque.

Debido a que la máquina es capaz de utilizar los carretes de forma simultánea, el tiempo se determina considerando que se bobinan 5000m de fibra como se muestra en la ecuación 22.

$$t = \frac{l}{v} \quad (22)$$

$$t = \frac{5000}{90} = 55.56 \text{ min} \cong 1 \text{ hora}$$

Donde:

l es la longitud del filamento del carrete, en m

v es la velocidad máxima de bobinado, en m/min

3.1.2.5 Selección de banda y poleas dentadas para el homogeneizador de fibras

El procedimiento de selección requiere el cálculo de la potencia y velocidad del sistema, a fin de seleccionar el perfil y dimensiones de la banda y poleas dentadas.

La potencia se determina mediante el producto del torque y la velocidad angular, como se muestra en la ecuación 23.

$$P = T \cdot w \quad (23)$$

Donde:

P es la potencia, en W

T es el torque, en N.m

w representa la velocidad angular, en rad/s

Para determinar el torque, es necesario conocer la inercia y aceleración del sistema, como se muestra en la ecuación 24.

$$T = I \cdot a \quad (24)$$

Donde:

I es la inercia, en kg. m²

a es la aceleración, en rad/s²

La inercia de masa que debe vencer el sistema corresponde al momento de cada polea dentada con respecto a su eje de rotación, el cual depende de los diámetros interno y externo de la polea, y su masa, como se muestra en la ecuación 25.

$$I = \frac{m}{2}(r_1^2 + r_2^2) \quad (25)$$

Donde:

m es la masa de la polea, en kg

r1 y r2 son los radios interno y externo de la polea, en m

El valor de la aceleración se obtiene a partir de la ecuación 26, considerando que el sistema parte del reposo y alcanza su velocidad final en un tiempo de 0.5 segundos.

$$a = \frac{v_f - v_o}{t} \quad (26)$$

Donde:

Vf y Vo son las velocidades final e inicial, en rad/s

t es el tiempo, expresado en segundos

La velocidad final que alcanza el sistema se obtiene considerando que el eje rota $\pi/2$ radianes en 1 segundo, es decir $\pi/2$ rad/s o 15rpm.

$$a = \frac{\pi/2 - 0}{0.5} = 3.14 \frac{rad}{s^2}$$

$$I = 2 \cdot \left(\frac{1kg}{2} (0.025m^2 + 0.055m^2) \right) = 0.00365kg.m^2$$

$$T = I \cdot a = 0.00365 \cdot 3.14 = 0.011N.m$$

$$P = 0.011 \cdot 1.57 = 0.017W$$

Se utiliza un factor de diseño igual a 2 para el homogeneizador de fibras, por lo cual la potencia corregida es de 0.034W, es decir, 0.046Hp.

De acuerdo con el manual de selección de transmisiones por correas dentadas de tiempo y sincrónicas de Intermecc [15], los parámetros necesarios para elegir la transmisión adecuada, son los que se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Parámetros del homogeneizador de fibras

Parámetro	Valor
Potencia de diseño	0.046Hp
rpm de la unidad motriz	15rpm
rpm del elemento a impulsar	15rpm
Diámetro de los ejes	2"
Distancia entre centros de los ejes	6.5" a 8.5" entre centros

Utilizando la potencia de diseño y las revoluciones por minuto, en base a la información de la Figura 3.12, se realiza la selección del paso recomendado para la correa.

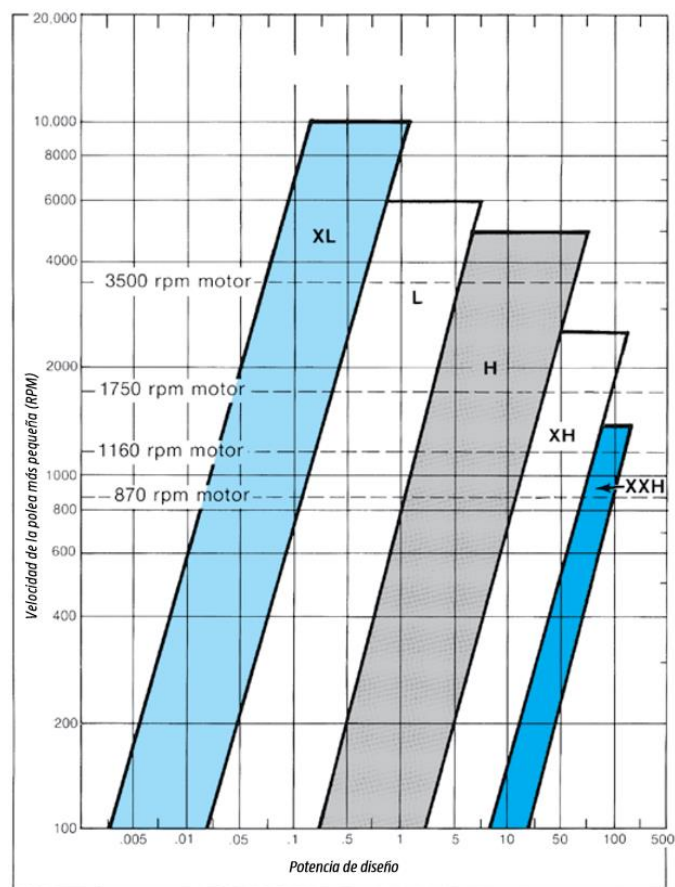


Figura 3.12. Gráfico para selección de paso de correas dentadas, [15]

Por lo tanto, se recomienda utilizar una correa de paso ligero L (paso 3/8").

Dado que las revoluciones por minuto son las mismas en la unidad motriz y el elemento a impulsar, la relación de velocidades es igual a 1.

Con la finalidad de encontrar una transmisión estándar, se analiza la relación de velocidad obtenida en las Tablas de Selección para Transmisiones Estándar de Tiempo L [15], dando como resultado las características que se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Transmisión estándar para el homogeneizador de fibras

Parámetro	Valor
Polea motriz	36L
Polea impulsada	36L
Longitud de correa estándar	285L
Distancia entre centros	7.5"

El ancho de la correa se obtiene dividiendo la potencia de diseño para la capacidad de transmisión por cada pulgada de ancho, como se indica en la ecuación 27.

$$ac = \frac{P_d}{C_t} \quad (27)$$

Donde:

ac es el ancho de la correa, en pulgadas

Pd es la potencia de diseño, en Hp

Ct es la capacidad de transmisión por cada pulgada de ancho, en Hp/pulgada

La capacidad de transmisión por cada pulgada de ancho es de 0.19Hp/in, y se obtiene al intersecar el número de dientes de la polea más pequeña con las rpm de la misma en la Tabla de Valores de Capacidad de Transmisión por cada pulgada de ancho de la correa [15].

$$ac = \frac{0.046}{0.19} = 0.242in$$

El ancho de correa comercial más próximo es de 1/2", factor con el que se define completamente la transmisión:

- Polea Motriz: 36L050
- Polea Impulsadora: 36L050
- Correa: 285L050
- Distancia entre centros: 7.5"

De acuerdo con el manual de selección de transmisiones por correas dentadas de tiempo y sincrónicas de Intermec [15], las especificaciones adicionales que debe cumplir la transmisión elegida son las siguientes:

- Número de dientes de la correa: 76
- Longitud de la correa: 28.5"
- Diámetro exterior de las poleas: 108.4mm

3.1.2.6 Selección de banda y poleas dentadas para el eje de rotación del mandril

De acuerdo con (21), el mandril rota a una velocidad entre 19 y 29 rpm. Para la selección del sistema de transmisión se considera una velocidad de 30rpm, es decir, π rad/s.

La inercia a vencer corresponde a la sumatoria de inercias del cilindro y las tapas toriesféricas (28). Este valor se duplica porque influyen la inercia del molde y la del tanque una vez finalizado el proceso de bobinado.

$$I_z = 2 \cdot (I_{z_{cilindro}} + 2 \cdot I_{z_{tapa}}) \quad (28)$$

Donde:

I_z es la inercia total a vencer, en kg. m²,

$I_{z_{cilindro}}$ es la inercia del cilindro,

$I_{z_{tapa}}$ es la inercia de cada tapa toriesférica.

La inercia de cada cilindro hueco se obtiene mediante la expresión (29).

$$I_{z_{cilindro}} = \frac{1}{2} m (R_1^2 + R_2^2) \quad (29)$$

Donde:

m es la masa del cilindro en kg,

R1 y R2 son los radios externo e interno del cilindro en m.

La expresión para determinar la inercia de una sección esférica hueca [16] es la que se muestra en (30).

$$I_{z_{tapa}} = \frac{2}{5} m \frac{(R_2^5 - R_1^5)}{(R_2^3 - R_1^3)} \quad (30)$$

Donde:

m es la masa de la sección esférica en kg,

R1 y R2 son los radios externo e interno de la semiesfera en m.

La aceleración del conjunto se determina en base a (26) considerando que el sistema parte del reposo y alcanza su velocidad final en un tiempo de 2 segundos.

$$a = \frac{\pi \frac{rad}{s}}{2s} = \frac{\pi rad}{2 s^2} = 1.57 \frac{rad}{s^2}$$

La mayor inercia a vencer por el sistema de transmisión del eje 1 se da cuando el espesor es el mínimo, por lo que se considera un espesor de 2mm en cada caso. El tanque de 100kg corresponde a 80kg del cilindro y 20kg de las tapas toriesféricas.

$$I_{z_{tapa}} = \frac{2}{5} \cdot 10 \cdot \frac{(0.5^5 - 0.499^5)}{(0.5^3 - 0.499^3)} = 1.66 \frac{kg}{m^2}$$

$$I_{z_{cilindro}} = \frac{1}{2} \cdot 80 \cdot (0.5^2 + 0.499^2) = 19.96 \frac{kg}{m^2}$$

$$I_z = 2 \cdot (19.96 + 2 \cdot 1.66) = 46.56 \frac{kg}{m^2}$$

Al determinar el valor de la aceleración y conociendo la inercia, es factible determinar el torque a vencer y la potencia del sistema, de acuerdo con (24) y (23) respectivamente.

$$T = 46.56 \cdot 1.57 = 73.1Nm$$

$$P = 7.464 \cdot 3.14 = 229.53W$$

Se utiliza un factor de corrección igual a 2 para el eje 1, por lo cual la potencia corregida es de 459.06W, es decir, 0.62Hp.

De acuerdo con el manual de selección de transmisiones por correas dentadas de tiempo y sincrónicas de Intermec [15], los parámetros necesarios para elegir la transmisión adecuada, son los que se muestran en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Parámetros de la transmisión del eje 1

Parámetro	Valor
Potencia de diseño	0.62Hp
rpm de la unidad motriz	30rpm
rpm del elemento a impulsar	30rpm
Diámetro de los ejes	2"
Distancia entre centros de los ejes	27" a 30" entre centros

Utilizando la potencia de diseño y las revoluciones por minuto, en base a la información de la Figura 3.9, el paso recomendado de correa es de 1/2" (correa de paso pesado tipo H).

Dado que las revoluciones por minuto son las mismas en la unidad motriz y el elemento a impulsar, la relación de velocidades es igual a 1.

Con la finalidad de encontrar una transmisión estándar, se analiza la relación de velocidad obtenida en las Tablas de Selección para Transmisiones Estándar de Tiempo H [15], dando como resultado las características que se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Transmisión estándar para el eje 1

Parámetro	Valor
Polea motriz	36H
Polea impulsada	36H
Longitud de correa estándar	750H
Distancia entre centros	28.5"

El ancho de la correa se obtiene de acuerdo a (27). La capacidad de transmisión por cada pulgada de ancho es de 0.64Hp/in, y se obtiene al intersecar el número de dientes de la polea más pequeña con las rpm de la misma en la Tabla de Valores de Capacidad de Transmisión por cada pulgada de ancho de la correa [15].

$$ac = \frac{0.62}{0.64} = 0.97in$$

El ancho de correa comercial más próximo es de 1", factor con el que se define completamente la transmisión:

- Polea Motriz: 36H100
- Polea Impulsadora: 36H100
- Correa: 750H100
- Distancia entre centros: 28.5"
- Número de dientes de la correa: 150
- Longitud de la correa: 75"
- Diámetro exterior de las poleas: 144.2mm

3.1.2.7 Selección del sistema piñón-cremallera para el distribuidor móvil

De acuerdo con el catálogo de transmisiones por cremallera piñón de la empresa KOOM [17], los parámetros necesarios para la selección del sistema de transmisión son la fuerza tangencial que actúa sobre el diente del piñón y la velocidad lineal de desplazamiento.

La velocidad lineal máxima de desplazamiento del sistema es de 45m/min, es decir, 0.75m/s. Por otro lado, la fuerza horizontal que actúa sobre el piñón se obtiene por medio de (31)

$$F_h = P \cdot (9.81 \cdot \mu + a) \quad (31)$$

Donde:

F_h es la fuerza horizontal en N,

P es la masa a trasladar en kg,

μ es el coeficiente de rozamiento,

a es la aceleración lineal en m/s^2 .

La aceleración lineal se determina considerando que el sistema tarda 1 segundo en alcanzar su velocidad máxima. De acuerdo con [18], el coeficiente de fricción estática entre acero-acero es de 0.74. Por otro lado, la masa a desplazar es la suma de la masa del distribuidor móvil, homogeneizador de fibras y sistema de avance radial (60kg).

$$a = \frac{0.75 \frac{m}{s}}{1s} = 0.75 \frac{m}{s^2}$$

$$F_h = 60kg \cdot (9.81 \cdot 0.74 + 0.75) \frac{m}{s^2} = 326.673N$$

La fuerza tangencial debe ser reconsiderada en base a un factor de corrección [17]. Se utiliza un factor de 2.25 considerando carga moderada en funcionamiento durante 8-10 horas diarias. La fuerza tangencial corregida se obtiene mediante (32)

$$F_t = k \cdot F_h \quad (32)$$

$$F_t = 2.25 \cdot 326.673N = 735.014N$$

El valor de la fuerza tangencial corregida se interseca en la Figura 3.13 con la velocidad lineal para obtener el material y módulo del dentado.

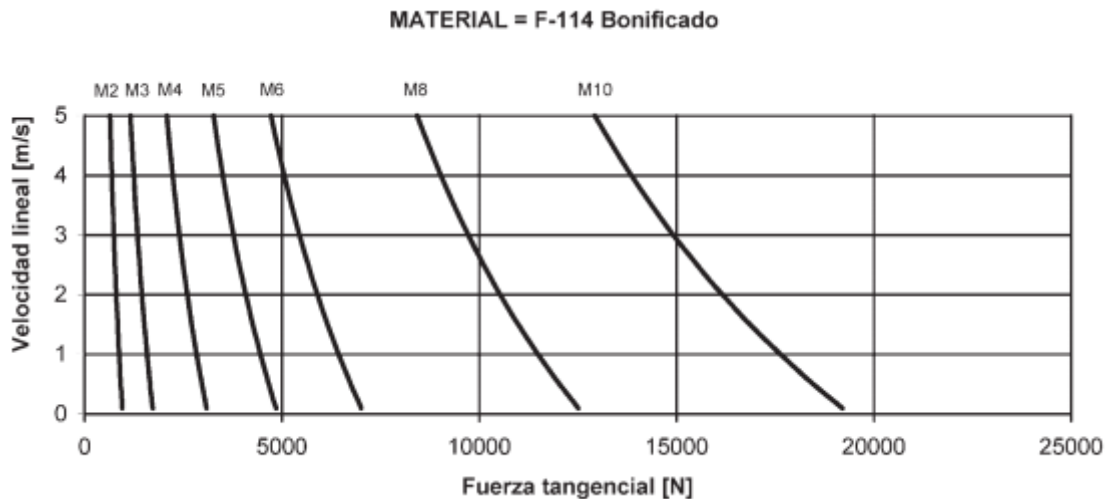


Figura 3.13. Diagrama de selección del módulo del dentado, [17]

El material es acero al carbono F-114 bonificado, utilizado para aplicaciones generales sin grandes exigencias y cargas medio-pequeñas [17]. Además, se deducen los siguientes valores:

- Dentado recto ($\beta = 0$)
- Módulo seleccionado: $m=4$
- Fuerza tangencial máxima: 3000N

Se requiere que el diámetro exterior del piñón sea máximo de 100mm. El número de dientes se determina en función del módulo y diámetro, a partir de (33).

$$z = \frac{d_{max}}{m} \quad (33)$$

Donde:

z es el número de dientes del piñón,

d_{max} es el diámetro exterior máximo, en mm,

m es el módulo seleccionado en mm/diente

$$z = \frac{100mm}{4 \frac{mm}{diente}} = 25 \text{ dientes}$$

La velocidad angular máxima del piñón es de 144rpm, obtenidos en el apartado 3.1.2.3.

El rendimiento del mecanismo piñón-cremallera es un factor necesario para determinar el par de giro que actúa sobre el piñón [17]. Considerando un rendimiento del 90% se calcula el torque en base a (34). La ecuación incluye el factor de conversión, por lo que se utilizan las unidades actuales de trabajo.

$$T = \frac{d_{max} \cdot F_h}{2000 \cdot \eta} \quad (34)$$

$$T = \frac{100 \cdot 326.673}{2000 \cdot 0.9} = 18.148Nm$$

Es necesario que la cremallera tenga perforaciones siguiendo un patrón de línea recta; de manera adicional, se requiere que ésta tenga una longitud de 1920mm. A partir de estos dos últimos factores mencionados, es factible determinar la transmisión por piñón cremallera como se indica a continuación:

- Cremallera: CKR-I-CTR-400-1920
- Piñón: PKR-III-400-25-2

3.1.2.8 Selección del sistema piñón-cremallera para el sistema de avance radial

La velocidad lineal del sistema se obtiene considerando que debe avanzar 0.5m en 0.25s, es decir, 2m/s. Por otro lado, la fuerza horizontal que actúa sobre el piñón se obtiene por medio de (31), tomando una aceleración lineal de $2m/s^2$, coeficiente de fricción estática entre acero-acero de 0.74, y la masa a desplazar es la suma de las masas del homogeneizador de fibras y estructura del sistema de avance radial (40kg).

$$F_h = 40kg \cdot (9.81 \cdot 0.74 + 2) \frac{m}{s^2} = 370.38N$$

La fuerza tangencial debe ser corregida en base a un factor obtenido mediante el catálogo [17]. Se utiliza un factor de 2 considerando carga moderada en funcionamiento intermitente. La fuerza tangencial corregida se obtiene mediante (35)

$$F_t = k \cdot F_h \quad (35)$$

$$F_t = 2 \cdot 370.38N = 740.76N$$

El valor de la fuerza tangencial corregida se interseca en la Figura 3.10 con la velocidad lineal para obtener el material y módulo del dentado, dando como resultado acero al carbono F-114 bonificado. Además, se deducen los siguientes valores:

- Dentado recto ($\beta = 0$)
- Módulo seleccionado: $m=2$
- Fuerza tangencial máxima: 1250N

Se requiere que el diámetro exterior del piñón sea máximo de 50mm. El número de dientes se determina en función del módulo y diámetro, a partir de (33).

$$z = \frac{50mm}{2 \frac{mm}{diente}} = 25 \text{ dientes}$$

La velocidad angular del piñón se obtiene a partir de (21), considerando el diámetro máximo.

$$w = \frac{2}{2 \cdot \pi \cdot 0.025} = 12.73rpm \cong 13rpm$$

Considerando un rendimiento del 90% se calcula el torque en base a (34).

$$T = \frac{50 \cdot 370.38}{2000 \cdot 0.9} = 10.29Nm$$

Es necesario que la cremallera tenga perforaciones siguiendo un patrón de línea recta; de manera adicional, se requiere que ésta tenga una longitud de 550mm. A partir de estos valores, es posible determinar la transmisión por piñón cremallera como se indica a continuación:

- Cremallera: CKR-I-CTR-200-0550
- Piñón: PKR-III-200-25-2

3.1.2.9 Selección del rodamiento de bolas de una hilera

De acuerdo con el catálogo de rodamientos FAG [19], el procedimiento para seleccionar el cojinete adecuado es el que se describe a continuación.

Es necesario conocer la carga dinámica equivalente a la que está sometido el cojinete. El valor se calcula según (36).

$$P = X \cdot F_t + Y \cdot F_a \quad (36)$$

Donde:

P es la carga dinámica equivalente en kN,

X e Y son los factores radial y axial respectivamente,

F_t es la fuerza radial en kN,

F_a es la fuerza axial en kN

El cojinete está sometido a una carga radial que representa el peso del sistema de transmisión del homogeneizador de fibras (98.1N, es decir 0.0981kN) e inicialmente se asume que el factor radial tiene un valor de 1).

La restricción geométrica es que el diámetro interno del rodamiento sea de 50mm. Al realizar la selección inicial, el rodamiento FAG 6010 cumple con dicha restricción y presenta una capacidad de carga dinámica igual a 20.8kN. Para verificar que el cojinete seleccionado cumpla con el requerimiento, se compara la capacidad de carga dinámica del cojinete con la calculada a partir de los factores de esfuerzos dinámicos (37) y de velocidad (38).

$$f_l = \sqrt[k]{\frac{L}{500}} \quad (37)$$

Donde:

f_l es el factor de esfuerzos dinámicos,

k es el exponente de vida para rodamientos de bolas; equivale a 3 [19],

L es la vida útil del cojinete expresada en horas.

$$f_n = \sqrt[k]{\frac{33\frac{1}{3}}{n}} \quad (38)$$

Donde:

f_n es el factor de velocidad,

n es la velocidad del homogeneizador de fibras en rad/min, (94.25rad/min)

La capacidad de carga dinámica se puede calcular en función de la carga dinámica equivalente y los factores de esfuerzos dinámicos y velocidad, como se muestra en (39).

$$C = \frac{f_l \cdot P}{f_n} \quad (39)$$

La duración del cojinete es de 96000 horas, valor obtenido considerando que el cojinete gira 200 veces por cada tanque mecanizado, es decir 100 veces por hora en una jornada de 8 horas, 5 días a la semana durante 24 meses.

$$P = 1 \cdot 0.0981kN = 0.0981kN$$

$$f_l = \sqrt[3]{\frac{96000}{500}} = 5.769$$

$$f_n = \sqrt[3]{\frac{33\frac{1}{3}}{94.25}} = 0.7072$$

$$C = \frac{5.769 \cdot 0.0981}{0.7072} = 0.8kN$$

Por medio de la tabla de factores radiales y axiales de los rodamientos rígidos de bolas [19] se verifica que el valor de X es 1. Dado que la capacidad de carga dinámica calculada es mucho menor que la característica del rodamiento, éste se encuentra en condición de cumplir con el requisito de funcionamiento.

3.1.2.10 Selección de chumaceras

De acuerdo con el catálogo de selección de rodamientos de la empresa NSK [20], los criterios necesarios para elegir la chumacera adecuada son los siguientes:

- Diámetro del eje: 1", el eje se conecta a la polea motora
- Tipo de chumacera: sin restricción, puede ser sin mantenimiento o relubricable.

- Características de sellado especial: ninguna (unidades de rodamientos estándar)
- Capacidad de carga dinámica: mayor a 1kN

La duración de las chumaceras es de 144000 horas, valor obtenido considerando que giran 2400 veces por cada tanque mecanizado, es decir 1200 veces por hora en una jornada de 8 horas, 5 días a la semana durante 3 meses. El tiempo de 3 meses es el recomendado de acuerdo con el catálogo NSK [20] para realizar la primera inspección, por lo que, de haber algún inconveniente que ocasione el desgaste prematuro de cualquier chumacera, el tiempo indicado es el necesario para realizar un cambio de elemento y así evitar que otras piezas de la máquina puedan verse afectadas.

La chumacera que cumple con los requerimientos es el modelo UCP204D1.

3.2 DISEÑO ELECTRÓNICO

3.2.1 DISPOSITIVOS DE ENTRADA Y SALIDA

Constituyen los dispositivos y elementos eléctricos y electrónicos que garantizan el funcionamiento adecuado de la máquina.

3.2.1.1 Dispositivos de entrada

Son todos los elementos que proporcionan a la máquina una señal, misma que es interpretada para efectuar o no una determinada acción. La tabla 3.3 muestra los dispositivos de entrada de la máquina y sus características fundamentales.

Tabla 3.5. Dispositivos de entrada del sistema bobinador

Dispositivo	Cantidad	Descripción
Interruptor de encendido/apagado	1	Permite encender o apagar la máquina una vez conectada
Pulsador de verificación	2	Un pulsador se utiliza para notificar al sistema que el molde ha sido posicionado y los filamentos tensados; el otro pulsador notifica al sistema que el baño de resina está listo.
Pulsador de paro	1	Habilita el paro de emergencia de la máquina
Pantalla táctil	1	Su objetivo fundamental es mostrar las pantallas de la HMI al operador, además de permitirle definir los parámetros de mecanizado.
Final de carrera	2	Sirven como indicadores para encerrar los ejes de movimiento traslacional de la máquina.

3.2.1.2 Dispositivos de salida

Son los elementos conectados a la máquina que, actúan o realizan las acciones pertinentes para efectuar el proceso de mecanizado del tanque. La Tabla 3.4 muestra una lista de dispositivos de salida de la máquina con sus principales características.

Tabla 3.6. Dispositivos de salida del sistema bobinador

Dispositivo	Cantidad	Descripción
Controlador lógico programable	1	Es una computadora industrial que comanda las acciones de la máquina en base a las entradas que recibe, según una programación establecida.
Controlador de motores	3	Es una tarjeta electrónica que permite que los motores a pasos sean controlador a través del PLC mediante salidas digitales.
Variador de frecuencia	1	Elemento que permite mantener la velocidad del motor a pesar de que la carga a la que está sometido varíe
Moto reductor	1	Actuador de movimiento para el eje 1
Motor a pasos	3	Actuadores de movimiento para los ejes 2, 3 y 4

3.2.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS

3.2.2.1 Selección de elementos para el eje de rotación del mandril

El principio de funcionamiento del eje de rotación del mandril se basa en adaptar la velocidad de rotación mediante un motorreductor y controlarla por medio de un variador de frecuencia. Estos elementos son necesarios porque a diferencia de los otros ejes, el eje de rotación del mandril opera con carga variable, es decir que además de reducir la velocidad a un valor nominal, necesita controlar que ésta no cambie a medida que incrementa la carga.

De acuerdo con el catálogo de selección de motorreductores de la empresa TECNON [21], los datos necesarios para elegir el motorreductor son los siguientes:

- Potencia requerida del motor. De acuerdo con el apartado 3.1.2.6, la potencia es de 229.53W, es decir 0.31CV.
- Factor AGMA. Es el factor de servicio para utilizar en la selección de reductores de velocidad [22]. El factor es de 1.25, considerando un motor eléctrico que funciona hasta 10 horas diarias con carga mediana.
- Velocidad nominal. De acuerdo con el apartado 3.1.2.2, la velocidad de bobinado se encuentra entre 19 y 29 rpm, sin embargo esta velocidad puede ser controlada por el variador de frecuencia, por lo que a partir de (21) y considerando un radio de 10cm, la velocidad nominal máxima es de 43.24rpm, valor aproximado a 45rpm.

En base a los parámetros y la disponibilidad del producto a nivel nacional, se elige el motorreductor compuesto de un motor trifásico marca ABB de potencia 1hp que gira a 1700rpm, y una caja reductora con relación de reducción 1/38. El resultado a la salida es 44 revoluciones por minuto.

De acuerdo al catálogo de selección y aplicación de variadores de velocidad de WEG [23], los lineamientos para seleccionar un variador de velocidad son los siguientes:

- Comportamiento del torque en función de la frecuencia. En el caso de los sistemas bobinadores se le conoce como torque hiperbólico y su comportamiento es el que se muestra en la Figura 3.14. Esto muestra que la carga aumenta en el proceso de bobinado, por lo que la velocidad debe controlarse a distintos torques, disminuyendo la frecuencia para torques elevados, y aumentando para torques bajos.

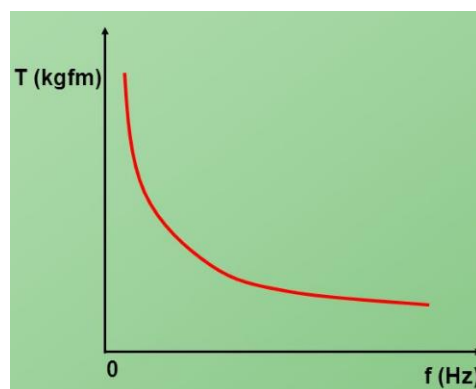


Figura 3. 14. Torque en función de la frecuencia para máquinas bobinadoras, [22]

- Rango de variación de velocidad. La velocidad más baja es de 20rpm y la velocidad más alta de 145rpm.
- Información del motor. El variador de velocidad controla la velocidad de salida de un motorreductor de 3/4hp a 145rpm.
- Datos nominales de la red eléctrica. 220V, 60Hz.
- Condiciones ambientales. Altura aproximada de Quito 3000m, temperatura entre 20 y 40 °C.
- Control y monitoreo del equipo. Mediante un controlador lógico programable

A partir del requerimiento y en base a la disponibilidad del mercado nacional, se selecciona el variador de velocidad IST230-T15B.

3.2.2.2 Selección de elementos para el distribuidor móvil

El funcionamiento del distribuidor móvil se basa en la rotación de un motor a pasos junto con el piñón para lograr el desplazamiento a través de la cremallera. De acuerdo con el apartado 3.1.2.7, el torque a vencer es de 18.148Nm. Considerando que el motor trabajará al 60% de la carga máxima, el torque necesario es de 30.25Nm.

En base al requerimiento, de acuerdo con el catálogo de motores a pasos de alto torque de JVL [24], se requiere un motor tipo modelo MST512, con un torque de 40Nm montado sobre una carcasa NEMA51 junto con el controlador 2DM2280 que facilita las salidas hacia el PLC.

3.2.2.3 Selección de elementos para el sistema de avance radial

De manera similar, el sistema de avance radial lleva un piñón que se acopla al motor a pasos para desplazar linealmente al homogeneizador de fibras hacia el centro geométrico del tanque a mecanizar. El torque a vencer es de 10.29Nm de acuerdo con el apartado 3.1.2.8. Considerando que el motor trabaja al 60% de su carga máxima, el torque para seleccionar el motor es de 17.15Nm.

En base al requerimiento, de acuerdo con el catálogo de motores a pasos de JVL [25], se requiere un motor tipo modelo MST431C213, con un torque de 21Nm montado sobre una carcasa NEMA43 junto con el controlador 2DM2280 que facilita las salidas hacia el PLC.

3.2.2.4 Selección de elementos para el homogeneizador de fibras

El movimiento del homogeneizador de fibras se basa en la rotación de un motor a pasos conectado a una polea dentada que, a través de una banda transmite el movimiento y permite que los filamentos roten una vez que el distribuidor móvil haya llegado a los extremos del tanque. El torque a vencer es de 0.011Nm de acuerdo con el apartado 3.1.2.5. Considerando que el motor trabaja al 60% de su carga máxima, el torque para seleccionar el elemento es de 0.02Nm.

En base al requerimiento, de acuerdo con el catálogo de motores a pasos de JVL [25], se requiere un motor tipo modelo MST171A02, con un torque de 0.13Nm montado sobre una carcasa NEMA23 junto con el controlador DM542D que facilita las salidas hacia el PLC.

3.2.2.5 Selección del controlador lógico programable

Además de la selección de alternativas del subsistema C, mostrada en 2.3.3.3, los criterios específicos para seleccionar un modelo de PLC son los siguientes:

- Cantidad de entradas/salidas disponibles: 24
- Comunicación RS485 para transmitir desde/hacia el HMI
- Comunicación USB o ETHERNET para la programación del PLC
- Voltaje de alimentación: 12/24V DC
- Salidas de relé: 6

En base a los parámetros mencionados, el PLC elegido es un Controllino Maxi del fabricante austríaco CONELCOM.

3.2.2.6 Selección del variador de frecuencia

Los criterios a ser tomados en cuenta para elegir un variador de frecuencia que se ajuste a la necesidad del proyecto son los siguientes:

- Parámetros de operación: voltaje 220V AC, frecuencia 60Hz
- Motorreductor a controlar: trifásico, potencia 1HP

En base a los parámetros mencionados, el variador elegido es el modelo ADIST230-S15B del fabricante chino CNC ELECTRIC GROUP.

3.2.3 TABLA DE ESTADOS

A continuación la tabla 3.5 muestra la relación entre el estado de los elementos electrónicos de la máquina y las salidas a ejecutarse ante cada escenario. Cada elemento se representa de la siguiente forma:

- I0 interruptor de encendido
- P0 pulsador de paro de emergencia
- P1 pulsador estado del molde
- P2 pulsador estado baño de resina

Tabla 3.7. Lógica del circuito y acciones a ejecutarse

Número	I0	P0	P1	P2	Salida
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	0
3	0	0	1	0	0
4	0	0	1	1	0
5	0	1	0	0	0
6	0	1	0	1	0
7	0	1	1	0	0
8	0	1	1	1	0
9	1	0	0	0	0
10	1	0	0	1	0
11	1	0	1	0	0
12	1	0	1	1	1
13	1	1	0	0	0
14	1	1	0	1	0
15	1	1	1	0	0
16	1	1	1	1	0

La conclusión de la tabla 3.5 es que la máquina no realiza ninguna acción mientras el interruptor esté apagado. Una vez encendido, la máquina funcionará siempre y cuando se encuentren posicionados el molde, filamentos y baño de resina, y se detendrá cuando haya finalizado el proceso o tan pronto se oprima el pulsador de emergencia. La ecuación booleana se muestra en (40).

$$Salida = I0 + \overline{P0} + P1 + P2 \quad (40)$$

3.3 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

3.3.1 ALGORITMO GENERAL DEL PROCESO

El proceso que se lleva a cabo para la fabricación de cada tanque es el que se muestra a continuación:

1. Inicio
2. Posicionar el molde (operación manual)
3. Fijar los filamentos (operación manual)
4. Preparar el baño de resina (operación manual)
5. Encender la máquina (operación manual)
6. Ejecutar el algoritmo de funcionamiento (operación automática)
7. Retirar filamentos (operación manual)
8. Desmontar el molde (operación manual)
9. Fin

3.3.2 ALGORITMO DE FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA

1. Inicio
2. Definir Contador igual a 1
3. Activar el eje 1 a una velocidad de 25 rpm
4. Mover el eje 2 1500mm en sentido positivo
5. Mover el eje 4 450mm en sentido positivo
6. Rotar el eje 3 90° en sentido horario
7. Rotar el eje 3 90° en sentido anti horario
8. Mover el eje 4 450mm en sentido negativo
9. Mover el eje 2 1500mm en sentido negativo
10. Rotar el eje 3 90° en sentido anti horario
11. Rotar el eje 3 90° en sentido horario
12. Contador = Contador + 1
13. Preguntar ¿Contador es igual a 30? Si es igual, ir al paso 12, caso contrario regresar al paso 4
14. Desactivar el movimiento del eje 1
15. Fin

El diagrama de flujo se muestra a continuación en las Figuras 3.15, 3.16, 3.17.

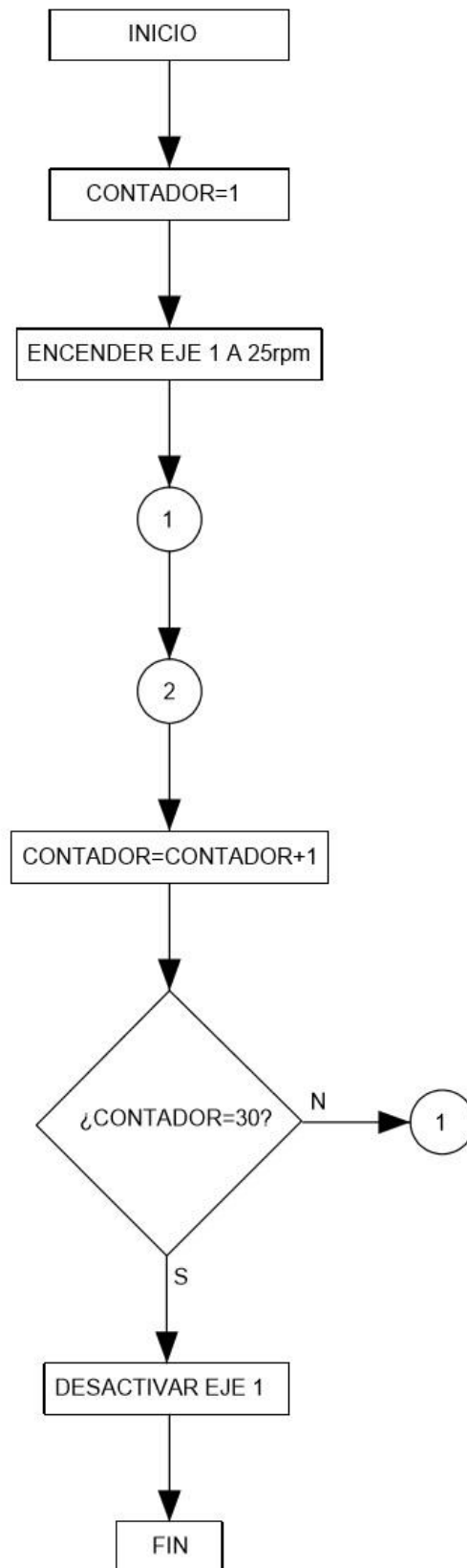


Figura 3.15. Diagrama de flujo del algoritmo de funcionamiento

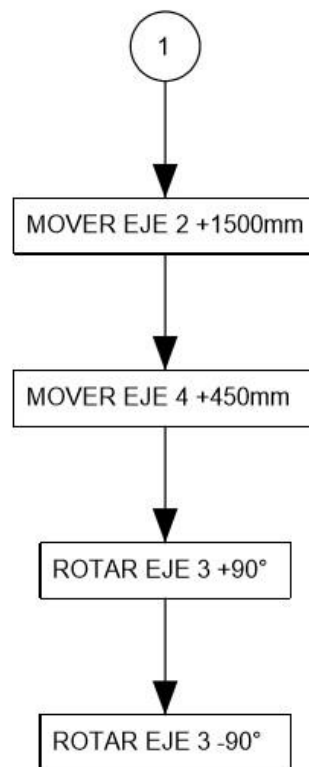


Figura 3. 16. Diagrama de flujo subrutina 1

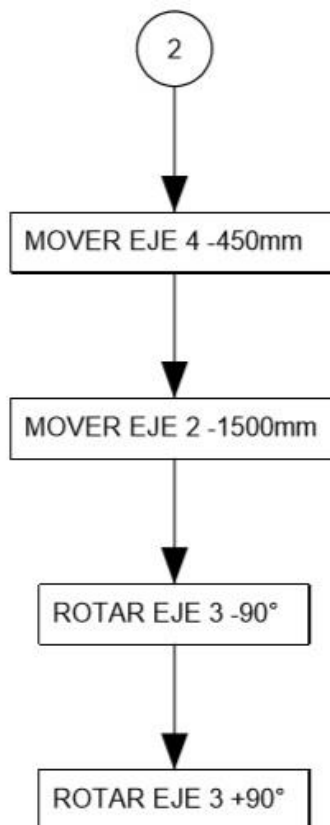


Figura 3. 17. Diagrama de flujo subrutina 2

3.3.3 DESCRIPCIÓN DE OPERACIONES MANUALES

3.3.3.1 Posicionar el molde

1. Abrir las mordazas del plato
2. Fijar un extremo del molde a la base móvil de la máquina
3. Posicionar el otro extremo del molde entre las mordazas
4. Ajustar mordazas

3.3.3.2 Fijar los filamentos

1. Posicionar los carretes
2. Sujetar los filamentos con las manos y llevarlos a través del baño de resina y eje 3 de la máquina, hasta llegar al molde
3. Fijar los filamentos al extremo del molde que se encuentra junto a las mordazas
4. Activar el interruptor 1 (indicador de estado de filamentos)

3.3.3.3 Preparar el baño de resina

1. Mezclar el acelerador y catalizador de acuerdo a 1.6.3
2. Vaciar el contenido en el baño de resina
3. Activar el interruptor 2 (indicador de estado de resina)

3.3.3.4 Encender la máquina

1. Encerar la máquina con el distribuidor móvil a la izquierda (lado opuesto a la mordaza), sistema de avance radial fuera de la superficie del molde y homogeneizador de fibras en un ángulo aproximado de 45°
2. Activar el interruptor de encendido
3. Mediante pulsador del variador de frecuencia, rotar el eje 1 hasta que los filamentos impregnados de resina se encuentren próximos a cubrir la superficie del molde
4. Iniciar secuencia de bobinado desde el HMI
5. Una vez completada la secuencia, desactivar el interruptor 1 y pulsar el botón de reinicio en el controlador. Esto permite preparar a la máquina para una secuencia de bobinado polar en caso de así requerirlo, o encerarla para apagar y desmontar el molde.

3.3.3.5 Retirar filamentos

1. Una vez haya finalizado el algoritmo de funcionamiento, verificar mediante inspección visual que no existan intersticios de resina sin filamentos
2. Retirar los filamentos próximos al molde
3. En caso de haber intersticios, colocar velo de protección utilizando el rodillo para fijarlo sobre la superficie del tanque.

3.3.3.6 Desmontar el molde

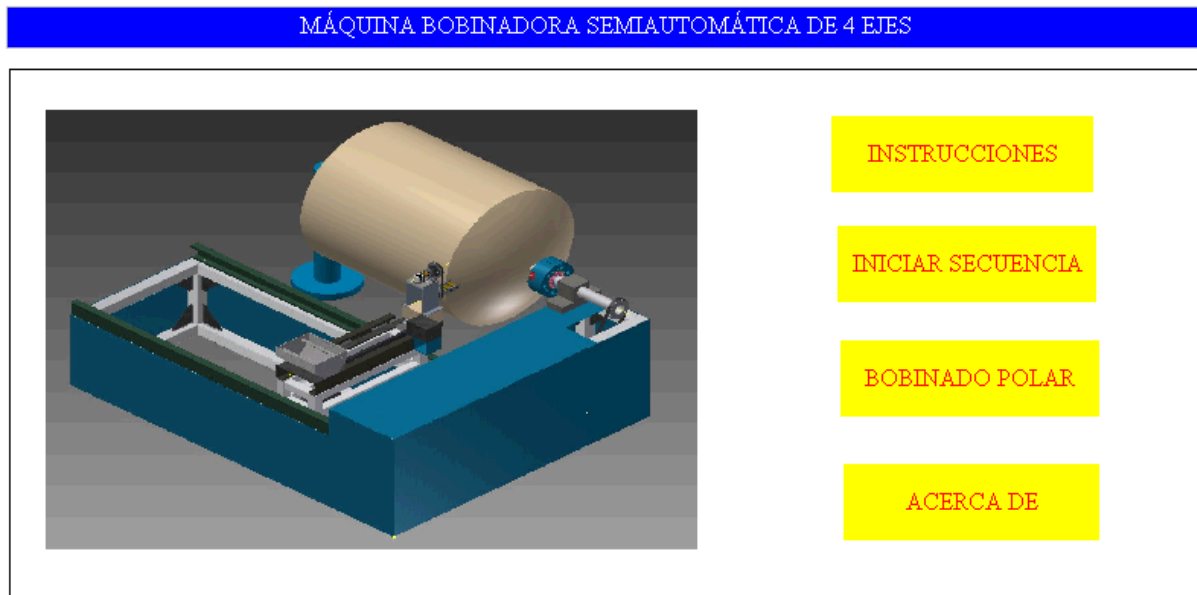
1. Abrir las mordazas del plato
2. Retirar un extremo del molde y llevarlo hacia un lugar fresco y seco
3. Esperar el tiempo de polimerización
4. Retirar la base móvil

3.3.4 HMI

La interfaz gráfica representa el conjunto de pantallas mostradas al operador a través del HMI de la máquina. Sus funciones son controlar el programa piloto y el proceso de construcción de tanques. Las figuras 3.18 – 3.21 muestran el conjunto de pantallas mostradas durante el funcionamiento de la máquina en base al algoritmo general del proceso.



Figura 3.18. Interfaz de inicio



STRONGPLAST S.C.C. - QUITO - ECUADOR
 Avenida Galo Plaza Lasso, lote 620 y calle Río Villonaco, sector carapungo
 Teléfonos: 0998471896 - 0969504860

Figura 3.19. Pantalla principal

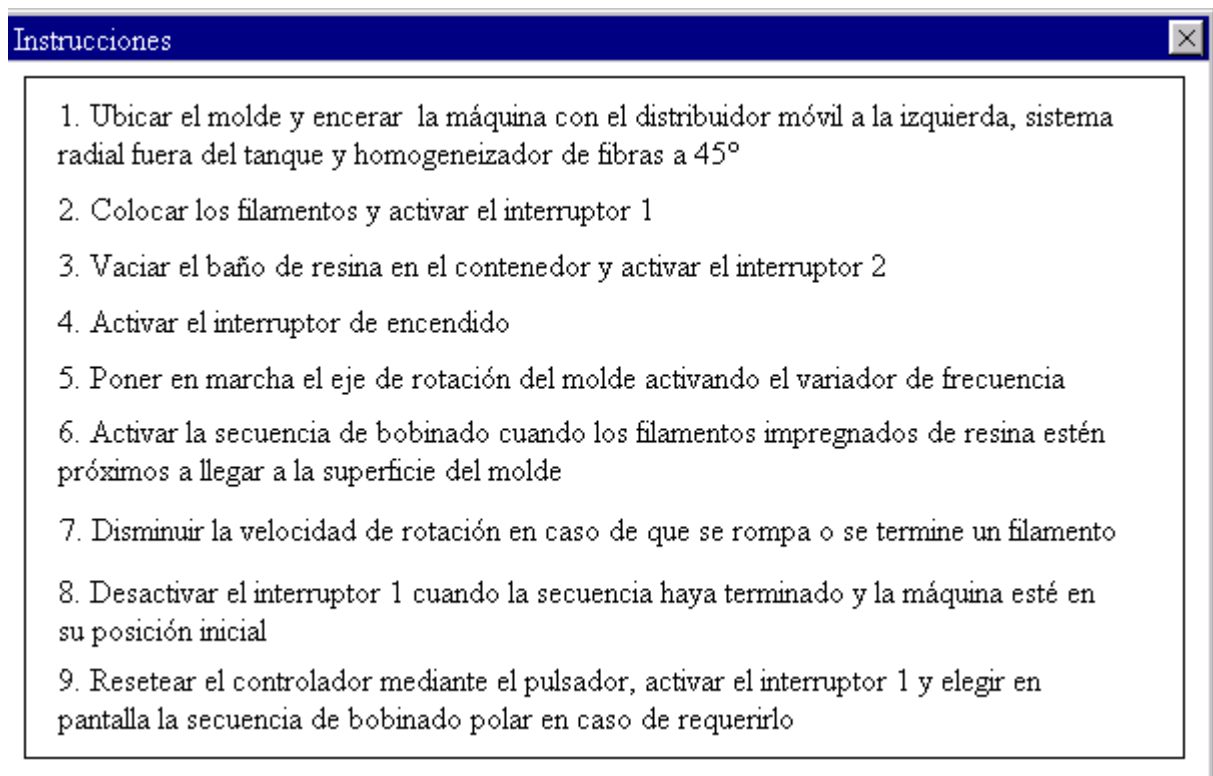


Figura 3.20. Pantalla de instrucciones

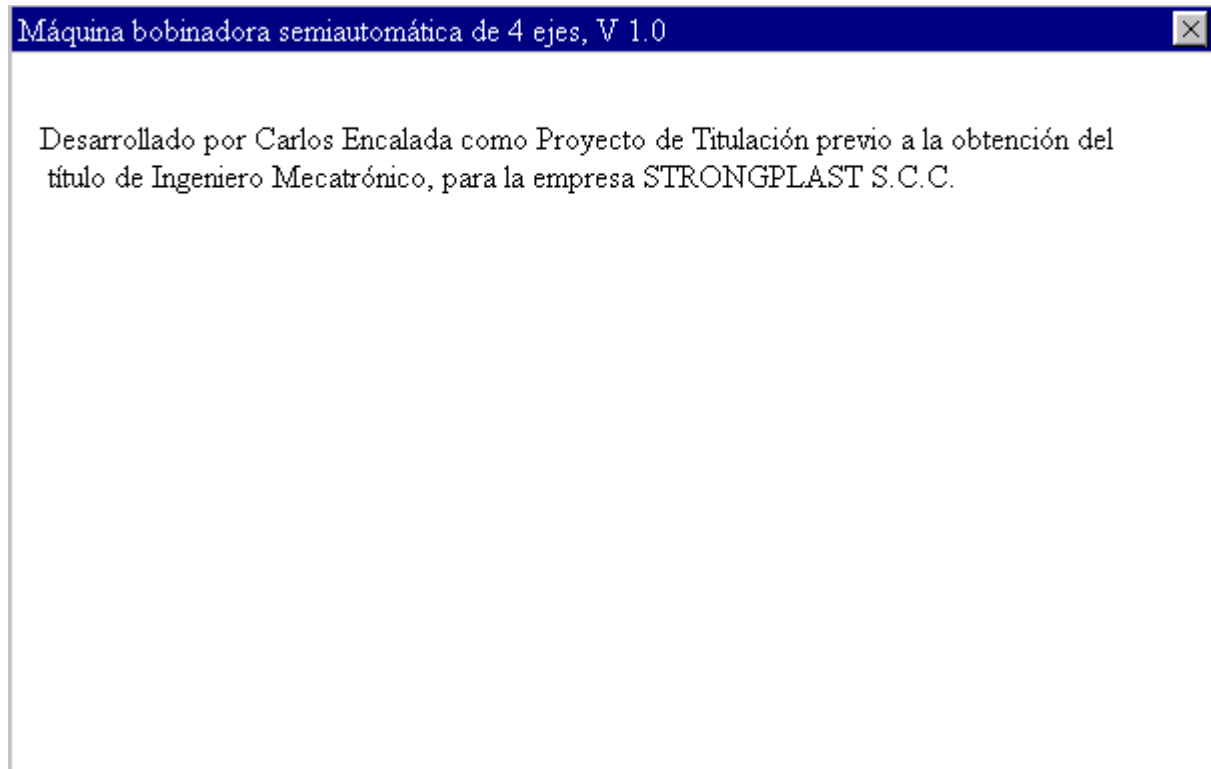


Figura 3.21. Pantalla “acerca de”

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS

El presente capítulo describe las etapas involucradas en el proceso de construcción de la máquina bobinadora de filamentos, junto con las pruebas realizadas para verificar el funcionamiento de cada eje y los resultados obtenidos al implementar el sistema bobinador.

4.1 CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

A continuación se muestra el proceso de construcción de la máquina. Los detalles y especificaciones se encuentran en el anexo D, correspondiente a los planos. Las pruebas de funcionamiento realizadas presentan 3 alternativas:

- Aprobada (A)
- Parcialmente aprobada (P)
- Fallida (F)

4.1.1 ESTRUCTURA

A partir del perfil cuadrado seleccionado en 3.2.1.1, se procede a cortar los perfiles usando una ingletadora de acuerdo a la longitud requerida de cada tramo para dar forma a la bancada. Se posicionan los elementos que conforman la base y éstos son soldados de acuerdo a las especificaciones del anexo D.

El proceso se muestra a continuación en las Figuras 4.1 – 4.2.



Figura 4.1. Posicionamiento de los primeros elementos



Figura 4.2. Estructura de la máquina

En la estructura se ubican los perfiles L a través de los cuales se desplaza el distribuidor móvil y se procede a pintar, inicialmente un fondo gris y los acabados de color azul eléctrico. Este proceso se muestra en las Figuras 4.3 – 4.5 a continuación.



Figura 4.3. Pintura de fondo color gris



Figura 4.4. Ubicación de los perfiles para el distribuidor móvil



Figura 4.5. Estructura pintada

4.1.2 EJE ROTACIONAL (EJE 1)

A fin de acoplar las mordazas, es necesario mecanizar en el torno una pieza que junte el acople al eje y soldarla según especificaciones del anexo D. En los ejes se posicionan las poleas dentadas diseñadas en 3.1.2.6 y se colocan las chumaceras diseñadas en 3.1.2.10, como se muestra en las Figuras 4.6 – 4.10 a continuación.



Figura 4.6. Poleas 36H100 con banda 750H100



Figura 4.7. Poleas 36H100



Figura 4.8. Ejes del sistema de rotación del mandril y mordaza



Figura 4.9. Ubicación de poleas y chumaceras en los ejes



Figura 4.10. Ubicación de la mordaza

El siguiente paso consiste en ubicar los ejes de manera que el molde pueda rotar haciendo coincidir su centro con el punto donde salen los filamentos del homogeneizador de fibras. Debido a la altura del contenedor de resina, es necesario subir la altura de la transmisión una distancia de 35cm, posicionando bases para las chumaceras según el anexo D y de acuerdo a la Figura 4.11. En la parte baja se ubica el motorreductor seleccionado en 3.2.2.1.



Figura 4.11. Ubicación del sistema de soporte y rotación del mandril

Las pruebas realizadas en el sistema de soporte y rotación del mandril se muestran a continuación en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Pruebas del sistema de soporte y rotación del mandril

#	Prueba	Descripción	Resultado esperado	Aprobación
1	Soporte	Soportar el peso del molde	El peso del molde de 1m de diámetro por 1.50m de altura es soportado por el sistema.	A
2	Rotación	Rotar el molde	El motorreductor rota el molde de 1m de diámetro por 1.50m de altura a través de la transmisión banda-polea	A

4.1.3 EJE DISTRIBUIDOR (EJE 2)

La construcción del distribuidor móvil inicia dando forma a la estructura del distribuidor. Utilizando el mismo perfil cuadrado de la bancada, se procede a cortar las secciones requeridas y soldar según especificaciones del anexo D.

Se pinta la misma base color gris que la bancada y se colocan 4 ruedas de poliuretano de 80mm de diámetro, a fin de que muevan el distribuidor a través de los perfiles L colocados en 4.1.1. Además, se ubican los perfiles tipo L que permiten el movimiento del sistema de avance radial.

Posteriormente se pinta el acabado final color azul eléctrico. El proceso se muestra a continuación en las Figuras 4.12 – 4.15.



Figura 4.12. Estructura del distribuidor móvil



Figura 4.13. Base de pintura color gris



Figura 4.14. Ruedas de poliuretano en el distribuidor móvil



Figura 4.15. Ubicación del distribuidor móvil en la estructura

Finalmente, se posiciona la transmisión por piñón-cremallera diseñada en 3.1.2.7 y se ubica el motor a pasos seleccionado en 3.2.2.2, como se muestra en las Figuras 4.16 – 4.17.



Figura 4.16. Ubicación de la cremallera del eje distribuidor



Figura 4.17. Posicionamiento del motor a pasos

Las pruebas realizadas con el distribuidor móvil se muestran a continuación en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Pruebas con el distribuidor móvil

#	Prueba	Descripción	Resultado esperado	Aprobación
1	Movimiento	Mover el peso total del distribuidor	El motor seleccionado es capaz de mover el sistema con el peso total del distribuidor.	A
2	Rango	Rango de movimiento del eje	El distribuidor móvil tiene rango de movimiento suficiente para abarcar la longitud de un molde igual a 1.50m.	A

4.1.4 EJE DE OJO (EJE 3)

Las piezas para construir el homogeneizador de fibras se mecanizan mediante corte por chorro de agua, se sueldan utilizando MIG y se pulen mediante una amoladora, a fin de formar una sola pieza donde se instala el sistema de transmisión diseñado en 3.1.2.5, cojinete seleccionado en 3.1.2.9, chumaceras seleccionadas en 3.1.2.10 y motor a pasos seleccionado en 3.2.2.4. La construcción se lleva a cabo de acuerdo con las especificaciones del anexo D; el proceso se muestra a continuación en las Figuras 4.18 – 4.22.



Figura 4.18. Piezas cortadas mediante chorro de agua



Figura 4.19. Estructura del homogeneizador de fibras



Figura 4.20. Poleas 36L050 y polea 285L050

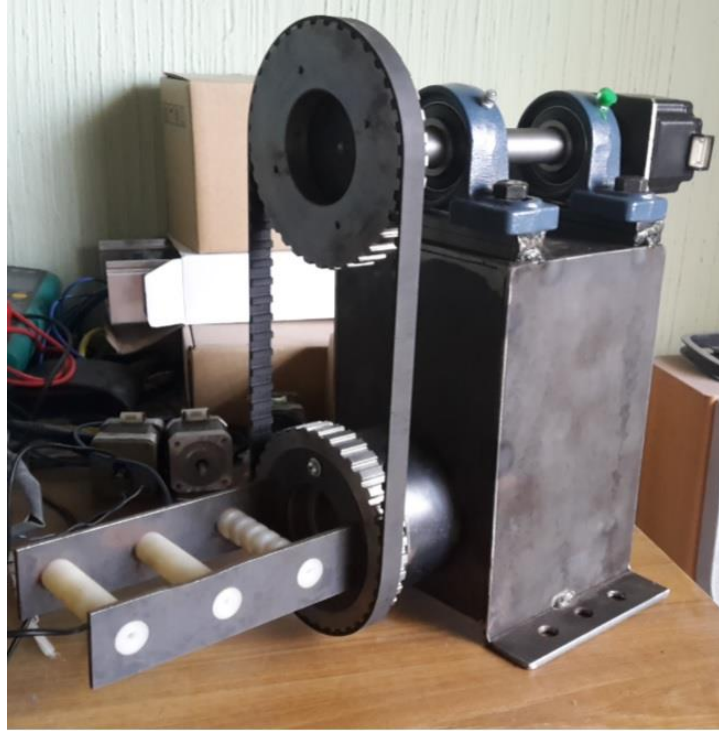


Figura 4.21. Homogeneizador de fibras



Figura 4.22. Ubicación del homogeneizador de fibras en la estructura

Las pruebas realizadas en el homogeneizador de fibras se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Pruebas con el homogeneizador de fibras

#	Prueba	Descripción	Resultado esperado	Aprobación
1	Rotación	Rotar el eje de ojo.	El motor seleccionado es capaz de rotar el eje de ojo a través de la transmisión banda-polea.	A
2	Rango	Rango de acción del sistema	La ubicación del homogeneizador de fibras le permite alcanzar el centro geométrico de los extremos del molde.	A

4.1.5 EJE RADIAL (EJE 4)

Para el sistema de avance radial se construye una estructura móvil utilizando perfiles tipo L de 2" por 1/8" de espesor y 6 ruedas de poliuretano de 80mm de diámetro, de acuerdo a las especificaciones del anexo D. El carro de avance radial es el que se muestra a continuación en la Figura 4.23.



Figura 4.23. Carro de avance radial

El carro de avance radial se ubica entre los perfiles tipo G colocados en 4.1.3 para verificar el movimiento del mismo y una vez comprobado se procede a pintar la estructura de avance radial. El proceso se muestra a continuación en las Figuras 4.24 – 4.26.



Figura 4.24. Sistema de avance radial saliendo del distribuidor móvil



Figura 4.25. Vista aérea del carro de avance radial, contenedor de resina y homogeneizador de fibras



Figura 4.26. Pintura del carro de avance radial

Finalmente se instala la transmisión por piñón-cremallera diseñada en 3.1.2.8 sobre un perfil L, y se posiciona el motor a pasos seleccionado en 3.2.2.3, como se muestra en las Figuras 4.27 – 4.28.



Figura 4.27. Ubicación de la cremallera para el sistema de avance radial



Figura 4.28. Ubicación del motor en el sistema piñón-cremallera

Las pruebas realizadas en el sistema de avance radial se muestran a continuación en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Pruebas del sistema de avance radial

#	Prueba	Descripción	Resultado esperado	Aprobación
1	Movimiento	Mover el peso total del sistema	El motor seleccionado desplaza el peso del sistema de avance radial por medio del sistema piñón-cremallera.	A
2	Rango	Rango de movimiento del eje	El sistema de avance radial tiene rango de movimiento suficiente para llegar hacia el centro de un molde de 1m de diámetro.	A

4.1.6 SISTEMA BOBINADOR DE FILAMENTOS

Para la construcción del sistema bobinador de filamentos inicialmente se fija el contenedor de resina sobre la estructura del distribuidor móvil. El contenedor se pinta del mismo color que la máquina. Las Figuras 4.29 y 4.30 muestran el contenedor antes y después de ser pintado.



Figura 4.29. Contenedor de resina sin pintar



Figura 4.30. Contenedor de resina pintado

Una vez posicionados todos los elementos que comprende el área mecánica, se procede a cablear la máquina, dirigiendo el cableado de los motores hacia el lugar donde se ubica el gabinete de control de dimensiones 600x400x200mm (altura, ancho, profundidad). Los componentes electrónicos se ubican en el gabinete utilizando riel DIN de 35mm y pernos M4. Una vez ubicados los elementos, se conectan entre sí mediante alambre de cobre TFF 18 AWG (600V, 6A) y espiral de

plástico flexible de 5/32", para finalmente conectar los motores a pasos al gabinete. En el motorreductor se realiza el cableado interno para darle una conexión tipo delta-delta, de modo que arranque con un voltaje trifásico de 220V, mismo que será proporcionado por el variador de frecuencia. El proceso y pruebas realizadas se muestran en las Figuras 4.31 – 4.41.



Figura 4.31. Cableado de motores a pasos



Figura 4.32. Ubicación de elementos en el tablero de control



Figura 4.33. Cableado de componentes del gabinete



Figura 4.34. Sistema en funcionamiento



Figura 4.35. Secuencia de bobinado helicoidal, posición 1



Figura 4.36. Secuencia de bobinado helicoidal, posición 2



Figura 4.37. Secuencia de bobinado helicoidal, posición 3



Figura 4.38. Secuencia de bobinado helicoidal, posición 4



Figura 4.39. Secuencia de bobinado helicoidal, posición 5



Figura 4.40. Secuencia de bobinado helicoidal, posición 6



Figura 4.41. Secuencia de bobinado helicoidal, posición 7

Las pruebas realizadas en el sistema bobinador de filamentos se muestran a continuación en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Pruebas del sistema bobinador

#	Prueba	Descripción	Resultado esperado	Aprobación
1	Continuidad	Verificar continuidad en el cableado.	Existe continuidad en todos los tramos de conexión del cableado.	A
2	Funcionamiento	Verificar el funcionamiento de todos los motores con carga real al mismo tiempo.	El suministro de energía eléctrica es suficiente para abastecer la corriente que consume la máquina.	A
3	Micropasos	Comprobar que la cantidad de micropasos que da un motor es igual a la cantidad de pulsos enviados al controlador.	Los micropasos definidos manualmente en cada controlador coinciden con los pulsos que se deben dar para mover cada motor.	A
4	Velocidad	Determinar el ancho de pulso en cada controlador para asignar la velocidad adecuada a cada motor.	Cantidad de milisegundos que debe durar el pulso en cada controlador para activar cada motor a la velocidad adecuada.	A
5	Algoritmo	Probar el algoritmo de bobinado con cuerdas.	La secuencia de bobinado permite cubrir el molde con cuerdas.	A

4.1.7. CONSTRUCCIÓN DE UN TANQUE CILÍNDRICO DE TAPA TORIESFÉRICA

Una vez probado el funcionamiento del algoritmo bobinando el molde con una cuerda, la etapa final consiste en colocar la materia prima a fin de construir un tanque cilíndrico de tapa toriesférica.

El proceso inicia colocando el filamento de fibra de vidrio desde el contenedor de resina hasta el eje de ojo, como se indica en la Figura 4.42.



Figura 4.42. Filamento de fibra de vidrio entre la máquina y el molde

Posteriormente se vierte la mezcla de resina con acelerador y catalizador dentro del recipiente, como se muestra en la Figura 4.43.



Figura 4.43. Baño de resina en el contenedor

Luego de activar los interruptores indicadores de existencia de materia prima, se enciende la máquina, el operador activa el variador de frecuencia y da inicio a la secuencia de bobinado desde la interfaz. El proceso se muestra a continuación en las Figuras 4.44 – 4.55.

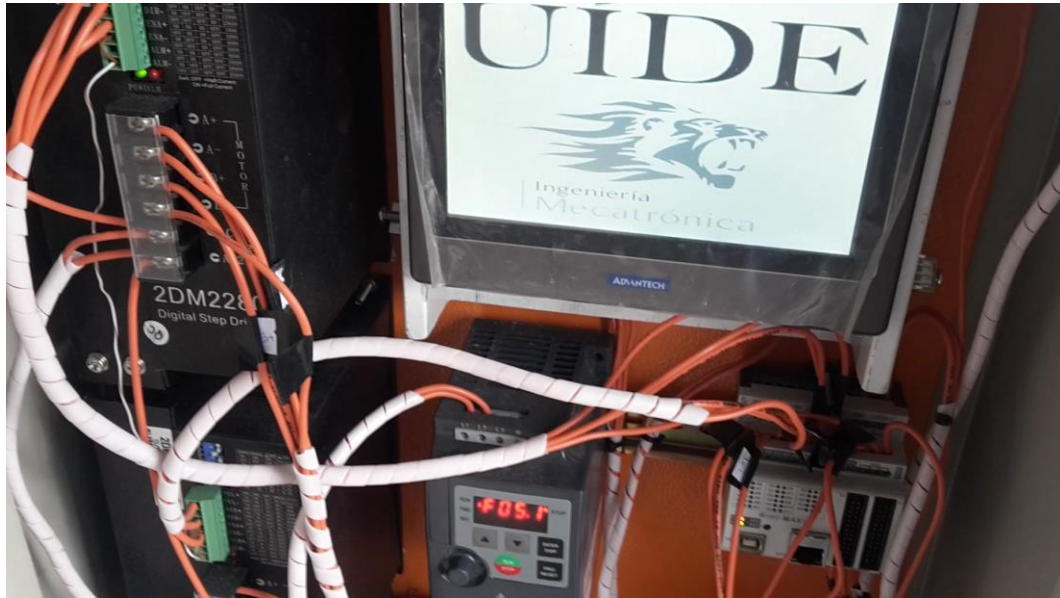


Figura 4.44. Interfaz de inicio



Figura 4.45. Construcción del tanque, etapa inicial



Figura 4.46. Construcción del tanque, patrones de bobinado



Figura 4.47. Carrete de filamentos posicionado durante el bobinado



Figura 4.48. Contenedor de resina, dosificación

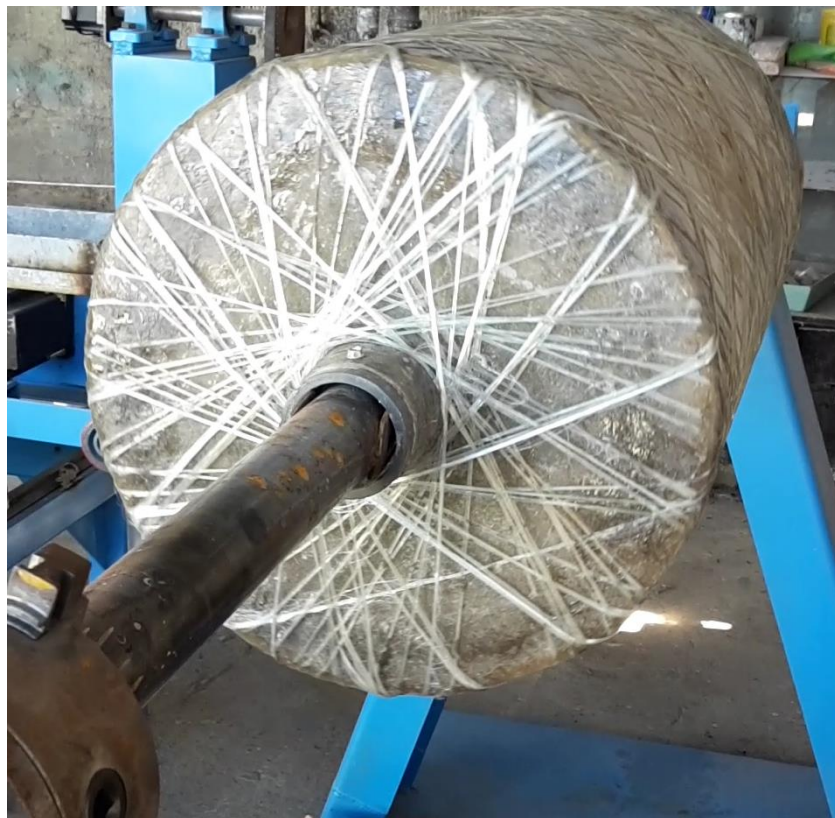


Figura 4.49. Construcción del tanque, 30 minutos transcurridos



Figura 4.50. Construcción del tanque, 1 hora transcurrida



Figura 4.51. Construcción del tanque, tiempo: 2 horas



Figura 4.52. Construcción del tanque, tiempo: 3 horas



Figura 4.53. Construcción del tanque, tiempo: 4 horas



Figura 4. 54. Tanque construido, desmontado de la máquina



Figura 4.55. Tanque de poliéster reforzado con fibra de vidrio

Las pruebas realizadas con fibra de vidrio y resina en el sistema se muestran a continuación en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6. Pruebas con fibra de vidrio y resina en el sistema

#	Prueba	Descripción	Resultado esperado	Aprobación
1	Tensión	Verificar que el filamento se encuentre tenso entre el molde y el eje de ojo.	La porción de filamento ubicada entre el eje de ojo y el molde tiene la suficiente tensión para mantener el patrón de bobinado durante el proceso.	A
2	Resina	Comprobar que la cantidad de resina preparada sea suficiente para la construcción del tanque.	El contenido del baño de resina es suficiente para llevar a cabo un proceso completo de mecanizado.	P
3	Algoritmo	Determinar si el algoritmo se cumple utilizando materia prima.	Los patrones de bobinado se mantienen utilizando fibra de vidrio y resina.	A
4	Tanque	Verificar la construcción de un tanque cilíndrico de tapa toriesférica.	Al llenar el tanque con agua, no existen filtraciones.	A

- Nota: El resultado parcialmente aprobado en la prueba 2 se debe a que, si bien el volumen del contenedor de resina es suficiente para llevar el total de la mezcla durante el bobinado, colocar todo al inicio ocasiona que en las etapas finales del proceso, el contenido restante empiece su período de polimerización, por lo que es preferible colocar la mezcla en dosis de 2kg a lo largo del proceso.

4.2 RESULTADOS

4.2.1 SISTEMA DE SOPORTE Y ROTACIÓN DEL MANDRIL

En el eje 1 de la máquina, además de comprobar que puede soportar las cargas de diseño, se determina el rango de velocidades de trabajo para un molde de 1m de diámetro por 1.50m de altura, como se indica en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7. Rango de velocidades de rotación del mandril

Velocidad mínima	20rpm
Velocidad máxima	30rpm

4.2.2 DISTRIBUIDOR MÓVIL

Los resultados obtenidos en las pruebas del distribuidor móvil son parámetros que se muestran a continuación en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Resultados obtenidos en el distribuidor móvil

Parámetro	Valor
Rango de movimiento	1.6m
Velocidad de trabajo	15rpm
Micropasos por revolución del motor	400 micropasos
Corriente de trabajo definida en el controlador	3.2A

4.2.3 HOMOGENEIZADOR DE FIBRAS

Además de verificar que se cumple con la restricción geométrica, los resultados de probar el homogeneizador de fibras son los que se muestran en la Tabla 4.9 a continuación.

Tabla 4.9. Resultados obtenidos en el homogeneizador de fibras

Parámetro	Valor
Velocidad de trabajo	20rpm
Micropasos por revolución del motor	400 micropasos
Corriente de trabajo definida en el controlador	1A

4.2.4 SISTEMA DE AVANCE RADIAL

Los resultados obtenidos en las pruebas del sistema de avance radial son los indicados en la tabla 4.10.

Tabla 4.10. Resultados obtenidos en las pruebas del sistema de avance radial

Parámetro	Valor
Rango de movimiento	55cm
Velocidad de trabajo	60rpm
Micropasos por revolución del motor	400 micropasos
Corriente de trabajo definida en el controlador	1.6A

4.2.5 SISTEMA BOBINADOR DE FILAMENTOS

Luego de realizar las pruebas del sistema general, los resultados son recopilados en la tabla 4.11 a continuación.

Tabla 4.11. Resultados del sistema bobinador de filamentos

Parámetro	Valor
Voltaje de alimentación de la máquina	220V y 110V monofásico
Corriente total consumida por la máquina	9A
Potencia eléctrica	1.9kW
Velocidad de pulso para distribuidor móvil	1600 microsegundos
Velocidad de pulso para homogeneizador	7000 microsegundos
Velocidad de pulso para sistema radial	500 microsegundos

4.2.6 CONSTRUCCIÓN DEL TANQUE DE FIBRA DE VIDRIO

Una vez construido el tanque de poliéster reforzado con fibra de vidrio, los resultados se muestran en la tabla 4.12 a continuación.

Tabla 4.12. Resultados de la construcción del tanque de fibra de vidrio

Parámetro	Valor
Cantidad máxima permitida de mezcla en el baño de resina	2kg
Tiempo total de mecanizado	4 horas

CONCLUSIONES

Se ha diseñado y construido una máquina bobinadora semiautomática de 4 ejes, capaz de fabricar tanques de 1m de diámetro por 1.50m de altura mediante la técnica Filament Winding.

Para la fabricación de tanques utilizando un único carrete de filamentos, la función del eje de ojo puede ser desactivada durante todo el proceso. Esto se debe a que el giro en los extremos solamente es necesario para dar forma a la tapa con varios carretes.

El protocolo Modbus RTU RS485 permite la comunicación entre la pantalla y el PLC; para que la transmisión de datos sea exitosa, los registros internos en los dispositivos involucrados deben coincidir.

Las pruebas de movimiento de cada eje permitieron conocer la relación existente entre la cantidad de micro pasos que debe dar cada motor para cubrir las dimensiones del molde.

Durante el proceso de bobinado pueden darse imprevistos no detectados por la máquina como la rotura de uno de los filamentos, o que uno de ellos se termine porque ha sido usado para otros procesos previamente. La solución ante estos percances es disminuir la velocidad de rotación del mandril. De esta forma es factible terminar de bobinar el tanque sin tener que desperdiciar el material para reiniciar el proceso, ni detenerlo, evitando el riesgo de polimerización anticipada.

Las ventajas principales de utilizar software libre son la disminución del costo del proyecto y la flexibilidad para que el diseñador pueda programar como mejor se adapte el código a los equipos que se están utilizando.

RECOMENDACIONES

Es recomendable vaciar únicamente el contenido de 2kg de resina en el contenedor durante el bobinado y repetir el proceso cuando el nivel baje a la altura del rodillo. De esta forma se desperdicia menos cantidad de la mezcla.

Luego de finalizar el proceso de bobinado, se recomienda limpiar el contenedor de resina y eje de ojo utilizando diluyente, de modo que no queden residuos que puedan ocasionar problemas en el próximo proceso que realice la máquina.

Se recomienda limpiar semanalmente el interior de los perfiles sobre los que se desplazan las ruedas del distribuidor móvil y sistema de avance radial, a fin de eliminar residuos de material o partículas que pudieran introducirse en ese tiempo y dificultar el libre movimiento de los carros, ocasionando sobrecarga en los motores.

En caso de desmontar o desarmar la máquina, al momento de rearmar es necesario comprobar la concentricidad y paralelismo de los ejes, para que las transmisiones queden alineadas y las bandas no se desplacen hacia los costados.

El sistema está programado para bobinar moldes de la mayor dimensión que puede realizar la máquina; para bobinar moldes de menor dimensión se debe disminuir en el código de programación la cantidad de pulsos del distribuidor móvil y el sistema de avance radial, o solamente del distribuidor móvil en caso de que se vaya a bobinar un cilindro sin tapas.

Se recomienda además dar mantenimiento y limpieza mensual a todos los sistemas que comprenden la máquina, con la finalidad de evitar el desgaste prematuro.

Los tanques de tapa toriesférica pueden ser bobinados hasta con 4 carretes de filamentos al mismo tiempo debido al diseño del eje de ojo; sin embargo, debido a que el modelo de contenedor de resina adquirido tiene capacidad de trabajo de hasta 20 carretes, al desmontar el eje de ojo es factible bobinar moldes cilíndricos sin tapa utilizando la máxima capacidad de carretes y disminuyendo el tiempo de bobinado.

Se recomienda utilizar guías lineales para el desplazamiento del distribuidor móvil y el eje radial, a fin de suavizar el movimiento y aumentar la velocidad de bobinado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Poveda, "Lecturas complementarias sobre materiales compuestos", [En línea]. 2010. Disponible en: http://ocw.upm.es/expresion-grafica-en-la-ingenieria/ingenieria-grafica-metodologias-de-diseno-para-proyectos/Teoria/LECTURA_COMPLEMENTARIA/MATERIALES/materialescompuestos.pdf. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [2] Optimist, "Arranjos em fibra, manual de uso de la fibra de vidrio", [En línea]. 2013. Disponible en: <https://www.yumpu.com/es/document/view/14809269/manual-para-uso-da-fibra-de-vidro-optimist>. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [3] ENTEC, "Filament Winding machines to fit every need", [En línea]. 2014. Disponible en: <http://www.entec.com/en-US/Filament-Winding/Custom/Custom-Filament-Winders.html>. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [4] VIDATEK, "Cantilever type Winding", [En línea]. 2016. Disponible en: <http://www.vidatek.com.cn/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=35>. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [5] CNC Technics, "4 Axes Filament Winding Machine", [En línea]. 2016. Disponible en: <http://www.cnctechnics.com/4-axes.html>. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [6] Adafruit Learning Systems, "All about stepper motors", [En línea]. 2015. Disponible en: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/all-about-stepper-motors.pdf>. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [7] WEG, "Motores de corriente continua", [En línea]. 2016. Disponible en: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-corriente-continua-50037241-catalogo-espanol.pdf>. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [8] SANMOTION, "DC servo systems", [En línea]. 2016. Disponible en: http://www.sanyodenki.eu/IMG/pdf/SANMOTION_T_Sytems_E_767-7.pdf. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [9] OMRON, "CP1H, el controlador compacto de máquinas más rápido", [En línea]. 2016. Disponible en: <https://industrial.omron.es/es/products/cp1h>. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].

- [10] Allen-Bradley, “Controladores ControlLogix 5580”, [En línea]. 2016. Disponible en: <http://ab.rockwellautomation.com/es/Programmable-Controllers/ControlLogix/5580-Controllers>. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [11] Siemens, “Kits de iniciación Simatic S7-1200”, [En línea]. 2016. Disponible en: <https://w5.siemens.com/spain/web/es/industry/automatizacion/simatic/Documents/S71200%20-%20Folleto0411.pdf>. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [12] Grupo CONDESA, “Catálogo de tubo estructural”, [En línea]. 2016. Disponible en: http://www.condesa.com/pdf/es/TUBO_ESTRUCTURAL_CASTV3.pdf. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [13] Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, “Filament Winding with increased efficiency”, [En línea]. 2008. Disponible en: http://www.storhy.net/pdf/FilamentWinding_Brussels_IVW.pdf. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [14] J. Salinas, “Diseño y construcción de una máquina para la elaboración de postes de Fibra de Vidrio Reforzada (F.V.R.)”, Proyecto de titulación, Col. Ciencias e Ing., Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador, 2014.
- [15] INTERMEC, “Transmisiones por correas dentadas de tiempo y sincrónicas”, [En línea]. 2016. Disponible en: http://lab.transmittec.com/wp-content/uploads/2014/06/manual_poleas_dentadas_intermec.pdf. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [16] LAPLACE, “Momento de inercia de sólidos esféricos”, [En línea]. 2016. Disponible en: http://laplace.us.es/wiki/index.php/Momento_de_inercia_de_s%C3%B3lidos_esf%C3%A9ricos. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [17] KOOM, “Transmisiones por cremallera-piñón”, [En línea]. 2016. Disponible en: <http://www.mecapedia.uji.es/catalogos/engranaje/spitkoom.1.pdf>. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [18] USON, “Coeficientes de fricción”, [En línea]. 2016. Disponible en: http://didactica.fisica.uson.mx/tablas/coefficients_of_friction.htm. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].

- [19] FAG, “Rodamientos FAG”, [En línea]. 2015. Disponible en: <http://www.baleromex.com/catalogos/C-FAG.pdf>. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [20] NSK, “Rodamientos LR”, [En línea]. 2015. Disponible en: <http://www.nskamericas.com/products-12.htm>. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [21] TecnonGroup, “Reductores de velocidad”, [En línea]. 2016. Disponible en: <http://www.tecnongroup.com/archivos/reductoresVelocidad.pdf>. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [22] UDP, “Factor de servicio, factor de seguridad y factor de diseño”, [En línea]. 2016. Disponible en: http://www.igm.mex.tl/images/5147/Factor%20de%20Seguridad_Servicio_Dise%C3%B1o.pdf. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [23] WEG, “Selección y aplicación de variadores de velocidad”, [En línea]. 2016. Disponible en: <http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-seleccion-y-aplicacion-de-variadores-de-velocidad-articulo-tecnico-espanol.pdf>. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [24] JVL, “High torque stepper motors MST51x up to 50Nm”, [En línea]. 2016. Disponible en: <http://www.jvl.dk/984/stepper-motor-high-torgue>. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [25] JVL, “High torque stepper motors MST43xxx2 up to 25Nm”, [En línea]. 2016. Disponible en: <http://www.jvl.dk/957/stepper-motors-mst43x>. [Último acceso: 1 de Agosto 2017].
- [26] Budynas y J. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 8va Ed, México D.F., México, McGraw Hill, 2008.
- [27] K. Ogatta, *Ingeniería de control moderna, 5ta Ed, Madrid, España, Pearson, 2010*.
- [28] M. Gómez, Y. Mayáns y O. Jiménez, “Perfeccionamiento del diseño de una máquina bobinadora de materiales para la fabricación de mangueras”, *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol 24, no. 3, pp. 58-62, 2015.
- [29] S. Mutasher, N. Mir-Nasiri y L. Chai Lin, “Small scale filament winding machine for producing fiber composite products”, *Journal of Engineering, Science and Technology of Taylor’s University*, vol. 7, no. 2, pp. 156-168, 2012.

- [30] D. Agostinelli, "Diseño de una máquina bobinadora de hilos de fibra de vidrio para la incorporación de capacidad CNC", Proyecto de titulación, Coord. Ing. Mecánica Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, 2008.