

**DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE FILAMENT WINDING PARA FABRICAR
MATERIALES COMPUESTOS**

AUTOR

JUAN JOSÉ REVELO QUIJANO

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
FLORIDABLANCA**

2021

**DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE FILAMENT WINDING PARA FABRICAR
MATERIALES COMPUESTOS**

AUTOR

JUAN JOSÉ REVELO QUIJANO

PRESENTADO PARA OPTAR EL TÍTULO: INGENIERO MECÁNICO

DIRECTOR

MSC. SERGIO ANDRÉS GÓMEZ SUAREZ

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
FLORIDABLANCA**

2021

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	4
LISTA DE ILUSTRACIONES	5
LISTA DE ANEXOS	7
SIMBOLOGÍA	8
1. INTRODUCCIÓN	12
2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	13
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
4. ANTECEDENTES	15
5. OBJETIVOS	19
6. ALCANCE	21
7. MARCO TEÓRICO.....	22
8. METODOLOGÍA.....	42
9. SOLUCIONES PRELIMINARES CONCEPTUALES PARA EL DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE FILAMENT WINDING	45
10. DISEÑO DETALLADO DE LOS COMPONENTES DE LA MÁQUINA FILAMENT WINDING	55
11. CÁLCULOS Y DISEÑO DE DETALLE DE LA MÁQUINA DE FILAMENT WINDING.....	64
12. PLANOS A DETALLE	92
13. PROCESO Y DEFINICIÓN DE MANUFACTURA DE COMPONENTES PARA MÁQUINA FILAMENT WINDING.....	95
14. CONCLUSIONES	99
15. RECOMENDACIONES	100
16. REFERENCIAS.....	101
17. ANEXOS.....	106

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Patentes filament winding	16
Tabla 2. Propiedades de diferentes tipos de fibras	25
Tabla 3. Características del poliéster y epoxi	33
Tabla 4. Etapas del diseño	43
Tabla 5. Diseño máquina filament winding	51
Tabla 6. Parámetros clave en proyectos antecesores	52
Tabla 7. Alternativas para diferentes subsistemas en la máquina filament winding.	56
Tabla 8. Selección de opciones para cada subsistema para la propuesta 1	57
Tabla 9. Selección de opciones para cada subsistema para la propuesta 2	58
Tabla 10. Selección de opciones para cada subsistema para la propuesta 3	60
Tabla 11. Correlación de factores de riesgo con sus variables.....	62
Tabla 12. Correlación de factores de riesgo con sus variables para las 3 las propuestas.....	62
Tabla 13. Componentes máquina filament winding.....	65
Tabla 14. Parámetros para el factor de modificación superficial de marin.....	77
Tabla 15. Datos generales del sistema piñón- cremallera elegido.....	88

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. ¿Qué es un material compuesto?	22
Ilustración 2. Fibra de vidrio MAT	28
Ilustración 3. Woven roving PRFV	29
Ilustración 4. Roving directo PRFV	30
Ilustración 5. Roving continuo	31
Ilustración 6. Velo de superficie PRFV.....	31
Ilustración 7. Procesos filament winding	35
Ilustración 8. Bobinado helicoidal.....	36
Ilustración 9. Bobinado circunferencial	37
Ilustración 10. Bobinado satélite	37
Ilustración 11. Esquema relación de variables de bobinado.....	38
Ilustración 12. Baño por inmersión.....	40
Ilustración 13. Proceso tambor	41
Ilustración 14. Modelos de fases.....	43
Ilustración 15. Diagrama de objetivos	47
Ilustración 16. Esquema general de transformación de la energía en máquina filament winding	48
Ilustración 17. Esquema general de transformación de la energía en máquina filament winding (con procesos internos).....	49
Ilustración 18. Esquema en detalle de transformación de la energía en máquina filament winding	50
Ilustración 19. Diseño CAD (solidworks) para la propuesta 1	58
Ilustración 20. Diseño CAD (solidworks) para la propuesta 2	59
Ilustración 21. Diseño CAD (solidworks) para la propuesta 3	61
Ilustración 22. Diseño final máquina filament windign.....	64
Ilustración 23. Diseño final máquina filament winding.....	64
Ilustración 24. Diagrama de cuerpo libre para pieza final terminada	67
Ilustración 25. Diagrama de cuerpo libre para mandril-eje.....	70
Ilustración 26. Diagrama de cortantes y flectores en el plano XZ	72
Ilustración 27. Diagrama de cortantes y flectores en el plano XY	73
Ilustración 28. Características de rodamiento seleccionado de catálogo SKF.....	80
Ilustración 29. Características de buje seleccionado de catálogo SKF.....	81
Ilustración 30. Características de polea seleccionada de catálogo SKF	81
Ilustración 31. Características de correa seleccionada de catálogo SKF	82
Ilustración 32. diseño de carro movible con dimensión tolva de resina	85
Ilustración 33. Screenshot propiedades de carro alimentador de acero inoxidable.....	87
Ilustración 34. Características perfil C de 70x50x15mm	90
Ilustración 35. Esquema eléctrico Filament Winding.....	91
Ilustración 36. Máquina Filament Winding vista dimetrica	92
Ilustración 37. Máquina Filament Winding vista isométrica.....	92
Ilustración 38. Máquina Filament Winding vista frontal	93

Ilustración 39. Máquina Filament Winding vista lateral93
Ilustración 40. Máquina Filament Winding vista superior94
Ilustración 41. Diagrama de operaciones de manufactura96

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Plano de detalle estructura base con ejes y mandril.....	106
Anexo 2. Plano de detalle brazo giratorio	107
Anexo 3. Plano de detalle carrete móvil.....	108
Anexo 4. Plano de detalle para la polea del brazo giratorio.....	109

SIMBOLOGÍA

V_{Fil} : Es la velocidad con necesaria para que el filamento avance.

\emptyset_{1i} : Es el diámetro interior del tubo de material compuesto y diámetro exterior del mandril.

\emptyset_{1e} : Es el diámetro exterior del tubo de material compuesto.

L_1 : Es la longitud final deseada del tubo de material compuesto.

$\omega_{\text{max}1}$: Es la velocidad angular del mandril.

F_{fil} : Fuerza del filamento.

P_{em} : Presión externo del mandril.

$\rho_{\text{fibra vidrio}}$: Densidad fibra de vidrio.

ρ_{resina} : Densidad de resina.

p_{em} : Perimetro exterior mandril.

q_{em} : Carga distribuida externa al mandril.

$V_{\text{pieza final}}$: Volumen de pieza final compuesta.

$W_{\text{pieza final}}$: Peso de pieza final compuesta.

$\rho_{\text{acero inoxidable}}$: Densidad de acero inoxidable 316.

T_{fil} : Torque de filamento.

R_{AZ} : Carga del rodamiento A en el plano XZ.

R_{Bz} : Carga del rodamiento B en el plano XZ.

M_z : Momento máximo flector en el plano XZ.

R_{Ay} : Carga del rodamiento A en el plano XY.

R_{By} : Carga del rodamiento B en el plano XY.

M_y : Momento máximo flector en el plano XY.

\dot{M} : Resultante momento flector máximo.

\dot{T} : Resultante de torque máximo.

S_y : Esfuerzo de fluencia.

S_{ut} : Esfuerzo ultimo de tensión.

n_s : factor de seguridad de trabajo.

d : Diámetro critico de eje.

R_A : Carga resultante en el rodamiento A.

R_B : Carga resultante en el rodamiento B.

\emptyset_{eje} : Es el diámetro del eje que se seleccionó para el diseño.

S_e : Resistencia a la fatiga.

k_a : Factor de modificación superficial de Marin.

k_b : Factor de tamaño para eje rotatorio.

k_c : Factor de tamaño para eje no rotatorio.

k_d : Factor de temperatura.

k_f : Factor de concentración de esfuerzo a la fatiga.

S'_e : Resistencia a carga simple completamente reversible.

σ_{max} : Esfuerzo normal máximo.

σ_{min} : Esfuerzo normal mínimo.

σ_a : Esfuerzo normal medio.
 τ_{max} : Esfuerzo cortante máximo.
 τ_{min} : Esfuerzo cortante mínimo.
 τ_m : Esfuerzo cortante medio.
 ϕ_{ir} : Diámetro interior de rodamiento.
 ϕ_{er} : Diámetro exterior de rodamiento.
 W_{pol} : Peso de la polea.
 W_{Rueda} : Peso de rueda.
 W_{bujes} : Peso de buje.
 $\phi_{primitivo}$: Diámetro primitivo de la polea del eje-mandril.
 P_{motor1} : Potencia del motor 1 (motor mandril).
 V_{brazo} : Velocidad lineal del brazo giratorio.
 ϕ_{polea} : Diámetro de la polea del brazo giratorio.
 ω_{max2} : Velocidad angular del motor 2.
 F_{brazo} : Fuerza que ejerce el brazo.
 T_{brazo} : Tensión en el brazo.
 P_{motor2} : Potencia del motor 2 (motor brazo giratorio).
 L_2 : Longitud que se desplaza el carro movable.
 t_{sumerg} : Tiempo que permanece la fibra sumergida en resina.
 W_{carro} : peso del carro movable.
 S : paso del carro que representa una vuelta del mandril.
 V_{carro} : velocidad lineal del carro movable.
 $\omega_{engranaje}$: velocidad angular del engranaje.
 $d_{engranaje}$: diámetro primitivo del engranaje.
 $\theta_{embobinado}$: Angulo de embobinado del mandril.
 $T_{engranaje}$: Torque del engranaje.
 P_{motor3} : Potencia del motor 3 (motor carrete móvil).

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE FILAMENT WINDING PARA FABRICAR MATERIALES COMPUESTOS

AUTOR(ES): Juan José Revelo Quijano

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Sergio Andrés Gómez Suarez

RESUMEN

La máquina de bobinado de filamentos ha sido una clave importante en el crecimiento de diferentes industrias, gracias a su eficaz rendimiento, junto con su bajo costo y su compatibilidad, hacen de ella una excelente opción para fabricar materiales compuestos, en especial, aquellos de forma cilíndrica que soporten grandes presiones. Su funcionamiento consiste en el bobinado de filamentos sobre un tubo, es decir, fibras impregnadas de resina, son dispensadas a cierta tensión y con ciertos ángulos mientras son enrolladas en un mandril giratorio hasta que este, es cubierto totalmente, obteniéndose al final, un material fuerte con altas propiedades mecánicas, térmicas y rendimientos superiores. Partiendo del principio de la máquina de bobinado de filamentos, la máquina constara de 4 ejes para proporcionarle mayor resistencia de presión interna al producto, funcionara bajo la orden de un controlador lógico programable, para un trabajo secuencial controlado y ordenado, todo esto junto con la aplicación de la resina epoxies y la fibra de vidrio. El mandril fue seleccionado de acuerdo a unos criterios, en el cual satisface tanto a la máquina como al usuario que va a manipularla. La máquina fue diseñada y adecuada para un espacio de investigación estudiantil, gracias a sus dimensionamientos, confiabilidad y seguridad, la máquina es apta para cumplir las distintas necesidades y expectativas del operador.

PALABRAS CLAVE :

bobinado de filamentos, mandril, resina, fibra, epoxies

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: DESIGN OF A FILAMENT WINDING MACHINE TO MANUFACTURE COMPOSITE MATERIALS

AUTHOR(S): Juan José Revelo Quijano

FACULTY: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Sergio Andrés Gómez Suarez

ABSTRACT

The filament winding machine has been an important key in the growth of different industries, due to its efficient performance, together with its low cost and its compatibility, make it an excellent option for manufacturing composite materials, especially those of the same shape. cylindrical that withstand high pressure. Its operation consists in the winding of filaments on a tube, that is, fibers impregnated with resin, they are dispensed at a certain tension and with certain angles while they are wound on a rotating mandrel until it is completely covered, obtaining at the end, a material strong with high mechanical and thermal properties and superior performances. Starting from the principle of the filament winding machine, the machine will consist of 4 axes to provide greater internal pressure resistance to the product, it will work under the order of a programmable logic controller, for a controlled and ordered sequential work, all this together with the application of epoxy resin and fiberglass. The mandrel was selected according to some criteria, in which it satisfies both the machine and the user who is going to manipulate it. The machine was designed and suitable for a student research space, thanks to its dimensions, reliability and safety, the machine is suitable to meet the different needs and expectations of the operator.

KEYWORDS:

filament winding, mandrel, resin, fiber, epoxies

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se ha visto un notable crecimiento en cuanto al uso de los materiales compuestos, ya que sus propiedades mecánicas son más sofisticadas en comparación con aquellos materiales tradicionales. Muchas industrias han optado por el uso de los materiales compuestos, para satisfacer necesidades básicas y esenciales en la vida del ser humano, por esta razón, han surgido técnicas especializadas en cuanto al tema de fabricación de dichos materiales, que ayuden a satisfacer las necesidades humanas que cada vez son más exigentes.

La técnica filament winding contribuye a la creación de productos compuestos de forma cilíndrica, por lo que la hace bastante llamativa en aplicaciones comerciales para la elaboración de tanques de almacenamiento, tubos reforzados y tuberías, y también en aplicaciones aeroespaciales para la fabricación productos como cajas de motor para cohetes, aspas de helicópteros. Estos productos son realizados con materiales como resinas epoxicas, poliéster, y fibras de tipo carbono y vidrio. [1]

En este proyecto se ha realizado el diseño y selección de las partes de una máquina de filament winding, con características académicas, con el fin de ofrecerla a la comunidad UPB. La máquina cumple con requisitos de manufactura, obteniendo un diseño de bajo costo y con poca mano de obra.

2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Debido a la ausencia de una máquina filament winding en la UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA sede BUCARAMANGA, se incentiva el diseño de una máquina de filament winding aplicando la metodología de French, con la intención de que el estudiante UPB tenga conocimientos más amplios en el ámbito de los materiales compuestos, del diseño, y procesos de fabricación ya que son líneas importantes en el desarrollo profesional del alumno.

Consecuentemente con lo anterior, el estudiante aplicara todos los conceptos aprendidos durante la formación como profesional en asignaturas como ciencias de los materiales, resistencias de los materiales, análisis de mecanismos, diseño de máquinas y procesos de fabricación, para tener la capacidad de desarrollar este proyecto con los objetivos planteados.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente distintas técnicas y formas para la fabricación de materiales compuestos son utilizados en la industria de a gran escala, entre ellos se encuentra la filament winding, una técnica bastante llamativa por sus reducidos costos, y por la garantía de ofrecer un producto bien procesado con excelentes condiciones mecánicas. [2]

Por otra parte, a pesar de que el uso de los materiales compuestos se ha ampliado consideradamente en los últimos años, Colombia cuenta con poca motivación que proporcione el afianzamiento en el uso de la técnica filament winding, impidiendo al ciudadano acceder de manera rápida y fácil a dicha técnica, ya que son pocas las industrias en el país que manejan este tipo de máquina. Sumado a esto, la facultad de mecánica de la UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA sede Bucaramanga no cuenta con una máquina de filament winding y un diseño fabricable de esta, que suministre apoyo a las asignaturas de ciencias de los materiales y procesos de fabricación, y así mismo le permita al estudiante reforzar y practicar los conocimientos aprendidos en dichas asignaturas.

Por lo anterior, se diseñó una máquina de filament winding para poder fabricarla en futuros proyectos académicos de la Universidad.

4. ANTECEDENTES

La técnica filament winding, un bobinado de filamentos, es una técnica industrial, bastante llamativa, debido a la factibilidad y versatilidad para hacer materiales compuestos que requieran soportar grandes fuerzas y presiones; Hoy en día, distintos prototipos de diseño, son ofrecidos al mundo y que gracias al internet se tiene la posibilidad de estudiarlas e investigarlas. Es de vital importancia realizar este paso ya que permite establecer una idea clara del diseño, a partir de evaluaciones sobre otras patentes para evitar inventar algo que ya existe o si es posible el caso, realizar alguna mejora.

La siguiente información, son proyectos similares de estudiantes que realizaron diseños similares de máquinas, con el principio de filament winding.

- El ingeniero Carlos Andrés Calada Zapata “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA BOBINADORA SEMIAUTOMÁTICA DE 4 EJES PARA LA FABRICACIÓN DE TANQUES DE FIBRA DE VIDRIO MEDIANTE LA TÉCNICA FILAMENT WINDING” (2017) en su trabajo de grado para la obtención de ingeniero mecatrónico, desarrolla el diseño de un sistema que se encarga de bobinar filamentos de vidrio impregnados de resina poliéster. Para hacer dicho proyecto se basa en una serie de pasos, analizando primero los parámetros de mayor importancia, luego procede a la etapa de diseño, teniendo en cuenta las dimensiones, las fuerzas que actuaran sobre la misma y los componentes y ejes necesarios para la estructura.[3]
- Mario Andrés Aguilar Coloma y Analía Matilde Parada Fernández realizan “DISEÑO Y SELECCIÓN DE LAS PARTES DE UNA MÁQUINA DE EMBOBINADO DE HILOS, PARA LA FABRICACION DE CILINDROS EN PLASTICO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO” (2015) presentado como trabajo de grado para la obtención del título ingeniero mecánico, ofrecen una

solución para una fábrica que maneja recipientes a presión con materiales compuestos, diseñando una máquina capaz fabricar cilindros en plástico reforzado con fibra de vidrio a partir de la modalidad embobinado de filamentos. Como punto de partida analizan el embobinado de hilos helicoidal, los parámetros que rigen el proceso y las partes que constituyen la máquina. [4]

- José Daniel Salinas Rojas en su trabajo de grado “DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MÁQUINA, PARA LA ELABORACION DE POSTES DE FIBRA DE VIDRIO REFORZADA” (2014) ofrece el diseño de una máquina para una empresa (Postycher), garantizando la confiabilidad de la máquina con cálculos en elementos críticos. [5]
- Irne Alejandro Ramírez Villegas en su trabajo de grado “DISEÑO DE UNA MÁQUINA PARA CONSTRUCCION DE TANQUES CON MATERIALES FIBRO-REFORZADOS CON TECNICA FILAMENT WINDING” (2009) diseña una máquina automatizada para revestir tanques con materiales fibro-reforzados a partir del principio de operación de filament winding, proporcionando al tanque mayor resistencia interna de presión sin aumentar considerablemente su peso. [6]

Además de eso, la historia de filament winding registra varios patentes, que se distinguen entre ellas, por llevar cambios en el tipo de baño de resina, tipo de bobinado, tipo de mandril, entre otras.

En la tabla 1, se aprecie las diferentes patentes con sus respectivas características

Patentes relacionadas con la técnica de filament winding		
Numero Patente	Nombre	Características
US3499815	Filament Winding Apparatus	*Consta de una malla dentro de un disco para direccionar las fibras, además ofrece la posibilidad de elegir diferentes

		<p>patrones de enrollado, gracias a su centro giratorio</p> <p>*posee un dispositivo simple y económico para cambiar fácilmente el ancho y la concentración de las fibras o filamentos</p> <p>*El enrollar las fibras en forma de cinta ayuda a tener un mejor acabado superficial</p>
US4369934	Aparato de bobinado de filamentos helicoidales	<p>*El tornillo sin fin se mueve con el mismo motor que gira el mandril, por lo que siempre se encuentra sincronizado el mecanismo</p> <p>* El distribuidor de fibras camina sobre un tornillo sin fin, paralelo al mandril</p>
US3492187	Mecanismo de impregnación y devanado de filamentos	<p>*La velocidad del recorrido del filamento está limitado a unas 2000 pulgadas por minuto.</p> <p>*Tiene un mecanismo simplificado para mantener una constante deseada tensión en los filamentos durante el procesamiento.</p> <p>*Posee el diseño de un aparato de impregnación y devanado de filamentos diseño sumamente simple y de bajo costo.</p>
US006096164A	Máquina de colocación de fibra de múltiples ejes	<p>*el brazo está unido a una base para poder mejorar posicionar la cabeza en relación con el mandril</p> <p>*Control de temperatura en el almacenamiento de resina</p> <p>*Posee la libertad de moverse perpendicular y hacia lo lejos del mandril</p>
US6179945B1	Proceso para bobinado de filamentos de piezas de trabajo compuestas	<p>*Ofrece la opción de realizar diferentes enrollamientos con tejidos, no tejidos, velo, tapete</p>

		de hebras picada, telas perforadas *Está compuesta con un dispositivo sensor que le suministra a la fibra una primera tensión, y otro dispositivo sensor que le suministra a la fibra, una segunda tensión, siendo esta, menor que la primera
--	--	--

Tabla 1. Patentes filament winding. autor

5. OBJETIVOS

5.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar una máquina de filament winding aplicando el modelo de diseño de French que permita la fabricación de materiales compuestos.

5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Identificar las características claves, funciones y requerimientos que se deben tener en cuenta para la conceptualización de la máquina de filament winding según técnica árbol de objetivos y análisis de funciones.
 - Indicador: Mínimo cuatro características, funciones o requerimientos para la máquina según árbol de objetivo y diagrama de funciones de la máquina.
 - Resultado: Características, funciones y requerimientos para el diseño de la máquina.
- Establecer soluciones preliminares conceptuales para el diseño de una máquina de filament winding, por medio de método de diagrama morfológico Y elegir la más adecuada en cumplir los requisitos.
 - ✓ Indicador: Mínimo tres esquemas de solución según método de diagrama morfológico.
 - ✓ Resultado: Selección del diseño más adecuado según factores evaluados.
- Diseñar detalladamente los componentes de la máquina de filament winding obteniendo la lista completa de componentes, agrupados según sea necesario en subensambles con sus funciones identificadas.
 - Indicador: Planos de detalles, materiales, lista de componentes, procedimiento de fabricación de mínimo los siguientes sistemas: Pre-impregnación, estructura, giro de máquina.

- Resultado: Planos de detalle, lista de componentes, materiales, fases de fabricación.

6. ALCANCE

Se realizó el diseño de una máquina de filament winding con la intención de ofrecerla a la comunidad UPB sede Bucaramanga y que se pueda fabricar en futuros proyectos. El resultado final es el diseño como tal de la máquina con sus respectivas características y simulación en software CAD con planos, etapas de fabricación y componentes que lo conforman. Se aclara y resalta que no se realizó la fabricación física de ninguno de los diseños planteados en este proyecto.

7. MARCO TEÓRICO

7.1 Material Compuesto

Es la combinación de diferentes materiales de tal forma que permite la mezcla de propiedades térmicas, mecánicas, electrónicas, etcétera. Este compuesto de una matriz y un refuerzo. El refuerzo está constituido de fibras. Su rol es de soportar la carga. La matriz está compuesta de resina. Tiene la función de proteger las fibras y constituye la consistencia estructural.[7]. (Ver ilustración 1)

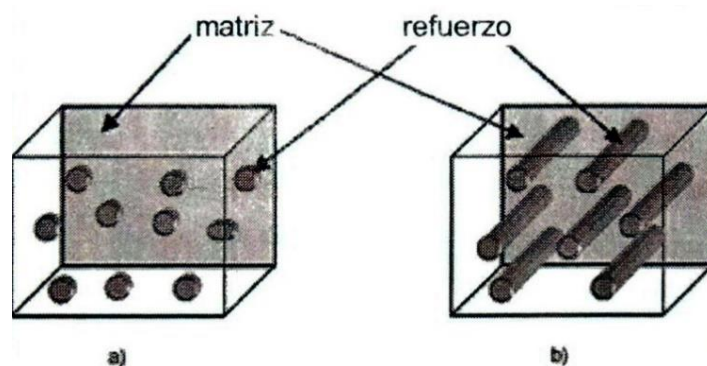


Ilustración 1. ¿Qué es un material compuesto? [8]

7.1.2 Tipos de materiales compuestos

Los materiales compuestos se pueden clasificar en función de:

7.1.2.1 En función del tipo de matriz

- ✓ Materiales compuestos de matriz metálica: Se caracterizan por poseer una alta tenacidad y rigidez a la fractura, además de esto, se comportan de una manera eficiente a altas temperaturas. Sin embargo, es un poco desfavorable el hecho de que sea complicado a la hora de mecanizar la matriz metálica.
- ✓ Materiales compuestos de matriz cerámica: presenta propiedades como alta resistencias a esfuerzos mecánicas, a altas temperaturas, sin afectar su

capacidad resistente. Son pobres en la tenacidad y en la conductividad térmica y eléctrica.

- ✓ Materiales compuestos de matriz polimérica (PMC): son llamativos por sus interesantes propiedades tales como alta tenacidad, baja densidad, su estructura molecular posee uniones débiles, haciendo que sean reversibles, es decir, pueden reblandecerse y endurecerse adquiriendo diferentes formas [7].

7.1.2.2 En función de la forma que posee el refuerzo

Con referencia al tipo de refuerzo, se pueden emplear de dos maneras refuerzo continuo y discontinuo:

- Refuerzo discontinuo:
 - ✓ Compuestos reforzados por partículas: con este tipo de refuerzos no se consiguen tantas propiedades benefactorías, su comportamiento mecánico es de tipo isotrópico, su fabricación es sencilla por lo que no son tan costosos.
 - ✓ Compuestos reforzados por fibras cortas: la longitud de las fibras influye en la calidad de propiedades que van a proporcionar, son de naturaleza anisótropa, otorgando excelentes propiedades en la dirección de las fibras.
 - ✓ Compuestos reforzados por plaquetas: ofrecen la opción de mejorar la propiedad de compactación. Al ser materiales bidimensionales, ofrecen igual resistencia en su plano. [7]
- Refuerzos continuos:
 - ✓ Fibras largas: trabajan con la relación L/D. la longitud de este tipo de reforzado con influye en las propiedades que van a otorgar al material.
 - ✓ Laminados: consiste en la implementación de varias laminas, una sobre otra en diferentes orientaciones. Estas laminas son la unión de varias fibras ya sean largas, cortas o tejidos de dos dimensiones.

- ✓ Tejidos: ofrecen mayor rigidez y un mayor grado a la resistencia a esfuerzos de flexión. [7]

7.2 Matrices poliméricas

Configuran geométricamente la pieza, dan cohesión al material, suelen ser flexibles y poco resistentes y transmiten los esfuerzos de unas fibras a otras. Las matrices se clasifican según el comportamiento térmico del polímero y se tienen:

- ✓ Termoplásticos: son reversibles, pues poseen la característica de transformarse en fluido a cierta temperatura, adquiriendo cualquier forma, que será preservada al momento de enfriarse.
- ✓ Elastómeros: son flexibles ya que tienen mucha libertad molecular.
- ✓ Termoestables: son rígidos debido a que en su estructura presenta uniones entrecruzadas, lo que impide adquirir cualquier forma al aumentar su temperatura, a diferencia de los termoplásticos, estos presentan daños en su composición química cuando son calentados. [9]

7.3 Fibras o refuerzos

Filamento de origen natural, artificial o sintético, apto para ser hilado y tejido, que generalmente presenta gran finura y buena flexibilidad.

El hecho de ser reforzado por fibras ofrece la posibilidad de poder variar las propiedades mecánicas como rigidez y resistencia del material, si se tiene en cuenta

elementos de diseño como pueden ser la longitud de la fibra, el diámetro, orientación, etc.

Las principales fibras usadas como refuerzos son: las de vidrio, aramida, carbono y boro. [10]

En la siguiente tabla 2 se puede apreciar las características de las fibras mencionadas anteriormente.

Materiales	Peso específico, ρ (kN/m ³)	Tensión límite en tracción, $\sigma_{lim,t}$ (GN/m ²)	$\sigma_{lim,t} / \rho$ 10 ³ m	Módulo elástico, E (GN/m ²)	E / ρ 10 ⁶ m
Aluminio	26,3	0,62	24	73	2,8
Titanio	46,1	1,9	41	115	2,5
Acero	76,6	4,1	54	72	2,7
Vidrio E	25,0	3,4	136	86	2,9
Vidrio S	24,4	4,8	197	190	3,5
Carbono	13,8	1,7	123	190	14
Berilio	18,2	1,7	93	300	16
Boro	25,2	3,4	137	400	16
Grafito	13,8	1,7	123	250	18

Tabla 2. Propiedades de diferentes tipos de fibras [7]

7.3.1 Fibra de vidrio

Las fibras de vidrio ofrecen una gran resistencia a tracción, son duras, resistentes al ataque químico y flexibles. Funcionan muy bien como aislante térmico, acústico y eléctrico. Es un material con propiedades isotrópicas.

Las fibras de vidrio se elaboran a partir de la sílice (del 50% al 70% de su composición), al que se le añade otros componentes en función de las propiedades deseadas. [7]

7.3.1.1 Fabricación

su fabricación empieza en un reactor, donde la materia prima finamente en presentación de polvo, es fundida. Luego de esto, el vidrio fundido fluye a través de unos canales que contienen pequeños agujeros. El vidrio fundido pasará por estos agujeros en forma de hilo continuo, donde posteriormente estará listo para la impregnación de un cubrimiento químico, gracias a un aplicador. Este cubrimiento le otorgará la propiedad de adherirse fácilmente a otros materiales. Finalmente, la fibra de vidrio es sometida a un horno con cierta temperatura para el proceso de curado. [10]

7.3.1.2 Clasificación de las fibras de vidrio

Las fibras de vidrio, a su vez, son concebidas para satisfacer las demandas de más variada índole, de ahí que estas fibras, puedan diferenciarse en los tipos que a continuación citamos:

- ✓ Vidrio A. se caracteriza por ser resistente al ácido, además de poseer alto grado en sílice, aunque tiene debilidad a la humedad.
- ✓ Vidrio B. Alta durabilidad, posee excelentes propiedades eléctricas.
- ✓ Vidrio C. Posee buena resistencia frente a los agentes químicos. Es más costoso que el del vidrio E.
- ✓ Vidrio D. baja densidad, y portadora de propiedades dieléctricas normales y absorbentes de ondas electromagnéticas.
- ✓ Vidrio E. Los elementos más significativos que conforman básicamente este tipo de vidrio son el borosilicato de calcio y aluminio, en cantidades exiguas contienen potasio y sodio. Es el vidrio utilizado con más frecuencia para producir las fibras que formarán parte de futuros plásticos reforzados.

- ✓ Vidrio ERC. Ofrece propiedades eléctricas y a la vez, tiene resistencia química.
 - ✓ Vidrio I. se usa de protector contra la radiación ya que tiene oxido de plomo.
 - ✓ Vidrio L. es impenetrable por las radiaciones infrarrojas, ya que tiene el plomo.
 - ✓ Vidrio R. Se encuentran en este vidrio ensalzadas todas las cualidades de resistencia, superando a las de otros tipos.
 - ✓ Vidrio S. Con propiedades semejantes a las del vidrio anterior, son vidrios de precio aún más elevado.
 - ✓ Vidrio X. este vidrio la translucidez a los rayos debido a que posee litio.
- [11]

7.3.1.3 Presentaciones

Como las fibras de vidrio más utilizadas son las de tipo E, que son las que se usan generalmente como refuerzo estructural y para equipamiento industrial, se tienen diferentes presentaciones de acuerdo a la finalidad.

- **Mat**

Su estructura se compone de varios filamentos de vidrio ubicados al azar, ignorando por completo la orientación de los filamentos. Son utilizados en laminaciones manuales, moldes cerrados y laminados continuos.[10] (Ver ilustración 2)



Ilustración 2. Fibra de vidrio MAT [12]

✓ Beneficios

- Se caracteriza por eliminar el aire interior de manera rápida, también se humecta rápido, haciendo que el proceso de moldeo sea fácil y sencillo.
- Permite el ahorro de resina, controlando la velocidad de impregnación, y de esta manera, obtener mejores propiedades mecánicas.
- Excelente maleabilidad: Facilita la manipulación y la capacidad para adaptarse rápidamente a moldes complejos.
- Curado rápido, incluso en piezas de materiales compuestos relativamente delgadas.
- Buena adhesión química en la aplicación de laminado.
- Poca probabilidad de agrietamiento. [13]

✓ Woven Roving

Woven Roving es un refuerzo de tela tejida bidireccional, es decir, los filamentos son ubicados en dirección vertical y horizontal alta resistencia mecánica en dos direcciones a las piezas fabricadas. Por ser compatible con resinas poliéster, vinil éster, fenólicas y epoxicas, es popularmente utilizado en procesos de moldeo manual y procesos automáticos. [13]. (Ver ilustración 3).

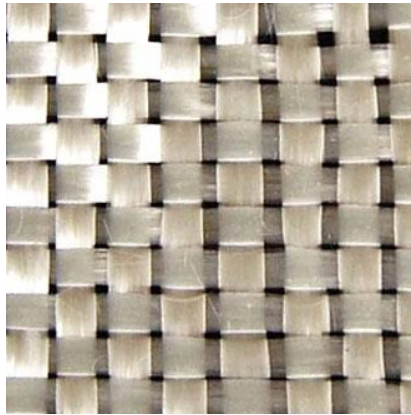


Ilustración 3. Woven roving PRFV [14].

- ✓ Beneficios
 - Alta velocidad de humectación.
 - Fácil manejo.
 - Facilidad de laminación y eliminación de burbujas.
 - Alta productividad.
 - Alta resistencia mecánica de las piezas.
 - Tensión uniforme.

✓ Roving directo:

Este tipo de presentación ha sido diseñado especialmente para la técnica de filament winding, haciéndola compatible con resina epoxies, vinilester, poliéster. Ofrecen un excelente procesamiento con una rápida humectación.[10] (Ver ilustración 4).



Ilustración 4. Roving directo PRFV [15]

- ✓ Beneficios
 - Tensión constante de los hilos.
 - Rápida impregnación.
 - Excelentes propiedades mecánicas.
 - Masa lineal constante.
 - Rendimiento uniforme.
 - Proporciona un acabado lisa y regular. [13]

- ✓ Roving continuo para aspersion

Es un roving de uso general, es fabricado con el vidrio tipo E, su enrollado es de forma cilíndrica y sin torsión. Su aplicación está centrada para hacer piezas de carros, camiones, piscinas, yates y tuberías.[13] (Ver ilustración 5)

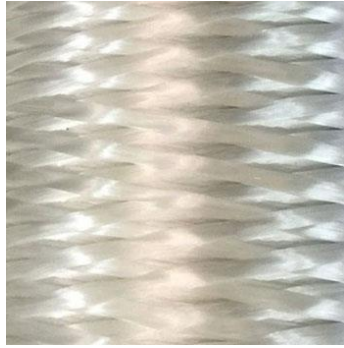


Ilustración 5. Roving continuo [16]

✓ Beneficios

- Baja electricidad estática.
- Excelente corte y dispersión.
- Rápida humectación y adaptación al molde.
- Compatible con múltiples sistemas de aspersión.
- Buenas propiedades mecánicas.
- Alto módulo de tensión. [13]

✓ Velo de superficie

Está diseñado bajo 5 laminados continuos de fibra, de 12 micrones de diámetros con vidrio C, con resistencia a la corrosión, dispersados al azar por toda la superficie. El velo de superficie es fabricado mediante una técnica llamada papel húmedo.[10] (Ver ilustración 6).



Ilustración 6. Velo de superficie PRFV [17]

- ✓ Beneficios
- Maximiza la productividad de moldeo por la poca aplicación de mano de obra requerida para producir piezas en plástico reforzado, gracias a su humectación agilizada.
- Adecuada velocidad de impregnación: Reduce el consumo de resina; por lo tanto, genera un mayor contenido de vidrio y mejora las propiedades mecánicas.
- Se caracteriza por tener una buena maleabilidad, haciéndola adaptable a cualquier tipo de molde. [13]

7.4 Resinas termoestables

Son aquellas resinas que cambian irreversiblemente bajo la influencia de luz, calor, algún agente químico y fotoquímico, transformándose de soluble y fusible a un modo no fusible e insoluble. Todo esto ocurre debido a un proceso reactivo de entrecruzamiento o de curado, un agente entrecruzador y las cadenas poliméricas reaccionan entre sí, formándose macromoléculas que estarán orientadas en todas las direcciones. El resultado es un retículo tridimensional que le proporciona al material a impregnar, distintas propiedades de resistencia, mecánicas y térmicas.[18]

7.4.1 Poliéster

Se obtiene a través del proceso policondensación de un di alcohol con un di ácido y un monómero insaturado. Se caracteriza por ser un producto alto en grado de dureza, resistente a la tracción, también posee una elevada relación resistencia/dureza, resistente a la hidrolisis y a la torsión. Por las anteriores características, la hacen bastante llamativa para aplicarla conjuntamente con fibra de vidrio para crear sistemas estratificados (PRFV) en los que la resina de poliéster aporta la resistencia química y la fibra de vidrio la resistencia mecánica.[19]

7.4.2 Resinas epoxi

En cuanto a sus características, la resina epoxi es la más sofisticada debido a su alta resistencia térmica, soportando temperaturas de hasta 70° C, tiene una aplicación sencilla debido a su flexibilidad, humectación y adherencia. Las marcas comerciales de la resina epoxi se elaboran a partir de una reacción química entre dos productos: epiclorohidrina y bisfenol-a.

Por el bajo costo que representa la resina epoxi, frente a otros tipos de materiales como el metal, la industria moldeadora es la que más la usa, destinándose a la fabricación de piezas laminares. [20]

En la tabla 3, se aprecia la comparación de propiedades entre la resina poliéster y la resina epoxi

PROPIEDAD	POLIÉSTER	EPOXI
Tensión de rotura (MPa)	40 - 90	55 – 130
Módulo de elasticidad a tracción (GPa)	2,0 - 4,4	2,8 – 4,2
Límite elástico a flexión (MPa)	60 - 160	125
Resistencia al impacto (J/m) (ensayo de Izod de barra dentada)	10,6 - 21,2	5,3 – 53
Densidad (g/cm ³)	1,1 - 1,46	1,2 – 1,3

Tabla 3. Características del poliéster y epoxi [7]

7.4.3 Vinil éster

Las resinas vinil éster se desarrollaron para combinar las ventajas de las resinas epoxi con una mejor manipulación y curado más rápido, o similar al de las resinas de poliéster insaturado. Las resinas de tipo vinil éster también se curan con los peróxidos orgánicos convencionales utilizados con resinas de poliéster. Las resinas de vinil éster ofrecen tenacidad mecánica y excelente resistencia a la corrosión. Estas propiedades mejoradas se obtienen sin el procesamiento y manipulación algo

más complejo, o los métodos especiales de fabricación en talleres típicos que trabajan con resinas epoxi. [21]

7.5 Aceleradores y catalizadores

Las resinas, al pasar el tiempo pierden sus características y más cuando entran en contacto con la luz y el calor, haciendo que el producto coja una contextura gelatinosa, desfavorable para los usos industriales

en lugares de trabajo, donde se necesita trabajar una temperatura ambiente para un curado adecuado, se tiene que adicionar productos que agilicen el proceso de endurecimiento. Estos productos se llaman acelerador y el catalizador.

El acelerador es el causante de activar la reacción química, es decir, descomponen el catalizador para que propicie el endurecimiento de la resina. Los catalizadores son los encargados de la reacción química entre la resina y el estireno, permitiendo formar una estructura sólida tridimensional. [22]

7.6 Filament Winding

La técnica de filament winding es un método para fabricar materiales compuestos de forma cilíndrica. Su función consiste en el enrollamiento de filamentos a cierta tensión, e impregnadas con resina, a un molde giratorio. Mientras el molde gira, un carro se desplaza de un lado a lado del molde, otorgando las fibras con orientación y Ángulos. Las fibras más comunes son las de carbono y de vidrio y son impregnadas con una resina sintética. Una vez el mandril este cubierto con el espesor deseado, se procede al paso de curado, donde será llevado a un horno con cierta temperatura para el endurecimiento adecuado, también se puede dejar al medio ambiente, aunque sería muy lento el proceso de curación. Una vez la pieza haya salido del proceso de curado con la resina, se procede al paso de

desmolde, si así se desea, pues dependiendo del uso a la pieza final, se requerirá o no el desmolde del mandril.

Esta técnica puede ser automatizada para llevar un control en las tensiones de las fibras. los filamentos que se aplican con alta tensión dan como resultado un producto final con una mayor rigidez y fuerza, baja tensión resulta en una mayor flexibilidad. El ángulo de enrollado también puede ser controlado. Un ángulo alto ofrecerá resistencia a la compresión, mientras que un patrón de menor ángulo proporcionará una mayor resistencia a la tracción. [23]

El proceso de filament winding se puede ver en la ilustración 7.

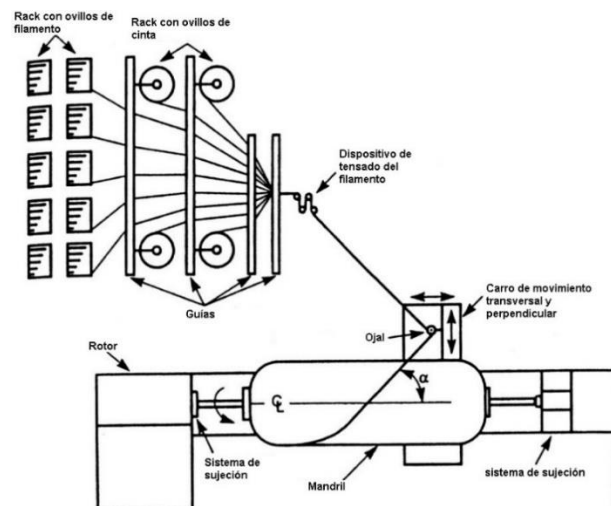


Ilustración 7. Proceso filament winding.[24]

7.6.1 Sistemas que constituyen el bobinado de filamentos

- Mandril

Aquí se enrollarán los filamentos y es donde se dará forma cilíndrica al material compuesto. Puede estar hecho de diferentes materiales, tales como plástico, vidrio o metal. El mandril puede ser removible o no, eso depende del Angulo y la presión proporcionada al enrollar los filamentos, es decir del tipo de bobinado y del uso que se le dará a la pieza final. [25]

- Carro alimentador

Es el conjunto compuesto por el sistema de guías y el equipo de impregnación de resina a la fibra. Este posee la característica de desplazarse horizontal y tangencialmente del mandril, en algunos casos, se mueve radialmente sobre mandriles que son de forma redondeados en sus extremos. [26]

- Sistema de guías

Está diseñado con argollas, rodillos orificios de guía, peines y demás accesorios, con el fin de transportar la fibra ordenadamente desde la percha hasta el mandril. Su material puede ser de nylon, acero, polietileno de ultra peso molecular.

- Percha

Es la parte que constituye el almacenamiento de las fibras y estará diseñado teniendo en cuenta la cantidad de hilos que pueda surtir para formar el ancho de la banda. Existen varios tipos: rotatorios, estacionarios, combinadores.[26]

7.6.2 Tipos de bobinado

- Bobinado helicoidal

Consiste en la combinación del movimiento rotacional del mandril con el movimiento traslacional del carro alimentador, haciendo que las fibras avancen y se enrollen con determinado ángulo. [27] (Ver ilustración 8)

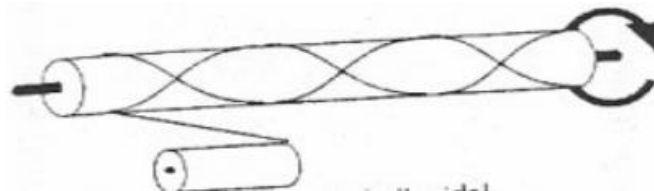


Ilustración 8. Bobinado helicoidal [28]

- Bobinado circunferencial

se trata de una variante del bobinado helicoidal, pero con un ángulo de enrollado de 90° . [28]. (Ver ilustración 9)

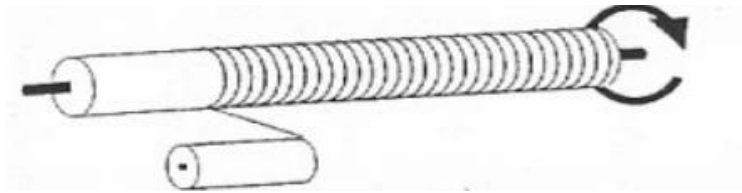


Ilustración 9. Bobinado circunferencial [29]

- Bobinado polar o plano

Es un bobinado similar al helicoidal, pero con la diferencia de que los pasos de la fibra son tangenciales a uno de los polos del mandril y luego tangente al otro polo opuesto, formando un plano de simetría en la pieza. [30] (Ver ilustración 10)

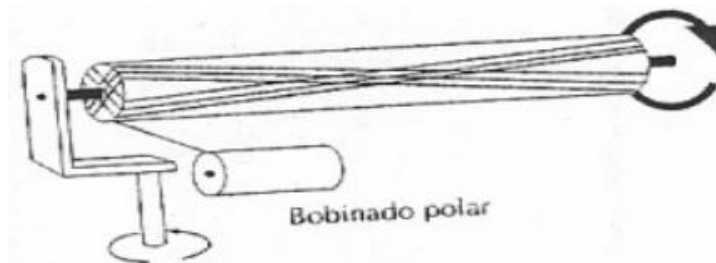


Ilustración 10. Bobinado satélite [31]

7.6.3 Parámetros que rigen el bobinado

En el proceso de filament winding es importante tener en cuenta el patrón con el que será cubierto el molde, y de esta manera, tener claridad del producto final que se va obtener

En el proceso, el ángulo de enrollamiento va ser determinante cuando se elija la velocidad de traslación y rotación

En la ilustración 11. Se analiza el patrón que hace el carro alimentador en un movimiento de ida. Cubre el mandril con cierta cantidad de bandas, con un paso S y un ángulo de bobinado $+\theta$. La longitud sobre la generatriz que se ha cubierto es S/n . [4]

En la ilustración 11. Se aprecia el patrón que rige el bobinado de filamento sobre el mandril

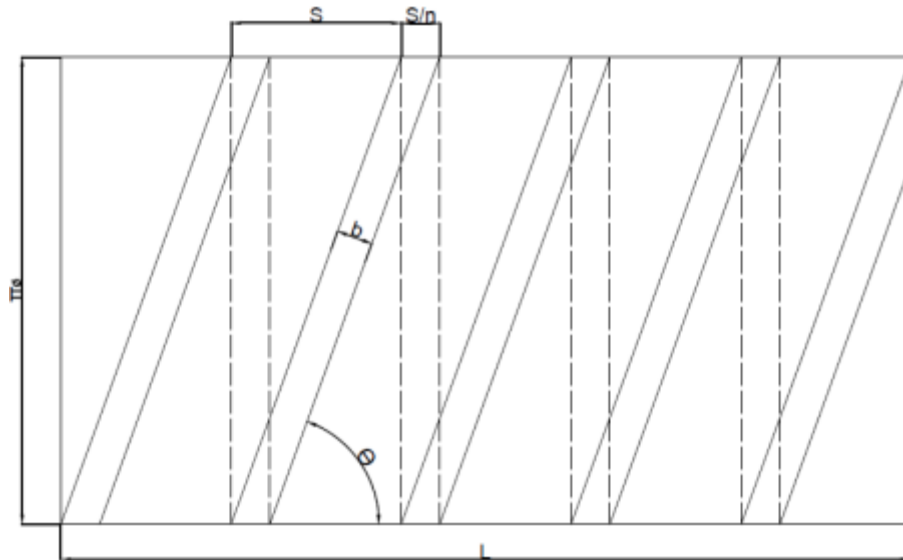


Ilustración 11. Esquema relación de variables de bobinado [32]

Las siguientes fórmulas, consisten en el hallazgo del paso S, y de esta manera determinar la distancia entre las bandas contiguas

$$\tan\theta = \frac{\pi * \emptyset}{S} \quad [33]$$

$$S = \frac{\pi * \emptyset}{\tan\theta} \quad [33]$$

\emptyset es el diámetro del mandril.

θ es el ángulo de embobinado.

S: es el paso entre las bandas contiguas.

Una vez obtenido los datos anteriores, se da paso para determinar el número de ciclos n que serán necesarios para cubrir todo el mandril, de esta forma, las fórmulas son las siguientes:

$$\sin\theta = \frac{b}{\left(\frac{S}{n}\right)} \quad [33]$$

$$n = \frac{S * \sin\theta}{b} \quad [33]$$

b es el ancho de banda.

n: número de ciclos necesarios para cubrir todo el mandril.

Las siguientes formulas determinan la velocidad con las que será enrolladas las fibras y la velocidad angular del mandril

$$V_a = \omega_m \frac{\pi\phi}{\sin\theta} \quad [33]$$

$$\omega_m = V_a \frac{\sin\theta}{\pi\phi} \quad [33]$$

Va: Velocidad de alimentación del filamento de vidrio.

ωm: Velocidad angular de mandril.

Se establecen parámetros adicionales a los de aspecto geométrico del proceso de embobinado. La masa de fibra de vidrio por metro cuadrado es:

$$M_{rd} = \frac{N_{rd} * TEX}{S} \quad [33]$$

Mrd: Masa de filamento de vidrio por metro cuadrado.

Nrd: es la cantidad de bobinas.

El espesor de la lámina se calcula de la siguiente forma:

$$t = \frac{\left(\frac{N * TEX}{S}\right) * \left(1 + \frac{M_f}{M_r}\right)}{\rho_{mc}} \quad [33]$$

Mf: es fracción másica de fibra en el laminado.

M_r : es la fracción másica de resina en el laminado.

P_{mc} : es la densidad de la lámina.

La densidad del material compuesto se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{\rho_{mc}} = \frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_r}{\rho_r} \quad [33]$$

P_f : Densidad de fibra de vidrio.

P_r : Densidad de resina.

7.7 Impregnación

En filament winding es de vital importancia las técnicas de impregnación, por lo que es necesario mencionar algunas de ellas:

7.7.1 Baño de resina por inmersión

Consta de un sistema de rodillos intercalados que estarán sumergidos en la resina. [34]. (Ver ilustración 12)

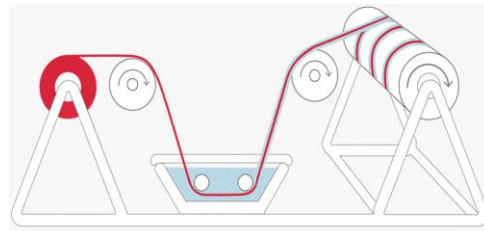


Ilustración 12. Baño por inmersión [35]

7.7.2 Baño de resina con tambor

Se trata del mismo principio que el anterior, pero es el tambor el que está empapado en la resina y luego impregnará las fibras.[34]. (Ver ilustración 13)

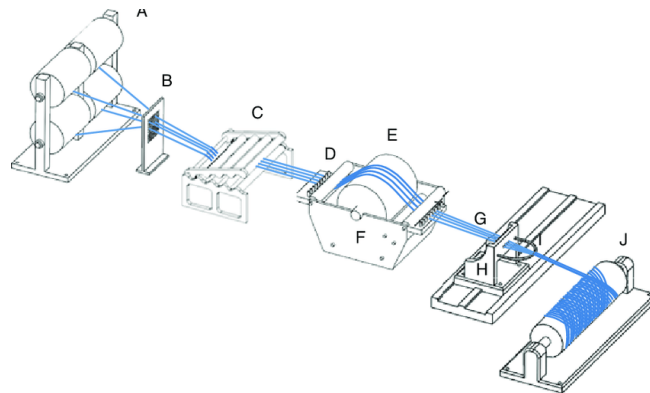


Ilustración 13. Proceso tambor [36]

7.7.3 Infusión

Consiste en aspirar, en un molde cerrado por una lona, los refuerzos secos que luego se impregnan con la resina que es aspirada por la depresión creada en el molde.[34]

8. METODOLOGÍA

Se describen las actividades que cumplieron con los objetivos mencionados anteriormente para llevarse a cabo el diseño de la máquina de filament winding, según método de French, los objetivos para el cumplimiento del presente proyecto se plantearon según la taxonomía de Bloom actualizada según Lorin Anderson y David R. Krathwoh en el 2001.

Esta metodología permitió demostrar el cumplimiento del propósito de aprendizaje como ingeniero mecánico al desarrollar el presente proyecto. En negrilla se resaltan los verbos utilizados en los objetivos específicos y que se asocian a cada uno de los niveles de procesos cognitivos.

Los niveles de recordar y comprender se subrayan debido a que estos se ejecutaron previos a la realización del presente documento donde se eligió la problemática a solucionar y se infirió una posible solución la cual fue el punto de partida para la presentación de la propuesta de trabajo de grado. (Ver ilustración 14)

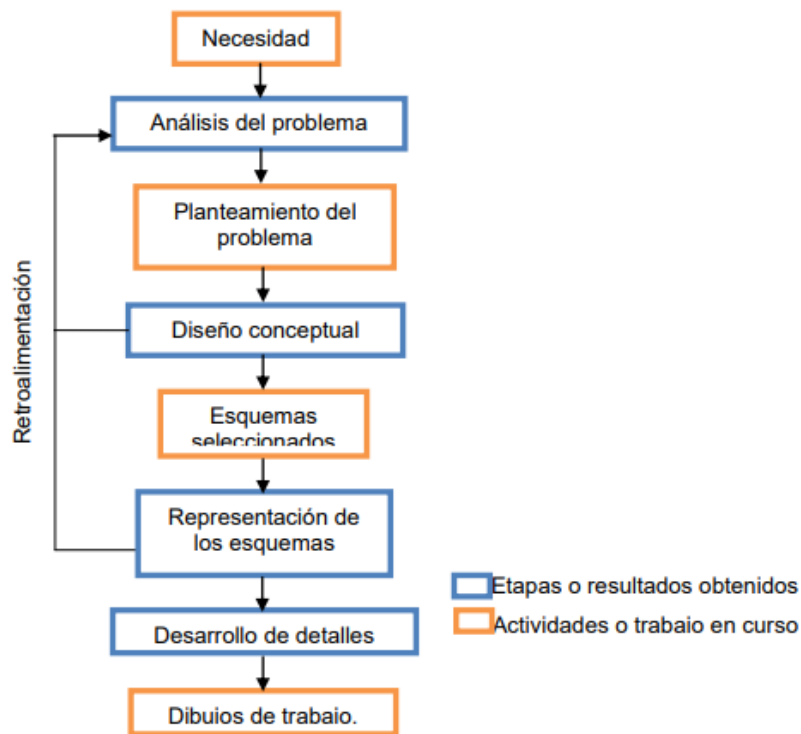


Ilustración 14. Modelos de fases. Autor

En la siguiente tabla 4, las etapas que se llevaran a cabo durante el diseño con sus respectivas actividades

Etapas del diseño	Actividades del diseño
Análisis del problema	<ul style="list-style-type: none"> *Indagar los conceptos esenciales a manejar durante el diseño de la máquina *Recolectar posibles diseños de máquina filament winding *Realizar un diagrama que permita al diseñador, establecer objetivos primarios y secundarios
Diseño conceptual y generación de alternativas	<ul style="list-style-type: none"> *Fijar funciones generales y límites del sistema de desempeño *Realizar soluciones en forma de esquemas de diseños con la ayuda de programas y software CAD *Examinar las soluciones de acuerdo a análisis planteados en propiedades mecánicas, físicas y termodinámicas *Elegir el diseño más adecuado de acuerdo a los análisis
Desarrollo de detalles	<ul style="list-style-type: none"> *Realizar una lista de los diferentes componentes que tendrá la máquina con sus funciones *Determinar costos de los componentes

	<ul style="list-style-type: none">*Verificar posibles reducciones en los costos*Implementar mejoras finales en los componentes teniendo en cuenta los límites del diseño
Dibujo de trabajo	<ul style="list-style-type: none">*Exponer prototipo ideal de diseño con sus respectivos componentes, dimensiones, planos y simulación en software

Tabla 4. Etapas del diseño. Autor

9. SOLUCIONES PRELIMINARES CONCEPTUALES PARA EL DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE FILAMENT WINDING

Esta parte comprende el conjunto de tres procesos (árbol de objetivos, diagrama de funciones, lista de requerimientos) en los cuales, permite el estudio de las necesidades y requerimientos que en un principio deberá satisfacer la máquina, estos requerimientos son analizados desde el punto de vista del cliente y del punto de vista del diseñador. Además de esto, distintas patentes, son estudiados a profundidad para obtener cierto aprendizaje y de esta manera, recolectar diferentes soluciones de diseño clasificadas de la mejor hasta la menos indicada, para hacer un producto final, adecuado y eficiente.

9.1 Árbol de objetivos

Como parte del planteamiento del diseño de la máquina de filament winding, en primera instancia se procede a tomar todos los objetivos posibles o requerimientos que deberá satisfacer el diseño final de la máquina, luego se ordenan de mayor y menor nivel, quedando en niveles jerárquicos que conducirán a objetivos secundarios y primarios, por último, se realiza un diagrama con raíces que conecta los diferentes niveles jerárquicos y representa los medios con los que los objetivos son alcanzados.

Los objetivos evaluados son los siguientes:

- ✓ Fácil de fabricar.
- ✓ Resistente a las fuerzas mecánicas.
- ✓ Manejo sencillo e intuitivo de la máquina.
- ✓ Fácil mantenimiento.
- ✓ Piezas estandarizadas.
- ✓ Control y orientación de los ángulos en los filamentos.

- ✓ Control de rotación sobre el mandril.
- ✓ Alta seguridad mecánica.
- ✓ Bajo consumo de energía.
- ✓ Bajo costo a la hora de fabricarla.
- ✓ Poca probabilidad de riesgo de un accidente de atrapamiento.
- ✓ Pocos errores posibles por el operador.
- ✓ Operación sencilla para el usuario.

Los objetivos anteriores tienen que estar basados bajo unos objetivos primarios, por tal razón, se estableció la siguiente lista:

- ✓ Confiabilidad técnica.
- ✓ Seguridad.
- ✓ Características de operación.
- ✓ Características estructurales.

Como resultado final se obtuvo un diagrama que relaciona todos los objetivos mencionados anteriormente, mediante niveles jerárquicos que demuestran la importancia de los objetivos, este diagrama es conocido como árbol de objetivos y se puede apreciar en la ilustración 15.

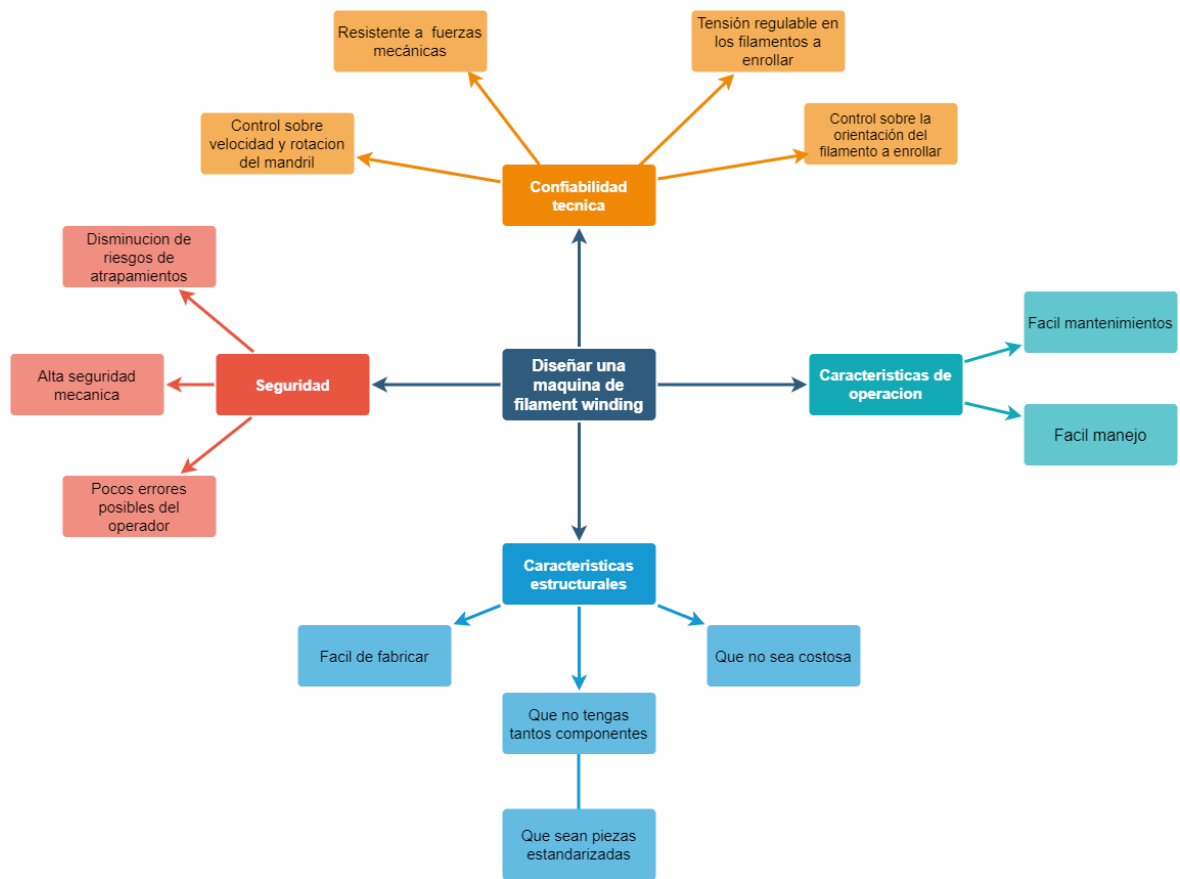


Ilustración 15. Diagrama de objetivos. Autor

Para entender mejor el anterior diagrama, hay que mencionar y explicar los objetivos primarios.

- Características estructurales: la máquina será de uso académico, por lo que es importante que la fabricación y construcción de dicha máquina, sea lo más asequible, con piezas estandarizadas y fáciles de ensamblar.
- Confiabilidad técnica: Se relaciona con los parámetros que deberá regir la máquina en su operación, para eso, es necesario un diseño adecuado, con fácil operación y un equipamiento asociado.

- Seguridad: Un factor demasiado importante que deberá ofrecer la máquina, para que el usuario se sienta con confianza y seguridad a la hora de manipular.
- Características de operación: compone la parte atractiva de la máquina, pues un fácil manejo y a su vez un fácil mantenimiento, la hará más llamativa a los ojos del usuario.

9.2 Diagrama de Funciones

el método análisis de funciones, se obtuvo una clara idea de la máquina final, gracias a la realización de módulos funcionales en 3 niveles, que muestran el proceso general y detallado realizado por la máquina para hacer un correcto enrollado de fibra.

9.2.1 Caja 1

De acuerdo a lo anterior, en la ilustración 16, se aprecia la transformación general de la entrada, este caso, los recursos, en la salida, que es la máquina de filament winding.

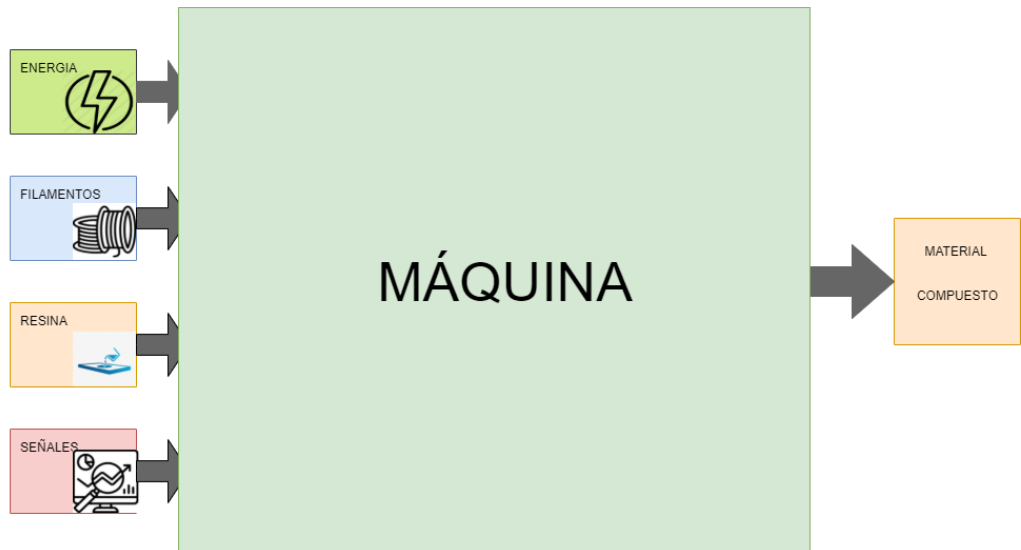


Ilustración 16. Esquema general de transformación de la energía en máquina filament winding. Autor

Los motores son accionados para causar el movimiento rotacional del mandril, el movimiento traslacional del carro alimentador y el movimiento rotacional del brazo alimentador, llevando un ajuste en sus velocidades que estarán siendo controladas por un par de PLC.

Mientras estos movimientos son ocasionados, instantáneamente la fibra de vidrio estará siendo suministrada a cierta tensión, pasando posteriormente por un baño de resina. Una vez la fibra este impregnada de resina, será enrollada al mandril giratorio, con la ayuda del carro y del brazo alimentador aportándole orientación a él enrollado.

Finalmente, el material compuesto fabricado será puesto en reposo a una temperatura ambiente, con el fin de obtener un producto resistente

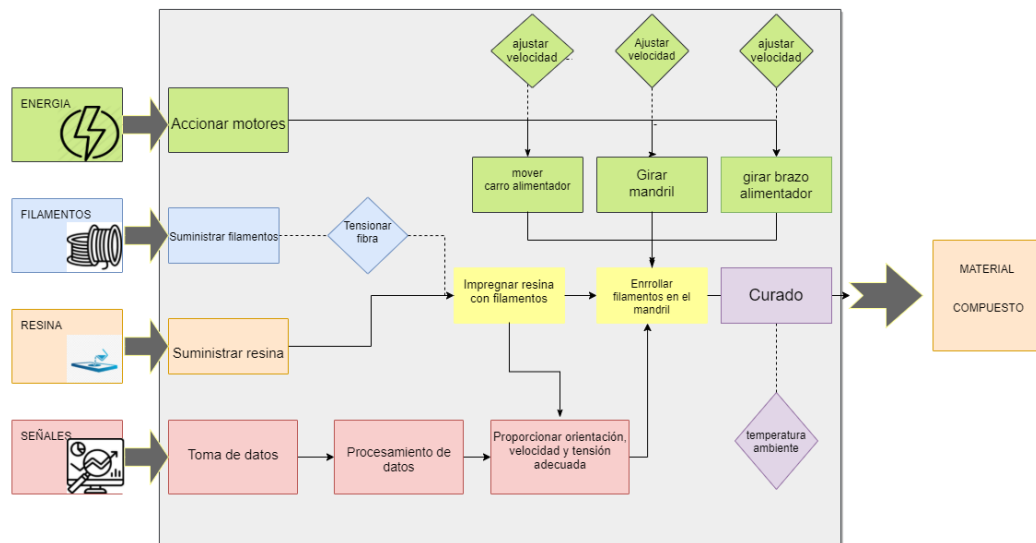


Ilustración 18. Esquema en detalle de transformación de la energía en máquina filament winding. Autor

9.3 Lista de requerimientos

De acuerdo al árbol de objetivos y a los diagramas de funciones, es necesario considerar unos requisitos para llevar a cabo los procesos de construcción y operación de la máquina de filament winding. Es de vital importancia aclarar que los

requerimientos apreciados en la siguiente tabla 5, se obtuvieron a partir del criterio del diseñador debido a que es una máquina académica, que tendrá un uso más de tipo laboratorio que industrial

Ítem	Requerimientos	Observaciones
1	Área máxima	1m*1,5m, (39-154 in) con el uso de un espacio reducido ya que se va usar para fines académicos
2	Velocidad máxima de operación	Para evitar accidentes se requiere una velocidad máxima de 3000 rpm
3	Díámetro máximo de la pieza	(4in- 5in), decisión tomada entre el director y el estudiante
4	Longitud máxima de la pieza	Su longitud podrá variar desde un rango de 300 a 750 mm, (11 -29 in) gracias a su base desplazable.
5	Resina poliéster o epoxica	Resinas asequibles en el mercado y prácticas para la actividad
6	Electricidad	En caso de requerirse energía, debe usar un voltaje de 110 V o 220 V
7	Capacidad máxima de resina	1 litro máximo, 0.001 m ³ (0.2 galones) por el tamaño académico de la máquina, el volumen del baño de resina no será tan grande
8	Fácil mantenimientos y reparación	Para evitar gastos extras en complejos mantenimientos ya que será una máquina de uso académicos
9	Presión	En caso de requerirse, se sugiere una presión de 90 psi (620528)
10	Silenciosa	Silenciosa, confiable y eficaz
11	Económica	Su diseño no supere los límites económicos
12	Gas	En caso de usarse, que sea gas natural y en cilindro
13	Díámetro de fibra	1 - 4 mm (0.03-0.1 in)

14	Fácil uso de manejo	Sencillez y confiabilidad a la hora de usarla. Se usará en ambientes académicos por lo que se exige una operación factible
----	---------------------	--

Tabla 5. Diseño máquina filament winding. Autor

9.4 Parámetros claves en distintos proyectos

Buscando los parámetros físicos y matemáticos de diseño más relevantes, se procede a realizar un análisis comparativo entre los proyectos contemplados en los antecedentes, identificados al inicio.

En la siguiente tabla 6, se observa los parámetros de diseño de cada uno de los proyectos similares contemplados.

ITEM	PROYECTO	AUTOR(ES)	UNIVERSIDAD	PARÁMETROS DE DISEÑO
1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA BOBINADORA SEMIAUTOMÁTICA DE 4 EJES PARA LA FABRICACIÓN DE TANQUES DE FIBRA DE VIDRIO MEDIANTE LA TÉCNICA FILAMENT WINDING	CARLOS ANDRÉS ENCALADA ZAPATA	UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR (ECUADOR)	<ul style="list-style-type: none"> • Material y resistencia (Acero estructural) • Velocidad de distribución de fibras (30 m/min) • Tiempo de bobinado (1 hora) • Potencia sistema (230 W) • Potencia motor mayor 0,64 hp • Potencia motor

				menor 0,046 hp
2	DISEÑO Y SELECCIÓN DE LAS PARTES DE UNA MÁQUINA DE EMBOBINADO DE HILOS, PARA LA FABRICACION DE CILINDROS EN PLASTICO REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO	MARIO ANDRÉS AGUILAR COLOMA, ANALÍA MATILDE PARADA FERNÁNDEZ	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL (ECUADOR)	<ul style="list-style-type: none"> • Presión máxima de mandril (9kpa) • Tensión máxima de la fibra de vidrio (50N) • Tensión de trabajo(10N) • Velocidad de distribución (30 m/min) • Potencia de mandril (7 hp) • Potencia de carrito (3 hp)
3	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA, PARA LA ELABORACIÓN DE POSTES DE FIBRA DE VIDRIO REFORZADA	JOSÉ DANIEL SALINAS ROJAS	UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO (ECUADOR)	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de enrollado (1h) • Tensión de trabajo(30N) • Velocidad de distribución (30 m/min) • Potencia de motor (0,37 hp) • Potencia de carrito (0,072 hp)
4	DISEÑO DE UNA MÁQUINA PARA CONSTRUCCÓN DE TANQUES CON MATERIALES FIBRO-REFORZADOS	IRNE ALEJANDRO RAMÍREZ VILLEGAS	UNIVERSIDAD AUTONOMA DE OCCIDENTE (CHILE)	<ul style="list-style-type: none"> • Tensión de trabajo(10N) • Velocidad de distribución (30 m/min)

	CON TECNICA FILAMENT WINDING			<ul style="list-style-type: none">• Potencia de motor (6 hp)Potencia de carrito (3 hp)
--	------------------------------------	--	--	---

Tabla 6. Parámetros clave en proyectos antecesores. Autor

10. DISEÑO DETALLADO DE LOS COMPONENTES DE LA MÁQUINA FILAMENT WINDING

Para que se aplicaran los conceptos tratados en el análisis de alternativas, fue necesario implementar las estrategias ofrecidas por el libro metodología de French. La máquina es hecha a partir de un análisis profundo y estricto a diferentes soluciones de los módulos funcionales que comprenden la máquina filament winding. Estas soluciones son el producto de extraer características en diseños similares, tomar las mejores decisiones y lograr una máquina nueva con mejoras.

10.1 Posibles soluciones morfológicas de la máquina de filament winding

Los módulos funcionales son los subsistemas que satisfacen el objetivo principal de la máquina, crear material compuesto. Para cada uno estos subsistemas, se propusieron distintas soluciones, eligiendo la más adecuada.

Los subsistemas:

- ✓ Matriz.
- ✓ Baño de impregnación.
- ✓ Geometría del mandril.
- ✓ Movimiento rotacional del mandril.
- ✓ Desplazamiento del carro de filamentos.
- ✓ Movimiento rotacional del brazo.
- ✓ Curado del mandril.
- ✓ Extracción del mandril.
- ✓ Tipo de resina.
- ✓ Encendido de la máquina.
- ✓ Tipo de bobinado.
- ✓ Tipo de transmisión del carro alimentador.

De acuerdo a estos subsistemas, se propusieron las siguientes alternativas en la siguiente tabla 7.

Subsistemas	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Tipo de matriz	Inorgánicas	Termoestables	Termoplásticos
Baño de impregnación	Baño por inmersión	Baño con tambor	Infusión
Geometría del mandril	Cilindro con extremos planos	Cilindro extremos planos cubiertos	Cilindros extremos esféricos
Movimiento rotacional del mandril	Motor de corriente continua	Motor de corriente alterna	
Desplazamiento de carro	Motor de corriente continua	Motor de corriente alterna	
Movimiento rotacional del brazo	Motor de corriente continua	Motor de corriente alterna	
Curado del mandril	Temperatura ambiente	Temperatura alterna	
Extracción del mandril	Manual	Motorizado	
Tipo de resina	Poliéster	Vinil éster	Epoxies
Encendido de máquina	Eléctrico	Gasolina	
Tipo de bobinado	Helicoidal	Circunferencial	Polar
tipo de transmisión de del carro alimentador	Guías	Piñón-cremallera	Pistón telescópico

Tabla 7. Alternativas para diferentes subsistemas en la máquina filament winding. Autor

10.2 Selección de la mejor opción

Se ofrecen 3 posibles diseños que cumplirán con los requerimientos para la máquina filament winding, se seleccionara la mejor opción para los diferentes subsistemas.

10.2.1 Propuesta 1

Este diseño tiene un mandril de extremos planos, de material termoplástico. La impregnación de resina a las fibras es de tipo por inmersión. Esta máquina cumple el enrollado de fibras mediante dos acciones, el movimiento giratorio del mandril y

el movimiento traslacional del carro alimentador de fibras, el cual se desplaza a lo largo del cilindro. Estas acciones serán dirigidas mediante un sistema PLC y dos motores de corriente alterna. El bobinado presente en esta máquina es de tipo circunferencial. Su material es de acero inoxidable.

En la siguiente tabla 8, se observa los subsistemas elegidos para la propuesta 1

Subsistemas	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Tipo de matriz	Inorgánicas	Metálicas	Termoplásticas
Baño de impregnación	Baño por inmersión	Baño con tambor	Infusión
Geometría del mandril	Cilindro con extremos planos	Cilindro extremos planos cubiertos	Cilindros extremos esféricos
Movimiento rotacional del mandril	Motor de corriente continua	Motor de corriente alterna	
Desplazamiento de carro	Motor de corriente continua	Motor de corriente alterna	
Movimiento rotacional del brazo	Motor de corriente continua	Motor de corriente alterna	
Curado del mandril	Temperatura ambiente	Horno	
Extracción del mandril	Manual	Motorizado	
Tipo de resina	Poliéster	Vinil éster	Epoxies
Encendido de la máquina	Eléctrico	Combustible fósil	
Tipo de bobinado geométrica	Helicoidal	Circunferencial	Polar
tipo de transmisión del carro alimentador	Guías	Piñón- corredera	Pistón telescópico

Tabla 8. Selección de opciones para cada subsistema para la propuesta 1. Autor

De acuerdo a los subsistemas elegidos, se obtiene la propuesta mostrada en la ilustración 19.

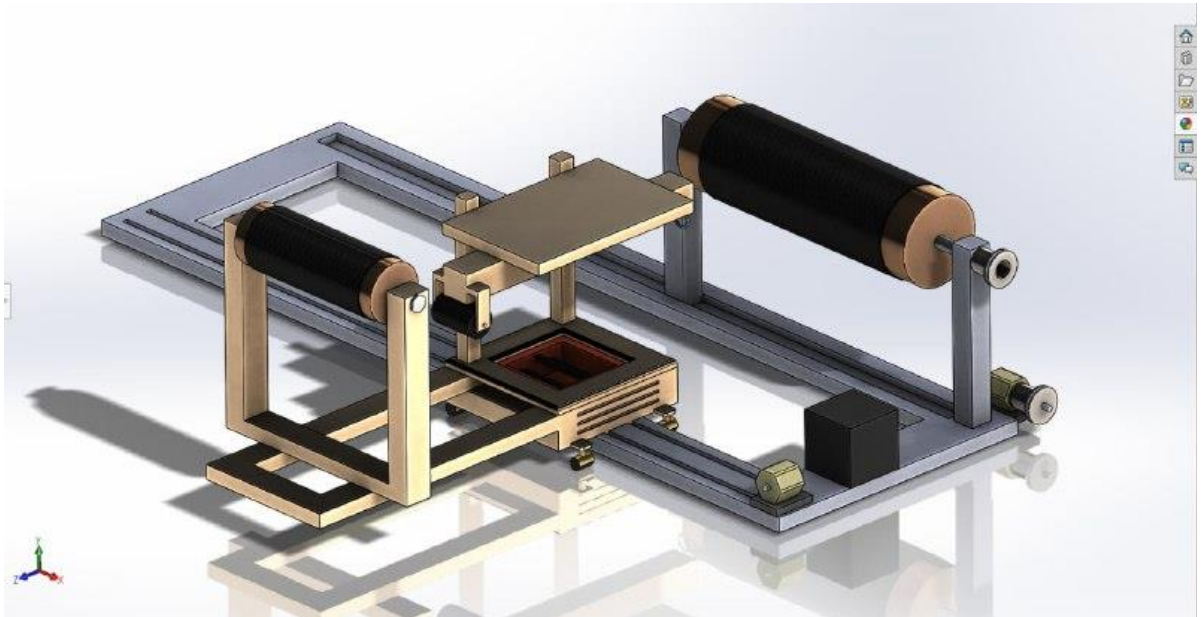


Ilustración 19. Diseño CAD (SolidWorks) para la propuesta 1. Autor

10.2.2 Propuesta 2

Sistema diseñado con baño de impregnación a tambor, este compuesto por 3 motores de corriente continua, que gobernarán los movimientos giratorios del Mandril, el movimiento del carro guiador de filamentos a lo largo del cilindro y el movimiento rotacional del brazo para un bobinado helicoidal. Su mandril es de extremos esféricos y material metálico, la tensión se generará mediante 6 tensores que están antes y después del baño de impregnación de resina, obteniendo un conjunto de tensiones secas y húmedas. El funcionamiento de la máquina está dirigido por un sistema de PLC. El material principal de la estructura es de acero inoxidable. El tipo de transmisión que transportará el carro alimentador será de piñón- cremallera

En la tabla 9, se observa los subsistemas elegidos para la propuesta 2

Subsistemas	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Tipo de matriz	Inorgánicas	Metálicas	Termoplásticas
Baño de impregnación	Baño por inmersión	Baño con tambor	Infusión

Geometría del mandril	Cilindro con extremos planos	Cilindro extremos planos cubiertos	Cilindros extremos esféricos
Movimiento rotacional del mandril	Motor de corriente continua	Motor de corriente alterna	
Desplazamiento de carro	Motor de corriente continua	Motor de corriente alterna	
Movimiento rotacional del brazo	Motor de corriente continua	Motor de corriente alterna	
Curado del mandril	Temperatura ambiente	Horno	
Extracción del mandril	Manual	Motorizado	
Tipo de resina	Poliéster	Vinil éster	Epoxies
Encendido de la máquina	Eléctrico	Combustible fósil	
Tipo de bobinado geométrica	Helicoidal	Circunferencial	Polar
tipo de transmisión del carro alimentador	Guías	Piñón-cremallera	Pistón telescópico

tabla 9. Diseño CAD (SolidWorks) para la propuesta 1. Autor

De acuerdo a los subsistemas seleccionados, se obtiene la propuesta mostrada en la ilustración 20.

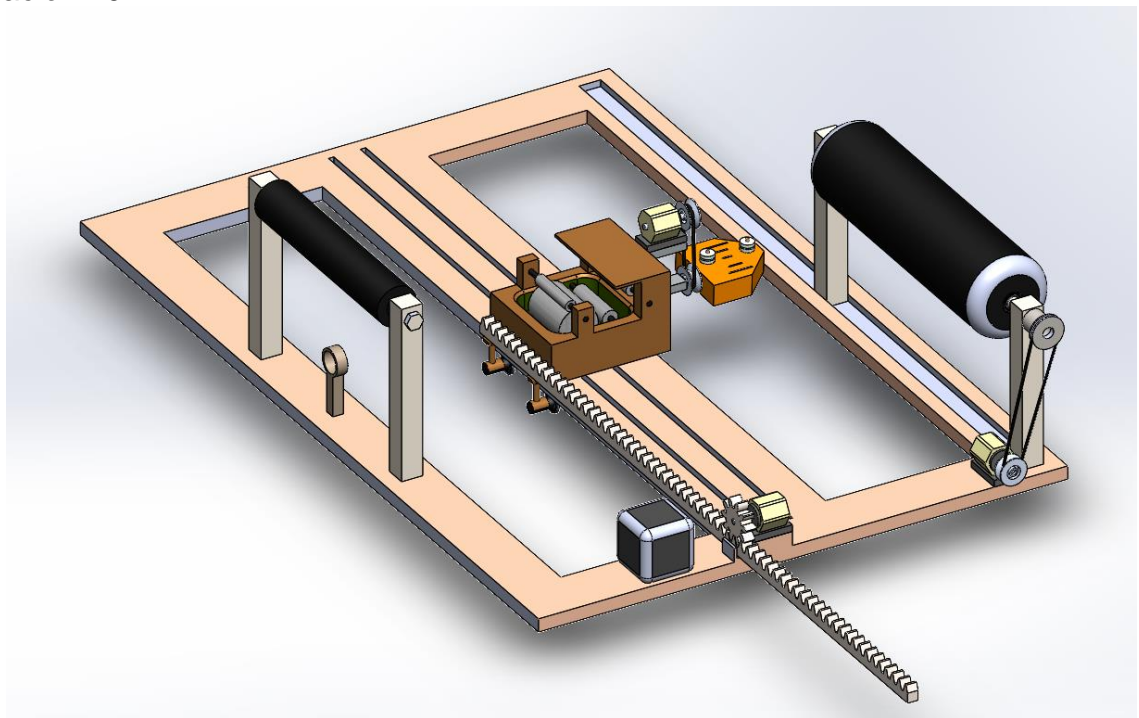


Ilustración 20. Diseño CAD (SolidWorks) para la propuesta 2. Autor

10.2.3 Propuesta 3

Máquina robusta con estructura estable, que cuenta con un sistema de impregnación llamada infusión, su mandril es de forma esférica en sus extremos.

Además, este prototipo cuenta con pistos telescópico, que será el tipo de transmisión encargado en el movimiento traslacional del carro alimentador. Su estructura en general es en acero inoxidable

En la tabla 10, se observa los subsistemas elegidos para la propuesta 3.

Subsistemas	Opción 1	Opción 2	Opción 3
Tipo de matriz	Inorgánicas	Metálicas	Termoplásticas
Baño de impregnación	Baño por inmersión	Baño con tambor	Infusión
Geometría del mandril	Cilindro con extremos planos	Cilindro extremos planos cubiertos	Cilindros extremos esféricos
Movimiento rotacional del mandril	Motor de corriente continua	Motor de corriente alterna	
Desplazamiento de carro	Motor de corriente continua	Motor de corriente alterna	
Movimiento rotacional del brazo	Motor de corriente continua	Motor de corriente alterna	
Curado del mandril	Temperatura ambiente	Horno	
Extracción del mandril	Manual	Motorizado	
Tipo de resina	Poliéster	Vinil éster	Epoxies
Encendido de la máquina	Eléctrico	Combustible fósil	
Tipo de bobinado geométrica	Helicoidal	Circunferencial	Polar
Tipo de transmisión del carro alimentador	Guías	Piñón- cremallera	Pistón telescópico

Tabla 10. Selección de opciones para cada subsistema para la propuesta 3. Autor

En la siguiente ilustración 21, se observa la propuesta del diseño 3

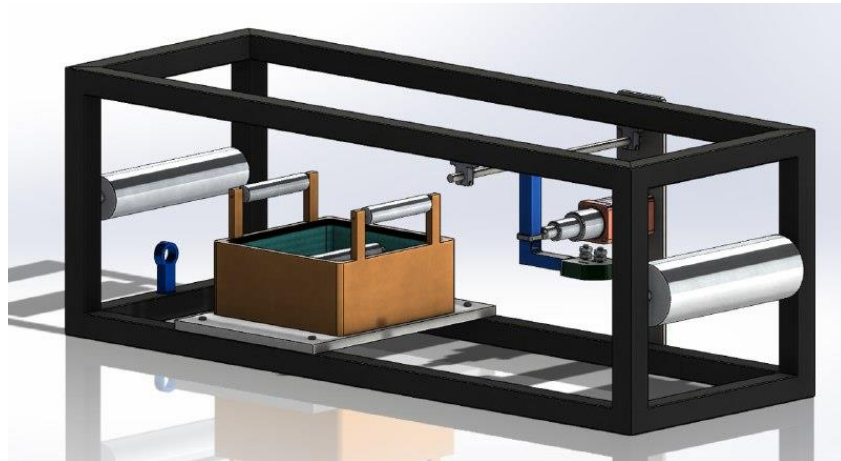


Ilustración 21. Diseño CAD (SOLIDWORKS) para la propuesta 3. Autor

10.3 Análisis de alternativas de acuerdo a los factores de diseño

Una vez se realizaron los diseños alternativos, se procede a tomar la mejor opción en base a unas variables importantes que definen el concepto de una buena máquina.

- ✓ Desempeño: se refiere al tipo de operación que ofrece la máquina, debe ser productiva y de buena calidad
- ✓ Fabricación: la máquina debe contar con ensamblajes sencillos, y con factibilidad a la hora de fabricarla, además el tiempo de fabricación debe ser el adecuado.
- ✓ Costo: la máquina debe trabajar con la eficiencia más alta posible, pero manteniendo siempre un costo bajo de operación
- ✓ Seguridad: la máquina debe generar seguridad y confianza a la hora de manipular la máquina.
- ✓ Apariencia: su forma y su estructura deben llevar esteticidad, junto con una buena compatibilidad.

En la siguiente tabla 11 se muestra los factores de diseño con sus variables. La importancia que tienen las variables en cada diseño fue evaluada del 1 al 4, siendo el 4 el puntaje mayor.

Es importante afirmar que los factores con su respectivos porcentajes y variables, fueron seleccionados a criterio del diseñador, teniendo en cuenta los objetivos iniciales.

Factor	PESO	Variable	Puntaje
Desempeño	25%	Excelente	4
		Bueno	3
		Regular	2
		Malo	1
Fabricación	15%	Muy fácil la construcción	4
		Fácil la construcción	3
		Difícil la construcción	2
		Muy difícil la construcción	1
Costo	20%	Económico	4
		Poco económico	3
		Costoso	2
		Muy costoso	1
Seguridad	30%	Bajo riesgos de accidentes	4
		Segura	3
		Poco segura	2
		Alto riesgos de accidentes	1
Apariencia	10%	Muy estética	4
		Estética	3
		Llamativa	2
		Poco llamativa	1

Tabla 11. de factores con sus

De los

Correlación de riesgo variables

acuerdo a factores de diseño

mencionados anteriormente con su importancia, los diseños propuestos por el autor, son evaluados y comparados entre sí, por medio del puntaje final que sumaron con sus variables presentes en el diseño.

En la tabla 12 se muestra la comparación.

Factores	Valor	Propuesta 1		Propuesta 2		Propuesta 3	
		Calificación	Valor	Calificación	Valor	Calificación	Valor
Desempeño	20	2	40	3	60	3	60
Fabricación	15	3	45	4	60	1	15
Costo	25	3	75	3	75	2	50
Seguridad	30	3	90	3	90	3	90
Apariencia	10	3	30	4	40	3	30

Total	100		280		325		245
-------	-----	--	-----	--	-----	--	-----

Tabla 12. Correlación de factores de riesgo con sus variables para las 3 propuestas.
Autor

Gracias a la evaluación de los 3 diseños, se puede concluir que el más adecuado es el diseño 2 debido a su mayor puntaje. Su preferencia se define al bajo costo que ofrece la máquina, el buen desempeño y la apariencia. Es un diseño silencioso ya que cuenta con motores de corriente alterna, además de eso, se compone de un mandril ligeramente liviano lo que genera un gasto de energía menor al momento de girarlo. La máquina está compuesta con diferentes tensores, esto permite que el material compuesto final, contenga una buena rigidez y fuerza, además de esto, el sistema ofrece la opción de modificar la orientación de las fibras, aportándole al material compuesto, más resistencia; Gracias a su estructura sencilla y compacta, la máquina es ideal para ambientes académicos debido a un ensamble de procesos pocos complejos y que requieren poco tiempo, además de esto, ocupa poco espacio, permitiendo que la máquina sea transportada de un lugar a otro, con mucha facilidad. Su material de acero inoxidable.

11. CÁLCULOS Y DISEÑO DE DETALLE DE LA MÁQUINA DE FILAMENT WINDING

WINDING

Partiendo de la propuesta numero 2 elegida en la tabla 12, se procede a indicar los sistemas y componentes de la máquina sobre el diseño hecho en el software SolidWorks, con el objetivo de dar al lector a conocer a profundidad el modelo planteado y la posición de sus piezas (ver ilustración 22, ilustración 23 y tabla 13).

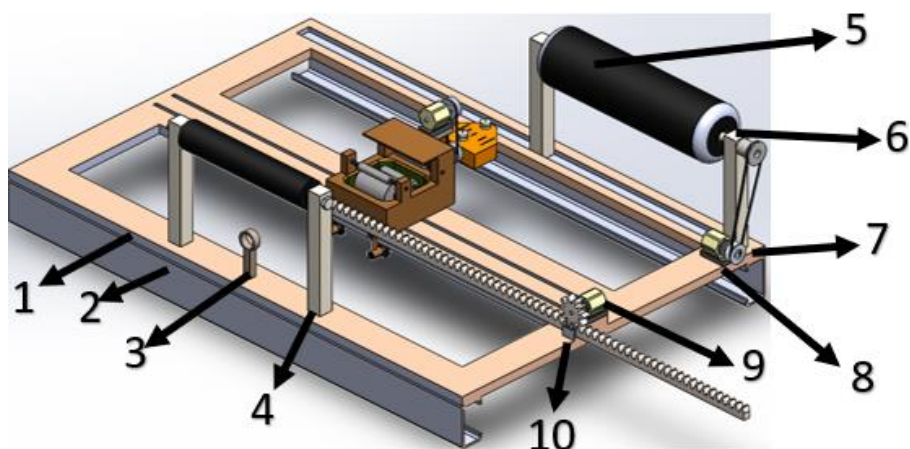


Ilustración 22. Diseño final máquina FILAMENT WINDING. Autor

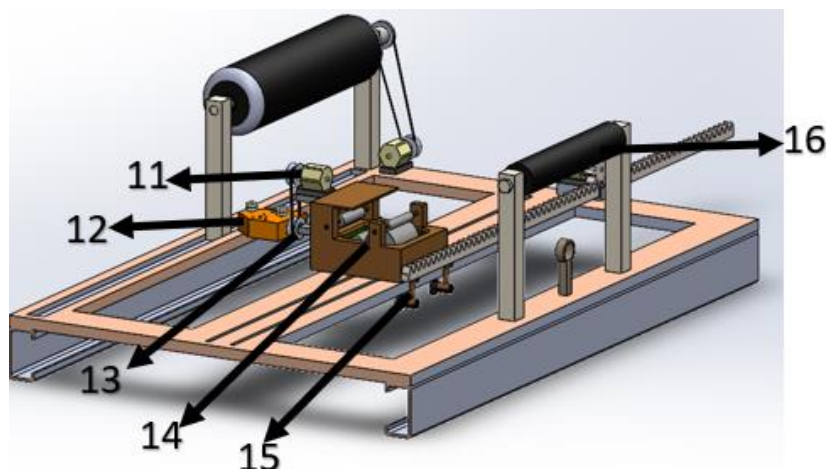


Ilustración 23. Diseño final máquina FILAMENT WINDING. Autor

1	Estructura base, platina acero inoxidable
2	Soportes de estructura base, Perfil C
3	Soporte guía para el hilo de fibra de vidrio
4	Soportes verticales mandriles-ejes
5	Mandril principal (conductor)
6	Rodamiento mandril principal
7	Sistema poleas - Correa, para motor 1
8	Motor 1 (conductor movimiento de fibra de vidrio)
9	Motor 2 (conductor movimiento de sistema carrete-tanque)
10	Sistema piñón-cremallera para motor 2 (cremallera soldada a carrete movable)
11	Motor 3 (conductor movimiento del brazo giratorio)
12	Brazo giratorio
13	Sistema poleas - Correa, para motor 3
14	Sistema de carrete movable, tanque y rodillos
15	Rodamientos carrete movable (Reducen la fricción de deslizamiento)
16	Mandril secundario (conducido)

Tabla 13. Componentes máquina FILAMENT WINDING. Autor

11.1 Calculo y análisis cinético

La finalidad de los siguientes análisis es determinar el espesor de la lámina de la estructura base, el tipo de perfil C para los soportes, determinar el área transversal de los soportes verticales para los ejes de mandriles, el diámetro de ejes de los mandriles, seleccionar rodamientos adecuados para el mandril de bobinado, seleccionar rodamientos adecuados para el carrete móvil, seleccionar los 3 motores necesarios en la máquina, seleccionar el engranaje, la cremallera, las poleas y correas necesarias en el sistema.

11.1.1 Cálculos en el mandril conductor

- **Velocidad máxima del mandril**

Estos cálculos se abordan con dos condiciones iniciales, la velocidad lineal del hilo de fibra de vidrio y el diámetro de mandril conductor, de estos datos el primero es extraído de la investigación realizada, donde se aclara que la velocidad óptima para fibra de vidrio es de 60 a 90 m/min [37] y el segundo es un valor dado por el diseñador al ser este el diámetro interno del tubo o tanque a fabricar, el diámetro máximo de pieza final contemplado es 4 pulgadas (ver tabla 5) para un diámetro externo de 4 pulgadas aproximadamente 10.2 cm. se asumirá un diámetro interno de 9,6 cm ya que se espera que el tubo o tanque tenga una longitud de 30cm.

- **DCL PIEZA FINAL (material compuesto)**

El mandril terminará enrollado sometido a una presión externa, por lo tanto, se analizará el tubo (pieza final) como un recipiente a presión. De la investigación realizada, se encontró en los anteriores trabajos que para fibras de vidrio la tensión máxima es de 50 N, aunque no se recomienda pasar de 10 N. Ya que nuestro objetivo es sobredimensionar para así adicionar un factor de seguridad se harán los cálculos con 30 N, lo cual daría un factor de seguridad tanto para el mandril y como para su respectivo eje de 3, también en los antecedentes se encuentra que, para una tensión de fibra de 30 N, la presión aplicada sobre el mandril es de 9kpa desde la 6ta capa de recubrimiento en adelante, siendo este valor su máximo [4].

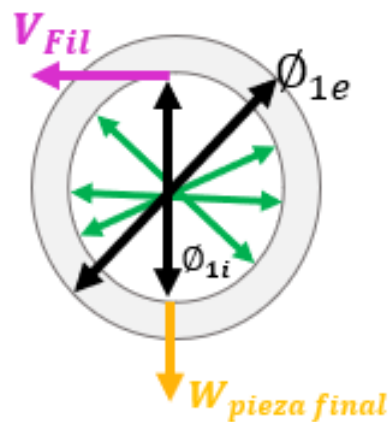


Ilustración 24. Diagrama de cuerpo libre para pieza final terminada. Autor

$$V_{Fil} = 90 \text{ m/min} \quad \phi_{1i} = 96 \text{ mm} \quad L_1 = 300 \text{ mm} \quad \phi_{1e} = 102 \text{ mm}$$

$$\omega_{max1} = \frac{V_{Fil}}{\frac{\phi_{1i} * \pi}{1000}} \quad (10)$$

$$\omega_{max1} = 298.42 \approx 300 \text{ rpm}$$

- **Carga distribuida en el mandril**

$$F_{fil} = 30 \text{ N} \quad P_{em} = 9 \text{ kpa} \quad \rho_{fibra \text{ vidrio}} = 2,6 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} [5] \quad \rho_{resina} = 1,55 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} [6]$$

Con la presión P_{em} siendo esta la presión externa al mandril y el perímetro interior p_{em} del tubo de material compuesto, calculamos la carga distribuida q_{em} a la que se encuentra sometida en cada punto del perímetro a lo largo del mandril.

$$p_{em} = \pi * \phi_{1i} \quad (11)$$

$$p_{em} = 0,302 \text{ m}$$

$$q_{em} = p_{em} * P_{em} \quad (12)$$

$$q_{em} = 2718 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

De la investigación previa se obtiene que la pieza final se compone de 70% fibra de vidrio y 30% la resina de recubrimiento, entonces se puede decir que el peso de la pieza final sería el siguiente:

- **Volumen y peso pieza final compuesta**

$$V_{pieza\ final} = L_1 * \pi * \left(\frac{\phi_{1e}^2}{4} - \frac{\phi_{1i}^2}{4} \right) \quad (13)$$

$$V_{pieza\ final} = 2,8\text{cm}^3$$

$$W_{pieza\ final} = \left(\frac{\rho_{fibra\ vidrio}}{0,7 * V_{pieza\ final}} + \frac{\rho_{resina}}{0,3 * V_{pieza\ final}} \right) * g \quad (14)$$

$$W_{pieza\ final} = 31,12\text{ g} * 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 0,32\text{N}$$

- **Peso de mandril**

Como se mencionó desde un inicio se seleccionó como único material metálico el acero inoxidable 316 por sus propiedades de resistencia a la corrosión, por ende, el mandril y el eje se diseñaron con este material.

$$\rho_{acero\ inoxidable} = 8000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$W_{mandril} = L_1 * \pi * \left(\frac{\phi_{1i}^2}{4} \right) * \rho_{acero\ inoxidable} \quad (15)$$

$$W_{mandril} = 0,3 * \pi * \left(\frac{\left(\frac{96}{1000} \right)^2}{4} \right) * 8000$$

$$W_{mandril} = 7539,82 * (2,304 * 10^{-3})$$

$$W_{mandril} = 17,372\text{ N}$$

- DCL mandril-eje

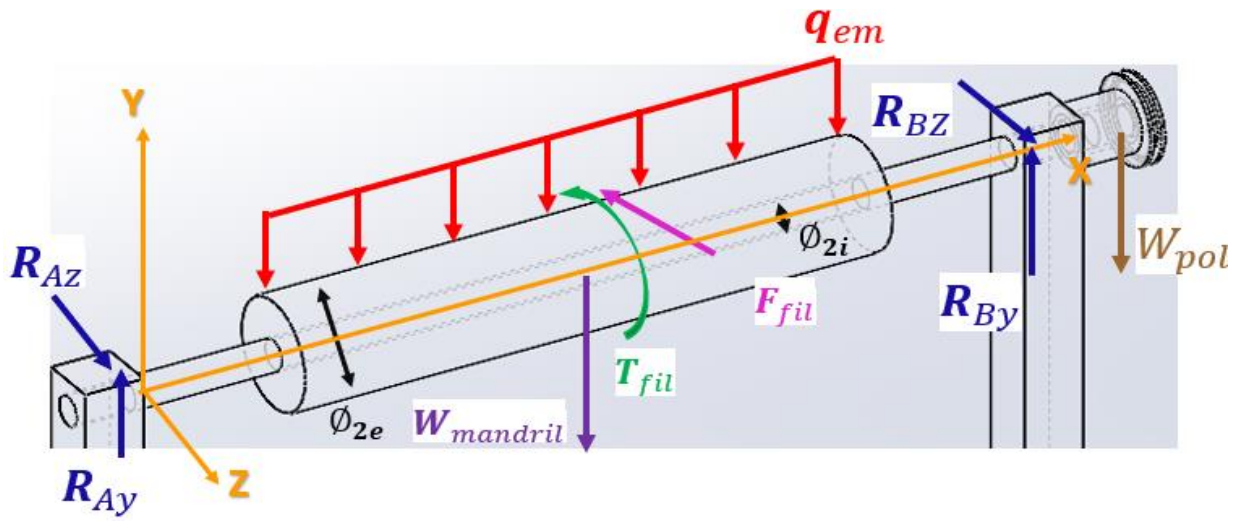


Ilustración 25. Diagrama de cuerpo libre para mandril-eje. Autor

- **Momento torsor**

Con la fuerza del filamento y el diámetro del mandril se procede a hacer el cálculo del momento torsor.

$$T_{fil} = F_{fil} * \left(\frac{\phi_{1i}}{2}\right) \quad (16)$$

$$T_{fil} = 30 * \left(\frac{96}{\frac{1000}{2}}\right)$$

$$T_{fil} = 1,44 Nm$$

A continuación, se procede a calcular las reacciones en que sentirán los rodamientos en los planos XZ y YZ respectivamente, los ejes están indicados en la ilustración 25. Se relaciona un peso de polea obtenido del catálogo Skf este peso corresponde al conjunto polea-buje de referencia PHP 18XH200TB y TB2012X45mm respectivamente, se seleccionan estas dos ya que son el conjunto que trabaja con el diámetro mínimo de eje que existe en el catálogo por ende en caso de dar más pequeño el eje deberá adaptarse el diámetro a este o en caso de que el diámetro de mayor a 45 mm se deberá recalculer el sistema polea-buje para el nuevo eje más grande.

- Cálculo de reacciones y momento flector plano XZ

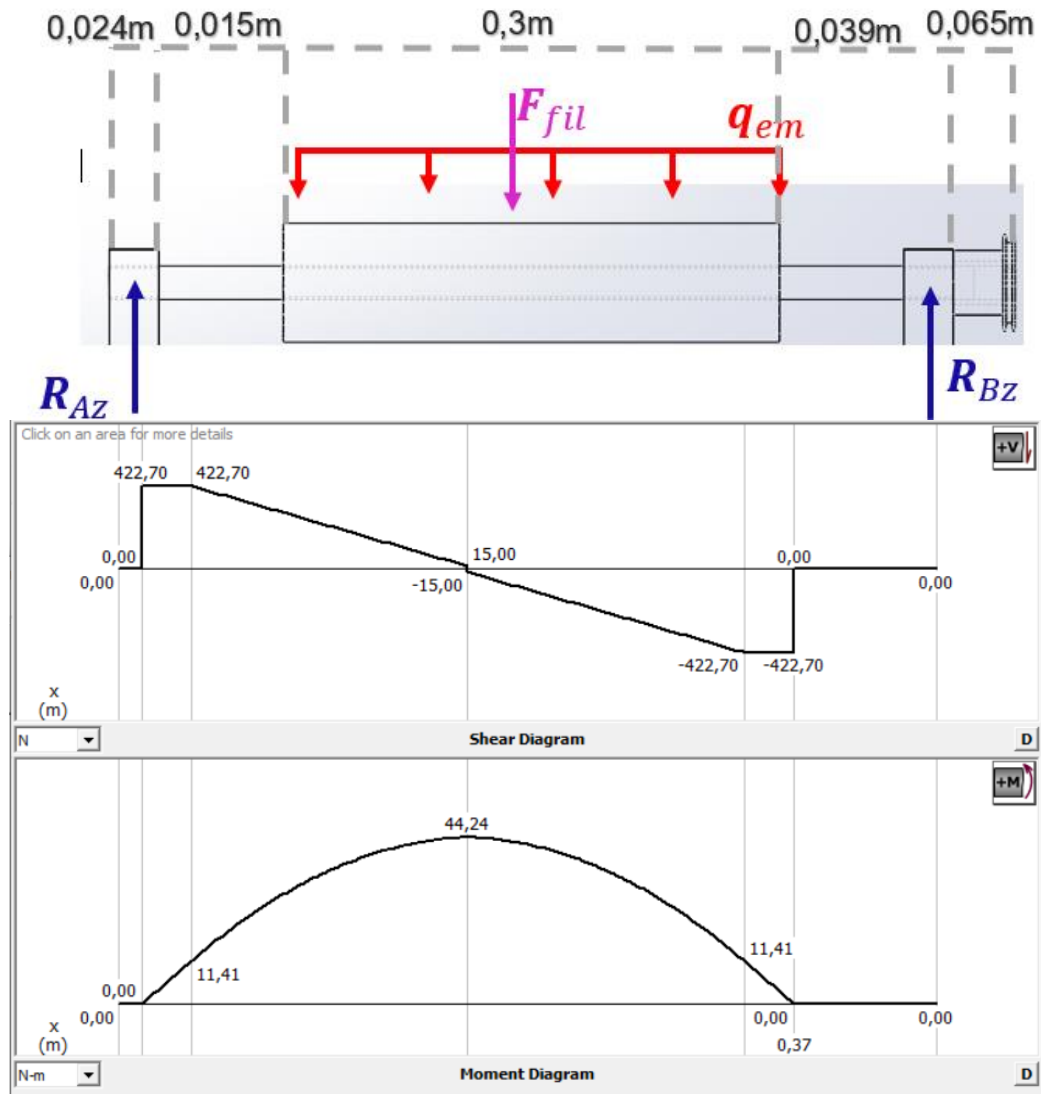


Ilustración 26. Diagrama de cortantes y flectores en el plano XZ. Autor

$$+\uparrow \Sigma F_z = 0$$

$$-F_{fil} - q_{em}(L_1) + R_{Az} + R_{Bz} = 0 \quad (17)$$

$$-30 - 2718(0,3 \text{ m}) + R_{Az} + R_{Bz} = 0$$

$$R_{Az} + R_{Bz} = 845,4$$

$$R_{Az} = R_{Bz} = 422,7 \text{ N}$$

De la gráfica de momentos flectores tenemos que,

$$M_z = 44,24 \text{ Nm}$$

- Cálculo de reacciones y momento flector plano XY

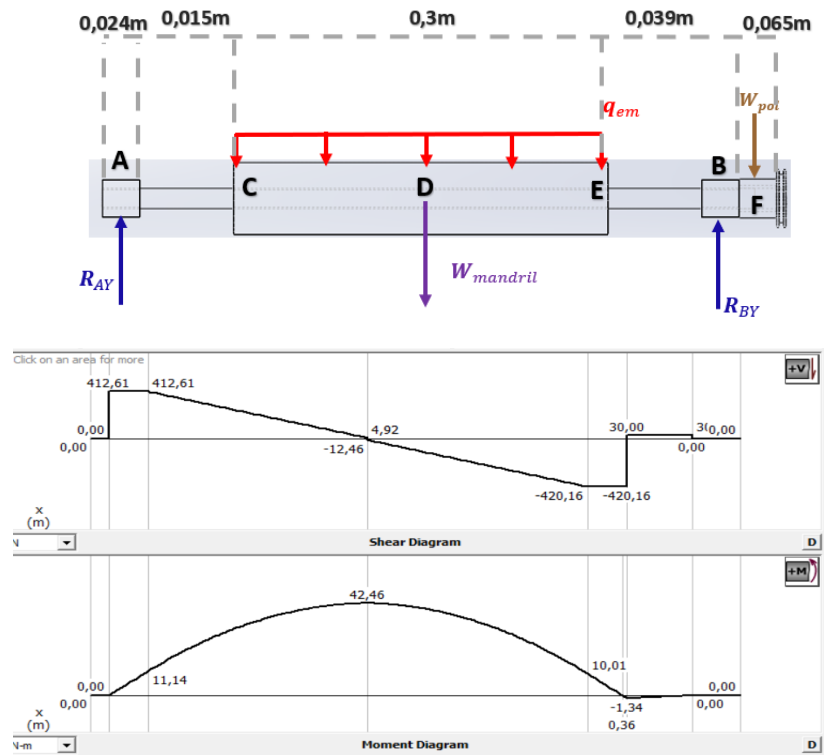


Ilustración 27. Diagrama de cortantes y flectores en el plano XY. Autor

$$+\uparrow \Sigma F_y = 0$$

$$-W_{mandril} - W_{pol} - q_{em}(L_1) + R_{Ay} + R_{By} = 0 \quad (18)$$

$$-17,372 - 30 - 2718 * (0,3) + R_{Ay} + R_{By} = 0$$

$$-862,772 + R_{Ay} + R_{By} = 0$$

$$R_{Ay} + R_{By} = 862,772$$

$$+\cup \Sigma M_A = 0$$

$$0,354 * R_{By} - 0,3985 * W_{pol} - 0,177 * W_{mandril} - q_{em} * (L_1) * 0,177 = 0 \quad (19)$$

$$R_{By} = \frac{0,3985 * 30 + 0,177 * 17,372 + 2718 * (0,3) * 0,177}{0,354}$$

$$R_{By} = 450,16 \text{ N} \rightarrow R_{Ay} = 412,612 \text{ N}$$

De la gráfica de momentos flectores se obtiene que,

$$M_y = 42,46 \text{ Nm}$$

De diseño de elementos de máquinas de Hamrock [38]

$$\dot{M} = \sqrt{M_z^2 + M_y^2} \quad (20)$$

$$\dot{M} = \sqrt{42,46^2 + 44,24^2}$$

$$\dot{M} = 61,32 \text{ Nm}$$

- **Cálculo del diámetro crítico (teoría del esfuerzo cortante máximo)**

Esfuerzo de fluencia y esfuerzo ultimo a la tensión para el acero inoxidable.[38]

$$S_y = 235MPa \quad S_{ut} = 585MPa$$

$$d = \left(\frac{32n_s}{\pi S_y} \sqrt{M^2 + T^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (21) [38]$$

$$T = T_{fil}$$

$$d = \left(\frac{32n_s}{\pi * 235 \times 10^6} \sqrt{M^2 + T_{fil}^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = \left(\frac{32n_s}{738,27 \times 10^6} \sqrt{61,32^2 + (1,44)^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = \left(\frac{32n_s}{738,27 \times 10^6} \sqrt{3760,14 + 2,0736} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Suponemos factor de seguridad igual a 2

$$d = \left(\frac{32(2)}{738,27 \times 10^6} \sqrt{3762,2136} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 17,45 \times 10^{-3} m$$

De esto se concluyó que el valor crítico del diámetro para el eje en acero inoxidable es **0,01745 mm**, por cuestiones de diseño y facilidad en el maquinado del sistema eje-mandril, los cálculos de selección no se harán con este diámetro. Desde aquí en adelante todos los cálculos se harán con un diámetro más acorde siendo este $\phi_{eje} = 45mm$.

- Cálculos con diámetro de eje de 45mm

$$\sigma_{max} = \frac{M}{\frac{I_m}{c}} = \frac{61,32}{\frac{\frac{\pi(\phi_{eje})^4}{4}}{\frac{\phi_{2eje}}{2}}} = \frac{61,32}{\frac{\pi(0,045)^3}{4}} = 6854,325 \text{ KPa} \quad \sigma_{min} = 0$$

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right| \quad (22)$$

$$\sigma_a = 3427,163 \text{ KPa}$$

$$\tau_{max} = \frac{T_{fil} * c}{J} = \frac{1,44 \text{ Nm} * \frac{\phi_{2e}}{2}}{\frac{\pi}{2} * \left(\frac{\phi_{2e}}{2}\right)^4} = 80481,31 \text{ Pa} \quad \tau_{min} = 0$$

$$\tau_m = \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2} \quad (23)$$

$$\tau_m = 40240,66 \text{ Pa}$$

Las cargas que siente el eje serian

$$R_{Bz} = 422,7 \text{ N} \quad R_{By} = 450,16 \text{ N}$$

$$R_B = \sqrt{R_{By}^2 + R_{Bz}^2} = 617,51 \text{ N}$$

$$R_{Az} = 422,7 \text{ N} \quad R_{Ay} = 412,612 \text{ N}$$

$$R_A = \sqrt{R_{Ay}^2 + R_{Az}^2} = 590,7 \text{ N}$$

Se procede a el análisis por fatiga ya que en este sistema se encuentran cargas dinámicas cíclicas y repetitivas. La resistencia a la fatiga viene dada por la siguiente ecuación. [39]

$$S_e = k_a * k_b * k_c * k_d * k_f * S'_e \quad (24)$$

$$S'_e = 0,504 * S_{ut} \quad (25)$$

$$S'_e = 0,504 * 585 \text{MPa} = 294,84 \text{MPa}$$

El factor de modificación superficial de Marin, se obtiene con la siguiente ecuación siendo los valores a y b los correspondientes a la tabla 14, para obtener estos valores se elige laminado en caliente para el cálculo de $k_a \rightarrow a = 57,77$ y $b = -0,718$. [39]

Acabado superficial	Factor a		Exponente
	S_{ut} [KPsi]	S_{ut} [MPa]	b
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado y laminado en frio	2.70	4.57	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.718
Como sale de forja	39.9	272	-0.995

Tabla 14 Parámetros para el factor de modificación superficial de Marin. [39]

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (26)$$

$$k_a = 57,77 * 585^{-0,718} = 0,6$$

Para k_b es necesario el diámetro del eje

$$k_b = 1,24 (\phi_{eje})^{-0,107} = 1,24 (\phi_{eje})^{-0,107} = 0,825$$

$$k_c = k_d = k_e = k_f = 1$$

$$S_e = 0,6 * 0,825 * 1 * 294,84 MPa = 145,95 MPa$$

La teoría de “Energía de distorsión” o “Von Misses” sirve para combinar los esfuerzos de tensión y cortantes, el resultado son componentes alternantes y medias modificadas de tensión.

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_a^2 + 3\tau_a^2} \quad (27)$$

$$\sigma'_a = \sqrt{\sigma_a^2 + 3\tau_a^2} = \sqrt{(3427,163)^2 + 3(0)^2} = 3427,163 KPa$$

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau_m^2} \quad (28)$$

$$\sigma'_m = \sqrt{\sigma_m^2 + 3\tau_m^2} = \sqrt{(0)^2 + 3(40240,66)^2} = \sqrt{3} * 40240,66 Pa = 69,7 KPa$$

$$\frac{1}{F_{max}} = \frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_y} \quad (29)$$

$$\frac{1}{F_{max}} = \frac{3427,163 \text{ KPa}}{139,75 \times 10^3 \text{ KPa}} + \frac{69,7 \text{ KPa}}{235 \times 10^3 \text{ KPa}} = \frac{3427,163}{139,75 \times 10^3} + \frac{69,7}{235 \times 10^3}$$

$$\frac{1}{F_{max}} = 0,024523 + 0,0002966 = 24,8196 \times 10^{-3}$$

$$F_{max} = \frac{1}{49,5932 \times 10^{-3}} = 40,29 \text{ N} \approx 40,3 \text{ N}$$

Con este cálculo concluimos que las cargas críticas son:

$$R_B = 617,51 \text{ N} \rightarrow \text{Por estática}$$

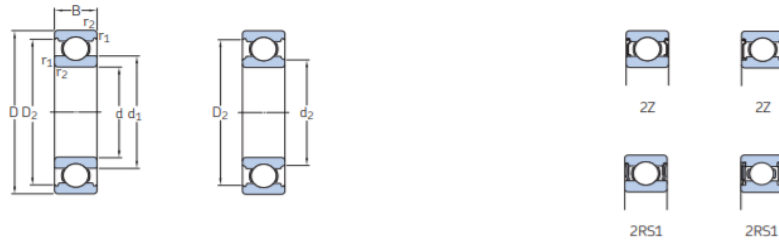
$$F_{max} = 40,3 \text{ N} \rightarrow \text{Por dinámica}$$

- **Selección de rodamiento**

Con el diámetro ($\phi_{eje} = 45 \text{ mm}$) y las cargas críticas se procede a seleccionar un rodamiento adecuado para el diseño planteado, según el catálogo SKF [40]. Se elige un rodamiento rígido de bolas en acero inoxidable con referencia W6009-2Z. En la ilustración 28 se puede ver su geometría y condiciones límite de trabajo.

1.4 Rodamientos rígidos de bolas de acero inoxidable
d 30 – 50 mm

1.4



Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designación
d	D	B	dinámica C	estática C ₀	P _u	Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	r. p. m.		g	-
30 cont.	72	19	22,9	15	0,64	–	6 300	346	▶ W 6306-2RS1 W 6306-2Z W 6306
	72	19	22,9	15	0,64	22 000	11 000	345	
	72	19	22,9	15	0,64	22 000	14 000	331	
40	62	12	11,9	9,8	0,425	–	6 700	107	▶ W 61908-2RS1 ▶ W 6008-2RS1 ▶ W 6008-2Z
	68	15	14,6	11,4	0,49	–	6 300	182	
	68	15	14,6	11,4	0,49	22 000	11 000	183	
	68	15	14,6	11,4	0,49	22 000	14 000	172	▶ W 6008
	80	18	25,1	17,6	0,75	–	5 600	359	▶ W 6208-2RS1
	80	18	25,1	17,6	0,75	20 000	10 000	359	▶ W 6208-2Z
45	80	18	25,1	17,6	0,75	20 000	12 000	342	W 6208
	68	12	12,1	10,8	0,465	–	6 000	125	▶ W 61909-2RS1
	75	16	18,2	15	0,64	–	5 600	236	▶ W 6009-2RS1
	75	16	18,2	15	0,64	20 000	10 000	237	W 6009-2Z

Ilustración 28. Características de rodamiento seleccionado de catálogo SKF [40]

De esto concluimos que el valor del diámetro interno del rodamiento (ϕ_{ir}) es 45mm que a su vez sería el mismo diámetro del eje y el diámetro externo del rodamiento (ϕ_{er}) sería 75mm.

- **Selección de polea, correa y buje**

Se procede a seleccionar el conjunto polea-buje el cual será el que generara el movimiento en el eje del mandril mediante un sistema polea-buje que estará colocado en el eje del motor, el sistema polea-buje que estará ubicado en el eje del mandril se seleccionara con el mismo catalogo SKF [40], para la selección de la polea primero se selecciona un buje que se ajuste al diámetro del eje, seleccionamos un buje TB2012X45mm posteriormente con el buje seleccionado ya podemos seguir en la selección de la polea, se recuerda que la condición deseada es polea dentada, para máxima precisión.

Buje nro.	TB2012	B (mm)	31.8
d = Bore diameter (mm)	45	B (in)	1.25
Diámetro del orificio (in)	1.77	D (mm)	66.7
Ancho del chavetero (mm)	14	D (in)	2.63
Keyway width (in)	0.55	E (mm)	-
Profundidad del chavetero (mm)	3.8	E (in)	-
Keyway depth (in)	0.15	F (mm)	11.113 x 22.225
A (mm)	69.9	F (in)	-
A (in)	2.75		
Peso (kg)	0.4		
Peso (lbs)	0.88		

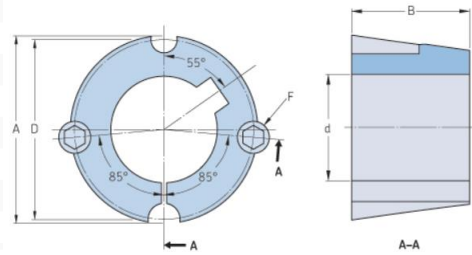


Ilustración 29. Características de buje seleccionado de catálogo SKF [40]

Con el serial del buje seleccionamos la polea dentada PHP 18XH200TB ya que esta es la polea más compacta que cumple con todas las condiciones de diseño impuestas, siendo su esquema el siguiente.

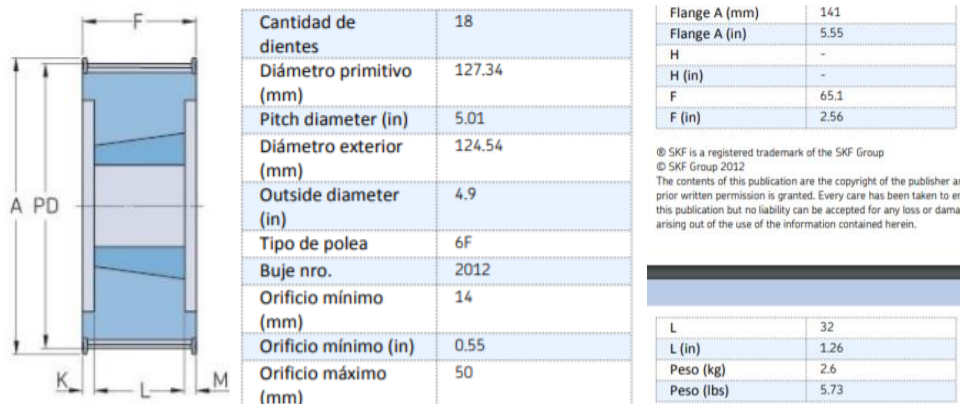
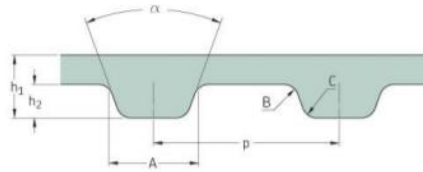


Ilustración 30. Características de polea seleccionada de catálogo SKF [40]

Con el perfil de la polea, su ancho y una longitud primitiva planteada de más o menos 15 cms (puede cambiar en la construcción y por consiguiente se deberá seleccionar otra correa) seleccionamos la correa dentada PHG 580-XH-200 siendo su esquema el siguiente.

$$W_{pol} = W_{Rueda} + W_{buje} = (2,6 + 0,4)Kg * 10 \frac{m}{s^2} = 30 N$$



Cantidad de dientes	66
Longitud primitiva (in)	57.55
Longitud primitiva (mm)	1466.85
h1 = Height (mm)	11.2
h = Height (in)	0.44
Ancho (mm)	50.8
Width (in)	2
Manguito (Y/N)	Y

Ilustración 31. Características de correa seleccionada de catálogo SKF [40]

- **Cálculos de motor**

Ya con la polea seleccionada podemos proceder con los cálculos en la polea

$$T_{fil} = 1,44 Nm \quad \phi_{primitivo} = 127,34mm$$

Ya que el sistema de poleas es 1:1 el torque y la velocidad angular es igual para ambas poleas y por ende es la misma del motor.

$$\omega_{max1} = 300 rpm = 31,42 \frac{rad}{seg}$$

$$P_{motor1} = T_{fil} * \omega_{max1} \quad (31)$$

$$P_{motor1} = 1,44Nm * 31,42$$

$$P_{motor1} = 45,24 W = 0,06 HP$$

Esta es la potencia mínima necesaria para hacer girar el mandril, ya que conseguir motores de esta potencia y velocidad angular es muy difícil se recomienda el uso de un motorreductor o en su defecto alterar la relación de las poleas.

11.1.2 Cálculos en el distribuidor del brazo

- **Velocidad, fuerza, torque y potencia de brazo giratorio**

El sistema de poleas en el carrete distribuidor tiene una relación 1:1, entonces con esta velocidad y el diámetro de polea seleccionada se calcula la velocidad angular del brazo giratorio y por consecuente la velocidad angular del motor 3, para este sistema de transmisión de potencia enfrentamos la adversidad de que al ir instalado en el carrito móvil el sistema es muy pequeño teniendo un diámetro de eje de polea de 8mm se recomienda fabricar estas dos poleas con varilla mediante máquinado y taladrado. Se plantea dos poleas de 8mm de diámetro interno y un diámetro primitivo de 23 mm (ver plano de polea en anexo 2). En uno de los proyectos de grado contemplados en los antecedentes se obtiene el dato de que la velocidad recomendada para el brazo esta entre 0,6 y 1,2 m/s [4]. Entonces se optó por una velocidad de brazo de 1 m/s.

$$V_{brazo} = 1 \frac{m}{min} \quad \Phi_{polea} = 23 mm$$

$$\omega_{max2} = \frac{V_{brazo}}{\Phi_{polea}\pi} \quad (32)$$

$$\omega_{max2} = \frac{1}{\left(\frac{23}{1000}\right)\pi}$$

$$\omega_{max2} = 13,84 \text{ rpm} \approx 14 \text{ rpm} = 1,466 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

- **Cálculo de torque en el brazo**

Ya que en este paso lo que hace más que todo el brazo es controlar el enrollamiento entonces podemos deducir que no es necesaria demasiada fuerza en la polea y como se menciona en uno de los antecedentes [4] la fuerza en el brazo suele ser máximo 0,9 N, ya que es solo una fuerza mínima para vencer la tensión del hilo y darle dirección en el eje perpendicular, se decanta por fuerza de brazo igual a 0,8.

$$F_{brazo} = 0,8 \text{ N}$$

$$T_{brazo} = \frac{\phi_{polea}}{2000} * F_{brazo} \quad (33)$$

$$T_{brazo} = \frac{23}{2000} * 0,8$$

$$T_{brazo} = 9,2 \times 10^{-3} \text{ Nm}$$

Recordando que la relación es 1:1, entonces.

$$P_{motor2} = T_{brazo} * \omega_{max2} \quad (34)$$

$$P_{motor2} = 9,2 \times 10^{-3} * 1,466 = 0,01349 \text{ W} = 1,80 \times 10^{-5} \text{ HP}$$

Esta es la potencia mínima necesaria para hacer girar el brazo, ya que conseguir motores de esta potencia y velocidad angular es muy difícil se recomienda el uso de motorreductor o en su defecto alterar la relación de las poleas, en este apartado

se plantea un motor AC ya que el brazo gira en ambos sentidos (horario y antihorario).

11.1.3 Cálculos en el carrito móvil

- **Tiempo de baño en resina**

Este es el tiempo que durara una distancia L_2 de filamento sumergido en la resina, este se calcula teniendo en cuenta las propiedades de volumen de la tolva de resina (al ser longitudes tan pequeñas se asume como que se sumerge la longitud de fibra de vidrio paralela a la respectiva cara de la tolva).

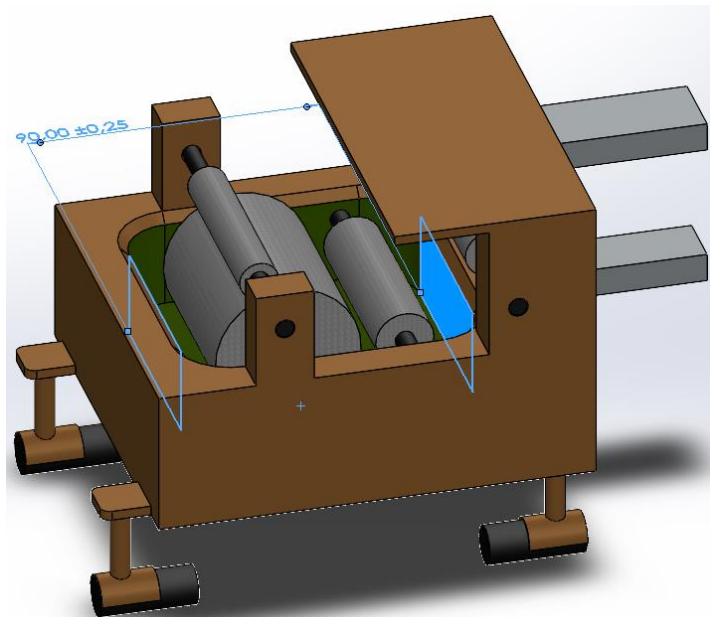


Ilustración 32. diseño de carrito móvil con dimensión tolva de resina. Autor

$$L_2 = 90 \text{ mm} \quad V_{Fil} = 90 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$t_{sumerg} = \frac{L_2}{V_{Fil}} \quad (35)$$

$$t_{sumerg} = 0,01 \text{ min} \approx 0,06 \text{ seg}$$

- **Cálculo de cargas en el carrete**

Ya que el modelo de carrete móvil planteado en este proyecto es el final, se calcula su masa con el programa Solid Works seleccionando como material el acero inoxidable, posteriormente a esto se calcula el peso del carrito.

Propiedades de material
 No se pueden editar los materiales en la biblioteca predeterminada. Para editar un material, cópielo primero a una biblioteca personalizada.

Tipo de modelo: Guardar tipo de modelo en la biblioteca

Unidades:

Categoría:

Nombre:

Descripción:

Origen:

Sostenibilidad:

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	200000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.26	N/D
Módulo cortante	79000	N/mm ²
Densidad de masa	8000	kg/m ³
Límite de tracción	517.017	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	206.807	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica	1.1e-05	/K
Conductividad térmica	19	W/(m·K)
Calor específico	500	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

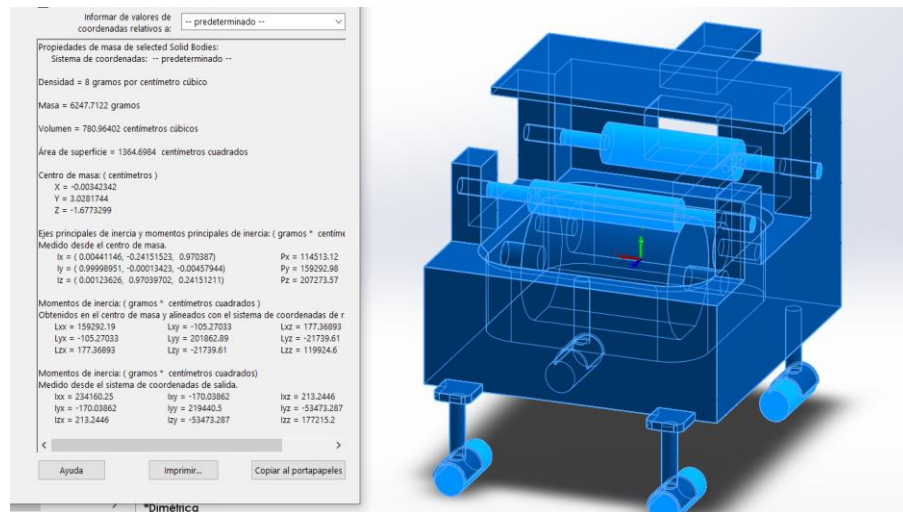


Ilustración 33. Screenshot propiedades de carro alimentador de acero inoxidable.
Autor

$$W_{carro} = 6,25 \text{ kg} * 10 \frac{m}{s^2} = 62,5 \text{ N}$$

De la investigación previa encontramos que el ángulo de embobinado para un tanque de 10 m^3 es de 70 grados y asumimos este ángulo. [4]

El paso sería la distancia lineal que avanza el carro en una vuelta del Mandril.

$$S = \frac{\pi * \phi_{2e}}{\tan \theta_{embobinado}} \quad (36)$$

$$S = \frac{\pi * \frac{102}{1000}}{\tan 70} = \frac{0,32}{2,7475} = 116,47 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\omega_{max1} = 300 \text{ rpm} = 31,42 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$

$$V_{carro} = \omega_{max1} * S \quad (37)$$

$$V_{carro} = 31,42 * 116,47 \times 10^{-3}$$

$$V_{carro} = 3,66 \frac{m}{s} = 219,6 \frac{m}{min}$$

La velocidad se transmite directamente por toda la cremallera al ser lineal por ende hacemos el cálculo de la velocidad angular en el engranaje, con el programa de SolidWorks se hizo una selección de cremallera y engranaje con las opciones disponibles en toolbox, teniendo en cuenta las condiciones de longitud de cremallera y de mínimo tamaño posible para conservar la estética de la máquina.

ÍTEM	SÍMB	FORMULA	COMPONENTES	
			PIÑÓN	CREMALLERA
MODULO	M	-	1,375	
ANGULO DE PRESIÓN	A	-	20	
NUMERO DE DIENTES	Z	-	10	-
ALTURA CREMALLERA	H	-	-	6,38mm
PASO PRIMITIVO	P	$P = \pi M$	4,3197mm	-
DIÁMETRO PRIMITIVO	D	$d = MZ$	13,75mm	-
DIÁMETRO EXTERIOR	Da	$da = d + 2M$	16,5mm	-
DIÁMETRO DE FONDO	Df	$df = d - 2,5M$	10,3125mm	-
DIÁMETRO DE BASE	Db	$db = d * \cos\alpha$	12,92 mm	-
DISTANCIA ENTRE CENTROS	a_x	$a_x = \frac{Z * M}{2} + H$	13,255 mm	
ALTURA DEL DIENTE	H	$h = 2,25M$	-	3,09375mm
ALTURA DE LA CABEZA DEL DIENTE	h_a	$h_a = M$	-	1,375mm
ALTURA DEL PIE DEL DIENTE	h_f	$h_f = 1,25M$	-	1,71875mm
LONGITUD DE CREMALLERA	L	-	-	900mm

Tabla 15. Datos generales del sistema piñón-cremallera elegido. Autor

Continuando con el cálculo de velocidad angular se tiene que,

$$\omega_{engranaje} = \frac{V_{carro}}{\pi d_{engranaje}} \quad (38)$$

$$\omega_{engranaje} = \frac{219,6}{\pi \frac{13,75}{1000}} = 5083,7rpm = 532,36 \frac{rad}{s}$$

El torque necesario para mover el carro es,

$$T_{engranaje} = W_{carro} * \frac{d_{engranaje}}{2} \quad (39)$$

$$T_{engranaje} = 62,5 N * \frac{13,75}{2000} m = 0,43 Nm$$

$$P_{motor3} = \omega_{engranaje} * T_{engranaje} \quad (40)$$

$$P_{motor3} = 532,36 * 0,43 = 228,92 W = 0,71 Hp$$

Esta es la potencia mínima necesaria para hacer girar el engranaje, ya que conseguir motores de esta potencia y velocidad angular es muy difícil se recomienda el uso de motorreductor o en su defecto alterar la relación de engranajes.

Para las ruedas inferiores del carrito se plantean unas ruedas de nailon o caucho de diámetro interior de 1,2 cms y diámetro exterior 2,5 cm, en caso de no conseguirse se sugiere alterar las bases de las ruedas en el carrito para adaptarlas al diámetro de rueda comprado.

11.1.4 Selección de estructura

Del programa Solid Works se calcula el espesor de lámina ideal que resiste las cargas planteadas, arrojando como resultado un espesor de lámina de 19mm siendo el más cercano 3/4 in, para el perfil estructural C que se utiliza como patas se selecciona una geometría adecuada para las dimensiones planteadas en este proyecto de grado siendo la geometría de este perfil la planteada en la ilustración 34.

PERFIL ESTRUCTURAL TIPO C GALVANIZADO (PROPIEDADES MECÁNICAS)																	
PRODUCTO	h (cm)	t (cm)	Peso (kg/unidad)	A (cm ²)	Eje x			Eje y			x (cm)	m (cm)	J (cm ⁴)	Cw (cm ⁶)	j (cm)	ro (cm)	Xa
					Ix (cm ⁴)	Sx (cm ³)	rx (cm)	Iy (cm ⁴)	min Sy (cm ³)	ry (cm)							
C 70x38x12mm	7	0.120	8.95	1.92	14.62	4.18	2.76	4.05	1.21	1.45	1.439	1.961	0.0092	52.60	4.43	4.61	3.40
		0.150	11.15	2.38	17.92	5.12	2.75	4.92	2.08	1.44	1.438	1.922	0.0178	63.00	4.4	4.57	3.36
C 70x50x12mm	7	0.120	10.04	2.22	18.20	5.15	2.86	7.80	2.57	1.88	1.969	2.666	0.0106	114.00	5.61	5.71	4.58
		0.150	12.50	2.74	22.10	6.33	2.84	9.52	3.14	1.87	1.968	2.646	0.0205	137.50	5.58	5.67	4.54
C 100x50x15mm	10	0.120	11.97	2.58	41.00	8.20	4.00	8.92	2.71	1.87	1.701	2.469	0.0123	221.00	6.34	6.03	4.11
		0.150	14.91	3.19	50.50	10.10	3.98	10.91	3.31	1.85	1.701	2.450	0.0239	268.60	6.32	5.99	4.08
		0.180	17.68	3.83	60.50	12.09	3.98	13.00	3.84	1.84	1.616	2.617	0.0413	303.70	7.31	6.09	4.23
C 200x50x15mm	20	0.150	22.01	3.94	130.60	17.42	5.76	12.51	3.47	1.78	1.39	2.19	0.03	623.80	8.65	6.97	3.50
		0.180	26.18	4.69	260.00	26.00	7.45	13.60	3.56	1.71	1.180	1.984	0.0352	1,048.40	11.21	8.22	3.05

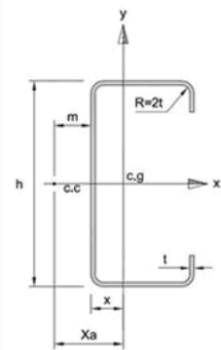


Ilustración 34. Características perfil C de 70x50x15mm

11.2 Sistema de control eléctrico de la máquina

En la ilustración 35 se puede apreciar el Esquema eléctrico necesario para el control del sistema de Filament Winding. Este se compone de un circuito eléctrico muy simple se emplea una resistencia de 10 K Ω para proteger las entradas de cada PLC, se plantea el uso de dos PLC ya que se necesitan 10 salidas de control, se plantea que para el motor M1 (motor mandril) solo tenga una salida de control ya que su dirección de giro no cambiara, para los motores M2 (motor brazo giratorio) y M3 (motor carrete movable) el sentido de giro si es necesario que cambie por ende aquí se plantean motores AC que giren en un sentido o el otro por un periodo deseado a la hora de construir. El sentido de giro lo dará la programación de los PLC activando/desactivando cada diodo tiristor, de esta forma cambiando el sentido de giro de los motores AC, las resistencias de 330 Ω protegen los diodos led que emitirán luz verde si el sentido de giro del motor se da en sentido horario y en dado caso que el motor gire en sentido antihorario se encenderá otro led de luz roja. No se plantea fuente ya que esto depende de la capacidad requerida de los motores elegidos a la hora de construcción y se recomienda en caso de ser necesario un convertidor de AC/DC.

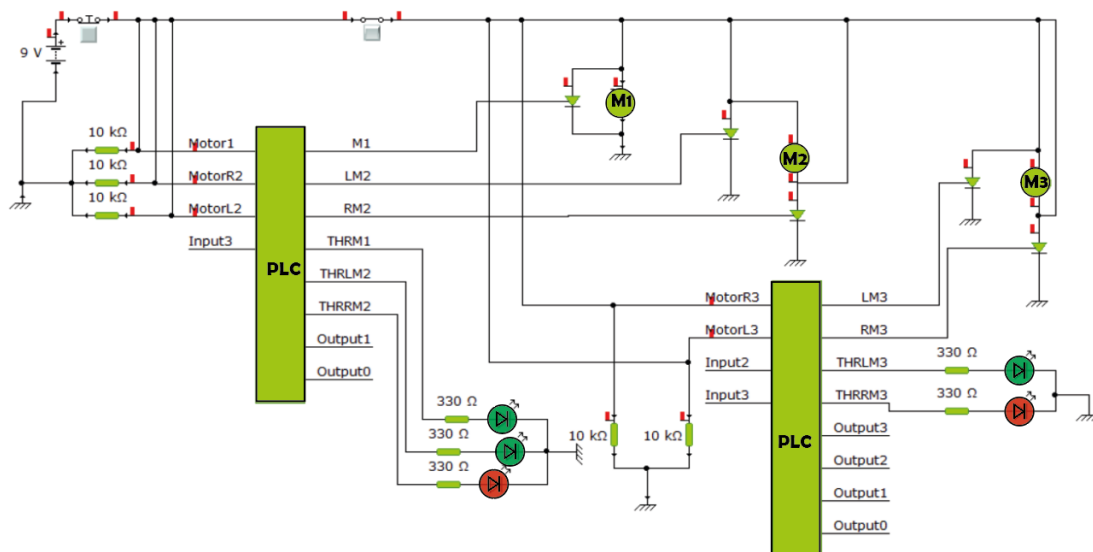


Ilustración 35. Esquema eléctrico Filament Winding. Autor

12. PLANOS A DETALLE

En la ilustración 36, 37, 38, 39 y 40 se verá el diseño de la máquina Filament Winding planteada en este proyecto realizada en Solid Works, los planos de cada una de las piezas se encuentran en los anexos.

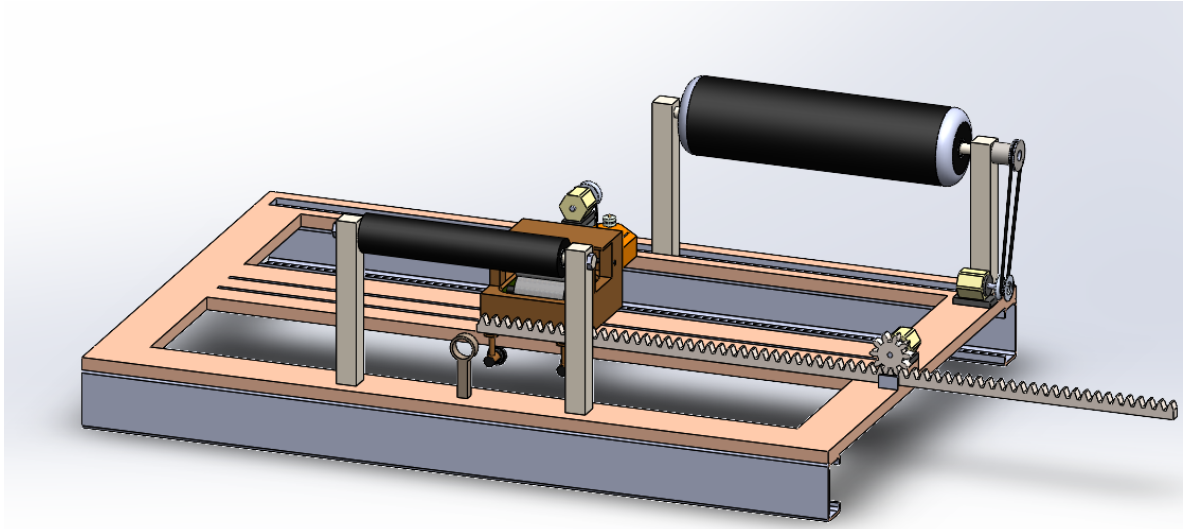


Ilustración 36. Máquina Filament Winding vista dimetrica. Autor

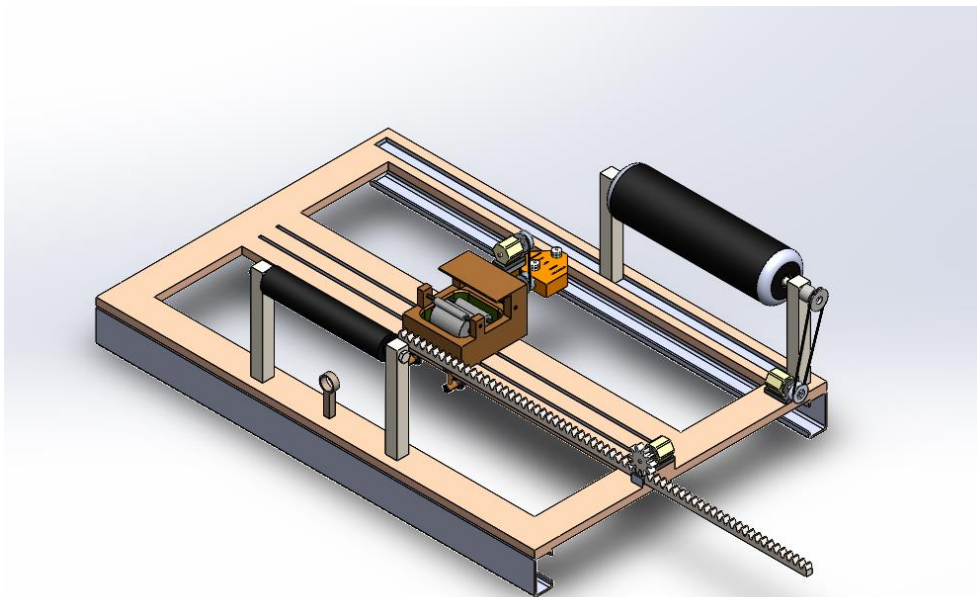


Ilustración 37. Máquina Filament Winding vista isométrica. Autor

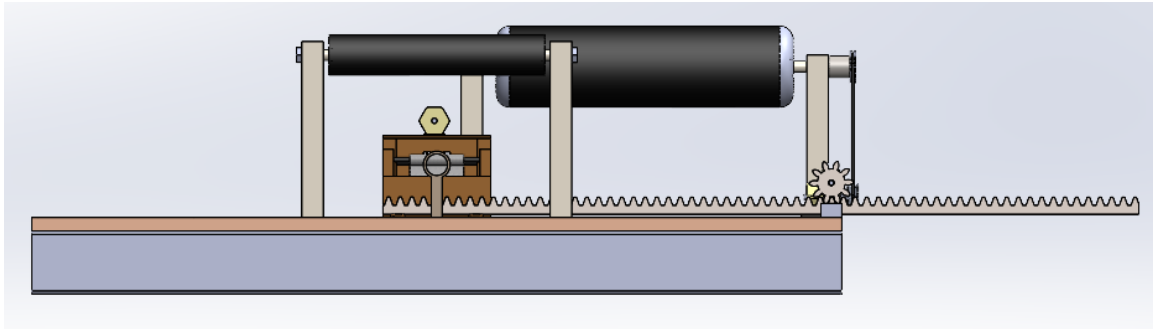


Ilustración 38. Máquina Filament Winding vista frontal. Autor

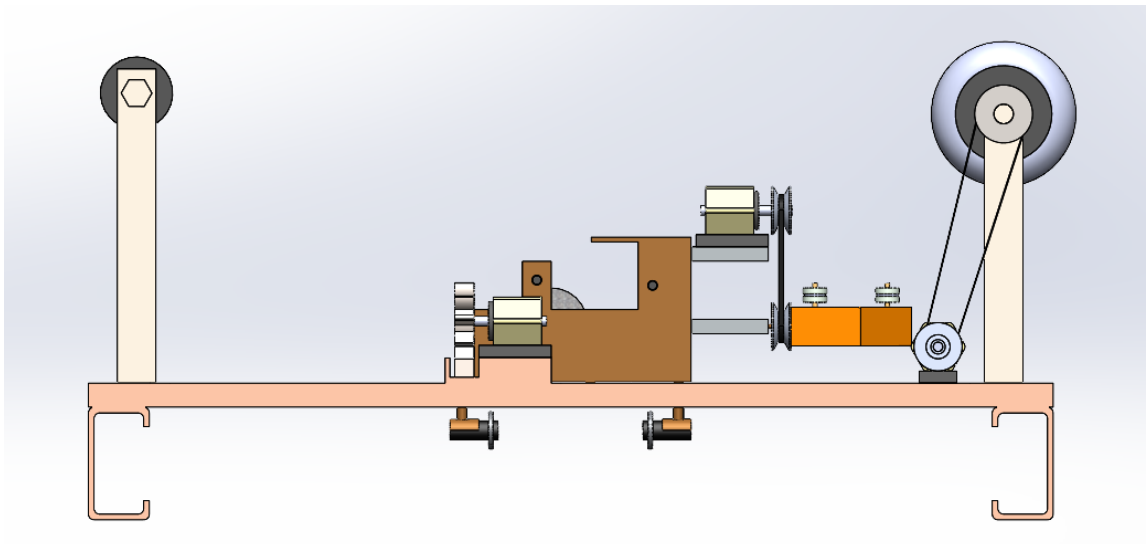


Ilustración 39. Máquina Filament Winding vista lateral. Autor

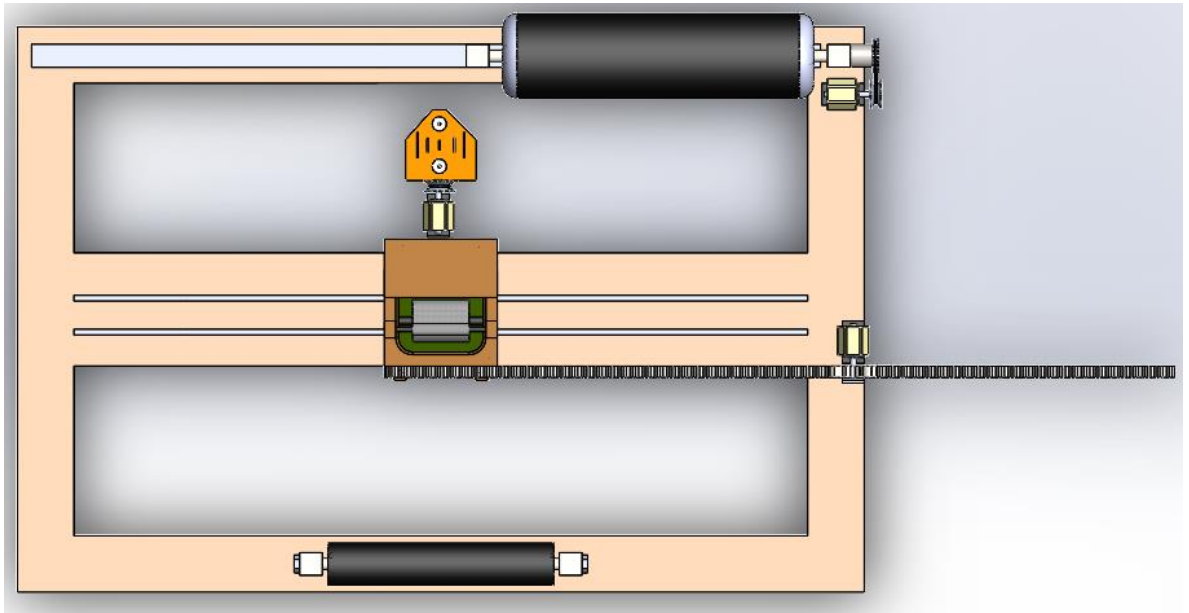


Ilustración 40. Máquina Filament Winding vista superior

13.PROCESO Y DEFINICIÓN DE MANUFACTURA DE COMPONENTES PARA MÁQUINA FILAMENT

WINDING

El proceso de manufactura para todo dispositivo mecánico se basa en una definición de operaciones necesarias representadas en un diagrama de flujo, especificando cada subproceso de manufactura de tal forma que todas las piezas al final generen un ensamble idóneo y correcto. En la Ilustración 41 se visualiza un diagrama de flujo con cada proceso y subproceso de manufactura necesario.

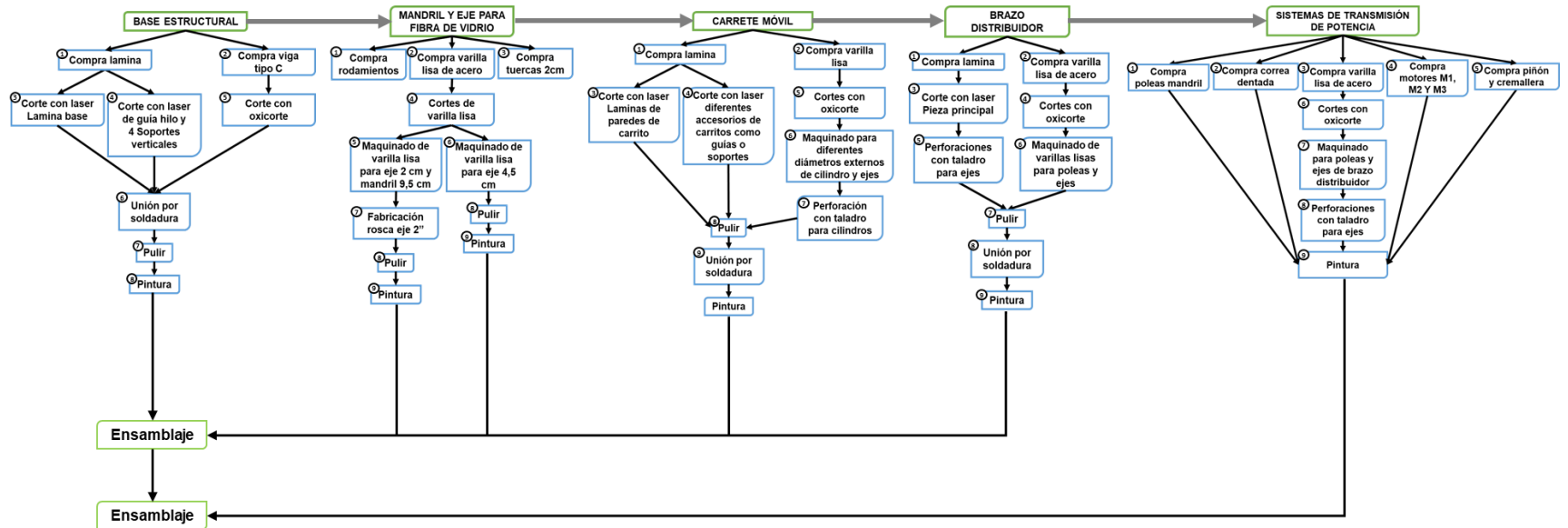


Ilustración 41 Diagrama de operaciones de manufactura

13.1 Definición de operaciones

- **Compras:** En el ejercicio de diseño se planteó para todas las superficies planas una lámina de espesor de $\frac{3}{4}$ " también para las superficies cilíndricas una varilla de diámetro 1 $\frac{7}{8}$ " y que mediante procesos de manufactura como lo son el maquinado, corte, pulido, perforado, soldadura entre otros se logren las piezas finales para así evitar el desperdicio monetario y de material.
- **Cortes:** Se recomienda hacer la mayor cantidad de cortes con láser para asegurar su precisión y para los cortes con pulidora, oxicorte y/o plasma se recomienda hacerlos a bajas temperaturas/voltajes dejando descansar el acero para así evitar su fusión, adicionalmente se recomienda pulir la superficie luego de ser llevado a cabo el corte.
- **Roscado:** Para toda operación de roscado se recomienda hacerse en torno industrial con buril de punta de tungsteno.
- **Soldadura:** Para toda unión soldada se recomienda soldadura de arco revestido con electrodo 7018 de $\frac{1}{8}$ o diámetros inferiores a este para asegurar la presentación.
- **Pulir:** Para todo proceso de pulir se recomienda llevar el material a metal blanco (sin corrosión, oxido o recubrimientos) mediante sandblasting o técnicas similares, si se decide hacer con lija manual se recomienda empezar con valores de lija 80-150-400-800 hasta lograr metal blanco.
- **Pintura:** Para todo proceso de pintura se recomienda utilizar una o dos capas de anticorrosivo barrera y posterior mente aplicar una capa de acabado con pintura epoxica según el tono deseado, estas 3 capas deben ser aplicas con aerógrafo y posteriormente una capa a mano de retoques.

13.2 Definición de procesos

- **Ensamblaje 1:** En esta parte se ensamblan todos los componentes metal mecánicos, anteriormente manufacturados, anterior a este existen unos ensambles por subgrupos identificados en la ilustración 41.
- **Ensamblaje 2:** En esta parte se ensamblan el ensamble uno y todos los componentes mecatrónicos (motores M1, M2, M3, PLC, y circuito integral de PLC) los motores se ensamblan mediante los 3 conjuntos de transmisión de potencia mencionados en la ilustración 41, el controlador PLC debe ser programado con anterioridad para controlar cada motor como se especifica en la parte 11.2 y en los cálculos independientes de cada motor.

14. CONCLUSIONES

- Se llevo a cabo una exhaustiva investigación de todo lo relacionado con los parámetros que afectan como también son significativos en la tecnología de filament winding, se obtuvieron datos clave y como velocidades, fuerzas y presiones máximas a las que se someten este tipo de máquinas.
- Durante la búsqueda de la información se identificaron diferentes parámetros clave a la hora del diseño, afectando estos en los 3 mecanismos en los cuales se encuentran ubicados los motores, y estos parámetros siendo diámetros de trabajo, cargas, presión y velocidad. Todas las características y parámetros claves se filtraron para obtener 3 opciones de diseño siendo la más adecuada y la contemplada en este proyecto de grado la opción número 2.
- Se desarrollo el diseño en detalle de la máquina filament winding en el programa CAD SolidWorks con sus respectivos planos con dimensiones y recordando que el material para todos los componentes es acero inoxidable 316.
- Se determinaron los cálculos contemplando análisis cinético y estático para ejes, se realizó el diseño de un sistema de poleas- correa, eligiendo un sistema de poleas- correa dentada, eligiendo un sistema de piñón- cremallera, eligiendo rodamientos, bujes y demás accesorios contemplados en el diseño en detalle.
- Se realizó todo el diseño de una máquina filament winding para uso académico universitario con dimensiones no superiores a 1 m^3 .
- La máquina diseñada puede elaborar recipientes de capacidad máxima de hasta 26058cm^3 y volumen mínimo de 8686cm^3 .

15.RECOMENDACIONES

- Se recomienda utilizar todos los retazos de lámina sobrantes de la base principal de la estructura y pedazos de varilla lisa para así evitar malgastar material y que el proyecto de construcción tenga un costo menor.
- El sistema de control permite la implementación de control adicional permite modificar las variables del motor a preferencias de construcción.
- Se recomienda que la programación del PLC para cada motor se haga de forma independiente para así no depender M1, M2 y M3 entre ellos. Los motores M2 y M3 se contemplaron como motores AC bidireccionales y se recomienda el uso de diodo led de diferente color para indicar en cada momento la dirección de giro.
- Se recomienda implementar a la máquina un sistema de cocido integrado en el eje, para que así sea posible la rectificación de la pieza PRFV en el antes mencionado.
- Si se desea cambiar el material por uno con propiedades diferentes se recomienda un recalcu de variables y ver si satisfacen los componentes planteados en los cálculos, de ser así se recomienda una reelección de componentes mecatrónicos y de componentes de transferencia de potencia como de sus respectivos ejes.

16. REFERENCIAS

- [1] STEWART, S., 1985. Filament Winding - Materials & Engineering. Materials & Design.
- [2] CHIACCHIARELLI, Leonel Matías y GARCIA, Vicente. Puesta a punto de la máquina de Filament Winding, Fase 1. En: ResearchGate [en línea]. Buenos Aires. Instituto tecnológico buenos Aires, INSA LYON, abril 2020 [consultado:25 de agosto 2020]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/340609298> Puesta a punto de la máquina de Filament Windin
- [3] C.-A. ENCALADA. “Diseño y construcción de una máquina bobinadora semiautomática de 4 ejes para la fabricación de tanques de fibra de vidrio mediante la técnica filament winding”. Proyecto de grado. Quito. Universidad internacional del Ecuador. 2017
- [4] M.-A. AGUILAR, A.-M. PARADA. “Diseño y selección de las partes de una máquina de embobinado de hilos, para la fabricación de cilindros en plástico reforzado con fibra de vidrio” Trabajo de grado. Guayaquil. Escuela superior politécnica del litoral. 2015.
- [5] J.-D. SALINAS.” Diseño y construcción de una máquina, para la elaboración de postes de fibra de vidrio reforzada”. Tesis. Quito. Universidad san francisco de quito. 2014
- [6] [11] I.-A. RAMIREZ. “Diseño de una máquina para construcción de tanques con materiales fibro-reforzados con técnica filament winding” Tesis. Santiago de Cali. Universidad autónoma de occidente. 2009
- [7] “Materiales compuestos,” *Temas de disseny*, no. 20, pp. 123–139, 2002, Consultado en: May 13, 2021. [Online]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn114.html>.
- [8] González, J. (2011) ¿Qué es un material compuesto? [Imagen]. Arquitectura en fibra de carbono. Recuperado de: <https://arquitecturacarbono.wordpress.com>
- [9] “Conoce los tipos y características de las fibras textiles – Playeras Mark.” <https://www.playerasmark.com/conoce-los-tipos-y-caracteristicas-de-las-fibras-textiles/> (visitado May 15, 2021).
- [10] J. Wales, “Manual para uso de fibra de Vidrio,” pp. 1–48, Accessed: May 17, 2021. [Online]. Disponible:

<https://www.yumpu.com/es/document/read/14809269/manual-para-uso-da-fibra-de-vidro-optimist>

[11] S. García Díez, “Fibras y materiales de refuerzo: Los poliésteres reforzados aplicados a la realización de piezas 3D,” 2011. Disponible en: <https://reviberpol.files.wordpress.com/2019/07/2011-2-garcia.pdf>

[12] SMC COLOMBIA SAS. Fibra de vidrio MAT.[Imagen] Disponible en: <https://smccolombia.com/fibra-de-vidrio-mat-smc-colombia/#woven-roving>

[13] “Fibra de vidrio| Mat | SMC Colombia - SMC Colombia.” <https://smccolombia.com/fibra-de-vidrio-mat-smc-colombia/#woven-roving> (accessed May 17, 2021).

[14] SMC COLOMBIA SAS. Woven roving PRFV[Imagen]. Disponible en: <https://smccolombia.com/fibra-de-vidrio-mat-smc-colombia/#woven-roving>

[15] SMC COLOMBIA SAS. Roving directo PRFV[Imagen]. Disponible en: <https://smccolombia.com/fibra-de-vidrio-mat-smc-colombia/#woven-roving>

[16] SMC COLOMBIA SAS. Roving continuo[Imagen]. Disponible en: <https://smccolombia.com/fibra-de-vidrio-mat-smc-colombia/#woven-roving>

[17] SMC COLOMBIA SAS. Velo de superficie PRFV[Imagen] Disponible en: <https://smccolombia.com/fibra-de-vidrio-mat-smc-colombia/#woven-roving>

[18] Universitat de Barcelona, “CARACTERÍSTICAS DE LOS TERMOESTABLES.” Disponible en: <http://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6686/06Txrj6de14.pdf;jsessionid=03460A62841D511688E1C0E3722EF586?sequence=6> (visitado May 17, 2021).

[19] M. Nieto, “Usos y aplicaciones de la resina de poliéster,” Nazza, 2018. https://www.nazza.es/blog/8_Usos-resina-poliester.html#que es la resina de poliester (accessed May 17, 2021).

[20] PLAREMESA, “Resina Epóxica | ¿Cuales son sus usos principales? | PLAREMESA®,” *Web Page*, 2020. <https://www.plaremesa.net/resina-epoxica/> (accessed May 17, 2021).

[21] “Características y aplicación de resina termoendurecible para Composites - Tstar Composites.” <https://www.cfrp-tstar.com/es/characteristics-and-application-of-thermosetting-resin-for-composites/> (accessed May 17, 2021).

[22] RAMIREZ, VILLEGAS. Irne. Diseño de máquina para construcción de tanques con materiales fibro-reforzados con técnica filament winding[web]. para optar el título de ingeniero mecatrónico. Universidad autónoma de occidente. Santiago de cali.2009. pag 39-40. Consultado: día 11 de mayo del 2021.

[23] “Filament Winding - Gazechim Composites Ibérica.” <https://www.gazechim.es/procesos-de-aplicacion/filament-winding/> (accessed May 17, 2021).

[24] BLOGSPOT. Tecnología de los plásticos. Proceso filament winding.[imagen] Disponible en: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/10/filament-winding-bobinado-de-filamento.html>

[25] “Filament winding (bobinado de filamento) | Tecnología de los Plásticos,” 2011-10-17. <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/10/filament-winding-bobinado-de-filamento.html> (accessed May 17, 2021).

[26] M.-A. AGUILAR, A.-M. PARADA. “Diseño y selección de las partes de una máquina de embobinado de hilos, para la fabricación de cilindros en plástico reforzado con fibra de vidrio” Trabajo de grado. Guayaquil. Escuela superior politécnica del litoral. 2015. (pag.9-10)

[27] “Existen tres modelos básicos de bobinado Bobinado helicoidal el movimiento de | Course Hero.” <https://www.coursehero.com/file/p68omjg3/Existen-tres-modelos-básicos-de-bobinado-Bobinado-helicoidal-el-movimiento-de/> (accessed May 17, 2021).

[28] MEXICO DOCUMENTS. Bobinado de filamento con resina. Proceso Bobinado helicoidal.[Imagen] Disponible en: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/10/filament-winding-bobinado-de-filamento.html>

[29] MEXICO DOCUMENTS. Bobinado de filamento con resina. Proceso Bobinado circunferencial.[imagen] Disponible en: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/10/filament-winding-bobinado-de-filamento.html>

[30] STUPENENGO, franco. Materiales y materias primas: materiales compuestos. inet. argentina. 2011. instituto nacional de educación tecnológica.

Consultado(6 de mayo 2021) disponible en: <http://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/materiales-compuestos.pdf>

[31] MEXICO DOCUMENTS. Bobinado de filamento con resina. Proceso Bobinado Satélite.[Imagen] Disponible en: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/10/filament-winding-bobinado-de-filamento.html>

[32] M.-A. AGUILAR, A.-M. PARADA. “Diseño y selección de las partes de una máquina de embobinado de hilos, para la fabricación de cilindros en plástico reforzado con fibra de vidrio” Trabajo de grado. Guayaquil. Escuela superior politécnica del litoral. 2015.[Imagen] pag.11

[33] M.-A. AGUILAR, A.-M. PARADA. “Diseño y selección de las partes de una máquina de embobinado de hilos, para la fabricación de cilindros en plástico reforzado con fibra de vidrio” Trabajo de grado. Guayaquil. Escuela superior politécnica del litoral. 2015.Pag 11-13

[34] GARCIA,Vicente. Reporte del proyecto de filament winding. Buenos aires. Instituto tecnológico de buenos aires. INSA Lyon. Paginación 1-62. disponible en: file:///C:/Users/Juan%20Jos%C3%A9/Downloads/REPORTEDELPROYECTOdefilamentwinding%20(2).pdf

[35] GAZECHIM COMPOSITES IBERICA. FILAMENT WINDING. [Imagen] Disponible en: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/10/filament-winding-bobinado-de-filamento.html>

[36] Pandita S. D., Irfan M. S., Machavaram V. R., Shotton-Gale N., Mahendran R. S., Wait C. F., Paget M. A., Harris D., Leek C. y Fernando G. F. (2012). Clean wet-filament winding – Part I: design concept and simulations. *Journal of composite materials*, 47(3) 379-390.[imagen] Disponible en: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/10/filament-winding-bobinado-de-filamento.html>

[37] Spies, H. J. Patente EE.UU. No. 4369934. Washington; DC: Oficina de patentes y marcas de EE.UU.

[38] Hamrock J. B., Jacobson. B. O. y Schmid S. R. (2000). Elementos de máquinas. McGraw-Hill.

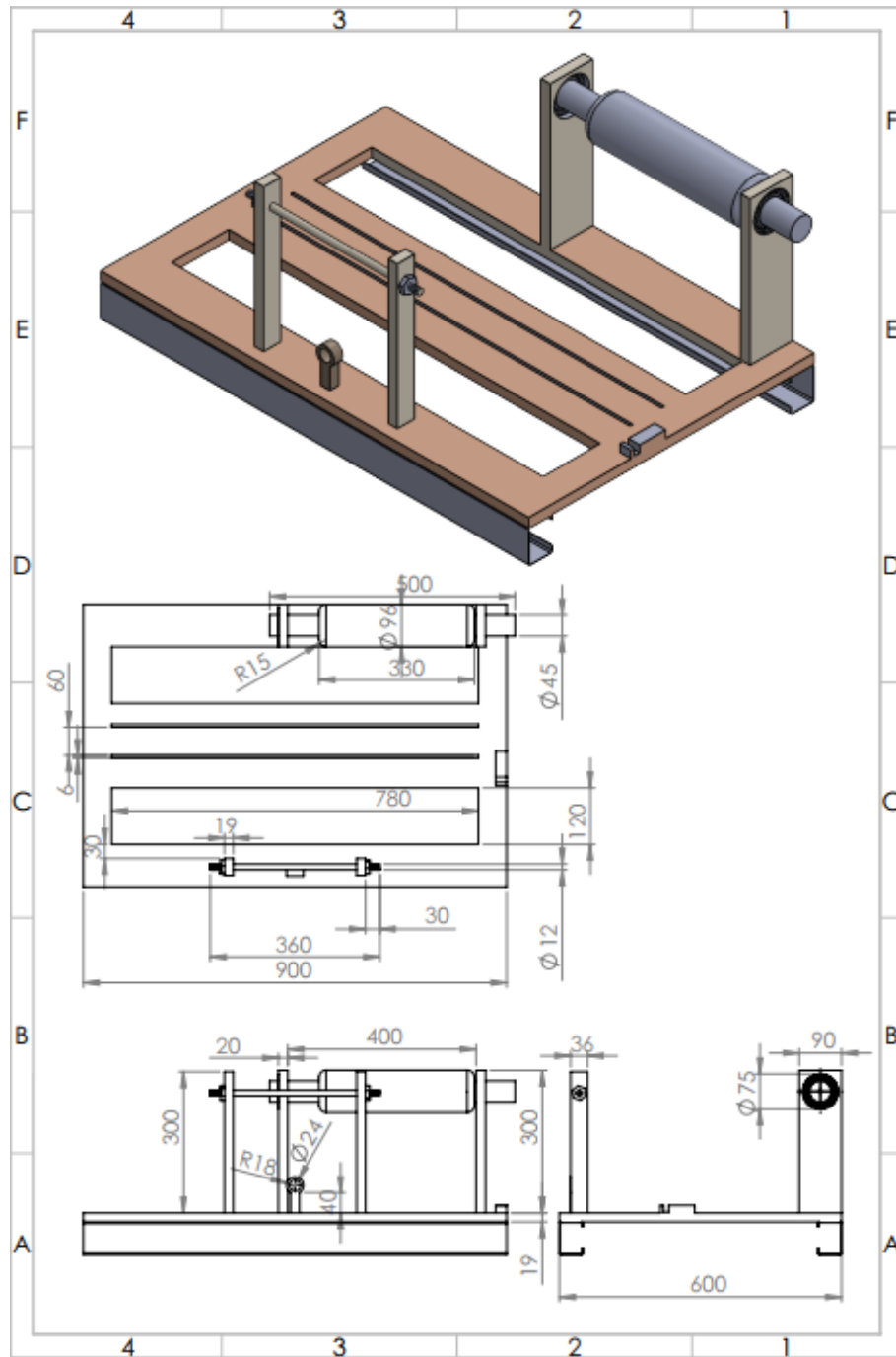
[39] Budynas R. G. y Nisbett J. K. (2008). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. McGraw-Hill.

[40] Skf. Selección de rodamientos.

https://www.skf.com/binaries/pub201/Images/0901d19680416953-Rolling-bearings---17000_1-ES_tcm_201-121486.pdf

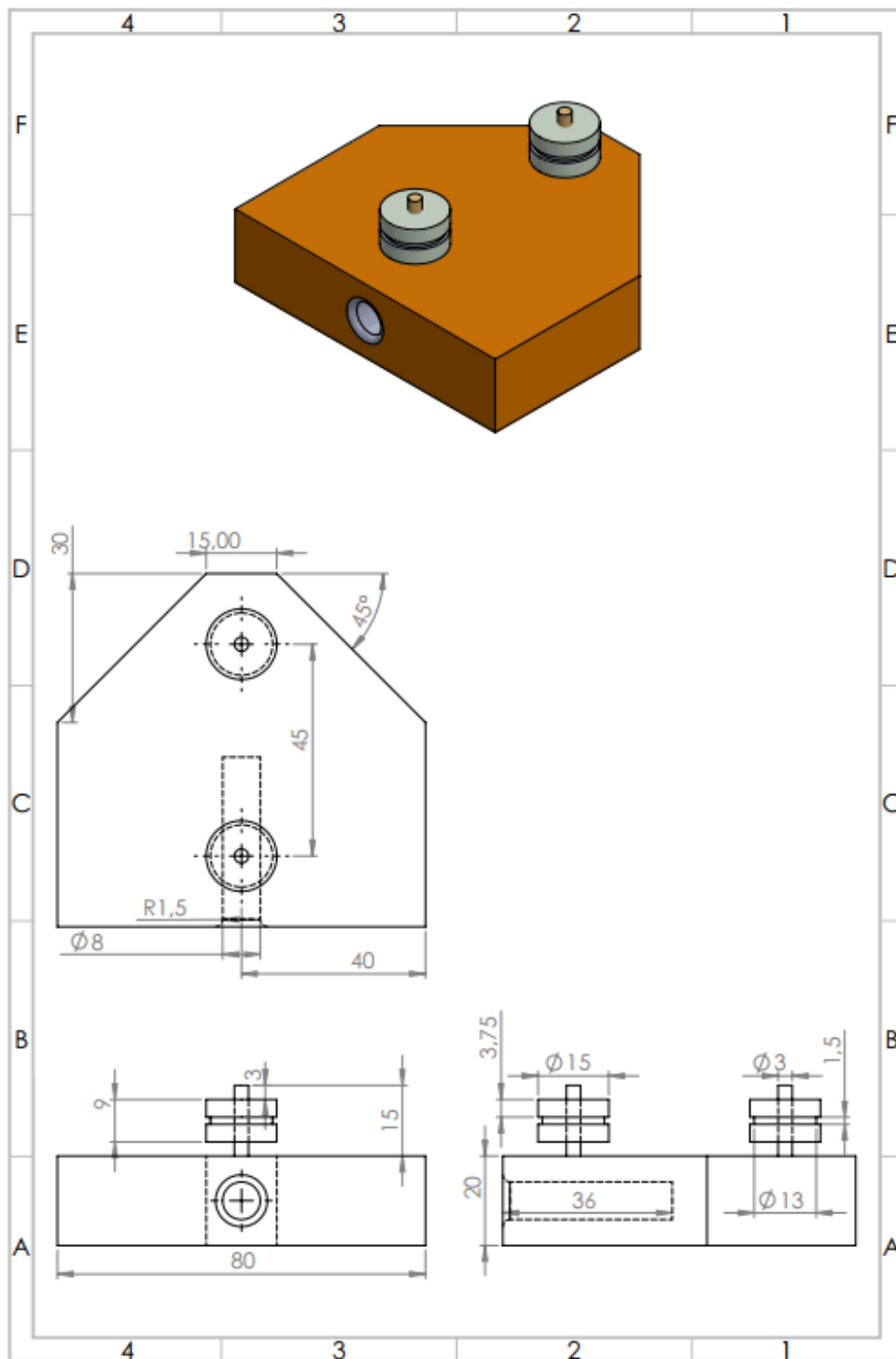
17.ANEXOS

Anexo1. Plano de detalle estructura base con ejes y mandril



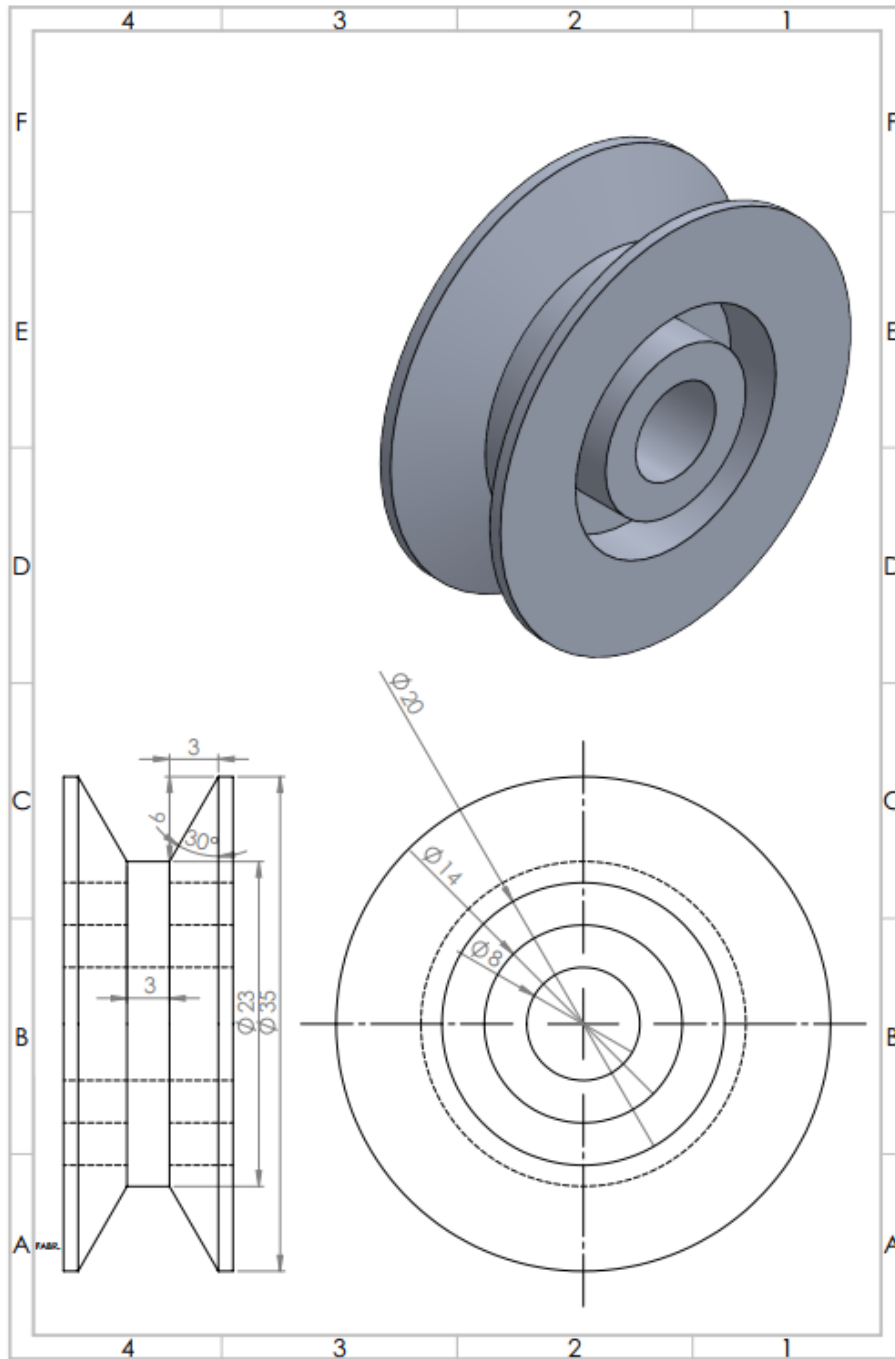
Anexo 1. Plano de detalle estructura base con ejes y mandril

ANEXO 2, Plano de detalle brazo giratorio



Anexo 2. Plano de detalle brazo giratorio

Anexo 4. Plano de detalle para la polea del brazo giratorio



Anexo 4. Plano de detalle para la polea del brazo giratorio

