



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERÍA EN
MECATRÓNICA.**

TEMA:

“SISTEMA DE ARRASTRE Y CORTE PARA UN EQUIPO DE PULTRUSIÓN.”

AUTOR: MAGALY ESTEFANIA CHIMARRO QUISHPE

DIRECTOR: ING. VÍCTOR MANUEL CÁRDENAS, PhD.

IBARRA, 2020

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



BIBLIOTECA UNIVERSITARIA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información.

DATOS DEL AUTOR	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	172529579-2
APELLIDOS Y NOMBRES:	CHIMARRO QUISHPE MAGALY ESTEFANIA
DIRECCIÓN:	CAYAMBE
EMAIL:	mechimarroq@utn.edu.ec
TELÉFONO FIJO / MÓVIL:	0999111446

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	SISTEMA DE ARRASTRE Y CORTE PARA UN EQUIPO DE PULTRUSIÓN
AUTOR:	CHIMARRO QUISHPE MAGALY ESTEFANIA
FECHA:	20 de febrero de 2020
PROGRAMA:	PREGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN MECATRÓNICA
DIRECTOR:	ING. VÍCTOR CÁRDENAS, PhD.

2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se desarrolló sin violar derechos de autores de terceros, por lo tanto, la obra es original, y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 20 días del mes de febrero de 2020

El autor

Firma:


Nombre: Magaly Estefania Chimarro Quishpe

Cédula: 172529579-2



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
CERTIFICACIÓN DIRECTOR

Certifico que el trabajo de grado titulado “SISTEMA DE ARRASTRE Y CORTE PARA UN EQUIPO DE PULTRUSIÓN”, ha sido desarrollado en su totalidad por la señorita: Chimarro Quishpe Magaly Estefania portadora de la cédula de identidad número: 172529579-2; previo a la obtención del título de Ingeniería en Mecatrónica.


Ing. Víctor Cárdenas, PhD.
DIRECTOR DE TESIS

AGRADECIMIENTO

Como primera instancia le doy gracias a Dios por acompañarme en cada paso de mi vida y en los momentos que más necesitaba de él y a mi familia, de manera especial a mis padres, quienes siempre cuidan de mí y me brindan su apoyo.

Un profundo agradecimiento a mis compañeros de trabajo y amigos, Gissela Chávez y Andrés García, quienes han sido pilar fundamental en el transcurso del desarrollo de este proyecto y su culminación. Junto con ellos también al Director de tesis, Doctor Víctor Cárdenas y Tutores: Víctor Erazo, Fernando Valencia, Cosme Mejía y Christian Vásquez quienes con su experiencia personal y profesional nos ayudaron a resolver varios inconvenientes y dudas que se presentaron en el desarrollo de este proyecto y durante toda la carrera.

También, mi más sincero agradecimiento a mis amigos Vicky, Anita, Brayan, Christian P., Cristian G. Silvy y Mericita quienes de manera directa o indirecta fueron parte y colaboraron en el desarrollo de este trabajo.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios y a mis padres, por estar siempre presentes en las decisiones más importantes de mi vida, por ser mi más grande motivación para seguir mejorando y por todo el esfuerzo que han realizado para que pudiera terminar mi carrera Universitaria.

A mis hermanos, Freddy y Pame quienes son mi fuerza y ejemplo para mejorar personal y profesionalmente.

A mis abuelitos María y Manuel, a mi madrinita Normy, a mis primos Danny y Camila y a Dannes quienes son mi inspiración y han cumplido un papel importante en mi vida, para mostrarles que con dedicación y sacrificio es posible llevar a cabo cualquier propósito que uno se planteé.

A mis amigos, de quienes he aprendido muchas cosas interesantes y con quienes he vivido varias experiencias que llevaré en mi corazón

RESUMEN

La evolución de la industria de los compuestos resalta con mayor fuerza durante los últimos años, debido al desarrollo de nuevas tecnologías que hacen posible mejorar los procesos para su obtención, permitiendo ahora su intervención en varias aplicaciones simples y complejas. Sin embargo, los costos de las máquinas para la producción de estos compuestos son elevados, como es el caso del proceso de pultrusión. Por esta razón este trabajo presenta el diseño y construcción de una de las fases de la máquina de pultrusión, el sistema de arrastre y corte para la obtención de perfiles tipo “I” de material compuesto de fibra de vidrio con resina poliéster de 25 x 46 mm, considerando como factor importante el costo total para su construcción.

Teniendo claros los conceptos base se procede a plasmar la máquina, utilizando el diseño concurrente como herramienta principal, mismo que considera los requerimientos que el cliente tiene hacia el producto y la mejor solución para lograr sus expectativas, además, se muestran los cálculos para realizar la adquisición de los equipos y para la comparación de resultados utilizando la herramienta computacional SolidWorks.

Posteriormente, con la máquina construida, se realizan pruebas en vacío y con carga, que permiten experimentar con las variables de esta fase, siendo las velocidades de arrastre y corte. Se obtienen resultados aceptables para el corte, pero no tan favorables para el arrastre, pues el sistema de arrastre precisa cumplir con parámetros para su adecuado funcionamiento, como son la velocidad de desplazamiento y el trabajo continuo, por ende, se presenta el análisis de rediseño del sistema, pero sin su implementación por honor al tiempo y dinero.

Palabras claves: compuesto, perfil, pultrusión, arrastre, corte, diseño.

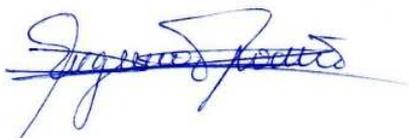
ABSTRACT

The evolution of the compound industry stands out more strongly during the last years, due to the development of new technologies that make possible to improve the processes for obtaining it, now allowing its intervention in several simple and complex applications. However, the costs of the machines for the production of these compounds are high, as in the case of the pultrusion process. For this reason, this work presents the design and construction of one of the phases of the pultrusion machine, the drag and cut system for obtaining "I" type profiles of fiberglass composite material with 25 x 46 mm polyester resin, considering the total cost for its construction as an important factor.

Having clear the basic concepts, we proceed to capture the machine, using the concurrent design as the main tool, which considers the requirements that the customer has towards the product and the best solution to achieve their expectations. In addition, the calculations to realize the equipment acquisition and for the comparison of results using the SolidWorks computational tool.

Subsequently, with the machine built, vacuum and load tests are carried out, which allow experimenting with the variables of this phase, being the drag and cut speeds. Acceptable results are obtained for the cut, but not so favorable for the drag, because the drag system needs to comply with parameters for its proper operation, such as the speed of travel and continuous work. Therefore, the redesign analysis is presented of the system, but without its implementation in honor of time and money.

Keywords: compound, profile, pultrusion, drag, cut, design.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA	ii
2. CONSTANCIAS.....	iii
CERTIFICACIÓN DIRECTOR.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	viii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN E INFORMACIÓN GENERAL.....	1
Descripción del problema	1
Objetivos	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
Justificación.....	2
Alcance	3
CAPÍTULO 2.....	5
MARCO REFERENCIAL.....	5
2.1. Marco del estado actual	5
2.1.1. A nivel mundial.....	5
2.1.2. A nivel regional.....	6
2.1.3. A nivel nacional.....	6
2.2. Marco conceptual	7
2.2.1. Materiales compuestos	7
2.2.2. Clasificación.....	7
2.2.3. Composición.....	9

2.2.4. Ventajas y desventajas de los materiales compuestos	20
2.2.5. Métodos para la fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica.....	21
2.2.6. Pultrusión.....	23
GLOSARIO	36
CAPÍTULO 3.....	39
METODOLOGÍA.....	39
3.1. Fases.....	39
3.1.1. Fase 1: investigación	39
3.1.2. Fase 2: diseño	40
3.1.3. Fase 3: construcción.....	41
3.1.4. Fase 4: validación.....	41
3.2. Análisis funcional y modular del proceso de pultrusión.....	42
3.2.1. Etapas.....	42
3.2.2. Análisis funcional	42
3.2.3. Análisis modular	46
3.3. Despliegue de la función de calidad (QFD)	48
3.3.1. Reconocimiento de clientes.....	48
3.3.2. Requerimientos del cliente	49
3.3.3. Especificaciones de ingeniería.....	49
3.3.4. Casa de la calidad	50
3.4. Determinación de soluciones.....	50
3.4.1. Generación de alternativas de solución.....	50
3.4.2. Método ordinal corregido de criterios ponderados.....	50
3.5. Selección de componentes neumáticos	66
3.5.1. Selección del cilindro para el arrastre.....	66
3.5.2. Selección del cilindro para el corte.....	69
3.5.3. Dimensión de la válvula distribuidora	70
3.6. Selección de componentes eléctricos	70
3.6.1. Selección de la herramienta de corte.....	70
3.7. Diseño.....	70
3.7.1. Selección de ejes	71
3.7.2. Cálculo de reacciones.....	71

3.7.3. Simulaciones.....	80
<i>CAPÍTULO 4.....</i>	85
<i>RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</i>	85
4.1. Materiales que intervienen en el proceso	85
4.1.1. Cilindros neumáticos de doble efecto.....	85
4.1.2. Electroválvulas.....	86
4.1.3. Compresor.....	87
4.2. Construcción del sistema de arrastre y corte	88
4.3. Funcionamiento de la máquina de pultrusión	89
4.4. Pruebas experimentales	90
4.4.1. Pruebas en vacío	90
4.4.2. Pruebas con el material.....	91
4.5. Análisis y discusión de resultados	100
4.6. Rediseño del sistema de arrastre y corte	101
<i>CAPÍTULO 5.....</i>	103
<i>CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES.....</i>	103
5.1. Conclusiones.....	103
5.2. Recomendaciones	104
<i>ANEXOS.....</i>	119
ANEXO A: Casa de la calidad	119
ANEXO B: Planos del primer diseño del sistema de arrastre y corte.....	120
ANEXO C: Planos del rediseño propuesto.....	121
ANEXO D: Manual de mantenimiento	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representación esquemática de compuestos reforzados con fibras en forma de: a) estera, b) fibras continuas unidireccionales, c) partículas, d) fibras cortas (o bigotes de 30 mm de largo) y e) fibras largas multidireccionales [12].....	12
Figura 2: Efecto en la resistencia de las fibras de vidrio en función al diámetro [3]	13
Figura 3: Relación longitud-resistencia de fibra de vidrio E en una matriz epóxica [13].....	13
Figura 4: Efecto de la orientación de las fibras en la resistencia a la tensión de compuestos epóxicos reforzados con fibras de vidrio E [13].	14
Figura 5: (a) Se pueden unir cintas que contienen fibras alineadas para producir una estructura compuesta unidireccional de varias capas. (b) Las cintas que contienen fibras alineadas se pueden unir con diferentes orientaciones para producir un compuesto casi isotrópico. En este caso, se forma un compuesto $0^{\circ}/\pm 45^{\circ}/90^{\circ}$ [13].....	15
Figura 6: Carretes con hilos roving ubicados en estanterías enumeradas que pasan a través de guías [19]	25
Figura 7: Ingreso y salida de las fibras de refuerzo en el tanque con resina y demás aditivos [20]	26
Figura 8: Sistema de pre-formado que también ayuda a quitar el exceso de resina [22]	27
Figura 9: Moldes de acero con diferentes geometrías para el proceso de pultrusión [23]	27
Figura 10: Curva de curado en el molde en función a su distancia y temperatura [1]	28
Figura 11: Cilindros reciprocantes que realizan el arrastre del perfil cuando sale del molde [25]	29
Figura 12: Curva de curado en el molde en función a su distancia y temperatura [26].	30
Figura 13: Representación esquemática del proceso de pultrusión para fabricación de formas huecas [21].....	31
Figura 14: Primera salida del perfil pultruído [29].....	33
Figura 15: Representación esquemática del proceso de pultrusión [30]	33
Figura 16: Diagrama análisis funcional nivel 0.....	43
Figura 17: Diagrama análisis funcional nivel 1	43
Figura 18: Diagrama análisis funcional nivel 2.....	45
Figura 19: Diagrama generación de módulos.....	47

Figura 20: Diagrama de la alternativa de solución apropiada	65
Figura 21: Diagrama para la selección de cilindros neumáticos [34].....	68
Figura 22: Simulación del desplazamiento del eje de arrastre	81
Figura 23: Simulación de tensión de Von Mises del eje de arrastre.....	82
Figura 24: Simulación del factor de seguridad del eje de arrastre.....	82
Figura 25: Simulación del desplazamiento del eje de corte	83
Figura 26: Simulación de tensión de Von Mises del eje de corte.....	84
Figura 27: Simulación del factor de seguridad del eje de corte.....	84
Figura 28: Cilindro neumático de doble efecto [36].....	85
Figura 29: Electroválvula solenoide 5/2 [36]	86
Figura 30: Compresor Campbell Hausfeld.....	88
Figura 31: Sistema de arrastre	88
Figura 32: Sistema de corte	89
Figura 33: Unión de las dos estaciones	89
Figura 34: Prueba 1-Perfil con una estructura demasiado frágil	93
Figura 35: Prueba 2- Perfil frágil que muestra partes que no se compactan correctamente.....	93
Figura 36: Prueba 3-Perfil frágil que muestra mejor compactación entre fibras y resina.....	93
Figura 37: Prueba 4-Perfil frágil con ciertas partes que no se compactaron correctamente	94
Figura 38: Prueba 5-Perfil frágil con mejor compactación, pero poroso	95
Figura 39: Primera prueba de corte-Se produce una delaminación en su estructura.....	95
Figura 40: Prueba 6-Perfil resistente con incorrecta distribución de fibras en una parte.....	96
Figura 41: Prueba 7-Perfil frágil con una excelente interfaz entre matriz y refuerzo	96
Figura 42: Prueba 8- Perfil con una estructura resistente	97
Figura 43: Prueba 9- Perfil frágil con distribución de fibras irregular	97
Figura 44: Prueba 10-Perfil resistente con un buen curado del material	98
Figura 45: El área en donde se realiza el corte muestra un buen acabado	98
Figura 46: Prueba 11: Perfil resistente con un buen curado	98
Figura 47: Prueba 13 –Perfil que presenta cierto nivel de cristalización	99
Figura 48: Prueba 14- Perfil resistente con un excelente curado	99
Figura 49: Prueba 12- Polimerización anticipada en el ingreso del molde	99
Figura 50: Prueba Final-Perfil resistente con un buen acabado en el área de corte	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades de los materiales compuestos [8].....	8
Tabla 2: Propiedades de algunas resinas termoestables [10].....	10
Tabla 3: Propiedades de algunas resinas termoplásticas [10].....	11
Tabla 4: Propiedades de algunas fibras de refuerzo [10].....	16
Tabla 5: Ventajas y desventajas de los materiales compuestos [17]	21
Tabla 6: Métodos más comunes para la fabricación de materiales compuestos [10].....	22
Tabla 7: Lista de requerimientos del cliente traducidas a la voz del ingeniero	49
Tabla 8: Determinación de la ponderación de cada criterio de evaluación	51
Tabla 9: Parámetros de un cilindro neumático [34].....	69
Tabla 10: Parámetros de la válvula distribuidora.....	70
Tabla 11: Características del eje para el sistema de arrastre [35].....	71
Tabla 12: Características del eje para el sistema de corte [35].....	71
Tabla 13: Condiciones de frontera	81
Tabla 14: Condiciones de frontera	83
Tabla 15: Características cilindro neumático de doble efecto [36].....	86
Tabla 16: Datos técnicos cilindro de doble efecto [36]	86
Tabla 17: Características electroválvula [36]	87
Tabla 18: Datos técnicos de la electroválvula [36].....	87
Tabla 19: Variables para la obtención del perfil pultruído	92
Tabla 20: Características cilindros hidráulicos V/C [37].....	101

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN E INFORMACIÓN GENERAL

Descripción del problema

Actualmente realizar estructuras con perfiles "I" es muy común, dichos perfiles son ampliamente utilizados en diferentes procesos arquitectónicos, industriales y de construcción.

Los perfiles "I" en procesos arquitectónicos son la base para el desarrollo de proyectos, pues se utilizan para producir marcos de puertas, ventanas, muros de cortina, entre otros.

En la actualidad la mayoría de estos perfiles son fabricados en aluminio resultan muy útiles, pero tienen un costo elevado, que oscila de \$10 a \$25 por metro lineal, según las especificaciones y calidad del material.

Desde hace varios años, se han utilizado materiales compuestos de plástico con fibra de vidrio; aunque no es el primer material compuesto moderno, este se utiliza en diferentes sectores por sus propiedades mecánicas y térmicas, alta resistencia y bajo peso, capaces de sustituir los perfiles realizados en aluminio [1]; además, el costo para obtener el producto va de \$1.50 a \$5.00 por metro lineal.

El material compuesto, se debe importar, pues no existe producción nacional por la falta de maquinaria, materia prima y cultura de innovación, estos parámetros han provocado dichos perfiles no sean utilizados en el Ecuador; siendo la falta de tecnología uno de los principales problemas, para obtener perfiles I de material compuesto.

Dado lo anterior, el Grupo de Investigación en Diseño, Simulación y Manufactura (**GIDSIM**) proponen, a través de la presente investigación, el diseño y construcción de un sistema para realizar el proceso de pultrusión del material compuesto para obtener perfiles tipo I.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar un sistema de arrastre y corte para un equipo de pultrusión para la obtención de perfiles en “I” de materiales compuestos.

Objetivos específicos

- Investigar diferentes mecanismos de arrastre y corte que se utilicen en procesos de pultrusión a nivel nacional e internacional.
- Diseñar cada una de las partes y estructuras mecánicas involucradas en el sistema de arrastre y corte.
- Construir el sistema de arrastre y corte a través del ensamblaje de las piezas mecánicas, equipos adicionales y elementos para el montaje.
- Validar el correcto funcionamiento del sistema de arrastre y corte mediante la ejecución de pruebas de funcionalidad.

Justificación

Debido a la amplia utilización de perfiles I se hace relevante generar investigaciones asociadas al proceso de producción de los mismos utilizando materiales compuestos. En primer lugar, desde el punto de vista económico es considerable el ahorro (alrededor del 80%) al comparar los perfiles de materiales compuestos con perfiles de aluminio convencional. Otro aspecto a tomar en cuenta es el elevado costo, debido a la importación de las máquinas que realizan el proceso de pultrusión.

Por otra parte, en el ámbito académico se desarrollaría un equipo que pueda ser útil en los laboratorios de la carrera de Ingeniería Mecatrónica para la realización de prácticas académicas y formación en esta área.

Así mismo en el aspecto de la investigación y mejoras de procesos, se haría un gran aporte, ya que hasta el momento son muy pocas las investigaciones que se han llevado a cabo en el Ecuador relacionadas a este tema; y debido a que es un campo tan amplio surge la posibilidad de dar continuidad al desarrollo de trabajos en esta área que beneficiaría a diferentes sectores del país, incentivando el cambio de la matriz productiva.

La construcción de una máquina de pultrusión facilitará la obtención y experimentación del perfil I, y a su vez innovar este proceso poco conocido en el país y permitirá la investigación de nuevos aditivos que mejoren los materiales compuestos y la creación de nuevos perfiles aplicativos en el medio de la arquitectura, construcción y procesos industriales.

Alcance

Se diseñará un sistema de arrastre y corte para la obtención de perfiles tipo “I” de material compuesto de fibra de vidrio y resina poliéster que tendrán un metro de largo y las dimensiones de la sección transversal establecidas de acuerdo a la normativa de perfiles tipo “I” de aluminio. Dicho sistema tendrá bajo nivel de automatización, una vez construido y ensamblado con los demás equipos se procederá a realizar pruebas con el material compuesto designado, que demuestren la validez de los resultados obtenidos.

CAPÍTULO 2

MARCO REFERENCIAL

2.1.Marco del estado actual

La producción europea de GRP (Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio) a través de la industria de la pultrusión es de aproximadamente el 5%, pero su incremento ha sido constante en los últimos años, además, se pronostica un futuro positivo a largo plazo para la pultrusión en América del Norte, que representa un 3% adicional en el mercado mundial de compuestos y que estimó un valor de \$ 790 millones en 2016 [2].

Un costo de inversión inicial elevado, el inconveniente para la fabricación de diseños complejos y el desconocimiento de las ventajas de los compuestos pultruidos son los principales retos que la industria pretende mejorar, para ello se requieren fusiones que ayuden a destacar su efectividad y potencialidad frente a otras industrias. Estas fusiones se basan en investigaciones realizadas por diversos personajes que buscan optimizar el proceso y la inversión, además de brindar mejores características al compuesto, a continuación, se resumen algunas de ellas:

2.1.1. A nivel mundial

González M. (2014) elaboró láminas con resina poliéster, fibras de vidrio tipo E, como cargas usó carbonato de calcio con un grado de pureza mínimo de 98,5% y como iniciador peróxido de metil-etil-cetona (MEK) obteniendo un compuesto de Fibra de vidrio-Poliéster-CaCO₃, posteriormente realizó probetas para ensayos de tensión, flexión y de impacto cuyo resultado mostró que las propiedades mecánicas mejoraron, pues, las cargas perfeccionan la rigidez de la matriz sin afectar la elongación a la rotura del compuesto, pero la cantidad de carbonato de calcio disminuye ligeramente la resistencia al impacto y la deflexión a la rotura [3].

Baran I., Tutum C., Hattel J. y col. (2014) realizaron una simulación termoquímica para el proceso de pultrusión de una cuchilla compuesta NACA0018, se enfocaron en simular la evolución de temperatura y grado de curado, utilizando esquemas de temperatura diferentes, Caso 1 (105,5-148,5-200 °C) y Caso 2 (171-188-188 °C) para velocidades de tracción diferentes (2,3-3 y 5 mm/s). El resultado muestra que la alta temperatura de las regiones cercanas a la superficie del dado calienta regiones próximas y produce reacción exotérmica en regiones internas, haciendo que la piel actúe como aislante para el núcleo, por ende, existe una reacción de cura autoacelerada [4].

2.1.2. A nivel regional

Beltrán P. y Parra J. (2014) rediseñaron una máquina de pultrusión para producción de perfiles tipo: varilla (12,7 mm de diámetro) y platina (25,4 x 5 mm), compuestos de 30% de resina Palatal CO40 y 70% de fibra de vidrio. Temas de Ingeniería Mecánica, desde la formulación de una propuesta hasta el diseño detallado del equipo con su respectiva simulación y un estudio financiero fueron necesarios, obteniendo como resultados el diseño final para una línea de producción que responde a las necesidades para la obtención de los perfiles antes mencionados y destacando que la fabricación de la máquina es más rentable que realizar una importación [5].

2.1.3. A nivel nacional

Sánchez E. y Jiménez J. (2017) diseñaron y construyeron un prototipo de máquina de pultrusión para obtener perfiles tipo “O” de material compuesto de fibra de vidrio y resina poliéster, se realizaron probetas para llevar a cabo pruebas de tracción, flexión y compresión, dando como resultados valores similares o por encima en comparación a otros procesos que fabrican materiales compuestos [1].

2.2.Marco conceptual

2.2.1. Materiales compuestos

Son aquellos que se encuentran formados por la combinación de diferentes materiales, ya sean orgánicos e inorgánicos, a través de un determinado proceso de fabricación, dichos materiales deben mantener un balance atómico entre ellos para que no pueda producirse alguna reacción desfavorable al momento de combinar, pues el propósito principal es obtener un producto con propiedades mecánicas especiales, que los materiales no proporcionan de manera individual.

Estos materiales compuestos se adaptan a diversas propiedades que son determinadas a través de sus componentes, en donde se debe tomar en cuenta varias consideraciones como: la proporción, distribución, morfología, grado de cristalinidad, estructura y la interacción entre los mismos. Por motivo de esta capacidad de adaptación los materiales compuestos se diseñan para satisfacer tecnologías relacionadas con las industrias aeroespacial, automotriz, electrónica, construcción, energía, biomédica y otras. Por ende, se puede afirmar que estos materiales conforman la mayor parte de los materiales de ingeniería comercial [6].

2.2.2. Clasificación

De acuerdo a las características que se pretenden conseguir en el compuesto final y en función a la naturaleza de la matriz se consideran tres diferentes compuestos:

Compuestos de matriz cerámica (CMC)

Estos materiales están formados por un refuerzo de fibras cortas que se incrustan en una matriz cerámica; presentan alta resistencia a la temperatura, al desgaste y a la corrosión.

Compuestos de matriz metálica (MMC)

Se forman con fibras que se incrustan en una matriz metálica de metales livianos; tienen algunos inconvenientes, como: baja rigidez y resistencia al desgaste y alto coeficiente de expansión térmica, su mayor intervención es en la industria automotriz.

Compuestos de matriz polimérica (PMC)

Consisten en plásticos reforzados con fibra (FRP); brindan buena rigidez, amortiguación y resistencia a la corrosión, y bajo coeficiente de expansión térmica [7]. Son una excelente opción cuando de empatar el peso y la resistencia se trata, esto quiere decir que el producto final que se obtiene al realizar la combinación, a pesar de poseer un peso ligero brinda una alta resistencia mecánica; además de otras propiedades que se obtienen dependiendo de los materiales base (tipo y cantidad) que integran el material compuesto, en la *tabla 1* se muestran sus propiedades:

Tabla 1: Propiedades de los materiales compuestos [8]

Características
1 Resistencia al impacto
2 Fuerza
3 Flexibilidad
4 Capacidad para transportar cargas
5 Rigidez al corte
6 Resistencia a la tensión
7 Resistencia a la corrosión
8 Baja densidad

2.2.3. Composición

Los materiales base que conforman el material compuesto cumplen diferentes funciones y son esenciales para establecer las características del producto final, estos son matriz polimérica y fibras de refuerzo.

Matriz polimérica

Se trata de una resina termoendurecible que aporta resistencia a la corrosión, se encarga de dar forma y unir las fibras de refuerzo para transferir la carga hacia y entre ellas (dependiendo de la orientación del refuerzo) protegiéndolas del entorno y su manipulación. Los dos tipos de resinas que se utilizan con mayor frecuencia son las termoestables y las termoplásticas, siendo las primeras las que predominan en la industria [9].

Resinas termoestables

Son resinas que al calentarlas se ablandan y se puede dar la forma que se desee mediante presión, no pueden volver a calentarse, pues, estas en lugar de ablandarse nuevamente se rompen, es decir no se reciclan. Para realizar la producción de materiales compuestos con este tipo de resina es necesario el uso de agentes de curado y la fibra de refuerzo elegida. A continuación, en la *tabla 2* se muestran las propiedades que brindan algunas resinas de este tipo:

Tabla 2: Propiedades de algunas resinas termoestables [10]

Resina	Densidad (g/cm³)	Resistencia a la tracción (MPa)	Temperatura de deflexión térmica (HDT) (°C)	Contracción de curado (%)	Temperatura de transición vítrea (°C)
Epóxica	1,2-1,3	55-130	48	1-5	100-270
Poliéster	1,1-1,43	34,5-103,5	60-205	1,4-2,1	70-120
Viniléster	1,12-1,32	73-81	93-135	5,4-10,3	102-150
Fenólica	1,00-1,25	30-50	165-175	0,19-0,36	260
Poliimida (PMR-15)	1,32	38,6	260	0,4-0,6	320-330
Poliuretano	1,1-1,5	1-69	50-205	0,80-0,81	135

Los polímeros que tienen mayor intervención en la industria de los compuestos son la resina epóxica y poliéster, a continuación, se explica de mejor manera las razones por las que su uso es común en este ámbito:

Epóxica

Este grupo se caracterizan por poseer un peso molecular bajo. El ingrediente principal que se combina con esta resina es un agente de curado o un catalizador, la función que cumple este aditivo es realizar el curado correcto, esto quiere decir que contribuye a que se puedan obtener buenas propiedades mecánicas y térmicas, alta resistencia a los productos químicos y a la corrosión, todo esto con el menor porcentaje de contracción. No obstante, presenta un inconveniente, pues si se compara con la resina poliéster su costo es más alto [10].

Poliéster

También conocida como resina de fibra de vidrio. Su uso en la industria es muy elevado, pues posee buenas propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión, bajo peso y más que nada muy

económica de adquirir. La temperatura de transición vítrea de esta resina está entre los 70 a 120 °C, que es la más baja entre las demás resinas [10].

Resinas termoplásticas

Es una resina que a diferencia de las resinas termoestables estas pueden recalentarse y reformarse cuantas veces sea necesario, el uso de este tipo de resinas en la industria es muy bajo debido a que el tiempo de enfriamiento afecta el grado de cristalinidad del termoplástico, por ende, las cadenas de polímeros necesitan el mayor tiempo posible para organizarse en el patrón ordenado del estado cristalino [11]. Las propiedades que presentan algunas resinas de este tipo se muestra en la *tabla 3*:

Tabla 3: Propiedades de algunas resinas termoplásticas [10]

Resina	Densidad (g/cm³)	Resistencia a la tracción (MPa)	Temperatura de deflexión térmica (HDT) (°C)	Contracción de curado (%)	Temperatura de transición vítrea (°C)
Acilonitrilo-butadieno-estireno, moldeado	0,88-3,5	24,1-73,1	65-220	0,4-0,7	105-109
Poliestireno	1,02-1,18	17,9-60,7	62-98	0,35-0,56	83-100
Nylon (PA6)	1,12-1,14	41-166	68-85	0,84-1,9	131
Policarbonato moldeado	0,95-1,51	46,1-93,1	78-187	0,46-0,76	143-152
Polisulfona	1,37-1,48	60-131	172-213	0,7-1	190
Polietileno, HDPE (relleno de vidrio)	0,94-1,53	20-37	51,7-127	0,35-1,4	-80

Fibras de refuerzo

Se caracterizan por ser fibras de origen orgánico o inorgánico, cumplen la función de aportar rigidez y resistencia para soportar cargas en dirección a la cual se encuentren e intervienen impregnándose en la matriz polimérica; dependiendo de las propiedades requeridas que se pretendan obtener, la aplicación y proceso de fabricación se procede a elegir la forma de refuerzo apropiada.

Forma y Tamaño

Como se observa en la *figura 1* las fibras pueden presentarse en varias formas de acuerdo al uso que se les vaya a dar, por ejemplo, las fibras largas unidireccionales son excelentes para procesos como el bobinado de filamentos y la pultrusión.

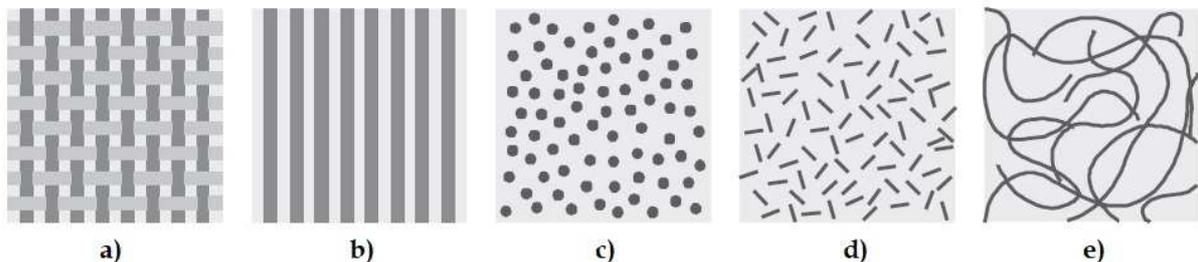


Figura 1: Representación esquemática de compuestos reforzados con fibras en forma de: a) estera, b) fibras continuas unidireccionales, c) partículas, d) fibras cortas (o bigotes de 30 mm de largo) y e) fibras largas multidireccionales [12]

Las fibras más comunes poseen diámetros que se encuentran en el rango de 10 a 150 micrones [13]. Con frecuencia las fibras tienden a fracturarse por defectos superficiales, para contrarrestar esto se las fabrican con diámetros pequeños que tienen menos área superficial y por ende los defectos que pueden transferirse en el proceso o cuando están sometidas a carga se reducen, como se observa en la *figura 2*:

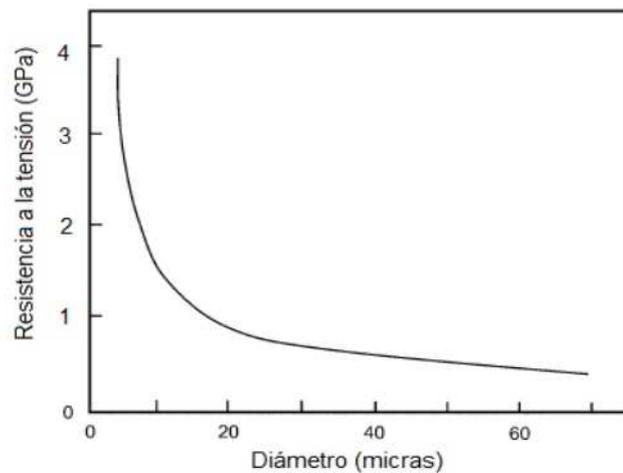


Figura 2: Efecto en la resistencia de las fibras de vidrio en función al diámetro [3]

Además, es importante resaltar que las fibras largas son las más adecuadas debido a que sus extremos resisten menos carga que lo restante de esta, es decir a menor número de extremos mayor capacidad para resistir cargas como se muestra en la figura 3:

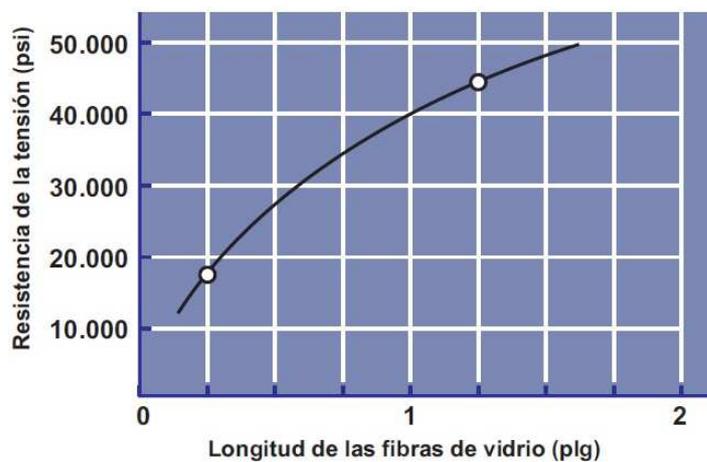


Figura 3: Relación longitud-resistencia de fibra de vidrio E en una matriz epóxica [13]

Cantidad

Al poseer características intrínsecas su resistencia y rigidez aumentan considerablemente cuando se incrementa el volumen de fibras, no obstante, este no debe superar el 80% del total del

compuesto porque pierde su capacidad para transferir las cargas debido a que las fibras no quedan cubiertas totalmente por la matriz.

Orientación

Pueden trabajar de varias maneras, así por ejemplo las fibras cortas se incrustan con facilidad de manera aleatoria a la matriz dando al material una conducta isotrópica, por otra parte, las fibras largas o continuas (conocidas como capas de 0°) aportan propiedades anisotrópicas en dirección de las fibras, no obstante, al estar sometidas a cargas perpendiculares o que no tengan la misma dirección de las fibras como se puede apreciar en la *figura 4* su resistencia tiende a ser baja.

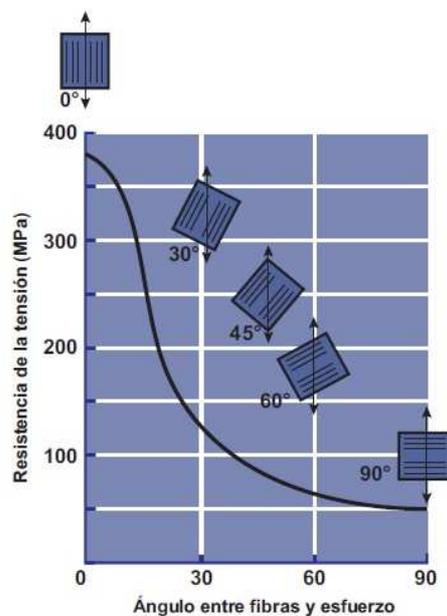


Figura 4: Efecto de la orientación de las fibras en la resistencia a la tensión de compuestos epóxicos reforzados con fibras de vidrio E [13].

Lo esencial de los compuestos reforzados es que se puede incluir en la matriz más de una capa de refuerzo y en diferentes ángulos como se observa en la *figura 5*, esto ayuda a que el compuesto final pueda soportar cargas en diferentes direcciones.

También se pueden trabajar con las fibras en patrones tridimensionales, esto se produce hasta en simples tejidos, pues existe cierto nivel de orientación en tercera dimensión en cada capa de tela, incluso si las capas de tela se encuentran cosidas o tejidas entre sí el resultado es mejor, obteniendo un mayor refuerzo tridimensional [13].

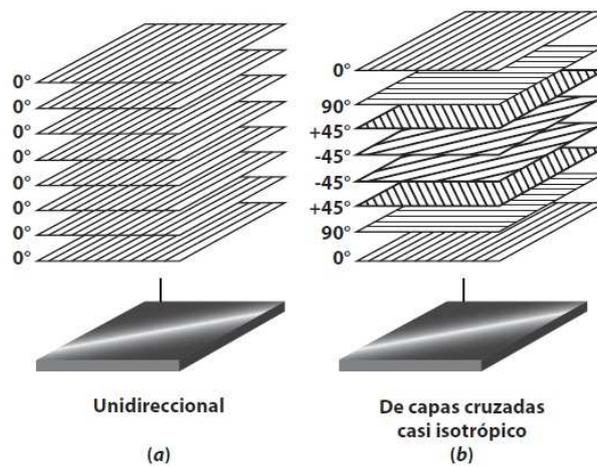


Figura 5: (a) Se pueden unir cintas que contienen fibras alineadas para producir una estructura compuesta unidireccional de varias capas. (b) Las cintas que contienen fibras alineadas se pueden unir con diferentes orientaciones para producir un compuesto casi isotrópico. En este caso, se forma un compuesto $0^\circ/\pm 45^\circ/90^\circ$ [13].

Tipos

En la industria se utilizan tres tipos básicos de fibra, estas son: vidrio, carbono, arámida y boro, de las cuales la primera es la más utilizada debido a que posee buenas propiedades mecánicas y se puede adquirir a un bajo costo [9]. Para realizar su correcta selección se deben conocer las propiedades de las mismas, a continuación, en la *tabla 4* se muestran las propiedades de algunas de ellas:

Tabla 4: Propiedades de algunas fibras de refuerzo [10]

Fibra	Densidad (g/cm³)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de tracción (GPa)	Alargamiento a la rotura (%)
Vidrio E	2,54	3450	72	4,5
Vidrio S	2,49	4300	87	5,3
Carbono (HT)	1,8	5000	250	1,6
Arámida (Kevlar 49)	1,44	3600	131	2,8
Boro	2,6	3500	400	0,8

Algunas de las fibras que tienen mayor intervención en la industria de los compuestos se explican a continuación:

Fibra de vidrio

Es un material de origen amorfo y es el refuerzo que se utiliza con mayor frecuencia en los PMC (Compuestos de Matriz Polimérica), debido a que implican una alta resistencia y a un bajo costo. Son fibras que pueden utilizarse de dos maneras: como fibras largas continuas y como fibras cortas.

Sin embargo, presenta ciertos inconvenientes como poca resistencia a la abrasión, poca adhesión a la matriz polimérica y tendencia a absorber la humedad. Para solucionar dichos inconvenientes se utilizan agentes de acoplamiento, por ejemplo, silanos [14]. Estas fibras se fabrican utilizando vidrios de diferente tipo, siendo el grupo E los que predomina en la industria del PMC, pues presentan buenas características mecánicas y eléctricas y lo que es más beneficioso, a un bajo costo.

Fibra de carbono/grafito

Es conocida también como fibra de grafito, esta fibra se caracteriza por su alta resistencia y rigidez que pueden variar de acuerdo al precursor químico utilizado, por las propiedades ya mencionadas es que tienen mucha participación en el ámbito estructural y eléctrico.

Este tipo de fibra se fabrica calentando, oxidando y carbonizando fibras poliméricas de poliacrilonitrilo (PAN) u otros precursores, como el rayón y la brea de petróleo, pero la fibra que se utiliza con mayor frecuencia en la industria de los compuestos es la basada en PAN [15].

Fibra de arámida

Este tipo de fibra tiene varias propiedades que la hacen especial, como alta resistencia a la tracción y módulo de elasticidad, estabilidad térmica y dimensional, rendimiento de flexión, procesabilidad textil y resistencia a químicos. El material del cual están hechas estas fibras son las poliamidas aromáticas [14]. A pesar de poseer buenas propiedades también tienen un inconveniente, pues son difíciles de mecanizar.

Fibra de boro

Son fibras cuyo diámetro varía entre 0,1 a 0,2 mm y son fabricadas por deposición química de vapor, en este proceso se utiliza un alambre de tungsteno fino o un filamento de grafito como núcleo y el gas tricloruro de boro como fuente de boro. Tienen baja densidad, alta resistencia a la tracción y alto módulo de elasticidad [10].

Estas fibras no son fáciles de tejer, trenzar o retorcer a razón de su alta rigidez, por este motivo solamente pueden fabricarse en forma de cinta para impregnación de resina y como filamentos para bobinar, además presenta una mayor desventaja que es su alto costo.

Después de haber destacado que la selección de los materiales base son la clave principal para la fabricación de materiales compuestos también es necesario resaltar el uso de aditivos y recubrimientos que contribuyen a mejorar la calidad y el proceso de fabricación del compuesto, para entender de mejor manera cuál es la función de cada una de las sustancias que se pueden utilizar en conjunto con la resina o como paso inicial se explica a continuación algunos de ellas:

Cargas

Antes de empezar es necesario mencionar que las cantidades correctas de estas sustancias dependen de las características de la resina, por lo tanto, se aconseja tomar en cuenta las recomendaciones del fabricante para evitar reducir sus propiedades físicas y mecánicas, en este grupo se conocen dos tipos de cargas que cumplen funciones diferentes durante el proceso, estas son:

Cargas reforzantes

Ayudan a mejorar la distribución de posibles aglomeraciones de tensiones y a reducir el peso total del compuesto, aquí se destacan las microesferas de vidrio que se pueden utilizar en porcentajes altos.

Cargas no reforzantes

Su origen es mineral y se utilizan para disminuir el costo total del material compuesto sin afectar sus propiedades finales, en este grupo se encuentran el carbonato de calcio, silicato de magnesio hidratado y cristalina.

Aditivos

Son elementos extra que son añadidos a la resina en cantidades muy pequeñas y que se utilizan para proporcionar o mejorar características al material compuesto, además contribuyen a que los materiales que intervienen en el proceso puedan adaptarse en la fase de moldeo y mejorar el acabado del producto final. Algunos de estos aditivos son los siguientes:

- **Sistemas catalíticos:** son importantes para realizar el curado de la resina, en este grupo se encuentran el inhibidor, el endurecedor, los estabilizantes térmicos y los antioxidantes.
- **Lubrificantes:** existen dos tipos, internos y externos. Los internos son capaces de alterar las fuerzas de cohesión intermolecular de la resina, esto ayuda mucho en el proceso debido a que su viscosidad disminuye. Los externos, llamados también agentes de desmoldeo, estos salen a la superficie de la resina cuando se está llevando a cabo el proceso de moldeo evitando que la resina se adhiera al molde.
- **Agentes tixotrópicos:** estos ayudan a que la resina no se escurra cuando vaya a trabajar de manera vertical o inclinada. Aquí se destaca el polvo de sílice.
- **Colorantes:** estas sustancias se pueden disolver en solventes orgánicos o agua. Son muy poco utilizadas debido a no presentan buenas propiedades químicas y térmicas.
- **Pigmentos:** se tratan de sustancias sólidas que actúan como colorante y pueden ser de origen mineral u orgánico.
- **Agente anti-ultravioleta:** brindan protección ante los efectos de los rayos UV cuando el material será destinado a trabajar en exteriores.
- **Agentes anti-retracción:** tienen el efecto de contribuir a la mejora de la superficie del producto final, estos se utilizan cuando se trabaja en moldeo en caliente.

Recubrimientos

Es una barrera que se encarga de proteger al material compuesto de los efectos químicos, del medio ambiente y del contacto con otras superficies. En este grupo se destaca el gelcoat, también conocido como gel de recubrimiento.

Gelcoat

Se utiliza aplicando una capa sobre el molde, esto permite cubrir mejor las fibras de refuerzo y así cuando el material salga servir como defensa contra agentes del exterior, aumentando el tiempo de vida del material y le mostrando una mejor apariencia. Además, brinda otras propiedades como color y brillo, (si se desea puede ser transparente) y resistencia a la abrasión, sin rastros de porosidad.

Este gel se forma a partir de resinas a las cuales se les añaden pigmentos y aditivos en suspensión, se distinguen por: sus colores y su viscosidad. Los gelcoats para moldes brindan una baja contracción, alta flexibilidad y resistencia a la abrasión y al rayado superficial en valores más elevados que los gelcoats utilizados para piezas [16].

2.2.4. Ventajas y desventajas de los materiales compuestos

Una mayor resistencia y la capacidad de adaptarse a las necesidades del producto final son motivos suficientes para elegir los materiales compuestos por encima de los materiales tradicionales, y no sólo eso, sino que mientras va avanzando el tiempo los materiales compuestos están siendo usados con mayor frecuencia y esto contribuye a mejorar los costos, el diseño, los procesos de fabricación y más que nada tener mayor información sobre sus propiedades.

Sin embargo, siempre es necesario destacar los pros y contras que presentan estos materiales, a continuación, en la *tabla 5*, se enlistan algunos de ellos:

Tabla 5: Ventajas y desventajas de los materiales compuestos [17]

	Ventajas	Desventajas
1	Elevada relación entre la resistencia y el peso	Técnicas de inspección difíciles de realizar, principalmente detección de delaminación
2	Buena distribución de tensión de fibra a fibra mediante enlaces químicos	Equipo de procesamiento costoso
3	Módulo (relación rigidez / densidad) 3,5 a 5 veces mayor que el acero o aluminio	No es posible reciclar
4	Mayor resistencia a la corrosión y vida útil que los metales	Gran variedad de materiales, procesos y técnicas
5	Resistencia a la tracción 4 a 6 veces mayor que el acero o el aluminio	Con frecuencia los productos son tóxicos y peligrosos

2.2.5. Métodos para la fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica

En los últimos años la fabricación de materiales poliméricos junto con el desarrollo de nuevas tecnologías ha contribuido de manera radical en la industria de los materiales compuestos. Actualmente existen varios procesos para realizar la producción de FRP (Plásticos Reforzados con fibra) y de igual manera se siguen considerando nuevos métodos de fabricación, principalmente en la fase de impregnación de resina que es en donde se utilizan métodos tradicionales y en donde se necesita mejorar para satisfacer los requisitos de rendimiento que cada vez son mayores.

Para tener mejor conocimiento de los métodos más comunes que se utilizan en la fabricación de materiales compuestos en la *tabla 6* se resume algunos de ellos:

Tabla 6: Métodos más comunes para la fabricación de materiales compuestos [10]

Método aplicado	Resumen	Ventajas	Desventajas
Colocación manual (Hand Layup)	Se trabaja con un molde abierto sobre el cual se coloca una capa de gel, después la fibra de refuerzo para posteriormente verter la resina sobre esta y con un rodillo ayudar a su impregnación, se repite el mismo proceso hasta cubrir cada espacio del molde.	<ul style="list-style-type: none"> - Proceso simple - Bajo nivel de habilidad para el trabajo - Bajo costo 	<ul style="list-style-type: none"> - Producción lenta - Presencia de muchas burbujas - Bajo volumen de fibras - Poca adhesión entre las fibras - Susceptible a sustancias volátiles
Moldeo por bolsa de vacío	Se trata del mismo proceso que el anterior, pero en este se utiliza un sistema de vacío, para llevarse a cabo es necesario colocar tres capas sobre el material pre-impregnado y después la bolsa de vacío y cuando ya todo esté sellado se procede a realizar el vaciado.	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor volumen de fibras - Mejor humectación de fibras - Mejor adherencia entre las capas - Bajo contenido de burbujas 	<ul style="list-style-type: none"> - Bolsas de vacío caras y desechables - Presencia de arruga - Pérdida del sellado - Mayor nivel de habilidad para el trabajo
Moldeo por bolsa a presión	Se repite el primer método, después se coloca una bolsa flexible que cubre al material pre-impregnado y se aplica presión (con aire comprimido o agua). Una mejora de este proceso es el uso de autoclaves, pues trabaja a altas temperaturas lo que permite mejorar la reacción de curado.	<ul style="list-style-type: none"> - Mejor compactación - Mejor humectación de fibras - Reducción de presencia de burbujas 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto costo en equipos y herramientas - Para aplicaciones de alta gama - Alta habilidad para el trabajo - El tamaño del molde está limitado por el tamaño del autoclave
Devanado de filamentos	Se trata de un mandril giratorio en el cual en patrones preestablecidos se enrollan fibras de refuerzo que han pasado por un baño de resina, después de esto se retira y se pasa por un horno para realizar el curado.	<ul style="list-style-type: none"> - Desmoldeo simple - Excelente para fabricación de piezas con simetría rotacional 	<ul style="list-style-type: none"> - Alto contenido de burbujas - Rotura de las fibras - Costo elevado en herramientas - Variedad limitada
Moldeo por transferencia de resina (RTM)	Se trabaja con un molde cerrado que contiene respiraderos y que consta de dos partes: la parte inferior donde se colocan las fibras, y la parte superior que es encargada de cerrar el molde, ya listo todo se procede a la inyección de resina en el molde calentado a través de un equipo de mezcla dosificado. Si se quiere obtener un mejor acabado se debe aplicar una capa de gel en el molde.	<ul style="list-style-type: none"> - Alto volumen de fibra - Reducción de presencia de burbujas - Superficie moldeada en ambos lados 	<ul style="list-style-type: none"> - Para la fabricación de formas complejas se usan preformas - Desviaciones de flujo de resina - Inadecuada distribución de resina - Uso de herramientas pesadas y costosas
Moldeo por transferencia de resina asistido por vacío (VARTM)	Se trabaja con la parte inferior del molde sobre el cual se coloca la preforma, una lámina flexible y la bolsa de vacío, después se inyecta la resina para posteriormente sellar todo y proceder con el vaciado entre la preforma y la lámina esto ayuda a que se elimine todo el aire atrapado.	<ul style="list-style-type: none"> - Mejor impregnación y transferencia de resina - Mayor volumen de fibra - Mejor adhesión entre las fibras - Menor tiempo de llenado del molde 	<ul style="list-style-type: none"> - Pérdida del sellado - Formación de manchas secas - Posible formación de arrugas - El acabado se produce en un solo lado

Moldeo por compresión	Este proceso se realiza con dos moldes metálicos calientes acoplados a una prensa, la preforma se coloca sobre el molde inferior y se procede a unir los moldes hasta que queden bien acoplados, en este caso el curado se produce por la presencia de presión y temperatura.	<ul style="list-style-type: none"> - Proceso simple - Ciclo de moldeo rápido - Moldeo de piezas con formas complejas 	<ul style="list-style-type: none"> - Las líneas de separación desiguales en el diseño del molde pueden generar problemas - No es adecuado para moldes con características frágiles - Posible aparición de burbujas
Moldeo por inyección de reacción estructural (SRIM)	Se trata de colocar una esterilla de fibra de vidrio en el molde de producción, después se procede a la inyección de resina en el molde hasta cubrir cada espacio de la esterilla.	<ul style="list-style-type: none"> - Producción de gran variedad de piezas estructurales - Fabricación de piezas con geometría compleja - Baja intervención de mano de obra 	<ul style="list-style-type: none"> - Aparición de burbujas - Absorción de humedad - Alto costo en equipos - Presencia de aire atrapado en el molde
Pultrusión	Consiste en halar mediante un sistema de tracción fibras continuas a través de un baño de resina que pasan por fases de preformado y formado, después a través de una matriz que se encuentra calentada a diferentes temperaturas (de manera ascendente), el proceso termina con el corte de perfil pultruído.	<ul style="list-style-type: none"> - Excelente relación resistencia-peso - Alta competencia ante perfiles metálicos (acero y aluminio) - Bajo contenido de burbujas - Superficie moldeada en ambos lados - Buena impregnación de resina 	<ul style="list-style-type: none"> - Sólo para fabricación de piezas con sección constante - Requieren curado adicional - Producción lenta - Alto costo para la compra o construcción de la máquina
Moldeo por inyección de reacción de espuma estructural	El proceso que se sigue es el mismo que el SRIM, se colocan las fibras largas de vidrio y la espuma de poliuretano, lo que lo diferencia es que aquí se agrega un agente de expansión al poliuretano, este ayuda a que pueda realizarse el proceso de curado.	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo peso (más que otros compuestos) - Baja intervención de mano de obra - Costo de funcionamiento bajo 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta inversión inicial - Generación de calor - Variación de la densidad en diferentes áreas

2.2.6. Pultrusión

Breve historia

La primera referencia del proceso se registró en una patente en 1951, con la mayoría del trabajo inicial atribuido a W. Brandt Goldsworthy en la década de 1950, quien efectuó gran parte del desarrollo del proceso y fabricó el equipo para producir elementos estructurales mediante esta técnica [18]. Durante sus primeros años de haber estado en práctica fue conocido como una técnica de producción comercial, esto debido a que solamente se fabricaba estructuras compuestas simples

(varillas), siendo la resina termoestable simple y las fibras longitudinales los materiales principales, proporcionando resistencia en dirección de las mismas y con una fuerza unidireccional.

Sin embargo, a mediados de la década de 1960 se produjo la necesidad de brindar una resistencia tridimensional, con esto se procedió a incluir capas de fibra en forma de estera o tela, ya sea en el interior del cuerpo o en la superficie de las formas estructurales, brindando el refuerzo y fortalezas multidireccionales. Además, en 1976 se impulsó la inclusión de formas estructurales personalizadas. Estos desarrollos, más la intervención de matrices de resina termoplástica, han llevado al proceso de pultrusión a la cima en los ámbitos aeroespaciales, de defensa y de aviación como un método económico [18].

Concepto

El proceso de pultrusión es un método empleado para realizar la producción continua de perfiles estructurales de material compuesto con sección transversal constante. Este proceso presenta una cierta relación con la extrusión (que trabaja mayormente con metales) debido a que implica obtener la forma del perfil mediante el uso de una matriz cerrada que se encuentra a cierta temperatura, a través de la cual pasan los materiales.

La diferencia que muestra la pultrusión es que, al trabajar con fibras de manera longitudinal, en lugar de empujar los materiales a través de la matriz calentada se puede emplear su resistencia para tirar de la forma pultruída, esto ayuda a que los elementos puedan pasar sin ningún problema por las fases de pre-formado, formado y curado, por esa diferencia es que se conoce con ese nombre.

Descripción de la máquina de pultrusión

La máquina de pultrusión está conformada principalmente por las estructuras base, que sirven de soporte para que los demás componentes de cada fase que ayudan a que el proceso pueda llevarse a cabo sean montados, a continuación, se describen las estructuras y dispositivos que intervienen en el proceso:

Armario

Se trata de una estructura rígida en forma de estantería que sirve para el almacenamiento de los carretes enrollados con hilos roving como muestra la *figura 6*, en su estructura presenta unas guías (orificios de cerámica) ubicadas de manera lineal con cierto intervalo de distancia y por encima de cada piso de carretes, estas guías ayudan a que las fibras puedan trasladarse a través de ellas sin enredarse y evitando que se desprendan unas con otras, pues pueden saturarse y formar bolas de pelusa que aumentan la viscosidad de la resina. En caso de no disponer con las guías de cerámica se pueden utilizar tubos de vinilo.

Los armarios de metal son más convenientes para esta aplicación, debido a que pueden ser conectados a tierra para disipar la carga estática producida por la fricción de las fibras.



Figura 6: Carretes con hilos roving ubicados en estanterías enumeradas que pasan a través de guías [19]

Tanque

Se refiere a una especie de tina que por lo general es de metal o aluminio, esta se observa en la *figura 7*, aquí se vierte la cantidad de mezcla (resina y aditivos) calculada para cubrir y realizar la saturación de resina sobre cada una de las fibras que pasan por allí. Para que las fibras puedan sumergirse correctamente es necesario el montaje de rodillos al inicio y base de la tina y para quitar el exceso de resina un rodillo a la salida.



Figura 7: Ingreso y salida de las fibras de refuerzo en el tanque con resina y demás aditivos [20]

Dados de pre-formado

Son un conjunto de guías que se encuentran separadas a cierta distancia una a otra y que se encargan de mantener la dirección correcta y realizar una compactación gradual previa de las fibras humedecidas antes de ingresar al molde caliente, con esto se logra obtener la forma más cercana a la del perfil final y evitar que se produzca una presión elevada cuando los refuerzos saturados ingresen a la matriz caliente, además, contribuyen a quitar el exceso de resina como se muestra en la *figura 8*.

Los materiales utilizados para fabricar el conjunto de guías son el teflón, polietileno de ultra alto peso molecular, acero cromado y otras aleaciones de acero [21].

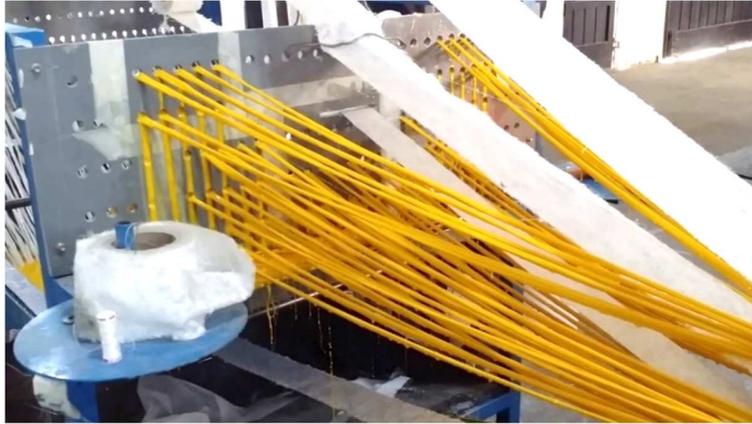


Figura 8: Sistema de pre-formado que también ayuda a quitar el exceso de resina [22]

Dados de formado

También conocido como molde cerrado o matriz caliente, fabricado con acero mecanizado o cerámica, su función es realizar la compactación final de los refuerzos saturados con resina y el curado (proceso de polimerización), cuando esto ocurre el perfil está listo para salir del molde con la forma adaptada en este y con las propiedades que se hayan determinado previamente con la selección de las materias primas. El dado presenta varias geometrías como muestra la *figura 9*:



Figura 9: Moldes de acero con diferentes geometrías para el proceso de pultrusión [23]

En la *figura 10* se puede apreciar un estudio preciso mediante la optimización de una curva de curado que ayuda a elegir las temperatura y dimensiones promedio adecuadas de cada zona calentada del molde para realizar un proceso de pultrusión exitoso [1].

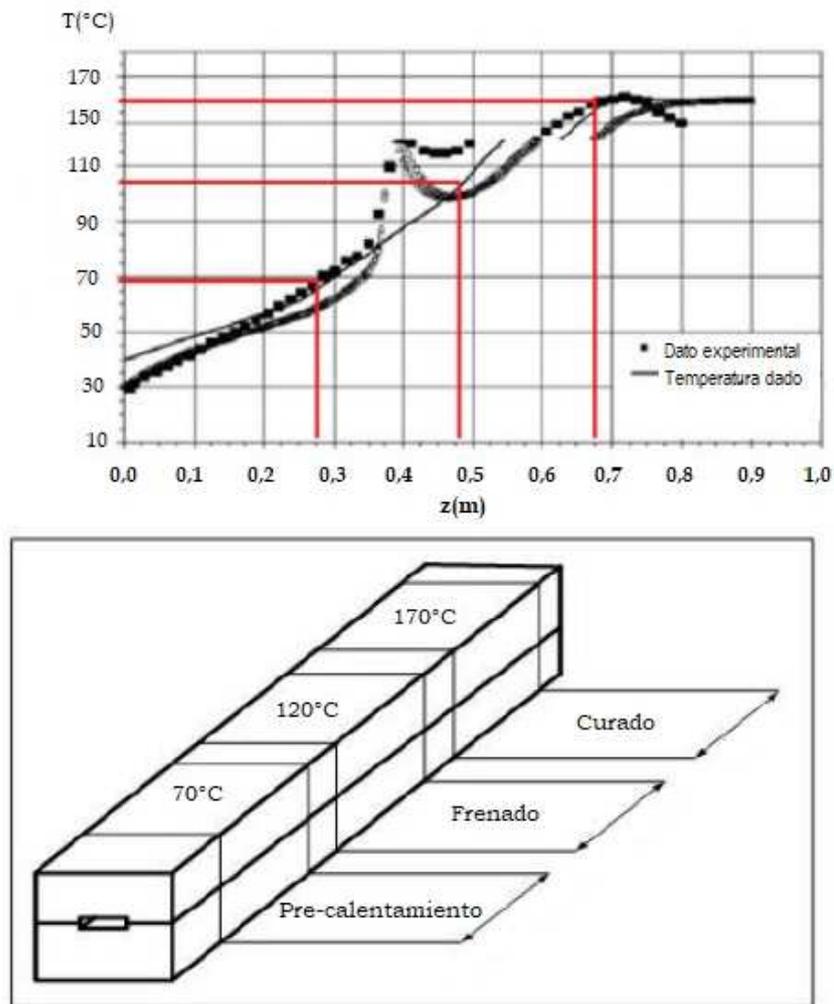


Figura 10: Curva de curado en el molde en función a su distancia y temperatura [1]

Para poder llevar a cabo la transferencia de calor hacia molde se trabaja con un conjunto de resistencias eléctricas, además, es conveniente destacar que el acabado del perfil depende de las características del molde.

Dispositivo de arrastre

Por lo general se encuentra ubicado a tres metros o más desde la salida del molde caliente, esto es necesario para que al llegar al sistema de tracción el producto pueda adquirir la resistencia necesaria para acoplarse al mismo y poder halar a través del molde sin ningún problema, casi todas las máquinas de pultrusión utilizan métodos de arrastre como rodillos, orugas o cilindros reciprocantes como muestra la *figura 11*.

El sistema por cilindros puede ser de dos tipos: En primera estancia serían los cilindros reciprocantes, en donde el primer extractor tira del perfil hasta llegar al límite máximo, y el segundo extractor continúa, a la vez el primer extractor regresa a su posición inicial. El segundo tipo es que ambos extractores tiran del compuesto al mismo tiempo y se retraen de igual manera a la posición original [24].



Figura 11: Cilindros reciprocantes que realizan el arrastre del perfil cuando sale del molde [25]

La velocidad de tracción depende de los siguientes factores:

- Tiempo y temperatura de curado de la resina
- El tipo de resina
- El tamaño y sección transversal que tenga el producto

Los rangos de velocidad que comúnmente se dan en las industrias varían entre 0,2 m/min y 0,4 m/min [1].

Dispositivo de corte

Aquí interviene el uso de una sierra eléctrica radial como se observa en la *figura 12*, esta se activa cuando se alcanza la longitud deseada del perfil, el radio de la sierra debe tener la medida correcta para realizar el corte, si es necesario se puede utilizar refrigerante.



Figura 12: Curva de curado en el molde en función a su distancia y temperatura [26].

Para realizar el corte con las debidas precauciones las máquinas cuentan con una cubierta, mordazas para fijar el perfil y un sistema de vacío para aspirar el polvo que se genera mientras se realiza el corte.

Disco abrasivo de corte

Los discos que se utilizan para realizar el corte del compuesto son de carburo de silicio o carburo de diamante debido a la naturaleza abrasiva del compuesto, este debe girar a una velocidad periférica de 2500 m/min, tener un espesor de dimensiones que varíen entre 0,8 y 4 mm aproximadamente y con una cantidad pequeña de dientes [27].

La relación existente entre el disco de corte y el material debe ser perpendicular, al formar un ángulo de 90° entre los dos componentes contribuye a que los dientes puedan insertarse correctamente al material a medida que avanza.

Es necesario contrastar que para realizar la fabricación de formas huecas se debe montar un mandril por encima del tanque de resina, este debe extenderse a través de los dados de pre-formado y de la sección de la matriz de formado como se observa en la *figura 13*.

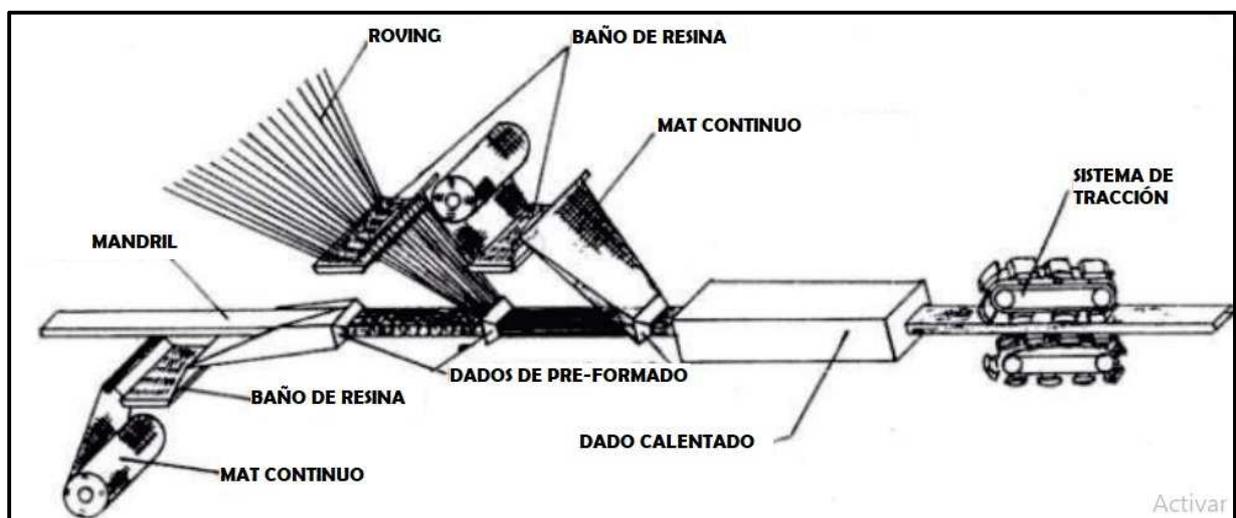


Figura 13: Representación esquemática del proceso de pultrusión para fabricación de formas huecas [21]

Descripción del proceso

Los pasos principales que se deben seguir para realizar la fabricación del material compuesto son los siguientes:

- **Primero:** ubicar las fibras de vidrio a lo largo de toda la máquina de pultrusión con mucho cuidado para evitar que puedan romperse, estas pasan a través de cada una de las estaciones que conforman la misma.
- **Segundo:** verter resina en el tanque para posteriormente ubicarse al final de las estaciones y tirar de las fibras que se encuentran enrolladas en varios carretes, estas pasan por un

conjunto de guías para mantener su dirección correcta sin que puedan enredarse o correr el riesgo de romperse a causa de la fricción.

- **Tercero:** las fibras pasan a través del tanque que contiene la mezcla (resina y aditivos) para proceder a su impregnación, por lo general la resina es de poliéster, pero también se puede trabajar con silicona y epoxi, el tanque debe tener el tamaño, forma y cantidad adecuada de la mezcla para que cada una de las hebras puedan ingresar y saturarse correctamente con la mezcla.
- **Cuarto:** las fibras saturadas atraviesan el conjunto de agujeros que se encuentran al salir del tanque, que tienen como función realizar el preformado de las fibras ya impregnadas con resina que se trasladan a través de estos, además ayudan a quitar el exceso de resina.
- **Quinto:** las fibras preformadas se dirigen hacia la matriz de acero cuya geometría dependerá de la sección transversal del perfil que se desee obtener, la temperatura del dado en esta parte es ascendente y conforme avancen las fibras el perfil irá tomando su forma. Tanto la gelificación como el curado de la resina se producen en esta parte del proceso debido al calor que se suministra a lo largo de todo el dado [28].
- **Sexto:** en inicios, cuando el perfil empieza a salir de la matriz caliente aún no presenta la geometría y resistencia que debería tener como se puede apreciar en la *figura 14*, pero a medida que se tira de las fibras va avanzando hasta obtener el perfil rígido curado y listo para ser halado por el dispositivo de tracción.



Figura 14: Primera salida del perfil pultruido [29]

- **Séptimo:** se realiza el primer corte del perfil (comúnmente con una sierra eléctrica) y por ende se deja de tirar de las fibras de refuerzo, ahora el halado a través de cada una de las estaciones de la máquina depende únicamente del sistema de arrastre. Después del primer corte que elimina la parte del perfil que aún no tenía su forma correcta se realizan los demás cortes con la longitud que se desee.

Mientras que el diseño de la máquina de pultrusión varía con la geometría de la pieza, el concepto básico del proceso de pultrusión se describe en la *figura 15*:

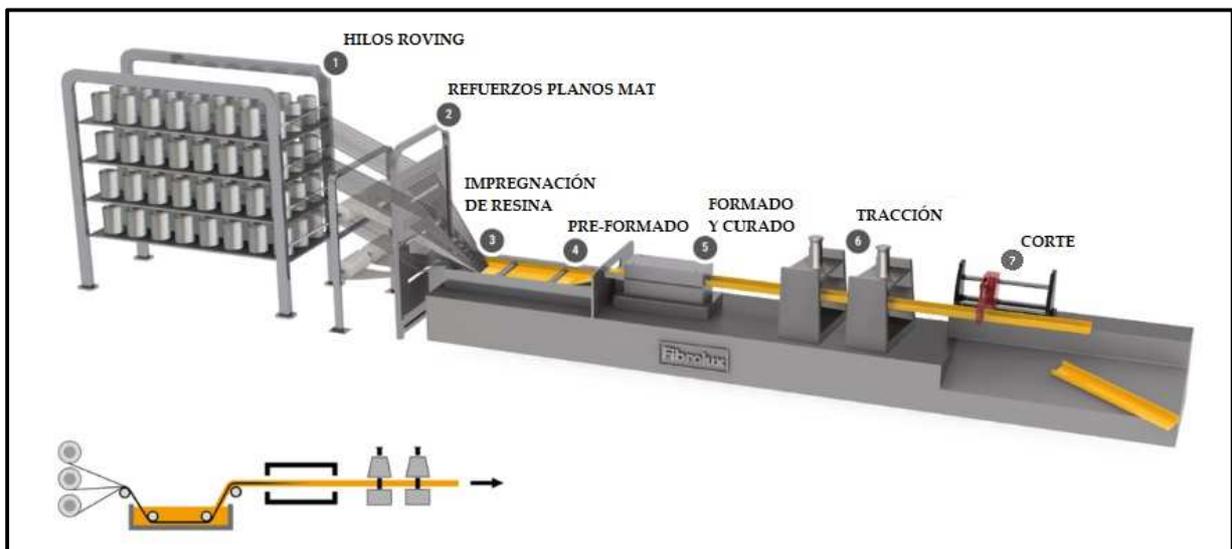


Figura 15: Representación esquemática del proceso de pultrusión [30]

Ventajas y desventajas

Con el proceso de pultrusión se llegan a obtener perfiles que contienen mayor cantidad de fibra de refuerzo que otros que se obtienen con otros procesos. El porcentaje en fibra en peso de estos perfiles está alrededor de 65-70% [31]. Entre algunas de sus ventajas se pueden enlistar las siguientes:

- Gran resistencia a la conductividad eléctrica (dieléctrico)
- Buena resistencia a la corrosión de la mayoría de productos existentes
- Excepcional comportamiento a la intemperie
- Absorción de agua casi nula
- No se deteriora ni pudre como la madera (no le afectan los microorganismos)
- Estabilidad frente a las radiaciones ultravioleta
- Fabricación de una amplia gama de colores (coloreada la totalidad de su masa)
- Se elimina el posterior mantenimiento que requieren las superficies pintadas
- Mayor relación esfuerzo/peso que las del aluminio y el acero
- Su peso llega a ser 2/3 del aluminio y 1/4 al del acero
- Mantiene sus propiedades mecánicas y eléctricas a altas temperaturas extremas (desde – 70 °C hasta 300 °C)
- Dimensionalmente estable (rigidez o flexibilidad a conveniencia)
- Altas resistencias mecánicas y al impacto (según la composición del refuerzo elegido)
- Puede fabricarse con elevada resistencia a la inflamabilidad, auto extingüibles y baja generación de humos no letales [31]

Sin embargo, como es normal en cualquier proceso también van de la mano algunos inconvenientes, a continuación, algunos de ellos:

- El principal inconveniente es su baja velocidad que en comparación con otros procesos es relativamente lenta
- La necesidad de maquinar un molde con acabados dimensionales perfectos y finos para no impedir el avance de la pieza en el proceso
- La necesidad de generar un sistema de calentamiento óptimo para proceso de pultrusión causa un incremento en el costo del proceso [5]

GLOSARIO

Temperatura de transición vítrea: es el punto intermedio de temperatura entre el estado fundido y el estado rígido del material.

Polímero: son macromoléculas compuestas por una o varias unidades químicas (monómeros) que se repiten a lo largo de toda una cadena, para entender mejor es como si se uniera con un hilo muchas monedas perforadas por el centro, al final se obtiene una cadena de monedas, en donde las monedas serían los monómeros y la cadena con las monedas sería el polímero.

Inhibidor: son sustancias que puede evitar la polimerización de monómeros y de resinas insaturadas.

Solvente orgánico: es la sustancia de uso corriente en las industrias para pegar, desengrasar, limpiar, plastificar, flexibilizar, pintar y lubricar superficies.

Precursor químico: es una sustancia indispensable o necesaria para producir otra mediante los compuestos químicos que constituyen una primera etapa en un proceso químico y que actúan como medio en las etapas posteriores.

Deposición química de vapor: es un proceso químico utilizado para producir productos de alta pureza y de alto rendimiento de materiales sólidos, más utilizado en la industria de semiconductores para producir películas delgadas

Aditivos en suspensión: que no llegan a disolverse en el líquido, incluso si se trata de partículas microscópicas.

Polimerización: consiste en la reacción de monómeros o moléculas individuales, para crear una macromolécula cuya configuración química, similar a la de una gran red tridimensional, confiere al producto pultrusionado su gran resistencia química.

Gelificación: es un proceso de transformación de una sustancia a una forma gelatinosa. Gracias a este proceso, las sustancias líquidas se convierten en sólidas con la ayuda de un agente gelificante.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

Este capítulo muestra cada una de las fases que fueron necesarias para realizar el diseño del sistema de arrastre y corte de la máquina de pultrusión, utilizando como herramientas principales el análisis funcional y el diseño concurrente, la primera obtiene las funciones que intervienen en el proceso para consecuentemente generar los módulos y la segunda es una técnica sistemática que pone a consideración dos o más posibles alternativas de solución para cada módulo, las mismas son expuestas considerando aspectos importantes como: requerimientos del cliente, situación actual del producto en el mercado frente a otros ya existentes, control de calidad y limitaciones físicas, económicas, ambientales y de producción para posteriormente proceder a la elección de la solución más favorable y finalmente realizar el diseño.

3.1. Fases

Se considera cuatro fases principales, estas contienen actividades base que son desglosadas de acuerdo a los objetivos planteados al inicio de este trabajo, de esta manera se espera su culminación de la mejor manera.

3.1.1. Fase 1: investigación

Se realiza la recopilación de información del proceso global que incluye los tres sistemas que constituyen a la máquina de pultrusión, realizando un enfoque principal en el sistema de arrastre y corte, el mismo que es de mayor interés en este caso.

- **Actividad 1:** “obtención de información acerca del proceso de pultrusión”: se realiza la búsqueda de información en fuentes bibliográficas digitales, como artículos, tesis, revistas, patentes y otros.

- **Actividad 2:** “evaluación del proceso en lugares donde exista la máquina”: se realiza la búsqueda de los contactos de las personas que fabricaron la máquina de pultrusión en la Escuela Superior Politécnica Nacional, pero no se obtiene ninguna respuesta de ellos, entonces se procede a obtener información del Director de tesis, Ing. Víctor Cárdenas que tiene mayor conocimiento sobre materiales compuestos y el proceso para la su obtención, en este caso la pultrusión.

3.1.2. Fase 2: diseño

Aplicando la metodología de Diseño Mecatrónico se determina la mejor solución para lo que será el proceso de arrastre y corte, se diseña la estructura del sistema y se determina los materiales a utilizar.

- **Actividad 1:** “planteamiento de las alternativas de solución”: se realiza un análisis funcional y modular, así como el QFD para determinar la solución más favorable, que se ajuste a las necesidades planteadas y que sea posible terminar a tiempo.
- **Actividad 2:** “determinación de los materiales”: después de haber seleccionado la mejor solución se procede a especificar el material de la estructura que tiene el trabajo de soportar todo el sistema y la elección de todos los componentes eléctricos, neumáticos, mecánicos y demás que van montados sobre este mediante cálculos.
- **Actividad 3:** “modelado de cada una de las piezas”: se realiza el diseño de cada una de las piezas usando la herramienta computacional SolidWorks, después el ensamblaje de cada sistema y finalmente de toda la máquina en sí, para ubicar cada sistema a la distancia establecida al momento de la construcción.

- **Actividad 4:** “ejecución del cálculo estructural”: se realizan cálculos de forma analítica de las partes del sistema que se consideran críticos, esto sirve como dato para realizar la validación con las simulaciones que se realizan en SolidWorks.

3.1.3. Fase 3: construcción

Después de tener el diseño terminado, la construcción de la máquina es el siguiente paso para poder verificar su correcto funcionamiento y proceder a realizar las pruebas.

- **Actividad 1:** “evaluación del proceso de manufactura de cada uno de los elementos”: se determina el proceso más eficiente (en tiempo, costo y calidad) para cada uno de los elementos que constituyen el sistema.
- **Actividad 2:** “obtención de los materiales”: se realiza un listado de todos los elementos eléctricos, mecánicos, neumáticos y demás que se utilizan al momento del ensamblaje, buscando contactos con proveedores que satisfagan las necesidades de calidad, tiempo y costo.
- **Actividad 3:** “ensamble de las partes y sistemas”: se procede a unir cada uno de los componentes acorde a la función que realizan, las partes eléctricas, mecánicas, neumáticas y demás para finalmente unir los tres sistemas que conforman la máquina.

3.1.4. Fase 4: validación

En esta parte se realizan pruebas experimentales de la máquina, así como del perfil pultruido para mostrar y analizar los resultados que se obtuvieron.

- **Actividad 1:** “pruebas de funcionamiento”: se realizan las pruebas en vacío de cada sistema para corregir errores individualmente, sólo después de haber comprobado su correcto funcionamiento se prosigue con las pruebas de toda la máquina.

- **Actividad 2:** “comparar los resultados con productos similares”: se realizan pruebas de resistencia del material del perfil pultruido, estos resultados permitirán verificar si los valores obtenidos son los esperados, esto mediante una comparación con materiales similares.

3.2. Análisis funcional y modular del proceso de pultrusión

Ya establecidas las fases metodológicas lo que sigue es desarrollar la segunda fase (diseño), que se considera la más importante en todo este proyecto.

3.2.1. Etapas

En esta parte es necesario resaltar que cada inicio y fin de las diferentes estaciones que conforman la máquina deben estar correctamente alineadas, de igual manera la estructura que sirve de base para montar todos los componentes se debe encontrar perfectamente nivelada. Todo el proceso de pultrusión se llevará a cabo en tres etapas (sistemas) que son las siguientes:

- Sistema para desenrollado e impregnación de los refuerzos de fibra
- Sistema de preformado-formado y curado
- Sistema de arrastre y corte

3.2.2. Análisis funcional

Esta herramienta se encarga de determina las funciones primarias y secundarias que intervienen en todo el proceso de pultrusión, trabaja con diagramas de flujo que empiezan desde un nivel 0 (entradas y salidas base) hasta el nivel que se crea conveniente, en este caso se llega hasta el nivel 2, detallando de mejor manera las funciones y señales que influyen durante todo el procedimiento de obtención del perfil pultruido y permitiendo obtener soluciones más precisas. A continuación, se indica los diagramas de flujo del análisis funcional:

Nivel 0

Se trata del nivel que sirve de base para los siguientes niveles, tiene solamente tres entradas y una sola salida como muestra la *figura 16*.



Figura 16: Diagrama análisis funcional nivel 0

Nivel 1

En este nivel aparecen nuevas funciones y señales del proceso como se observa en la *figura 17*, pero aún quedan otras funciones que se sobreentienden y no se muestran en el nivel 1.

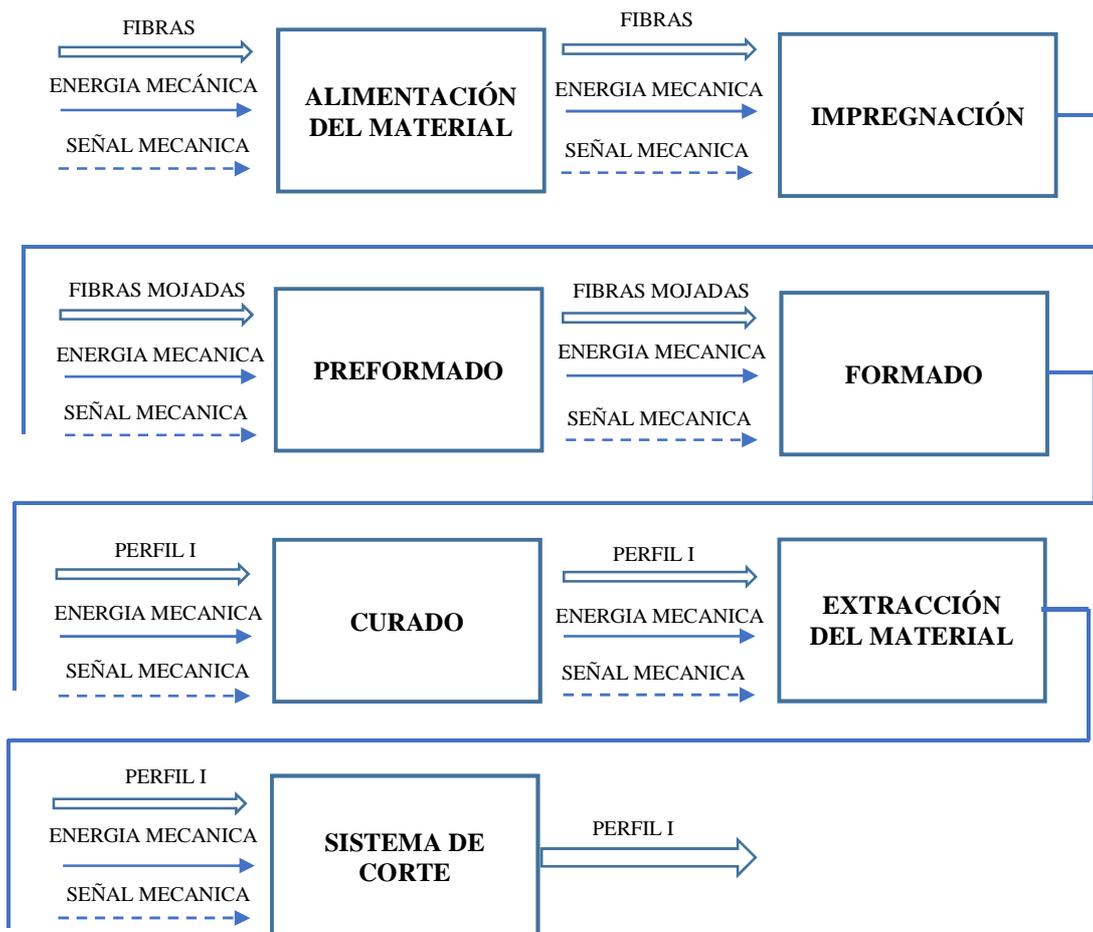
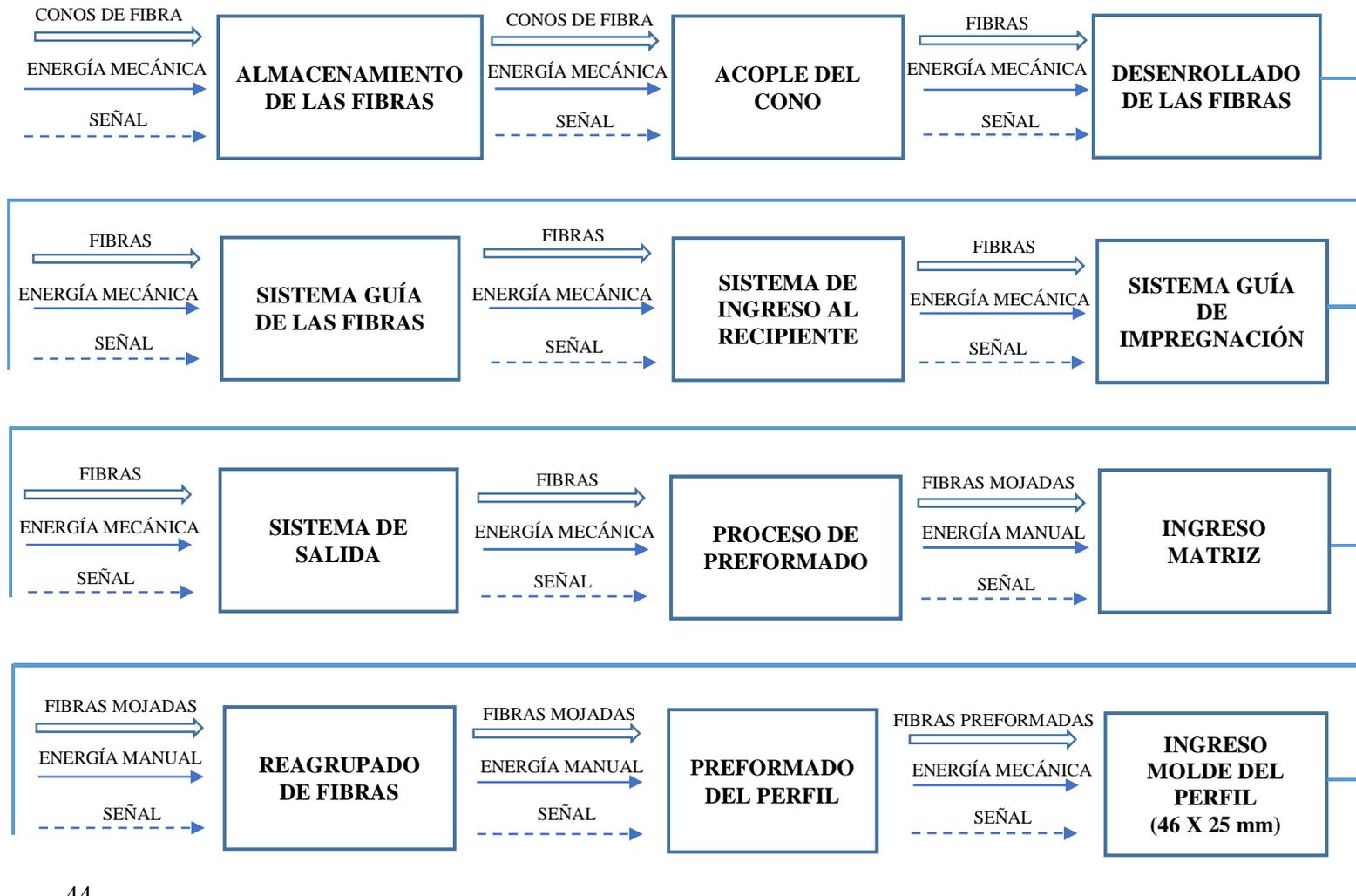


Figura 17: Diagrama análisis funcional nivel 1

Nivel 2

Es el nivel final, la *figura 18* muestra hasta la función más pequeña (que en muchos casos suele provocar problemas) para que cuando se proceda a generar los respectivos módulos estos empenen de una forma conveniente.



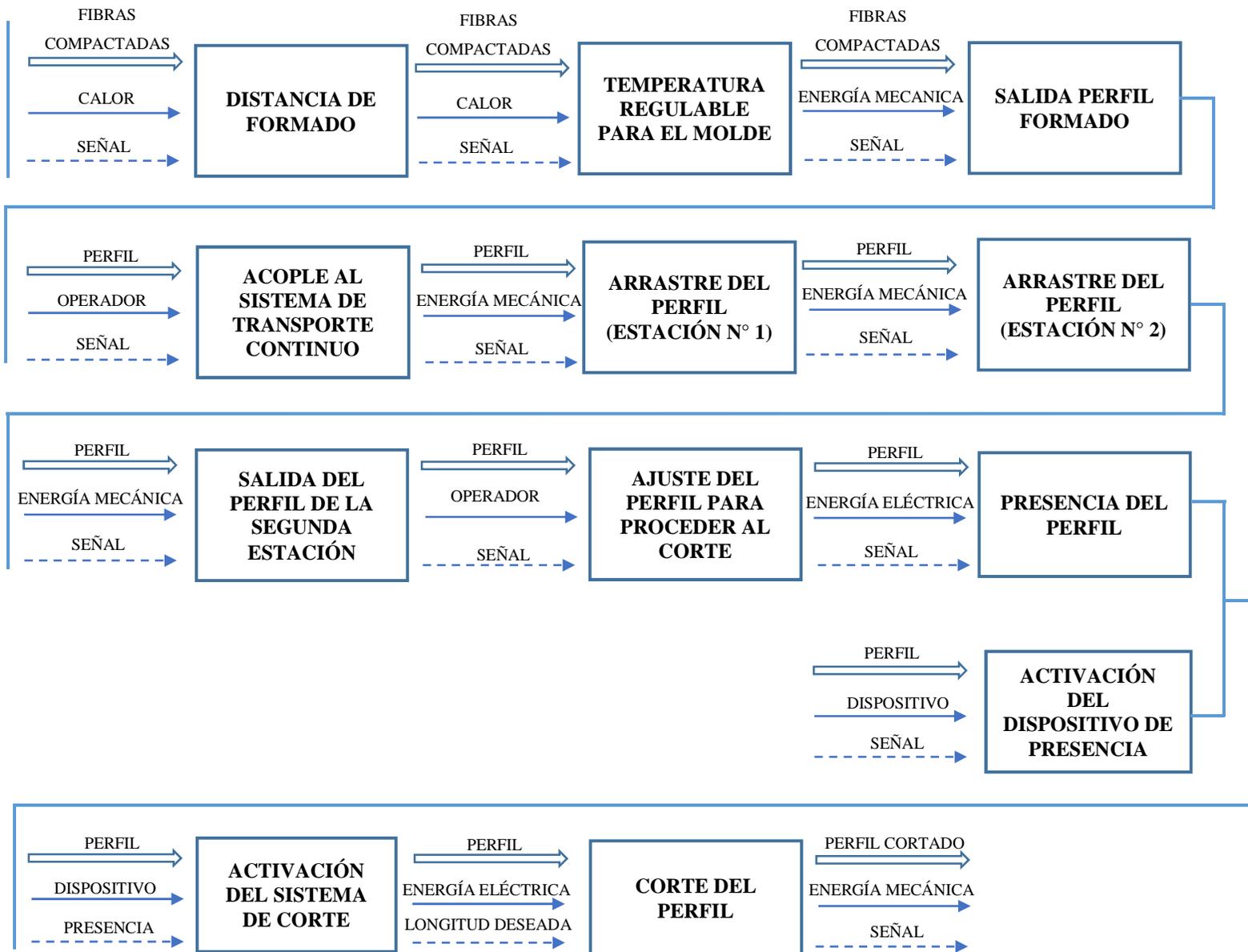
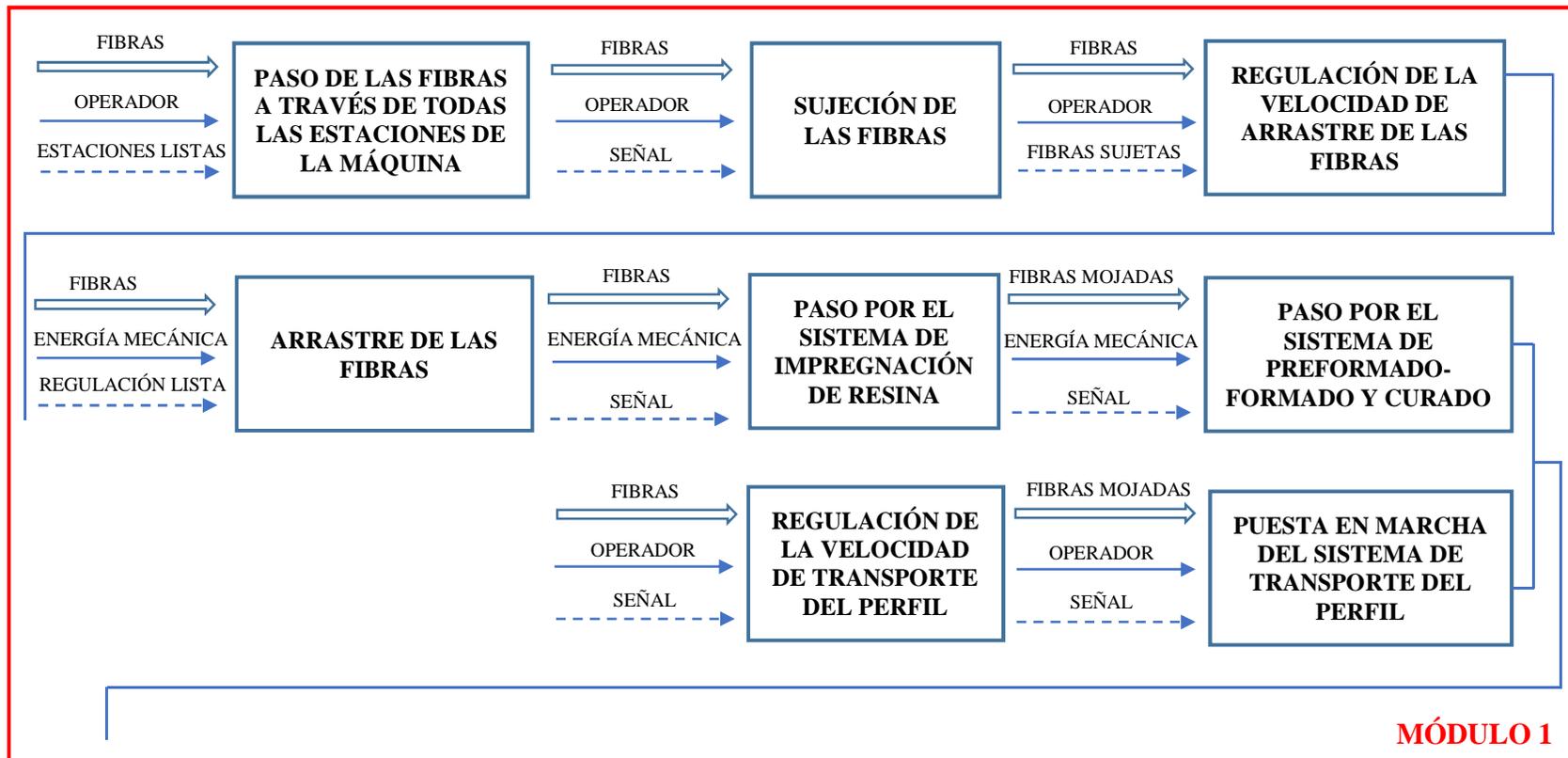


Figura 18: Diagrama análisis funcional nivel 2

3.2.3. Análisis modular

Etapa 3: Sistema de arrastre y corte para un equipo de pultrusión

Para este análisis se procede a la evaluación y selección de módulos considerando las interfaces de entrada y salida (material energía y señal). Este procedimiento ayuda a agrupar de manera correcta cada bloque funcional (módulo) como se observa en la *figura 19*, ayudando de gran manera en la disminución de costos, mejoras de mantenimiento y de producción.



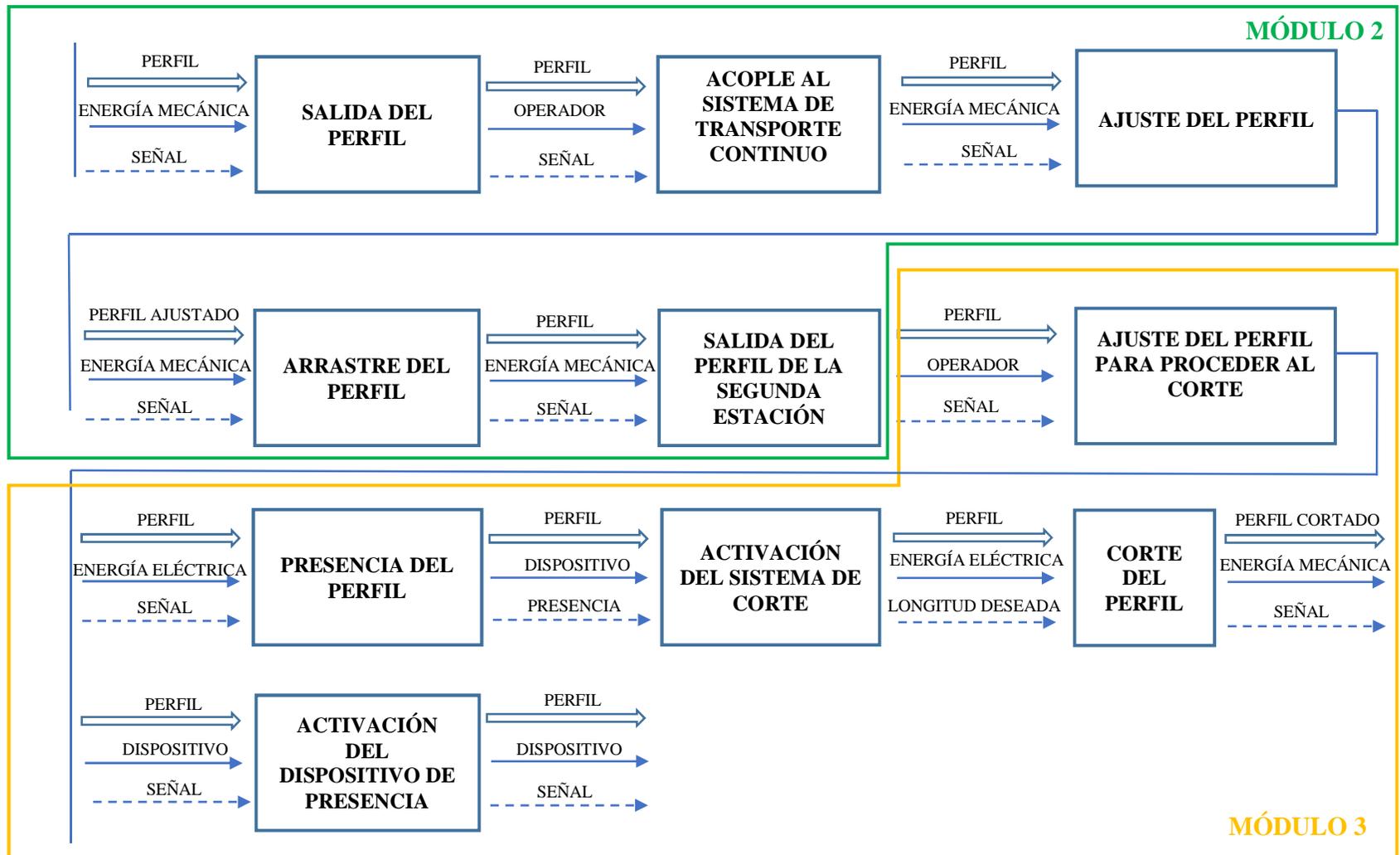


Figura 19: Diagrama generación de módulos

Para esta etapa, que comprende el sistema de arrastre y corte se obtuvieron tres módulos, estos se enlistan a continuación, diferenciados cada uno por un color:

- **MÓDULO 1: SISTEMA DE ARRASTRE 1**
- **MÓDULO 2: SISTEMA DE ARRASTRE 2**
- **MÓDULO 3: SISTEMA DE CORTE**

Esta determinación de módulos, sirve para plantear diferentes soluciones para cada uno de ellos, tomando en cuenta las tres variables importantes mencionadas anteriormente, material, energía y señal.

3.3. Despliegue de la función de calidad (QFD)

Es el primero paso a seguir, se trabaja con una matriz cuantitativa (casa de la calidad) en donde se ingresa información relevante que proporciona el cliente respecto a lo que espera del producto para después relacionarla con otros parámetros.

3.3.1. Reconocimiento de clientes

Como clientes internos se encuentran el grupo de trabajo de la Universidad Técnica del Norte que son encargados de diseñar y construir la máquina de pultrusión como requisito para el trabajo de titulación, tutores, proveedores y técnico docente del mismo ente educativo.

Como clientes externos se encuentran el principal autor de la idea y docente de la Universidad Técnica del Norte, Ing. Víctor Cárdenas y estudiantes de la Carrera de Ingeniería en Mecatrónica de la misma universidad.

3.3.2. Requerimientos del cliente

Se refiere a las características o expectativas que el cliente espera del producto, en este caso la persona adecuada para enlistar los requerimientos que se muestran en la *tabla 6* los que considera primordiales es el Ing. Víctor Cárdenas.

3.3.3. Especificaciones de ingeniería

Se refieren a una lista de términos ingenieriles descritos como parámetros cuantitativos que ayudan a traducir los requerimientos del cliente a la voz del ingeniero, en este caso los autores de la construcción de la máquina de pultrusión relacionan y muestran la manera de cómo satisfacer cada uno de los requerimientos del cliente como se observa en la *tabla 6*.

Tabla 7: Lista de requerimientos del cliente traducidas a la voz del ingeniero

	Requerimientos del cliente	Voz del ingeniero
1	Producción de perfiles con sección transversal "I"	Perfil "I" con dimensiones 25 x 46 mm
2	Buena velocidad de trabajo	Obtención de 1m de perfil por minuto
3	Perfiles de material compuesto	Composición del material compuesto: resina poliéster y fibra de vidrio
4	Corte del perfil	Velocidad de corte para material abrasivo
5	Cumplir con normas de seguridad	Normas de seguridad
6	Cumplir con normas ergonómicas	Normas ergonómicas
7	De bajo costo	Tiempo y calidad
8	Buen tiempo de vida	Selección de materiales
9	Longitud de la máquina: mediana	Dimensiones de máquinas existentes
10	Bajo nivel de automatización	Energía total de funcionamiento

Fuente: Ing. Víctor Cárdenas, Magaly Chimarro, Gissela Chávez, Andrés García; Autores

La relación existente entre el cliente y las especificaciones de ingeniería son la parte principal para estudiar los demás parámetros que intervienen en la casa de la calidad.

3.3.4. Casa de la calidad

La casa de la calidad ayuda a distinguir y seleccionar de manera técnica las características más relevantes de las opcionales, considerando su situación en el mercado frente a sus competencias para llegar a un acuerdo final que presente rasgos competitivos (tiempo, costo y calidad) y hasta superar la visión que tiene el cliente sobre el producto.

Los requerimientos que sobresalen después de evaluar los distintos parámetros por medio de la casa de la calidad (ver Anexo A) son los siguientes: costo total, dimensiones del perfil y dimensiones de la máquina.

3.4. Determinación de soluciones

En esta parte se pone a consideración posibles soluciones (que sean asequibles) para las funciones de cada uno de los módulos. Se puede trabajar con una matriz en donde muestre los siguientes parámetros para cada módulo: función, solución, descripción, ventajas, desventajas y gráfico.

3.4.1. Generación de alternativas de solución

En esta parte se procede a combinar las diferentes soluciones que se plantearon para cada función con otras que sean posibles, generando las alternativas que serán evaluadas de manera cuantitativa.

3.4.2. Método ordinal corregido de criterios ponderados

Permite evaluar las alternativas de solución de cada uno de los módulos, haciendo una comparación una con la otra y considerando los criterios más relevantes obtenidos en el estudio de la casa de la calidad, siendo el costo, dimensiones del perfil y dimensiones de la máquina.

La *tabla 8* es la principal y permite establecer el nivel de importancia de cada criterio que sirve para determinar la alternativa de solución que resulte más conveniente.

Tabla 8: Determinación de la ponderación de cada criterio de evaluación

<i>Criterios</i>	<i>Costo</i>	<i>Dimensiones del perfil</i>	<i>Dimensiones de la máquina</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>
<i>Costo</i>		0,5	1	2,5	0,42
<i>Dimensiones del perfil</i>	0,5		1	2,5	0,42
<i>Dimensiones de la máquina</i>	0	0		1	0,16
		<i>Total</i>		6	1

Nota: para realizar la comparación entre criterios se trabaja con los siguientes valores: 0= menor importancia; 1= mayor importancia; 0,5= van de la mano.

De esta manera, como se puede apreciar en la *tabla 7* los criterios se consideran de la siguiente manera (de mayor a menor importancia):

COSTO = DIMENSIONES DEL PERFIL > DIMENSIONES DE LA MÁQUINA

Soluciones: módulo 1

N°	Función	Solución	Descripción	Ventajas	Desventajas	Gráfico
1	Sujeción de las fibras Método a emplear para sostener de manera uniforme las fibras que atraviesan por todos los módulos.	<i>Mordazas</i>	Se utiliza una mordaza para sogas, esta permite asegurar cada una de las fibras.	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo - Fácil uso 	- Puede no sujetar uniformemente todas las fibras	
		<i>Con las manos</i>	Es la manera más convencional que se pone en práctica en los procesos de pultrusión.	<ul style="list-style-type: none"> - Ningún costo - Buena sujeción de las fibras 	- Riesgo para la persona en caso de no usar un EPP	
2	Regulación de la velocidad de arrastre de las fibras Posibles opciones para ajustar la velocidad de arrastre de acuerdo a las necesidades del proceso.	<i>Variador de frecuencia</i>	Este sistema permite controlar la velocidad con la que girará el motor.	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil uso - Fácil implementación 	- Requiere de personal calificado	
		<i>Fuerza humana</i>	La velocidad de arrastre depende directamente de la fuerza aplicada por la persona a cargo de ello, pero siempre con el EPP adecuado para ese trabajo.	<ul style="list-style-type: none"> - El arrastre puede detenerse en cualquier momento que sea necesario - Ningún costo 	- La variación de la fuerza de arrastre no puede ser la correcta	

<p>3 Arrastre de las fibras</p> <p>Mecanismo encargado del paso inicial del proceso, el arrastre de las fibras.</p>	<p><i>Motor</i></p>	<p>Esta máquina presta una velocidad de giro constante que permite el correcto arrastre de las fibras.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo - Arrastre constante - Fácil implementación 	<ul style="list-style-type: none"> - Tienen poca fuerza de arrastre 	
	<p><i>Con las manos</i></p>	<p>A pesar de ser un procedimiento convencional se puede realizar sin ningún inconveniente si se tiene el cuidado adecuado.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Ningún costo 	<ul style="list-style-type: none"> - La velocidad de arrastre no es constante 	
	<p><i>Enrolladora de hilos manual</i></p>	<p>Es una máquina que trabaja con una manivela que es girada por el operario.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo - Fácil implementación 	<ul style="list-style-type: none"> - La velocidad de arrastre no es constante 	

Generación de alternativas: módulo 1

<i>N°</i>	<i>Función</i>	<i>Componente</i>
1	<i>Sujeción de las fibras</i>	
2	<i>Regulación de la velocidad de arrastre de las fibras</i>	
3	<i>Arrastre de las fibras</i>	

ALTERNATIVA 1: Sujeción de las fibras con las manos, regulación de la velocidad de arrastre por fuerza humana y arrastre de las fibras por enrolladora de hilos manual.

ALTERNATIVA 2: Sujeción de las fibras por mordazas, regulación de la velocidad de arrastre por fuerza humana y arrastre de las fibras por fuerza humana.

ALTERNATIVA 3: Sujeción de las fibras con las manos, regulación de la velocidad de arrastre por fuerza humana y arrastre de las fibras por fuerza humana.

Criterios ponderados: módulo 1

<i>Costo</i>	<i>Alternativa 1</i>	<i>Alternativa 2</i>	<i>Alternativa 3</i>	$\Sigma+I$	<i>Ponderación</i>
<i>Alternativa 1</i>		0	0	1	0,17
<i>Alternativa 2</i>	1		0	2	0,33
<i>Alternativa 3</i>	1	1		3	0,50
		Total		6	1

ALTERNATIVA 3 > ALTERNATIVA 2 > ALTERNATIVA 1

<i>Dimensiones del perfil</i>	<i>Alternativa 1</i>	<i>Alternativa 2</i>	<i>Alternativa 3</i>	$\Sigma+I$	<i>Ponderación</i>
<i>Alternativa 1</i>		1	1	3	0,50
<i>Alternativa 2</i>	0		0	1	0,17
<i>Alternativa 3</i>	0	1		2	0,33
		Total		6	1

ALTERNATIVA 1 > ALTERNATIVA 3 > ALTERNATIVA 2

<i>Dimensiones de la máquina</i>	<i>Alternativa 1</i>	<i>Alternativa 2</i>	<i>Alternativa 3</i>	$\Sigma+I$	<i>Ponderación</i>
<i>Alternativa 1</i>		0	0	1	0,17
<i>Alternativa 2</i>	1		0	2	0,33
<i>Alternativa 3</i>	1	1		3	0,50
		Total		6	1

ALTERNATIVA 3 > ALTERNATIVA 2 > ALTERNATIVA 1

La solución final sería:

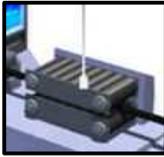
	<i>Costo</i>	<i>Dimensiones del perfil</i>	<i>Dimensiones de la máquina</i>	Σ	<i>Prioridad</i>
<i>Alternativa 1</i>	0,0714	0,2100	0,0272	0,3086	2
<i>Alternativa 2</i>	0,1386	0,0714	0,0528	0,2628	3
<i>Alternativa 3</i>	0,2100	0,1386	0,0800	0,4286	1

Soluciones: módulo 2

<i>N°</i>	<i>Función</i>	<i>Solución</i>	<i>Descripción</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>	<i>Gráfico</i>
1	<p>Ajuste del perfil</p> <p>Mecanismo para realizar el ajuste del perfil sin dañarlo.</p>	<p><i>Cilindros neumáticos</i></p>	<p>Son actuadores que realizan un movimiento lineal, este ajusta las mordazas para realizar el ajuste.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se puede regular la velocidad de avance y retroceso - Fáciles de conseguir 	<ul style="list-style-type: none"> - Pueden presentar inconvenientes a altas velocidades de retroceso. - Requiere mantenimiento 	
2	<p>Arrastre del perfil</p> <p>Mecanismo que realiza el transporte del perfil para guiarlo a la siguiente estación.</p>	<p><i>Cilindros hidráulicos</i></p>	<p>Son actuadores mecánicos que se utilizan para trabajar con grandes fuerzas de forma lineal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor fuerza de arrastre - Más robustos 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo elevado - Implementación compleja - Requiere mantenimiento 	
		<p><i>Cilindros neumáticos</i></p>	<p>Se utilizan dos cilindros neumáticos de doble efecto (uno para el ajuste del perfil y otro para el arrastre) con válvula reguladora de caudal.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo 	<ul style="list-style-type: none"> - Pueden presentar inconvenientes a altas velocidades de retroceso. - Requiere mantenimiento 	
		<p><i>Por rodillos</i></p>	<p>Se utilizan rodillos (parte superior e inferior) para el arrastre.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo - Fácil implementación 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor precisión de ajuste - No tiene el contacto suficiente para realizar el arrastre 	

3	<i>Regulación de la velocidad de arrastre del perfil</i>	<i>Variador de frecuencia</i>	Este sistema permite controlar la velocidad con la que girará el motor.	- Fácil uso - Fácil implementación	- Requiere de personal calificado	
	Método para realizar el ajuste de velocidad para arrastrar el perfil pultruído.	<i>Válvula reguladora de caudal</i>	Regula el paso de fluido a través de las tuberías.	- No ocupa gran espacio	- Exige un buen mantenimiento - Costo elevado	

Generación de alternativas: módulo 2

N°	Función	Componente
1	Ajuste del perfil	
2	Arrastre del perfil	  
3	Regulación de la velocidad de arrastre del perfil	 

ALTERNATIVA 1: Ajuste del perfil utilizando cilindro neumático, arrastre mediante rodillos y regulación de la velocidad a través de variador de frecuencia.

ALTERNATIVA 2: Ajuste del perfil utilizando cilindro neumático, arrastre mediante cilindro hidráulico y regulación de velocidad a través de válvula reguladora de caudal.

ALTERNATIVA 3: Ajuste del perfil utilizando cilindro neumático, arrastre mediante cilindro neumático y regulación de la velocidad a través de válvula reguladora de caudal.

Criterios ponderados: módulo 2

<i>Costo</i>	<i>Alternativa 1</i>	<i>Alternativa 2</i>	<i>Alternativa 3</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>
<i>Alternativa 1</i>		1	0	2	0,33
<i>Alternativa 2</i>	0		1	2	0,33
<i>Alternativa 3</i>	1	0		2	0,33
		<i>Total</i>		6	1

ALTERNATIVA 1 = ALTERNATIVA 2 = ALTERNATIVA 3

<i>Dimensiones del perfil</i>	<i>Alternativa 1</i>	<i>Alternativa 2</i>	<i>Alternativa 3</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>
<i>Alternativa 1</i>		0	0	1	0,16
<i>Alternativa 2</i>	1		0,5	2,5	0,42
<i>Alternativa 3</i>	1	0,5		2,5	0,42
		<i>Total</i>		6	1

ALTERNATIVA 2 = ALTERNATIVA 3 > ALTERNATIVA 1

<i>Dimensiones de la máquina</i>	<i>Alternativa 1</i>	<i>Alternativa 2</i>	<i>Alternativa 3</i>	$\Sigma+1$	<i>Ponderación</i>
<i>Alternativa 1</i>		0,5	0	1,5	0,25
<i>Alternativa 2</i>	0,5		0,5	2	0,33
<i>Alternativa 3</i>	1	0,5		2,5	0,42
		<i>Total</i>		6	1

ALTERNATIVA 3 > ALTERNATIVA 2 > ALTERNATIVA 1

La solución final sería:

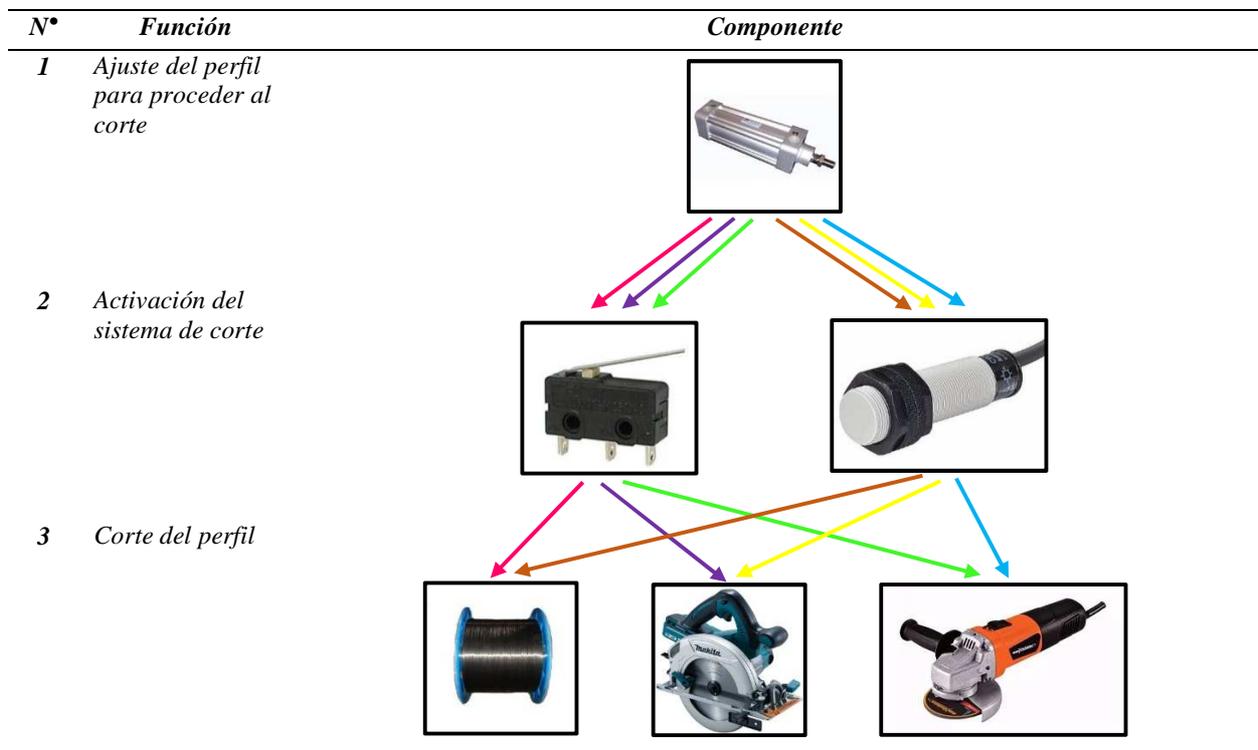
	<i>Costo</i>	<i>Dimensiones del perfil</i>	<i>Dimensiones de la máquina</i>	Σ	<i>Prioridad</i>
<i>Alternativa 1</i>	0,1399	0,0672	0,0400	0,2471	3
<i>Alternativa 2</i>	0,1399	0,1764	0,0528	0,3691	2
<i>Alternativa 3</i>	0,1399	0,1764	0,0672	0,3835	1

Soluciones: módulo 3

N°	Función	Solución	Descripción	Ventajas	Desventajas	Gráfico
1	<p>Ajuste del perfil para proceder al corte</p> <p>Mecanismo para ajustar el perfil y realizar el corte sin que este se mueva.</p>	<i>Cilindro neumático</i>	Tan pronto como el perfil llegue a la estación de corte los cilindros neumáticos serán activados para realizar el ajuste adecuado.	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo - Mayor velocidad de ajuste 	<ul style="list-style-type: none"> - Implementación compleja 	
2	<p>Activación del sistema de corte</p> <p>Proporciona la señal para proceder al corte del perfil a la longitud deseada.</p>	<p><i>Final de carrera</i></p> <p><i>Sensor de proximidad</i></p>	<p>Se coloca a la distancia que se requiera (depende de la longitud del perfil que se desee obtener), y se activa cuando el perfil haga contacto.</p> <p>Se coloca a la distancia que se requiera (depende de la longitud del perfil que se desee obtener), y se activa cuando detecte la presencia del perfil.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo - Fácil implementación - Mayor precisión 	<ul style="list-style-type: none"> - Puede llegar a quemarse - Menor precisión 	 

3 Corte del perfil Se consideran tres propuestas, tomando en cuenta las propiedades físicas que tendrá el perfil pultruido.	<i>Alambre de acero de alto carbono</i>	Se calienta- el alambre para realizar el corte.	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil adquisición en el país - Alta resistencia - Mejor acabado en la superficie de corte 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo elevado (sólo se vende por toneladas a un costo aproximado de \$700 la tonelada) 	
	<i>Sierra eléctrica</i>	Utiliza un disco de carburo de tungsteno para realizar el corte.	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo - Mayor tiempo de vida - Fácil mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor calidad de acabado - Ocupa mayor espacio 	
	<i>Amoladora</i>	Utiliza un disco de carburo de tungsteno para realizar el corte.	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo costo - Fácil manipulación - Mayor tiempo de vida - Fácil mantenimiento 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor calidad de acabado 	

Generación de alternativas: módulo 3



ALTERNATIVA 1: Ajuste del perfil por cilindro neumático, activación del sistema de corte con final de carrera y corte del perfil con alambre de acero de alto carbono.

ALTERNATIVA 2: Ajuste del perfil por cilindro neumático, activación del sistema de corte con sensor de proximidad y corte del perfil con alambre de acero de alto carbono.

ALTERNATIVA 3: Ajuste del perfil por cilindro neumático, activación del sistema de corte con final de carrera y corte del perfil con sierra eléctrica.

ALTERNATIVA 4: Ajuste del perfil por cilindro neumático, activación del sistema de corte con sensor de proximidad y corte del perfil con sierra eléctrica.

ALTERNATIVA 5: Ajuste del perfil por cilindro neumático, activación del sistema de corte con final de carrera y corte del perfil con amoladora.

ALTERNATIVA 6: Ajuste del perfil por cilindro neumático, activación del sistema de corte con sensor de proximidad y corte del perfil con amoladora.

Crterios ponderados: módulo 3

<i>Costo</i>	<i>Alternativa 1</i>	<i>Alternativa 2</i>	<i>Alternativa 3</i>	<i>Alternativa 4</i>	<i>Alternativa 5</i>	<i>Alternativa 6</i>	$\Sigma+I$	<i>Ponderación</i>
<i>Alternativa 1</i>		0,5	0	0	0	0	1,5	0,07
<i>Alternativa 2</i>	0,5		0	0	0	0	1,5	0,07
<i>Alternativa 3</i>	1	1		1	0	0,5	4,5	0,21
<i>Alternativa 4</i>	1	1	0		0	0	3	0,15
<i>Alternativa 5</i>	1	1	1	1		1	6	0,29
<i>Alternativa 6</i>	1	1	0,5	1	0		4,5	0,21
<i>Total</i>							21	1

SOLUCIÓN 9 = SOLUCIÓN 11 > SOLUCIÓN 10 = SOLUCIÓN 12 > SOLUCIÓN 1 = SOLUCIÓN 3

<i>Dimensiones del perfil</i>	<i>Alternativa 1</i>	<i>Alternativa 2</i>	<i>Alternativa 3</i>	<i>Alternativa 4</i>	<i>Alternativa 5</i>	<i>Alternativa 6</i>	$\Sigma+I$	<i>Ponderación</i>
<i>Alternativa 1</i>		0	0,5	0,5	0,5	1	3,5	0,16
<i>Alternativa 2</i>	1		0,5	0	0	0,5	3	0,14
<i>Alternativa 3</i>	0,5	0,5		1	0,5	1	4,5	0,21
<i>Alternativa 4</i>	0,5	1	0		0	0,5	3	0,15
<i>Alternativa 5</i>	0,5	1	0,5	1		1	5	0,24
<i>Alternativa 6</i>	0	0,5	0	0,5	0		2	0,10
<i>Total</i>							21	1

SOLUCIÓN 9 = SOLUCIÓN 11 > SOLUCIÓN 10 = SOLUCIÓN 12 > SOLUCIÓN 1 = SOLUCIÓN 3

<i>Dimensiones de la máquina</i>	<i>Alternativa 1</i>	<i>Alternativa 2</i>	<i>Alternativa 3</i>	<i>Alternativa 4</i>	<i>Alternativa 5</i>	<i>Alternativa 6</i>	$\Sigma+I$	<i>Ponderación</i>
<i>Alternativa 1</i>		0,5	1	1	0,5	0,5	4,5	0,21
<i>Alternativa 2</i>	0,5		1	1	0,5	0,5	4,5	0,21
<i>Alternativa 3</i>	0	0		0,5	0	0	1,5	0,07
<i>Alternativa 4</i>	0	0	0,5		0	0	1,5	0,07
<i>Alternativa 5</i>	0,5	0,5	1	1		1	5	0,24
<i>Alternativa 6</i>	0,5	0,5	1	1	0		4	0,20
							21	1
			<i>Total</i>					

SOLUCIÓN 9 = SOLUCIÓN 11 > SOLUCIÓN 10 = SOLUCIÓN 12 > SOLUCIÓN 1 = SOLUCIÓN 3

La solución final sería:

	<i>Costo</i>	<i>Dimensiones del perfil</i>	<i>Dimensiones de la máquina</i>	Σ	<i>Prioridad</i>
<i>Alternativa 1</i>	0,0294	0,0672	0,0336	0,1302	5
<i>Alternativa 2</i>	0,0294	0,0588	0,0336	0,1218	6
<i>Alternativa 3</i>	0,0882	0,0882	0,0112	0,1876	2
<i>Alternativa 4</i>	0,0630	0,0630	0,0112	0,1372	4
<i>Alternativa 5</i>	0,1218	0,1008	0,0384	0,2610	1
<i>Alternativa 6</i>	0,0882	0,0420	0,0320	0,1622	3

Con las alternativas finales de cada módulo seleccionadas al aplicar el método ordinal corregido de criterios ponderados, se logra obtener el diagrama que muestra la *figura 20*, mismo que representa la tercera y última etapa del proceso de pultrusión, el sistema de arrastre y corte, donde se puede observar todos los elementos base que sirven para realizar cada uno de los procedimientos:

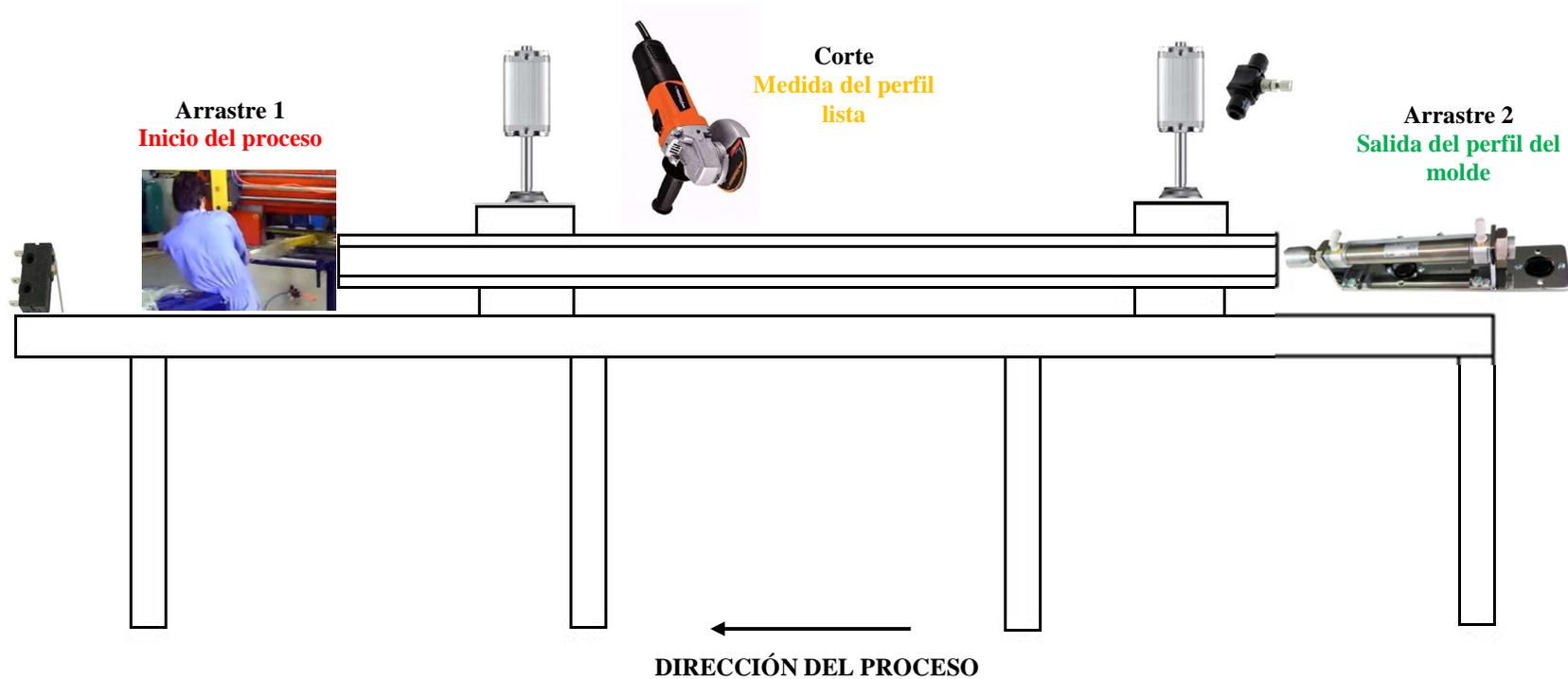


Figura 20: Diagrama de la alternativa de solución apropiada

Lo que prosigue ahora, es la selección de los materiales, para esto se hará el uso de gráficos, fórmulas, tablas y cálculos necesarios que ayuden a su correcta determinación, de esta manera se evitará realizar algún cambio inesperado.

3.5. Selección de componentes neumáticos

3.5.1. Selección del cilindro para el arrastre

De primera instancia se debe conocer la fuerza que debe ejercer el cilindro neumático, en este caso la fuerza adecuada para arrastrar el perfil a través del molde donde se produce el curado. Los pasos que se consideran para determinar la fuerza se basan en un trabajo ejecutado por Hwam Kim, Woo Lee y K. Friedrich, mismos que se desarrollan a continuación [32].

Ecuación 1: Volumen de la sección de curado

$$V = \text{Área del perfil} * \text{Longitud zona}$$

$$V = 92372 \text{ mm}^3 = 92,37 \text{ cm}^3$$

Ecuación 2: Masa de la zona de curado

$$m = \text{Densidad de un perfil pultruido} * V$$

$$m = 184,74 \text{ gr} = 0,185 \text{ kg}$$

Ecuación 3: Peso de la sección

$$P = m * g$$

$$P = 1,81 \text{ N}$$

Para el siguiente paso se obtiene las fuerzas de rozamiento del perfil y del carro que es el encargado de realizar el arrastre, estos resultados se obtienen mediante la multiplicación del unitario por la normal (el peso), considerando que el coeficiente de fricción entre un metal y un compuesto moldeado se encuentra en un intervalo de 0,25-0,45, eligiendo el máximo [33]. Y el coeficiente de rozamiento entre el bronce y el acero es de 0,18.

Ecuación 4: Fuerza de rozamiento del perfil y del arrastre

$$f_{rp} = u * N$$

$$f_{rp} = 0,815 \text{ N}$$

Considerando que la masa aproximada del carro que realiza el arrastre sea de 10 kg se transforma a N y se realiza el siguiente cálculo:

$$f_{ra} = u * N$$
$$f_{ra} = 17,66 N$$

Finalmente, al realizar la sumatoria de las dos fuerzas de rozamiento se obtiene la fuerza resultante:

Ecuación 5: Fuerza de rozamiento resultante

$$f_{rr} = 0,815 N + 17,66 N$$
$$**f_{rr} = 18,48 N**$$

Una vez obtenida la fuerza mínima que debe ejercer el cilindro se procede a su selección, tomando en cuenta algunos puntos importantes:

- El cilindro debe poseer una carrera lo suficientemente larga para realizar el menor número de retrocesos posibles (esto mantendrá el proceso continuo).
- La continuidad de halado se realiza hasta obtener una distancia de un metro de perfil que será cortado.
- La longitud del vástago del cilindro debe encontrarse en relación con su diámetro para evitar que se dañe el mismo.
- El avance del cilindro es más lento que su retroceso (se debe controlar la velocidad de avance)

Dicho lo anterior, en la *figura 21* se puede apreciar un diagrama que permite realizar la selección de cilindros neumáticos tomando en cuenta la situación más crítica (fijación trasera con carga libre). Esto ayuda a que se realice una elección correcta pese a que no se conozca con seguridad la forma de instalación del cilindro.

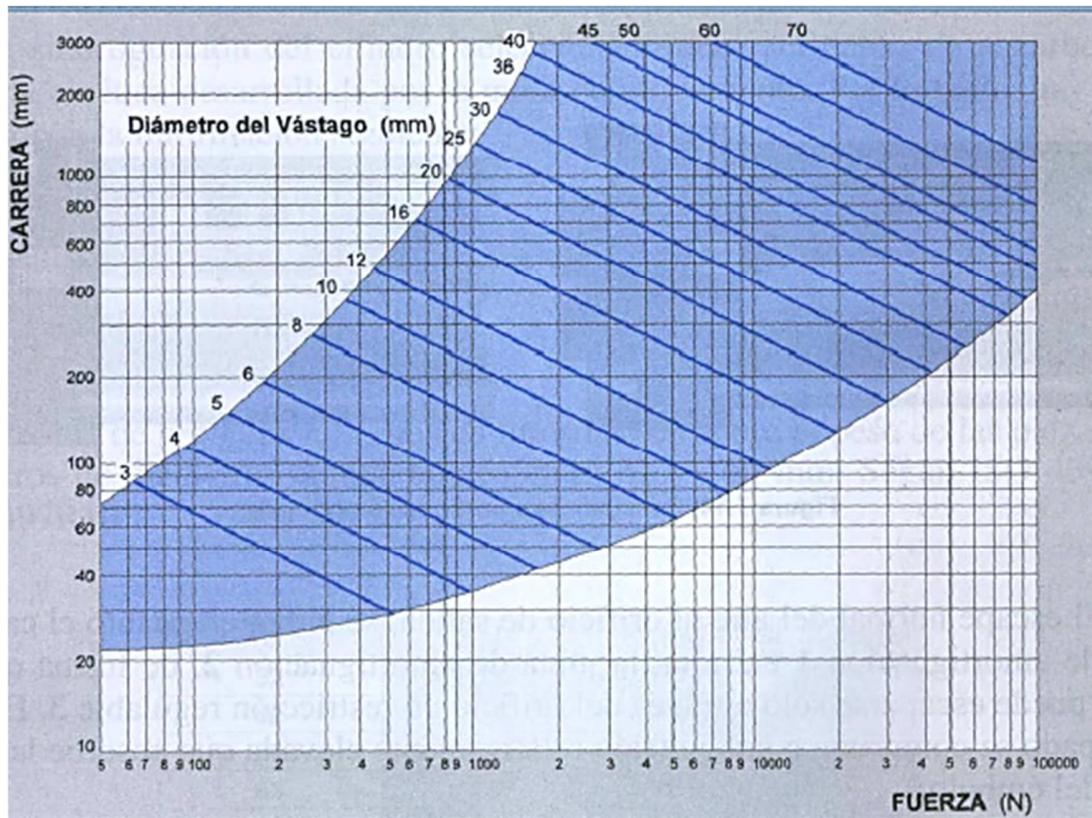


Figura 21: Diagrama para la selección de cilindros neumáticos [34].

De acuerdo con los resultados obtenidos para la fuerza se tiene a consideración varias opciones según el diagrama, pero la que más se ajusta a los puntos mencionados anteriormente es el cilindro de 600 mm de carrera, con vástago de 16 mm.

Con esto ya se tienen los parámetros principales del cilindro y como es de conocimiento los cilindros se encuentran normalizados, por ende, la *tabla 9* muestra el diámetro del émbolo y las fuerzas de avance y retroceso respectivamente.

Tabla 9: Parámetros de un cilindro neumático [34]

Diámetro vástago (mm)	Diámetro émbolo (mm)	A+ (N a 6 bar)	A+ (N a 6 bar)
4	10	47	39
6	12	67	50
6	16	120	103
8	20	188	158
10	25	294	245
12	32	483	414
16	40	753	633
20	50	1178	989
20	63	1870	1681

3.5.2. Selección del cilindro para el corte

En esta parte se calcula la fuerza de rozamiento que produce el carro deslizante del sistema de corte, considerando que su masa aproximada es de 10 kg se transforma a N y se realiza el siguiente cálculo:

$$frc = u * N$$

$$frc = 17,66 N$$

Ya establecida la fuerza de rozamiento se procede a la selección del cilindro que satisfaga los siguientes requerimientos:

- Su carrera debe ser suficiente para desplazarse a lo largo del perfil para realizar el corte.
- Su velocidad de avance debe ser más lenta que la de retroceso.

De acuerdo con la *figura 21* un cilindro de 300 mm de carrera y 12 mm de vástago es el adecuado para realizar el corte sin problemas.

3.5.3. Dimensión de la válvula distribuidora

Tomando en cuenta el diámetro del émbolo de los cilindros neumáticos se tienen los valores de la tabla 10:

Tabla 10: Parámetros de la válvula distribuidora

Diámetro émbolo (mm)	Conexión de la válvula	Diámetro nominal aproximado (mm)	Caudal nominal aproximado (mm)
Hasta 12	M3	1,5	80
>12-25	M5	2,5	Hasta 200
>25-50	G 1/8	3,5	Hasta 500
>50-100	G 1/4	7	Hasta 1140
>150-200	G 1/2	12	Hasta 3000
>200-320	G 3/4, G1	18,7	Hasta 6000

3.6. Selección de componentes eléctricos

3.6.1. Selección de la herramienta de corte

Como ya se menciona en la página 27, la velocidad periférica para realizar el corte del perfil es de 2500 m/min, con este dato se puede realizar los siguientes cálculos:

Ecuación 6: Número de revoluciones

$$V_c = \pi * D * N$$

$$N = \frac{V_c}{\pi * D}$$

$$N = 6919,78 \cong 6920 \text{ rpm}$$

3.7. Diseño

Se realizan cálculos para la selección de ejes del sistema de arrastre y corte, en base a los datos iniciales que se tienen para cada uno de ellos.

3.7.1. Selección de ejes

Arrastre

En esta etapa se necesitan dos ejes, mismos que serán encargados de soportar una carga de 10 kg, que es la masa del carro deslizante que arrastra el perfil cuando este sale del molde. El eje que se utiliza tiene las características que se muestran en la *tabla 11*:

Tabla 11: Características del eje para el sistema de arrastre [35].

<i>N°</i>	<i>Características</i>
<i>Longitud</i>	0,902 m
<i>Diámetro</i>	0,220 m
<i>Material</i>	AISI 1020 (eje de transmisión)
<i>Masa</i>	2,858 kg

Corte

En esta etapa se necesitan cuatro ejes, mismos que son encargados de soportar una carga de 8 kg, que es la masa total de la amoladora junto con su carcasa. Las características del eje se aprecian en la *tabla 12*:

Tabla 12: Características del eje para el sistema de corte [35].

<i>N°</i>	<i>Características</i>
<i>Longitud</i>	0,490 m
<i>Diámetro</i>	0,191 m
<i>Material</i>	AISI 1020 (eje de transmisión)
<i>Masa</i>	1,171 kg

3.7.2. Cálculo de reacciones

En esta parte se calculan las reacciones de los ejes que seleccionaron anteriormente, mismos que servirán para realizar las simulaciones.

Arrastre

Se tienen los siguientes datos:

$$\text{Peso eje} = 28,04 \text{ N}$$

$$\text{Longitud del eje} = 0,902 \text{ m}$$

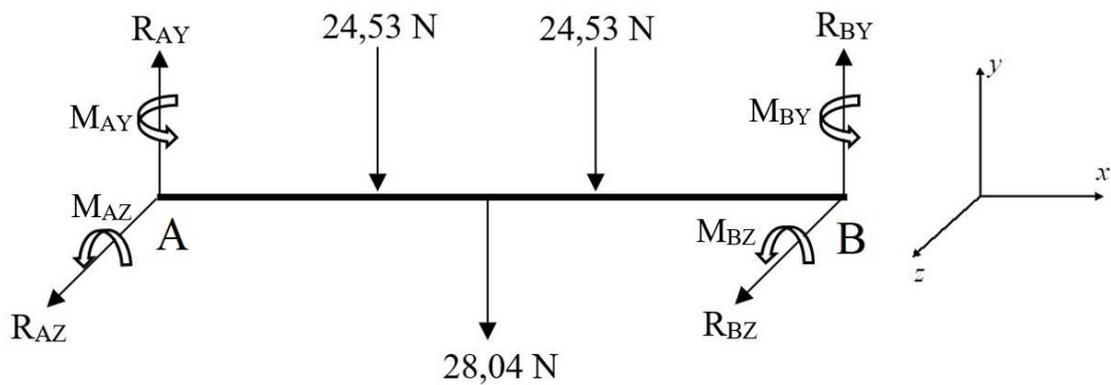
$$\text{Peso total del carro} = 10 \text{ kg}$$

$$\text{Distancia entre bocines} = 0,212 \text{ m}$$

Se divide el peso total para el número de bocines que se tiene, en este caso son cuatro, dos para cada eje.

$$\text{Peso en cada bocín} = \frac{10}{4} = 2,5 \text{ kg}$$

El diagrama de cuerpo libre queda de la siguiente manera, con los datos que se tienen hasta este punto, para consecuentemente hallar cada una de las incógnitas:



Se realiza la sumatoria de fuerzas que se tiene en Y y Z:

$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_{AY} + R_{BY} = 24,53 + 28,04 + 24,53$$

$$R_{AY} + R_{BY} = 77,10$$

$$\Sigma F_z = 0$$

$$R_{AZ} + R_{BZ} = 0$$

Se realiza la sumatoria de momentos en el punto A:

$$\Sigma M_{Ax} = 0$$

$$-24,53 * 0,345 - 28,04 * 0,451 - 24,53 * 0,557 + R_{BY} * 0,902 + R_{BZ} * 0,902 = 0$$

$$R_{BY} + R_{BZ} = 38,55$$

$$\Sigma M_{Ay} = 0$$

$$M_{AY} + R_{BZ} * 0,902 = 0$$

$$\Sigma M_{Az} = 0$$

$$M_{AZ} - 24,53 * 0,345 - 28,04 * 0,451 - 24,53 * 0,557 + R_{BY} * 0,902 = 0$$

$$M_{AZ} - 34,77 + R_{BY} * 0,902 = 0$$

También se realiza la sumatoria de momentos en el punto B:

$$\Sigma M_{Bx} = 0$$

$$-24,53 * 0,345 - 28,04 * 0,451 - 24,53 * 0,557 + R_{AY} * 0,902 + R_{AZ} * 0,902 = 0$$

$$R_{AY} + R_{AZ} = 38,55$$

$$\Sigma M_{By} = 0$$

$$M_{BY} + R_{AZ} * 0,902 = 0$$

$$\Sigma M_{Bz} = 0$$

$$M_{BZ} - 24,53 * 0,345 - 28,04 * 0,451 - 24,53 * 0,557 + R_{AY} * 0,902 = 0$$

$$M_{BZ} - 34,77 + R_{AY} * 0,902 = 0$$

Se obtienen cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas:

$$R_{AY} + R_{BY} = 77,10$$

$$R_{AZ} + R_{BZ} = 0$$

$$R_{BY} + R_{BZ} = 38,55$$

$$R_{AY} + R_{AZ} = 38,55$$

Resolviendo por cualquier método se obtienen los siguientes resultados para las reacciones:

$$R_{AY} = 38,55 \text{ N}$$

$$R_{BY} = 38,55 \text{ N}$$

$$R_{BZ} = 0$$

$$R_{AZ} = 0$$

Sustituyendo los valores de las reacciones obtenidas, se obtienen los momentos:

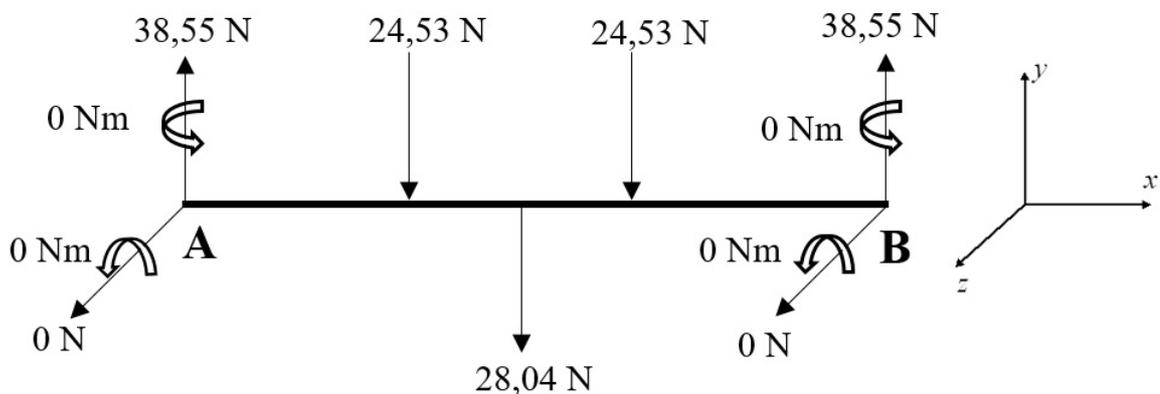
$$M_{AY} = 0$$

$$M_{AZ} = 0,0021$$

$$M_{BY} = 0$$

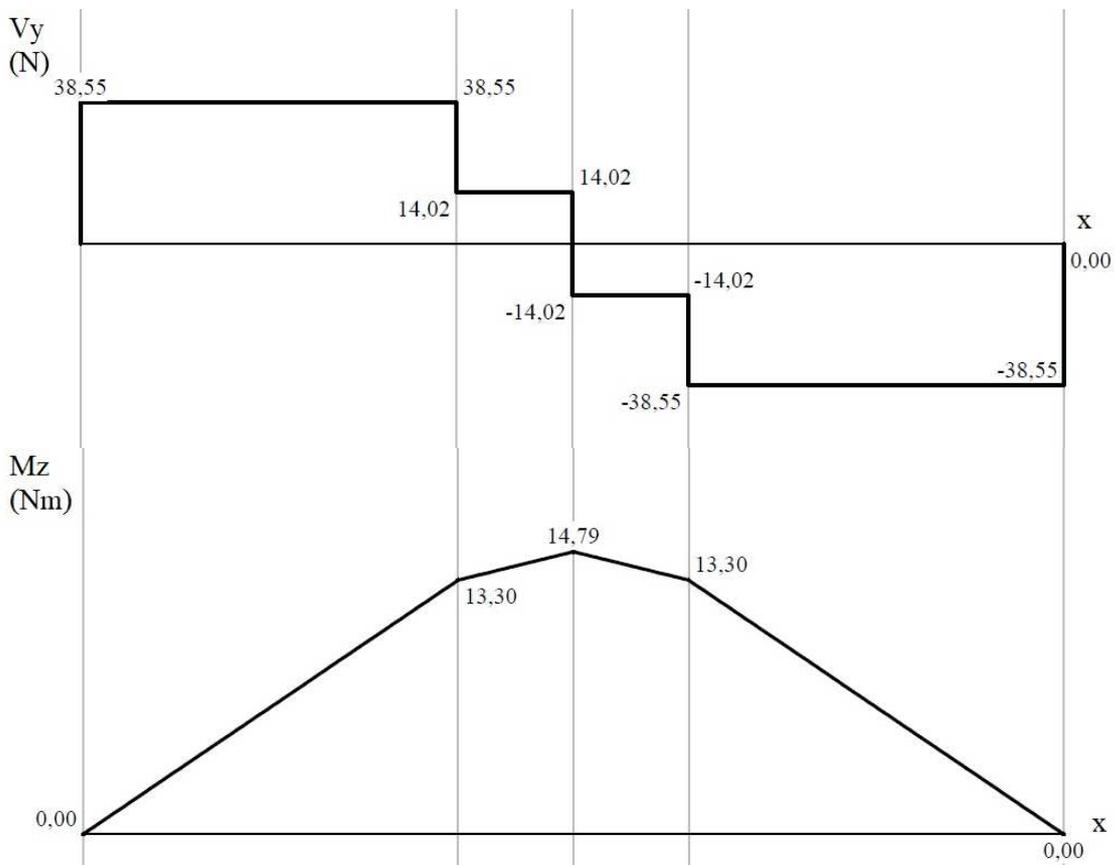
$$M_{BZ} = 0,0021$$

El diagrama de cuerpo libre resuelto queda de la siguiente manera:



Seguido de esto se realizan los diagramas de esfuerzo cortante y momento para determinar los siguientes valores:

- Momento máximo
- Esfuerzo máximo
- Factor de seguridad



El esfuerzo máximo se calcula considerando como dato el momento máximo que se obtuvo en el diagrama de momentos, siendo 14,79 Nm y calculando la sección del eje:

Ecuación 7: Sección del eje

$$S = \frac{\pi * D^3}{32}$$

$$S = 1,05 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Ecuación 8: Esfuerzo máximo

$$\tau = \frac{M}{S}$$
$$\tau = 14085714,29 \frac{N}{m^2} = \mathbf{14,09 \text{ MPa}}$$

Para calcular el factor de seguridad se toma como dato el límite de fluencia, en este caso es 380 MPa.

Ecuación 9: Factor de seguridad

$$N = \frac{S_y}{\tau}$$
$$N = \mathbf{26,97}$$

Corte

Se tienen los siguientes datos:

$$\text{Peso eje} = 11,48 \text{ N}$$

$$\text{Longitud del eje} = 0,490 \text{ m}$$

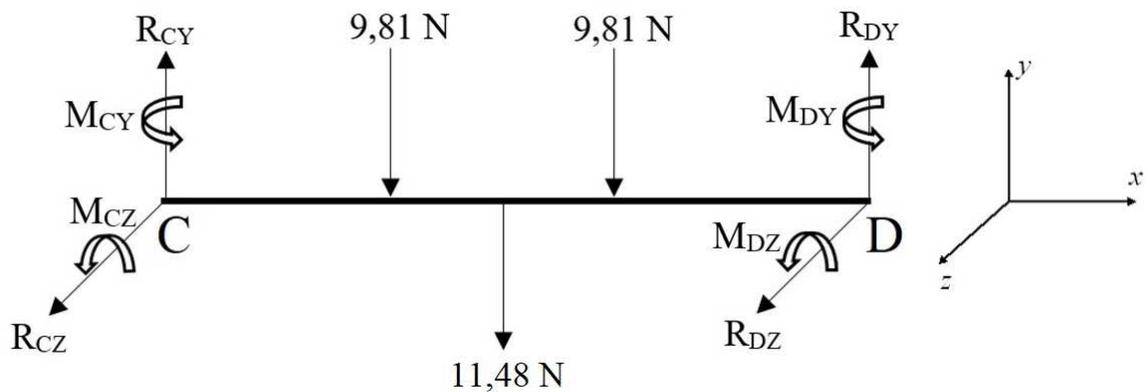
$$\text{Peso total del carro} = 8 \text{ kg}$$

$$\text{Distancia entre bocines} = 0,130 \text{ m}$$

Se divide el peso total para el número de bocines que se tiene, en este caso son ocho, dos para cada eje.

$$\text{Peso en cada bocín} = \frac{8}{8} = 1 \text{ kg}$$

El diagrama de cuerpo libre queda de la siguiente manera, con los datos que se tienen hasta este punto, para consecuentemente hallar cada una de las incógnitas:



$$\Sigma F_y = 0$$

$$R_{CY} + R_{DY} = 9,81 + 11,48 + 9,81$$

$$R_{CY} + R_{DY} = 31,10$$

$$\Sigma F_z = 0$$

$$R_{CZ} + R_{DZ} = 0$$

$$\Sigma M_{Cx} = 0$$

$$-9,81 * 0,180 - 11,48 * 0,245 - 9,81 * 0,310 + R_{DY} * 0,490 + R_{DZ} * 0,490 = 0$$

$$R_{DY} + R_{DZ} = 15,55$$

$$\Sigma M_{Cy} = 0$$

$$M_{CY} + R_{CZ} * 0,490 = 0$$

$$\Sigma M_{Cz} = 0$$

$$M_{CZ} - 9,81 * 0,180 - 11,48 * 0,245 - 9,81 * 0,310 + R_{DY} * 0,490 = 0$$

$$M_{CZ} - 7,62 + R_{DY} * 0,490 = 0$$

También se realiza la sumatoria de momentos en el punto B:

$$\Sigma M_{Dx} = 0$$

$$-9,81 * 0,180 - 11,48 * 0,245 - 9,81 * 0,310 + R_{CY} * 0,490 + R_{CZ} * 0,490 = 0$$

$$R_{CY} + R_{CZ} = 15,55$$

$$\Sigma M_{Dy} = 0$$

$$M_{DY} + R_{CZ} * 0,490 = 0$$

$$\Sigma M_{Dz} = 0$$

$$M_{DZ} - 9,81 * 0,180 - 11,48 * 0,245 - 9,81 * 0,310 + R_{CY} * 0,490 = 0$$

$$M_{DZ} - 7,62 + R_{CY} * 0,490 = 0$$

Se obtienen cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas:

$$R_{CY} + R_{DY} = 31,10$$

$$R_{CZ} + R_{DZ} = 0$$

$$R_{DY} + R_{DZ} = 15,55$$

$$R_{CY} + R_{CZ} = 15,55$$

Resolviendo por cualquier método se obtienen los siguientes resultados para las reacciones:

$$R_{CY} = 15,55 \text{ N}$$

$$R_{DY} = 15,55 \text{ N}$$

$$R_{DZ} = 0$$

$$R_{CZ} = 0$$

Sustituyendo los valores de las reacciones obtenidas, se obtienen los momentos:

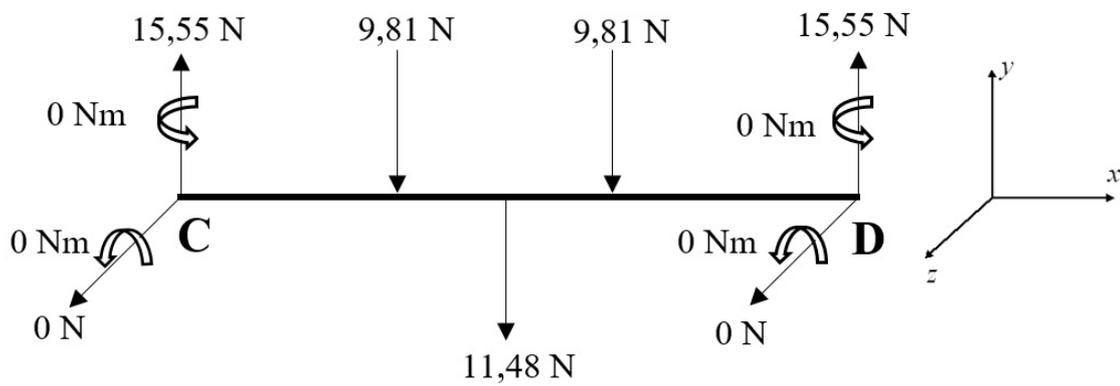
$$M_{CY} = 0$$

$$M_{CZ} = 0,0005$$

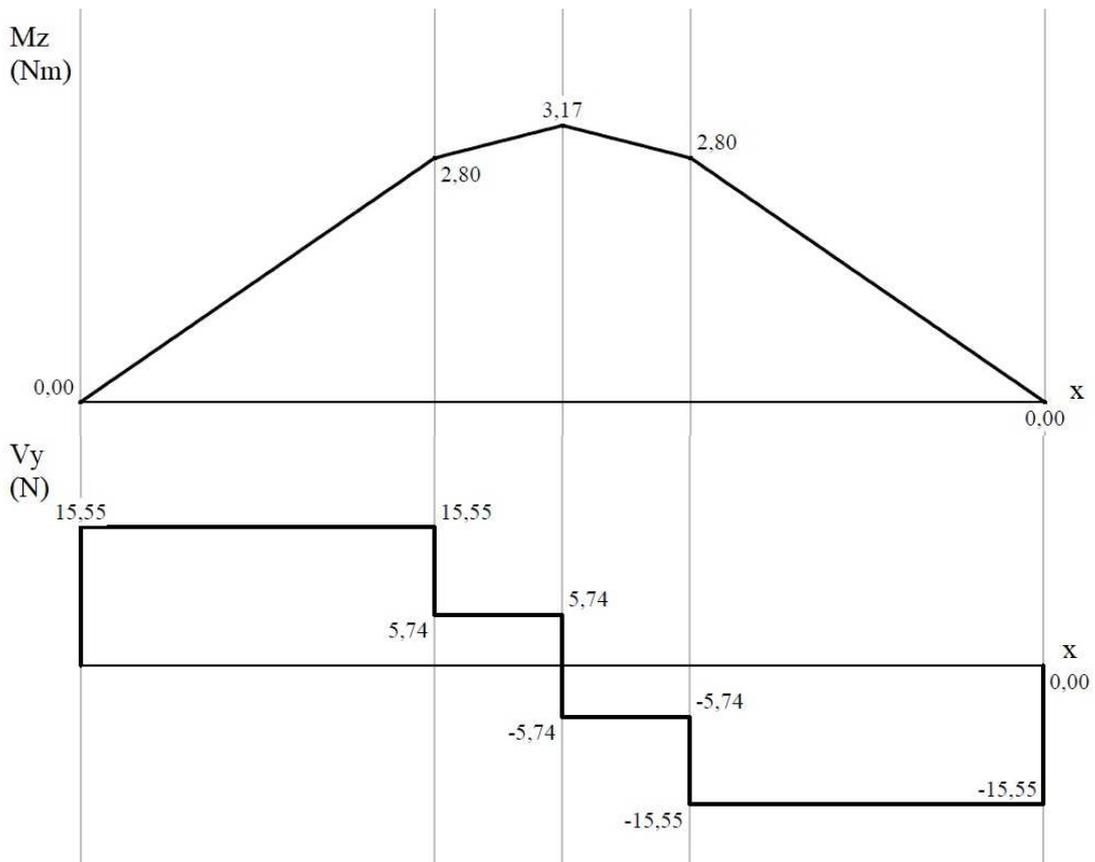
$$M_{DY} = 0$$

$$M_{DZ} = 0,0005$$

El diagrama de cuerpo libre resuelto quedaría de la siguiente manera:



Seguido de esto se realizan los diagramas de esfuerzo cortante y momento:



De igual manera que en el eje de arrastre los cálculos se basan en el momento máximo que en este caso es 3,17 Nm y en el esfuerzo último que al tratarse del mismo material es de 380 MPa.

$$S = \frac{\pi * D^3}{32}$$

$$S = 6,73 \times 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$\tau = \frac{M}{S}$$

$$\tau = 4710252,6 \frac{N}{m^2} = \mathbf{4,71 \text{ MPa}}$$

$$N = \frac{Sy}{\tau}$$

$$N = \mathbf{80,6}$$

Finalmente, las reacciones y momentos calculados anteriormente también se usan para realizar las simulaciones y comprobar que los datos resultados coincidan o varíen en un margen no mayor al 10%, se calculan los siguientes parámetros:

- Desplazamiento
- Tensión de Von Mises
- Factor de seguridad

3.7.3. Simulaciones

Se realizan las simulaciones utilizando como herramienta el software CAD SolidWorks, estableciendo en primera instancia las condiciones de frontera para el eje del sistema de arrastre y sistema de corte respectivamente.

Arrastre

La *tabla 13* muestra las condiciones de frontera que se tiene como dato para realizar la simulación del eje.

Tabla 13: Condiciones de frontera

Condiciones de frontera		
1	Longitud	0,902 m
2	Diámetro	0,220 m
3	Material	AISI 1020
4	Sujeción	Fija a los dos extremos
5	Cargas externas	24,53 N (2)

Para la simulación se realiza un análisis estático que trabaja con un mallado sólido estándar. En las *figuras 22-24* se muestran los resultados.

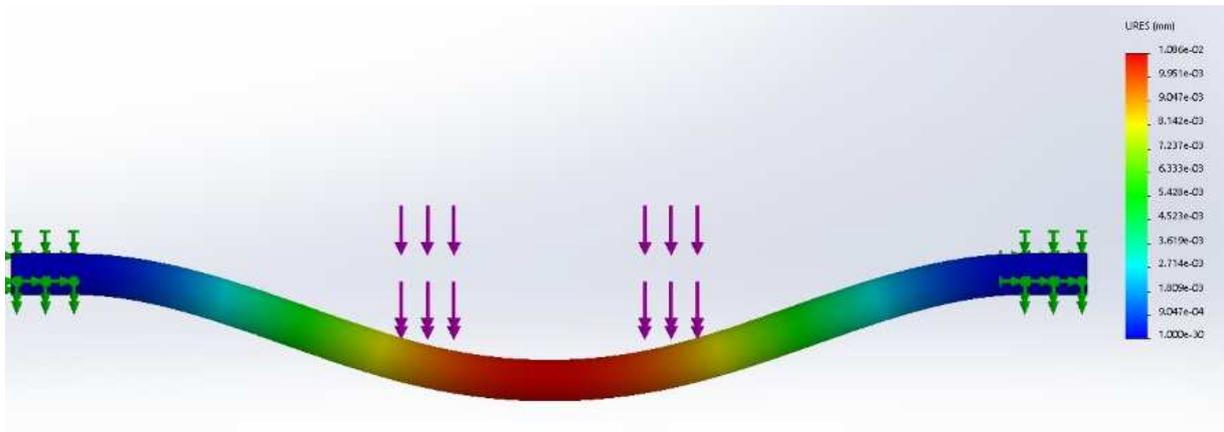


Figura 22: Simulación del desplazamiento del eje de arrastre

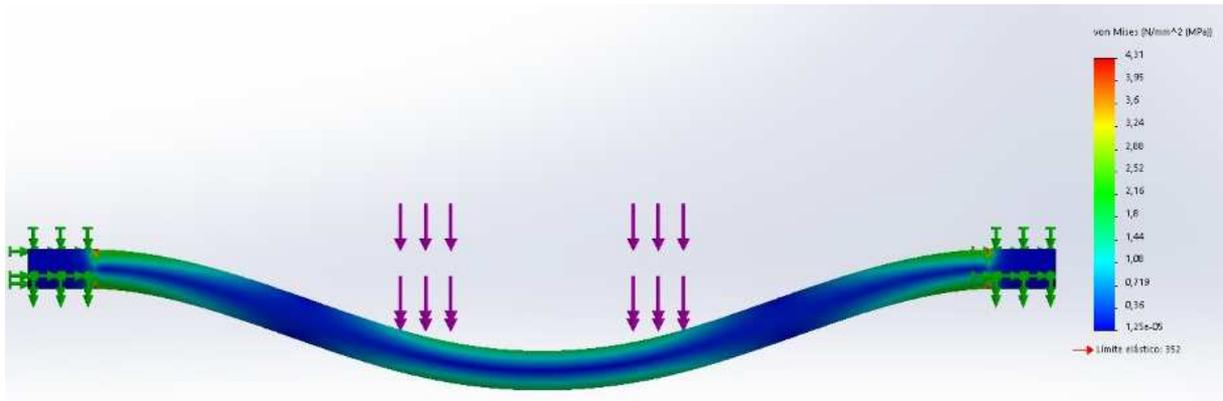


Figura 23: Simulación de tensión de Von Mises del eje de arrastre

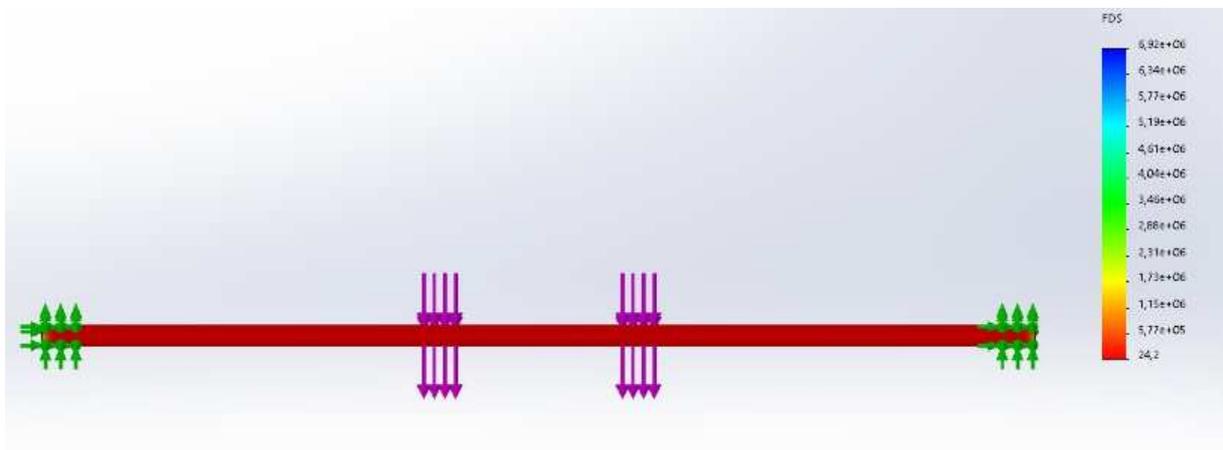


Figura 24: Simulación del factor de seguridad del eje de arrastre

Los valores para cada parámetro son:

- Desplazamiento = 0,157 mm
- Tensión de Von Mises = 14,5 MPa
- Factor de seguridad = 24,2

Corte

La *tabla 14* muestra las condiciones de frontera que se tiene como dato para realizar la simulación del eje.

Tabla 14: Condiciones de frontera

Condiciones de frontera		
1	Longitud	0,409 m
2	Diámetro	0,191 m
3	Material	AISI 1020
4	Sujeción	Fija a los dos extremos
5	Cargas externas	9,81 N (2)

Para la simulación se realiza un análisis estático que trabaja con un mallado sólido estándar.

En las *figuras 25-27* se muestran los resultados.

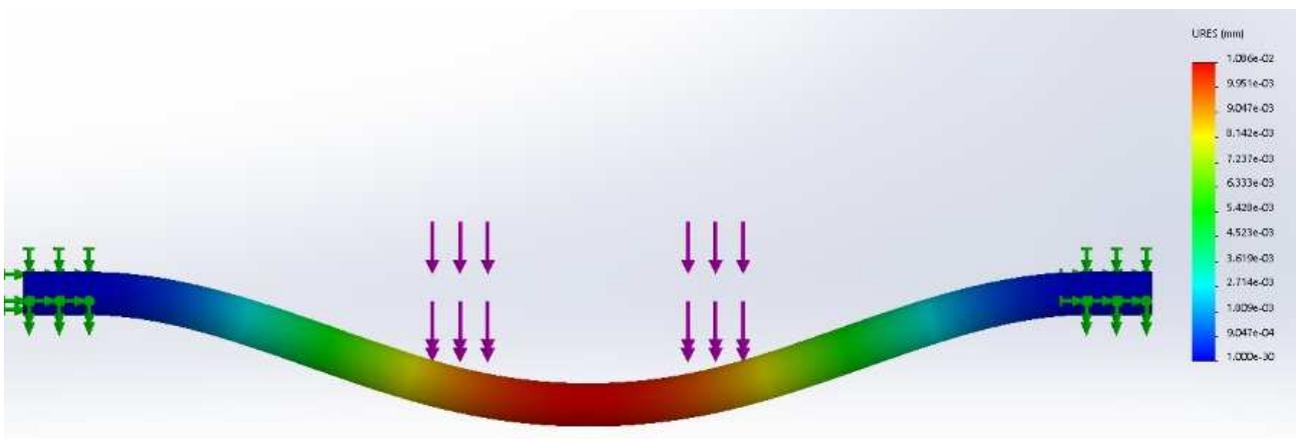


Figura 25: Simulación del desplazamiento del eje de corte

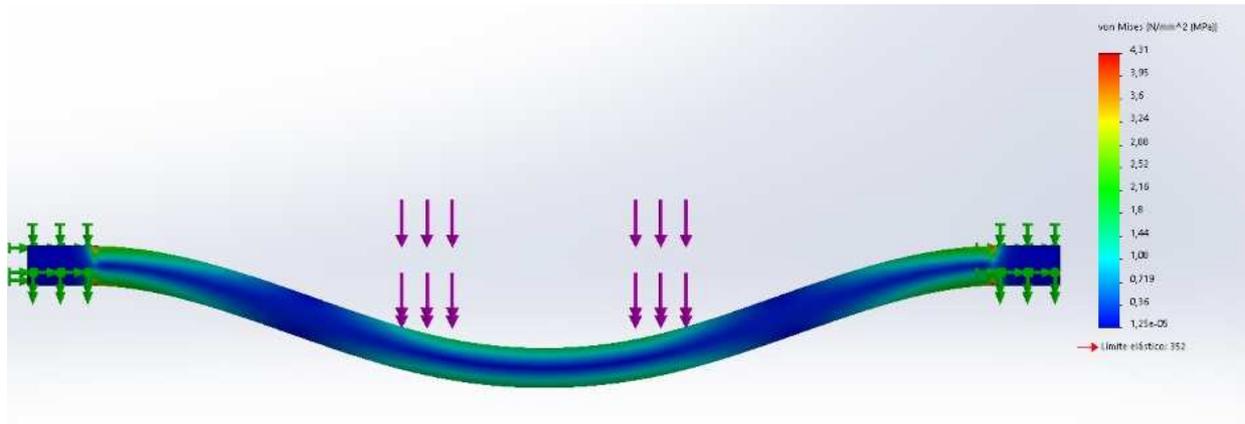


Figura 26: Simulación de tensión de Von Mises del eje de corte

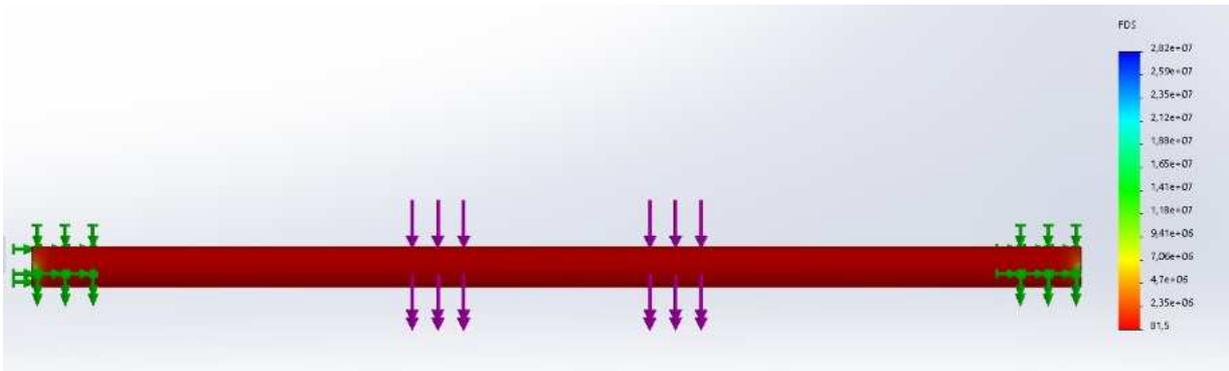


Figura 27: Simulación del factor de seguridad del eje de corte

Los valores para cada parámetro son:

- Desplazamiento = 0,011 mm
- Tensión de Von Mises = 4,31 MPa
- Factor de seguridad = 81,5

CAPÍTULO 4

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se describen todos los detalles acerca de las pruebas experimentales que se realizaron y cómo se llegó hasta eso, considerando como pasos importantes la selección de materiales y la verificación del correcto funcionamiento de la máquina antes y durante las pruebas. Además, se realiza un análisis final que permite determinar si se cumplieron con los objetivos específicos planteados al inicio de este proyecto y que es lo que se sugiere mejorar o cambiar.

4.1. Materiales que intervienen en el proceso

Para la obtención del perfil tipo “I” en cuanto tiene que ver al sistema de arrastre y corte se consideraron los siguientes elementos base:

4.1.1. Cilindros neumáticos de doble efecto

Se utilizan cuatro cilindros neumáticos de doble efecto, para el arrastre uno de 600 x 40 mm, dos de 50 x 20 mm y uno de 300 x 40 mm, esto debido a que es posible manipular sus velocidades de avance y retroceso, que es parte importante del proceso, en la *figura 28* se observa el modelo de cilindro que se adquirió en IMATIC S.A. ubicada en la ciudad de Quito.



Figura 28: Cilindro neumático de doble efecto [36]

A continuación, en las *tablas 15 y 16* se muestran las características y los datos técnicos de los cilindros utilizados:

Tabla 15: Características cilindro neumático de doble efecto [36]

Características	
1	Norma ISO 6431
2	Anillo magnético standard para control de posición
3	Amortiguación regulable en ambas cabezas
4	No requieren lubricación

Tabla 16: Datos técnicos cilindro de doble efecto [36]

Datos técnicos	
Fluido:	Aire comprimido Filtrado, lubricado o no lubricado
Presión de Trabajo:	1 a 9 Bar ~ 15 a 130 PSI
Temperatura de Trabajo:	0°C a 70°C ~ 0°F a 158°F
Amortiguación:	Neumática, Regulable

4.1.2. Electroválvulas

Se utilizan cuatro electroválvulas para controlar el paso del fluido en el sistema de arrastre y corte, la *figura 29* muestra la electroválvula con la que se trabaja.



Figura 29: Electroválvula solenoide 5/2 [36]

En las *tablas 17 y 18* se muestran las características y datos técnicos de la electroválvula:

Tabla 17: Características electroválvula [36]

Características	
1	Servopilotadas
2	Operador manual adicional
3	Libres de mantenimiento
4	Bajo consumo de potencia
5	Facilidad de montaje

Tabla 18: Datos técnicos de la electroválvula [36]

Datos técnicos	
Fluido:	Aire comprimido Filtrado, lubricado o no lubricado
Presión de Trabajo:	1.5 a 8 Bar ~ 21 a 114 PSI
Temperatura de Trabajo:	-5°C a 60°C ~ 23°F a 140°F
Tiempo de Respuesta:	0.05 segundos

4.1.3. Compresor

Para alimentar el sistema neumático se trabaja con un solo compresor que abastece de fluido necesario a todo el sistema neumático (110 psi) para desplazar cada uno de los cilindros, este se muestra en la *figura 30*:



Figura 30: Compresor Campbell Hausfeld

4.2. Construcción del sistema de arrastre y corte

Se trata del resultado final que se obtuvo tras seguir cada uno de los pasos que se consideraron en la metodología, en las *figuras 31-33* se observan el sistema de arrastre, corte y las dos partes en un solo conjunto respectivamente.

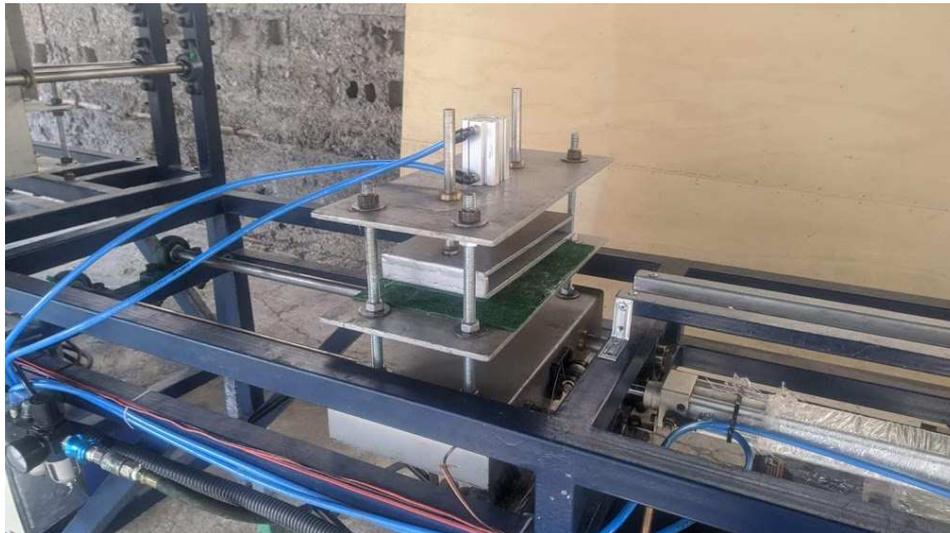


Figura 31: Sistema de arrastre



Figura 32: Sistema de corte



Figura 33: Unión de las dos estaciones

4.3. Funcionamiento de la máquina de pultrusión

Una vez construida la tercera fase (sistema de arrastre y corte) se realiza la experimentación de su funcionamiento, esto ayuda a comprobar si el diseño y selección de componentes satisface los requerimientos para la obtención del perfil tipo “T”.

4.4.Pruebas experimentales

Es necesario validar el correcto funcionamiento de esta fase de la máquina de pultrusión, debido a que es parte fundamental para dar inicio al proceso y mantener continuo en las demás fases durante todo el ciclo de fabricación del perfil. Para ello se en esta ocasión se considera dos tipos de pruebas: al vacío y con el material.

4.4.1. Pruebas en vacío

Se la realiza sin el material y sirve para verificar y corregir varios aspectos como: nivelación de las estructuras, secuencia de los cilindros, movimiento de elementos (identifica cualquier tipo de obstrucción en su área de trabajo), encendido de la amoladora, presión de trabajo, conexiones eléctricas y neumáticas, lubricación, elementos de fijación.

Las pruebas se realizan en la ciudad de Otavalo, lugar donde se encuentra la máquina, para esta fase se tiene consideración los siguientes puntos a evaluar:

Nivelación de las estructuras

Debido a que el proceso es continuo las estructuras deben estar perfectamente niveladas con respecto al piso y también centradas una con otra para que al momento de la transición desde una etapa a la otra no se presente problemas al acoplarse, esto se lo hace con el uso de un nivel regulando los niveladores que se tienen en las patas de las mesas.

Lubricación de ejes

Si los carros (de arrastre y corte) producen sonidos extraños al deslizarse a través de los ejes o se puede apreciar visualmente este detalle se utiliza WD-40, es importante verificar esto para evitar el desgaste de los elementos.

Ajuste de elementos de fijación

Se realiza una inspección visual y de contacto, si es el caso, para asegurarse, se verifica cada punto en donde se encuentran las tornillos y tuercas con una llave.

Velocidades de arrastre y corte

Se modifica las velocidades de los cilindros mediante los reguladores de caudal y utilizando un cronómetro se calcula los diferentes tiempos en los que realiza los recorridos hasta establecer las velocidades adecuadas.

4.4.2. Pruebas con el material

Una vez ajustados los aspectos en vacío, posteriormente, se realizan las pruebas con la intervención de las fases anteriores al arrastre y corte y con la materia prima que interviene en la obtención del perfil, para realizar las pruebas se trabaja con tres variables clave que determinan la estructura final del compuesto, estos son:

- Composición
- Temperaturas
- Velocidades

En la *tabla 19* se puede observar las pruebas que se realizaron:

Tabla 19: Variables para la obtención del perfil pultruido

N° PRUEBA	COMPOSICIÓN				TEMPERATURAS (°C)			VELOCIDADES (m/min)	
	Resina (g)	Catalizador (cc)	Carbonato (g)	Cobalto (cc)	Zona 1 (400 mm)	Zona 2 (300mm)	Zona 3 (300mm)	Arrastre	Corte
1	1000	10	-	-	70	120	170	3,6	-
2	1000	10	-	-	100	150	210	3,6	-
3	1000	20	-	-	70	120	170	3,6	-
4	1000	20	-	-	90	140	190	2,4	-
5	1000	25	-	-	70	120	170	2,4	3,6
6	1000	25	-	-	90	140	190	1,8	2,4
7	1000	25	-	-	80	130	175	1,8	2,4
8	1000	25	100	-	70	120	180	1,6	1,6
9	1000	20	50	-	70	120	170	1,6	-
10	1000	20	-	0,5	70	120	170	1,6	1,6
11	1000	20	100	-	97	150	199	1,6	1,6
12	1000	20	100	0,5	97	150	199	1,6	1,6
13	1000	25	100	-	100	150	190	1,6	1,6
14	1000	25	100	-	100	160	210	1,6	1,6
15	1000	25	50	-	100	150	220	1,6	1,6

Ahora, lo que compete a esta parte del proyecto es hablar acerca de los resultados que se obtuvieron en función de las velocidades consideradas en cada una de las pruebas:

Pruebas 1- 3

Se realiza el arrastre del perfil con la velocidad máxima del cilindro, siendo 3,6 m/min, sale del molde, pero su estructura es demasiado frágil debido a que la velocidad de tracción que impide producir el curado del perfil como se observan en las *figuras 34-36*. Estas pruebas no son aptas para realizar el corte porque produciría una delaminación.



Figura 34: Prueba 1-Perfil con una estructura demasiado frágil



Figura 35: Prueba 2- Perfil frágil que muestra partes que no se compactan correctamente



Figura 36: Prueba 3-Perfil frágil que muestra mejor compactación entre fibras y resina

Prueba 4

Se regula la velocidad de arrastre a 2,4 m/min, el perfil sale del molde, pero el perfil aún no presenta una estructura rígida (debido a que las fibras no pueden compactarse uniformemente, esto impide que este pueda acoplarse a las mordazas de corte, por tal motivo aún no es posible poner a prueba el corte, el resultado se muestra en la *figura 37*.



Figura 37: Prueba 4-Perfil frágil con ciertas partes que no se compactaron correctamente

Prueba 5

La prueba se realiza con la misma velocidad, 2,4 m/min, pero se varían las temperaturas, el perfil sale nuevamente del molde, en la *figura 38* se puede notar que presenta una estructura más rígida que las anteriores, en esta ocasión haciendo posible realizar la prueba de corte. El corte realizado no presenta buen acabado como muestra la *figura 39*, pues, la velocidad máxima del cilindro es demasiado rápida, es más, se produce una delaminación.



Figura 38: Prueba 5-Perfil frágil con mejor compactación, pero poroso



Figura 39: Primera prueba de corte-Se produce una delaminación en su estructura

Pruebas 6 y 7

Se vuelve a disminuir la velocidad de arrastre, esta vez a 1,8 m/min, el perfil sale del molde sin problemas, pero su estructura aún presenta varios inconvenientes, como en la *figura 40*, en donde se puede apreciar que se desprendió una parte al realizar el corte y en la *figura 41* se obtiene un perfil blando, sin embargo, con un mejor acabado en el corte.



Figura 40: Prueba 6-Perfil resistente con incorrecta distribución de fibras en una parte



Figura 41: Prueba 7-Perfil frágil con una excelente interfaz entre matriz y refuerzo

Pruebas 8

Se modifican las velocidades de arrastre y corte al límite mínimo en que pueden operar, 1,6 m/min, en esta parte el perfil no logra salir del molde debido al tiempo que se pierde en el retroceso del cilindro, pero se puede observar en la *figura 42* que la estructura del perfil es más resistente, esto en parte porque se le añadió otra composición a la mezcla (carbonato de calcio).



Figura 42: Prueba 8- Perfil con una estructura resistente

Prueba 9

Las velocidades de arrastre y corte ya no pueden variarse, en esta prueba al disminuir el porcentaje de carbonato el perfil sale de molde, pero con una estructura frágil. La *figura 43* muestra el resultado que se obtuvo, mostrando que realizar el corte sería inapropiado.



Figura 43: Prueba 9- Perfil frágil con distribución de fibras irregular

Prueba 10

Para esta prueba se omite el uso de carbonato de calcio, utilizando otro elemento diferente, el cobalto, que ayuda a agilizar el proceso de curado, pero de la misma manera el tiempo de retroceso del cilindro perjudica el arrastre, por ende, el perfil no logra salir del molde, además en este punto, se considera que el cilindro no proporciona fuerza suficiente para lograr halar el perfil. El resultado se muestra en la *figura 44* con su respectivo corte en la en la *figura 45*.



Figura 44: Prueba 10-Perfil resistente con un buen curado del material



Figura 45: El área en donde se realiza el corte muestra un buen acabado

Prueba 11, 13 y 14

En este punto las pruebas que se pueden realizar son las del corte debido a que desde la prueba 10 en adelante el perfil no logró salir del molde, A continuación, en las *figuras 46-48* se muestran los resultados.



Figura 46: Prueba 11: Perfil resistente con un buen curado



Figura 47: Prueba 13 –Perfil que presenta cierto nivel de cristalización



Figura 48: Prueba 14- Perfil resistente con un excelente curado

Prueba 12

Lo únicos valores que se variaron en comparación con la prueba 10 fueron las temperaturas, la *figura 49* muestra el resultado, descartando por completo el uso de cobalto en la composición.



Figura 49: Prueba 12- Polimerización anticipada en el ingreso del molde

Prueba 15

Se obtienen los parámetros adecuados para la obtención del perfil, con excepción del sistema de arrastre que no proporciona la fuerza necesaria para tirar del perfil y atravesar el molde. La *figura 50* muestra la prueba final.

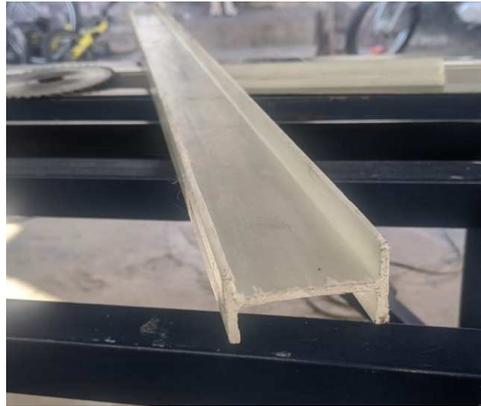


Figura 50: Prueba Final-Perfil resistente con un buen acabado en el área de corte

4.5. Análisis y discusión de resultados

Es necesario recordar que las velocidades óptimas de tracción de las máquinas de pultrusión del mercado se encuentran en un intervalo de 0,2 a 0,4 m/min y la fuerza entre 4 a 6 toneladas [27].

Se propuso probar con cilindros neumáticos con la intención de evitar grandes costes en elementos que proporcionan esa fuerza, tomando en cuenta los siguientes puntos:

- La sección transversal del perfil no es tan grande
- Los cálculos realizados, mostraron que se necesitaba una fuerza de 18,48 N para arrastrar el perfil
- El cilindro neumático proporciona una fuerza de 753 N en avance y 633 N en retroceso.

Claro está que en ocasiones los cálculos no coinciden con las pruebas experimentales por ello se sugiere que para próximos estudios se modifique la parte del sistema de arrastre.

En cuanto al sistema de corte realiza su trabajo de manera correcta, en este punto también es necesario destacar que se realizaron 50 cortes con el disco antes de que este se desgastara completamente.

4.6.Rediseño del sistema de arrastre y corte

La variación que se tiene en esta parte es el uso de dos cilindros hidráulicos que trabajen recíprocamente en lugar de uno solo neumático como se propuso al inicio, aunque esto conlleva grandes costos para su implementación. En la *tabla 20* se muestran las características de cilindros hidráulicos de doble efecto serie V/C [37].

Tabla 20: Características cilindros hidráulicos V/C [37].

Características	
Presión nominal	200 bar
Presión de prueba	375 bar
Temperatura	-30 +90 °C
Aceite	Hidráulico mineral

En el catálogo de INOL se encuentran varios cilindros de esta serie, se escoge uno con las siguientes características: diámetro del vástago 40 mm, diámetro del pistón 70 mm y carrera de 300 mm [37]. Con estos datos se realiza el cálculo de fuerza para determinar si es igual o mayor a la requerida para realizar el arrastre.

Ecuación 10: Área del pistón

$$A = \frac{\pi * D^2}{4}$$

$$A = 38,48 \text{ cm}^2$$

Ecuación 11: Cálculo fuerza cilindro

$$F = \frac{P * A}{10}$$

$$F = 76960 \text{ N} = 7,85 \text{ Ton}$$

El resultado muestra que efectivamente el cilindro elegido cumple con la fuerza para realizar el arrastre. En el Anexo C se muestran los planos de rediseño de la estructura.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES

5.1. Conclusiones

Las fuentes bibliográficas referentes a la obtención de material compuesto a través de la pultrusión contribuyen a conocer de mejor manera los mecanismos comunes que se utilizan para realizar el arrastre y corte durante este proceso, siendo el uso de cilindros hidráulicos reciprocantes y orugas dobles los que sobresalen para el arrastre, a pesar del elevado costo que implica su implementación y sierras automáticas con disco de canto diamantado para el corte, estos elementos son la clave principal, debido a que se ajustan sin mayor inconveniente al proceso continuo que requiere velocidades de desplazamiento y fuerzas establecidas para la obtención del perfil pultruído.

Con las investigaciones previas como soporte se lleva a cabo la ejecución de los pasos sistemáticos que implica el diseño concurrente, permitiendo considerar dos o más opciones que mejor se acoplen a los requisitos previamente establecidos antes de realizar el CAD de los dos sistemas. Además, todos los cálculos analíticos que se realizan contribuyen a la correcta selección de los elementos que forman parte del ensamblaje final y participan como datos que se ingresan para realizar un análisis estático utilizando la herramienta computacional SolidWorks, mismas que intervienen para determinar que el porcentaje de error entre los cálculos analíticos y simulaciones no superen el 10%, obteniendo en este caso el 2%.

Los planos de cada pieza, subconjunto y conjunto que forman parte del ensamblaje final son importantes al momento de trabajar sobre cada uno de estos, su uso es fundamental para que las medidas sean exactas o al menos se encuentren dentro de una tolerancia admisible ($\pm 0,05$). Con

la estructura de las mesas de arrastre y corte construidas, se procede a realizar el montaje de los sub-ensamblajes, piezas, elementos mecánicos, eléctricos, neumáticos y de ajuste, para finalmente sincronizar su comportamiento dentro del proceso.

Las pruebas en vacío de cada sistema son un paso fundamental para validar su correcto funcionamiento y si es necesario corregir cualquier error con anticipación antes de realizar pruebas con carga, requisito que el sistema cumple sin ningún problema, después de esto se prosigue a realizar varias experimentaciones con la materia prima que interviene en la obtención del material compuesto, el corte se realiza sin ningún problema cuando el material presenta una estructura resistente, pero el arrastre muestra inconvenientes, pues, no ejerce fuerza suficiente para jalar el perfil y que este salga del molde.

5.2. Recomendaciones

Tomar en cuenta el rediseño del sistema de arrastre y corte que se plantea en este escrito para obtener mejores resultados en cuando a satisfacer el requerimiento de proceso continuo y fuerza de tracción.

Mantener correctamente lubricados los ejes de deslizamiento de los carros de arrastre y corte para evitar su desgaste rápido y asegurar que se desplacen sin problemas durante el proceso.

Implementar un sistema de aspiración en la fase de corte para evitar que las partículas de resina y fibra de vidrio se expandan en el ambiente.

Nivelar, alinear y empotrar las mesas al piso para que al momento de realizar la tracción de las fibras queden completamente fijas.

Ubicar a la máquina en un lugar con condiciones de temperatura, energía y ambiente propicios para llevar a cabo el proceso, pues son factores que influyen en gran medida las características del perfil pultruido.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Sánchez y J. Jiménez, Diseño y construcción de un prototipo de máquina de pultrusión y estudio experimental de las variables para la obtención de perfiles "O" de material compuesto de matriz termoestable., Quito, 2017.
- [2] Association, European Pultrusion Technology, "World Pultrusion Conference 2018," Viena, 2018.
- [3] M. González, Optimización de las propiedades mecánicas de laminados de resina poliéster reforzado con fibra de vidrio y cargas de carbonato de calcio, México, 2014.
- [4] I. Baran, C. Tutum, J. Hattel and R. Akkerman, "Pultrusion of a vertical axis wind turbine blade part-I: 3D thermo chemical process simulation," *International Journal of Material Forming*, vol. VIII, pp. 379-389, 2015.
- [5] P. A. Beltrán y J. F. Parra, Rediseño de una máquina de pultrusión para materiales compuestos termoestables, Bogotá D. C., 2014.
- [6] D. Chung, «Composite Material Structure and Processing,» de *Composite Materials: Science and Applications*, Segunda ed., London, 2010, pp. 1-34.
- [7] D. Biermann, «Composite Materials,» de *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Segunda ed., S. Chatti , L. Laperrière, G. Reinhart y T. Tolio, Edits., Berlin, 2019, p. 311.
- [8] Thought Co., «Properties of FRP Composites,» [En línea]. Available: <https://www.thoughtco.com/properties-of-frp-composites-820515>. [Último acceso: 10 Noviembre 2019].

- [9] Ph Technology, «Compuestos FRP,» [En línea]. Available: <https://ph-technology.net/materiales/compuestos-frp/>. [Último acceso: 10 Noviembre 2019].
- [10] S. D. Sharma , L. Sowntharya y K. K. Kamal, «Polymer-Based Composite Structures: Processing and Applications,» de *Composite Materials: Processing, Applications, Characterizations*, K. K. Kamal, Ed., Berlin, 2017, pp. 1-36.
- [11] K. K. Chawla, «Matrix Materials,» de *Composite Materials: Science and Engineering*, Tercera ed., New York, 2012, pp. 73-103.
- [12] P. Elsner, F. Henning y K. A. Weidenmann, «Composite materials,» de *Technology Guide: Principles, Applications, Trends*, H. J. Bullinger, Ed., Berlin, 2009, pp. 24-29.
- [13] F. Stupenengo, «Materiales Compuestos,» de *Materiales y Materias Primas*, Buenos Aires, 2011, p. 18.
- [14] D. J. Vaughan, «Fiberglass Reinforcement,» de *Handbook of Composites*, Segunda ed., vol. I, S. T. Peters, Ed., Boston, 1998, pp. 131-155.
- [15] K. Lafdi y M. A. Wright, «Carbon Fibers,» de *Handbook of Composites*, Segunda ed., vol. I, S. T. Peters, Ed., Boston, 1998, pp. 169-201.
- [16] A. Besednjak, *Materiales Compuestos: Procesos de fabricación de embarcaciones*, Barcelona, 2005, p. 35.
- [17] U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, «Composite Materials,» de *Aviation Maintenance Technician Handbook–General (FAA-H-8083-30A)*, Oklahoma, 2018, pp. 7-31.
- [18] B. A. Wilson, «Pultrusion,» de *Handbook of Composites*, Segunda ed., vol. I, S. T. Peters, Ed., Boston, 1998, pp. 488-524.

- [19] SIESA Soluciones Alternativas, «¿Como se obtienen las piezas para las estructuras de fibra de vidrio?,» [En línea]. Available: <https://siesa.global/como-se-obtienen-las-piezas-de-fibra-de-vidrio-prfv-o-frp-2/>. [Último acceso: 12 Noviembre 2019].
- [20] Fiberprofil, «Pultrusión,» [En línea]. Available: <http://fiberprofil.com/pultrusion/que-es/>. [Último acceso: 12 Noviembre 2019].
- [21] R. W. Meyer, Handbook of Pultrusion Technology, New York, 2012, p. 6.
- [22] YouTube, «PRFV SA- Proceso Pultrusion,» [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=oVNAsfqsAnI>. [Último acceso: 12 Noviembre 2019].
- [23] Unicomposite, «Mould Forming Process of Fiberglass pultrusion,» [En línea]. Available: <http://www.unicomposite.com/news/Mould-Forming-Process-of-Fiberglass-pult.html>. [Último acceso: 12 Noviembre 2019].
- [24] A. M. Fairuz, S. M. Sapuan, E. S. Zainudin y C. N. Jaafar, «Pultrusion Process of Natural Fibre-Reinforced Polymer Composites,» de *Manufacturing of Natural Fibre Reinforced Polymer Composites*, M. S. Salit, M. Jawaid, N. B. Yusoff y M. E. Hoque, Edits., Cham, 2015, pp. 217-231.
- [25] Ashiravd Industries, «Pultrusion Process,» [En línea]. Available: <https://ashirvadind.com/products/pultrusion-process/>. [Último acceso: 13 Noviembre 2019].
- [26] Flotenk, «Pultrusion,» [En línea]. Available: <http://www.flotenk.ru/articles/pultruziya/>. [Último acceso: 13 Noviembre 2019].
- [27] T. F. Starr, Ed., Pultrusion for engineers, New York: Elsevier, 2000, p. 40.
- [28] J. W. Gooch, «Pultrusion,» de *Encyclopedic Dictionary of Polymers*, J. W. Gooch, Ed., New York, 2011, p. 481.

- [29] YouTube, «Pultrusion,» [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=D2ZMejajgtA>. [Último acceso: 15 Noviembre 2019].
- [30] Fibrolux, «El proceso de pultrusión,» [En línea]. Available: <https://fibrolux.com/es/prfv/datos-de-interes/pultrusion/>. [Último acceso: 16 Noviembre 2019].
- [31] Manufacturas de Plásticos Reforzados S.L., «El proceso de pultrusión y características,» [En línea]. Available: http://www.mplr.net/wp-content/uploads/2012/03/MP_Caracteri%CC%81ticas-PRFV-perfiles1.pdf. [Último acceso: 16 Noviembre 2019].
- [32] H. Kim, W. Lee y K. Friedrich , «A model for a thermoplastic pultrusion process using commingled yarns,» de *Composites science and technology*, 2001, p. 1077.
- [33] [En línea]. Available: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/bonilla-mercado_jc/apendiceB.pdf. [Último acceso: 29 Enero 2020].
- [34] [En línea]. Available: http://platea.pntic.mec.es/~jgarrigo/1bch/archivos/3eva/7_actuadores_neumaticos.pdf. [Último acceso: 29 Enero 2020].
- [35] «DIPAC PRODUCTOS DE ACERO,» [En línea]. Available: <http://www.dipacmanta.com/aisi-1018-transmision>. [Último acceso: 6 Febrero 2020].
- [36] «AIRTAC,» [En línea]. Available: <http://www.mercado-ideal.com/catalogosa/AIRTAC%20CATALOGO.pdf>. [Último acceso: 11 Febrero 2020].
- [37] «INNOVACIONES HIDRÁULICAS,» [En línea]. Available: https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/128349/Catalogo-general-Innovaciones-Hidraulicas.pdf. [Último acceso: 17 Febrero 2020].

ANEXOS

ANEXO A: Casa de la calidad

ANEXO B: Planos del primer diseño del sistema de arrastre y corte

ANEXO C: Planos del rediseño propuesto

ANEXO D: Manual de mantenimiento