

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA LA MANUFACTURA DE  
PROTOTIPOS DE ÁRBOLES DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA FABRICADOS  
CON FIBRAS DE CARBONO

BENJI MARINO JAIMES JERÉZ  
FREDY ALEXÁNDER BOHÓRQUEZ MARTÍNEZ  
JUAN SEBASTIÁN FONTECHA MONCADA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2018

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA LA MANUFACTURA DE  
PROTOTIPOS DE ÁRBOLES DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA FABRICADOS  
CON FIBRAS DE CARBONO

BENJI MARINO JAIMES JERÉZ  
FREDY ALEXÁNDER BOHÓRQUEZ MARTÍNEZ  
JUAN SEBASTIÁN FONTECHA MONCADA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director  
Heller Guillermo Sánchez Acevedo  
PhD. Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA

2018

## DEDICATORIA

*A Dios todopoderoso por dotarme de fortaleza, sabiduría y persistencia para enfrentar y superar etapas durante todo mi proceso académico y permitirme culminar este proyecto.*

*A mis padres Gloria Jerez Pedraza y Marino Jaimes Alvarado a quienes debo todo lo que soy, por brindarme su confianza, sus consejos, su ejemplo de perseverancia y su apoyo incondicional durante estos años.*

*A mis hermanos, Oliver Jaimes Jerez y Angélica Jaimes Jerez, familiares y amigos que estuvieron pendientes de este proyecto, me brindaron motivación, comprensión y apoyo para seguir adelante.*

**Benji Marino Jaimes Jerez**

## DEDICATORIA

*A Dios todopoderoso, por darme sabiduría, fortaleza y perseverancia en cada uno de los momentos de mi vida.*

*A mis padres, Alba Lilia y Arnulfo, por sus consejos y apoyo incondicional en cada de las etapas de mi formación profesional.*

*A mis hermanos, Lilian Andrea y Arnold Eduardo, por su constante aliento.*

*A mis sobrinos, Marian Valeria, Matías y Evelyn Gabriela, quienes se han convertido en una gran motivación para mí.*

*A mis abuelitas, Sara y Aurora por tenerme siempre presente en sus oraciones.*

*A mi abuelito Eduardo, mi ángel en el cielo, quien de seguro estará muy orgulloso de mí.*

*Y a todos y cada una de las personas que influyeron de una u otra manera para que este sueño se convirtiera en realidad.*

**Juan Sebastián Fontecha Moncada**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al profesor Heller Guillermo Sánchez Acevedo, por su apoyo y orientación durante el desarrollo de este proyecto de grado.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por compartir sus conocimientos durante nuestro proceso de formación.

Al Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA, por el apoyo económico brindado a través del Sistema de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación – SENNOVA, perteneciente al programa Red Tecnoparque Colombia – Nodo Manizales.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	23
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	24
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	24
1.2. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	25
2. OBJETIVOS	26
2.1. OBJETIVO GENERAL	26
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
3. MARCO REFERENCIAL	27
3.1. TRANSMISIÓN DE POTENCIA MECÁNICA	27
3.1.1. Ejes y árboles de transmisión de potencia	28
3.2. FILAMENT WINDING	32
3.3. MATERIALES COMPUESTOS	36
3.3.1. Fibra de carbono	38
3.3.2. Resina epoxi	40
4. DISEÑO CONCEPTUAL	42
4.1. DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD (QFD)	42
4.1.1. Requerimientos del consumidor	42
4.1.2. Organización de requerimientos	43
4.2. MATRIZ DE CALIDAD	43

4.3. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS	44
4.3.1. Alternativa A – Sistema de desplazamiento lineal mediante tornillo sin fin con guías cilíndricas	45
4.3.2. Alternativa B – Sistema de desplazamiento lineal mediante tornillo sin fin guiado mediante un perfil de cola de milano	47
4.3.3. Alternativa C – Sistema de desplazamiento lineal por correa tipo impresora, montaje entre mandriles y estructura de aluminio	48
4.4. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS	50
4.5. ESPECIFICACIÓN DE LA ALTERNATIVA GANADORA	51
5. DISEÑO EN DETALLE	52
5.1. SISTEMAS DE LA MÁQUINA	52
5.1.1. Identificación y descripción de los sistemas	52
5.2. SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA	54
5.2.1. Criterios de selección de un motor paso a paso	55
5.2.2. Cálculo de la velocidad máxima de pulsos	57
5.2.3. Cálculo del par requerido para el sistema de alimentación de la fibra	59
5.2.5. Selección de la transmisión de potencia para los motores	64
5.3. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE LA FIBRA	66
5.3.1. Selección del perfil de aluminio para el bastidor del sistema de tensión de la fibra	67
5.3.2. Selección y análisis del sistema de guías del carro porta fibra	69
5.3.3. Subsistema de tensión y bañera para la resina termoestable	70
5.3.4. Soporte estructural móvil del sistema de alimentación de la fibra	75
5.4. SISTEMA DE SUJECIÓN DE LA MATRIZ	77

5.4.1.	Diseño del eje del sistema de sujeción de la matriz	78
5.4.2.	Selección de los cojinetes de deslizamiento	84
5.4.3.	Selección de las arandelas y los collarines de los ejes	86
5.4.4.	Selección de los mandriles	88
5.5.	SISTEMA ELÉCTRICO Y DE CONTROL	88
5.5.1.	Diseño conceptual del sistema de control	89
5.5.2.	Características de los componentes del sistema de control	90
5.5.3.	Diseño en detalle para el sistema de control	96
5.5.4.	Algoritmo del sistema de control	98
5.5.5.	Plano de conexiones eléctricas y electrónicas	99
5.5.6.	Software del sistema de control	101
5.5.7.	Interfaz Hombre – Máquina (HMI)	101
5.6.	SISTEMA ESTRUCTURAL	104
5.6.1.	Estructura base del sistema de alimentación de la fibra	105
5.6.2.	Soporte estructural	107
6.	CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA	108
6.1.	MECANIZADO DE LOS PERFILES Y LÁMINAS DE ALUMINIO	108
6.2.	ENSAMBLE DE LOS PERFILES Y LÁMINAS DE ALUMINIO	110
7.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA	114
7.1.	MODIFICACIÓN Y SUSTITUCIÓN DE ELEMENTOS	114
7.1.1.	Rodillos de tensión de la fibra y bañera para la resina termoestable	114
7.1.2.	Bujes del carro portafibra	116
7.1.3.	Ojal o dispensador de fibra	117

7.2. CONSUMO DE MATERIAL	118
7.2.1. Cálculo del número de capas de fibra de carbono	119
7.2.2. Orientación de la fibra	120
7.2.3. Cálculo de la cantidad de fibra	120
7.2.4. Cálculo de la cantidad de resina y catalizador	122
7.3. DISEÑO DEL BOBINADO	123
7.4. CONSTRUCCIÓN DE LOS PROTOTIPOS	123
8. ANÁLISIS DE COSTOS Y VIABILIDAD DEL PROYECTO	125
8.1. COSTOS GENERALES	125
8.2. COSTOS DETALLADOS DE LOS SISTEMAS QUE COMPONEN LA MÁQUINA	126
8.3. VIABILIDAD DEL PROYECTO	129
8.3.1. Flujo de caja	129
8.3.2. Valor presente neto (VPN) y relación beneficio/costo (RB/c)	135
8.3.3. Reembolso sobre la inversión (PayBack)	137
9. CONCLUSIONES	138
BIBLIOGRAFÍA	140

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tracción trasera y doble tracción	24
Figura 2. Sistema de transmisión de potencia de un vehículo	29
Figura 3. Denominación, composición y características mecánicas de los aceros comúnmente empleados en la fabricación de ejes y árboles	30
Figura 4. Árbol de transmisión metálico	31
Figura 5. Esquema del Renault Espace Quadra	32
Figura 6. Eje de transmisión de Dan Gurney en 1987	34
Figura 7. Componentes de una máquina filament winding horizontal	34
Figura 8. Máquina de filament winding con seis ejes	35
Figura 9. Piezas construidas usando la técnica filament winding (toroide, recipiente a presión y estructura entrelazada)	35
Figura 10. Formación de un material compuesto mediante fibras y resina	36
Figura 11. Comparación de las características específicas de diferentes fibras	38
Figura 12. Matriz de calidad	44
Figura 13. Sistema de desplazamiento lineal mediante tornillo sin fin con guías cilíndricas	45
Figura 14. Sistema de transmisión de potencia por poleas y correas	46
Figura 15. Sistema de desplazamiento lineal mediante tornillo sin fin guiado mediante un perfil de cola de milano	47
Figura 16. Sistema de desplazamiento lineal por correa tipo impresora	49
Figura 17. Sistemas que componen la máquina	53
Figura 18. Sistema de transmisión de potencia	54
Figura 19. Dimensiones de los motores paso a paso NEMA	56
Figura 20. Representación geométrica de las velocidades presentes en la máquina	57
Figura 21. Propiedades de físicas del carro portafibra según SolidWorks	59
Figura 22. Propiedades físicas de la polea sincrónica según SolidWorks	60

Figura 23. Diagrama de cuerpo libre del sistema de alimentación de la fibra	60
Figura 24. Especificaciones del motor NEMA KL34H260-35-4A	62
Figura 25. Gráfica de torque vs rpm, para un motor paso a paso KLH34260-35-4A	63
Figura 26. Diagrama de cuerpo libre del sistema de sujeción de la matriz	64
Figura 27. Perfiles de las correas dentadas	65
Figura 28. Sistema de alimentación de la fibra	67
Figura 29. Perfil de aluminio tipo hepco	68
Figura 30. Carro portafibra	70
Figura 31. Subsistema de tensión e impregnación de la fibra	71
Figura 32. Conos para acoplamiento del rollo de fibra	72
Figura 33. Diagrama de cuerpo libre del subsistema de tensión de la fibra	73
Figura 34. Soporte estructural del sistema de alimentación de la fibra	75
Figura 35. Sistema de sujeción de la matriz	78
Figura 36. Diseño conceptual del eje	79
Figura 37. Diagrama de cuerpo libre de la matriz	79
Figura 38. Diagrama de cuerpo libre del eje	80
Figura 39. Diagrama de cuerpo libre, fuerzas cortantes y momentos flectores del eje	82
Figura 40. Características y selección del cojinete de bronce sinterizado con pestaña	86
Figura 41. Arandela de nylon 6.6 natural estándar DIN 125	87
Figura 42. Collarín de eje MSC-12-SS	87
Figura 43. Selección del mandril DC7-16-1/2	88
Figura 44. Sistema de control de lazo cerrado	90
Figura 45. Arduino MEGA 2560	91
Figura 46. Display LCD 20x4	92
Figura 47. Teclado matricial 4x4	92
Figura 48. Final de carrera	93
Figura 49. Fuente de voltaje 60V – 20A	94

Figura 50. Driver DM860A	95
Figura 51. Motor paso a paso NEMA 34	96
Figura 52. Diagrama de flujo del sistema de control	98
Figura 53. Prueba piloto de las conexiones electrónicas y eléctricas	99
Figura 54. Diseño de la tarjeta electrónica PCB	99
Figura 55. Tarjeta electrónica PCB	100
Figura 56. Disposición del sistema de control de la máquina	100
Figura 57. Vista general de la máquina	102
Figura 58. Tablero de interacción	103
Figura 59. Estructura base del sistema de alimentación de la fibra	106
Figura 60. Soporte estructural	107
Figura 61. Fragmento del plano de uno de los perfiles de aluminio de sección cuadrada	109
Figura 62. Fragmento del plano de un perfil tipo hepco y de una lámina de aluminio	110
Figura 63. Uniones para el soporte estructural	110
Figura 64. Procedimiento para el ensamble de la perfilería tipo hepco	111
Figura 65. Vista detallada y ensamble real de uno de los sistemas de transmisión de potencia	112
Figura 66. Vista detallada y ensamble real del sistema de alimentación de la fibra	112
Figura 67. Vista detallada y ensamble real del sistema de transmisión de potencia secundario	113
Figura 68. Producto final	113
Figura 69. Rodillo tensor de fibra con (derecha) y sin (izquierda) ranura	115
Figura 70. Bañera de la resina termoestable, antes (derecha) y después (izquierda) de su cambio	116
Figura 71. Bujes temporales (izquierda) y bujes permanentes (derecha)	117
Figura 72. Ojal antes (izquierda) y después (derecha) de su modificación	118
Figura 73. Aspectos geométricos para determinar la longitud de la fibra	121

Figura 74. Volumen de la fibra a utilizar	122
Figura 75. Diseño del bobinado	123
Figura 76. Primeros prototipos construidos en la máquina	124

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Funciones de las fibras y la matriz en un material compuesto	37
Tabla 2. Propiedades de diferentes fibras de carbono provenientes de PAN	40
Tabla 3. Propiedades de las resinas epoxi más utilizadas	41
Tabla 4. Ponderación de factores	50
Tabla 5. Matriz de ponderación	51
Tabla 6. Flujo de cálculo del subsistema de tensión de la fibra	73
Tabla 7. Propiedades del perfil de aluminio tipo hepc	76
Tabla 8. Cálculo del desplazamiento vertical y el esfuerzo de flexión del perfil	76
Tabla 9. Diseño del eje	82
Tabla 10. Cálculos para la selección del cojinete de deslizamiento	85
Tabla 11. Especificaciones eléctricas del driver DM860A	95
Tabla 12. Propiedades del perfil de aluminio tipo hepc 3"x1"	106
Tabla 13. Especificaciones geométricas del prototipo	119
Tabla 14. Propósitos de la orientación de la fibra	120
Tabla 15. Ejemplo de cálculo de la cantidad de fibra necesaria en cada capa para diferentes configuraciones de disposición de la misma	121
Tabla 16. Costo general de la máquina	125
Tabla 17. Costo total del sistema estructural	126
Tabla 18. Costo total del sistema de transmisión de potencia	127
Tabla 19. Costo total del sistema de alimentación de la fibra	127
Tabla 20. Costo total del sistema de sujeción de la matriz	127
Tabla 21. Costo total del sistema eléctrico y de control	128
Tabla 22. Costo total de la manufactura de la máquina	128
Tabla 23. Costo total del diseño de la máquina	128
Tabla 24. Otros costos	129
Tabla 25. Flujo de caja previsto a 5 años	130
Tabla 26. Costos de fabricación de los prototipos de los árboles de transmisión	131

Tabla 27. Proporción de la fibra de carbono y resina para el árbol de transmisión	132
Tabla 28. Costo por unidad de los materiales para el prototipo	133
Tabla 29. Precio de los materiales por unidad fabricada	133
Tabla 30. Precio de los materiales del molde por cada prototipo	134
Tabla 31. Precio del costo energético por árbol de transmisión	134
Tabla 32. Precio de los costos operacionales por árbol de transmisión	135
Tabla 33. Valor presente neto (VPN)	136
Tabla 34. PayBack	137

## LISTA DE ANEXOS

**(Ver anexos en el CD adjunto)**

Anexo A. Planos de la máquina.

Anexo B. Manual de operación.

Anexo C. Datasheets de los componentes electrónicos.

Anexo D. Plano de conexiones eléctricas y electrónicas.

Anexo E. Código Arduino.

Anexo F. Videos de la máquina.

Anexo G. Escalado de un eje comercial.

Anexo H. Análisis de costos.

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA LA MANUFACTURA DE PROTOTIPOS DE ÁRBOLES DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA FABRICADOS CON FIBRAS DE CARBONO\*

**AUTORES:** BENJI MARINO JAIMES JERÉZ\*\*  
FREDY ALEXÁNDER BOHÓRQUEZ MARTÍNEZ\*\*  
JUAN SEBASTIÁN FONTECHA MONCADA\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Bobinado de filamentos, Árboles de transmisión de potencia, Fibra de carbono

### DESCRIPCIÓN:

La implementación de materiales compuestos como reemplazo de los convencionales en la industria automotriz, ha impulsado el desarrollo de nuevas máquinas que permitan la fabricación de las autopartes, sin causar alguna clase de alteración en las propiedades mecánicas del material empleado.

El proyecto ejecutado, consistió en diseñar y construir una máquina para la manufactura de prototipos de árboles de transmisión de potencia, fabricados a partir de fibras de carbono, mediante la implementación de un sistema de control, con el fin de obtener, gran variedad de productos a través de la modificación de los parámetros para su elaboración. La metodología de diseño parte de la recopilación de información, con el propósito de tener los conceptos claros para la realización de un diseño conceptual. Habiendo definido los requerimientos del proyecto, se procede a detallar y/o seleccionar cada uno de los componentes del sistema para su posterior construcción. Seguidamente, se realizan pruebas de funcionamiento, se pone a punto la máquina y se da inicio a la manufactura de los diferentes prototipos, teniendo en cuenta la variación de los parámetros de fabricación.

Finalmente, se efectúa un análisis de costos, con el objetivo de evaluar los resultados del proyecto y su viabilidad en el sector automotriz.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Heller Guillermo Sánchez Acevedo, PhD. Ingeniería Mecánica.

## ABSTRACT

**TITLE:** DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA PARA LA MANUFACTURA DE PROTOTIPOS DE ÁRBOLES DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA FABRICADOS CON FIBRAS DE CARBONO\*

**AUTHORS:** BENJI MARINO JAIMES JERÉZ\*\*  
FREDY ALEXÁNDER BOHÓRQUEZ MARTÍNEZ\*\*  
JUAN SEBASTIÁN FONTECHA MONCADA\*\*

**KEYWORDS:** Filament winding, Power transmission shafts, Carbon fiber

### DESCRIPTION:

The implementation of composite materials as a replacement for conventional in the automotive industry, has driven the development of new machines that allow the manufacture of auto parts, without causing any kind of alteration in the mechanical properties of the material used.

The executed project, consisted of designing and building a machine for the manufacture of power transmission shaft prototypes, manufactured from carbon fibers, through the implementation of a control system, in order to obtain a great variety of products through the modification of the parameters for its elaboration. The design methodology starts from the collection of information, with the purpose of having clear concepts for the realization of a conceptual design. Having defined the requirements of the project, we proceed to detail and / or select each one of the components of the system for its later construction. Next, performance tests are performed, the machine is set up and the manufacturing of the different prototypes is started, taking into account the variation of manufacturing parameters.

Finally, a cost analysis is carried out, with the objective of evaluating the results of the project and its viability in the automotive sector.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Physicomechanical Faculty of Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Heller Guillermo Sánchez Acevedo, PhD. Mechanical Engineering.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los problemas de ingeniería son cada vez más exigentes. Es aquí, donde se hace necesario el uso de nuevas alternativas para encontrar una solución efectiva; la implementación de nuevos materiales, puede ser una de ellas.

Los materiales compuestos surgieron como una nueva opción para remplazar a los convencionales en sus diferentes campos de aplicación: automoción, industria aeronáutica, medicina, etc. Sus excelentes propiedades, hacen que atraigan la atención de muchos sectores industriales, lo cual conlleva, a que poco a poco se vayan consolidando cada vez más.

La fabricación de productos y piezas mecánicas elaboradas con materiales compuestos, implica el uso de diversas tecnologías. Una de ellas es la de filament winding o enrollamiento de filamentos, mediante la cual se obtienen piezas huecas de diferentes geometrías. En Colombia, se emplea para la fabricación de postes de alumbrado y energía eléctrica, recipientes de alta presión y tanques de gran volumen.

Uno de los sectores más convenientes para la incorporación de nuevas técnicas de fabricación es el de autopartes, ya que, desde sus inicios, la gran mayoría de piezas que componen un automóvil han sido fabricadas de materiales metálicos, lo cual indica la falta de estudios, que permitan la inclusión de nuevos materiales en sus procesos de manufactura.

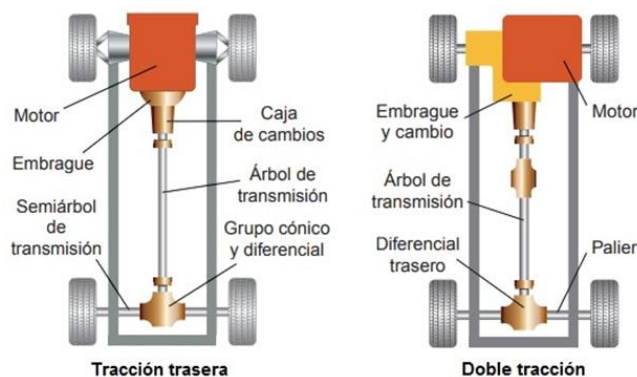
A partir de las necesidades del sector automotriz, se planteó este proyecto, con el fin de ofrecer una alternativa de investigación sobre la factibilidad de construir árboles de transmisión de potencia con fibras de carbono, mediante la implementación de la técnica filament winding.

# 1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

## 1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En los vehículos con tracción trasera (motor delantero longitudinal y propulsión trasera) y con doble tracción (Figura 1), se hace necesaria la utilización de árboles de transmisión para realizar la conexión entre la caja de cambios y el diferencial, y cuya función principal es la de transmitir el par motor, mediante su giro.

Figura 1. Tracción trasera y doble tracción.



Fuente: LA TRANSMISIÓN EN LOS VEHÍCULOS. [En línea]. [Consultado el 20 de octubre de 2017]. Disponible en: [http://www.editexebooks.es/AdjuntosLibros/Sist\\_Transm-Frenado\\_Ud01.pdf](http://www.editexebooks.es/AdjuntosLibros/Sist_Transm-Frenado_Ud01.pdf)

El árbol de transmisión es un tubo liviano hueco hecho de acero al carbono de gran resistencia a la torsión y con capacidad de soportar oscilaciones variables alrededor de su centro fijo de rotación. Los árboles tienden a vibrar excesivamente cuando giran a velocidades críticas. Para reducir estas vibraciones, se hace necesaria fragmentación del árbol, cuyos segmentos se unen mediante juntas, lo cual implica un aumento en el peso del vehículo y por ende mayor consumo de combustible.

El acero empleado para la construcción de los árboles, es uno de los factores más influyentes para realizar la segmentación del componente mecánico debido a su baja rigidez específica, cuya propiedad está directamente relacionada con las frecuencias naturales de oscilación.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA**

La falta de apropiación o generación de nuevas tecnologías, reflejada en la industria colombiana, que permitan mejorar la competitividad de las empresas, repercuten en el desarrollo del sector automotriz y en la implementación de nuevos elementos mecánicos, que contribuyen con mejoras sustanciales en el rendimiento de los vehículos y garantizan el cumplimiento de las políticas de reducción de costos, manteniendo la calidad de los productos ofrecidos, en la industria de autopartes.

En una máquina que requiere árboles de transmisión de potencia, la reducción de peso por medio del uso de materiales alternativos, que ofrecen alta resistencia mecánica y se adecúan eficientemente a los múltiples requerimientos de diseño, como lo son las fibras de carbono mediante el empleo de tecnologías avanzadas, permiten que industrias como la de autopartes, se vinculen al escenario competitivo internacional.

En la industria de autopartes colombiana no se tiene registro de empresas que realicen estudios enfocados en el mejoramiento de las propiedades de este elemento mecánico (árbol de transmisión de potencia), los cuales impulsen el crecimiento industrial y comercial del sector automotriz mediante la incursión de nuevas tecnologías. En este sentido, el diseño y construcción de una máquina para la fabricación de árboles de transmisión de potencia mediante la técnica “Filament Winding” se ha convertido en la principal alternativa de solución para la implementación de nuevas tecnologías en la industria colombiana de autopartes.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir una máquina para la manufactura de prototipos de árboles de transmisión de potencia, fabricados con fibras de carbono, mediante la implementación de la técnica “Filament Winding”.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar una máquina para la fabricación de árboles con fibras de carbono a través de la técnica “Filament Winding”, que cumpla con las siguientes características:
  - a. Los rangos para la longitud y el diámetro interno de los árboles construidos deben ser: 0,3 m a 1,2 m y 1 a 3,5 pulgadas, respectivamente.
  - b. El espesor y por ende el diámetro externo del árbol, dependerá de la cantidad de pasadas que se realicen sobre la matriz.
  - c. El ángulo para la disposición de las fibras debe estar contemplado entre 0 y 60°.
- Construir una máquina para el proceso de enrollado de fibras, incorporando una plataforma de prototipos electrónicos de código abierto (Arduino) y usando sensores de proximidad.
- Desarrollar una interfaz (HMI) para el funcionamiento semiautomático de la máquina.
- Elaborar un manual de operación y mantenimiento de la máquina.
- Evaluar la viabilidad para la implementación de la máquina en la manufactura de autopartes en el país.

### 3. MARCO REFERENCIAL

Entendiendo el marco referencial como la recopilación de la información consultada en la cual se basa el estudio de un objeto en particular, se incluye en este proyecto de grado, haciendo énfasis en los árboles de transmisión de potencia, tecnología filament winding y materiales compuestos (fibras de carbono), facilitando en cierta manera, el diseño y la construcción de una máquina capaz de llevar a cabo la manufactura de prototipos de árboles de transmisión de potencia en fibra de carbono.

#### 3.1. TRANSMISIÓN DE POTENCIA MECÁNICA

Como escribió Thomas Tredgold [Florman (1987)], acerca de la ingeniería: “es el arte de dirigir las vastas fuentes de poder de la naturaleza para el uso y conveniencia del hombre”<sup>1</sup>, es una buena definición de lo que es esta ciencia y lo que nos compete como profesionales, en este caso: la transmisión de potencia producida en el motor a las llantas traseras o delanteras del vehículo según sea el caso.

En los primeros vehículos que se crearon, dicha transmisión se hacía por medio de cadenas o correas, lo cual era muy ineficiente debido a su difícil mantenibilidad y poca precisión en su funcionamiento. En 1908 la fábrica alemana de vehículos Mercedes Benz, empezó a usar ejes para transmitir el par generado en el motor a las ruedas; desde ese momento a la actualidad, se han presentado notables mejorías en la eficiencia para transmitir dicho par<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> HAMROCK, Bernard J.; JACOBSON, Bo O. y SCHMID, Steven R. Elementos de máquinas. México D. F.: McGraw-Hill, 2000. p. 3.

<sup>2</sup> ARANGUREN, Ángel. El cardán, su historia, componentes y su función. [En línea]. Motor y Racing. 2018. (Recuperado en 10 agosto 2018.) Disponible en <https://www.motoryracing.com/coches/noticias/el-cardan-su-historia-componentes-y-su-funcion/>

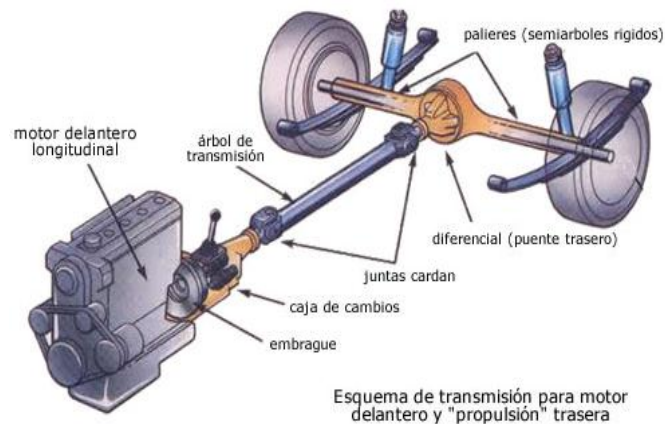
**3.1.1. Ejes y árboles de transmisión de potencia.** Un eje es un componente de muy frecuente uso en dispositivos mecánicos que transmiten movimientos de giro y potencia<sup>3</sup>, este puede ser estudiado dependiendo de las cargas que actúan sobre él y su forma geométrica (redondo, rectangular, macizo o hueco). Teniendo este espectro tan grande de lo que es un eje, el estudio en esta tesis se centra en los ejes de transmisión de potencia usados en la mayoría de vehículos comerciales, los cuales tienen como principales características: ser huecos, estar sometidos a grandes esfuerzos de torsión y ser utilizados para transmitir la potencia de giro que proviene de un motor.

Como se puede apreciar en la figura 2, un sistema de transmisión de potencia por lo general se compone de: un embrague que se encarga de hacer posible la transmisión del movimiento que proviene del motor, una caja de cambios que es la encargada de variar la velocidad y la potencia según los requerimientos exigidos por el vehículo, dos juntas cardán que mantienen el giro del motor a pesar de la diferencia de altura entre el éste y las ruedas a las que se va a transmitir el movimiento, un árbol de transmisión que une las dos juntas cardán y del cual se fabricará el prototipo en la máquina, y un diferencial cuya función es la de trasladar el movimiento de rotación que proviene del motor a los palieres o semiárboles.

---

<sup>3</sup> CORTIZO RODRÍGUEZ, José L., *et al.* Elementos de máquinas: teoría y problemas. Oviedo: Universidad de Oviedo, 2004. p. 1.

Figura 2. Sistema de transmisión de potencia de un vehículo.



Fuente: EL DIFERENCIAL. [En línea]. [Consultado el 10 de agosto de 2018]. Disponible en: <http://fierrosclasicos.com/el-diferencial/>

Entendiendo la ubicación y funcionamiento del árbol de transmisión dentro del sistema, se procede a estudiar el diseño actual de este componente.

Un árbol de transmisión de potencia por lo general se fabrica mediante la utilización de un torno, donde a través de un proceso de remoción de material por arranque de viruta, se mecaniza un eje macizo de acero hasta obtener la forma deseada.

A continuación, se presenta una tabla con los diferentes tamaños y materiales usados en la fabricación de árboles de transmisión.

Figura 3. Denominación, composición y características mecánicas de los aceros comúnmente empleados en la fabricación de ejes y árboles.

Tipos de Aceros	DIN	UNE	AISI	% C	% Otros	Resistencia a la flexión alternativa / pulsatoria [N/mm <sup>2</sup> ]		Resistencia a la torsión alternativa / pulsatoria [N/mm <sup>2</sup> ]		Limite elástico [N/mm <sup>2</sup> ]	Carga de Rotura [N/mm <sup>2</sup> ]	Dureza Vickers mínima - HV (endurecible hasta)
						$\sigma_{yw}$	$\sigma_{Sch}$	$\tau_{yw}$	$\tau_{Sch}$			
<b>Aceros de construcción</b>												
	St 42-2	Fe430	1020	0,25		220	360	150	180	250	420 - 500	115
	St 50-2	BFN	A570Gr.50	0,30		260	420	180	210	290	500 - 600	(450)
	St 60-2	Fe490-2FN	A572Gr.65			300	470	210	230	330	600 - 720	135 (530)
	St 70-2	Fe590-2FN - Fe690-2FN	-			340	520	240	260	360	700 - 850	165 (720) 190
				0,50								
<b>Aceros al carbono</b>												
	C 22,Ck 22	F-1120	1020	0,2		280	490	190	250	290	500 - 650	150
	C 35,Ck 35	F-1130	1035	0,35		330	550	230	300	360	590 - 740	140 (530)
	C 45,Ck 45	F-1140	1045	0,45		370	630	260	340	390	670 - 820	170 (720)
<b>Aceros aleados de gran resistencia</b>												
	25CrMo4	F-1256	4130	0,2	1,1 Cr 0,2 Mo	430	730	300	450	540	800 - 950	186 (610)
<b>Aceros moldeados de baja aleación resistentes a la abrasión</b>												
	34Cr4	F-8221	5132	0,3	1,1 Cr	480	810	330	550	640	900 - 1100	229 (670)
<b>Aceros de cementación</b>												
	C 15,Ck 15 16MnCr5	F-1511 F-1516	1015 5115	0,1 0,16	0,95 Cr	260 390	420 670	180 270	210 430	290 590	500 - 650 800 - 1100	140 (840) 210 (840)

Fuente: CORTIZO RODRÍGUEZ, José L., *et al.* Elementos de máquinas: teoría y problemas. Oviedo: Universidad de Oviedo, 2004. p. 25.

Como se puede observar en la tabla, el acero es el principal material para la fabricación de árboles de transmisión; este presenta algunas desventajas en comparación con las fibras de carbono:

- Tiene una densidad de aproximadamente 7860 Kg/m<sup>3</sup>, la cual es alta en comparación con las fibras de carbono usadas en la manufactura de árboles de transmisión, cuya densidad es de 1600 Kg/m<sup>3</sup>.
- La construcción de un árbol de transmisión en acero, en un 70% de los casos se hace con la unión de dos semiejes por medio de un cojinete central<sup>4</sup> (figura 4), lo cual representa un aumento en el peso del vehículo,

<sup>4</sup> POLLARD, Andrew. Polymer matrix composites in driveline applications. Conference: 3rd International Conference on Materials for Lean Weight Vehicles, At Warwick, November 1999. p. 2.

bajo rendimiento en la transmisión del par y por consiguiente alto consumo energético.

- Los materiales compuestos presentan alta resistencia y rigidez específica, lo que permite eliminar la utilización del cojinete.

Figura 4. Árbol de transmisión metálico.



Fuente: WANG, Shengyu. Uso de materiales compuestos en el diseño de un árbol de transmisión. Proyecto fin de carrera. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, 2014, p. 5.

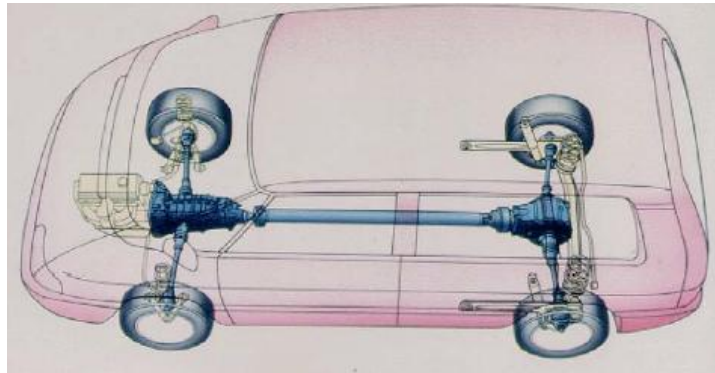
Teniendo en cuenta las desventajas mencionadas anteriormente y un informe realizado por los investigadores de la Universidad de Jaume I en Castellón de la Plana en España: si se reduce en 100 kg el peso de un vehículo es posible obtener entre un 0,12 y 0,15 litros de consumo de combustible por cada 100 km de conducción dependiendo del tipo de motor. De igual manera si se reduce el 20% del peso del vehículo, se podría disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> un 0,5 Ton/año para conducción en ciudades; estos datos sitúan a las fibras de carbono como un posible reemplazante del acero en la manufactura de árboles de transmisión.

Empresas como GKN Technology, teniendo en cuenta las ventajas del uso de la fibra de carbono en la construcción de árboles de transmisión, se han encargado de elaborarlos desde 1988, innovando en su fabricación al manufacturarlos en una sola pieza, con el fin de eliminar el uso del cojinete de unión y disminuir el peso de

un árbol de transmisión de acero, el cual es de 10 kg a uno de apenas 2,7 kg, reduciéndolo en un 62% aproximadamente.

En la actualidad, varios modelos de coches ya cuentan con un árbol de transmisión fabricado con materiales compuestos, como el Renault Espace Quadra, el Toyota Mark I o el Audi A4/A8 Quattro<sup>5</sup>.

Figura 5. Esquema del Renault Espace Quadra.



Fuente: POLLARD, Andrew. Polymer matrix composites in driveline applications. Conference: 3rd International Conference on Materials for Lean Weight Vehicles, At Warwick, November 1999. p. 3.

### 3.2. FILAMENT WINDING <sup>6</sup>

Es una técnica de manufactura utilizada principalmente para la fabricación de estructuras abiertas (cilindros) o de extremos cerrados (recipientes a presión o tanques). Este proceso implica enrollar filamentos bajo tensión sobre un mandril giratorio. Estos filamentos o fibras han sido previamente impregnados con una resina que servirá de matriz, al finalizar el proceso de enrollado se obtiene el espesor deseado en la pieza, para posteriormente hacer un curado que dependerá del tipo de resina usado. Después del curado, en el caso de los ejes, el mandril es

---

<sup>5</sup> *Ibíd.*, p. 4-5.

<sup>6</sup> PETERS, Stan T. Composite Filament Winding. Ohio: ASM International, 2011. 167 p.

retirado obteniendo así una pieza hueca; en otros casos como los recipientes a presión, el mandril queda de forma permanente en la pieza, sirviendo como revestimiento para evitar fugas del contenido del recipiente.

La evolución de las máquinas que emplean esta técnica, han presentado un completo desarrollo desde su invención, cerca del año 1940 por Richard E. Young. La máquina creada por Young, era controlada por engranajes y cadenas, usaba hilo de fibra de vidrio como materia prima para el proceso y se empleó principalmente, en el desarrollo de nuevas tecnologías para los cohetes en los Estados Unidos.

A pesar del tiempo y la difícil operación que representaba su uso, las primeras máquinas se mantuvieron realizando dicho proceso por cerca de 50 años, hasta el auge de la producción de recipientes de presión para gas propano en los noventa, lo que llevó a la fabricación de tanques de fibra de vidrio a convertirse en un proceso automatizado de producción continua con una intervención mínima por parte del operario.

No obstante, al ser los recipientes de presión de fibra de vidrio su principal aplicación, en 1987 Dan Gurney, ingeniero y piloto automovilístico, implementó un eje de transmisión de potencia de grafito (figura 6) en su vehículo, el cual le favoreció en la consecución del campeonato de GTO del mismo año. El equipo de trabajo de Gurney demostró que con la implementación del eje lograba una velocidad 12% más alta en cada marcha; la razón principal de este aumento en la velocidad parece ser la reducción de las vibraciones por la utilización del grafito.

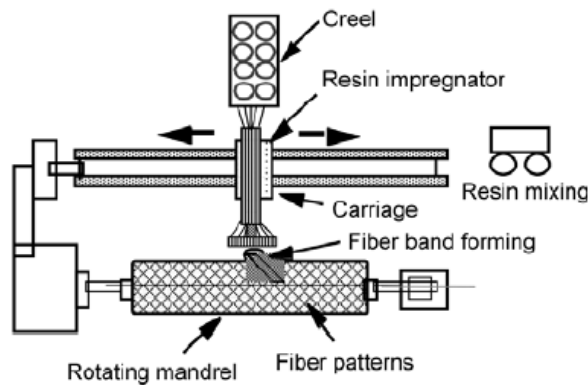
Figura 6. Eje de transmisión de Dan Gurney en 1987.



Fuente: PETERS, Stan T. Composite Filament Winding. Ohio: ASM International, 2011. p. 88.

El avance en la tecnología filament winding, ha permitido establecer unos componentes mínimos o esenciales presentes en las máquinas que trabajan con esta técnica, como se puede apreciar en la siguiente imagen.

Figura 7. Componentes de una máquina filament winding horizontal.

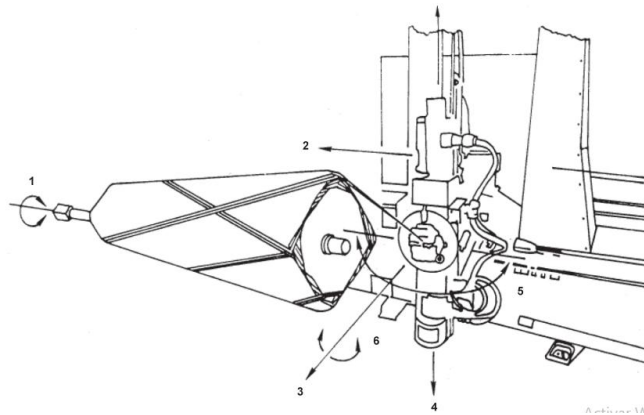


Fuente: PETERS, Stan T. Composite Filament Winding. Ohio: ASM International, 2011. p. 65.

Actualmente, las máquinas que se emplean para desarrollar este proceso, cuentan con gran variedad en su número de ejes de operación, los cuales pueden ir desde

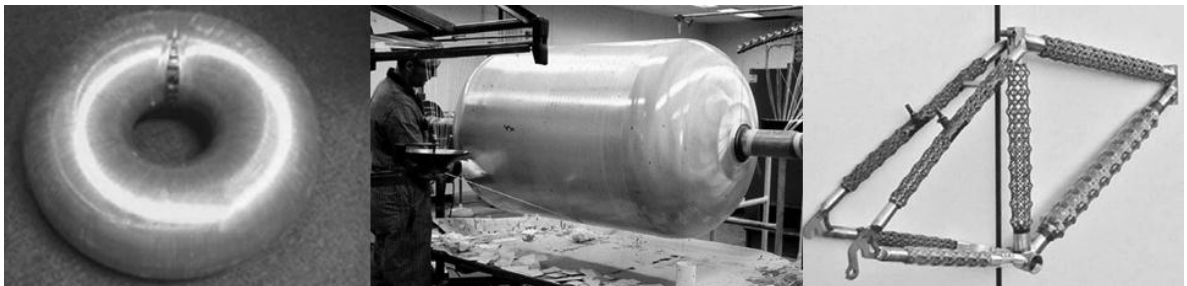
dos hasta seis ejes, como se muestra en la figura 7; esta característica permite la construcción de piezas más complejas como toroides, recipientes de presión y diferentes tipos de estructuras entrelazadas (figura 8).

Figura 8. Máquina de filament winding con seis ejes.



Fuente: PETERS, Stan T. Composite Filament Winding. Ohio: ASM International, 2011. p. 2.

Figura 9. Piezas construidas usando la técnica filament winding (toroide, recipiente a presión y estructura entrelazada).



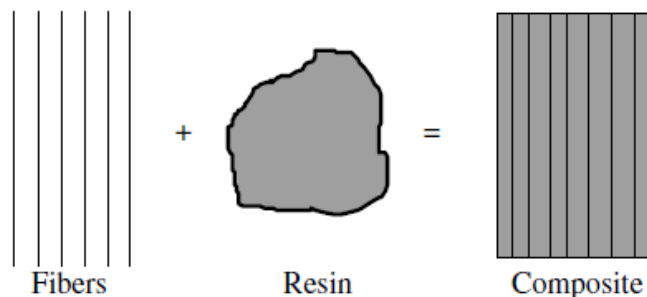
Fuente: PETERS, Stan T. Composite Filament Winding. Ohio: ASM International, 2011. p. 3.

### 3.3. MATERIALES COMPUESTOS <sup>7</sup>

A lo largo del tiempo, los materiales compuestos se han utilizado para dar solución a problemas tecnológicos, pero sólo a partir de la década de los 60 comenzaron a captar la atención de industrias debido a la introducción de compuestos basados en polímeros. El crecimiento en el uso de los compuestos, también se produjo debido a una mayor conciencia sobre el rendimiento del producto y una mayor competencia en el mercado mundial de componentes livianos.

Los materiales compuestos se forman reforzando fibras en una matriz de resina (figura 9) y sus propiedades dependen en gran medida de la manera en que se dispongan las fibras.

Figura 10. Formación de un material compuesto mediante fibras y resina.



Fuente: MAZUMDAR, Sanjay K. Composites manufacturing: materials, product, and process engineering. EE.UU: CRC Press LLC, 2002. p. 5.

Las fibras en sí mismas son de poca utilidad sin la presencia de un material matriz o aglutinante, cuyas funciones son vitales para el rendimiento de la estructura. En la siguiente tabla se enlistan las principales funciones que cumplen cada uno de los componentes de un material compuesto.

---

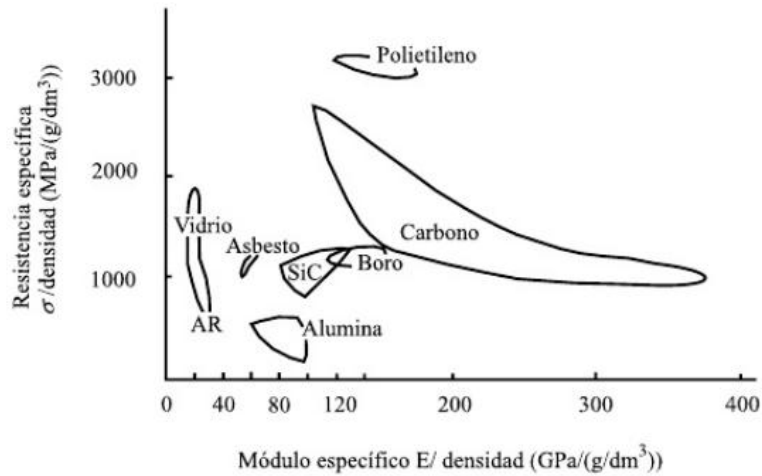
<sup>7</sup> MAZUMDAR, Sanjay K. Composites manufacturing: materials, product, and process engineering. EE.UU: CRC Press LLC, 2002. p. 4-7.

Tabla 1. Funciones de las fibras y la matriz en un material compuesto.

<b>Fibras</b>	<b>Matriz</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Llevar la carga. En un compuesto estructural, 70 a 90% de la carga es transportada por las fibras.</li> <li>• Proporcionar rigidez, resistencia, estabilidad térmica y otras propiedades estructurales, también conductividad eléctrica o aislamiento, según el tipo de fibra.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une las fibras y transfiere la carga a ellas. Proporciona rigidez y forma a la estructura.</li> <li>• Aísla las fibras para que puedan actuar por separado, esto detiene o ralentiza la propagación de una grieta.</li> <li>• Proporciona protección a las fibras de refuerzo contra el ataque químico y el daño mecánico (desgaste).</li> <li>• El modo de falla se ve fuertemente afectado por el material utilizado como matriz, así como su compatibilidad con la fibra.</li> </ul>

La fibra es el componente de refuerzo del material compuesto. Aporta resistencia mecánica, rigidez, dureza y es determinante para obtener las principales propiedades mecánicas. Las características más sobresalientes de las fibras de los materiales compuestos son su resistencia a la tracción específica y su elevado módulo específico.

Figura 11. Comparación de las características específicas de diferentes fibras.



Fuente: MIRAVETE, Antonio. Materiales compuestos I. Barcelona: Reverté S.A., 2012. p. 2.

**3.3.1. Fibra de carbono<sup>8</sup>.** La investigación que dio como resultado el uso de las fibras de carbono en los materiales compuestos modernos, se atribuye a los trabajos de principios de los años sesenta de Shindo en Japón, Watt en Inglaterra y Bacon y Singer en los Estados Unidos. Aunque se ha investigado una gran cantidad de materiales como precursores de la fibra de carbono, el poliacrilonitrilo (PAN), una mesofase del alquitrán y la celulosa, son los tres precursores que actualmente se utilizan para fabricar las fibras de carbono. Las fibras que están basadas en el PAN tienen diámetros que oscilan entre las 5 y 7  $\mu\text{m}$ , y aquellas cuyo precursor es el alquitrán están entre las 10 y 12  $\mu\text{m}$ .

La fibra de carbono es excepcional para aplicaciones de estructuras sometidas a cargas repetitivas o fatiga, ya que es el único material conocido cuyas propiedades mecánicas apenas son sensibles a la aplicación de una carga cíclica. También en lo que se refiere a su comportamiento en condiciones estáticas, sus propiedades son muy elevadas tanto en las fibras de alto módulo como en las de alta

<sup>8</sup> MIRAVETE, Antonio. Materiales compuestos I. Barcelona: Reverté S.A., 2012. p. 4-19.

resistencia. Su densidad es baja ( $1,6 \text{ kg/dm}^3$ ), lo cual implica que sus propiedades mecánicas específicas o por unidad de peso sean excepcionalmente elevadas.

La estructura de las fibras de carbono de alto módulo obtenidas a partir de alquitrán es altamente gráfica (ordenamiento en forma de láminas), mientras que el ordenamiento en forma de láminas no se observa en las fibras de carbono obtenidas a partir de PAN o rayón. Las fibras de carbono de módulo muy elevado ( $> 800 \text{ GPa}$ ), se obtienen a partir de la mesofase del alquitrán.

**3.3.1.1. Tipos de fibra de carbono.** A partir de las temperaturas del tratamiento de calentamiento, se han identificado tres tipos diferentes de fibras de carbono:

- *La fibra de carbono de alto módulo (HM):* es la más rígida y requiere la mayor temperatura de tratamiento.
- *La fibra de carbono de alta resistencia (HR):* es la más fuerte y se carboniza a la temperatura que proporciona la mayor resistencia tensil.
- *El último tipo de fibra de carbono (III):* es la más barata; la rigidez es menor que en las anteriores pero la resistencia es buena. Este tipo tiene la temperatura más baja de tratamiento.

Tabla 2. Propiedades de diferentes fibras de carbono provenientes de PAN.

Designación	Tipo de fibra		
	Alta resistencia (HR)	Alto módulo (HM)	III
Diámetro de hilo [ $\mu\text{m}$ ]	8	7	7 – 8
Densidad [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	1740 – 1760	1810 – 1870	1820
Módulo de elasticidad [GPa]	230	390	290
Resistencia a la tracción [GPa]	2,6 – 5	2,1 – 2,7	3,1
Elongación a la rotura [%]	2	0,7	1,1
Módulo específico	130	210	160
Coeficiente expansión térmica [ $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]	2,56	2,56	2,56

Fuente: MIRAVETE, Antonio. Materiales compuestos I. Barcelona: Reverté S.A., 2012. p. 6.

**3.3.2. Resina epoxi<sup>9</sup>.** Las resinas epoxi son termoendurecibles que contienen en su molécula dos o varias funciones epoxídicas o glicídicas. La resina epoxi más típica es el diglicidilester del bisfenol A (DGEBA).

La dureza de los epoxis es superior a la de las resinas de poliéster y, por ello, pueden operar a temperaturas más altas. Tiene buena adherencia a muchos sustratos, baja contracción durante la polimerización y son especialmente resistentes a los ataques de álcali. Esto permite moldeos de alta calidad, con buena tolerancia dimensional, para ser fabricado.

Las resinas epoxi se caracterizan por tener una baja retracción, un buen comportamiento a temperatura elevada, hasta  $180^{\circ}\text{C}$ , y una buena resistencia a los agentes químicos.

<sup>9</sup> MIRAVETE, Antonio. Materiales compuestos I. Barcelona: Reverté S.A., 2012. p. 47-56.

**3.3.2.1. Clasificación de las resinas epoxi.** La mayoría de resinas epoxi están basadas en tres estructuras químicas: TGMDA (dianilinatetraglicidil metileno), DGEBA (diglicidil eter de bisfenol A), y fenolformaldehído epoxi novolaca. La principal diferencia entre las moléculas es que TGMDA y las novolacas curan a una densidad de entrecruzamiento mayor que la epoxi Bisfenol A, la cual presenta altos valores de módulo de Young y temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) pero bajos valores de deformación a la rotura.

Tabla 3. Propiedades de las resinas epoxi más utilizadas.

	<b>TGMDA</b>	<b>Bisfenol A</b>
Módulo de Young [MPa]	3800 – 4500	2750 – 3450
Deformación a rotura [%]	1 – 2	5 – 8
$T_g$ [°C]	175 – 235	120 – 175
Absorción de agua [%]	4 – 6	2 – 3

Fuente: MIRAVETE, Antonio. Materiales compuestos I. Barcelona: Reverté S.A., 2012. p. 51.

## 4. DISEÑO CONCEPTUAL

En esta fase se dio inicio al desarrollo de la máquina a partir de la identificación de la necesidad: construir prototipos de árboles de transmisión de potencia fabricados con fibra de carbono, teniendo en cuenta la incorporación de la técnica filament winding.

### 4.1. DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN DE CALIDAD (QFD)

Mediante la aplicación del método QFD, se identificaron cada uno de los requerimientos del consumidor y luego se organizaron en diferentes categorías, según su relación con las mismas.

**4.1.1. Requerimientos del consumidor.** A continuación se enlistan las peticiones básicas de los interesados en el desarrollo del proyecto para el diseño y construcción de la máquina.

- Producción de ejes de manera rápida
- Ocupa poco espacio
- Fácil de transportar
- Versatilidad
- Durabilidad
- Mantenibilidad
- Economía
- Garantía
- Bajo peso
- Seguridad y ergonomía

- Diseño novedoso

**4.1.2. Organización de requerimientos.** Los requerimientos del consumidor se organizaron en tres categorías (operación, construcción y vida útil) a partir de la relación que se establece entre el listado y los criterios de ordenamiento.

Operación:

- Producción de ejes de manera continua
- Versatilidad
- Seguridad y ergonomía

Construcción:

- Diseño novedoso
- Ocupa poco espacio
- Fácil de transportar
- Bajo peso
- Economía
- Garantía

Vida útil:

- Durabilidad
- Mantenibilidad

## **4.2. MATRIZ DE CALIDAD**

Se le dan prioridad en la solución a los subsistemas con mayores puntuaciones, en este caso a la mantenibilidad, facilidad de movilidad, fácil ensamble, cumplimiento de normas de seguridad y poco espacio para su operación.

Figura 12. Matriz de calidad.

Requerimientos del consumidor \ Requerimientos ingenieriles			Resistencia a la fatiga		Bajo precio		Fácil ensamble		Mantenibilidad		Resistencia a la corrosión		Cumplimiento de normas de seguridad		Soportar altas velocidades		Facilidad de movilidad		Poco espacio para su operación		Diseño estético	
Producción de ejes de manera rápida	11	3	33	0	0	0	0	9	99	3	33	9	99	9	99	3	33	3	33	0	0	
Ocupa poco espacio	10	0	0	3	30	3	30	3	30	0	0	3	30	0	0	9	90	9	90	3	30	
Fácil de transportar	9	0	0	3	27	9	81	9	81	3	27	0	0	0	0	9	81	9	81	3	27	
Versatilidad	8	3	24	3	24	9	72	3	24	0	0	9	72	3	24	9	72	0	0	9	72	
Durabilidad	7	9	63	3	21	3	21	9	63	9	63	3	21	9	63	0	0	0	0	3	21	
Mantenibilidad	6	9	54	0	0	9	54	9	54	9	54	9	54	0	0	9	54	3	18	0	0	
Económico	5	3	15	9	45	3	15	3	15	9	45	0	0	0	0	3	15	9	45	3	15	
Garantía	4	3	12	3	12	3	12	9	36	3	12	0	0	3	12	3	12	0	0	0	0	
Bajo peso	3	9	27	9	27	3	9	3	9	0	0	0	0	3	9	9	27	3	9	0	0	
Seguridad y ergonomía	2	3	6	0	0	3	6	3	6	3	6	9	18	3	6	3	6	3	6	0	0	
Diseño novedoso	1	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	9	
<b>Total</b>				<b>234</b>	<b>186</b>	<b>303</b>	<b>417</b>	<b>240</b>	<b>294</b>	<b>213</b>	<b>390</b>	<b>282</b>	<b>174</b>									

### 4.3. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS

De acuerdo con la información recopilada correspondiente al proceso de filament winding, los conocimientos previos adquiridos en los cursos de diseño propios del pregrado en Ingeniería Mecánica – UIS y teniendo en cuenta los requerimientos con respecto a las dimensiones (diámetro y longitud) de los árboles de transmisión en la industria de autopartes colombiana, se plantean 3 alternativas para el diseño de la máquina.

A continuación, se realizará la descripción de cada una de las alternativas junto con una pequeña descripción de su funcionamiento y cualidades más relevantes.

**4.3.1. Alternativa A – Sistema de desplazamiento lineal mediante tornillo sin fin con guías cilíndricas.** Este diseño se compone de un tornillo sin fin guiado con varillas cilíndricas para el desplazamiento lineal del carro longitudinal (figura 13). El movimiento de rotación necesario para la matriz, se realiza mediante la implementación de un sistema de transmisión por poleas y correas (figura 14). El montaje para el molde se realiza entre copas, una fija (a donde se le transmite la potencia) y otra móvil, con el objetivo de poder variar la longitud del producto final. Finalmente, la estructura se compone de ángulos de hierro y se sujeta con tornillos de anclaje al piso.

Figura 13. Sistema de desplazamiento lineal mediante tornillo sin fin con guías cilíndricas.

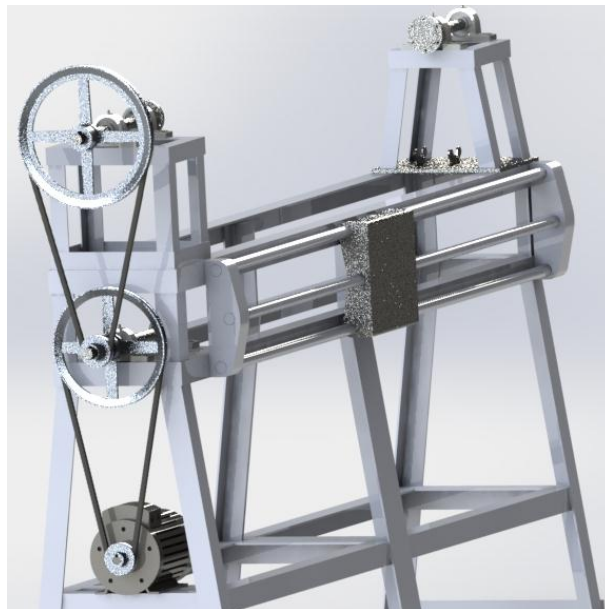
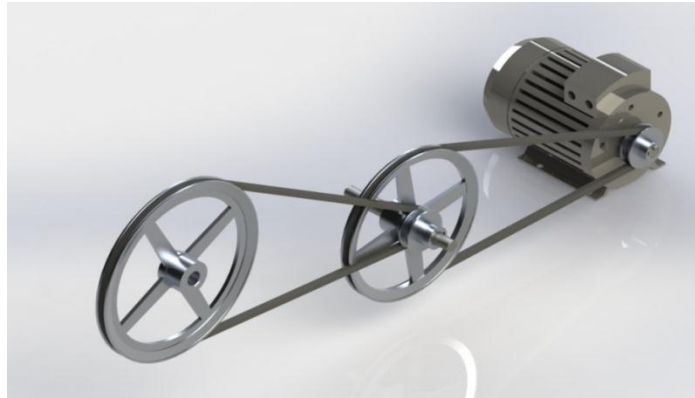


Figura 14. Sistema de transmisión de potencia por poleas y correas.



✓ Ventajas:

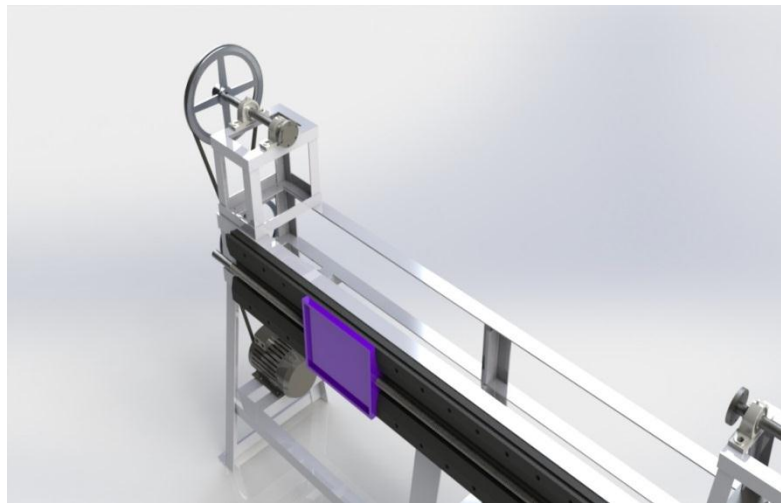
- Flexibilidad en la construcción de cualquier tipo de eje gracias a la longitud de la bancada y a la distancia que existe desde la misma hasta el centro de la copa.
- Selección de la gran mayoría de elementos mediante catálogo.
- Alta durabilidad en el tiempo al ser un diseño robusto.
- Excelente sujeción de la matriz gracias al montaje entre copas.

✓ Desventajas:

- Montaje demasiado pesado debido a los materiales de construcción (hierro y acero).
- Requiere gran espacio para su instalación y funcionamiento.
- Puede producir altas vibraciones como consecuencia de las uniones soldadas que se requieren para su instalación.
- El tornillo sin fin y las guías cilíndricas se pueden flectar, ya que la carga que se pretende usando el carro longitudinal, es demasiado pesada (sistema de tensión y dirección de la fibra).

**4.3.2. Alternativa B – Sistema de desplazamiento lineal mediante tornillo sin fin guiado mediante un perfil de cola de milano.** Este diseño se compone de un tornillo sin fin guiado mediante un perfil de cola de milano, el cual proporciona gran capacidad de carga y excelente amortiguación de la vibración durante el desplazamiento lineal del carro longitudinal. Solidario al tornillo sin fin, se encuentra un motor con variador de frecuencia para modificar la velocidad de desplazamiento lineal con el objetivo de obtener diferentes disposiciones de la fibra en la matriz. El movimiento de rotación necesario para la matriz, se realiza mediante la implementación de un sistema de transmisión por poleas y correas. Finalmente, la estructura se compone de ángulos de hierro y se sujeta con tornillos de anclaje al piso.

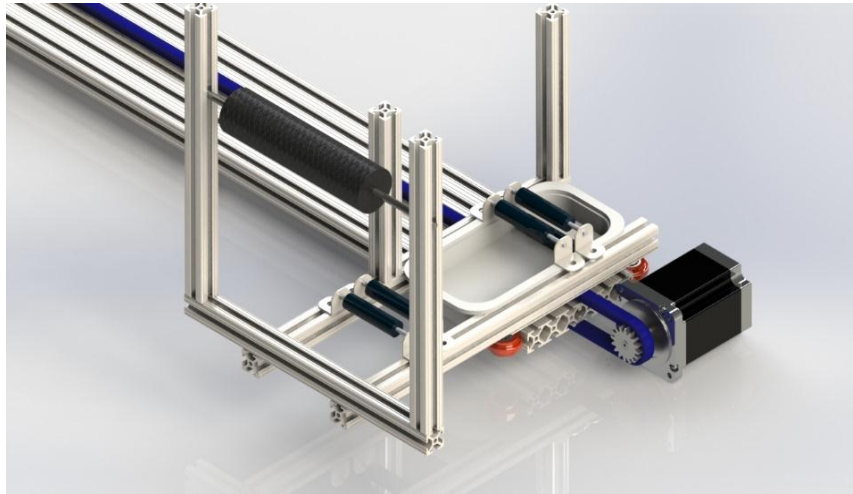
Figura 15. Sistema de desplazamiento lineal mediante tornillo sin fin guiado mediante un perfil de cola de milano.



- ✓ Ventajas:
  - Obtención de diferentes configuraciones de ejes gracias al variador de frecuencia solidario al tornillo sin fin.
  - Excelente amortiguación a las vibraciones en el carro longitudinal.
  - Selección de la gran mayoría de los componentes mediante catálogo.
  - Buena estabilidad de la máquina gracias a su sistema de sujeción al piso.
  
- ✓ Desventajas:
  - Montaje demasiado pesado debido a los materiales de construcción (hierro y acero).
  - Necesidad de personal capacitado para la operación del variador de frecuencia del motor.
  - Difícil manufactura del perfil de cola de milano como consecuencia de su extensa longitud.
  - Estructura con demasiadas uniones soldadas y roscadas que pueden generar altos niveles de vibraciones.

**4.3.3. Alternativa C – Sistema de desplazamiento lineal por correa tipo impresora, montaje entre mandriles y estructura de aluminio.** Este diseño se compone de una correa tipo impresora accionada mediante un motor paso a paso NEMA 34 para el desplazamiento lineal del carro longitudinal. La rotación del mandril sobre el cual se monta la matriz, también se realiza con un motor paso a paso NEMA 34. Los pulsos de los dos motores se controlan mediante Arduino, permitiendo en el motor asociado al desplazamiento lineal, la variación de su velocidad con el fin de obtener diferentes configuraciones de ejes. La estructura en su gran mayoría se compone de perfil de estrella de aluminio.

Figura 16. Sistema de desplazamiento lineal por correa tipo impresora.



✓ Ventajas:

- Facilidad en el ensamble.
- Programación sencilla para el control de las velocidades mediante un microcontrolador Arduino.
- Fácil de transportar.
- Estructura liviana debido a su material (aluminio).

✓ Desventajas:

- Diámetro interno del eje limitado como consecuencia de su pequeño tamaño.
- La gran mayoría de los materiales deben ser importados.
- Se hace necesaria una impresora 3D para la fabricación de las piezas demasiado pequeñas.

#### 4.4. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS

Para cumplir con el objetivo principal y seleccionar la mejor alternativa propuesta, se consideran los 5 criterios más importantes obtenidos del QFD elaborado anteriormente. A continuación se presentan los criterios más importantes ordenados de manera descendente según su puntuación obtenida.

1. Mantenibilidad
2. Facilidad de movilidad
3. Fácil ensamble
4. Cumplimiento de normas de seguridad
5. Poco espacio para su operación

Para determinar la alternativa más conveniente, se analizan cuidadosamente las ventajas y desventajas de cada una de las opciones de diseño mediante una ponderación de factores. De acuerdo a la importancia de cada criterio, podemos establecer un porcentaje de relevancia para cada uno (tabla 4).

Tabla 4. Ponderación de factores.

Requerimiento	Valor QFD	Porcentaje
Mantenibilidad	417	25%
Facilidad de movilidad	390	23%
Fácil Ensamble	303	18%
Cumplir Normas de seguridad	294	17%
Poco espacio para su operación	282	17%
<b>Total</b>	<b>1686</b>	<b>100%</b>

Una vez elaborada la ponderación de los factores más relevantes en el diseño de la máquina, procedemos a elegir la alternativa con mayor importancia, para ello, debemos hacer una matriz de ponderación, que tenga en cuenta el porcentaje de

consideración de cada criterio hallado anteriormente y también una jerarquía de importancia de cada alternativa respecto a cada criterio, siendo:

- 5 – Muy bueno
- 4 – Bueno
- 3 – Pobre
- 2 – Muy pobre

Una vez establecida la jerarquía de importancia para cada alternativa según cada criterio, podemos observar que la alternativa con mayor puntuación es la alternativa C (tabla 5).

Tabla 5. Matriz de ponderación.

<b>Factores/Alternativa</b>	<b>A</b>		<b>B</b>		<b>C</b>	
Mantenibilidad	2	0,495	3	0,741	3	0,741
Facilidad de movilidad	1	0,231	1	0,231	5	1,156
Fácil ensamble	2	0,359	2	0,359	4	0,718
Cumplimiento de normas de seguridad	4	0,698	4	0,697	3	0,523
Poco espacio para su operación	1	0,167	2	0,334	4	0,669
<b>Total</b>		<b>1,950</b>		<b>2,364</b>		<b>3,809</b>

#### 4.5. ESPECIFICACIÓN DE LA ALTERNATIVA GANADORA

Luego de haber efectuado las evaluaciones correspondientes a cada una de las alternativas descritas anteriormente, se ha determinado que el sistema que cumple o se acerca más a las expectativas óptimas de diseño, tanto en características requeridas por el cliente como en los factores tenidos en cuenta en el diseño, es la **Alternativa C** “*Sistema de desplazamiento lineal por correa tipo impresora, montaje entre mandriles y estructura de aluminio*”.

## 5. DISEÑO EN DETALLE

Las características dimensionales, la selección de materiales y la conformación y disposición ergonómica de los elementos eléctricos y mecánicos, son requisitos que hacen parte de cálculos ingenieriles desarrollados a continuación, con el fin de obtener una máquina funcional, capaz de aplicar la tecnología filament winding para la manufactura de un prototipo de árbol de transmisión y de esta manera caracterizar los parámetros de fabricación por medio de un sistema de control, los cuales se involucran directamente con las propiedades mecánicas del prototipo.

Los parámetros de fabricación del prototipo, como: el ángulo de distribución de las fibras, espesor y diámetros, longitud, temperatura de curado y la tensión de las fibras, están regidos por dos movimientos motrices: uno constante y otro variable, los cuales son características propias del bobinado helicoidal de filamentos. A partir de lo anterior, se establecen los sistemas que componen la máquina.

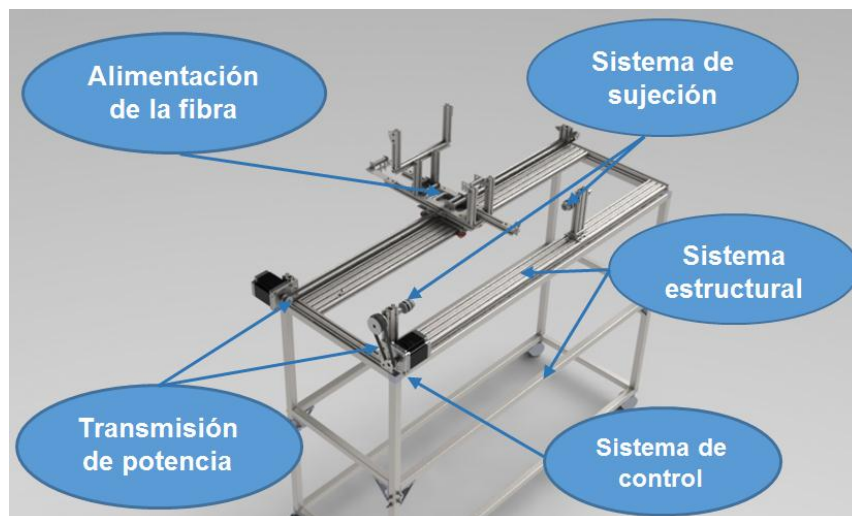
### 5.1. SISTEMAS DE LA MÁQUINA

**5.1.1. Identificación y descripción de los sistemas.** La base para el diseño de la máquina es la aplicación de la técnica filament winding, teniendo en cuenta los requerimientos planteados en el diseño conceptual, mediante la incorporación de un sistema semiautomático y mecanismos que controlen los parámetros de fabricación del prototipo del árbol de transmisión. La máquina está compuesta por los siguientes sistemas:

- *Sistema de transmisión de potencia:* conformado por dos motores paso a paso, poleas sincrónicas (motrices y conducidas) y correas sincrónicas.

- *Sistema de alimentación de la fibra:* incluye un bastidor en donde se disponen y ensamblan 7 rodillos tensores, un rollo de fibra de carbono, un carro para desplazamiento horizontal y una bañera para la resina termoestable.
- *Sistema de sujeción de la matriz:* se compone de dos mandriles unidos a sus respectivos ejes, los cuales se apoyan en cojinetes de fricción dispuestos en un perfil de aluminio.
- *Sistema eléctrico y de control:* incorpora un Arduino mega, dos drivers, una pantalla LCD, un teclado matricial, una fuente DC y los botones de inicio y parada de emergencia situados en el tablero de control.
- *Sistema estructural:* constituido por perfiles de aluminio cuadrados y tipo hepco, cuya unión se realiza mediante tornillería.

Figura 17. Sistemas que componen la máquina.

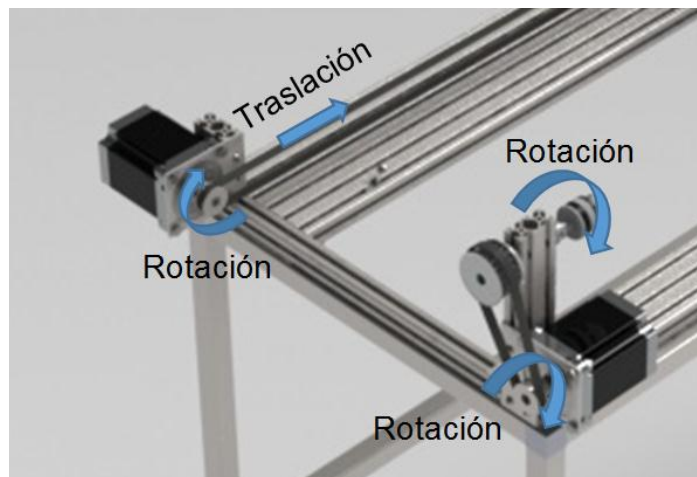


## 5.2. SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA

En base al bobinado helicoidal de filamentos, que se rige por dos movimientos principales: uno de rotación y otro de traslación horizontal; y con el fin de generar desplazamiento en los mecanismos que conforman la máquina, es necesario el uso de dos motores, en este caso motores paso a paso, los cuales son dispositivos electromecánicos de gran precisión y alto par, capaces de mover tanto el sistema de alimentación de la fibra como el sistema de sujeción de la matriz, y mantener una velocidad de acuerdo a la secuencia que se les indique a través de un microcontrolador.

En la figura 18 se observa la configuración de los montajes del sistema motriz; allí se evidencia la conversión del movimiento de rotación del motor paso a paso, en el movimiento de traslación del carro portafibra, mediante la utilización de poleas y correas sincrónicas. Por otra parte, el sistema de sujeción recibe un movimiento rotacional proveniente del motor, como producto de una transmisión por medio de poleas y correas sincrónicas.

Figura 18. Sistema de transmisión de potencia.



**5.2.1. Criterios de selección de un motor paso a paso.** En todo proyecto electromecánico, la selección del tipo de motor suele ser uno de los aspectos más críticos debido a la gran variedad de motores que existen (corriente alterna AC, corriente continua DC, paso a paso y servomotores; cada uno con características similares en aplicaciones diferentes).

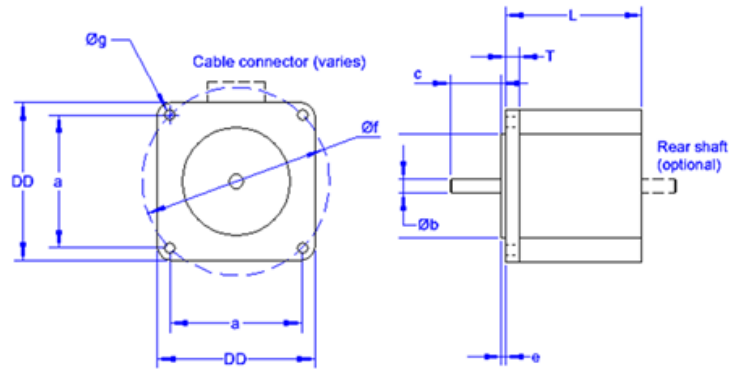
Los motores paso a paso no giran libremente por sí mismos, avanzan girando por pequeños pasos gracias a la estimulación del inductor a partir de una fuente de alimentación externa, lo que permite tener mucha más precisión en el arranque y parada del motor a diferencia de los motores AC y DC. También difieren de los motores DC en cuanto a la velocidad y torque, los cuales no son buenos para ofrecer un buen torque a baja velocidad sin la ayuda de un mecanismo de reducción, a diferencia de los motores paso a paso que poseen una mayor capacidad de torque a baja velocidad.

En accionamientos continuos, donde las aplicaciones requieren de largo periodos de trabajo y gran cantidad de arranques y paradas, los motores paso a paso ofrecen mayor precisión a diferencia de los servomotores que se utilizan en gran medida en accionamientos más precisos y veloces, como las aplicaciones de robótica y automatización industrial.

Los motores paso a paso, al igual que los demás motores, cuentan con unos criterios principales para su selección, los cuales se definen a continuación:

- *Tamaño del motor:* La selección del motor depende en gran medida del torque requerido por los sistemas móviles de la máquina, el cual está ligado a las dimensiones mismo. A partir de lo anterior, se tiene en cuenta la figura 19 como paso inicial para la selección de los motores paso a paso que componen la máquina.

Figura 19. Dimensiones de los motores paso a paso NEMA.



Dimensión en pulgadas (mm)	Dimensiones de montaje del motor NEMA						
	NEMA 8	NEMA 11	NEMA 14	NEMA 17	NEMA 23	NEMA 34	NEMA 42
<b>Tamaño del motor (DD)</b>	~ 0.8	~ 1.1	~ 1.4	~ 1.7	~ 2.3	~ 3.4	~ 4.2
<b>a: Distancia del orificio del perno (cuadrado)</b>	0.630 (16)	0.905 (23)	1.024 (26)	1.220 (31)	1.854 (47.14)	2.744 (69.7)	3.500 (88.9)
<b>b: Diámetro del eje del motor</b>	0,157 (4)	0,197 (5)	0,197 (5)	0,197 (5)	0.250 (6.35)	0.375 (9.5)	0.625 (16)
<b>c: longitud del eje del motor (máx)</b>				0.945	0.810	1.250	1.380
<b>d: Diámetro del piloto</b>	0.590 (15)	0.866 (22)	0.866 (22)	0.866 (22)	1.500 (38.1)	2.875 (73)	2.186
<b>e: Profundidad del piloto (máx)</b>	0.059 (1.5)	0.079 (2)	0.079 (2)	0.079 (2)	0.062 (1.6)	0.062 (1.6)	0.062 (1.6)
<b>f: diámetro del círculo del agujero del perno</b>				1.725	2.625	3.875	4.950
<b>g: tamaño del agujero del perno</b>	0.118 (3)	0,157 (4)	0,157 (4)	4-40 UNC	0.195 (5)	0,218 (5.5)	0.281

Fuente: STREPPER MOTOR NEMA SIZES. [En línea]. [Consultado el 7 de septiembre de 2018].

Disponible en: <http://techref.massmind.org/techref/io/stepper/nemasizes.htm>

- *Torque requerido por los sistemas móviles para lograr el movimiento:* los motores paso a paso utilizados en el proyecto deben suministrar el torque o par requerido para transmitir el movimiento tanto al sistema de alimentación de la fibra como al sistema de sujeción de la matriz. Para la selección del motor paso a paso se tienen en cuenta dos características exigidas por el fabricante (NEMA) y que son igualmente importantes para el correcto funcionamiento de la máquina: la velocidad de pulsos máxima que el motor paso a paso debe desarrollar y el torque a superar para transmitir el movimiento a los demás sistemas.

**5.2.2. Cálculo de la velocidad máxima de pulsos.** Esta velocidad se calcula tomando como ángulo máximo que se quiere obtener con la fibra el valor de 75° y como ya se había establecido en capítulos anteriores se realiza el cálculo por medio de un triángulo de velocidades formado por el carro porta fibra y el mandril que estará rotando a velocidad constante.

Datos:

- Velocidad de rotación del mandril = 60 rpm (velocidad tangencial)
- Ángulo theta = 75°
- $r_1 = 20$  mm (radio del mandril)
- $D_1 = D_2 =$  diámetros de las poleas

Figura 20. Representación geométrica de las velocidades presentes en la máquina.



Con estos datos se puede calcular la velocidad del carro porta fibra (Vel. de desplazamiento en la figura 20) de siguiente forma:

$$\text{Tan}\theta = \frac{\text{Vel. de desplazamiento}}{\text{Vel. tangencial}}$$

Y teniendo que:

$$60 \text{ rpm} * \frac{2\pi}{60} * r_1 = 125,66 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Entonces:

$$\text{Vel. de desplazamiento} = \text{Tan}75^\circ * 125,66 \frac{\text{mm}}{\text{s}} = 468,97 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

Los motores paso a paso tienen un recorrido de  $1,8^\circ$  por pulso, así que para determinar su recorrido por pulso, tenemos que:

$$\Delta l = \frac{\pi * D_1 * \theta_{REC}}{360}$$

Donde:

$$\Delta l = \text{recorrido por pulso} \quad ; \quad \theta_{REC} = \text{ángulo recorrido por pulso}$$

Entonces:

$$\Delta l = \frac{\pi * 40 * 1,8^\circ}{360} = 0,628 \frac{\text{mm}}{\text{pulso}}$$

Como ya se tiene la velocidad requerida y el recorrido por pulso suministrado por el motor, se puede calcular el número de pulsos para obtener dicha velocidad:

$$\# \text{ de pulsos} = \frac{\text{Vel. de desplazamiento}}{\Delta l} = \frac{468,97 \text{ mm/s}}{0,628 \text{ mm/pulso}} = 746,76 \text{ pps}$$

Que también se puede definir como frecuencia de pulsos, si se toma un tiempo de posicionamiento del motor de  $t = 1s$ . Además, si trabajamos un perfil de pulsos trapezoidal con tiempo de aceleración y desaceleración igual a  $0,25s$  se obtiene la frecuencia de pulsos media como:

$$f_{pm} = \frac{\# \text{ de pulsos}}{t - t_{acel}} = \frac{746,76}{1 - 0,25} = 995,68 \text{ pps}$$

### 5.2.3. Cálculo del par requerido para el sistema de alimentación de la fibra.

El par requerido por el sistema es otro parámetro que el motor paso a paso debe asegurar. A continuación se calcula de manera teórica el torque máximo que el sistema exige. Para esto son necesarios algunos datos que se obtienen del CAD SolidWorks: masa del carro portafibra =  $4,347 \text{ kg}$  (figura 21) y masa de la polea sincrónica =  $0,052 \text{ kg}$  (figura 22).

Figura 21. Propiedades de físicas del carro portafibra según SolidWorks.

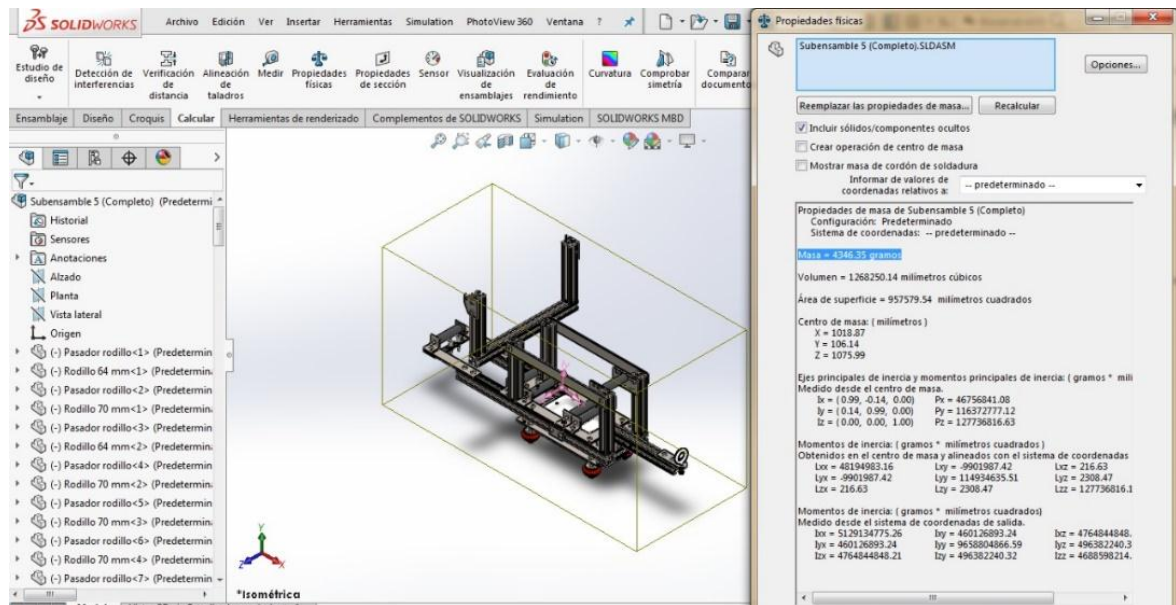
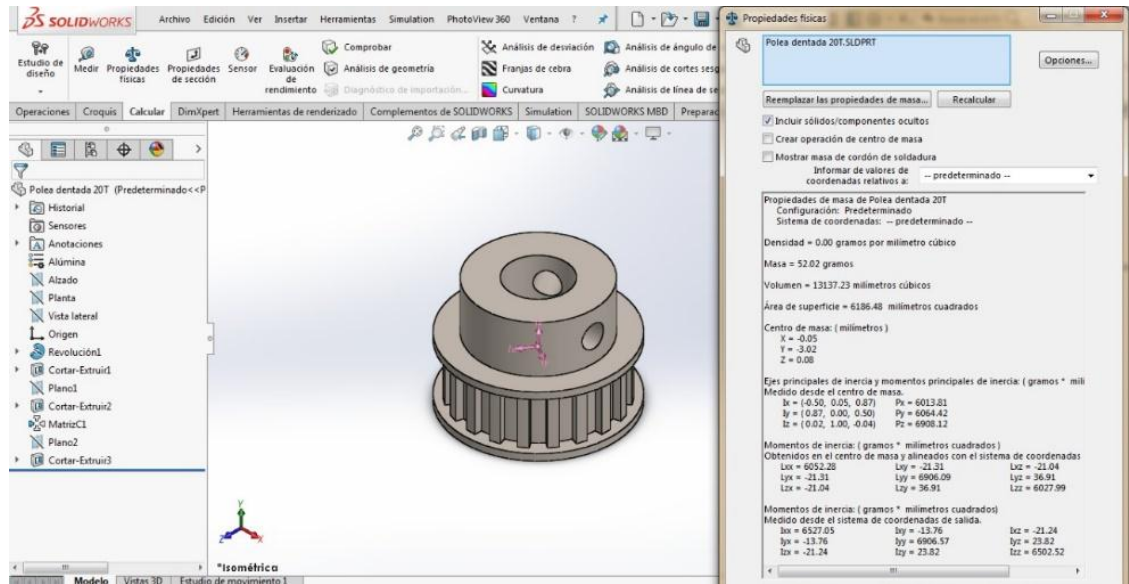
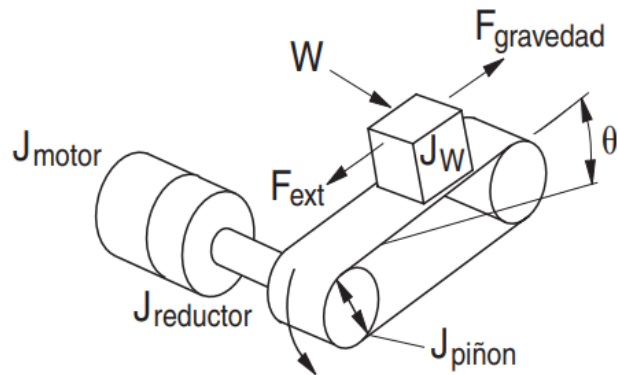


Figura 22. Propiedades físicas de la polea sincrónica según SolidWorks.



Para el cálculo del torque, primero se debe realizar el cálculo del momento de inercia.

Figura 23. Diagrama de cuerpo libre del sistema de alimentación de la fibra.



El momento de inercia de la polea sincrónica es:

$$J_{polea} = \frac{1}{8} * W_{polea} * D_{polea}^2$$
$$J_{polea} = \frac{1}{8} * 0,052Kg * (4cm)^2 = 0,104 Kg.cm^2$$

El momento de inercia del carro portafibra y la correa sincrónica es:

$$J_W = W_{carro} * \left(\frac{D_{polea}}{2}\right)^2$$
$$J_W = 4,347 Kg * \left(\frac{4}{2}\right)^2 = 17,388 Kg.cm^2$$

El momento de inercia total es la suma de todos los momentos de inercia:

$$J_{Total} = 2 * J_{polea} + J_W = 2 * 0,104 + 17,388 = 17,596 Kg.cm^2$$

Para el cálculo del par, primero se calcula la carga lineal del sistema:

$$F = \mu * W * g = 0,48 * 4,347Kg * 9,81 \frac{m}{s^2} = 2,467 N = 2,51 Kgf$$

El par de la carga es:

$$T_w = \frac{F * D_{Polea}}{2 * \eta} = \frac{2,51 * 4}{2 * 0,9} = 5,57 Kgf * cm$$

Por último, el par de aceleración se define como:

$$T_{acel} = \frac{J_0 + J_{total}}{g} * \frac{\pi * \theta_s}{180} * \frac{fpm}{t_{acel}}$$

$$T_{acel} = \frac{J_0 + 17,596}{980} * \frac{\pi * 1,8}{180} * \frac{995,68}{0,25}$$

$$T_{acel} = 0,127 * J_0 + 2,245$$

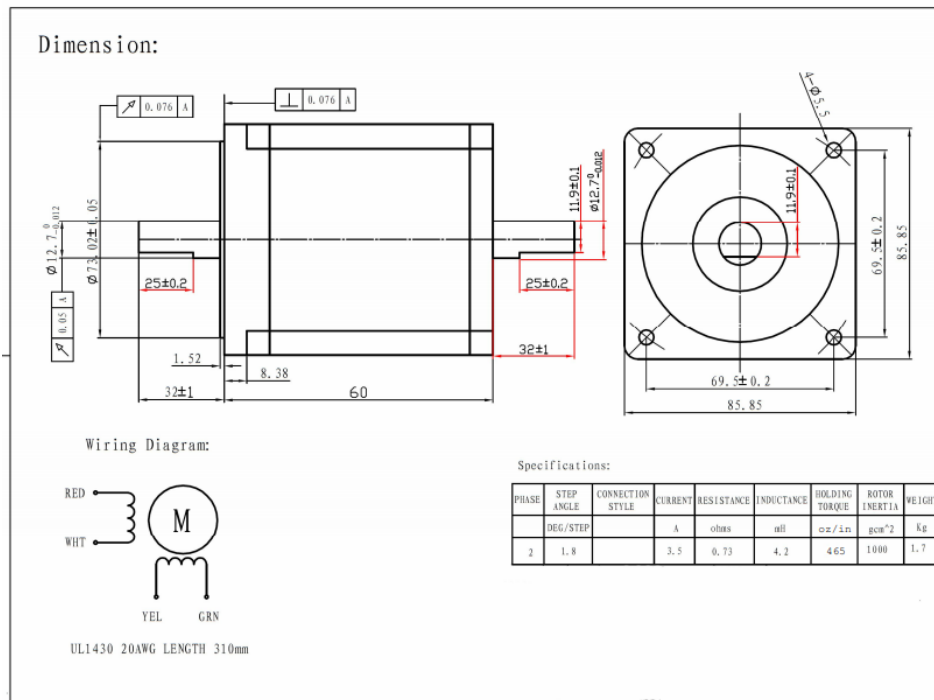
$J_0$  es el momento de inercia del rotor del motor

El par de operación del motor es:

$$T_M = (T_{acel} + T_w) * k ; k \text{ es un factor de seguridad} = 2$$

$$T_M = (0,127 * J_0 + 2,245 \text{ Kgf} * \text{cm} + 5,57 \text{ Kgf} * \text{cm}) * 2$$

Figura 24. Especificaciones del motor NEMA KL34H260-35-4A



Fuente: AUTOMATION TECHNOLOGIES INC. [En línea]. [Consultado el 7 de septiembre de 2018].

Disponible en: <https://www.automationtechnologiesinc.com/wp-content/uploads/downloads/2014/03/KL34H260-35-4B.pdf>

Se selecciona el motor NEMA 34 KL34H260-35-4A con momento de inercia del rotor igual a 1 Kg.cm<sup>2</sup>. Entonces:

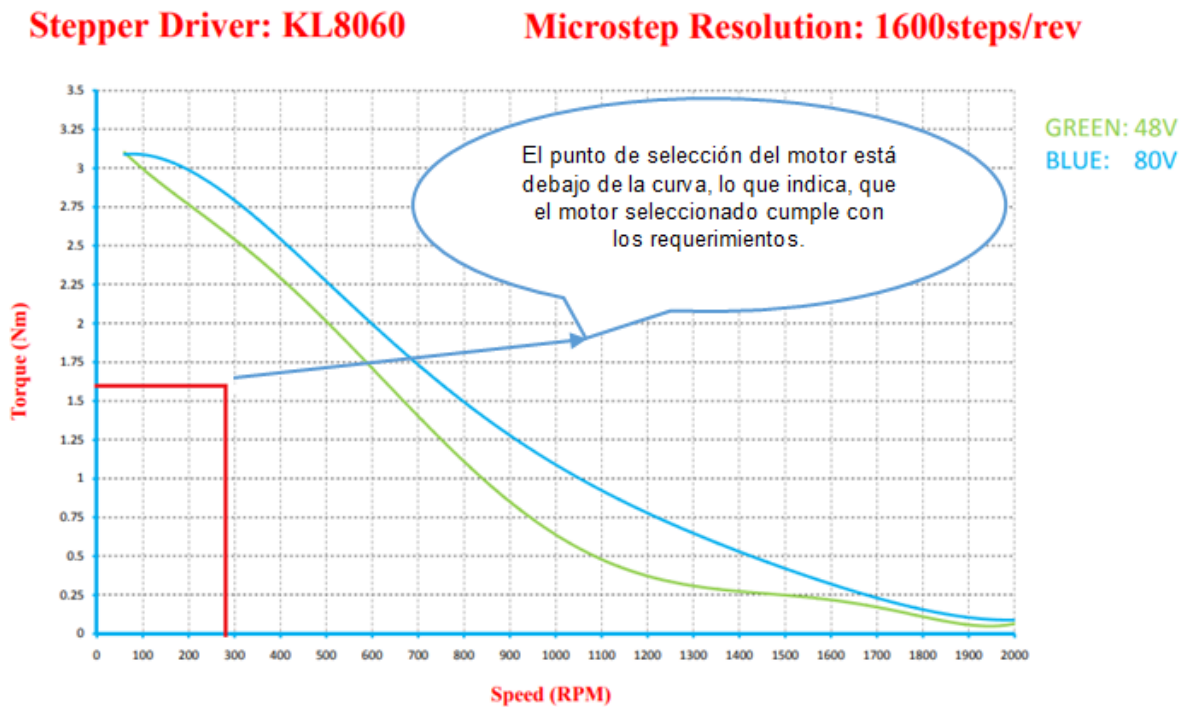
$$T_M = (0,127 * (1) + 2,245 \text{ Kgf} * \text{cm} + 5,57 \text{ Kgf} * \text{cm}) * 2$$

$$T_M = 15,884 \text{ Kgf} * \text{cm} = 1,558 \text{ N.m}$$

Verificando el torque necesario a las revoluciones preestablecidas, en la figura 25, se observa que el motor seleccionado cumple con los requerimientos.

Figura 25. Gráfica de torque vs rpm, para un motor paso a paso KLH34260-35-4A

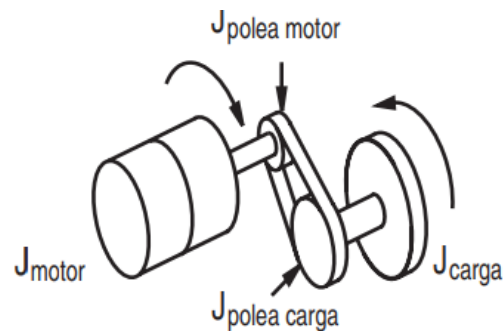
### K34H260-35-4B



Fuente: AUTOMATION TECHNOLOGIES INC. [En línea]. [Consultado el 7 de septiembre de 2018].  
 Disponible en: <https://www.automationtechnologiesinc.com/wp-content/uploads/downloads/2015/05/KL34H260-35-4BTC.pdf>

**5.2.4. Cálculo del par necesario para el sistema de sujeción de la matriz.** El proceso de cálculo descrito anteriormente sirve en gran medida para calcular el par requerido del sistema de sujeción. De igual manera hay que tener en cuenta las cargas que actúan en el sistema de sujeción de la matriz (figura 26). Al seguir este proceso de cálculo se obtiene un par similar al anterior, por lo tanto y debido a factores económicos y facilidad en el proceso de construcción, se elige un motor paso a paso igual al anterior para el sistema de sujeción de la matriz.

Figura 26. Diagrama de cuerpo libre del sistema de sujeción de la matriz.

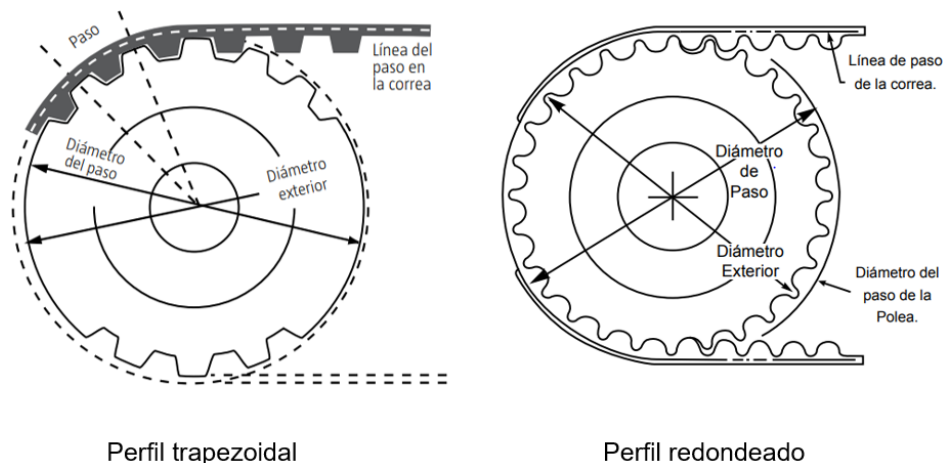


**5.2.5. Selección de la transmisión de potencia para los motores.** El sistema diseñado para la transmisión del torque de los motores paso a paso, está basado en aplicaciones de control y automatización de máquinas CNC e impresoras. Por ende, el uso de correas dentadas para transmitir la potencia, es el más adecuado para el montaje que se tiene, ya que existe una separación considerable entre los ejes de las poleas motriz y conducida, haciendo imposible el uso de engranajes pequeños o que ocupen poco espacio. Por otra parte, a diferencia de estos y de las transmisiones por cadena, las correas dentadas no requieren lubricación, la cual puede llegar a acelerar el desgaste de estas transmisiones y contaminar el proceso por salpicadura de aceite o grasa. Las transmisiones por correa, en este caso, también están por encima en la transmisión del movimiento de traslación por

medio de un husillo, ya que el sistema de alimentación de fibra es relativamente liviano y al existir el uso del husillo, es probable que se presenten mayores vibraciones en el sistema.

Las correas dentadas se dividen en dos: las de tiempo, que poseen dientes en forma trapezoidal y las sincrónicas, que tienen dientes de perfil redondeado (figura 27). En transmisiones de potencia a medianas y altas velocidades, las correas de tiempo y sincrónicas aventajan a las correas en V, ya que no se patinan, son más compactas y de gran precisión.

Figura 27. Perfiles de las correas dentadas.



Fuente: TRANSMISIONES POR CORREAS DENTADAS DE TIEMPO Y SINCRÓNICAS: MANUAL DE SELECCIÓN. [En línea]. [Consultado el 7 de septiembre de 2018]. Disponible en: [http://lab.transmitec.com/wp-content/uploads/2014/06/manual\\_poleas\\_dentadas\\_intermec.pdf](http://lab.transmitec.com/wp-content/uploads/2014/06/manual_poleas_dentadas_intermec.pdf)

La gran ventaja que tienen las transmisiones sincrónicas de las de tiempo, es que la zona de alta concentración de tensiones se sitúa en el centro del diente, frente a las correas dentadas de perfil trapezoidal, donde los mayores niveles de tensión

se concentran en la esquina de la base del diente del lado que arrastra la polea, reduciendo su duración<sup>10</sup>.

Teniendo en cuenta todas las consideraciones anteriores, se seleccionó una correa sincrónica para realizar la transmisión de potencia del motor paso a paso a los demás sistemas de la máquina.

### **5.3. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE LA FIBRA**

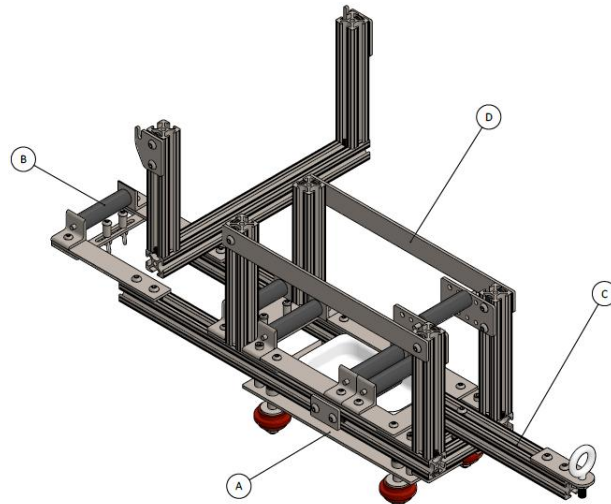
La figura 28 representa el sistema de alimentación de fibra, compuesto en su mayor parte por perfilaría de aluminio tipo hepco, un subsistema de tensión de la fibra a través de rodillos poliméricos, una bañera para deposición de la resina termoestable y un carro portafibra. Este conjunto es un sistema estructural móvil, en su mayoría. Está diseñado con el fin de disponer cada uno de sus componentes de manera eficiente para lograr el funcionamiento óptimo de la máquina, ya que, es posible afirmar que es el componente más crítico de la misma, debido a que a través de este se cumplen la gran mayoría de funciones durante el proceso.

La perfilaría de aluminio tipo hepco, facilita la construcción de máquinas CNC de aplicaciones ligeras e impresoras 3D. Es ampliamente usada en la industria por su ligereza y excelentes propiedades estructurales, haciendo que el resultado sea una plataforma modular para estructuras y deslizadores lineales de alta precisión.

---

<sup>10</sup> RODRÍGUEZ GALBARRO, Hermenegildo. Correas de transmisión: cálculo y diseño. [En línea]. Ingemecánica. (Recuperado en 7 septiembre 2018.) Disponible en <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn121.html>

Figura 28. Sistema de alimentación de la fibra.



El uso de la perfilería en aluminio, presenta la ventaja de ser más ligera que el acero, lo cual permite que con un par menor desarrollado por los motores de la máquina, sea posible desplazar correctamente toda la parte móvil de la misma. A causa de la diferencia de peso entre el acero y el aluminio, se puede prever que si la estructura se hiciera de acero se necesitarían piezas más resistentes, haciendo aparecer mayores tensiones y la necesidad de unos motores más potentes que generen el movimiento, lo cual haría que la diferencia de precio entre los dos materiales fuera compensada a nivel global de la máquina<sup>11</sup>.

**5.3.1. Selección del perfil de aluminio para el bastidor del sistema de tensión de la fibra.** El objetivo principal de la máquina es fabricar prototipos de árboles de transmisión, dimensionalmente están escalados. Por lo tanto, al ser estos más pequeños que los árboles reales, los componentes de la máquina pueden presentar características dimensionales y propiedades de resistencia, rigidez, y

---

<sup>11</sup> SORIANO BAGUET, David. Diseño y construcción de una fresadora de control numérico. Trabajo final de grado. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña. 2014.

peso más reducidas. En este orden de ideas, el material de aluminio presenta un buen comportamiento frente a lo que se requiere, por lo que una vez seleccionado, es imprescindible estudiar la perfilería existente de éste.

Perfiles de aluminio compacto, se descartan rápidamente, ya que al tener tanto material, el peso del sistema aumentaría, lo cual se quiere evitar con el fin de favorecer y facilitar su correcto funcionamiento. El perfil cuadrado hueco es viable con respecto a su peso, pero su geometría afecta directamente sus prestaciones mecánicas. Finalmente, el perfil de aluminio tipo hepco (figura 29), ofrece una resistencia mecánica mayor que la del perfil cuadrado hueco y su peso es mucho menor que el de los perfiles compactos. A partir de lo anterior, se decide implementar el perfil tipo hepco en la construcción de la máquina, el cual, además de las características mencionadas anteriormente, también nos permite facilidad en el ensamble debido a su geometría.

Figura 29. Perfil de aluminio tipo hepco.



Fuente: DIRECT INDUSTRY. [En línea]. [Consultado el 10 de septiembre de 2018]. Disponible en: [http://img.directindustry.es/images\\_di/photo-m2/16525-11032583.jpg](http://img.directindustry.es/images_di/photo-m2/16525-11032583.jpg)

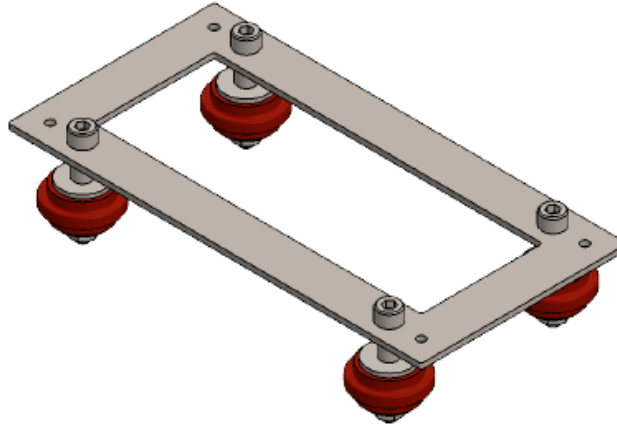
**5.3.2. Selección y análisis del sistema de guías del carro porta fibra.** El sistema de movimiento lineal horizontal del carro porta fibra debe ser tal, que permita un buen desplazamiento del sistema de alimentación de la fibra, con el fin de evitar la realización de operaciones de acabado a los árboles luego de ser curados. Este movimiento lineal se logra gracias a la transmisión de potencia y al deslizamiento de las piezas móviles de la máquina sobre las guías empleadas.

El perfil de aluminio tipo hepcos ofrece la posibilidad de que sus ranuras sirvan como guías para el desplazamiento de partes móviles. Por lo tanto se diseña un sistema de rodillos – guía dimensionado, de tal manera que soporte el peso del sistema de alimentación de fibra y encaje bien sobre el riel del perfil. El material seleccionado para los rodillos guía, además de permitir con precisión el deslizamiento de forma suave por el perfil, cuenta con la rigidez suficiente para evitar el exceso de vibraciones y por ende el desgaste del riel. Es importante tener en cuenta que una buena lubricación de las guías, es fundamental para evitar problemas durante el desplazamiento del carro portafibra.

El sistema de rodillos – guía del carro portafibra (figura 30), se fabrica de empack. Es un polietileno de alta densidad (HDPE), que cuenta con propiedades como bajo coeficiente de fricción, autolubricación, resistencia al impacto y al desgaste y soporta una temperatura de hasta 80 °C, las cuales cumplen en gran medida los requerimientos para tener un deslizamiento efectivo del carro portafibra.

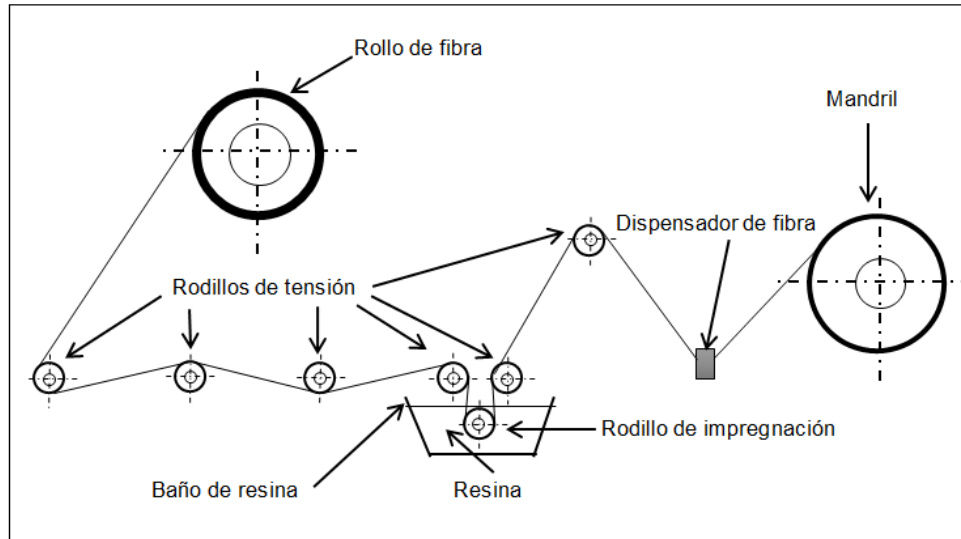
Las ruedas se obtienen mediante el mecanizado del polímero. La rodadura de estos rodillos – guía o ruedas, se da gracias al uso de 8 rodamientos, dispuestos dentro de las ruedas, las cuales a su vez se ensamblan, por medio de tornillería, a una placa de aluminio de un espesor considerable, con el fin de brindarle más resistencia al carro portafibra.

Figura 30. Carro portafibra



**5.3.3. Subsistema de tensión y bañera para la resina termoestable.** Las propiedades de rigidez, fuerza y flexibilidad de los árboles de transmisión, son producto de una buena compactación de la fibra. Esto se logra gracias a la tensión ejercida en la fibra y a la impregnación de la misma con resina epóxica. A partir de lo anterior, se hace necesaria la implementación de un mecanismo que permita tensionar la fibra y al mismo tiempo bañarla con la resina termoestable, con el fin de que el árbol de transmisión construido sea íntegro y bien conformado para que al momento del desmolde no sufra cambios en su geometría y pueda ser empleado en pruebas posteriores.

Figura 31. Subsistema de tensión e impregnación de la fibra.



En la figura anterior, se evidencia que el punto inicial del subsistema de tensión es el rollo de fibra, el cual está apoyado en dos láminas de aluminio, diseñadas para soportar el peso del rollo. El contenedor de la fibra es hueco, por lo que se fabricaron dos conos (figura 32) para acoplar éste con los soportes laterales de aluminio. La tensión de la fibra continúa al hacerla pasar por 7 rodillos, de los cuales, uno de ellos se ubica en la bañera que contiene la resina epóxica con el fin de que la fibra se impregne totalmente, y los siguientes dos a este, son los encargados de eliminar el exceso de material. Finalmente la fibra pasa a través del ojal o dispensador de fibra, el cual se encarga de disponerla en el molde de manera correcta, según el ángulo de bobinado al que se desea construir el árbol.

Los rodillos de tensión son fabricados en empack, los conos y la bañera se imprimen en nylon, manteniendo un diseño íntegro con todo el sistema. El ensamble a la estructura se hace por medio de tornillería.

Figura 32. Conos para acoplamiento del rollo de fibra.



**5.3.3.1. Cálculo de la tensión de la fibra.** La acción de halar la fibra se logra gracias al torque del mandril generado por el movimiento de rotación de éste y transmitido por el motor paso a paso. El cálculo de la tensión de la fibra depende de la cantidad de rodillos utilizados, por lo tanto, el diseño de este sistema supone una buena cantidad de éstos, con el fin de obtener una velocidad baja y constante en el rollo, para evitar los sobresaltos y vibraciones en la estructura. A continuación se presentan los cálculos realizados para este sistema, teniendo en cuenta que, inicialmente éste se encuentra en reposo y después de un segundo, la fibra adquiere una velocidad constante gracias a la rotación del mandril. No se considera la fricción de los rodillos con la fibra, tampoco la fricción de los apoyos del rollo, pues una aproximación de la dinámica de este movimiento es suficiente para entenderlo.

Figura 33. Diagrama de cuerpo libre del subsistema de tensión de la fibra.

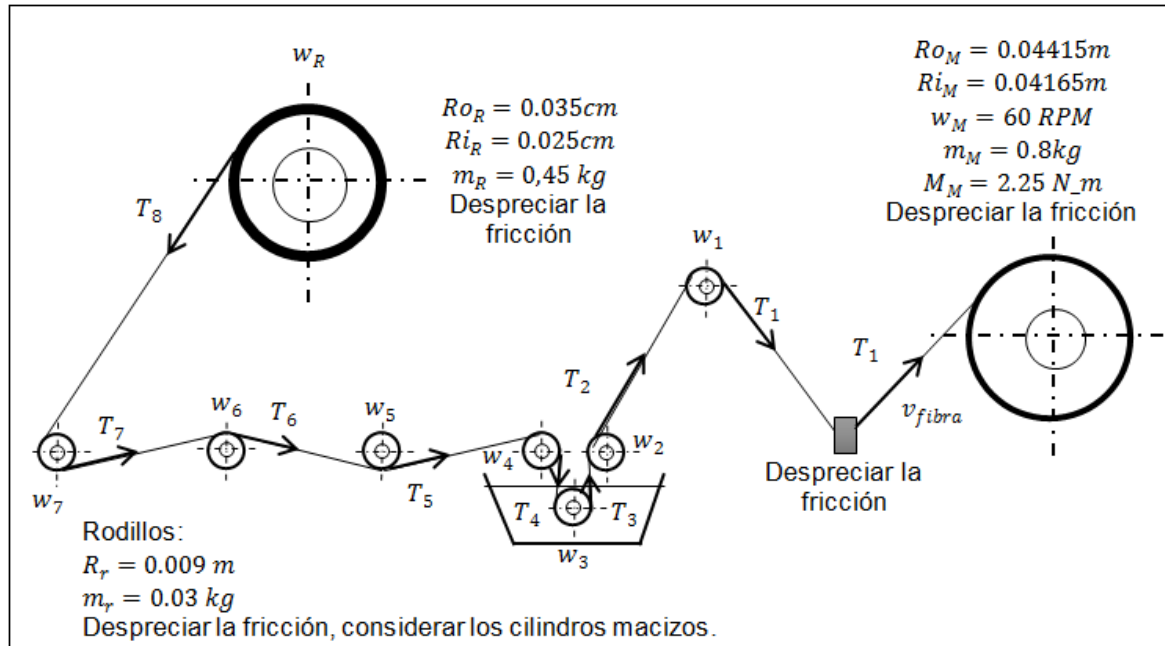


Tabla 6. Flujo de cálculo del subsistema de tensión de la fibra.

Cinemática del movimiento	
$v_{fibra} = w_m * \left(\frac{2\pi}{60}\right) * R_M$	$v_{fibra} = 0,2774 \text{ m/s}$ Velocidad de la fibra
$w_1 = w_2 = w_3 = w_4 = w_5 = w_6 = w_7$ $= \frac{v_{fibra}}{R_r}$	$w_1 = 30,82 \text{ rad/s} = 294,31 \text{ rpm}$ Velocidad angular de los rodillos
$\alpha_1 = \frac{w_1}{t}$	$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_6 = \alpha_7 = 30,82 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$ Aceleración angular de los rodillos
Geometría de los elementos	
$I_r = \frac{1}{2} * m_r * R_r^2$	$I_r = 0,000001215 \text{ kg} * \text{m}^2$ Inercia de los rodillos
$I_R = \frac{1}{2} * m_R * (Ro_R^2 + Ri_R^2)$	$I_R = 0,009 \text{ kg} * \text{m}^2$ Inercia del rollo de fibra

$I_M = \frac{1}{2} * m_M * (Ro_M^2 + Ri_M^2)$	$I_M = 0.002763 \text{ kg} * m^2$ Inercia del molde
<b>Dinámica de rotación</b>	
$\uparrow \sum M_M = I_m * \alpha_M$ $T_1 = \frac{1}{RO_M} \left[ \left( M_M - \left( I_r * \left( \frac{w_M}{t} \right) \right) \right) \right]$	$T_1 = 50.60 \text{ N}$ Tensión de la fibra en el rodillo 1
$\uparrow \sum M_1 = I_r * \alpha_1$ $T_2 = \frac{1}{R_r} [(T_1 * R_r) - (I_r * \alpha_1)]$	$T_2 = 50.59 \text{ N}$ Tensión de la fibra en el rodillo 2
$\uparrow \sum M_2 = I_r * \alpha_2$ $T_3 = \frac{1}{R_r} [(T_2 * R_r) - (I_r * \alpha_2)]$	$T_3 = 50.58 \text{ N}$ Tensión de la fibra en el rodillo 3
$\uparrow \sum M_3 = I_r * \alpha_3$ $T_4 = \frac{1}{R_r} [(T_3 * R_r) - (I_r * \alpha_3)]$	$T_4 = 50.57 \text{ N}$ Tensión de la fibra en el rodillo 4
$\uparrow \sum M_4 = I_r * \alpha_4$ $T_5 = \frac{1}{R_r} [(T_4 * R_r) - (I_r * \alpha_4)]$	$T_5 = 50.56 \text{ N}$ Tensión de la fibra en el rodillo 5
$\uparrow \sum M_5 = I_r * \alpha_5$ $T_6 = \frac{1}{R_r} [(T_5 * R_r) - (I_r * \alpha_5)]$	$T_6 = 50.55 \text{ N}$ Tensión de la fibra en el rodillo 6
$\uparrow \sum M_6 = I_r * \alpha_6$ $T_7 = \frac{1}{R_r} [(T_6 * R_r) - (I_r * \alpha_6)]$	$T_7 = 50.54 \text{ N}$ Tensión de la fibra en el rodillo 7
$\uparrow \sum M_7 = I_r * \alpha_7$ $T_8 = \frac{1}{R_r} [(T_7 * R_r) - (I_r * \alpha_7)]$	$T_8 = 50.53 \text{ N}$ Tensión de la fibra en el rodillo 8
$w_R = \frac{v_{fibra}}{R_R}$	$w_R = 4.623 \frac{rad}{s} = 44.14 \text{ rpm}$ Velocidad angular del rollo de fibra
$\uparrow \sum M_8 = I_R * \alpha_R$ $T_{8\_min} = \frac{1}{RO_R} (I_R * \alpha_R)$	$T_{8\_min} = 0.693 \text{ N}$ Tensión mínima para mover el rollo de fibra

#### 5.3.4. Soporte estructural móvil del sistema de alimentación de la fibra.

Teniendo en cuenta los requisitos de movimiento y bobinado de la fibra, el diseño que se adoptó para la labor del sistema de alimentación de la misma, cumple en gran medida con el objetivo de manufacturar los árboles de transmisión, teniendo como premisa el buen funcionamiento y resistencia del soporte estructural.

El carro portafibra, el subsistema de tensión y el recipiente de la resina, forman un conjunto de componentes, que está unido y dispuesto por un sistema estructural de perfil de aluminio tipo hepcos y láminas de aluminio (figura 28). Sobre este sistema estructural, actúan cargas debidas al peso de algunos elementos y a las tensiones de la fibra. Por lo tanto, la validación de la resistencia de la estructura seleccionada, se hace por medio de un cálculo, donde se analiza el efecto que tendría una determinada carga, en una barra de perfil de aluminio que se encuentra simplemente apoyada en sus extremos.

Figura 34. Soporte estructural del sistema de alimentación de la fibra.

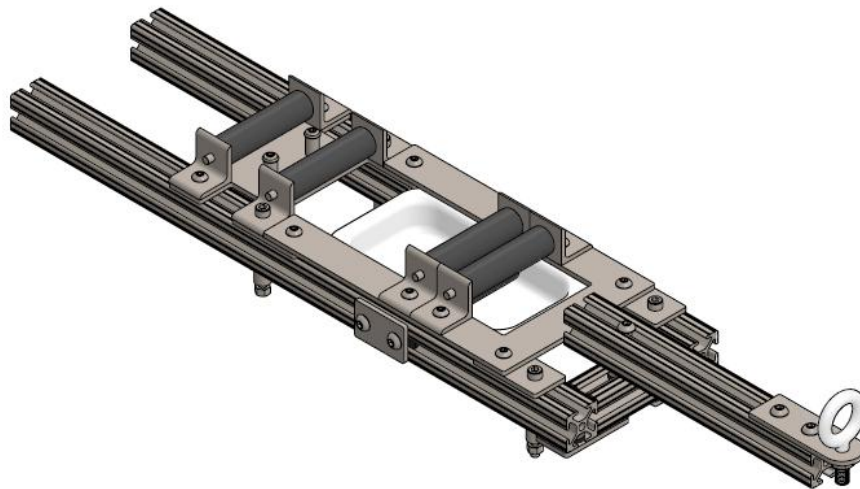
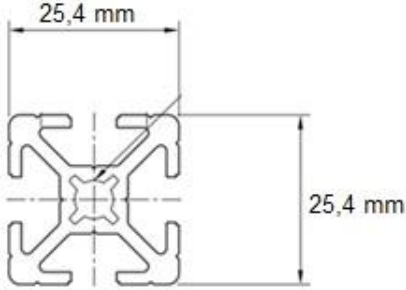


Tabla 7. Propiedades del perfil de aluminio tipo hepco.

	
Datos Técnicos	
Módulo de Young	$E = 70000 \text{ N/mm}^2$
Módulo elástico transversal	$G = 27000 \text{ N/mm}^2$
Densidad	$D = 2.7 \text{ kg/dm}^3$
Momentos de inercia	$I_x = I_y = 2.7 \text{ cm}^4$
Módulos de sección	$W_x = W_y = 1.8 \text{ cm}^3$
Tensión del límite elástico	$\sigma_{max} = 190 \text{ N/mm}^2$

Fuente: REXROTH MEDIENVERZEICHNIS. [En línea]. [Consultado el 10 de septiembre de 2018].

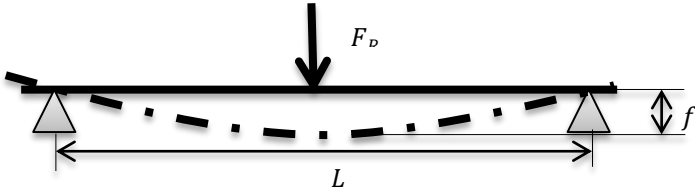
Disponible

en:

[http://www.boschrexroth.com/various/utilities/mediadirectory/index.jsp?publication=NET&search\\_query=3842540238](http://www.boschrexroth.com/various/utilities/mediadirectory/index.jsp?publication=NET&search_query=3842540238)

A partir de lo anterior, se procede al cálculo para definir las flechas del perfil cuando se someten a esfuerzos y el esfuerzo de flexión del mismo.

Tabla 8. Cálculo del desplazamiento vertical y el esfuerzo de flexión del perfil.

	
Datos Conocidos	
Fuerza resultante del peso del perfil y sus componentes	$F_R = 20 \text{ kg} * 9.81 \text{ m/s}^2 = 196.2 \text{ N}$

Longitud de la sección de perfil	$L = 450 \text{ mm}$
<b>Cálculo de flecha en viga sometida a esfuerzo</b>	
$f = \frac{F_R * L^3}{48E * I * 10^4}$	$f = 0.197 \text{ mm}$
<b>Cálculo de esfuerzo de flexión</b>	
$\sigma = \frac{F_R * L}{4W * 10^3}$	$\sigma = 12.2625 \text{ N/mm}^2$
<b>Cálculo de la fuerza máxima permisible</b>	
$\sigma_{max} = \frac{F_R * L}{4W * 10^3}$	$F_R = 3040 \text{ N} \quad m = \frac{3040}{9.81} = 309 \text{ kg}$

Se obtiene un desplazamiento de 0,197 mm, el cual es despreciable, al igual que la flexión, cuyo valor es mucho menor al límite elástico. También se calcula la fuerza máxima en función del límite elástico, con el fin de obtener un valor más apreciable de cuanta carga es capaz de soportar el perfil. Por lo tanto este tipo de perfil cumple en gran medida los requerimientos de resistencia del sistema de alimentación de la fibra.

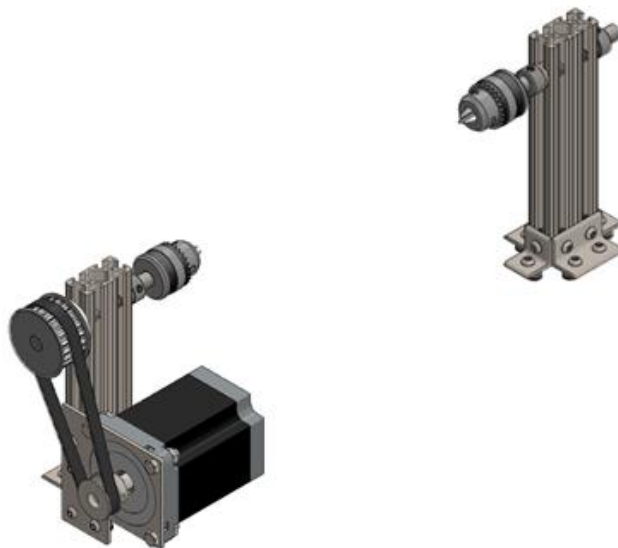
#### 5.4. SISTEMA DE SUJECIÓN DE LA MATRIZ

La transmisión del movimiento giratorio de uno de los motores paso a paso, se realiza por medio de poleas a uno de los mandriles del sistema de sujeción (figura 35). El sistema está compuesto por dos mandriles, acoplados cada uno a su respectivo eje mediante una sujeción roscada. Cada eje es soportado por dos cojinetes de fricción de bronce sinterizado, permitiendo el deslizamiento del mismo. El movimiento axial de los ejes, se bloquea por medio de dos collarines que se ajustan a cada lado de la estructura. Para dar soporte se utiliza un perfil tipo hepcos de 2" x 1", teniendo en cuenta que gracias a sus propiedades

mecánicas, éste resiste en gran medida el peso que se vaya a generar entre los dos mandriles.

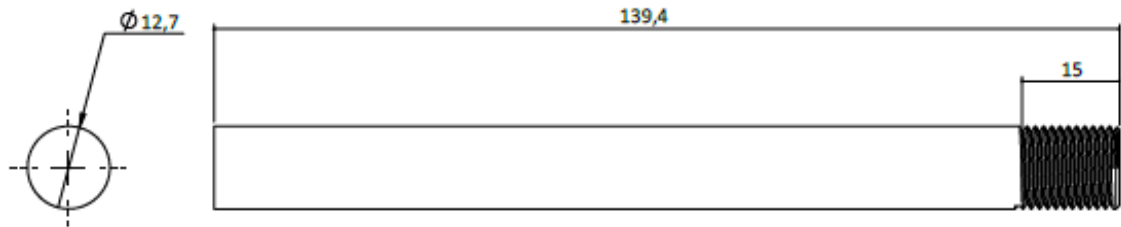
Este sistema además de sostener el molde que se vaya a utilizar para bobinar la fibra entre sus dos mandriles, se encarga de halar y tensionar la fibra con su movimiento de rotación. Por lo tanto, la selección y diseño de los elementos que lo componen, debe ser tal que, el movimiento giratorio sea lo más seguro y armónico posible; también, debe soportar las cargas impuestas por el peso del molde, la tensión de la fibra y el peso del prototipo final.

Figura 35. Sistema de sujeción de la matriz.



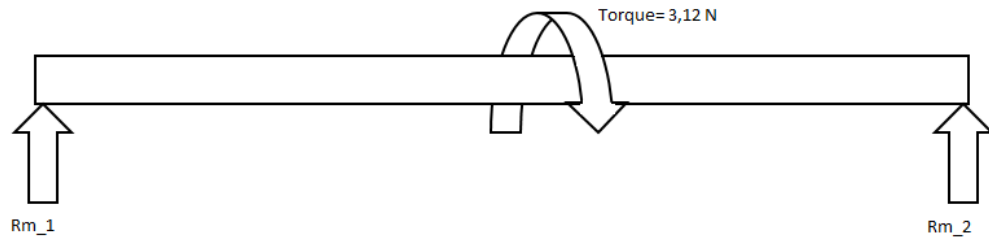
**5.4.1. Diseño del eje del sistema de sujeción de la matriz.** Los ejes diseñados a continuación, se encargan de transmitir el movimiento de rotación y soportar las cargas debidas a la tensión de la fibra, al peso final del árbol de transmisión de potencia y a los elementos como los mandriles y poleas. Para tal fin se fabrican en acero SAE 1045 laminado en caliente.

Figura 36. Diseño conceptual del eje.



Como primer paso, para calcular el diámetro del eje, se debe conocer la fuerza que actúa sobre los mandriles. Esta fuerza, es la tensión de la fibra cuando es bobinada en el molde y es máxima en su centro.

Figura 37. Diagrama de cuerpo libre de la matriz.



Considerando que el molde tiene un diámetro de 17,5 mm y el torque del motor paso a paso, girando a 60 rpm es de 3.12 Nm aproximadamente, entonces la tensión sería igual a:

$$Torque = \frac{Tensión * D_{molde}}{2}$$

$$Tensión = \frac{2 * Torque}{D_{molde}} = \frac{2 * 3,12 N.m}{0,0175 m} = 356,57 N$$

Al estar ubicada en el centro del molde las reacciones  $Rm_1$  y  $Rm_2$ , que representan los dos mandriles, serian iguales:

$$Rm_1 = Rm_2$$

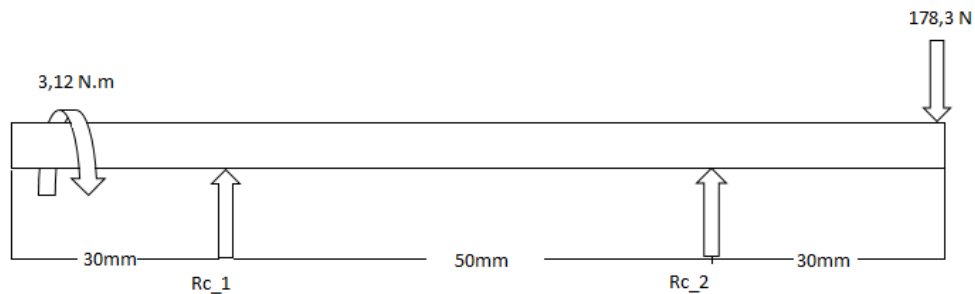
Haciendo sumatoria de fuerzas:

$$\sum F_Y = 2 * Rm_1 - 356,57 = 0$$

$$Rm_1 = Rm_2 = 178,3 N$$

Con el resultado obtenido, es posible realizar un estudio del eje.

Figura 38. Diagrama de cuerpo libre del eje.



En la figura anterior, se pueden observar las reacciones  $Rc_1$  y  $Rc_2$ , a las que estarán sometidos los cojinetes. La fuerza de 178,3 N, que ejerce el mandril sobre el eje. Por último, el torque de 3,12 Nm, es aportado por el motor, transmitido por medio de una polea sincrónica y se expresa de la siguiente manera:

$$Torque = \frac{F_{Tan} * D_{Polea}}{2}$$

$$F_{Tan} = \frac{Torque * 2}{D_{Polea}} = \frac{3,12 N.m * 2}{0,03 m} = 208 N$$

De esta manera ya se pueden establecer dos ecuaciones con dos incógnitas y obtener el resultado de la fuerza sobre los cojinetes:

$$\text{Ecuación 1} \rightarrow \sum F_Y = R_{c1} + R_{c2} - 386,3 = 0$$

$$\text{Ecuación 2} \rightarrow \sum F_{M_{rc1}} = -208 * 0,03 - R_{c2} * 0,05 + 178,3 * 0,08 = 0$$

Solucionando el sistema de ecuaciones se obtiene que:

$$R_{c1} = 225,82 N \quad \text{y} \quad R_{c2} = 160,48$$

Al obtener los diagramas de cortante y momentos flectores usando el software en línea SkyCiv, se puede encontrar el momento flector máximo, el cual es de 6,24 Nm. Éste se utiliza para obtener el diámetro mínimo del eje usando la teoría de energía de distorsión resumida en la ecuación de la tabla 9.

Figura 39. Diagrama de cuerpo libre, fuerzas cortantes y momentos flectores del eje.

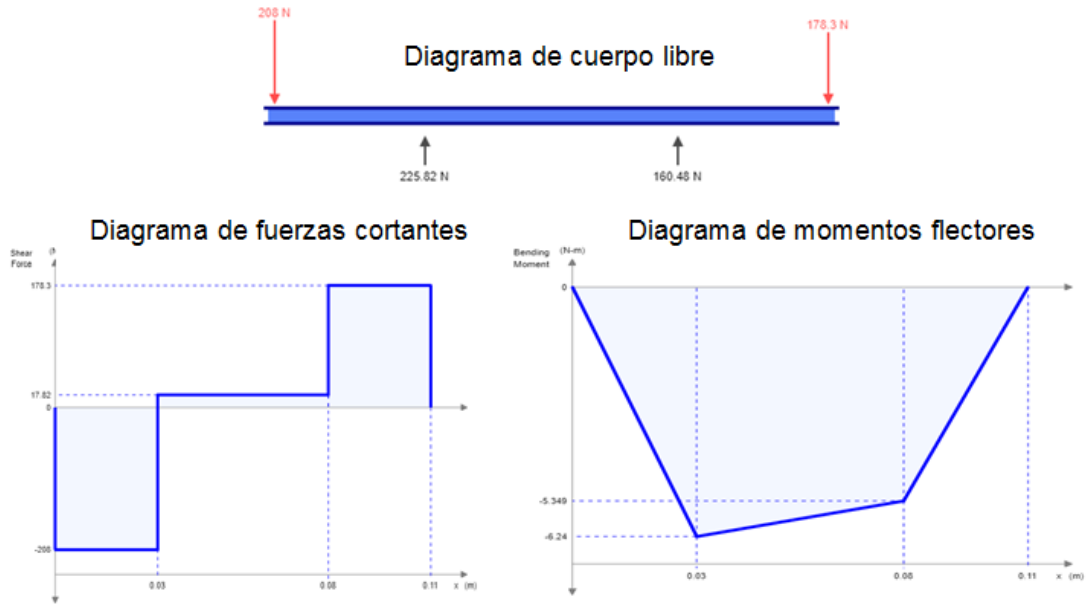


Tabla 9. Diseño del eje.

$$D = \left[ \frac{32 * N}{\pi} * \left[ \left( (K_f * M_{Max}) / S_e \right)^2 + \frac{3}{4} * \left( (K_{fs} * T_{max}) / S_y \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$S_e = k_f * k_s * k_r * k_t * k_m * S_e' \qquad S_e' = 0.5 * S_U$$

<b>Propiedades del acero SAE 1045 laminado en caliente</b>		
<b>Descripción</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Resistencia a la fluencia	$S_y$	650 MPa (aprox.)
Resistencia a la tensión	$S_U$	410 MPa (aprox.)
Límite de resistencia a la fatiga	$S_e$	180 MPa

Límite a la fatiga de la probeta bajo condiciones ideales	$Se'$	325 MPa
Factor de acabado de la superficie	$k_f$	0.7 <sup>12</sup>
Factor de tamaño ( $k_s = 1.189 * d^{-0.112}$ , asumiendo $d = 15mm$ )	$k_s$	0.88
Factor de confiabilidad	$k_r$	0.9
Factor de temperatura ( <i>el eje no estará sometido a grandes cambios de temperatura</i> )	$k_t$	1
Factor diverso ( <i>no hay un ambiente agresivo para el material</i> )	$k_m$	1
Concentrador de esfuerzos ( <i>el eje no presenta muescas ni esfuerzos normales</i> )	$K_{fs}$	1
Factor de concentrador de esfuerzos ( <i>el eje no presenta muescas ni esfuerzos normales</i> )	$K_f$	1
<b>Cálculo del diámetro mínimo del eje</b>		
Factor de seguridad	$N$	3
Momento flector máximo	$M_{Max}$	6,24 Nm
Torque máximo	$T_{max}$	3,12 Nm
Diámetro mínimo del eje	$D$	10 mm

<sup>12</sup> HAMROCK, Bernard J.; JACOBSON, Bo O. y SCHMID, Steven R. Elementos de máquinas. México D. F.: McGraw-Hill, 2000. p. 273.

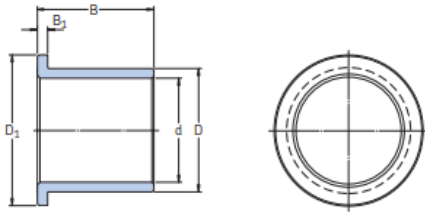
Con los resultados obtenidos en el proceso de cálculo anterior, se decide fabricar el eje con un diámetro de  $\frac{1}{2}$ ", debido a la facilidad de su construcción. Por lo tanto, el factor de seguridad se verá aumentado.

**5.4.2. Selección de los cojinetes de deslizamiento.** El uso de rodamientos o cojinetes de deslizamiento, dependerá factores tales como, el tamaño de la carga y la velocidad de operación de la máquina. Por lo que las características que presenta el cojinete a la hora de soportar el eje junto con las fuerzas del sistema de sujeción, son adecuadas, ya que a diferencia de los rodamientos, los cojinetes de fricción son piezas fácilmente desmontables que se adaptan entre el eje y el soporte estructural. También, este elemento al estar sometido a bajos esfuerzos y velocidades, presentara una fricción baja, lo que lo hace conveniente para su implementación en el sistema.

En aplicaciones de máquinas herramientas, se utilizan cojinetes de fricción de bronce sinterizado, ya que son autolubricantes y libres de mantenimiento, lo que favorece su elección a la hora de pensar en el uso de cojinetes.

En la tabla 10, se resume el proceso de cálculo para la selección del cojinete de fricción. Allí suponemos las dimensiones como el diámetro del agujero y el ancho del casquillo para luego aplicar las ecuaciones de la tabla, teniendo en cuenta las reacciones calculadas anteriormente en los cojinetes y la velocidad de rotación del sistema.

Tabla 10. Cálculos para la selección del cojinete de deslizamiento.

 $v = n * 2\pi * d / (60 * 1000)$ $p = F / (d * B)$		
<b>Cálculo de la velocidad de deslizamiento</b>		
Descripción	Símbolo	Valor
Velocidad de deslizamiento	$v$	$0.07 \text{ m/s}$
Velocidad de rotación	$n$	$60 \text{ RPM}$
Diámetro del agujero del casquillo	$d$	$12 \text{ mm}$
<b>Cálculo de la carga específica del cojinete</b>		
Carga específica del cojinete	$p$	$1.57 \text{ N/mm}$
Carga del rodamiento	$F$	$225.82 \text{ N}$
Diámetro del agujero del casquillo	$d$	$12 \text{ mm}$
Ancho del casquillo	$b$	$12 \text{ mm}$

Una vez calculada la velocidad de deslizamiento y la carga específica del cojinete, guiándonos de los resultados obtenidos, seleccionamos el tipo de cojinete. Debido a la proximidad entre los resultados y las características del cojinete de fricción de bronce sinterizado, se optó por elegir este. Para la elección de la referencia, se tienen en cuenta las dimensiones del eje y el soporte estructural, por ende se elige el cojinete cuya referencia es PSMF 121812 A51, como se muestra a continuación.

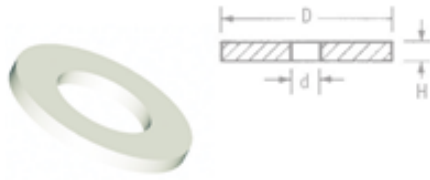
Figura 40. Características y selección del cojinete de bronce sinterizado con pestaña.

	Solid bronze	Sintered bronze	Designation system					
Temperature range, °C	-40 .. +250	-10 .. +90	PSMF	08	12	08		
Friction coefficient, $\mu$	0,08 .. 0,15	0,05 .. 0,10		d	D	B		
Permissible load, N/mm <sup>2</sup>				Flanged				
- dynamic	25	10		Metric				
- static	45	20		Sintered bronze				
Permissible sliding velocity, m/s	0,5	0,25 .. 5		Plain bearing				
Shaft tolerance	e7 - e8	f7 - f8						
Housing tolerance	H7	H7						
Shaft roughness $R_a$ , $\mu\text{m}$	0 .. 1,0	0,2 .. 0,8						
Shaft hardness, HB	165 - 400	200 - 300						
Assortment and product series designation	PBM	PSM						
	PBMF	PSMF						
			Designation <sup>1)</sup>	d	D	B	D <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>
				mm	mm	mm	mm	mm
			PSMF 030504 AS1	3	5	4	8	1,5
			PSMF 030604 AS1	3	6	4	9	1,5
			PSMF 040804 AS1	4	8	4	12	2
			PSMF 040806 AS1	4	8	6	12	2
			PSMF 050904 AS1	5	9	4	13	2
			PSMF 050905 AS1	5	9	5	13	2
			PSMF 050908 AS1	5	9	8	13	2
			PSMF 051006 AS1	5	10	6	14	2
			PSMF 061004 AS1	6	10	4	14	2
			PSMF 061006 AS1	6	10	6	14	2
			PSMF 061010 AS1	6	10	10	14	2
			PSMF 061206 AS1	6	12	6	14	2
			PSMF 081206 AS1	8	12	6	16	2
			PSMF 081208 AS1	8	12	8	16	2
			PSMF 081212 AS1	8	12	12	16	2
			PSMF 081408 AS1	8	14	8	18	3
			PSMF 101608 AS1	10	16	8	22	3
			PSMF 101610 AS1	10	16	10	22	3
			PSMF 101616 AS1	10	16	16	22	3
			PSMF 121808 AS1	12	18	08	24	3
			PSMF 121810 AS1	12	18	10	24	3
			PSMF 121812 AS1	12	18	12	24	3
			PSMF 121820 AS1	12	18	20	24	3

Fuente: SKF. [En línea]. [Consultado el 13 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.skf.com/binary/96-120169/SKF-bushings-thrust-washers-and-strips-1-EN.pdf>

**5.4.3. Selección de las arandelas y los collarines de los ejes.** Es importante tener en cuenta la función que cumple cada uno elementos. Para el caso de las arandelas, es la de reducir las cargas axiales que se puedan presentar en el sistema de sujeción, durante la operación de la máquina. A partir de esto y basados en el diámetro exterior del cojinete, se opta por seleccionar una arandela de nylon, del fabricante Essentra Components.

Figura 41. Arandela de nylon 6.6 natural estándar DIN 125.



Part No.	Tamaño (mm)	d (mm)	D (mm)	H (mm)
005070000VR	M18	19.0	34.0	3.0

Fuente: ESSENTRA COMPONENTS. [En línea]. [Consultado el 13 de septiembre de 2018].  
 Disponible en: <http://www.essentracomponents.es/>

Los collarines se seleccionan en base al diámetro del eje y su función es la de sujetar el eje en sus extremos por medio de tornillos prisioneros, evitando el movimiento axial del mismo.

Figura 42. Collarín de eje MSC-12-SS.

Clave de producto: MSC-12-SS  
 Tipo de producto: Collarín de Eje  
 Tipo: Tornillo de Fijación  
 Material: Acero Inoxidable 303 (DIN 1.4305)  
 Acabado: Brillante  
 País de origen: Estados Unidos

**Medidas**  
 Agujero B: 12 mm  
 Diámetro externo OD: 22 mm  
 Espesor W: 12 mm

**Tornillos**  
 Tornillo prisionero: M6x6  
 Material del tornillo: Acero Inoxidable 18-8  
 Acabado de los tornillos: Brillante  
 Par de apretamiento: 5,76 Nm  
 Llave Allen: 3,0 mm

Fuente: RULAND. [En línea]. [Consultado el 13 de septiembre de 2018]. Disponible en:  
<http://espanol.ruland.com/collar-de-eje-msc.asp>

**5.4.4. Selección de los mandriles.** La selección de los elementos anteriormente mostrados, se hace de acuerdo al diseño del eje, por lo que los mandriles a utilizar no son la excepción. Se debe tener en cuenta el tipo de acople empleado entre el mandril y el eje, es decir, la sujeción roscada. También y no menos importante, el rango de abertura que puede llegar a tener, teniendo en cuenta los requerimientos de diseño. A partir de las consideraciones anteriores, nos basamos en el catálogo Blue-Master para realizar dicha selección.

Figura 43. Selección del mandril DC7-16-1/2.



**LIGERO**

- Taladro tanto en modo percusión como en rotación.
- Incluye llave

Ref. DC7

	Mín.-Máx. mm	A	D <sub>2</sub> mm	L <sub>1</sub> mm	€
DC7-06-B10	0,6-6	B10	30	50	19,09
DC7-06-3/8	0,6-6	3/8-24 UNF	30	50	19,09
DC7-10-3/8	1,5-10	3/8-24 UNF	33	59	18,67
DC7-10-1/2	1,5-10	1/2-20 UNF	33	59	18,67
DC7-13-B12	1,5-13	B12	42	70	22,17
DC7-13-B16	1,5-13	B16	42	70	22,17
DC7-13-3/8	1,5-13	3/8-24 UNF	42	70	22,17
DC7-13-1/2	1,5-13	1/2-20 UNF	42	70	22,17
DC7-13-SDS	1,5-13	1/2-20 UNF	42	70	23,33
DC7-16-B16	3-16	B16	51	87	28,00
<b>DC7-16-1/2</b>	<b>3-16</b>	<b>1/2-20 UNF</b>	<b>51</b>	<b>87</b>	<b>28,00</b>
DC7-16-5/8	3-16	5/8-16 UNF	51	87	28,00

Fuente: BLUE-MASTER. [En línea]. [Consultado el 13 de septiembre de 2018]. Disponible en: [http://www.bluemaster.es/ContentNoHTML/Descargas/Catalogo\\_Bluemaster/ES/03C\\_PORTABRO CAS\\_BM\\_2017.pdf](http://www.bluemaster.es/ContentNoHTML/Descargas/Catalogo_Bluemaster/ES/03C_PORTABRO CAS_BM_2017.pdf)

## 5.5. SISTEMA ELÉCTRICO Y DE CONTROL

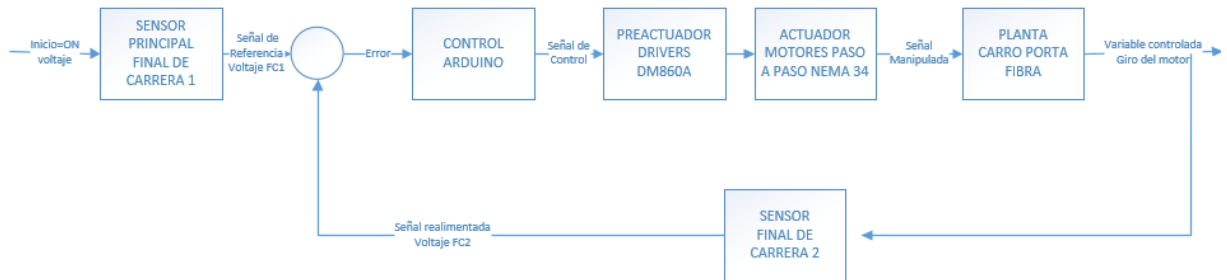
El sistema de control incorporado en la máquina, cuenta con los componentes apropiados para favorecer el uso de una programación acertada y flexible, dando

así, un mayor nivel tecnológico en cuanto a las funciones automáticas de la misma.

Este apartado abarca el diseño de la plataforma semiautomática y la configuración de los elementos del sistema de control de la máquina. Inicialmente se define el lazo de control del proceso, se presentan las características de los componentes eléctricos y electrónicos de la máquina junto con sus conexiones. Para finalizar se muestra el algoritmo y programación del sistema de control.

**5.5.1. Diseño conceptual del sistema de control.** Se define un sistema de control de lazo cerrado, donde la acción de control se ejecuta y está en función de la señal de salida, por lo que la retroalimentación desde un resultado final, es relevante para este tipo de sistemas de bucle (figura 44). Se da inicio con un comando ejecutado a través del diálogo en la HMI, el cual va dirigido al controlador, seguido por los preactuadores, los actuadores, la máquina, los sensores y regresa al controlador donde se define la acción de control. Dentro de las características que posee la máquina, se encuentra la de realizar el ajuste automático del cambio de giro del motor, así como también, variar la velocidad del mismo, controlar la cantidad de ciclos, el inicio y la parada del proceso y permitir la correcta visualización de los parámetros que se van a definir antes de cada procedimiento.

Figura 44. Sistema de control de lazo cerrado.



A continuación se definen las características de los componentes que hacen parte del sistema de control, con el fin de tener una idea clara y concisa de la función que cada elemento cumple.

**5.5.2. Características de los componentes del sistema de control.** El sistema de control, se elaboró en base a una plataforma de prototipos electrónicos de código abierto (Arduino Mega), la cual se conectó y configuró con otros elementos, para controlar, mediante una programación acertada, velocidades, ciclos y cambios de giro, y la parada e inicio de los motores paso a paso. Los componentes que forman parte del sistema de control son:

**5.5.2.1. Arduino MEGA.** Es un tablero de microcontroladores, basado en el ATmega2560. Tiene 54 pines digitales de entrada/salida (de los cuales 15 se pueden usar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UART (puertos serie de hardware), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación (7 - 12V), un encabezado ICSP, y un botón de reinicio<sup>13</sup>. Esta placa está diseñada para proyectos complejos, por lo que al ser programada

<sup>13</sup> ARDUINO. Arduino MEGA 2560 REV3. [En línea]. Arduino. 2018. (Recuperado en 15 septiembre 2018.) Disponible en <https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>

eficazmente, cumpliendo con los requerimientos del funcionamiento de la máquina, provee un control óptimo de todo el proceso de fabricación de los prototipos de árboles de transmisión de potencia.

Figura 45. Arduino MEGA 2560



Fuente: ARDUINO. [En línea]. [Consultado el 15 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>

**5.5.2.2. Display LCD 20x4.** Dispositivo alfanumérico de matriz de puntos, que contiene 20 columnas y 4 filas. Sirve para mostrar mensajes a través de números, letras o símbolos. La tensión de operación es de 5V DC. Dispone de unos pines para conectar un microcontrolador y en su pantalla se visualizan los valores de los ciclos y la velocidad programada para el funcionamiento de uno de los motores paso a paso.

Figura 46. Display LCD 20x4.



Fuente: MAURO ALFIERI. [En línea]. [Consultado el 15 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.mauroalfieri.it/elettronica/tutorial-arduino-scrutte-scorrevoli-su-lcd.html>

**5.5.2.3. Teclado matricial 4x4.** Es una colección de botones que usa una combinación de filas y columnas para conocer el estado de cada tecla. Se conecta máximo a 24V DC y su función es la de permitir el ingreso de los valores de los ciclos y velocidades a configurar, para el correcto funcionamiento del motor.

Figura 47. Teclado matricial 4x4.



Fuente: NAYLAMP MECHATRONICS. [En línea]. [Consultado el 15 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://naylampmechatronics.com/interfaz-de-usuario/19-teclado-matricial-4x4.html>

**5.5.2.4. Finales de carrera.** Forma parte del conjunto de los sensores de proximidad, mejor conocidos como sensores de contacto. Son dispositivos electromecánicos que constan de un accionador y un conjunto de contactos que abren o cierran una conexión eléctrica. Se utilizan con el fin de controlar el sentido de giro de uno de los motores, la cantidad de ciclos y la finalización de cada proceso.

Figura 48. Final de carrera.



Fuente: DIGI-KEY CORPORATION. [En línea]. [Consultado el 15 de septiembre de 2018].  
Disponible en: <https://www.digikey.com/catalog/en/partgroup/crash-sensor-left-and-right/75806>

**5.5.2.5. Fuente de voltaje 60V – 20A.** Convierte la corriente alterna (AC), en una o varias corrientes continuas (DC). Usada para alimentar los circuitos de los aparatos electrónicos, como los motores paso a paso, los drivers, el arduino, etc.

Figura 49. Fuente de voltaje 60V – 20A.



Fuente: MERCADO LIBRE. [En línea]. [Consultado el 15 de septiembre de 2018]. Disponible en: [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-593910288-fuente-de-alimentacion-60v-20a-1200-watts-fa20-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-593910288-fuente-de-alimentacion-60v-20a-1200-watts-fa20-_JM)

**5.5.2.6. Drivers DM860A.** Es un tipo de impulsor que está diseñado para usarse con motores paso a paso híbridos de 2 fases de todo tipo, con un diámetro exterior de 57 mm a 110 mm y una corriente de fase inferior a 8,0A<sup>14</sup>. El circuito de control de este driver, permite que el motor funcione sin problemas, casi sin ruido ni vibraciones. Se usa ampliamente en dispositivos de control numérico de tamaño medio y grande, como la máquina curvadora, la máquina CNC y la máquina bordadora de computadoras, máquinas de embalaje, etc. Las especificaciones eléctricas que definen a este driver están en la tabla 11.

---

<sup>14</sup> CHANGZHOU LONGS MOTOR CO., LTD. Stepper Motor Driver-DM860A. [En línea]. Changzhou Longs Motor Co., Ltd. 2018. (Recuperado en 15 septiembre 2018.) Disponible en <http://www.longs-motor.com/stepper-motor-driver-dm860a.html>

Figura 50. Driver DM860A.



Fuente: CHANGZHOU LONGS MOTOR CO., LTD. [En línea]. [Consultado el 15 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.longs-motor.com/stepper-motor-driver-dm860a.html>

Tabla 11. Especificaciones eléctricas del driver DM860A.

<b>Voltaje de entrada</b>	24 - 80V DC
<b>Corriente de entrada</b>	< 6A
<b>Corriente de salida</b>	2.8 ~ 7.8A
<b>Consumo</b>	80W, Seguro interno: 10A
<b>Temperatura</b>	Trabajo: -10 ~ 45°C Almacenamiento: -40 ~ 70°C
<b>Frecuencia de entrada de pulso</b>	Hasta 400 kHz
<b>Peso</b>	500 g

Fuente: CHANGZHOU LONGS MOTOR CO., LTD. [En línea]. [Consultado el 15 de septiembre de 2018]. Disponible en: <http://www.longs-motor.com/stepper-motor-driver-dm860a.html>

**5.5.2.7. Motor paso a paso NEMA 34.** Conocido también como motor de pasos, es un dispositivo electromecánico que convierte una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos; lo que significa que es capaz de girar una cantidad de grados (paso o medio paso) dependiendo de sus entradas de control.<sup>15</sup> Este motor presenta las ventajas de tener precisión y repetitividad en cuanto al posicionamiento. Las aplicaciones más principales de este motor son: fresadoras, tornos CNC, cortadoras láser, cortadoras de plasma CNC, etc.

Figura 51. Motor paso a paso NEMA 34.



Fuente: CNC REPOWERING. [En línea]. [Consultado el 15 de septiembre de 2018]. Disponible en: <https://cncrepowering.com.co/es/motores-paso-a-paso/232-motor-paso-a-paso-nema-34.html>

**5.5.3. Diseño en detalle para el sistema de control.** La programación para el control de los componentes implementados en el sistema semiautomático de la

---

<sup>15</sup> MECAFENIX, Frank. Motor paso a paso, ¿qué es y cómo funciona?. [En línea]. Ingeniería Mecafenix. 2017. (Recuperado en 15 septiembre 2018.) Disponible en <http://www.ingmecafenix.com/electricidad-industrial/motor-paso-a-paso/>

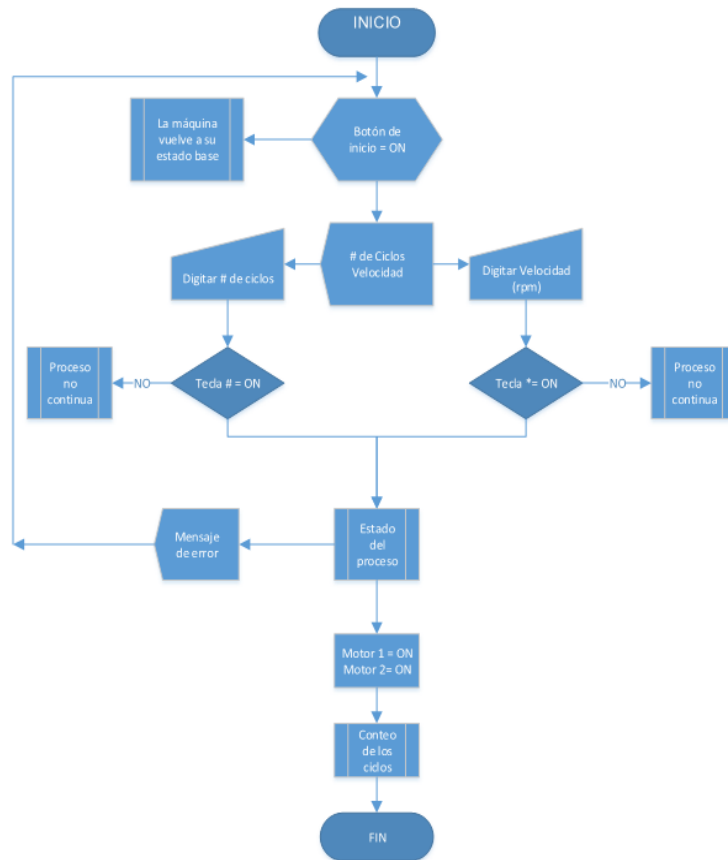
máquina, se elaboró en el software de código abierto Arduino, cumpliendo con los requisitos de funcionamiento y control planteados a continuación:

- Control del inicio de la operación: antes de cada proceso, el movimiento del carro portafibra debe iniciar desde una posición estándar para permitir que el bobinado de la fibra siempre tenga una referencia.
- Es necesario implementar un paro de emergencia, ya que, si el proceso presenta alteraciones, fallos o modificaciones en su funcionamiento, fuera de lo común, detenerlo es la mejor opción, con el fin de no provocar accidentes.
- Permitir la configuración de la velocidad (300 - 1000 rpm) del motor que mueve el carro portafibra. Es un requisito de diseño que se hace con el fin de caracterizar la velocidad, de acuerdo a los prototipos desarrollados y llevados a prueba.
- Los ciclos (0 – 999), es decir las veces que el carro portafibra vuelve a encontrarse con su punto de origen. Es indispensable en la caracterización del proceso, pues permitirá dar el espesor al prototipo.
- Por medio de un lazo cerrado de control, permitir el cambio de giro del motor que mueve el carro portafibra, controlado por sensores de proximidad: en este caso, los finales de carrera; que también sirven para el conteo de los ciclos y el final del proceso.
- Proporcionar la visualización (pantalla LCD) y la configuración de la velocidad y los ciclos por medio de un teclado matricial, para orientar al operario de la máquina y dar una mejor HMI.

- El control de encendido y apagado de los dos motores debe ser idéntico para permitir el correcto funcionamiento del proceso.
- La velocidad del motor que mueve el mandril es constante (60 rpm), pero aun así, es necesario que se pueda variar en el programa configurado en Arduino.

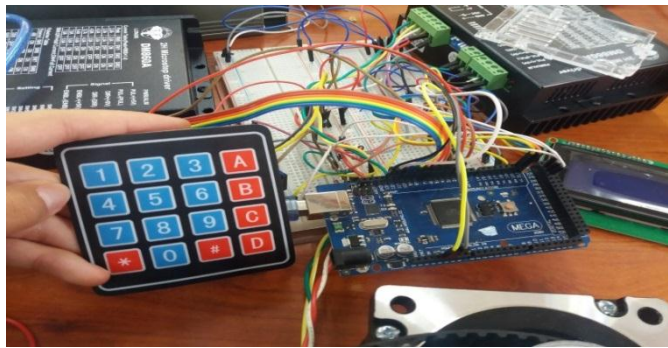
**5.5.4. Algoritmo del sistema de control.** El diagrama de flujo establecido para el funcionamiento secuencial del algoritmo del sistema de control del proceso, da la base fundamental para la correcta programación del software implementado en esta máquina.

Figura 52. Diagrama de flujo del sistema de control.



**5.5.5. Plano de conexiones eléctricas y electrónicas.** Inicialmente, las conexiones electrónicas de todos los componentes que hacen parte del sistema de control, se realizaron en una protoboard, con el fin de observar y comprobar el correcto funcionamiento del mismo. En la figura 34 se observa como fue la conexión de este sistema y el desorden del mismo. Estas conexiones se hicieron posibles con la ayuda del datasheet de cada componente.

Figura 53. Prueba piloto de las conexiones electrónicas y eléctricas.



Debido a lo anterior, se hizo necesario el diseño de una tarjeta electrónica PCB (figura 54), con el fin de reducir el uso de materiales y también hacer más compacto y estético el producto final (figura 55).

Figura 54. Diseño de la tarjeta electrónica PCB.

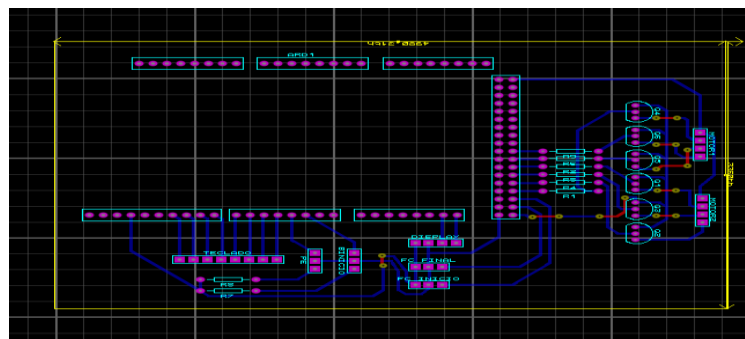
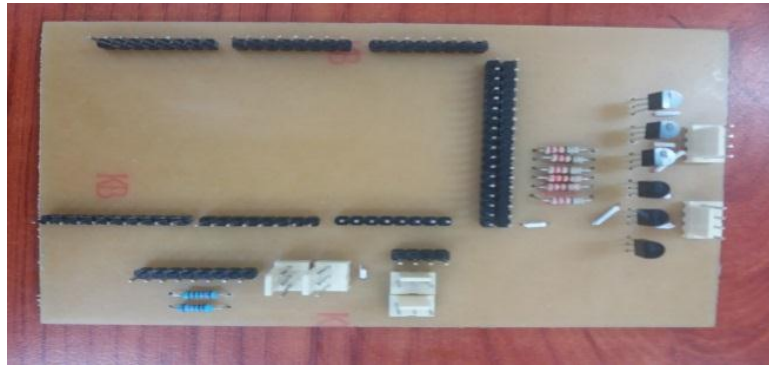


Figura 55. Tarjeta electrónica PCB.



En la figura 56, se observa el producto final del plano de conexiones. Es más compacto, por ende se aprovecha de una mejor manera el espacio del sistema de control. Esto se da, gracias al desarrollo de la tarjeta electrónica PCB y al diseño del circuito electrónico (anexo D).

Figura 56. Disposición del sistema de control de la máquina.



**5.5.6. Software del sistema de control.** Se enciende la máquina oprimiendo el botón de inicio, el carro automáticamente encuentra su punto de referencia cuando haga contacto con el final de carrera. En ese momento, se ingresan los valores de los números de ciclos y la velocidad, por ejemplo: 4# 500\*. Cuando el motor que mueve el carro alcance el número de ciclos, la máquina se detiene. En algún caso que el usuario ingrese mal los parámetros, inmediatamente en la pantalla aparecerá el comando “valor no aceptado” y se debe proceder a oprimir nuevamente la tecla numeral (#) o asterisco (\*), hasta que aparezca el comando “reset”; en ese momento, se debe oprimir el botón de inicio para empezar el proceso otra vez.

El sistema cuenta con un paro de emergencia, el cual debe ser accionado únicamente cuando el proceso presente algún fallo, con el fin de evitar condiciones inseguras para el operario y averías de la máquina.

Los ciclos van desde 0 hasta 999 y la velocidad para el motor que se encarga de mover el carro porta fibra se encuentra en el rango de 300 a 1000 rpm.

Todos estos parámetros son programables y con la ayuda de las librerías de Arduino, que sustentan a cada uno de los componentes del sistema de control, se pudo desarrollar el software de esta máquina visto en el anexo E.

**5.5.7. Interfaz Hombre – Máquina (HMI).** Entendiendo como HMI, a la interfaz que reúne todas las partes de interacción (software y hardware), que facilitan el desarrollo y control de un proceso, en este proyecto se hace fundamental una interacción entre el operario y la máquina, que permita el poner en marcha el proceso de enrollamiento de manera segura y con un procedimiento relativamente fácil.

En el anexo E, se encuentra el código de Arduino usado para dicha interacción desde el punto de vista del software. Por consiguiente, este apartado se centrará en dar a conocer los dispositivos de entrada y salida de información de la máquina y la manera de poner en funcionamiento la máquina con dichos dispositivos.

**5.5.7.1. Presentación general del tablero de interacción.** El tablero de interacción, se encuentra ubicado en la parte frontal de la máquina (figura 57). Este tablero está compuesto por una carcasa de plástico que en su interior contiene el Arduino Mega y la tarjeta electrónica PCB. Hacia la parte externa, se encuentran el display LCD y el teclado 4x4; componentes a través de los cuales el operario realiza la interacción con la máquina.

Figura 57. Vista general de la máquina.

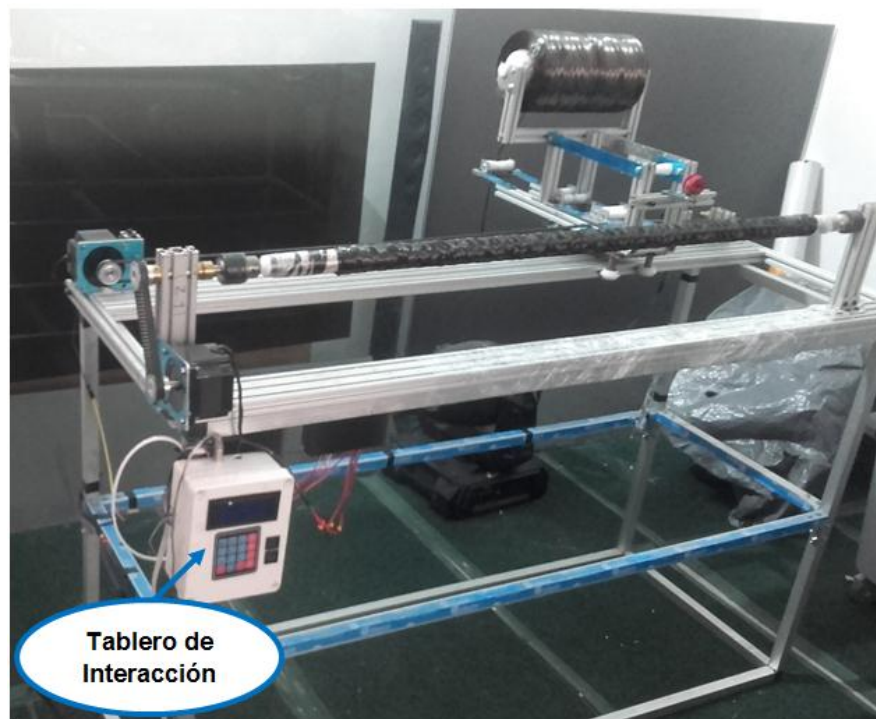
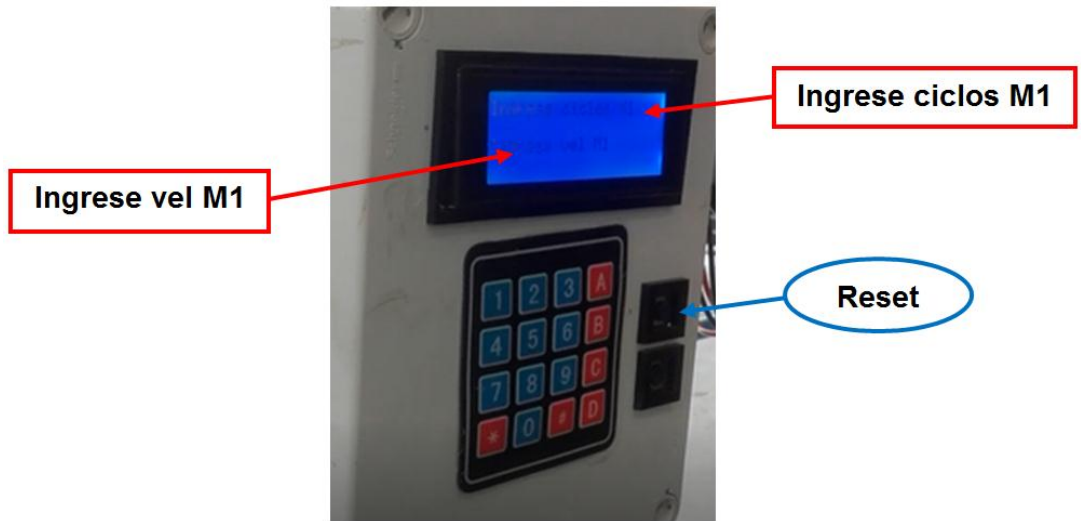


Figura 58. Tablero de interacción.



Como se puede apreciar en la figura 58, el tablero consta de un teclado alfanumérico y un botón de reinicio. Por otra parte, también cuenta con una pantalla LCD, donde se presentan dos enunciados:

- *Ingrese ciclos M1.* Hace referencia a la cantidad de veces que desea usted como operario, que el carro portafibra realice el recorrido entre los dos finales de carrera. Cabe aclarar que un ciclo se cuenta como ida y vuelta entre los finales de carrera.
- *Ingrese vel M1.* Hace referencia a la velocidad deseada para el giro del motor que es solidario a la correa sincrónica y que a través de la misma, transfiere la potencia al carro portafibra.

**5.5.7.2. Interacción para puesta en marcha del proceso.** Como se mencionó anteriormente, el código Arduino que se encuentra en el anexo E,

permite interactuar con la máquina siguiendo los pasos que se mencionan a continuación:

1. Energice la máquina y oprima el botón de reinicio para llevar el carro portafibra a la posición inicial anteriormente establecida.
2. Digite el número de ciclos que desea que el carro realice y oprima la tecla numeral (#).
3. Digite la velocidad que desea que tenga el motor del carro portafibra (en números enteros) y oprima la tecla numeral (#).
4. Oprima tecla asterisco (\*) para que la máquina inicie con el proceso de fabricación.

Siguiendo estos cuatro sencillos pasos, se logra sintetizar en este proyecto, las operaciones que la máquina debe cumplir, para poder manufacturar un prototipo de árbol de transmisión de potencia.

## **5.6. SISTEMA ESTRUCTURAL**

El sistema estructural es el que soporta las cargas impuestas por los demás sistemas de la máquina. Se conforma por una estructura base y un soporte estructural fabricados del mismo material, con el fin de mantener la relación y estética de la máquina. La perfilería no es la misma para los dos, esta cambia debido a la funcionalidad que tienen dentro del sistema y también a factores económicos.

El diseño de este soporte estructural, se hace en base al tamaño máximo de los prototipos de árboles de transmisión a fabricar, pues al tener el espacio suficiente

la máquina funcionará adecuadamente y el montaje de los otros sistemas que la conforman, será efectivo. Además, se analizan las propiedades del material, con el fin de garantizar resistencia, rigidez, bajo peso, facilidad de ensamble y economía en la fabricación.

Según aplicaciones reales y siguiendo un método de escalamiento, se obtienen un rango de longitudes que van desde los 0,7 m a los 1,3 m, para los prototipos. Por lo tanto, se toman estas dimensiones como base para el diseño del sistema estructural.

**5.6.1. Estructura base del sistema de alimentación de la fibra.** En la figura 59 está representada la estructura base. Esta es fabricada en perfil de aluminio tipo hepcos, de sección transversal de 3"x1" y una longitud de 1,5 m. El área de trabajo se reduce a 1,3 m x 3", ya que el otro espacio se emplea para el ensamble de los motores y demás elementos que conforman la máquina. Además de soportar el peso del subsistema de tensión de la fibra, este perfil facilita el ensamble de otros componentes y sirve de guía para el carro portafibra. Su buen funcionamiento, repercute en el acabado de los árboles de transmisión. La rigidez y la resistencia de este perfil, debe ser tal que permita una deformación aceptable y cuente con un buen factor de seguridad.

Las propiedades técnicas de este perfil se resumen en siguiente tabla, las cuales se utilizan para la validación de la selección del perfil.

Figura 59. Estructura base del sistema de alimentación de la fibra.

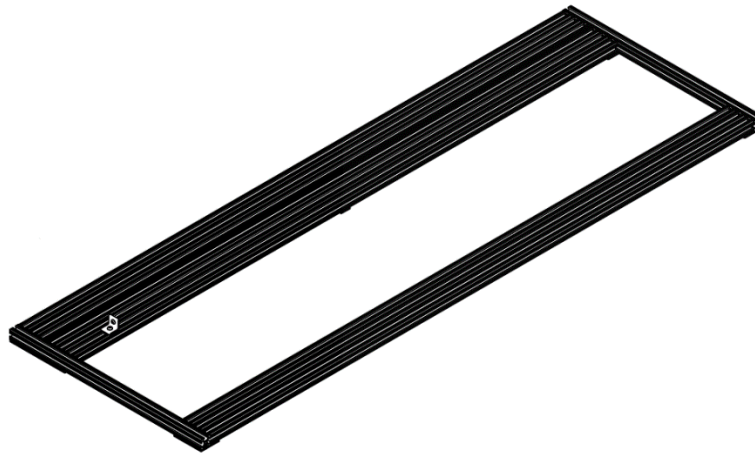


Tabla 12. Propiedades del perfil de aluminio tipo hepc 3"x1"

Datos técnicos	
Módulo de Young	$E = 70000 \text{ N/mm}^2$
Módulo elástico transversal	$G = 27000 \text{ N/mm}^2$
Densidad	$D = 2,7 \text{ kg/dm}^3$
Momentos de inercia	$I_x = 60,6 \text{ cm}^4 \quad I_y = 7,3 \text{ cm}^4$
Módulos de sección	$W_x = 13,4 \text{ cm}^3 \quad W_y = 4,9 \text{ cm}^3$
Masa	$m = 2,1 \text{ kg/m}$

Fuente: REXROTH MEDIENVERZEICHNIS. [En línea]. [Consultado el 10 de septiembre de 2018].

Disponible

en:

[http://www.boschrexroth.com/various/utilities/mediadirectory/index.jsp?publication=NET&search\\_query=3842540238](http://www.boschrexroth.com/various/utilities/mediadirectory/index.jsp?publication=NET&search_query=3842540238)

**5.6.2. Soporte estructural.** El soporte estructural diseñado, además de contar con buenas propiedades de resistencia, rigidez y peso, también cumple la tarea de dar a los otros sistemas de la máquina el espacio de disposición, pues es requisito para la buena configuración de la misma. Para el diseño, se toma como base geométrica una longitud de 1,4 m con una altura de 0,8 m, ya que la altura de la máquina debe ser la adecuada para que el operario trabaje de una manera ergonómica.

El perfil seleccionado, es un tubo cuadrado de aluminio de 1,5" de lado y 1,2 mm de espesor. La estructura está preparada para soportar cargas verticales, provenientes de la base del sistema de alimentación de la fibra. En la figura 60, se muestra el diseño del soporte estructural.

Figura 60. Soporte estructural.



## **6. CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA**

Una vez descritos e ilustrados, los diferentes sistemas que componen la máquina, deben incorporarse de la manera más cómoda y eficaz posible, de tal forma que el resultado final sea un ensamble entre éstos, que defina la máquina en su totalidad.

El orden de ensamblaje y mecanizado en el proceso de construcción de la máquina, tiene una gran relevancia, pues a diferencia del diseño que se hace en un programa CAD como SolidWorks, el montaje de ésta debe ser coherente, pues la disposición de algunos sistemas, no puede hacerse sin antes haber establecido y conformado un sistema en su totalidad. Por lo tanto, se define un orden para la realización del proceso de ensamblaje:

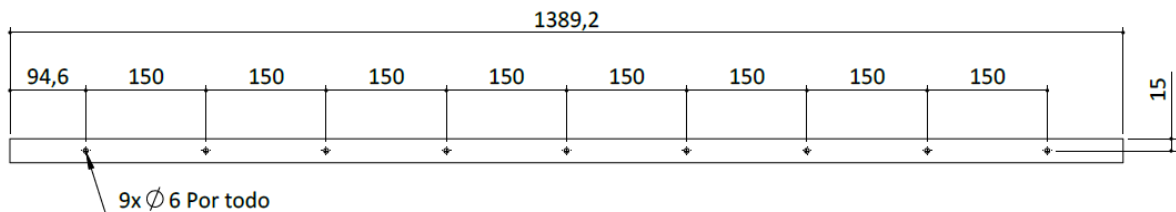
1. Sistema estructural.
2. Sistema de sujeción de la matriz.
3. Sistema de alimentación de la fibra.
4. Sistema de transmisión de potencia.
5. Sistema eléctrico y de control.

### **6.1. MECANIZADO DE LOS PERFILES Y LÁMINAS DE ALUMINIO**

Una vez establecido el orden de ensamblaje para los diferentes sistemas que componen la máquina, y teniendo en cuenta los parámetros geométricos de la misma, varios de los perfiles y láminas de aluminio han tenido que mecanizarse.

El soporte estructural, elaborado con perfil de aluminio de sección cuadrada, se presenta por el proveedor como un tubo de 6 m de largo, lo cual indica que debe ser cortado según las especificaciones de los planos. Para ello, se utilizó una sierra circular para seccionar el material y un taladro vertical para mecanizar unos agujeros (figura 61).

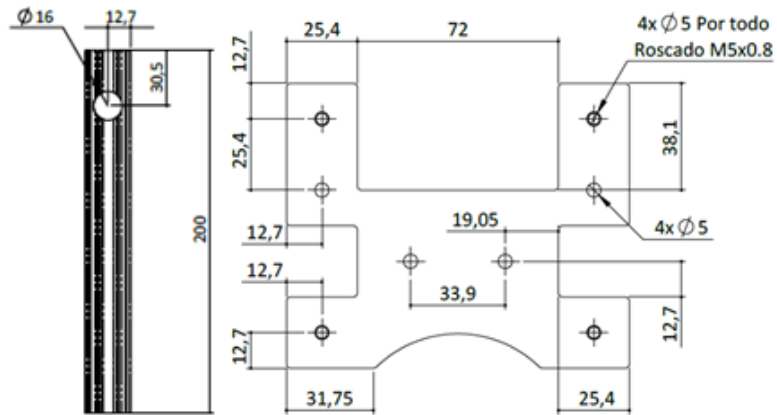
Figura 61. Fragmento del plano de uno de los perfiles de aluminio de sección cuadrada.



La estructura base y los bastidores que conforman el sistema de alimentación de fibra, de sujeción de la matriz y de transmisión de potencia, están fabricados con perfil de aluminio tipo hepco de diferentes secciones transversales: 1"x1"; 2"x1" y de 3"x1", y de lámina de aluminio de un espesor de 1/8" (figura 62). El perfil hepco, debe ser cortado y taladrado igual que el anterior. La lámina de aluminio se obtiene mediante una cortadora láser, que garantiza la geometría de la parte.

Para el mecanizado de todas las piezas no es necesario establecer hojas de ruta, pues una de las ventajas de utilizar perfiles de aluminio, es que requieren de pocos procesos para la transformación de la materia prima.

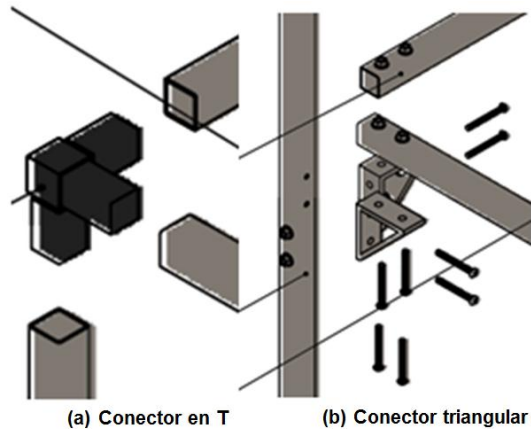
Figura 62. Fragmento del plano de un perfil tipo hepco y de una lámina de aluminio.



## 6.2. ENSAMBLE DE LOS PERFILES Y LÁMINAS DE ALUMINIO

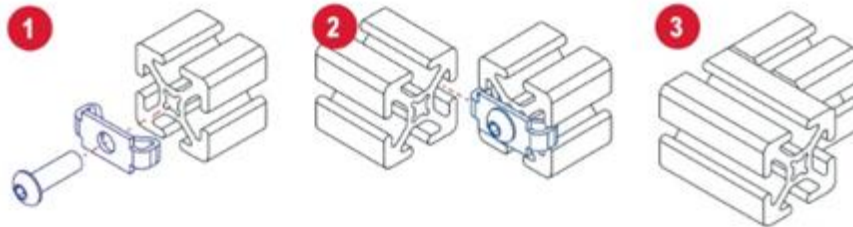
Una vez establecido el mecanizado del sistema estructural, se procede a realizar el ensamble, teniendo en cuenta el orden que se estableció anteriormente. El soporte estructural, está unido en sus esquinas por conectores en T (a) y en el centro del soporte, se utilizan conectores triangulares (b), como se puede observar en la figura 63.

Figura 63. Uniones para el soporte estructural.



La modularidad de los perfiles de aluminio tipo hepco, hace que el ensamble de los mismos sea más fácil. Estas uniones y ensambles se hacen mediante elementos denominados T – Nut y tornillería. En la figura 64, se detalla el procedimiento a realizar para el ensamble de estos perfiles. Además, a diferencia de los perfiles de acero y otros metales, no se necesitan uniones soldadas, facilitando futuras modificaciones de la máquina.

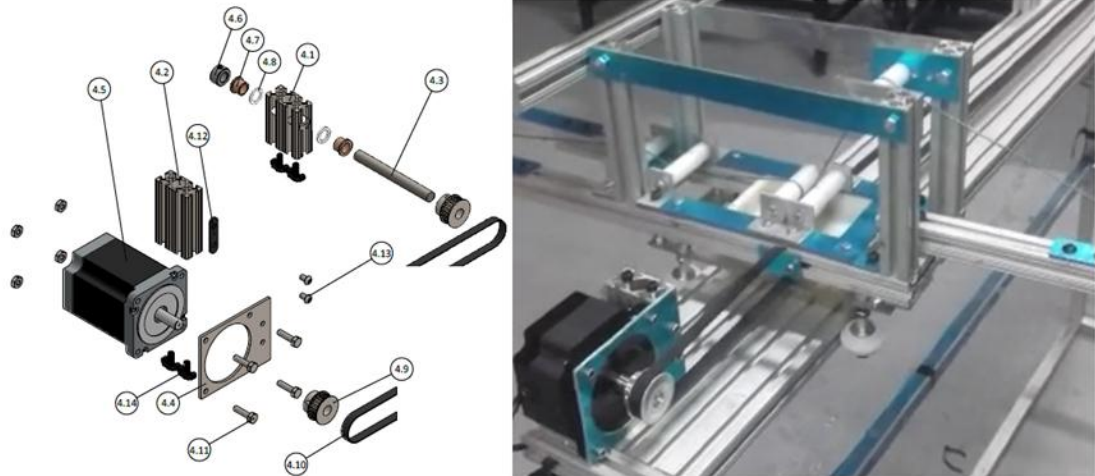
Figura 64. Procedimiento para el ensamble de la perfilería tipo hepco.



Fuente: 80/20 INC. [En línea]. [Consultado el 1 de octubre de 2018]. Disponible en: <https://8020.net/>

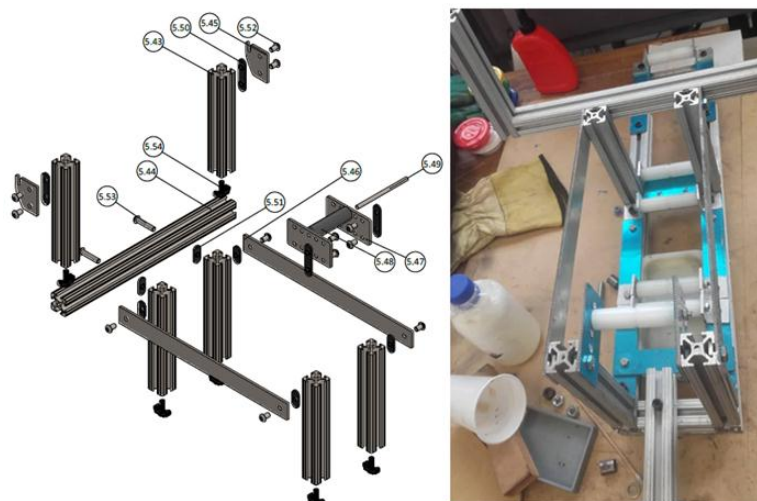
La figura 65, muestra un detalle de las uniones que se hacen para ensamblar uno de los sistemas de transmisión de potencia. Allí se evidencia el uso del perfil hepco y por ende, de T – Nuts. También se emplea lámina de aluminio mecanizada, unida al motor por medio de tornillería. Finalmente, se observa el ensamble real de este sistema, el cual no requirió de cambios.

Figura 65. Vista detallada y ensamble real de uno de los sistemas de transmisión de potencia.



En la figura 66 se observa el procedimiento de ensamble del sistema de alimentación de fibra, así como el resultado del mismo. Se muestra la unión de los perfiles hepco, los rodillos de tensión, la bañera de la resina y el uso de láminas de aluminio.

Figura 66. Vista detallada y ensamble real del sistema de alimentación de la fibra.



Al igual que en las ilustraciones anteriores, en la figura 67 se observa el proceso de ensamble y su resultado final, del sistema de transmisión de potencia secundario. Se destaca el uso de elementos de unión que son propios de la modularidad del perfil hepco.

Figura 67. Vista detallada y ensamble real del sistema de transmisión de potencia secundario.

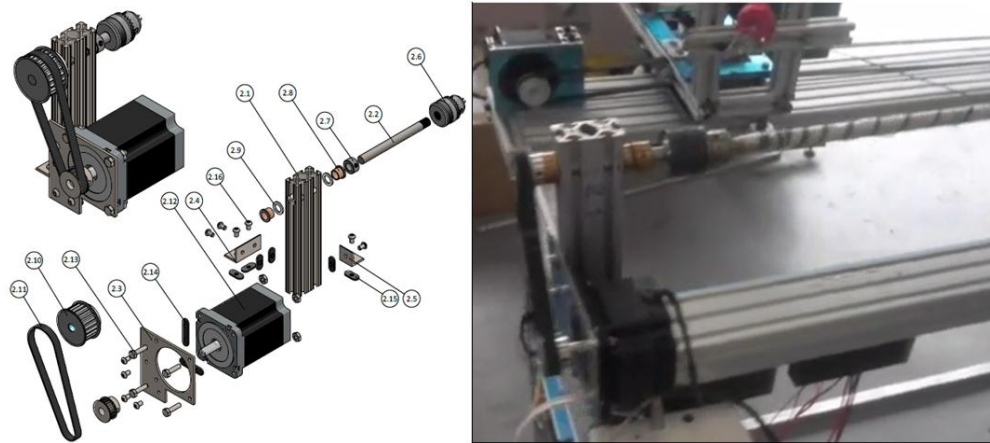
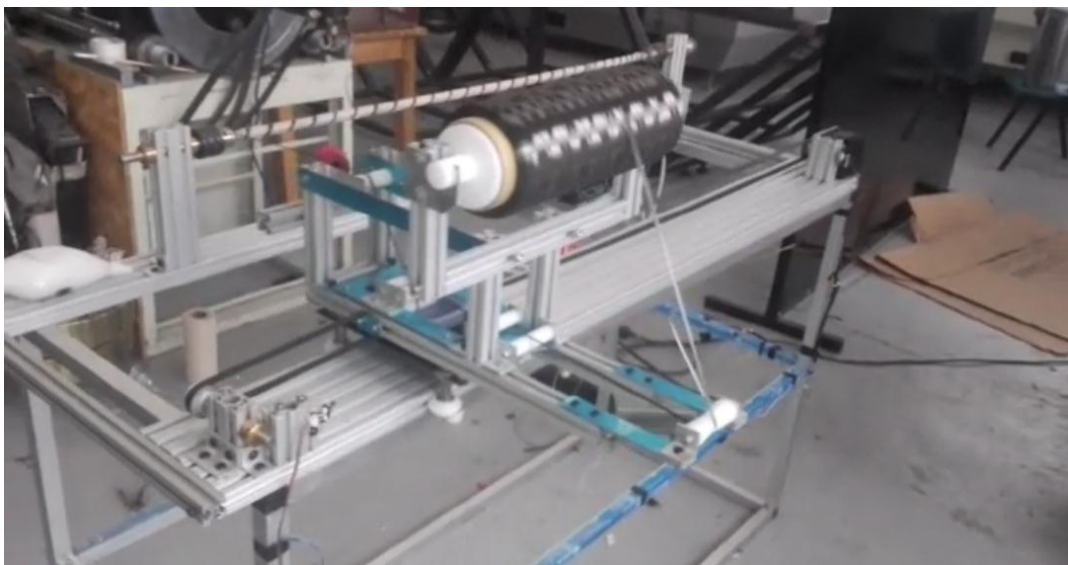


Figura 68. Producto final.



## **7. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA**

Las propiedades mecánicas del prototipo del árbol de transmisión de potencia, se obtienen gracias a los parámetros de fabricación, que se encargan de la conformación y acabado de las piezas. Están relacionados con el desplazamiento de las piezas móviles de la máquina y con los mecanismos de tensión e impregnación de la fibra. Una vez la máquina entra en funcionamiento y debido a la dificultad de predecir su comportamiento por aspectos ajenos al CAD (vibraciones, ruidos y golpes), se hace evidente modificar componentes del sistema, con el fin de mejorar el funcionamiento de la máquina y obtener piezas de excelente calidad.

Las modificaciones, cambios y disposición de algunos elementos, se realizaron en base a las primeras pruebas de funcionamiento de la máquina. Además de eso, a través de dichas pruebas, se pueden obtener datos como, la velocidad de producción y consumo de material según las especificaciones dimensionales del prototipo y orientación de la fibra.

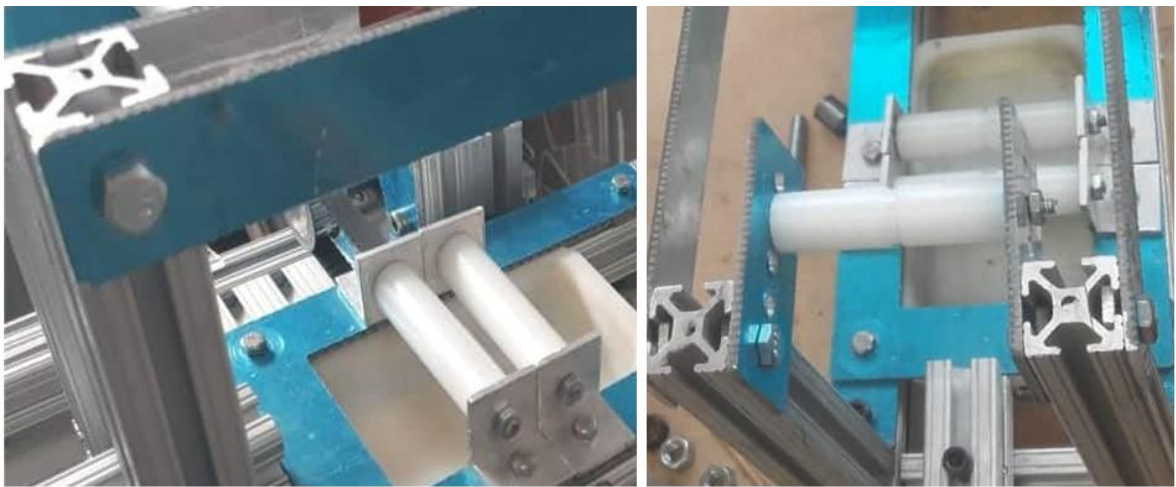
### **7.1. MODIFICACIÓN Y SUSTITUCIÓN DE ELEMENTOS**

#### **7.1.1. Rodillos de tensión de la fibra y bañera para la resina termoestable.**

Los siete rodillos y el movimiento de rotación del molde son los encargados de tensionar y compactar la fibra en su apilamiento, para dar rigidez, fuerza y flexibilidad al prototipo. Inicialmente se fabricaron los 7 rodillos en empack, ya que, sus propiedades de resistencia y bajo coeficiente de fricción, eran apropiadas para evitar que la fibra se enredara y porque no, llegara a romperse. Una vez echas las pruebas, se observó que la fibra se estaba deshilando y deslizando por toda el

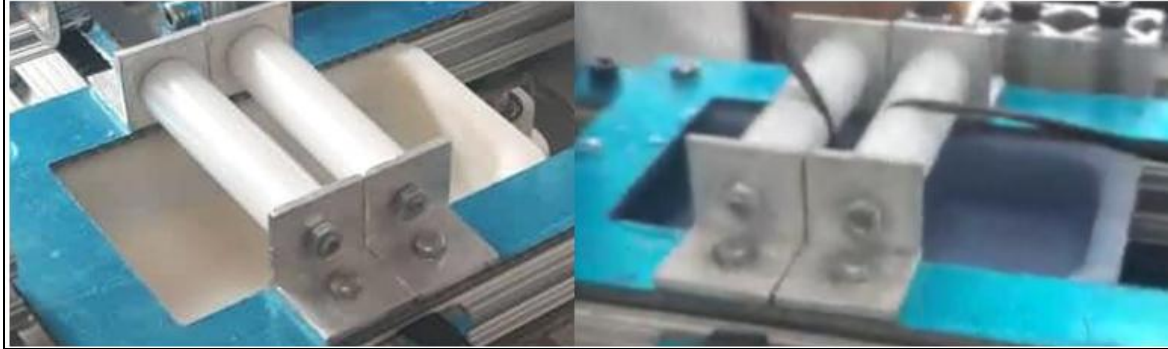
área del rodillo, hasta llegar a enredarse en los soportes del mismo. Analizando este comportamiento, se llegó a la conclusión de que se debía realizar una pequeña modificación a la geometría de los rodillos. Dicho cambio se trata de hacer una ranura en el centro de los rodillos, con el fin de darle direccionamiento y estabilidad al material.

Figura 69. Rodillo tensor de fibra con (derecha) y sin (izquierda) ranura.



Durante las pruebas de validación, también se notó que al no limpiar los restos de la mezcla de resina y catalizador contenidos en la bañera, esta se solidificaba, generando una capa dura que causó afectaciones en la movilidad del rodillo dispuesto allí. Fue necesaria la impresión e instalación de otro contenedor igual. Se concluyó que después de cada uso de la máquina, es necesario limpiar bien la bañera, con el fin de evitar este tipo de inconvenientes.

Figura 70. Bañera de la resina termoestable, antes (derecha) y después (izquierda) de su cambio.



**7.1.2. Bujes del carro portafibra.** Inicialmente, los bujes se fabricaron con un tubo de aluminio de 8 mm de diámetro interior y 1,5 mm de espesor, en secciones de 15 mm de longitud. La función de estos, es la dar una altura prudente al carro portafibra, con el fin de que el espacio que haya entre este y el bastidor de perfil tipo hepco, sea tal, que permita a la correa sincrónica atravesar sin presentar roces con las láminas y el perfil de aluminio, evitando el desalineamiento de la misma.

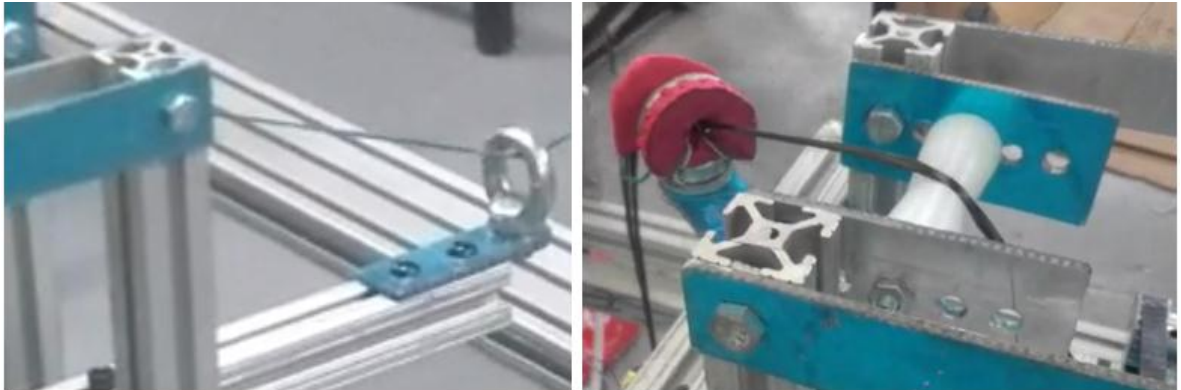
Al analizar el movimiento del carro portafibra, se observó la existencia de una holgura considerable entre las ruedas y las guías, lo cual generaba excesivas vibraciones, afectando el movimiento constante del carro. También se vio un roce de la correa sincrónica con el perfil de aluminio. Con el fin de solucionar este inconveniente, usaron tuercas para dotar de más altura a la estructura del carro; pero no fue suficiente, ya que la holgura seguía existiendo. Finalmente, se rediseñaron los bujes, partiendo de un tubo de sección cuadrada de 10 mm de lado y espesor de 2,5 mm, cortados cada 25 mm. Esta solución fue efectiva, ya que se le logró dar más rigidez y estabilidad a este sistema, eliminando las vibraciones y por ende el mal funcionamiento del carro portafibra.

Figura 71. Bujes temporales (izquierda) y bujes permanentes (derecha).



**7.1.3. Ojal o dispensador de fibra.** La técnica filament winding, establece que se debe tener un ojal o dispensador de fibra, el cual se encarga de disponer el material en el molde de acuerdo a la orientación del bobinado, con el fin de que la fibra se apile adecuadamente. Durante las primeras pruebas de funcionamiento de la máquina, se notó que cuando la fibra pasaba por el ojal, esta empezaba a deshilarse. También se observó, que el contenido de resina en la fibra era demasiado. Se dedujo por medio del funcionamiento de la máquina, que la solución para estos inconvenientes era la de disponer el ojal más cerca del último rodillo tensor y forrarlo con fomi, con el fin de disminuir el rozamiento y evitar que la fibra se deshilache. El fomi también sirvió como eliminador de exceso de resina.

Figura 72. Ojal antes (izquierda) y después (derecha) de su modificación.



## 7.2. CONSUMO DE MATERIAL

Es fundamental que el operario tenga conocimiento de cuanta materia prima necesita para la producción de un prototipo, ya que, esa información facilita en gran medida, la realización de un análisis de costos del proceso. Mediante un proceso de cálculo que se aproxima a los valores reales del consumo de material, se da a conocer por medio de un ejemplo, cuanta materia prima se necesita para la fabricación de un prototipo de pequeño tamaño. También, se dan las ecuaciones para que el productor calcule el material requerido para la conformación de otro tipo de prototipos.

Según las dimensiones reales del árbol de transmisión, se elabora un proceso de escalamiento (anexo G), basado en la geometría y con el cual se obtienen las dimensiones del prototipo, las cuales son la base necesaria para calcular el consumo de material para su fabricación.

Tabla 13. Especificaciones geométricas del prototipo.

Dimensiones del prototipo	
Radio exterior del eje	$Ro_e = 21,7203 \text{ mm}$
Radio interior del eje	$Ri_e = 20,2203 \text{ mm}$
Espesor del eje	$e_e = 1,5 \text{ mm}$
Longitud del eje	$L_e = 0,7 \text{ m}$

Para calcular la cantidad de material utilizado en la fabricación de este prototipo, primero se debe conocer la cantidad de capas que serán necesarias para su fabricación, así como la orientación de la fibra. Una vez elaborado el cálculo del consumo de fibra se puede estimar la cantidad de resina y catalizador necesarios para impregnar todo el material a utilizar.

**7.2.1. Cálculo del número de capas de fibra de carbono.** El número de capas de fibra de carbono en el mandril o molde, depende del espesor del eje, pues este espesor lo da el apilamiento del material en el mismo. Por lo tanto, la siguiente ecuación es una aproximación para el cálculo del número de capas.

$$N_{capas} = \frac{e_e}{e_{fibra}} = \frac{1,5}{0,25} = 6 \text{ capas}$$

$$N_{capas} = \text{Número de capas}$$

$$e_{fibra} = 0,25 \text{ mm espesor de la fibra}$$

Se dice que es una aproximación, ya que el apilamiento depende en gran medida de la orientación de la fibra. A diferencia de una disposición de  $90^\circ$  que cubre todo el molde, una capa de  $45^\circ$  o de  $15^\circ$  dejará espacios vacíos, que serán cubiertos por capas posteriores.

**7.2.2. Orientación de la fibra.** El apilamiento de la fibra en el mandril, constituye una gran cantidad de combinaciones posibles en base a las orientaciones de la misma. Por lo tanto, para fabricar un prototipo óptimo que tenga buenas propiedades mecánicas se deben establecer los siguientes criterios:

- Se usan solo las orientaciones contempladas en la tabla 14, de acuerdo al propósito que cumplen y porque en dichas orientaciones se encuentran los módulos y esfuerzos últimos más altos del material.
- Las orientaciones de  $-45^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $-15^\circ$  y  $15^\circ$ , estarán como pares simultáneos para garantizar que puedan fabricarse mediante el la técnica filament winding.

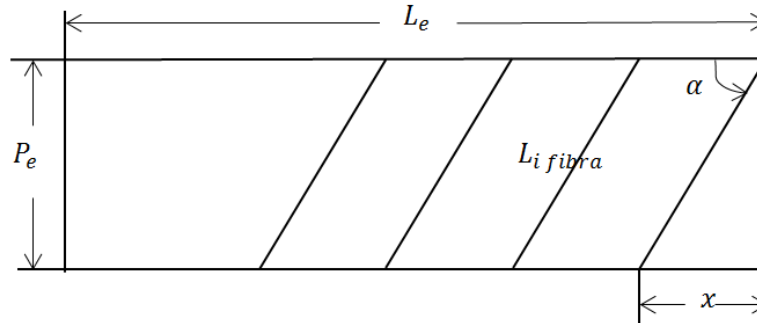
Tabla 14. Propósitos de la orientación de la fibra.

Orientación	Propósito
15°	Se usa para aumentar el módulo axial, por ende, también se aumenta la frecuencia de resonancia de flexión fundamental.
45°	Proporciona resistencia estructural para la carga de par.
90°	Sirve como una capa base para la fricción y la compactación. Da poco o ningún soporte estructural.

Fuente: KEYS, Chad; KINKLER, Wesley y SANTIAGO, Alex. Composite driveshaft: efficiency, safety and economics. Kingsville: Texas A&M University, 2004. 61 p.

**7.2.3. Cálculo de la cantidad de fibra.** El consumo de fibra de carbono para la fabricación de un determinado prototipo, se determina según un cálculo aproximado, basado en la figura 73, donde al tener en cuenta los aspectos geométricos del prototipo y elaborando unas ecuaciones, se obtiene la longitud de la fibra según la orientación deseada. En la tabla 15, se resumen estos cálculos para el ejemplo tomado.

Figura 73. Aspectos geométricos para determinar la longitud de la fibra.



Ejemplo de la cantidad de material necesario en una capa, para un ángulo de disposición de fibras de 45°:

$$R_{molde} = 0,0202203 \text{ m} \quad ; \quad L_e = 0,7 \text{ m}$$

$$P_e = 2\pi * R_{molde} = 2\pi * 0,0202203 \text{ m} = 0,127048 \text{ m}$$

$$L_{i\text{ fibra}} = \frac{P_e}{\text{sen}(\alpha)} = \frac{0,127048 \text{ m}}{\text{sen}(45)} = 0,179673 \text{ m}$$

$$x = \left( \frac{P_e}{\tan(\alpha)} \right) = \left( \frac{0,127048 \text{ m}}{\tan(45)} \right) = 0,127048 \text{ m}$$

$$N_{pasadas} = \frac{L_e}{x} = \frac{0,7 \text{ m}}{0,127048 \text{ m}} = 5,5$$

$$L_{fibra} = L_{i\text{ fibra}} * N_{pasadas} = 0,179673 \text{ m} * 5,5 = 0,99 \text{ m}$$

Tabla 15. Ejemplo de cálculo de la cantidad de fibra necesaria en cada capa para diferentes configuraciones de disposición de la misma.

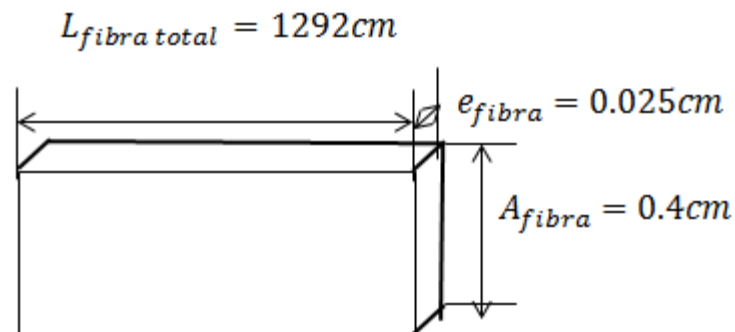
Capa	Orientación	$L_{i\text{ fibra}} [m]$	$x [m]$	$L_{fibra} [m]$
1	90	0,1322	0,023	4,024
2	-45°	0,1842	0,1302	0,9903

3	45	0,1842	0,1302	0,9903
4	- 45°	0,1842	0,1302	0,9903
5	45	0,1842	0,1302	0,9903
6	90	0,1322	0,023	4,024
<i>L<sub>fibra total</sub> aproximado [m]</i>				<b>12,92</b>

**7.2.4. Cálculo de la cantidad de resina y catalizador.** En un recipiente limpio y preferiblemente descartable, se vierte una cantidad de resina y se le agrega y el catalizador, en una relación del 1,5% al 2% dependiendo de la temperatura. A más calor, menos catalizador, ya que, con una temperatura alta y gran cantidad catalizador, la mezcla reaccionaría muy rápido y tendríamos poco tiempo para aplicarla antes de que gelificara.

El volumen de resina a utilizar es proporcional a la cantidad de la fibra. Por lo tanto, al tener las dimensiones de la fibra a utilizar, se estima que cuando esta se impregna de resina, cambia sus dimensiones, sumando 0,1 cm de espesor en todas las medidas. Al calcular el volumen de la resina, se obtienen los resultados descritos a continuación.

Figura 74. Volumen de la fibra a utilizar.



$$V_{resina} = (1292 + 0,2) * (0,025 + 0,2) * (0,4 + 0,2)$$

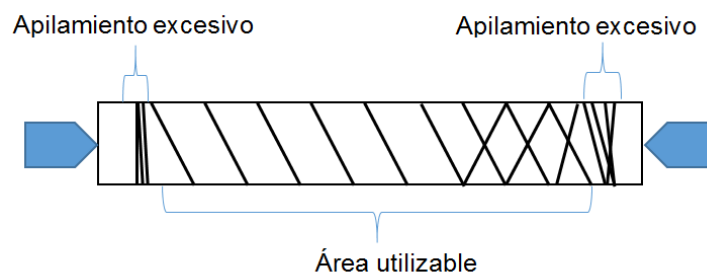
$$V_{resina} = 174,45 \text{ cm}^3 \text{ (aprox.)}$$

$$V_{catalizador} = V_{resina} * 0,02 = 174,45 \text{ cm}^3 * 0,02 = 3,5 \text{ cm}^3 \text{ (aprox.)}$$

### 7.3. DISEÑO DEL BOBINADO

La orientación de la fibra se da gracias a una relación existente entre la velocidad de rotación del molde y la velocidad de traslación horizontal del sistema de alimentación del material. Al realizar el bobinado sobre el molde, se presenta un ángulo de disposición de la fibra, el cual está presente en una determinada área del mismo. Es decir, que al presentarse estos dos movimientos, la fibra en los extremos del molde, será dispuesta irregularmente, debido al movimiento relativo de la misma. En la figura 75, se pueden observar las áreas que son aceptables según la orientación de la fibra y las que no lo son debido al apilamiento rápido de esta.

Figura 75. Diseño del bobinado.



### 7.4. CONSTRUCCIÓN DE LOS PROTOTIPOS

Luego de poner a punto la máquina, se dio inicio a la construcción formal de los primeros prototipos de árboles de transmisión. Inicialmente los resultados no

fueron los esperados, ya que, se presentó dificultad para separar el producto de su matriz, por lo tanto gran parte de esta, quedó atrapada en el árbol (figura 76a). Se realizaron unas modificaciones en cuanto al molde, con el fin de facilitar la separación del producto y se procedió a la construcción de un nuevo prototipo, donde se evidenció la solución del problema. La geometría de este, presenta mejoras con respecto al primero (figura 76b). Sin embargo, antes de realizar la construcción de un tercer árbol, y mediante la interfaz HMI, se modificaron varios de los parámetros para la construcción. Al final se obtuvo un producto de mejor calidad que los dos anteriores (figura 76c).

Figura 76. Primeros prototipos construidos en la máquina.



**(a) Primer prototipo    (b) Segundo prototipo    (c) Tercer prototipo**

En el anexo F, se pueden evidenciar los videos de la construcción de los diferentes prototipos y el desempeño de la máquina.

## 8. ANÁLISIS DE COSTOS Y VIABILIDAD DEL PROYECTO

Determinar la inversión total para la fabricación de la máquina, es parte fundamental del análisis de costos; pues permite obtener una lista de los valores de todos los materiales y componentes utilizados para la conformación de la misma y posteriormente definir si el desarrollo del proyecto es viable o no. La compra de los materiales, así como también los costos de la manufactura, fueron asumidos por el Sistema de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación – SENNOVA, de la Red Tecnoparque Colombia, nodo Manizales (SENA), razón por la cual dichos costos, son valores ficticios que se tienen en cuenta, pues representan la utilidad esperada si la máquina se desea comercializar.

### 8.1. COSTOS GENERALES

Los costos totales de los sistemas que integran la máquina, se muestran en la tabla 16. Allí se expone una lista de los sistemas primarios con su correspondiente costo, así como el costo de diseño, manufactura y otros imprevistos que se presentaron en la realización del proyecto.

Tabla 16. Costo general de la máquina.

SISTEMA	COSTO
Estructura	\$ 4.756.668
Transmisión de potencia	\$ 1.538.670
Alimentación de la fibra	\$ 1.780.192
Sistema del mandril	\$ 934.816
Unidad de control	\$ 2.390.865
Manufactura	\$ 850.000

Diseño	\$ 6.000.000
Otros	\$ 765.000
<b>Total</b>	<b>\$ 19.016.211</b>

## 8.2. COSTOS DETALLADOS DE LOS SISTEMAS QUE COMPONEN LA MÁQUINA

En las siguientes tablas, se resumen de forma general, los costos de cada uno de los sistemas anteriormente descritos. Se definen tres clases de conceptos que se tuvieron en cuenta para la buena interpretación de los elementos adquiridos:

- *Materiales de construcción:* materiales que requieren ser mecanizados.
- *Implementos y accesorios:* componentes eléctricos, mecánicos y electrónicos.
- *Materiales consumibles:* aquellos que pasan a formar parte del árbol de transmisión y por consiguiente se consumen.

Las tablas, en su totalidad se encuentran en el anexo H, donde se identifica con más detalle los valores de cada uno de los elementos que componen la máquina. Para hacer más fácil la lectura de este capítulo se resumen las tablas así de la siguiente manera:

Tabla 17. Costo total del sistema estructural.

<b>Estructura</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>VALOR</b>
	Materiales de construcción	\$ 3.229.200
	Implementos y accesorios	\$ 768.000
	VALOR TOTAL SIN IVA	\$ 3.997.200
	IVA	\$ 759.468
	<b>VALOR TOTAL CON IVA</b>	<b>\$ 4.756.668</b>

Tabla 18. Costo total del sistema de transmisión de potencia.

<b>Transmisión de potencia</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>VALOR</b>
	Materiales de construcción	\$ 420.000
	Implementos y accesorios	\$ 873.000
	VALOR TOTAL SIN IVA	\$ 1.293.000
	IVA	\$ 245.670
	<b>VALOR TOTAL CON IVA</b>	<b>\$ 1.538.670</b>

Tabla 19. Costo total del sistema de alimentación de la fibra.

<b>Alimentación de la fibra</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>VALOR</b>
	Materiales de Construcción	\$ 52.200
	Implementos y Accesorios	\$ 201.300
	Materiales Consumibles	\$ 1.242.460
	VALOR TOTAL SIN IVA	\$ 1.495.960
	IVA	\$ 284.232
	<b>VALOR TOTAL CON IVA</b>	<b>\$ 1.780.192</b>

Tabla 20. Costo total del sistema de sujeción de la matriz.

<b>Sistema de sujeción</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>VALOR</b>
	Materiales de Construcción	\$ 87.000
	Implementos y Accesorios	\$ 634.560
	Materiales Consumibles	\$ 64.000
	VALOR TOTAL SIN IVA	\$ 785.560
	IVA	\$ 149.256
<b>VALOR TOTAL CON IVA</b>	<b>\$ 934.816</b>	

Tabla 21. Costo total del sistema eléctrico y de control.

<b>Sistema de control</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>VALOR</b>
	Materiales de Construcción	\$ 288.810
	Implementos y Accesorios	\$ 1.720.320
	<b>VALOR TOTAL SIN IVA</b>	<b>\$ 2.009.130</b>
	IVA	\$ 381.735
	<b>VALOR TOTAL CON IVA</b>	<b>\$ 2.390.865</b>

En las tablas 22, 23 y 24, se resume el valor total que tienen los apartados de diseño y manufactura, los cuales deben tenerse en cuenta si la máquina se desea comercializar, así como la identificación de otros costos que se hicieron presentes durante la fabricación de la misma. Se tuvo en cuenta un costo de imprevistos del 3% del valor de los elementos de la máquina, con el fin de suplir otros percances.

Tabla 22. Costo total de la manufactura de la máquina.

<b>Manufactura</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>VALOR</b>
	Mecanizado	\$ 368.000
	Ensamble	\$ 430.700
	<b>TOTAL</b>	<b>\$ 798.700</b>

Tabla 23. Costo total del diseño de la máquina.

<b>Diseño</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>VALOR</b>
	Autores: 3	\$ 3.037.500
	Director: 1	\$ 3.018.750
	<b>TOTAL</b>	<b>\$ 6.056.250</b>

Tabla 24. Otros costos.

<b>Otros</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>VALOR</b>
	Papelería	\$ 15.000
	Horas de PC	\$ 300.000
	Gastos de viaje	\$ 150.000
	Imprevistos	\$ 342.036
	<b>TOTAL</b>	<b>\$ 807.036</b>

### **8.3. VIABILIDAD DEL PROYECTO**

Analizar la viabilidad de este proyecto, concluye con la rentabilidad de la inversión y el beneficio obtenido de éste. Al recopilar, analizar y evaluar diferentes variables del estudio económico se puede establecer la decisión sobre el desarrollo o no del proyecto.

Para realizar el análisis, inicialmente se definen las variables que conforman el estudio económico, entre ellas están: la inversión inicial de la máquina y el desarrollo de un flujo de caja con los ingresos y egresos determinados por un periodo de 5 años. Posteriormente se ejecutan los métodos financieros de una inversión tales como el VPN y la relación Beneficio/Costo (RB/c), también calculamos el tiempo de recuperación de la inversión por medio del PayBack.

**8.3.1. Flujo de caja.** Los métodos del VPN y RB/c están en función del flujo de caja, por lo que se deben establecer los ingresos y egresos durante un periodo de tiempo considerable (5 años) para analizar la viabilidad del proyecto (tabla 25).

Tabla 25. Flujo de caja previsto a 5 años.

<b>FLUJO DE CAJA</b>						
<b>Periodos anuales</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Inversión</b>	\$ 19.016.211	-	-	-	-	-
<b>Saldo inicial</b>	-	-	\$ 45.326.825	\$ 92.013.455	\$ 140.100.684	\$ 189.630.530
<b>Ingresos</b>	-	\$ 196.416.242	\$ 202.308.729	\$ 208.377.991	\$ 214.629.331	\$ 221.068.211
<b>Egresos</b>	-	\$ 151.089.417	\$ 155.622.100	\$ 160.290.762	\$ 165.099.485	\$ 170.052.470
<b>Saldo final</b>	-	\$ 45.326.825	\$ 92.013.455	\$ 140.100.684	\$ 189.630.530	\$ 240.646.271

El enfoque que sigue este análisis de viabilidad, establece que los ingresos obtenidos por el producto final, están basados según los resultados de los estudios y pruebas de torsión que posteriormente se realizarán en los prototipos de árboles de transmisión. La inversión inicial de la máquina será de 19.016.211. Los ingresos correspondientes serán del 30% sobre la producción de prototipos, que se estima en 720 árboles de transmisión por año. Esta crecerá de acuerdo a una inflación del 3%. Los egresos, están determinados por el costo que tiene producir los prototipos, para ello se tiene en cuenta los costos de producción, costos operacionales y costos de las pruebas que están representados en la tabla 26.

La producción que se supone para este análisis de costos, incluye tres tamaños de los prototipos y tres orientaciones de fibra, con el fin de obtener 240 prototipos de tamaño pequeño con sus tres orientaciones en 80 días. Se hace exactamente lo mismo con los otros dos tamaños, para que al finalizar el año de trabajo, se obtengan 720 prototipos de tres tamaños y orientaciones diferentes.

Tabla 26. Costos de fabricación de los prototipos de los árboles de transmisión.

DESCRIPCIÓN	REFERENCIA		COSTO/PROTOTIPO		
	Materiales	Orientación	PROPORCIÓN		
			Tamaño pequeño	Tamaño mediano	Tamaño grande
COSTOS DE PRODUCCIÓN	Fibra de carbono	90°	\$ 39.320,80	\$ 74.855,73	\$ 121.634,50
		45°	\$ 9.652	\$ 18.393,03	\$ 29.896,80
		15°	\$ 7.051,75	\$ 13.469,81	\$ 21.870,16
	Resina epoxi para fibra de carbono (750 ml)		\$ 23.799,45	\$ 31.732,60	\$ 42.839,01
	Catalizador de resina 1,5%-2% (250 ml)		\$ 171,57	\$ 228,76	\$ 308,83
	Tubo de aluminio		\$ 16.000	\$ 24.000	\$ 26.000
	Cera desmoldante Mold Release TR-108		\$ 10.975	\$ 14.633	\$ 18.291
	Cinta transparente multipropósito		\$ 312	\$ 416	\$ 520
	Papel bond		\$ 640	\$ 800	\$ 960
	Costo energético		\$ 5.274,60	\$ 5.274,60	\$ 5.274,60
COSTOS OPERACIONALES	Operario		\$ 8.333,33	\$ 8.333,33	\$ 8.333,33
	Almacenamiento		\$ 2.222	\$ 2.222	\$ 2.222
	Mantenimiento		\$ 10.791,40	\$ 10.791,40	\$ 10.791,40
COSTOS DE LAS PRUEBAS	Prueba de torsión		\$ 75.000	\$ 75.000	\$ 75.000
<b>COSTO/DÍA</b>			<b>\$ 516.582</b>	<b>\$ 627.014</b>	<b>\$ 745.022</b>
<b>COSTO/80DÍAS</b>			<b>\$ 41.326.568</b>	<b>\$ 50.161.091</b>	<b>\$ 59.601.758</b>
<b>COSTO/AÑO</b>			<b>\$ 151.089.417</b>		

### 8.3.1.1. Costos de producción

- **Costo de los insumos para fabricar el árbol de transmisión.** Se deben tener en cuenta los materiales y su proporción, para evaluar el costo que tiene producir un árbol de transmisión de potencia. Se consideran tres proporciones puntuales para elaborar el estudio de viabilidad, pues al existir

más tamaños y formas, es conveniente estudiar los límites con el fin de tener una base del costo que lleva fabricar éstos y a partir de ahí considerar un porcentaje de costos para los otros casos.

Tabla 27. Proporción de la fibra de carbono y resina para el árbol de transmisión.

Materiales	Orientación	Unid.	PROPORCIÓN		
			Tamaño pequeño L=0,7m e=1.5mm Do=4,344cm # pasadas=6	Tamaño mediano L=1 m e=2mm Do=6,58cm # pasadas =8	Tamaño grande L=1,3 m e=2,5mm Do=8,83cm # pasadas =10
Fibra de carbono	90°	m	24,20	46,07	74,86
	45°	m	5,94	11,32	18,40
	15°	m	4,34	8,29	13,46
Resina epoxi para fibra de carbono (750 ml)		ml	150	200	270
Catalizador de resina 1,5% - 2% (250 ml)		ml	3	4	5,4

A partir de la tabla 27 y considerando las cotizaciones de los materiales, se pueden construir las siguientes tablas de costos.

Tabla 28. Costo por unidad de los materiales para el prototipo.

<b>Materiales</b>	<b>Presentación</b>	<b>Valor sin IVA (COP/Unidad)</b>	<b>Valor con IVA (COP/Unidad)</b>
<b>Fibra de carbono</b>	100 m	1.365,4 COP/m	1.624,826 COP/m
<b>Resina epoxi</b>	750 ml	133,33 COP/ml	158,663 COP/ml
<b>Catalizador</b>	250 ml	48 COP/ml	57,19 COP/ml

Tabla 29. Precio de los materiales por unidad fabricada.

<b>Materiales</b>	<b>Orientación</b>	<b>PROPORCIÓN</b>		
		<b>Tamaño pequeño</b>	<b>Tamaño mediano</b>	<b>Tamaño grande</b>
Fibra de Carbono	90°	\$ 39.320,80	\$ 74.855,73	\$ 121.634,50
	45°	\$ 9.652	\$ 18.393,03	\$ 29.896,80
	15°	\$ 7.051,75	\$ 13.469,81	\$ 21.870,16
Resina epoxi		\$ 23.799,45	\$ 31.732,60	\$ 42.839,01
Catalizador		\$ 171,57	\$ 228,76	\$ 308,83

- **Costos de los moldes para los árboles de transmisión.** Los moldes para bobinar la fibra de carbono, son cilindros huecos con dimensiones de longitud y de diámetro un poco más grande y más pequeña, respectivamente, que la de los prototipos. De igual manera, existe variedad de materiales utilizados para la fabricación de estos moldes. En este análisis, se van a utilizar tubos de aluminio mecanizados con el fin de darle sus dimensiones finales. En la siguiente tabla se identifica el costo por prototipo de los materiales que conforman el molde.

Tabla 30. Precio de los materiales del molde por cada prototipo.

Materiales	PROPORCIÓN		
	Tamaño pequeño	Tamaño mediano	Tamaño grande
Tubo de aluminio	\$ 16.000	\$ 24.000	\$ 26.000
Cera desmoldante Mold Release	\$ 10.975	\$ 14.633	\$ 18.291
Cinta transparente multipropósito	\$ 312	\$ 416	\$ 520
Papel bond	\$ 640	\$ 800	\$ 960

- **Costo de la energía suministrada.** La energía suministrada al sistema eléctrico de la máquina, tiene un costo, el cual se obtiene de acuerdo al consumo de potencia eléctrica de cada componente (motores y fuentes) y a las horas de trabajo de la máquina. Posteriormente se calcula el costo por prototipo conociendo que la máquina opera 6 horas y en este tiempo fabrica 3 árboles de transmisión.

Tabla 31. Precio del costo energético por árbol de transmisión.

COSTO ENERGÉTICO					
Componente	Potencia eléctrica consumida (kW)	Horas trabajo diarias	Valor (COP/KW-h)	Valor total día	Valor total año
Fuente de poder AC-DC 60V 20A	1.2	6	\$ 447	\$ 3.218,40	\$ 772.416,00
Fuente de poder Arduino Due	0.2	6	\$ 447	\$ 536,40	\$ 128.736,00
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 3.754,80</b>	<b>\$ 901.152,00</b>
<b>COP/Árbol</b>				<b>\$ 5.274,60</b>	

**8.3.1.2. Costos operacionales.** Los costos operacionales están representados en la siguiente tabla, donde encontramos el costo por prototipo, de acuerdo al salario que devenga un operador diariamente al fabricar un árbol de transmisión. También el costo del almacenamiento y el costo de mantenimiento de la máquina, el cual será el 5% del costo de producción.

Tabla 32. Precio de los costos operacionales por árbol de transmisión.

Referencia	Costo/Día	Costo/Mes
Operario	\$ 25.000	\$ 750.000
<b>Total/Prototipo</b>	<b>\$ 8.333,33</b>	
Almacenamiento	\$ 6.666	\$ 200.000
<b>Total/Prototipo</b>	<b>\$ 2.222</b>	
Mantenimiento	\$ 187.500	\$ 5.625.000
<b>Total/Prototipo</b>	<b>\$ 62.500</b>	

**8.3.1.3. Costos de las pruebas.** Finalizada la fabricación de los prototipos, se hacen pruebas de torsión con el fin de caracterizar las propiedades de éstos. Por lo tanto, el costo de dichas pruebas para cualquier prototipo, se va a tomar como \$ 75.000.

**8.3.2. Valor presente neto (VPN) y relación beneficio/costo (RB/c).** El valor presente neto (VPN) o valor actual neto (VAN), se elabora con la ayuda del flujo de caja y a través de este podemos saber si un negocio es rentable o no, teniendo en cuenta lo siguiente:

- *VPN positivo*: el proyecto es rentable.
- *VPN negativo*: proyecto no rentable.
- *VPN es cero*: proyecto indiferente.

Utilizando la ecuación uno (1) y tomando los valores del flujo de caja en cada periodo, se puede calcular el VPN, teniendo una tasa de descuento del 20%.

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_o \quad (1)$$

Donde:

$V_t$  = Representa los flujos de caja en cada periodo.

$I_o$  = Inversión inicial.

$k$  = Interés o tasa de descuento.

Tabla 33. Valor presente neto (VPN).

VALOR ACTUAL NETO (VAN)			
AÑO	$V_t$	$(1+k)^t$	$\frac{V_t}{(1+k)^t}$
1	\$ 45.326.825	1,2	\$ 37.772.354
2	\$ 92.013.455	1,44	\$ 63.898.233
3	\$ 140.100.684	1,728	\$ 81.076.785
4	\$ 189.630.530	2,074	\$ 91.432.271
5	\$ 240.646.271	2,488	\$ 96.722.778
$\sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t}$			\$ 370.902.420
$I_o$			\$ 19.016.211
<b>VAN</b>			<b>\$ 351.886.209</b>

La relación beneficio/costo (RB/c) se calcula con la ecuación dos (2). Esta establece el beneficio obtenido por la inversión del proyecto, el cual al ser mayor que 1 significa que el proyecto es viable.

$$RB/c = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t}}{I_0} \quad (2)$$

$$RB/c = \frac{\$370.902.420}{\$19.016.211} = 19,50 > 1 \rightarrow \text{Proyecto viable}$$

**8.3.3. Reembolso sobre la inversión (PayBack).** Este criterio se utiliza con el fin de estimar el potencial de recuperación de la inversión inicial. Es decir, cuánto tiempo toma el proyecto en devolver la inversión. El PayBack, se elabora en base a una tasa de descuento del 20% y de acuerdo a la tabla 34, el periodo de recuperación de la inversión es de aproximadamente 6 meses.

Tabla 34. PayBack.

Año	Flujo de caja	Descuento	Acumulado
0	(\$ 19.016.211)	(\$ 19.016.211)	(\$ 19.016.211)
1	\$ 45.326.825	\$ 37.772.354	\$ 18.756.143
2	\$ 92.013.455	\$ 63.898.233	\$ 45.142.090
3	\$ 140.100.684	\$ 81.076.785	\$ 35.934.695
4	\$ 189.630.530	\$ 91.432.271	\$ 55.497.576
5	\$ 240.646.271	\$ 96.722.778	\$ 41.225.202

$$PayBack = [\text{Periodo ultimo con flujo acumulado negativo}] + \left[ \frac{\text{Valor absoluto del último flujo acumulado negativo}}{\text{Valor del flujo de caja en el siguiente periodo}} \right]$$

$$PayBack = 0 + \left[ \frac{19.016.211}{37.772.354} \right] = 0,5 \text{ años} = 6 \text{ meses}$$

## 9. CONCLUSIONES

A continuación, se enlistan las conclusiones obtenidas del diseño y la construcción de la máquina para la manufactura de prototipos de árboles de potencia fabricados con fibras de carbono.

- En base al objetivo general, se concluye, que el presente proyecto de grado cumplió a cabalidad con lo propuesto. Es decir, se diseñó y construyó una máquina en base a la técnica filament winding, con la cual se pueden fabricar prototipos de árboles de transmisión de potencia usando como materia prima la fibra de carbono y una matriz de resina epóxica.
- La máquina presenta muchas ventajas, entre ellas, la modularidad de los perfiles de aluminio tipo hepcó. Estos permiten ensamblar cualquier elemento, mediante el uso adecuado de tornillería y T – Nuts. También, presenta menor peso que una estructura metálica y sus dimensiones de diseño permiten fabricar varios prototipos de árboles de transmisión con diferentes dimensiones. Por otra parte, se tiene absoluto control sobre los parámetros de fabricación: tensión, ángulo de bobinado y apilamiento de las fibras.
- El uso de la matriz QFD en la evaluación de alternativas, permitió conocer la exigencia integral de la máquina a construir y así elegir la alternativa que más se adecúa a los requerimientos.
- El controlador usado (Arduino Mega) a pesar de no ser un controlador de gran capacidad para aplicaciones industriales, cumple de manera correcta su función durante el desarrollo del proceso. Cabe destacar que en futuras

versiones de la máquina, se recomienda el uso de PLC's como controladores.

- El uso de elementos electrónicos, incorporados en un sistema de control la conexión adecuada de los mismos, permitieron desarrollar una interfaz HMI para el funcionamiento semiautomático de la máquina, ya que este, depende en gran parte de la destreza que tenga el operador para interactuar con la interfaz.
- Como anexo al proyecto se entrega un manual de operación y mantenimiento con indicaciones claras y de fácil entendimiento para el uso de la máquina. Además, se especifica el proceso a seguir para la fabricación del prototipo de árbol de transmisión de potencia que se necesite para posteriores estudios y pruebas.
- El proyecto de la máquina para la manufactura de los prototipos de árboles de transmisión, es una propuesta viable económicamente; que busca impulsar el desarrollo tecnológico e investigativo en el sector automotriz de Colombia, pues el uso del materiales compuestos para la fabricación de autopartes, traen ventajas notorias que favorecen competencia en el mercado. A largo plazo, pueden llegar a reemplazar a los materiales convencionales.

## BIBLIOGRAFÍA

ANAYA DURAND, Alejandro y PEDROZA FLORES, Humberto. Escalamiento, el arte de la ingeniería química: plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. [Base de datos en línea]. Enero – junio de 2008. Tecnología, Ciencia, Educación, 23(1), 31-39. (Recuperado en 5 febrero 2018). Disponible en <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48223105>

ASKELAND, Donald R. Ciencia e ingeniería de los materiales, 3a Ed. México D.F.: International Thomson Editores, S.A. de C.V., 1998. pp. 508-549.

BORRELL TOMÁS, María Amparo y SALVADOR MOYA, María Dolores. Materiales de carbono: del grafito al grafeno. Barcelona: Editorial Reverté, S.A., 2015. 77p.

CORTIZO RODRÍGUEZ, José L., *et al.* Elementos de máquinas: teoría y problemas. Oviedo: Universidad de Oviedo, 2004. p. 25

FARIA, H., *et al.* Numerical modelling of the filament winding process. (Recuperado en 23 abril 2018) Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/228873262\\_Numerical\\_modelling\\_of\\_the\\_filament\\_winding\\_process](https://www.researchgate.net/publication/228873262_Numerical_modelling_of_the_filament_winding_process)

KEYS, Chad; KINKLER, Wesley y SANTIAGO, Alex. Composite driveshaft: efficiency, safety and economics. Kingsville: Texas A&M University, 2004. 61p.

MAZUMDAR, Sanjay K. Composites manufacturing: materials, product, and process engineering. EE.UU: CRC Press LLC, 2002. p. 5.

MIRAVETE, Antonio. Materiales compuestos I. Barcelona: Reverté S.A., 2012. p. 47-56.

MUTASHER, Saad; MIR-NASIRI, Nazim y CHAI LIN, Lee. (2012). Small - Scale filament winding machine for producing fiber composite products. [Base de datos en línea]. Abril de 2012. Journal of Engineering Science and Technology, 7(2), 156-168. (Recuperado en 5 febrero 2018). Disponible en [http://jestec.taylors.edu.my/Vol%207%20Issue%20April%202012/Vol\\_7\\_2\\_156\\_168\\_SAAD%20MUTASHER.pdf](http://jestec.taylors.edu.my/Vol%207%20Issue%20April%202012/Vol_7_2_156_168_SAAD%20MUTASHER.pdf)

MORALES HERNÁNDEZ, Brian Farid y BARRERA SANTOS, Reynel Germán. Diseño óptimo de un eje de transmisión para vehículos fabricado con materiales compuestos. Trabajo de grado Ingeniero Mecánico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2016, 137p.

PETERS, Stan T. Composite filament winding. Ohio: ASM International, 2011. p. 3.

POLLARD, A. Polymer matrix composites in driveline applications, GKN Tech., UK, 1989.

SÁNCHEZ CARRIÓN, Edgar Fabián y JIMÉNEZ GONZÁLEZ, Jonathan Paúl. Diseño y construcción de un prototipo de máquina de pultrusión y estudio experimental de las variables para la obtención de perfiles “O” de material compuesto con matriz termoestable. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2017, 180p.

WANG, Shengyu. Uso de materiales compuestos en el diseño de un árbol de transmisión. Proyecto fin de carrera. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.

Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, 2014, p.  
5.