



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DE MÁQUINA EXTRACTORA DE  
FIBRAS DE POLIÉSTER A PARTIR DE BOTELLAS RECICLADAS PET,  
CON UNA CAPACIDAD DE 5 kg/h**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingenieros Mecánicos

**AUTORES: PAÚL MARCELO CÁRDENAS TOAPANTA  
IVÁN ANDRÉS MORALES ATAHUALPA**

**TUTOR: RENÉ PATRICIO QUITIAQUEZ SARSOZA**

Quito – Ecuador

2022

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Paúl Marcelo Cárdenas Toapanta con documento de identificación N° 1721487906 e Iván Andrés Morales Atahualpa con documento de identificación N° 1720921608, manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 19 de septiembre de 2022

Atentamente,



---

Paúl Marcelo Cárdenas Toapanta  
1721487906



---

Iván Andrés Morales Atahualpa  
1720921608

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL  
TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA  
SALESIANA**

Nosotros, Paúl Marcelo Cárdenas Toapanta , con documento de identificación N° 1721487906 e Iván Andrés Morales Atahualpa con documento de identificación N° 1720921608, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana, la titularidad sobre los derechos patrimoniales, en virtud de que somos autores del Proyecto Técnico: “Diseño y construcción de una máquina para la obtención de fibra de poliéster a partir de botellas recicladas PET, con una capacidad de 5 kg/h”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en forma digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 19 de septiembre de 2022

Atentamente,



---

Paúl Marcelo Cárdenas Toapanta  
1721487906



---

Iván Andrés Morales Atahualpa  
1720921608

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, René Patricio Quitiaquez Sarsoza, con documento de identificación N° 1710597269, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DE MÁQUINA EXTRACTORA DE FIBRAS DE POLIÉSTER A PARTIR DE BOTELLAS RECICLADAS PET, CON UNA CAPACIDAD DE 5 kg/h”, realizado por Paúl Marcelo Cárdenas Toapanta , con documento de identificación N° 1721487906 e Iván Andrés Morales Atahualpa con documento de identificación N° 1720921608, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 19 de septiembre de 2022

Atentamente,



---

Ing. René Patricio Quitiaquez Sarsoza, MSc

1710597269

## **Dedicatoria**

Esta tesis está dedicada a mis padres Marcelo Cárdenas y Marina Toapanta quienes, con su amor y paciencia me han permitido cumplir hoy un sueño, gracias por inculcar en mi ejemplo de respeto, honestidad y esfuerzo. Además, a mis hermanos, por su cariño y respaldo incondicional, desde el primer día que decidí tomar mi camino profesional. A todas las personas que me han apoyado y que han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que me abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

*Paúl*

En dedicatoria a Dios, por ser creyente en él, a mi madre Inés, mis abuelos maternos y paternos que su bendición guía mi vida desde el cielo y fueron mi soporte al no dejar quebrantar mi camino de ser un profesional, mi padre Iván por su sustento y valores inculcados a mis hermanos y familia por su paciencia e interés por ser alguien en la vida. En especial a todas esas personas que llegaron en un punto de mi vida y me dieron consejos y aliento para llegar a ser un profesional, y no dejarme vencer a pesar de tantas caídas que obtuve en este trayecto

*Iván*

## **Agradecimiento**

Agradecemos a los docentes de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de nuestra formación profesional.

Agradecemos de manera especial al tutor de este Trabajo de Titulación, Ingeniero Patricio Quitiaquez, MSc., por el tiempo, paciencia y dedicación durante la elaboración de esta investigación quienes nos han guiado con su paciencia, y su rectitud como docentes.

*Paúl e Iván*

## Índice de contenido

<b>CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....</b>	<b>ii</b>
<b>CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA .....</b>	<b>iii</b>
<b>CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....</b>	<b>iv</b>
<b>Dedicatoria.....</b>	<b>v</b>
<b>Agradecimiento .....</b>	<b>vi</b>
<b>Índice de contenido .....</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de tablas.....</b>	<b>x</b>
<b>Índice de figuras .....</b>	<b>xi</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>xiv</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo I .....</b>	<b>7</b>
<b>Marco contextual y teórico del proyecto .....</b>	<b>7</b>
1.1. Polímero .....	7
1.2. Clasificación de los polímeros.....	7
1.3. PET .....	8
1.3.1. Formación del Tereftalato de polietileno .....	8
1.3.2. Propiedades del tereftalato de polietileno.....	8
1.3.3. Aplicaciones del tereftalato de polietileno .....	9
1.4. Reciclaje .....	10
1.4.1. Reciclaje de PET .....	10
1.4.2 PET virgen y PET reciclado .....	10
1.4.3. Tipos de reciclajes para el PET .....	11
1.4.4. Reciclaje de botellas PET en Ecuador.....	12
1.5. Máquinas usadas para el reciclado del PET .....	13
1.5.1. Máquina de extrusión .....	13
1.5.2. Máquina de soplado.....	14
1.5.3. Máquina de fibra PET .....	15
1.6. Análisis de alternativas.....	15
1.6.1. Identificación de necesidades .....	15
1.6.2. Alternativas de solución .....	16

1.6.3. Elección de la mejor alternativa .....	16
1.7. Conclusión del capítulo .....	17
<b>Capítulo II.....</b>	<b>18</b>
<b>Elementos de diseño .....</b>	<b>18</b>
2.1. Selección del motor .....	19
2.2. Eje o flecha de la máquina.....	20
2.2.1. Esfuerzo en la flecha o eje.....	20
2.2.2. Límite a la resistencia a fatiga .....	21
2.2.3. Factor de seguridad para flecha o eje .....	24
2.3. Chasis o estructura de la máquina .....	24
2.3.1. Esfuerzo en vigas.....	25
2.3.2. Esfuerzo en columnas.....	26
2.4. Selección de cojinetes.....	29
2.5. Diseño de conexiones .....	33
2.5.1. Conexión apernada .....	33
2.5.2. Conexión por soldadura de arco eléctrico (SMAW) .....	35
2.5.3. Elección de varilla de aporte o electrodo .....	36
2.6. Conclusión del capítulo .....	37
<b>Capítulo III .....</b>	<b>38</b>
<b>Cálculos y diseño de la maquina fibradora .....</b>	<b>38</b>
3.1. Diseño de flecha de la máquina.....	38
3.1.2. Resistencia de la flecha o eje a la fatiga .....	39
3.1.3. Factor de seguridad en ejes.....	40
3.2. Chasis o estructura de la máquina .....	41
3.2.1. Esfuerzo en vigas.....	44
3.2.2. Esfuerzo en columnas.....	45
3.3. Selección de cojinetes.....	46
3.4. Conexión apernada .....	47
3.5. Conexión soldada .....	48
3.5.1. Elección del electrodo .....	49
3.6. Validación de los componentes mediante software.....	50
3.6.1. Estructura.....	50
3.6.2. Desplazamiento .....	51
3.6.3. Factor de seguridad.....	51
3.6.4. Flecha o eje de transmisión .....	52

3.6.5. Desplazamiento .....	52
3.6.6. Factor de seguridad.....	53
3.7. Conclusiones del capítulo.....	53
<b>Capítulo IV .....</b>	<b>54</b>
<b>Análisis financiero y resultados de la máquina fibradora.....</b>	<b>54</b>
4.1. Análisis Financiero .....	54
4.1.1. Flujo neto.....	56
4.1.2. Valor Actual Neto (VAN) .....	57
4.1.3. Tasa Interna de Retorno (TIR) .....	58
4.1.4. Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) .....	58
4.2. Pruebas y Resultados.....	59
4.2.1. Tiempo para la temperatura de fundición del PET.....	59
4.2.2. Temperatura y estado del PET .....	60
4.2.3. Comparación de la capacidad real de la máquina con la capacidad teórica .....	60
4.2.4. Capacidad real de la máquina.....	60
4.3. Resultado final.....	61
<b>Conclusiones .....</b>	<b>62</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>63</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>64</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>73</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Propiedades Térmicas del PET [37].....	9
<b>Tabla 2.</b> Análisis calificativo para las alternativas [67]. .....	16
<b>Tabla 3.</b> Argumentos de cada necesidad .....	17
<b>Tabla 4.</b> Componentes de la máquina. ....	18
<b>Tabla 5.</b> Diámetro de las fibras de rPET a distintas velocidades de rotación [69]19	
<b>Tabla 6.</b> Coeficientes para hallar el factor de acabado superficial [72]. .....	22
<b>Tabla 7.</b> Coeficientes para el factor de modificación de tamaño [73].....	22
<b>Tabla 8.</b> Factor de carga $k_c$ [72] .....	22
<b>Tabla 9.</b> Coeficientes para determinar el factor de temperatura [74].....	23
<b>Tabla 10.</b> Coeficiente de fiabilidad $k_e$ [73] .....	23
<b>Tabla 11.</b> Coeficiente de fiabilidad $a_1$ [86] .....	30
<b>Tabla 12.</b> Valores de factores de modificación. ....	39
<b>Tabla 13.</b> Valores de cargas previamente obtenidos .....	41
<b>Tabla 14.</b> Valores obtenidos del catálogo SKF [86]. ....	46
<b>Tabla 15.</b> Valores diarios y anuales promedio de trabajo .....	54
<b>Tabla 16.</b> Ingresos proyectados para tres años. ....	54
<b>Tabla 17.</b> Porcentaje de remuneración con relación a las horas trabajadas .....	55
<b>Tabla 18.</b> Egresos mensuales .....	55
<b>Tabla 19.</b> Inversión para la construcción de la máquina Fibradora .....	55
<b>Tabla 20.</b> Flujo neto en tres años.....	57
<b>Tabla 21</b> Condiciones del VAN [98].....	57
<b>Tabla 22.</b> Condiciones para el TIR [99]. .....	58
<b>Tabla 23</b> Flujos acumulado en tres años .....	59
<b>Tabla 24.</b> Tiempos de la máquina para llegar a la temperatura de operación .....	59
<b>Tabla 25.</b> Temperatura de operación y estado del material.....	60

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Proyección de los residuos plásticos si no tomamos medidas [5].	1
<b>Figura 2.</b> Caracterización de residuos plásticos en Quito [7] [8].	2
<b>Figura 3.</b> PET recogido de botellas se utiliza en otras aplicaciones [22].	4
<b>Figura 4.</b> Tejado de plástico reciclado [26].	5
<b>Figura 5.</b> Código de identificación de la resina PET [32].	8
<b>Figura 6.</b> Estructura molecular del PET [35].	8
<b>Figura 7.</b> Principales aplicaciones del tereftalato de polietileno [40].	9
<b>Figura 8.</b> Tasa (%) global de reciclaje del año 2017 [45].	10
<b>Figura 9.</b> Esquema del reciclaje mecánico del plástico [52].	11
<b>Figura 10.</b> Esquema del reciclaje químico del plástico [55].	12
<b>Figura 11.</b> PET es exportado en forma de hojuelas y pellets [57].	13
<b>Figura 12.</b> Tornillo y tambor de extrusión [62].	14
<b>Figura 13.</b> Esquema de soplado con molde de botella [64].	14
<b>Figura 14.</b> Máquina de fibra PET [66].	15
<b>Figura 15.</b> Esquema del proceso para la obtención de Fibra PET [68].	18
<b>Figura 16.</b> Tabla de motores WEG [70].	19
<b>Figura 17.</b> Formas de cálculo de $Se'$ para los diferentes materiales [71].	21
<b>Figura 18.</b> Concentrador de esfuerzo, en torsión y perforación transversal [72].	23
<b>Figura 19.</b> Parámetros para la selección de factor de seguridad (N) [73].	24
<b>Figura 20.</b> Base y estructura de la máquina diseñado en Inventor Profesional.	25
<b>Figura 21.</b> Esfuerzo de flexion.	26
<b>Figura 22.</b> Coeficiente de longitud efectiva, K [76] [77].	27
<b>Figura 23.</b> Tablas de la AISC para tensión admisible [76] [77].	28
<b>Figura 24.</b> Catálogo de rodamiento rígido de una hilera de bolas [86].	29
<b>Figura 25.</b> Coeficientes de cálculo en rodamientos rígidos de bolas [86].	30
<b>Figura 26.</b> Cálculo de la viscosidad cinemática [86].	31
<b>Figura 27.</b> Clasificación de la viscosidad según la norma ISO 3448 [86].	31
<b>Figura 28.</b> Cálculo de la viscosidad nominal [86].	32
<b>Figura 29.</b> Valores del coeficiente $a_{23}$ [86].	33
<b>Figura 30.</b> Elementos involucrados en una conexión (Soldada, apernada) [88].	33
<b>Figura 31.</b> Ecuaciones necesarias para determinar la rigidez en pernos [71].	34
<b>Figura 32.</b> Área de esfuerzo sometida a tensión [71].	35
<b>Figura 33.</b> Soldadura por arco eléctrico y electro con alma fundente [92].	36
<b>Figura 34.</b> Esfuerzo de un cordón de soldadura [97].	37
<b>Figura 35.</b> Fuerzas y reacciones presentes en la máquina.	41
<b>Figura 36.</b> Diagrama de corte y momento flector máximo de la sección 1.	42
<b>Figura 37.</b> Diagrama de corte y momento flector de la sección 2.	43
<b>Figura 38.</b> DCL de la base del motor.	47
<b>Figura 39.</b> Diagrama de cuerpo libre de una típica soldadura [97].	48
<b>Figura 40.</b> Tensión de Von Mises.	50
<b>Figura 41.</b> Desplazamiento con respecto al eje Y.	51
<b>Figura 42.</b> Coeficiente de seguridad de la estructura.	51
<b>Figura 43.</b> Esfuerzo de tensión en el eje.	52
<b>Figura 44.</b> Desplazamiento del eje.	52
<b>Figura 45.</b> Coeficiente de seguridad del eje.	53

<b>Figura 47.</b> Grafica de alimentación vs tiempo.....	61
<b>Figura 48.</b> Fibra PET obtenida.....	61

## Resumen

El presente proyecto técnico se empleó para aumentar la actividad vinculada a la protección del medio ambiente, a través del diseño y construcción de una máquina la cual permite obtener fibra poliéster a base de botellas recicladas PET. La fibra se obtuvo por hilatura centrífuga, que es un sistema alternativo, donde la velocidad centrífuga empuja el fluido a través de las perforaciones en el plato de fibrado, mientras el fluido pasa por dichas perforaciones, se estira por la fricción del aire y luego se enfría y solidifica rápidamente.

La elaboración de esta máquina tiene el afán de reducir los focos de contaminación por botellas plásticas, como también, beneficiar a los recicladores y pequeñas empresas de la industria del plástico que por las limitaciones tecnológicas solo son para recolección.

Las fibras PET producidas son discontinuas y sus principales usos son en el relleno de colchones y almohadas, también por su parecido con la fibra de vidrio o fibra de roca se lo puede emplear como aislante termoacústico en proyectos de construcción inmobiliaria. Las fibras se dan por dos fenómenos; la fundición con resistencias eléctricas, de hojuelas PET en el cañón de la máquina a 260 °C y las velocidades de giro generadas por un motor a 3520 RPM.

Este estudio proporciona una descripción técnica de la construcción de la máquina para producir la fibra PET. Para poner en funcionamiento la máquina se recomienda leer el manual de operación, y dar un mantenimiento preventivo principalmente en el eje y chumaceras ya que son las más críticas debido a las altas velocidades a las que están sometidas.

**Palabras claves:** Tereftalato de Polietileno, fibra poliéster, botellas plásticas.

## **Abstract**

This technical project was used to increase the activity linked to the protection of the environment, through the design and construction of a machine which allows obtaining polyester fiber from recycled PET bottles. The fiber was obtained by centrifugal spinning, which is an alternative system, where the centrifugal speed pushes the fluid through the perforations in the spinning plate, while the fluid passes through said perforations, is stretched by air friction and then cools and solidifies rapidly.

The development of this machine is intended to reduce the sources of pollution from plastic bottles, as well as to benefit recyclers and small companies in the plastics industry that, due to technological limitations, are only for collection.

The PET fibers produced are discontinuous and their main uses are in the filling of mattresses and pillows, also because of its resemblance to fiberglass or rock fiber it can be used as thermo-acoustic insulation in real estate construction projects. The fibers were produced by two phenomena; the melting with electrical resistances of PET flakes in the machine barrel at 260 oC and the rotational speeds generated by a motor at 3520 RPM.

This study provides a technical description of the construction of the machine to produce PET fiber. To start up the machine, it is recommended to read the operation manual and to perform preventive maintenance mainly on the shaft and bearings, since they are the most critical due to the high speeds they are subjected to.

**Keywords:** Polyethylene terephthalate, polyester fiber, plastic bottles.

## Introducción

Las botellas plásticas son un producto derivado del petróleo, usado por sus características como, resistencia, durabilidad, limpieza y bajo costo, este producto se lo conoce como un polímero llamado Tereftalato de polietileno o por sus siglas en inglés PET.

Al plástico le toma 500 años en descomponerse, por lo que se convierte en una amenaza para el medio ambiente, según la información las Naciones Unidas [1], una cantidad de 8 millones de toneladas del plástico PET va a los mares como desecho cada año, esto quiere decir, que la velocidad a la que se consumen estos productos significará que para 2050 habrá más desechos plásticos en el océano que peces.

Las botellas de plástico, si no se reciclan, terminan enterradas, incineradas o apiladas en vertederos. Si las botellas de PET no se reciclan, se convertirán en una fuente de contaminación y pérdida de materias primas. [2]. El reciclaje es clave para mitigar los desechos PET acumulados en los vertederos municipales, lo que reducirá los costos de eliminación que debe pagar el estado, así como las consecuencias ambientales adversas. [3].

Por la mala gestión de los desechos PET, se estima que, del año 2016 con 91 millones de toneladas, en el año 2040 habrá alrededor 239 millones de toneladas de desecho PET, lo alarmante es que solo el 9 % de este material se ha reciclado y el 12 % ha sido incinerado, con los impactos ambientales que esto implica [4] [5]. En la Figura 1 se muestra la proyección de los residuos.

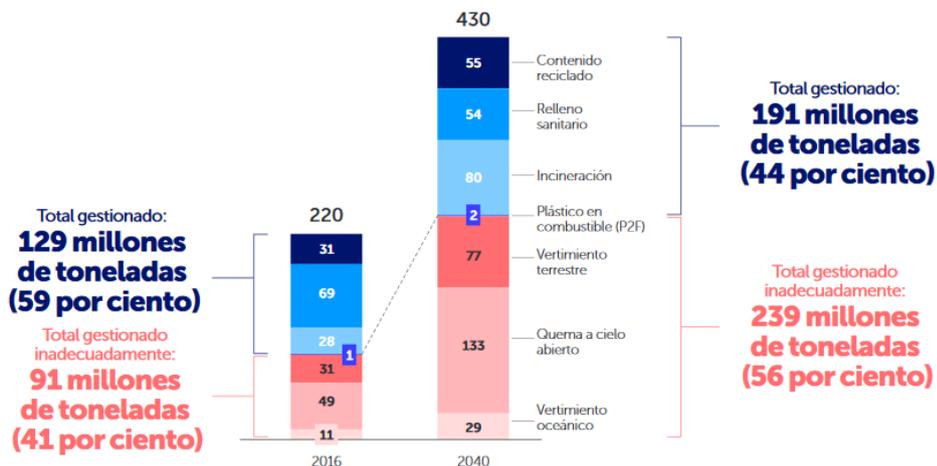
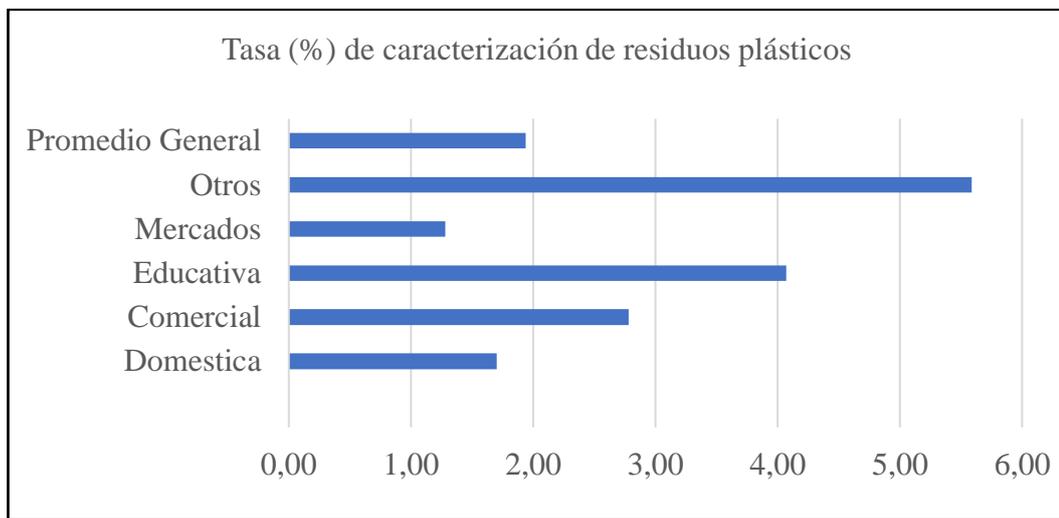


Figura 1. Proyección de los residuos plásticos si no tomamos medidas [5].

Según el Ministerio del Medio Ambiente [6] , el 3.4 % de las botellas de PET son recicladas por recicladores informales. La Empresa Metropolitana de Aseo de Quito (EMASEO) [7] asegura que la población quiteña concentra el 1.94 % de los residuos en botellas PET consumidos por persona al día. Quito genera una gran cantidad de residuos plásticos, produciendo alrededor de 490 millones de botellas de plástico al año [8]. La Figura 2 muestra la caracterización de residuos plásticos en Quito.



**Figura 2.** Caracterización de residuos plásticos en Quito [7] [8].

Según el Acuerdo No. 19 del Ministerio del Medio Ambiente [9], tiene como objetivo, instalar en diferentes etapas de producción y consumo, la reducción de los residuos PET, aumentando la producción de materiales a través de la reutilización de residuos PET y el reciclaje, sin dañar el medio ambiente o al menos reduciendo su ocurrencia y persistencia.

La necesidad de la industria de utilizar tecnologías verdes y sistemas sustentables, así como la conciencia de reducir su huella de carbono, ha llevado a la industria de polímeros, como usuaria de derivados petroquímicos, a enfocarse en el desarrollo de tecnologías para materias primas de fuentes renovables y/o reciclables [10].

El uso de productos reciclados disminuye el consumo energético. En otras palabras, se libera menos CO<sub>2</sub> al medio ambiente, cerca de 1.5 kilogramos, esto ayuda a mitigar el efecto invernadero. En términos de energía calorífica, una botella plástica debidamente tratada puede generar energía suficiente para encender una bombilla de 60 W por 90 minutos [11].

El estudio de Elven [12] muestra que el poliéster reciclado es cualitativamente similar al poliéster virgen, pero requiere un 59 % menos de energía para producirlo que el poliéster virgen, por otro lado, un estudio realizado por la Oficina Federal de la Agencia Suiza de Medio Ambiente en 2017 (WRAP) [13] estima que la producción de PET reciclado disminuye la emisión de CO<sub>2</sub> en un 32 %.

La obtención de PET reciclado utiliza aproximadamente un 90 % menos de agua comparado con la elaboración de PET virgen, y el proceso de conversión del PET en poliéster reciclado requiere mucha menos energía, entre 33 y 55 % menos que la producción de poliéster virgen [14].

Reciclar plástico no solo es primordial para reducir la contaminación al medio ambiente, sino que ha generado empleos en; su producción, recuperación y reciclaje, convirtiéndolo en diferentes materiales tales como: otras botellas, hilados textiles, láminas de planchaje, entre otros [15] [16]. Según ECOCE [17], una organización privada muestra que, el sector del reciclaje de PET genera empleos aproximadamente en 2.900 empleos directos y 35.000 indirectos.

Johnson [18] menciona que, el reciclaje, el uso y la reducción de residuos plásticos es una razón fantástica para utilizar plásticos reciclados, se necesita 9 botellas de agua de plástico transparente para hacer una camiseta, 25 botellas de plástico para hacer un pantalón, y 12 botellas para una camiseta polo, Sarioğlu y Kaynak [19] sostienen que, debe ser valorado como una responsabilidad social el uso de la fibra de PET en productos textiles en una cierta proporción para mantener la naturaleza.

La investigación de Gupta et al. [20] muestra que, el uso de textiles de PET reciclado reduce los daños en los tejidos textiles en un 10 %, además de ser un impacto positivo al ecosistema, con el incremento del consumo de ropa modesta en todo el mundo, se recomienda el consumo de tejido alternativo (PET reciclado). El uso de PET reciclado supone una disminución del 16 % de CO<sub>2</sub>, 20 % Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y 45 % de Fosfatos (PO<sub>4</sub>) respecto del PET virgen, además, permite la reutilización de materiales para que tengan una segunda vida, evita la explotación de nuevos recursos fósiles y eventualmente se convierte en un material 100 % reciclable, el producto recobrado tiene un alto valor agregado para la industria. [21].

El estudio de Martínez [22] muestra que a lo que respecta a reciclaje del PET, se recicla el 28.5 % de los envases y el 0.2 % de las fibras, en cuanto al reciclaje botella a botella, suman 500000 toneladas al año, lo que representa el 3 % del uso de PET para envases, y se reciclan 3.5 millones de toneladas de envases para fibras, y 700 mil toneladas para lámina y fleje. La Figura 3 muestra las aplicaciones del PET reciclado.

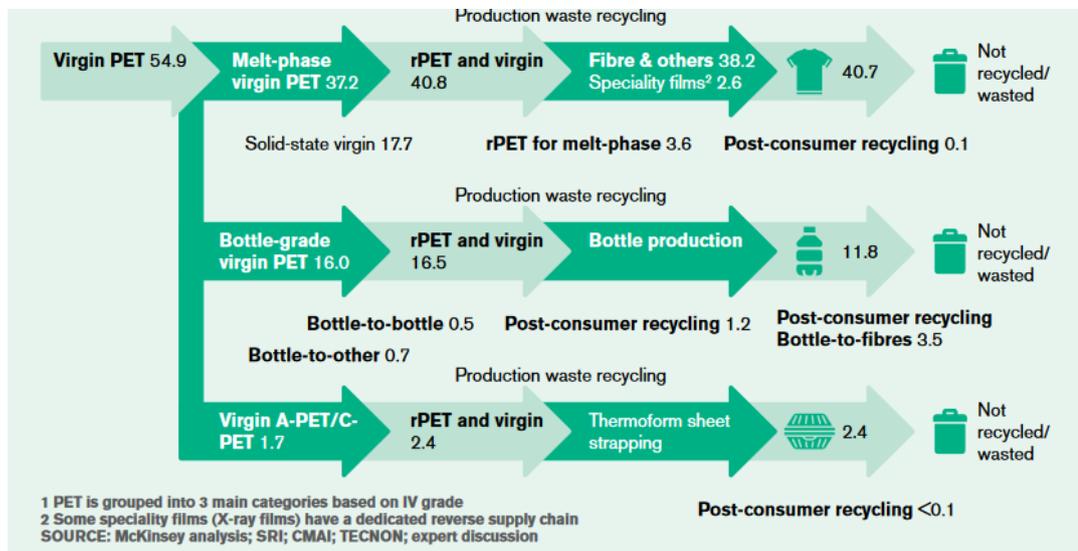


Figura 3. PET recogido de botellas se utiliza en otras aplicaciones [22].

La investigación de Manjarekar et al. y Almeshal et al. [23] [24] muestra que, los ladrillos con adición de residuos de botellas plásticas aumentan su resiliencia a la compresión del ladrillo a  $9.53 \text{ N/mm}^2$  lo que es el doble que la resiliencia a la compresión de los ladrillos convencionales con un peso de 3.31 kg, estos ladrillos con adición de plástico también son económicos ya que utilizarlos en la construcción de un edificio, reduce del 20 % al 25 % del coste total.

Bamigboye et al. [25] concluyen que, las tejas de PET reciclado tienen estimaciones de absorción de agua en 0.01 %, lo que las hace impenetrables al contrario que las tejas de micro hormigón, también la composición con 40 y 50 % de hojuela de PET reciclado da los mejores resultados tanto física como mecánicamente, lo que implica que las tejas de PET reciclado pueden ser utilizadas en lugar de las tejas de micro hormigón. La Figura 4 muestra la teja plástica.



**Figura 4.** Tejado de plástico reciclado [26].

Martínez et al. [27] obtuvieron de su investigación, tableros de madera plástica con resistencia estática de 24.6 MPa, la compresión longitudinal fue de 142.4 MPa y la resistencia a la tracción fue de 32.8 MPa, estos resultados se pueden dar por la relación proporcional entre densidad y propiedades mecánicas, este tratamiento logra una densidad de  $1206 \text{ Kg.m}^{-3}$ , teniendo en cuenta estos resultados, se pueden obtener paneles de madera de alta calidad a partir de residuos forestales reciclados y termoplásticos, por lo que se recomienda que dichos paneles de madera se utilicen eficazmente en edificios.

En la actualidad el reciclaje ya no es una opción, sino una necesidad de la que hay que hacerse cargo, a nivel mundial se ha creado protocolos y campañas que promueven la reutilización, reducción y reciclaje de botellas PET, además, muchos investigadores buscan nuevos métodos de uso de tereftalato de polietileno. Por esta razón, la intención de este proyecto tiene como objetivo implementar una máquina para producir fibra a partir de botellas PET.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Diseñar y construir una máquina extractora de fibras de poliéster a partir de botellas recicladas PET, con una capacidad de 5 kg/h

### **Objetivos específicos**

- Analizar la información relacionada a los diferentes mecanismos utilizados para la extracción de fibra PET.
- Diseñar y calcular los principales elementos que componen la máquina.
- Validar cálculos mediante simulación de los elementos mecánicos.
- Establecer el rendimiento de la máquina mediante la comparación de la capacidad teórica vs la capacidad real.
- Evaluar la factibilidad económica del proyecto mediante indicadores financieros.

## Capítulo I

### Marco contextual y teórico del proyecto

En este capítulo se explicará los principios teóricos que respaldan la investigación y el desarrollo del proyecto propuesto, a través del estudio y análisis de soluciones existentes. Se tratan las principales definiciones relacionadas con el PET y su empleo como materia prima. Se describen los procesos para reciclar el PET y se fundamenta la utilización de una máquina para la obtención de fibra para el presente proyecto.

#### 1.1. Polímero

Un polímero es una molécula grande formada por la asociación repetida de una o varias moléculas más pequeñas (monómeros), entrelazadas entre sí por enlaces covalentes, dependiendo de su origen, pueden ser naturales o sintéticos [28]. El plástico es un polímero que se deforma cuando se somete a esfuerzos mecánicos y no vuelve posteriormente a su forma original [29]. Los polímeros se pueden encontrar en la naturaleza, tales como: celulosa, almidón, proteínas, látex; los polímeros sintéticos, en cambio, están formados por moléculas derivadas del petróleo, gas natural, carbón, tales como: polietileno, polipropileno, PVC y Teflón [30].

#### 1.2. Clasificación de los polímeros

Teniendo en cuenta el comportamiento térmico es posible crear una clasificación de polímeros.

Polímeros termoplásticos: Polímeros de este grupo que pueden recuperar sus propiedades originales después de calentarse, fundirse o ablandarse. Es decir, no sufren cambios químicos y estos polímeros suelen tener una estructura lineal, lo que los hace menos rígidos, resistentes y se funden a baja temperatura, no es bueno como conductor térmico o eléctrico y generalmente es soluble en solventes orgánicos. Ejemplos de estos polímeros son el polietileno, el polipropileno, el PVC o la poliamida [29].

Resinas Termoestables: Son polímeros que tienen una estructura reticulada y forman una red a base de enlaces covalentes. Este tipo de polímero se moldea solo durante el conformado ya que no cambia su estructura debido al calor o la presión cuando se enfría. Sus características generales son: alta estabilidad térmica, rigidez y dureza, son casi insolubles y aíslan el calor y la electricidad [31].

### 1.3. PET

El PET es el polímero termoplástico más usado a nivel mundial y muy conocido en la industria textil por el nombre comercial de "poliéster", es un plástico transparente y semicristalino, con una extensa aplicabilidad en el embotellamiento y el embalaje (conocido en estos casos como PET o "resina PET") [32]. El PET se ha convertido en la elección para la industria del sector de los envases plásticos, comúnmente se lo utiliza para el envasado de agua y bebidas carbonatadas, se los reconoce por su código de identificación que se muestra en la Figura 5 [33].



Figura 5. Código de identificación de la resina PET [32].

#### 1.3.1. Formación del Tereftalato de polietileno

El Tereftalato de polietileno se deriva de los compuestos etilenglicol y ácido tereftálico, históricamente, los polímeros se han obtenido mediante procesos sintéticos utilizando tereftalato de dimetilo, en la Figura 6 se muestra la estructura molecular del Tereftalato de polietileno [34].

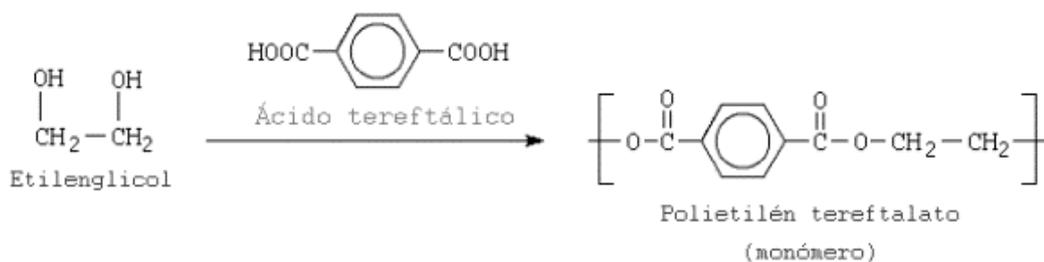


Figura 6. Estructura molecular del PET [35].

#### 1.3.2. Propiedades del tereftalato de polietileno

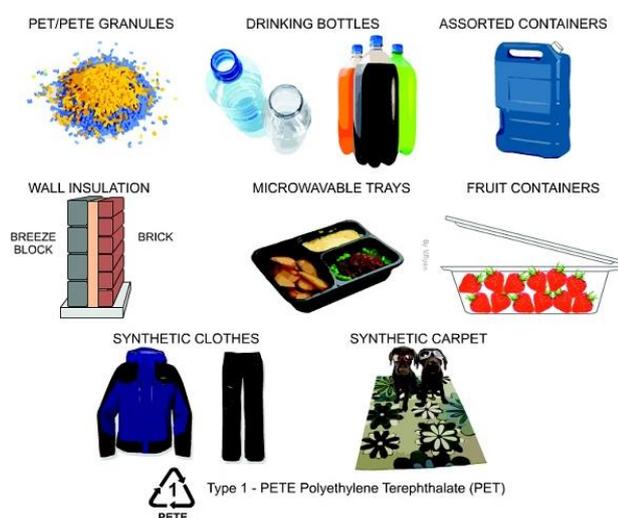
Las características generales del PET son: pureza, alta resistencia, tenacidad, fácil de planchar y resistente a polillas, bacterias y hongos [36]. En la Tabla 1 se puede observar las propiedades del PET requeridas para este estudio.

**Tabla 1.** Propiedades Térmicas del PET [37]

Propiedades Térmicas	Valor
Punto de fusión (°C)	260
Capacidad térmica	1200-1350 J/K·Kg
Dilatación térmica	20-80 (x10 <sup>-6</sup> ) 1/K
Conductividad térmica	0.15-0.4 W/m·K
T <sub>max</sub> de operación	115-170 °C
T <sub>min</sub> de operación	-40 a -60 °C

### 1.3.3. Aplicaciones del tereftalato de polietileno

El PET reciclado reduce la utilización de productos asociados al petróleo, dado que se trata de un recurso renovable, el PET tiene un enorme campo de acción como [38]: lámina no orientada para crear bandejas de envasado y fleje, película de PET para utilizar en la aplicación de cinta adhesiva, se utiliza para hacer los frascos de cosméticos, contenedores para microondas y otras aplicaciones de envasado, monofilamento de PET para hacer tejidos de malla en aplicaciones de impresión, aceite de filtro y agricultura, cintas tejidas, telas filtrantes y otras, en la industria del automóvil se usa para fabricar accesorios como el brazo del limpiaparabrisas, la carcasa del engranaje, la cubierta del motor y la carcasa del conector, en la industria electrónica se usa debido a su propiedad de aislamiento, en la Figura 7 se muestra ejemplos de aplicaciones del PET [39].



**Figura 7.** Principales aplicaciones del tereftalato de polietileno [40].

## 1.4. Reciclaje

Reciclar es el proceso de transformar los residuos en productos nuevos, de esta manera los residuos sufren una transformación eco ambiental para ser utilizados en procesos de producción, reduciendo el consumo de materias primas y eliminando residuos [41]. Es importante distinguir entre reciclaje y reutilización, el segundo es el uso de una determinada cosa para otro fin que no requiera transformación fisicoquímica, por ejemplo, botellas como macetas o jarrones, mientras que reciclar es transformar un material de desecho, en un nuevo producto o materia prima [42].

### 1.4.1. Reciclaje de PET

A pesar de los continuos esfuerzos por reducir los residuos de plástico, solo se recicla una pequeña parte de ellos, por ejemplo, de acuerdo con la información del Consejo de Reciclaje de Botellas, Europa recicla un 48,3 %, Argentina el 34 %, Estados Unidos el 28 %, Brasil encabeza con el 55.6 % [43] [44]. En la Figura 8 se muestra el porcentaje de reciclaje de algunos países.

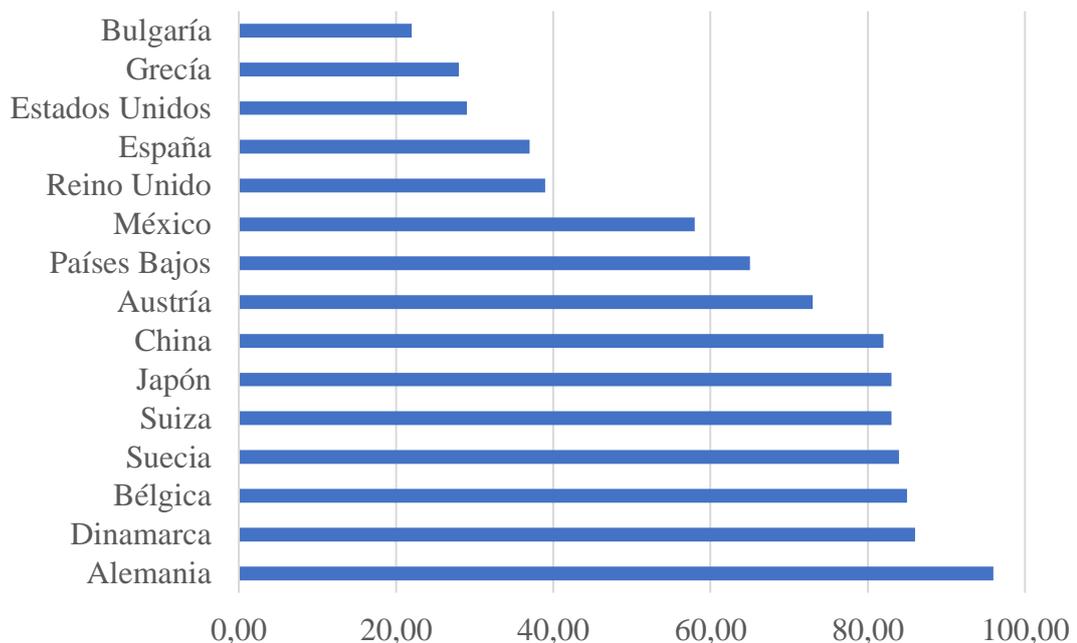


Figura 8. Tasa (%) global de reciclaje del año 2017 [45].

### 1.4.2 PET virgen y PET reciclado

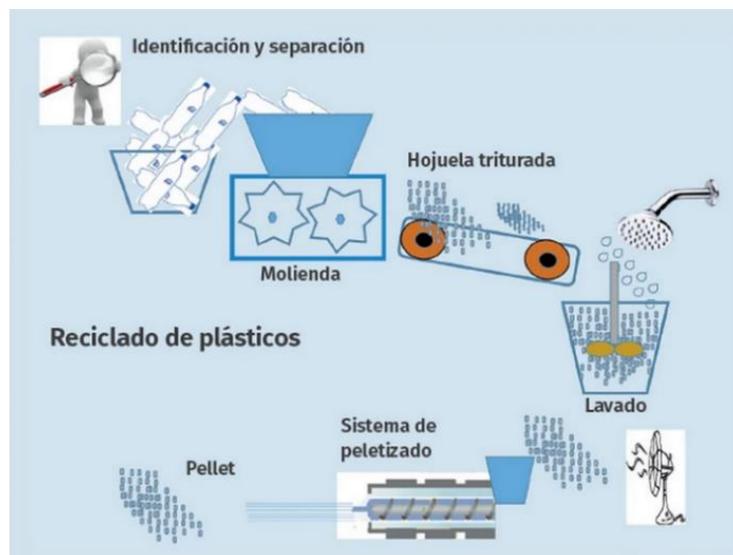
El PET virgen (V-PET, por sus siglas en inglés) se produce del mono etilenglicol y el ácido tereftálico purificado en la fase de fusión en plantas de polimerización continua, la masa fundida de PET se convierte en pellets (esferas pequeñas), ya sea mediante el

corte de los filamentos o mediante sistemas de peletización bajo el agua, los gránulos intermedios de PET de las plantas se utilizan para algunas aplicaciones de fibra, pero no son adecuados para las mayores exigencias de las aplicaciones de envasado de alimentos [46].

El PET de Reciclaje (rPET, por sus siglas en inglés), implica actividades de transporte y separación que incurren en impactos energéticos y ambientales, el proceso de reciclado comienza con la recogida de material de desecho posconsumo, que se transporta a una instalación de reciclado o de recuperación de material, donde el material de desecho se separa y se reprocesa en hojuelas [47].

### 1.4.3. Tipos de reciclajes para el PET

Una vez recolectadas las botellas de plástico, pasan por un lavado, prensado y almacenado [48]. El reciclaje mecánico es el más común [49], este proceso generalmente implica la recolección, clasificación, lavado y trituración del material, los pasos pueden tener lugar en un orden diferente, múltiples veces o no, según la fuente y la composición de los desechos [50]. Se podría decir que el reciclaje mecánico tiene dos puntos importantes de mejora: lograr una clasificación más eficiente de los materiales y mejorar la calidad del reciclaje, lo cual favorece a una reintroducción al mercado [51]. En la Figura 9 se muestra el esquema de reciclaje mecánico.



**Figura 9.** Esquema del reciclaje mecánico del plástico [52].

El reciclaje químico implica esencialmente convertir, romper o reducir la cadena principal del polímero en unidades más pequeñas, como monómeros y oligómeros (partes de una cadena más grande), así como formar subproductos en forma de gas, otra explicación es la descomposición resultante en condiciones controladas (temperatura, PH, presión, tiempo de reacción, entre otras), mediante un proceso de descomposición que involucra la adición de diversos solventes, como agua, alcohol, ácido, entre otros [53]. Una de esas posibilidades de reciclaje es que cuando el polímero recuperado puede reducirse mecánicamente en tamaño y luego fundirse, moldearse o extruirse, en el caso específico del PET, puede producir fibras para almohadillas, alfombras y aislamiento, entre otros [54]. (Observe la Figura 10)

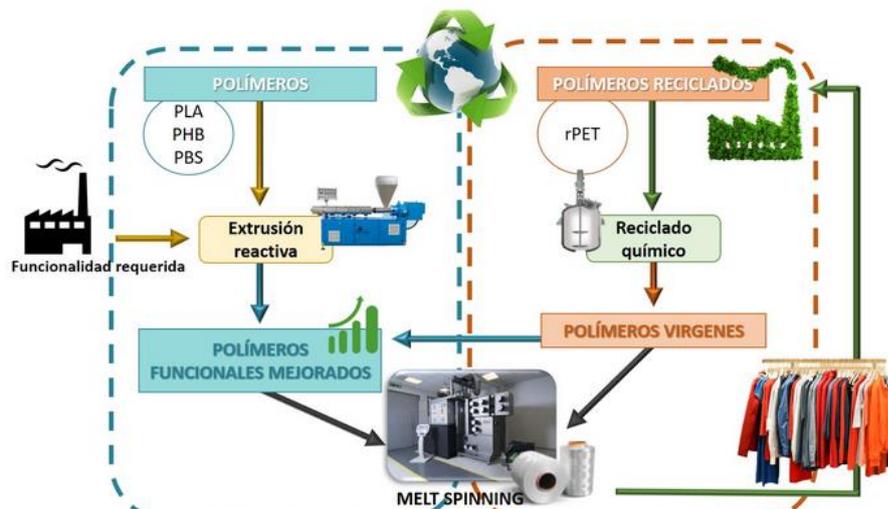


Figura 10. Esquema del reciclaje químico del plástico [55].

#### 1.4.4. Reciclaje de botellas PET en Ecuador

La investigación de Zambrano [56] muestra, el proceso que deben pasar las botellas de PET para ser recicladas: Las botellas son recolectadas por los recicladores, estos los transportan a los centros de recolección autorizados, donde se venden a un precio de entre USD 0.42 y USD 0.65 el kilo. A continuación, los envases pasarán por un proceso de selección y clasificación automático y manual para que el plástico pueda separarse según el color y la calidad. Estas botellas pasan a través de una máquina, que las convierte en hojuelas. Estas hojuelas se calientan para formar una resina manipulable, que luego se convierte en pellets (esferas pequeñas) de calidad alimenticia, que se enfrían, se someten a un proceso de revisión de calidad y luego se envasan para la venta. En la Figura 11 se muestra los pelets.



**Figura 11.** PET es exportado en forma de hojuelas y pellets [57].

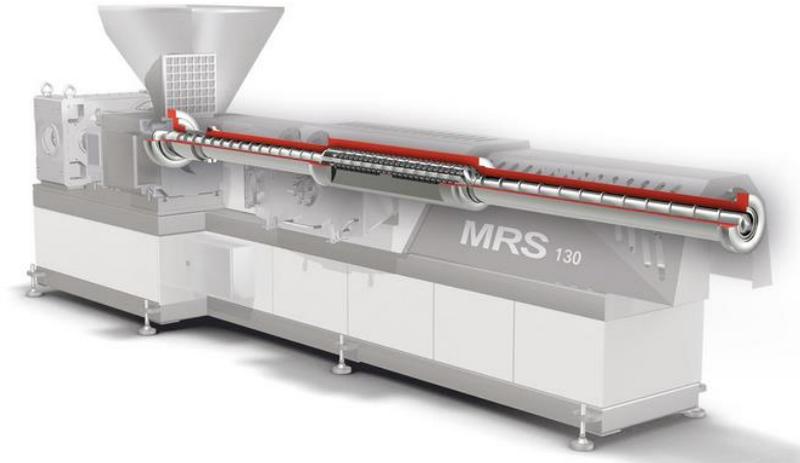
### **1.5. Máquinas usadas para el reciclado del PET**

En el mundo ecológico, hay un movimiento que incluye las llamadas tres R, que significan, reducción, reutilización y reciclaje, este último es el que ha despertado el mayor interés de las personas en las últimas décadas, por lo que, hoy no solo se puede utilizar diferentes métodos de reciclaje en el hogar, sino que también utilizar diferentes tipos de equipos de reciclaje a nivel industrial [58].

La investigación de Coppini [59] dice que, las máquinas de reciclaje permiten cumplir con la gestión integral de residuos en diferentes regiones, en particular, es muy útil para todo tipo de empresas, la selección del tipo de máquina de reciclaje se puede definir según el material a reciclar o el campo de trabajo, en cualquier caso, las máquinas de reciclaje tienen un papel vital en la disminución del impacto ambiental y contribuyen con el ciclo integral del producto dentro de la economía circular.

#### **1.5.1. Máquina de extrusión**

En la Figura 13 se observa la máquina que se encarga de la extrusión del polímero a través de los procesos de prensado, fusión y moldeado [60]. Las materias primas premolidas en forma de hojuelas pasan a través de una tolva de alimentación continua hacia un tambor o "barril" de alta temperatura, que tiene un tornillo sin fin en el interior que empuja el material a lo largo del tambor [61].

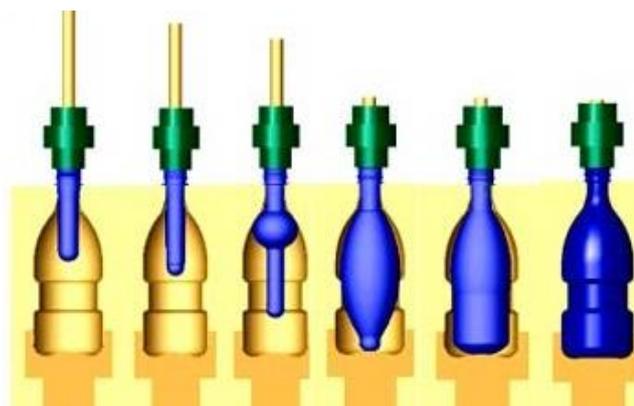


**Figura 12.** Tornillo y tambor de extrusión [62]

El husillo (tornillo sin fin) es la parte encargada de empujar el material a través del cilindro y presionarlo hasta alcanzar la forma deseada, este husillo es un tornillo de gran diámetro y largo con varias formas o diseños que se pueden moldear cuando el material termoplástico alcanza altas temperaturas [60].

### 1.5.2. Máquina de soplado

El soplado es un proceso que tiene una gama de ventajas sobre otros métodos como la inyección, ya que permite la capacidad de variar el espesor de la pared dependiendo de la baja presión utilizada (0.2-1.0 MPa) y la baja tensión residual, este proceso permite el uso de resinas con un peso molecular más alto que la inyección, también puede obtener paredes más delgadas y una mayor resistencia con el mismo peso, lo que se prefiere para reactivos ambientales y productos químicos de agrietamiento por tensión [63].



**Figura 13.** Esquema de soplado con molde de botella [64].

### 1.5.3. Máquina de fibra PET

La máquina de fibra discontinua de poliéster reciclada es aplicable a materiales regenerados, como viruta de poliéster o escamas de botella, fibra regranulada, material de molienda, entre otros, para producir fibra sólida de poliéster discontinua, fibra hueca ondulada, fibra de alta intensidad y bajo estiramiento [65]. La Figura 15 muestra una máquina industrial para la producción de fibra PET.



Figura 14. Máquina de fibra PET [66].

## 1.6. Análisis de alternativas

El estudio de posibles alternativas que existen para el desarrollo de la fibradora de PET tomará en cuenta las necesidades a satisfacer, tales como; menor costo, tecnología aplicada, mantenimiento, entre otros.

### 1.6.1. Identificación de necesidades

Para este proyecto las necesidades que se deben tomar en cuenta son la siguientes:

- **Bajo costo:** Tentativamente el proyecto está enfocado en personas de bajos recursos, por lo cual los recursos son limitados.
- **Tamaño de la máquina:** La máquina debe contar con medidas que se adapten en el espacio donde será colocada para su operación y su transporte cuando se lo necesite.

- **Mantenimiento:** Para conservar la máquina en perfectas condiciones se debe dar mantenimientos por lo que, al momento de cambiar alguna pieza defectuosa, deberá ser accesible de conseguir en el mercado local.
- **Operación de la máquina:** La máquina será lo más fácil de operar para evitar accidentes y contratiempos en el proceso de fibrado PET.

### 1.6.2. Alternativas de solución

Los parámetros que contribuirán a la selección de alternativas, teniendo en cuenta las necesidades antes mencionadas son; comprar, alquilar o construir la máquina.

- **Comprar:** Estas máquinas en el Ecuador no se producen, por lo cual se deberá traer de otro país teniendo en cuenta que estas máquinas son de uso industrial.
- **Alquilar:** Alquilar una máquina de estas es poco probable en el Ecuador, ya que hay pocas empresas dedicadas al reciclaje PET.
- **Construir:** Para la construcción de la máquina se considerará las necesidades antes mencionadas para su óptimo rendimiento.

### 1.6.3. Elección de la mejor alternativa

Se analizará de manera imparcial cada alternativa según las necesidades propuestas, el método cuantitativo Analytic Hierarchy Process [67] da soporte, en donde se deben considerar muchos criterios y hay muchas alternativas. Para elegir la mejor alternativa se elaborará una matriz de análisis en la que se utilizará una escala del 7 al 10, siendo; 10 excelente, 9 muy buena, 8 buena y 7 mala. (Observe la Tabla 2)

**Tabla 2.** Análisis calificativo para las alternativas [67].

Alternativas	Necesidades				Valoración global	Valoración porcentual
	Costo económico	Tamaño de la maquina	Mantenimiento	Operación de la maquina		
Comprar	7	8	7	9	31/40	77.5%
Alquilar	7	7	7	9	30/40	75%
Construir	8	9	10	10	37/40	92.5%

En la Tabla 3 se muestra los argumentos de cada necesidad.

**Tabla 3.** Argumentos de cada necesidad

<b>Necesidades</b>	<b>Argumento</b>
Costo económico	Economiza y optimiza el uso de recursos
Tamaño de la máquina	Tiene gran relevancia para la instalación y transporte de la máquina
Mantenimiento	Un buen mantenimiento evitara accidentes y problemas en el proceso
Operación de la máquina	No será un inconveniente para el operador manipular la máquina

Una vez realizado el análisis cuantitativo se considera que la alternativa óptima para el proyecto es la construcción de la máquina, por lo cual se empezará a realizar la investigación de las ecuaciones requeridas para el cálculo de los elementos que conformarán la máquina y posteriormente realizar la construcción.

### **1.7. Conclusión del capítulo**

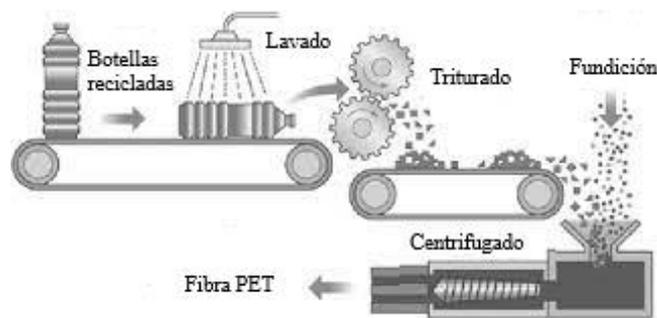
El PET es un plástico muy útil, conocer su composición, así como sus ventajas y usos, permite apreciarlo un poco más. El PET reciclado se puede utilizar en un sinnúmero de aplicaciones diferentes, incluyendo fibras para alfombras, piezas para automóviles, relleno de abrigos y sacos de dormir, zapatos, equipaje, camisetas y entre otras cosas. Reciclar PET reduce la demanda de materia prima petroquímica y disminuye el uso de energía así también reduce la emanación de gases de efecto invernadero CO<sub>2</sub>.

El análisis de las diferentes alternativas nos permite identificar las necesidades, y así optimizar y mejorar el desempeño, funcionamiento y eficiencia de la máquina.

## Capítulo II

### Elementos de diseño

Para iniciar el diseño de la máquina es necesario conocer los pasos a seguir para la obtención de la fibra poliéster; las botellas recolectadas, pasarán por un proceso de lavado. luego se trituran hasta que se convierten en hojuelas de aproximadamente 1 centímetro. Estas hojuelas se introducen en la tolva, las cuales se someten a un proceso de fundición en un tubo vertical utilizando resistencias eléctricas de tipo abrazadera, estas se calientan hasta formar una resina manipulable que saldrá por una boquilla y caerá en un plato giratorio provisto de perforaciones de 3 milímetro de diámetro. Por la fuerza centrífuga ejercida por un motor, la resina caliente pasa por los agujeros del plato giratorio, ayudando a que las cadenas moleculares del PET se estiren a tal punto de quedar en forma de hilos, más conocidos como fibra PET. La Figura 15 muestra el esquema para la obtención de la fibra PET.



**Figura 15.** Esquema del proceso para la obtención de Fibra PET [68].

Obtenida la fibra, se realiza un listado de elementos donde se detallará los componentes principales sujetos a modificaciones según la necesidad que se requiera como se muestra en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Componentes de la máquina.

Nº	Cantidad	Denominación
1	1	Estructura de la máquina
2	1	Tolva y cañón de alimentación
3	1	Plato de fibrado
4	2	Chumaceras

Nº	Cantidad	Denominación
5	1	Flecha o eje de transmisión
6	1	Motor

## 2.1. Selección del motor

El estudio de Zander et al. [69] demuestra que, se formaron fibras de tamaño micrométrico mediante el proceso de hilado centrífugo a partir de la masa fundida variando la velocidad de rotación entre 6000 y 12000 RPM para examinar el efecto sobre el diámetro y la morfología de las fibras. En la Tabla 5 se muestra el patrón de diámetros con la variación de revoluciones por minuto.

**Tabla 5.** Diámetro de las fibras de rPET a distintas velocidades de rotación [69]

Polímero	rpm	Temperatura (°C)	Diámetro (µm)
rPET	6000	300	9.41
	8000		5.84
	10000		4.68
	12000		4.56

Se puede concluir que a mayores revoluciones por minuto se consigue menor diámetro en la fibra de PET, en la Figura 16 se muestra los motores WEG que están disponibles en el mercado, por tanto, en esta investigación se seleccionará un motor de 2 Hp y 3520 rpm

Potencia		Carcasa	Par nominal Tn (kgfm)	Corriente con rotor trabado II/in	Par con rotor trabado TV/Tn	Par Máximo Tb/Tn	Momento de Inercia J (kgm²)	Tiempo máximo con rotor trabado (s)	Peso (kg)	Nivel de ruido dB (A)	RPM
kW	HP										
II Polos											
0,12	0,16	63	0,034	5,9	2,0	2,9	0,0002	6	10,0	50	3490
0,18	0,25	63	0,050	6,1	2,2	2,8	0,0003	6	10,7	50	3490
0,25	0,33	63	0,071	4,6	2,4	2,4	0,0002	6	10,7	50	3440
0,37	0,5	71	0,102	7,2	2	3,1	0,0005	7	13,0	60	3520
0,55	0,75	80	0,152	7,7	2,1	3	0,0008	10	16,5	65	3525
0,75	1	80	0,208	7,0	2,3	2,7	0,0009	9	17,5	65	3520
1,1	1,5	90S	0,303	9,1	2,1	2,9	0,0020	9	24,0	69	3535
1,5	2	90L	0,415	8,4	2,1	2,7	0,0022	8	25,0	69	3520

**Figura 16.** Tabla de motores WEG [70].

## 2.2. Eje o flecha de la máquina

Un eje es un elemento sometido a torsión que tiene sección transversal circular, usado para transferir potencia o movimiento [71]. Para el diseño de ejes se debe tomar en cuenta esfuerzos y deflexiones, para ello se empieza determinando la potencia transmitida que está dado por la Ecuación 1 [72].

$$P = T\omega \quad (1)$$

Donde  $\omega$  es la velocidad angular y  $T$  es el par de torsión.

### 2.2.1. Esfuerzo en la flecha o eje

En el elemento de diseño, podrían estar presentes esfuerzos flexionantes, torsionantes o axiales, por lo que para el análisis se usará la teoría de Von Mises que está dada por las ecuaciones 2 y 3 [73].

$$\sigma_{\max} = Kf \frac{M_{\max} c}{I} \quad (2)$$

$$\tau_{\max} = Kf_s \frac{T_{\max} c}{J} \quad (3)$$

Donde  $Kf$  y  $Kf_s$  son los coeficientes de concentración del esfuerzo,  $M$  es el momento flector y  $T$  es el par de torsión.

Para la sección transversal circular se usa las ecuaciones 4 y 5 [73].

$$\sigma_{\max} = Kf \frac{32M_{\max}}{\pi d^3} \quad (4)$$

$$\tau_{\max} = Kf_s \frac{16T_{\max}}{\pi d^3} \quad (5)$$

Donde  $d$  es el diámetro de la sección circular.

### 2.2.2. Límite a la resistencia a fatiga

Para el diseño hay que tomar la resistencia última a la tensión y se debe tomar en cuenta los factores de carga, tamaño, superficie, temperatura, confiabilidad y efectos varios, como se muestra en la Ecuación 6 [74].

$$S_e = S_e' k_a k_b k_c k_d k_e k_f \quad (6)$$

Donde  $S_e'$  es la resistencia última a la fatiga y se multiplica por un factor que depende del material como se detalla en la Figura 17, los factores son  $k_a$  que es el coeficiente para el acabado superficial,  $k_b$  es el coeficiente para la variación del tamaño,  $k_c$  es el coeficiente de variación de carga,  $k_d$  es la modificación de temperatura,  $k_e$  es la confiabilidad y  $k_f$  es modificación de efectos varios.

$$\text{Acero} \left\{ \begin{array}{l} S_e' \cong 0.5 S_{ut} \quad \rightarrow \text{para } S_{ut} \leq 200 \text{ ksi (1400 MPa)} \\ S_e' \cong 100 \text{ Ksi (700 MPa)} \quad \rightarrow \text{para } S_{ut} > 200 \text{ ksi (1400 MPa)} \end{array} \right\}$$

$$\text{Hierro(fundiciones)} \left\{ \begin{array}{l} S_e' \cong 0.4 S_{ut} \quad \rightarrow \text{para } S_{ut} \leq 60 \text{ ksi (400 MPa)} \\ S_e' \cong 24 \text{ Ksi (160 MPa)} \quad \rightarrow \text{para } S_{ut} > 60 \text{ ksi (400 MPa)} \end{array} \right\}$$

$$\text{Aluminios} \left\{ \begin{array}{l} S_f' \cong 0.4 S_{ut} \quad \rightarrow \text{para } S_{ut} \leq 48 \text{ ksi (330 MPa)} \\ S_f' \cong 19 \text{ Ksi (130 MPa)} \quad \rightarrow \text{para } S_{ut} > 48 \text{ ksi (330 MPa)} \end{array} \right\}$$

$$\text{cobre} \left\{ \begin{array}{l} S_f' \cong 0.4 S_{ut} \quad \rightarrow \text{para } S_{ut} \leq 40 \text{ ksi (280 MPa)} \\ S_f' \cong 14 \text{ Ksi (100 MPa)} \quad \rightarrow \text{para } S_{ut} > 40 \text{ ksi (280 MPa)} \end{array} \right\}$$

$$S_u = 0.5 H_B \rightarrow \text{Kpsi}$$

$$S_u = 3.4 H_B \rightarrow \text{MPa}$$

**Figura 17.** Formas de cálculo de  $S_e'$  para los diferentes materiales [71].

Para determinar el factor  $k_a$  se utilizará la ecuación 7 y los coeficientes mostrados en la Tabla 6 [74].

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (7)$$

**Tabla 6.** Coeficientes para hallar el factor de acabado superficial [72].

<b>Acabado Superficial</b>	<b>Factor a</b>		<b>Exponente b</b>
	<b>Sut (Kpsi)</b>	<b>Sut (MPa)</b>	
Esmerilado	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o laminado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.40	57.57	-0.718
Forja	39.90	272.00	-0.995

Los coeficientes mostrados en la Tabla 7, se emplearán si el elemento está sometido a flexión y torsión, para carga axial  $k_b = 1$ .

**Tabla 7.** Coeficientes para el factor de modificación de tamaño [73].

<b>Criterio</b>	<b>Factor</b>
Para $d \leq 0.3$ plg (8 mm)	$k_b = 1$
Para $0.3$ plg $< d \leq 10$ plg	$k_b = 0.869 d^{-0.097}$
Para $8$ mm $< d \leq 250$ mm	$k_b = 1.189 d^{-0.097}$

La Tabla 8 muestra el factor de carga  $k_c$ .

**Tabla 8.** Factor de carga  $k_c$  [72]

<b>Criterio</b>	<b>Factor</b>
Flexión	1
Axial	0.7
Torsión pura	0.577

El factor de temperatura  $k_d$  se emplea la Tabla 9.

**Tabla 9.** Coeficientes para determinar el factor de temperatura [74]

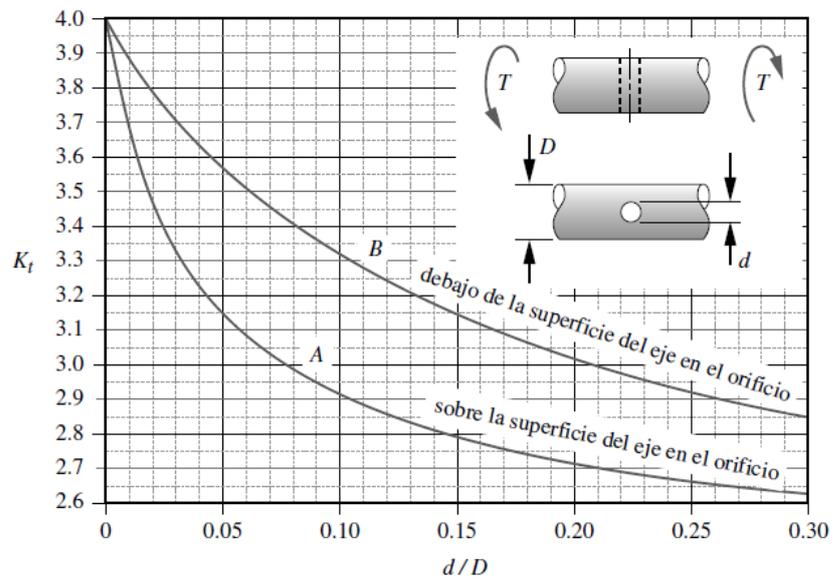
<b>Criterio</b>	<b>Factor</b>
Para $T \leq 450 \text{ }^\circ\text{C}$ (840 $^\circ\text{F}$ )	$k_d = 1$
Para $450 \text{ }^\circ\text{C} < T \leq 550 \text{ }^\circ\text{C}$	$k_d = 1 - 0.0058 (T - 450)$
Para $840 \text{ }^\circ\text{F} < T \leq 1020 \text{ }^\circ\text{F}$	$k_d = 1 - 0.0032 (T - 840)$

La Tabla 10 detalla el factor de confiabilidad  $k_e$ .

**Tabla 10.** Coeficiente de fiabilidad  $k_e$  [73]

<b>Fiabilidad (%)</b>	<b><math>k_e</math></b>
95	0.868
99	0.814
99.9	0.753
99.99	0.702
99.999	0.659
99.9999	0.620

Para el concentrador de esfuerzo  $K_f$ , se utilizará la Figura 18.



**Figura 18.** Concentrador de esfuerzo, en torsión y perforación transversal [72].

### 2.2.3. Factor de seguridad para flecha o eje

Según la teoría de esfuerzo Von Mises para ejes de sección transversal circular, sin tomar en cuenta las cargas axiales, se expresa de la siguiente manera [75].

$$\sigma'_{\max} = \sqrt{\sigma_{\max}^2 + 3\tau_{\max}^2} \quad (9)$$

Estos esfuerzos equivalentes pueden evaluarse usando la teoría de falla de Goodman modificada que se expresa en la siguiente ecuación.

$$\frac{1}{N} = \frac{\sigma'_{\max}}{Se} \quad (10)$$

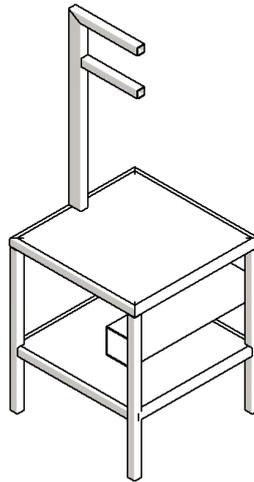
Donde  $Se$  es la resistencia última a la fatiga y  $N$  es el factor de seguridad, y está dado en la Figura 19.

Valor	Tipo de carga
1.25 a 2	Estructuras de baja carga estática, con alto grado de confianza en todos los datos de diseño
2 a 2.5	Elementos de máquinas de baja carga dinámica con una confianza promedio de todos los datos del diseño
2.5 a 4	Estructuras estáticas o elementos de máquinas de baja carga dinámicas con incertidumbre acerca de las cargas, propiedades de los materiales, análisis de esfuerzos o ambientales.
4 a más	Estructuras estáticas o elementos de máquinas con baja carga dinámica, con incertidumbre en cuanto a o algunas combinaciones de cargas, propiedades de los materiales, análisis de esfuerzos o ambiente.

**Figura 19.** Parámetros para la selección de factor de seguridad ( $N$ ) [73].

### 2.3. Chasis o estructura de la máquina

El acero ASTM A36 [76], es usado en: torres de construcción, equipos de transporte, puentes grúa y puentes, incluso a las temperaturas más bajas, por lo tanto, cuando se diseña y construye de forma adecuada, hay poca probabilidad de fractura, en consecuencia, la fractura por fragilidad no suele producirse en estas estructuras, a menos que se presenten condiciones inusuales de temperatura, muesca y tensiones inusuales [77], se muestra el chasis de la máquina en la Figura 20.



**Figura 20.** Base y estructura de la máquina diseñado en Inventor Profesional.

Para el diseño de la estructura se parte de un concepto de esfuerzo, que es la fuerza aplicada sobre el área [78] [79], y está dado por la Ecuación 11 [80].

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (11)$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo normal,  $P$  es la fuerza aplicada al cuerpo y  $A$  es el área de la sección transversal.

Para determinar el factor de seguridad se utiliza la Ecuación 12 [81].

$$N = \frac{S_{ut}}{\sigma_{max}} \quad (12)$$

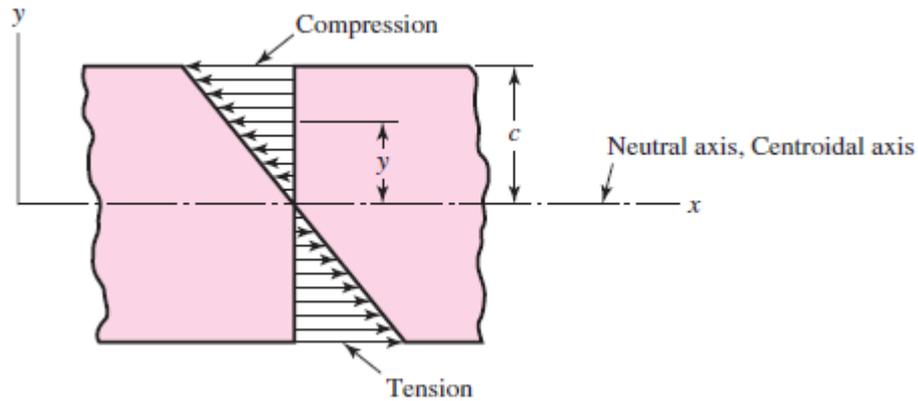
Donde  $S_{ut}$  es el esfuerzo último tensionante y  $\sigma_{max}$  es el esfuerzo máximo.

### **2.3.1. Esfuerzo en vigas**

Para el esfuerzo en vigas, se relacionará el momento flector y el esfuerzo a flexión que se producen, entre la fuerza de corte, para ello se utiliza la Ecuación 13 [82] [78].

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max} c}{I} \quad (13)$$

Donde  $M_{\max}$  es el momento flexionante máximo,  $c$  es la longitud al eje de fibra neutra e  $I$  es la inercia como se muestra en la Figura 21.



**Figura 21.** Esfuerzo de flexión

Para el diseño de vigas a flexión se sustituye  $\sigma_{\max}$  por  $f_b$  y se tiene la Ecuación 14 [77].

$$f_b = \frac{M_{\max} c}{I} \quad (14)$$

Donde  $f_b$  es la fuerza real a flexión y esta tiene que ser menor o igual al esfuerzo admisible a flexión. En la Ecuación 14 se utiliza el módulo de sección y suele designarse con  $S$  y se obtiene la Ecuación 15.

$$f_{b\max} = \frac{M_{\max}}{S_{\max}} \quad (15)$$

### 2.3.2. Esfuerzo en columnas

El comportamiento en columnas intermedias, se lo denomina inelástico, que es cuando unas fibras alcanzan el esfuerzo de fluencia y otras no, se estima la resistencia de columnas con las siguientes fórmulas [76] [77].

$$\frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{F_{cr} A_g}{\Omega_c} \quad (16)$$

Donde  $P_n$  es la fuerza nominal,  $F_{cr}$  es el esfuerzo a flexión para elementos a compresión,  $A_g$  es el área y  $\Omega_c$  se da por el diseño de resistencia permisible (por sus siglas en inglés, ASD) Por tanto,  $\Omega_c = 1.67$ .

Para determinar que el perfil no falle estructuralmente se utiliza el concepto de esbeltez que no es otra cosa que la reducción de resistencia debido a las deformaciones y está dada por la Ecuación 17 [77] .

$$\lambda = \frac{KL}{r} \quad (17)$$

Donde  $K$  es el coeficiente de longitud efectiva,  $L$  es la distancia de la columna,  $r$  es el radio de curvatura especificado en las tablas del manual de la AISC [72] [76]. En la Figura 22 se muestra el valor teórico del coeficiente de longitud efectiva  $K$ .

Las líneas punteadas muestran la forma pandeada de la columna	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)
Valor $K$ teórico	0.5	0.7	1.0	1.0	2.0	2.0
Valores recomendados de diseño cuando las condiciones reales son aproximadas	0.65	0.80	1.2	1.0	2.10	2.0
Símbolos para las condiciones de extremo						
	<ul style="list-style-type: none"> <li> Rotación y traslación impedidas</li> <li> Rotación libre y traslación impedida</li> <li> Rotación impedida y traslación libre</li> <li> Rotación y traslación libres</li> </ul>					

**Figura 22.** Coeficiente de longitud efectiva,  $K$  [76] [77].

La resistencia permisible de una columna se determina con la Ecuación 18 [76] [77].

$$P_{real} \leq P = F_a A \quad (18)$$

Donde  $F_a$  es el esfuerzo permisible,  $A$  es el área de la sección transversal de la columna y  $P_{real}$  es la carga real que hay en la columna.

Una vez hallada la esbeltez, se utilizará las tablas de la AISC para tensión admisible para los elementos de compresión de acero con límite elástico especificado de 36 KSI, que se muestra en la Figura 23 [76] [77].

Table C-36 Allowable Stress For Compression Members of 36-ksi Specified Yield Stress Steel <sup>a</sup>										
F <sub>y</sub> = 36 ksi	K <sub>t</sub> / r	F <sub>a</sub> (ksi)								
	1	21.56	41	19.11	81	15.24	121	10.14	161	5.76
	2	21.52	42	19.03	82	15.13	122	9.99	162	5.69
	3	21.48	43	18.95	83	15.02	123	9.85	163	5.62
	4	21.44	44	18.86	84	14.90	124	9.70	164	5.55
	5	21.39	45	18.78	85	14.79	125	9.55	165	5.49
	6	21.35	46	18.70	86	14.67	126	9.41	166	5.42
	7	21.30	47	18.61	87	14.56	127	9.26	167	5.35
	8	21.25	48	18.53	88	14.44	128	9.11	168	5.29
	9	21.21	49	18.44	89	14.32	129	8.97	169	5.23
10	21.16	50	18.35	90	14.20	130	8.84	170	5.17	
11	21.10	51	18.26	91	14.09	131	8.70	171	5.11	
12	21.05	52	18.17	92	13.97	132	8.57	172	5.05	
13	21.00	53	18.08	93	13.84	133	8.44	173	4.99	
14	20.95	54	17.99	94	13.72	134	8.32	174	4.93	
15	20.89	55	17.90	95	13.60	135	8.19	175	4.88	
16	20.83	56	17.81	96	13.48	136	8.07	176	4.82	
17	20.78	57	17.71	97	13.35	137	7.96	177	4.77	
18	20.72	58	17.62	98	13.23	138	7.84	178	4.71	
19	20.66	59	17.53	99	13.10	139	7.73	179	4.66	
20	20.60	60	17.43	100	12.98	140	7.62	180	4.61	
21	20.54	61	17.33	101	12.85	141	7.51	181	4.56	
22	20.48	62	17.24	102	12.72	142	7.41	182	4.51	
23	20.41	63	17.14	103	12.59	143	7.30	183	4.46	
24	20.35	64	17.04	104	12.47	144	7.20	184	4.41	
25	20.28	65	16.94	105	12.33	145	7.10	185	4.36	
26	20.22	66	16.84	106	12.20	146	7.01	186	4.32	
27	20.15	67	16.74	107	12.07	147	6.91	187	4.27	
28	20.08	68	16.64	108	11.94	148	6.82	188	4.23	
29	20.01	69	16.53	109	11.81	149	6.73	189	4.18	
30	19.94	70	16.43	110	11.67	150	6.64	190	4.14	
31	19.87	71	16.33	111	11.54	151	6.55	191	4.09	
32	19.80	72	16.22	112	11.40	152	6.46	192	4.05	
33	19.73	73	16.12	113	11.26	153	6.38	193	4.01	
34	19.65	74	16.01	114	11.13	154	6.30	194	3.97	
35	19.58	75	15.90	115	10.99	155	6.22	195	3.93	
36	19.50	76	15.79	116	10.85	156	6.14	196	3.89	
37	19.42	77	15.69	117	10.71	157	6.06	197	3.85	
38	19.35	78	15.58	118	10.57	158	5.98	198	3.81	
39	19.27	79	15.47	119	10.43	159	5.91	199	3.77	
40	19.19	80	15.36	120	10.28	160	5.83	200	3.73	

<sup>a</sup>When element width-to-thickness ratio exceeds noncompact section limits of Sect. B5.1, see Appendix B5.  
Note: C<sub>b</sub> = 126.1

Figura 23. Tablas de la AISC para tensión admisible [76] [77].

## 2.4. Selección de cojinetes

La selección de cojinetes tiene en cuenta su vida útil esperada, esto significa que es imposible lograr una vida infinita y se debe considerar el cojinete como un elemento de desgaste [83]. Existen factores que afectan la vida útil, los más importantes son; el tamaño de la carga, la dirección de la carga, la velocidad, la deformación del eje, la desalineación, la lubricación, la temperatura de trabajo y la limpieza [84] [85]. Ante la necesidad de utilizar estos elementos, se recomienda utilizar un catálogo de cojinetes de una marca confiable para conocer el número y tamaño del rodamiento que se desea utilizar, en dicho catálogo hay valores de resistencia mecánica que son la base para el cálculo de vida útil, en la Figura 24 se muestra los dichos valores [86].

Designación	Dimensiones principales				Capacidad de carga básica		Velocidades nominales
	d [mm]	$t_1$	D [mm]	B [mm]	dinámica C [kN]	estática C <sub>0</sub> [kN]	Velocidad de referencia [r/min]
W 63805	25		37	10	3.38	2.5	38 000
W 63805-2RS1	25		37	10	3.38	2.5	
W 63805-ZZ	25		37	10	3.38	2.5	38 000
RLS 8	25.4		57.15	15.875	17.8	9.65	24 000
RLS 8-2RS1	25.4		57.15	15.875	17.8	9.65	

**Figura 24.** Catálogo de rodamiento rígido de una hilera de bolas [86].

Para determinar la vida útil de un cojinete se utilizará la expresión para la vida nominal de un cojinete dada por la Ecuación 19 [83].

$$L_{10} = \left( \frac{C}{P} \right)^p \quad (19)$$

Donde  $C$  es la de carga dinámica,  $P$  es la fuerza equivalente y  $p$  es 3 para cojinetes de bolas.  $L_{10}$  está considerada en millones de revoluciones, para la fuerza equivalente se utilizará la Ecuación 20 [85].

$$P = XF_r + YF_a \quad (20)$$

Donde  $F_r$  es la fuerza radial,  $F_a$  es la carga axial,  $X$  e  $Y$  son coeficientes adimensionales y se detallan en la Figura 25.

Factores de cálculo para rodamientos rígidos de bolas									
$f_0 F_3 / C_0$	Rodamientos de una hilera y de dos hileras Juego normal			Rodamientos de una hilera Juego C3			Juego C4		
	e	X	Y	e	X	Y	e	X	Y
0,172	0,19	0,56	2,3	0,29	0,46	1,88	0,38	0,44	1,47
0,345	0,22	0,56	1,99	0,32	0,46	1,71	0,4	0,44	1,4
0,689	0,26	0,56	1,71	0,36	0,46	1,52	0,43	0,44	1,3
1,03	0,28	0,56	1,55	0,38	0,46	1,41	0,46	0,44	1,23
1,38	0,3	0,56	1,45	0,4	0,46	1,34	0,47	0,44	1,19
2,07	0,34	0,56	1,31	0,44	0,46	1,23	0,5	0,44	1,12
3,45	0,38	0,56	1,15	0,49	0,46	1,1	0,55	0,44	1,02
5,17	0,42	0,56	1,04	0,54	0,46	1,01	0,56	0,44	1
6,89	0,44	0,56	1	0,54	0,46	1	0,56	0,44	1

**Figura 25.** Coeficientes de cálculo en rodamientos rígidos de bolas [86].

Obtenido la vida nominal de un cojinete, dicho valor se sustituye en la expresión de vida nominal ajustada dada por la Ecuación 21 [84].

$$L_{na} = a_1 a_{23} L_{10} \quad (21)$$

Donde  $a_1$  es la fiabilidad del rodamiento,  $a_{23}$  considera la calidad de la lubricación. En la Tabla 11 se detalla la fiabilidad de los cojinetes.

**Tabla 11.** Coeficiente de fiabilidad  $a_1$  [86]

Fiabilidad (%)	Coeficiente $a_1$
90	1.0
95	0.62
96	0.53
97	0.44
98	0.33
99	0.21

Para el cálculo del factor  $a_{23}$  se necesitará conocer las dimensiones básicas del cojinete para usarlas en la Ecuación 22 [85].

$$dm = \left( \frac{D + d}{2} \right) \quad (22)$$

Donde  $D$  es el diámetro mayor y  $d$  es el diámetro menor del cojinete. Este valor se utilizará en la Figura 26 para obtener la viscosidad cinemática  $\nu_l$ .

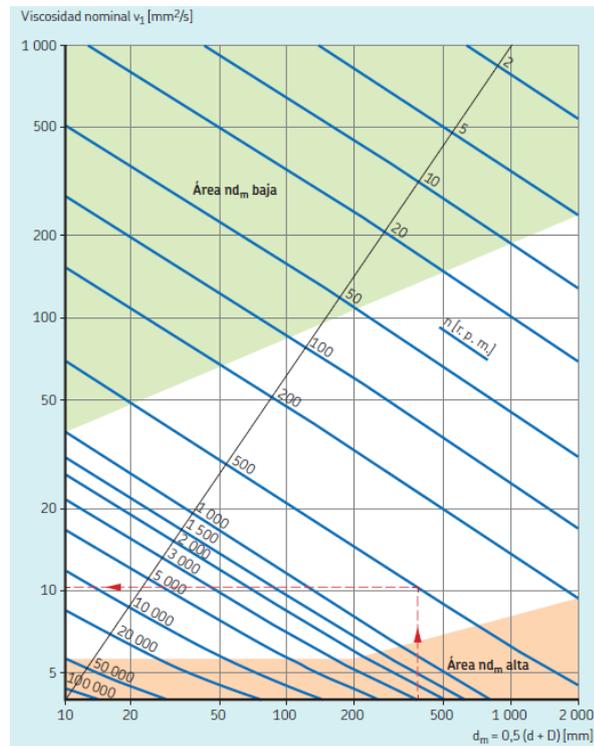


Figura 26. Cálculo de la viscosidad cinemática [86].

La Figura 27 muestra la viscosidad cinemática, en base a la temperatura y el lubricante.

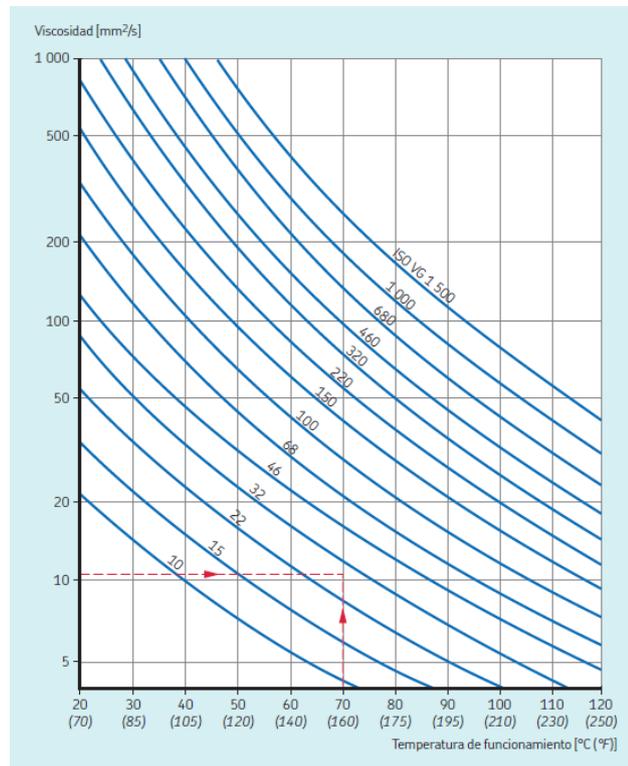
Tabla 5

Clasificación de la viscosidad según la norma ISO 3448

Grado de viscosidad	Viscosidad cinemática límite a 40 °C (105 °F)		
	media	mín.	máx.
—	mm <sup>2</sup> /s		
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42
ISO VG 3	3,2	2,88	3,52
ISO VG 5	4,6	4,14	5,06
ISO VG 7	6,8	6,12	7,48
ISO VG 10	10	9,00	11,0
ISO VG 15	15	13,5	16,5
ISO VG 22	22	19,8	24,2
ISO VG 32	32	28,8	35,2
ISO VG 46	46	41,4	50,6
ISO VG 68	68	61,2	74,8
ISO VG 100	100	90,0	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1 000	1 000	900	1 100
ISO VG 1 500	1 500	1 350	1 650

Figura 27. Clasificación de la viscosidad según la norma ISO 3448 [86].

Obtenida la viscosidad, este dato se utilizará en la Figura 28 para obtener el valor de la viscosidad nominal  $\nu$ .

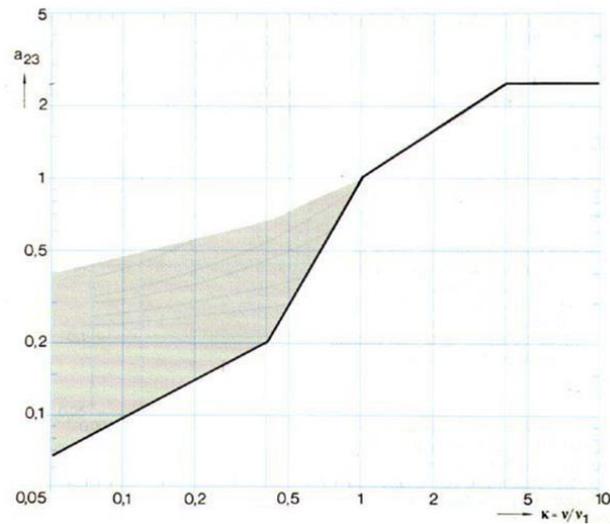


**Figura 28.** Cálculo de la viscosidad nominal [86].

Los valores obtenidos se utilizarán en la Ecuación 23 [84].

$$K = \frac{\nu}{\nu_1} \quad (23)$$

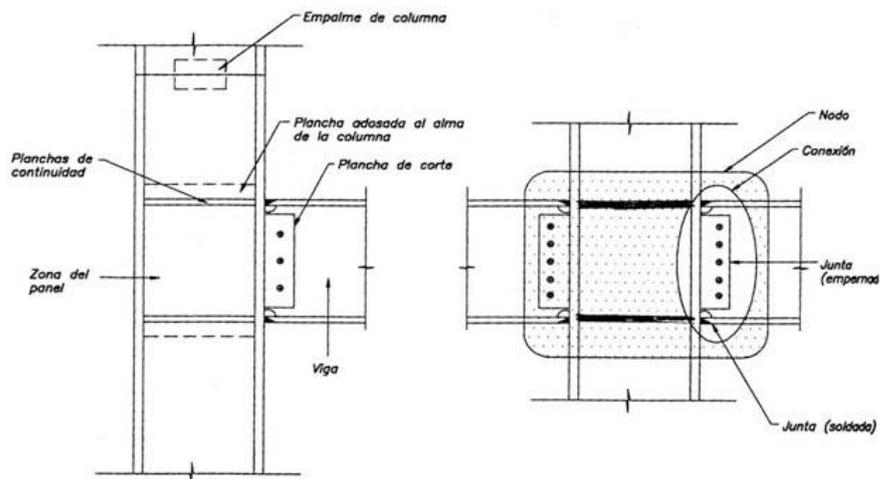
Donde  $\nu_1$  es la viscosidad cinemática y  $\nu$  es la viscosidad nominal. Finalmente se utilizará la Figura 29 para obtener el valor del coeficiente  $a_{23}$



**Figura 29.** Valores del coeficiente  $a_{23}$  [86].

### 2.5. Diseño de conexiones

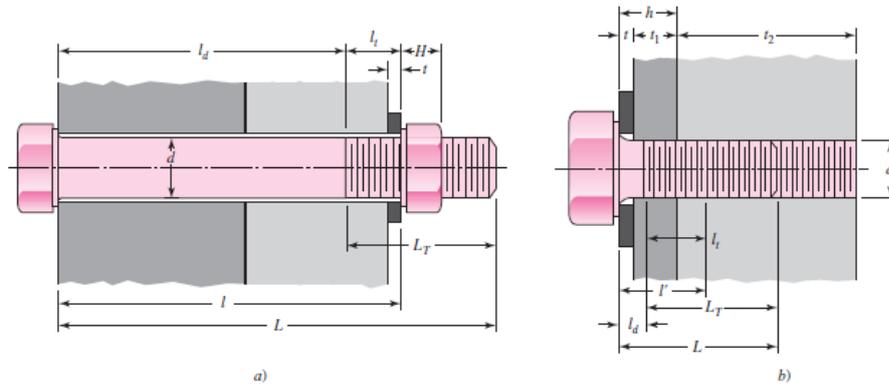
Una conexión es el grupo de elementos que se unen para formar un nodo y transmitir esfuerzos, las conexiones pueden ser apernadas o soldadas, como se muestra en la Figura 30 [87].



**Figura 30.** Elementos involucrados en una conexión (Soldada, apernada) [88].

#### 2.5.1. Conexión apernada

Cuando se desea realizar una unión desmontable que sea capaz de resistir cargas cortantes o flexionantes, una solución es la unión apernada, en la Figura 31 se muestra una unión típica [89] [90].



Dado el diámetro del sujetador  $d$  y el paso  $p$  o el número de roscas

Agarre efectivo

El agarre es el espesor  $l$

$$l' = \begin{cases} h + t_2/2, & t_2 < d \\ h + d/2, & t_2 \geq d \end{cases}$$

Espesor de la arandela de la tabla A-32 o A-33  
 Longitud roscada  $l_T$   
 Serie en pulgadas:

$$l_T = \begin{cases} 2d + \frac{1}{4} \text{ pulg}, & L \leq 6 \text{ pulg} \\ 2d + \frac{1}{2} \text{ pulg}, & L > 6 \text{ pulg} \end{cases}$$

Serie métrica:

$$l_T = \begin{cases} 2d + 6 \text{ mm}, & L \leq 125, d \leq 48 \text{ mm} \\ 2d + 12 \text{ mm}, & 125 < L \leq 200 \text{ mm} \\ 2d + 25 \text{ mm}, & L > 200 \text{ mm} \end{cases}$$

Longitud del sujetador:  $L > l + H$

Redondee usando la tabla A-17\*

Longitud del sujetador:  
 $L > h + 1.5d$

Longitud de la parte útil  
 sin rosca:  $l_d = L - l_T$   
 Longitud de la parte roscada:  
 $l_t = l - l_d$

Longitud de la parte útil  
 sin rosca:  $l_d = L - l_T$   
 Longitud de la parte útil  
 roscada:  $l_t = l' - l_d$

**Figura 31.** Ecuaciones necesarias para determinar la rigidez en pernos [71].

Para la rigidez de la unión apernada, hay que tomar en cuenta el agarre del perno, que son todos los espesores del material más él o de las arandelas utilizadas, y viene dado en la Ecuación 24 [71] [84].

$$K_b = \frac{A_d A_t E}{A_d l_t + A_t l_d} \quad (24)$$

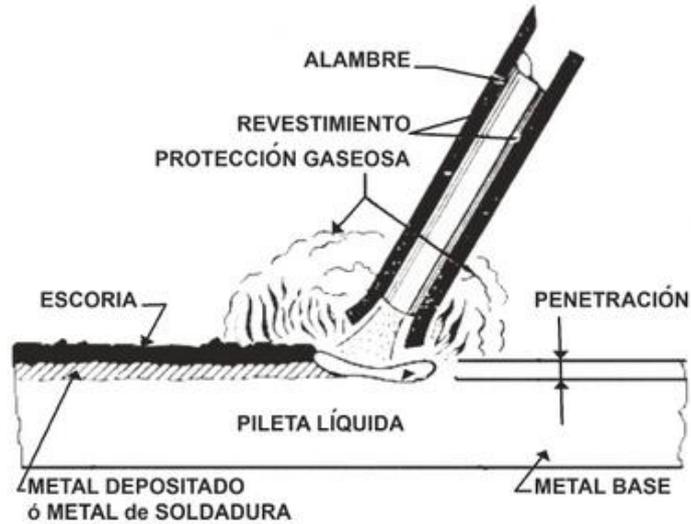
Donde  $K_b$  es la dureza del perno,  $A_t$  es el área de esfuerzo,  $l_t$  es la longitud roscada,  $A_d$  es el área del sujetador,  $l_d$  es la parte del perno sin roscar y  $E$  es el módulo de elasticidad. La Figura 32 muestra el área de esfuerzo  $A_t$ .

Diámetro mayor nominal $d$ , mm	Serie de paso grueso			Serie de paso fino		
	Paso $p$ , mm	Área de esfuerzo de tensión $A_t$ , mm <sup>2</sup>	Área del diámetro menor $A_r$ , mm <sup>2</sup>	Paso $p$ , mm	Área de esfuerzo de tensión $A_t$ , mm <sup>2</sup>	Área del diámetro menor $A_r$ , mm <sup>2</sup>
1.6	0.35	1.27	1.07			
2	0.40	2.07	1.79			
2.5	0.45	3.39	2.98			
3	0.5	5.03	4.47			
3.5	0.6	6.78	6.00			
4	0.7	8.78	7.75			
5	0.8	14.2	12.7			
6	1	20.1	17.9			
8	1.25	36.6	32.8	1	39.2	36.0
10	1.5	58.0	52.3	1.25	61.2	56.3
12	1.75	84.3	76.3	1.25	92.1	86.0
14	2	115	104	1.5	125	116
16	2	157	144	1.5	167	157
20	2.5	245	225	1.5	272	259
24	3	353	324	2	384	365
30	3.5	561	519	2	621	596
36	4	817	759	2	915	884
42	4.5	1 120	1 050	2	1 260	1 230
48	5	1 470	1 380	2	1 670	1 630
56	5.5	2 030	1 910	2	2 300	2 250
64	6	2 680	2 520	2	3 030	2 980
72	6	3 460	3 280	2	3 860	3 800
80	6	4 340	4 140	1.5	4 850	4 800
90	6	5 590	5 360	2	6 100	6 020
100	6	6 990	6 740	2	7 560	7 470
110				2	9 180	9 080

Figura 32. Área de esfuerzo sometida a tensión [71].

### 2.5.2. Conexión por soldadura de arco eléctrico (SMAW)

Se denomina soldadura por arco eléctrico a la unión de partes metálicas por medio del calentamiento del metal de aporte a un estado de fundición, la soldadura tiene mayor resistencia que la del metal base, en la Figura 33 se muestra la soldadura de arco eléctrico [87] [91].



**Figura 33.** Soldadura por arco eléctrico y electrodo con alma fundente [92].

La resistencia de una soldadura se determina de acuerdo con el estado límite de la fractura y está dada por las siguientes expresiones [77] [93]:

Resistencia nominal para la base es:

$$R_n = F_{nBM} \cdot A_{BM} \quad (25)$$

Resistencia nominal para el aporte es:

$$R_n = F_{nw} \cdot A_{we} \quad (26)$$

Donde  $F_{nBM}$  es el esfuerzo para la base,  $F_{nw}$  es el esfuerzo nominal para el aporte,  $A_{BM}$  es el área del metal base y  $A_{we}$  es el área efectiva de la soldadura.

### 2.5.3. Elección de varilla de aporte o electrodo

Para elección de la varilla de aporte o electrodo se analizará el entorno de trabajo, donde se toma en cuenta las condiciones de tracción y compresión, que se puede determinar con la Ecuación 27 [94].

$$\sigma_{adm} = \frac{F}{hl} \quad (27)$$

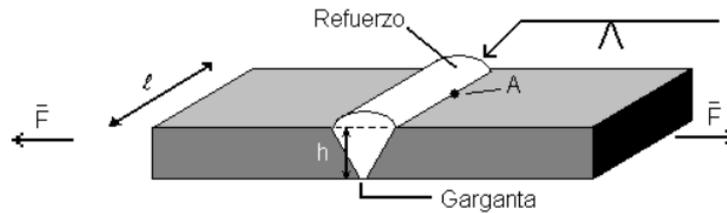


Figura 1

$l$  = Long. del cordón  
 $h$  = altura de la garganta

**Figura 34.** Esfuerzo de un cordón de soldadura [97].

Donde  $P$  es la fuerza ejercida sobre el cordón de soldadura,  $h$  es la altura y  $l$  es la longitud del cordón de soldadura. El esfuerzo de trabajo ( $\sigma_{adm}$ ) deberá ser menor que el esfuerzo del material de la soldadura ( $\sigma_{mat}$ ) multiplicada por 0.6 como se muestra en la Ecuación 28 [94].

$$\frac{P}{hl} = \sigma_{adm} \leq 0.6\sigma_{mat} \quad (28)$$

## 2.6. Conclusión del capítulo

Para el diseño de elementos de máquina es necesaria cada una de las ecuaciones detalladas en el presente capítulo, como también la experiencia y el buen juicio del diseñador de las máquinas, además, es recomendable realizar una simulación previa de cada uno de los componentes como se detalla en el siguiente capítulo. Para comenzar con los diferentes cálculos es necesario obtener datos de un catálogo de una marca confiable de los diferentes materiales a utilizarse.

## Capítulo III

### Cálculos y diseño de la maquina fibradora

En el presente capítulo se realizarán los cálculos, para diseñar los componentes de la máquina que se van a construir, también se seleccionarán las partes normalizadas en relación con los resultados de los elementos diseñados.

#### 3.1. Diseño de flecha de la máquina

De acuerdo con el catálogo del proveedor WEG [70], la potencia del motor seleccionado es de 1 Hp y 3520 RPM, usando la Ecuación 1 se tendrá que:

$$P = T \omega \quad (1)$$

$$T = \frac{P}{\omega}$$

$$T = \frac{1Hp}{3520rpm} \left| \frac{746W}{1Hp} \cdot \frac{1rpm}{\frac{\pi rad}{30seg}} \right|$$

$$T = 2.02Nm$$

El acero AISI 1018 fue seleccionado para la flecha o eje, utilizado en piezas generales de maquinaria de baja carga el cual tiene una resistencia mecánica 410-520 mega pascales y punto de fluencia de 235 mega pascales [95], el coeficiente de seguridad empleado es 2 y se puede observar en la Figura 19 lo cual se obtendrá que:

$$\tau_{\max} \leq \frac{\tau_{ut}}{N} \quad (29)$$

$$\tau_{\max} \leq \frac{410MPa}{2}$$

$$\tau_{\max} = 205MPa$$

Para determinar el diámetro del eje se usará la Ecuación 5, el eje tiene el concentrador de esfuerzo, en torsión y perforación transversal el cual previamente se determinó usando la Figura 18 y es igual a 2.7, por lo cual se obtiene:

$$\tau_{\max} = Kf_s \frac{16T_{\max}}{\pi d^3} \quad (5)$$

$$205 \frac{MN}{m^2} = 2.7 \cdot \frac{16(2.02Nm)}{\pi d^3}$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{2.7 \cdot \frac{16(2.02Nm)}{\pi \cdot 205 \times 10^6 \frac{N}{m^2}}}{}}$$

$$d = 5.13 \times 10^{-3} m$$

Usando el catalogo del proveedor DIPAC [95], se selecciona un eje de 25.4 mm el cual pasará por un proceso de mecanizado según el diseño de la máquina.

### 3.1.2. Resistencia de la flecha o eje a la fatiga

Una vez determinado el diámetro de la flecha de la máquina se determinará la resistencia a la fatiga usando los coeficientes de modificación, con lo cual se usa la Ecuación 6 y la Tabla 12 y se obtendrá que:

**Tabla 12.** Valores de factores de modificación.

Factor de modificación	Valor
$Se'$	205 MPa
$k_a$	1.1
$k_b$	0.86
$k_c$	0.57
$k_d$	1
$k_e$	0.814
$k_f$	1

$$Se = Se' k_a k_b k_c k_d k_e k_f \quad (6)$$

$$Se = 205MPa \times 1.1 \times 0.86 \times 0.57 \times 1 \times 0.81 \times 1$$

$$Se = 89.53MPa$$

### 3.1.3. Factor de seguridad en ejes

Para calcular la torsión máxima se utiliza la Ecuación 5 y se obtendrá que:

$$\tau_{\max} = \frac{16T_{\max}}{\pi d^3} \quad (5)$$

$$\tau_{\max} = \frac{16(2.02Nm)}{\pi(0.0254m)^3}$$

$$\tau_{\max} = 0.627MPa$$

En la flecha se tiene torsión pura por lo cual en la Ecuación 9 se tendrá lo siguiente:

$$\partial'_{\max} = \sqrt{\partial_{\max}^2 + 3\tau_{\max}^2} \quad (9)$$

$$\partial'_{\max} = \sqrt{3\tau_{\max}^2}$$

$$\partial'_{\max} = \sqrt{3(0.627MPa)^2}$$

$$\partial'_{\max} = 1.085MPa$$

Estos esfuerzos equivalentes pueden evaluarse usando la teoría de falla de Goodman usando la Ecuación 10.

$$\frac{1}{N} = \frac{\partial'_{\max}}{Se} \quad (10)$$

$$\frac{1}{N} = \frac{1.085MPa}{89.53MPa}$$

$$N = 82.51$$

### 3.2. Chasis o estructura de la máquina

Se dividirá a la estructura en dos secciones la primera donde se considera una viga simplemente apoyada y la segunda donde se considera una viga en voladizo, se realizará el diagrama de cuerpo libre donde se detallarán las fuerzas que están presentes como se muestra en la Figura 35 y los valores se detallan en la Tabla 13.

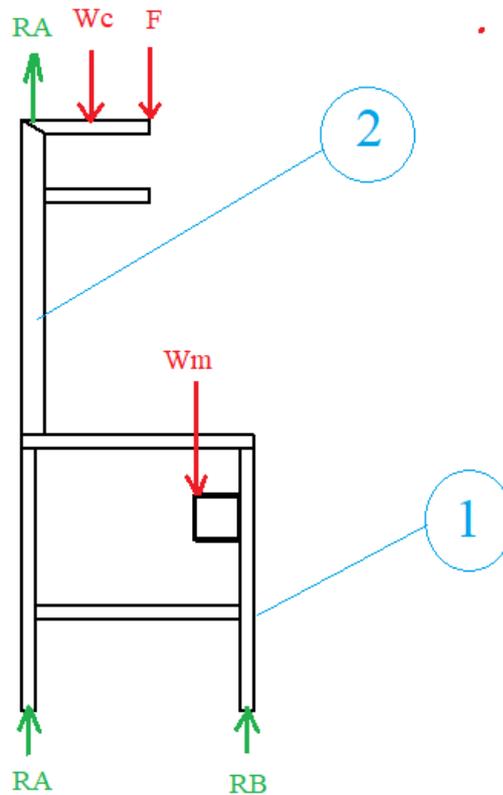


Figura 35. Fuerzas y reacciones presentes en la máquina

Tabla 13. Valores de cargas previamente obtenidos

Carga	Designación	Valor (Kg)
Peso del motor, flecha y plato giratorio	Wm	17
Peso de la caja de control	Wc	0.2
Peso del cañón y tolva	F	2

Luego del DCL se realizará la comprobación mediante los criterios de resistencia. Para ello se realizará un análisis de las fuerzas que actúan las cuales se calcularán a partir de la segunda ley de Newton la cual se expresa como:

## Sección 1

$$\uparrow^+ \sum F_Y = 0$$

$$RA + RB - Wm = 0$$

$$RA = Wm - RB$$

$$\uparrow^+ \sum M_A = 0$$

$$RB(0.50m) - Wm(0.30m) = 0$$

$$RB = \frac{3Wm}{5} = \frac{17Kg(9.82 \frac{m}{seg^2})(3)}{5}$$

$$RB = 100.16N$$

$$RA = 166.94N - 100.16N$$

$$RA = 66.77N$$

Una vez determinado las reacciones que se producen en la parte 1, se obtiene el diagrama de corte y momento flector máximo. (Observe la Figura 37)

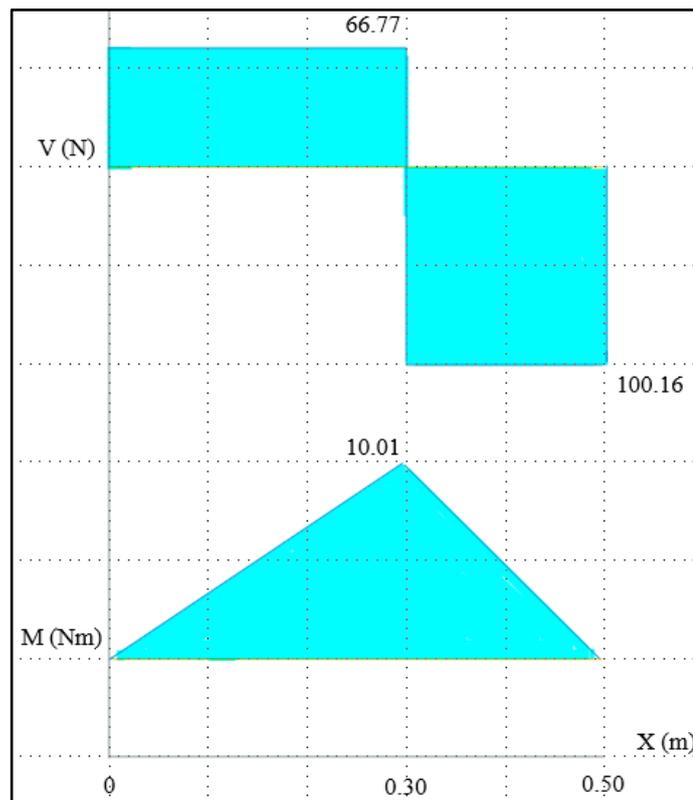


Figura 36. Diagrama de corte y momento flector máximo de la sección 1.

## Sección 2

$$\uparrow^+ \sum F_Y = 0$$

$$RA - Wc - F = 0$$

$$RA = Wc + F$$

$$RA = (0.2Kg + 2Kg)\left(\frac{9.82m}{seg^2}\right)$$

$$RA = 21.6N$$

$$\sum M_A = F \cdot d$$

$$M_A = Wc(0.10m) + F(0.20m)$$

$$M_A = \frac{(0.2kg)(9.82m)(0.10m)}{seg^2} + \frac{(2kg)(9.82m)(0.30m)}{seg^2}$$

$$M_A = 6.08Nm$$

Una vez determinado las reacciones que se producen en la parte 2, se obtiene el diagrama de corte y momento flector. (Observe la Figura 40)

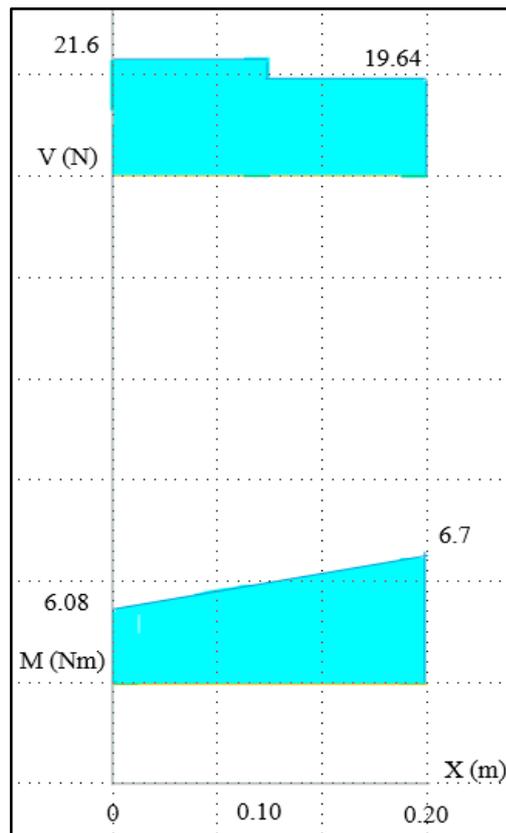


Figura 37. Diagrama de corte y momento flector de la sección 2.

### 3.2.1. Esfuerzo en vigas

Para el diseño seleccionamos tubo cuadrado de 25x1.2mm, el cual tiene una inercia de 1.08 cm<sup>4</sup>, área de 1.14 cm<sup>2</sup> y esfuerzo a la tracción de 340 MPa [96], usando la Ecuación 12 y la Ecuación 13 se obtiene que:

#### Sección 1

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}c}{I} \quad (13)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{10.01Nm(0.0125m)}{(1.08 \times 10^{-8})m^4}$$

$$\sigma_{\max} = 11.58MPa$$

$$N = \frac{S_{ut}}{\sigma_{\max}} \quad (12)$$

$$N = \frac{340MPa}{11.58MPa}$$

$$N = 29.34 \approx 29$$

#### Sección 2

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}c}{I} \quad (13)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{6.7Nm(0.0125m)}{(1.08 \times 10^{-8})m^4}$$

$$\sigma_{\max} = 7.75MPa$$

$$N = \frac{S_{ut}}{\sigma_{\max}} \quad (12)$$

$$N = \frac{340MPa}{7.75MPa}$$

$$N = 43.84$$

### 3.2.2. Esfuerzo en columnas

Para la columna que soporta el peso de la caja de control, y el tubo de fundición o cañón, se seleccionará un tubo rectangular de 60x30x1.5mm, el cual tiene un radio de curvatura de 0.662 pulgadas, un área de 1.86 pulgadas<sup>2</sup>, y un factor de longitud de  $K=2$ , al aplicar la Ecuación 17 se obtiene que:

$$\lambda = \frac{KL}{r} \quad (17)$$

$$\lambda = \frac{2(23.03 \text{ pulg})}{0.662 \text{ pulg}}$$

$$\lambda = 69.57 \text{ pulg}$$

Una vez obtenida la esbeltez entramos en las tablas de la Figura 23 para seleccionar la carga equivalente, aplicando la Ecuación 18 se obtiene que:

$$P = F_a A \quad (18)$$

$$P \geq P_{real}$$

$$P = 16.43 \text{ KSI} (1.86 \text{ pulg}^2)$$

$$30.55 \text{ Klb} \geq P_{real}$$

Para la carga real se suma las reacciones obtenidas en los dos casos anteriores y se obtiene una carga de 390.83 N, por cual se obtiene que:

$$30.55 \text{ Klb} \geq 390.83 \text{ N} \left| \frac{0.2248 \text{ Lb}}{1 \text{ N}} \right|$$

$$30.55 \text{ Klb} \geq 87.86 \text{ Lb}$$

### 3.3. Selección de cojinetes

Previamente en el cálculo se obtuvo el diámetro de la flecha que es igual a 25.4mm, del catálogo [86] se seleccionará el cojinete de bolas rígidas el cual tiene unas propiedades detalladas en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Valores obtenidos del catálogo SKF [86].

Denominación	Valor
$F_a$	166.94 N
C	17.8 KN
$C_0$	9.65 KN
$f_0$	13
X	0.56
Y	2.3

Estos valores se sustituirán en la Ecuación 20 y se obtendrá que:

$$P = XF_r + YF_a \quad (20)$$

$$P = 0.56(0) + 2.3(166.94N)$$

$$P = 383.96N$$

Obteniendo el valor de carga equivalente se sustituirá en la Ecuación 19.

$$L_{10} = \left( \frac{C}{P} \right)^p \quad (19)$$

$$L_{10} = \left( \frac{17.8KN}{383.96N} \right)^3$$

$$L_{10} = 99632.73$$

Obtenido la vida nominal de un cojinete, dicho valor se sustituirá en la expresión de vida nominal ajustada dada en la Ecuación 21.

$$L_{na} = a_1 a_{23} L_{10} \quad (21)$$

$$L_{na} = 1(0.73)(99632.73)$$

$$L_{na} = 72731.89$$

### 3.4. Conexión apernada

En la máquina se podrá encontrar uniones apernadas, por lo cual se trabajará con la carga del peso del motor ya que es la más alta de todas las cargas. En la Figura 31 se detallan las ecuaciones para obtener los factores que intervienen en la Ecuación 24, usando la Figura 32 obtenemos que,  $A_t = 36 \text{ mm}^2$ . En la Figura 38 se muestra el diagrama de cuerpo libre de la placa del motor que su espesor es de 4 mm.

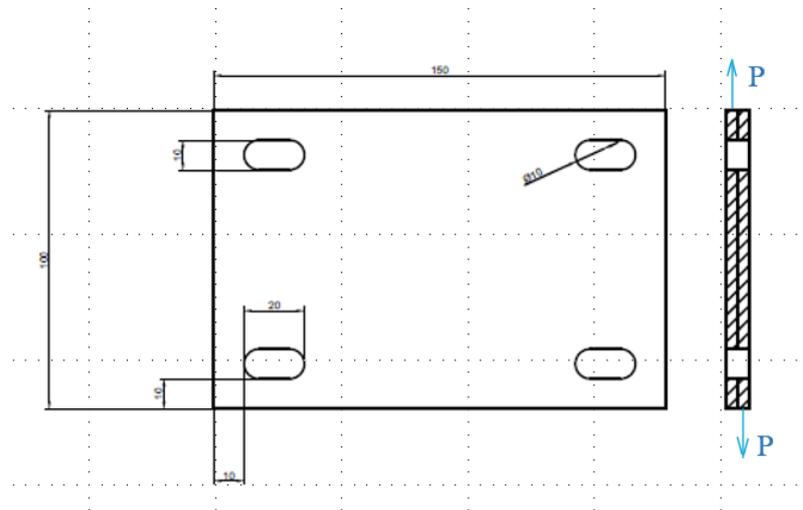


Figura 38. DCL de la base del motor

$$K_b = \frac{A_d A_t E}{A_d l_t + A_t l_d} \quad (24)$$

$$l_t = 2(8\text{mm}) + 6\text{mm}$$

$$l_t = 22\text{mm}$$

$$l_d = 25\text{mm} - 22\text{mm}$$

$$l_d = 3\text{mm}$$

$$A_d = \frac{\pi(8mm)^2}{4}$$

$$A_d = 50.26mm^2$$

$$K_b = \frac{(50.26mm^2)(36mm^2)200GPa}{(50.26mm^2)(22mm) + (36mm^2)(3mm)}$$

$$K_b = \frac{(1800mm^4)200 \frac{KN}{mm^2}}{1213.72mm^3}$$

$$K_b = 296608.77 \frac{N}{mm} \left| \frac{1000mm}{1m} \right|$$

$$K_b = 296.6 \frac{MN}{m}$$

$$\sigma = \frac{P}{A_d} \tag{11}$$

$$\sigma = \frac{166.94N}{50.26mm^2} \left| \frac{(1000mm)^2}{(1m)^2} \right|$$

$$\sigma = 3.32MPa$$

### 3.5. Conexión soldada

La resistencia de la conexión soldada se sumará los esfuerzos calculados anteriormente en la estructura o chasis de la máquina, y utilizando las Ecuaciones 25 y 26 se obtendrá la siguiente expresión:

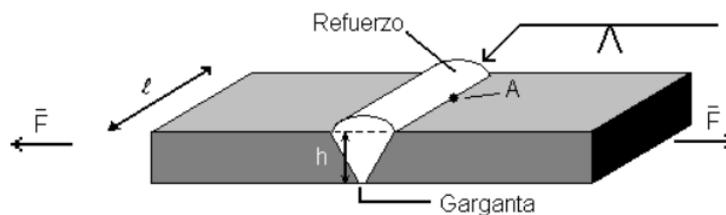


Figura 1

$l$  = Long. del cordón  
 $h$  = altura de la garganta

Figura 39. Diagrama de cuerpo libre de una típica soldadura [97].

**Resistencia nominal para el metal base es:**

$$R_n = F_{nBM} \cdot A_{BM} \quad (25)$$
$$R_n = 83.17MPa \cdot (0.00014m^2)$$
$$R_n = 11.64KN$$

**Resistencia nominal para el metal de aporte es:**

$$R_n = F_{nw} \cdot A_{we} \quad (26)$$
$$R_n = 413MPa \cdot (0.00014m^2)$$
$$R_n = 57.82KN$$

### 3.5.1. Elección del electrodo

Obtenidos los valores de resistencia de metal base y metal de soldadura, se usará la Ecuación 27 y se obtendrá que:

$$\sigma_{adm} = \frac{P}{hl} \quad (27)$$

$$\sigma_{adm} = \frac{11.64KN}{(2mm)(500mm)}$$

$$\sigma_{adm} = 11.64MPa$$

$$\sigma_{mat} = \frac{P}{hl}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{57.82KN}{(2mm)(500mm)}$$

$$\sigma_{adm} = 57.82MPa$$

El esfuerzo de trabajo ( $\sigma_{adm}$ ) deberá ser menor que el esfuerzo del material de la soldadura ( $\sigma_{mat}$ ) multiplicada por 0.6, Usando la Ecuación 28 se obtendrá:

$$\frac{P}{hl} = \sigma_{adm} \leq 0.6\sigma_{mat} \quad (28)$$

$$11.64MPa \leq 0.6(57.82MPa)$$

$$11.64MPa \leq 34.69MPa$$

### 3.6. Validación de los componentes mediante software

Se analizará la estructura de la máquina con ayuda de un software avanzado de ingeniería Inventor Profesional, que permite comprobar si las piezas ensambladas soportarán la carga y que tenga el mejor funcionamiento.

#### 3.6.1. Estructura

Para la simulación se tomó en cuenta como carga estática al peso del motor, peso de la tolva y cañón de alimentación, en la base de la máquina se usó una restricción fija, para poder realizar el análisis. El esfuerzo máximo de Von Mises es de 15.65 MPa. (Observe la Figura 40)

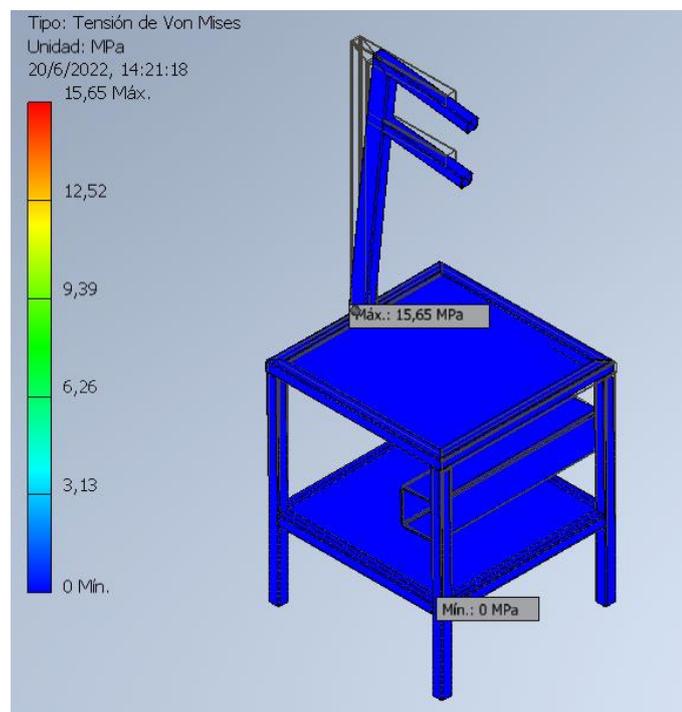


Figura 40. Tensión de Von Mises

### 3.6.2. Desplazamiento

La Figura 41 muestra el desplazamiento al aplicar las cargas estaticas en los nodos críticos de la estructura, el desplazamiento máximo que se observa es de 0.1044 mm, lo que genera la seguridad que la estructura no va a colapsar.

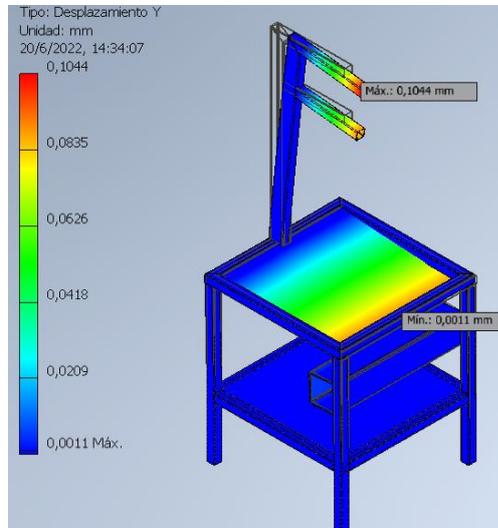


Figura 41. Desplazamiento con respecto al eje Y

### 3.6.3. Factor de seguridad

La Figura 42 muestra que el coeficiente de seguridad es 13.23 lo que nos indica que la estructura es confiable y puede soportar las cargas asumidas o incluso se puede aumentar la carga si así se requiere.

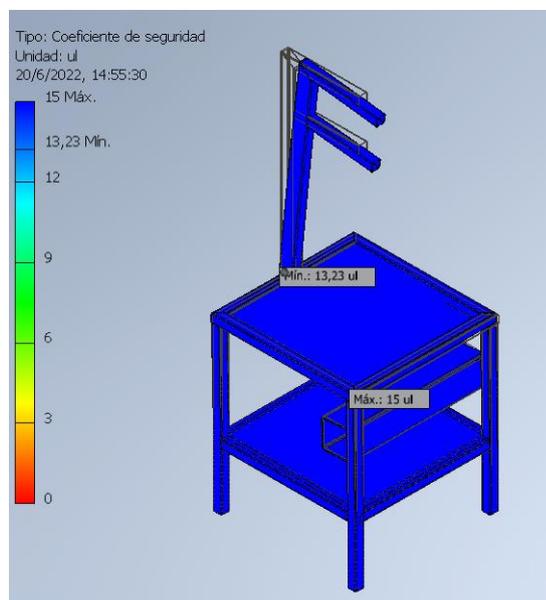


Figura 42. Coeficiente de seguridad de la estructura

### 3.6.4. Flecha o eje de transmisión

Para la simulación se tomó en cuenta como carga estática al peso del plato de fibrado, tolva y el par de torsión del motor, se restringió en el acople del motor y se tomó una restricción de rodamientos. La Figura 46 muestra el esfuerzo de tensión Von Mises.

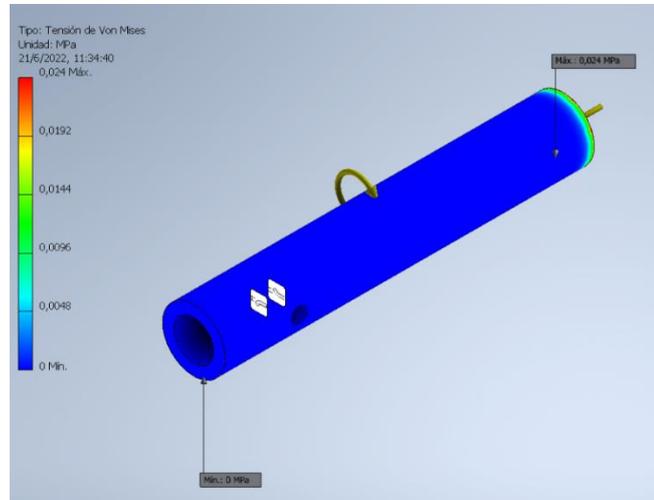


Figura 43. Esfuerzo de tensión en el eje.

### 3.6.5. Desplazamiento

La Figura 47 muestra el desplazamiento al aplicar el peso del plato de fibrado y el par de torsión.

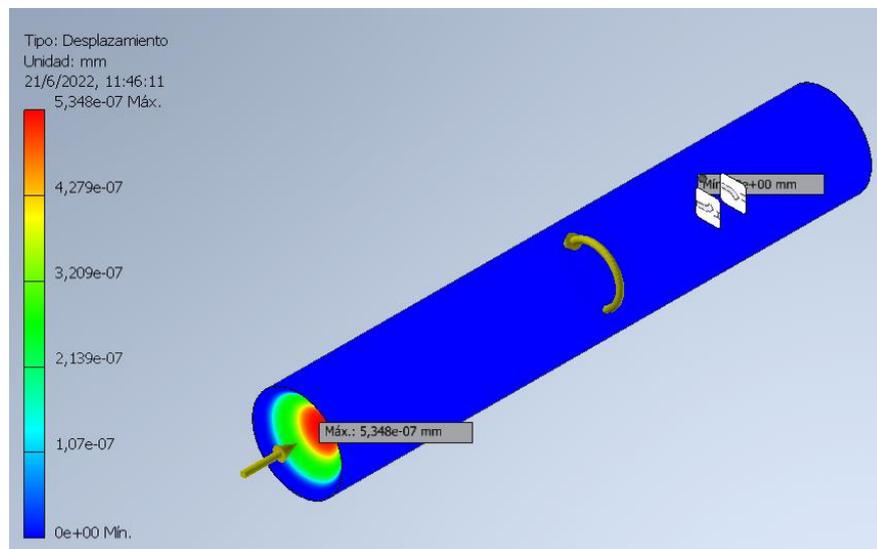


Figura 44. Desplazamiento del eje.

### 3.6.6. Factor de seguridad

La Figura 45 muestra que el coeficiente de seguridad es 15 lo que nos indica que el eje es confiable y puede soportar las cargas asumidas o incluso se puede aumentar la carga si así se requiere.

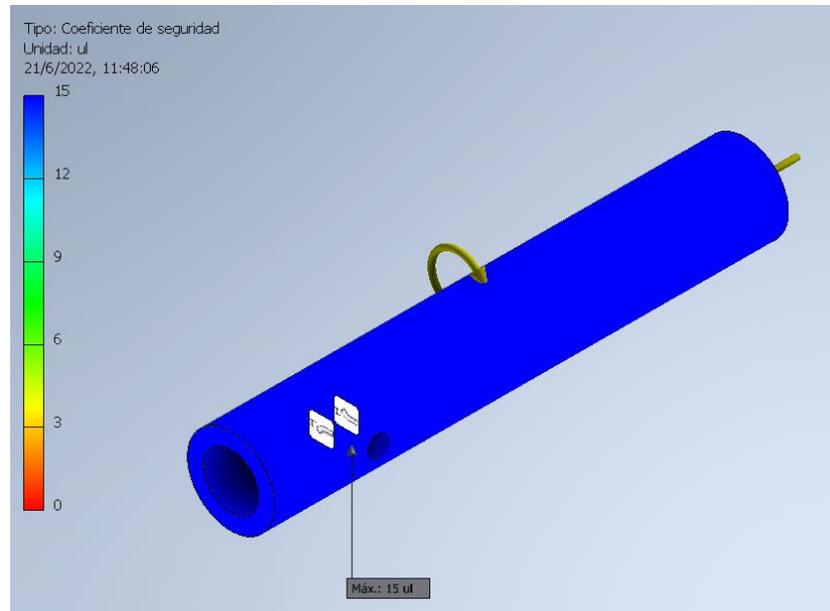


Figura 45. Coeficiente de seguridad del eje.

### 3.7. Conclusiones del capítulo

Mediante las fórmulas se calculó un esfuerzo máximo de 11.58 MPa, y mediante el software avanzado de ingeniería Inventor Profesional el esfuerzo máximo 15.65 MPa, por lo que hay un margen de error del 26%. Se puede concluir que la estructura no va a fallar y se puede ensamblar con toda seguridad.

Los rodamientos o chumaceras cumplen con 72731 millones de revoluciones de vida útil, lo que quiere decir, que tiene vida infinita.

El esfuerzo máximo en los pernos de sujeción del motor es de 3.32 MPa por lo que se seleccionará pernos M8 de grado 4.6 que tienen un esfuerzo máximo a tensión de 400MPa.

## Capítulo IV

### Análisis financiero y resultados de la máquina fibradora

En este capítulo se analizarán los valores que implica la construcción de la máquina, donde se toma en cuenta los ingresos y egresos que generará este proyecto, además se evidenciará la fibra PET como producto final obtenido.

#### 4.1. Análisis Financiero

Se tomará el precio de referencia de los centros de acopio donde las botellas son vendidas a un costo de entre USD 0.45 y USD 0.65 como lo menciona Zambrano en su investigación [56]. Teniendo el valor referencial se realizará el análisis de inversión inicial, la Tabla 15 muestra el promedio diario y anual de operación de la máquina.

Tabla 15. Valores diarios y anuales promedio de trabajo

	<b>Botellas</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Kg/h</b>	<b>USD/Kg</b>	<b>Precio Final (USD)</b>
<b>Horas/día</b>	PET	8	5	0.65	22
<b>Horas/anuales</b>	PET	1920	9600	0.65	6240

La Tabla 16 indica los ingresos durante tres años.

Tabla 16. Ingresos proyectados para tres años.

<b>Año</b>	<b>Ingresos (USD)</b>
1	6240
2	6240
3	6240

La Tabla 17 muestra los egresos de una persona con un promedio de 8 horas diarias de labores.

**Tabla 17.** Porcentaje de remuneración con relación a las horas trabajadas

<b>Sueldo básico (USD)</b>	<b>Equivalente de salario diario (USD)</b>	<b>Remuneración por hora (USD)</b>
450	22	2.8

La Tabla 18 es la proyección de egresos mensuales por estar en funcionamiento la máquina.

**Tabla 18.** Egresos mensuales

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad (USD)</b>
Remuneración del trabajador	450
Servicio básico	22
Gastos varios	15
Total	487
por 12 meses	5844

Para la construcción de la máquina se realizó el siguiente presupuesto .

**Tabla 19.** Inversión para la construcción de la máquina Fibradora

<b>Designación</b>	<b>Cant.</b>	<b>U.</b>	<b>unitario (USD)</b>	<b>total (USD)</b>
Plancha 1200x2400x1.5mm	1		67.48	67.48
Tubo cuadrado 30x1.5mm	2		13.98	27.96
Tubo redondo 38x1.5mm	1		14.84	14.84
Electrodo AGA 6011	2	Kg	5.87	11.75
Motor WEG 3520 RPM 110/220V	1		133.9	133.9
Chumacera de pared diámetro 25.4mm	1	par	21.20	21.20
Perno cabeza hexagonal diámetro 10mm (arandela plana y de presión)	4		1.50	6.00
Perno Allen diámetro ¼ de pulgada	24		0.1053	2.53
Perno Allen M8 grado 4.5	4		0.1755	0.70

Designación	Cant.	U.	unitario (USD)	total (USD)
Tuerca diámetro 1 pulgada UNF	1		1.58	1.58
Prisionero diámetro 1/4	2		0.39	0.78
Resistencia eléctrica tipo abrazadera diámetro 38mm 300W 220V	3		15	45
Resistencia eléctrica circular 1500W 110V	1		25	25
Caja plástica 175x110x83mm	1		9.24	9.24
Control de temperatura 72x72mm -199°C-1300 °C	1		40	40
Contactador 220V 9A 3P	1		14	14
Breaker 2P 20A	1		6	6
Breaker 2P 16A	1		6	6
Pulsador	2		3	6
Relé EST 25A 1P 3-32Vdc salida 24-480Vac	1		13	13
Relé térmico 7-10A	1		17	17
Selector 2P	1		3.21	3.21
Termocupla tornillo tipo J	1		8	8
Disco de corte 4 pulgadas	5		1.72	8.6
Disco de pulido 4 pulgadas	1		2	2
Pintura anticorrosiva negra	2	litro	5	10
Thiñer	2	litro	2	4
Mano de obra mecánica	5	días	40	200
Mano de obra eléctrica	2	días	50	100

El valor de todos los elementos necesarios para la máquina da un valor total de 805.77 dólares.

#### 4.1.1. Flujo neto

Se toma en cuenta los ingresos respecto a los egresos para un tiempo de tres años, como se muestra en la Tabla 18.

**Tabla 20.** Flujo neto en tres años

<b>Año</b>	<b>Ingresos (USD) A</b>	<b>Egresos (USD) B</b>	<b>Fn=A-B</b>
1	6240	5844	396
2	6240	5844	396
3	6340	5844	396

#### 4.1.2. Valor Actual Neto (VAN)

El indicador financiero VAN es usado para verificar si es viable o no un proyecto, para lo cual asocia los egresos e ingresos quitando la inversión inicial, y está dado por la Ecuación 30 [98].

$$VAN = \left( \frac{f1}{(1+i)^1} + \frac{f2}{(1+i)^2} + \frac{f3}{(1+i)^2} + \dots + \frac{fn}{(1+i)^n} - I_0 \right) \quad (30)$$

Donde  $fn$  es el flujo de efectivo del proyecto,  $I_0$  es la inversión inicial  $i$  es el interés y  $n$  son los periodos. Para aplicar el VAN se va a tomar valores de un préstamo otorgado por un banco en el Ecuador con una tasa del 11.85 %.

$$VAN = \left( \frac{396}{(1+0.1185)^1} + \frac{396}{(1+0.1185)^2} + \frac{396}{(1+0.1185)^2} - 805.77 \right) \quad (31)$$

$$VAN = 181.34$$

En la Tabla 21 se menciona las condiciones para que el proyecto sea rentable [98].

**Tabla 21** Condiciones del VAN [98]

<b>Indicador</b>	<b>Condición</b>
$VAN > 0$	Proyecto rentable
$VAN < 0$	No rentable
$VAN = 0$	No hay ganancia ni pérdida

### 4.1.3. Tasa Interna de Retorno (TIR)

Este indicador financiero cuantifica los valores en porcentaje, el TIR se calcula en relaciona al VAN igualando acero como indica la Ecuación 32 [99].

$$0 = \left( \frac{f1}{(1+TIR)^1} + \frac{f2}{(1+TIR)^2} + \frac{f3}{(1+TIR)^2} + \dots + \frac{fn}{(1+TIR)^n} - I_0 \right) \quad (32)$$

Donde  $fn$  es el flujo de efectivo del proyecto,  $I_0$  es la inversión inicial  $TIR$  es la tasa de interés y  $n$  el número de periodos.

$$0 = \left( \frac{396}{(1+TIR)^1} + \frac{396}{(1+TIR)^2} + \frac{396}{(1+TIR)^2} - 805.77 \right)$$

$$TIR = 0.9769$$

Para que sea rentable el proyecto se tiene las condiciones en la Tabla 22 , donde  $i$  tasa de descuento de flujos del cálculo del VAN [99].

**Tabla 22.** Condiciones para el TIR [99].

Indicador	Condición
$TIR > i$	Proyecto rentable
$TIR < i$	Proyecto no rentable
$TIR = i$	No hay ganancia ni pérdida

### 4.1.4. Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI)

El PRI se usa con los flujos netos, para obtener los flujos efectivos acumulados. (Observe la Tabla 23)

**Tabla 23** Flujos acumulado en tres años

<b>Año</b>	<b>Fn</b>	<b>Fa</b>
0	-805.77	
1	396	922
2	396	1318
3	396	2240

Para el periodo de recuperación de la inversión inicial (PRI), se aplica la siguiente fórmula [100].

$$PRI = a + \frac{(b - c)}{d} \quad (33)$$

Donde  $a$  es el inmediato que se recupera la inversión,  $b$  es la inversión inicial,  $c$  es el flujo de efectivo acumulado en el año inmediato anterior y  $d$  es el flujo de efectivo en el año que se recupera la inversión.

$$PRI = 1 + \frac{(805.77 - 922)}{396}$$

$$PRI = 0.706$$

## 4.2. Pruebas y Resultados

Se realizará pruebas en la máquina para definir parámetros.

### 4.2.1. Tiempo para la temperatura de fundición del PET

La Tabla 20 muestra los diferentes tiempos que le toma llegar a la máquina a la temperatura de operación, debido a que el calor se disipa al medio ambiente provocando que los tiempos sean elevados.

**Tabla 24.** Tiempos de la máquina para llegar a la temperatura de operación

<b>Prueba</b>	<b>T° Ambiente</b>	<b>Tiempo</b>	<b>T° Operación</b>
1	19 °C	18 min	260 °C
2	17 °C	17.4 min	260 °C
3	20 °C	15 min	260 °C

#### 4.2.2. Temperatura y estado del PET

En forma experimental se ingresó el PET a diferentes temperaturas y de manera visual se pudo apreciar el estado a la salida del cañón de la fibradora. La Tabla 21 muestra dichas apreciaciones.

Tabla 25. Temperatura de operación y estado del material

Prueba	T° Ambiente	T° Operación	Estado del PET
1	19 °C	230 °C	Grumo
2	19 °C	260 °C	Fundido
3	20 °C	292 °C	Fundido/Degradado

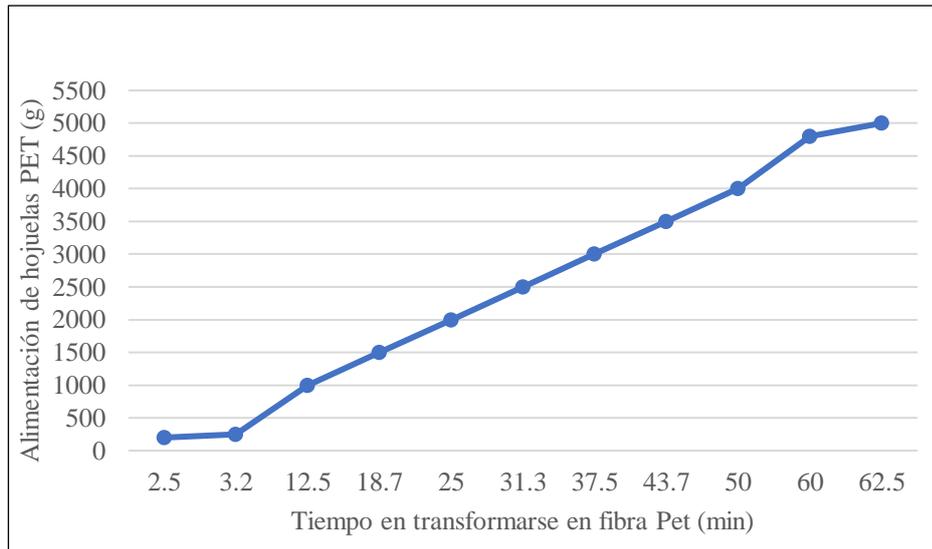
Se puede concluir que el PET se funde a los 260 °C y a partir de los 290 °C se puede observar la degradación del material.

#### 4.2.3. Comparación de la capacidad real de la máquina con la capacidad teórica

De forma teórica se dispuso que la capacidad de la máquina sea de 5 Kg/h, y de manera practica realizando diferentes pruebas a la máquina, como resultado se llega a una capacidad real de 4.8 Kg/h, lo que nos deja un error del 4 %, este error es debido a que el calor se disipa al medio ambiente y tarda en llegar a la temperatura de operación, como se muestra en la Tabla 20.

#### 4.2.4. Capacidad real de la máquina

En la Figura 47 se muestra la tendencia que tiene la máquina, desde la alimentación de hojuelas PET en gramos y el tiempo que le toma en convertirse en fibra PET medido en minutos.



**Figura 46.** Grafica de alimentación vs tiempo.

Se puede apreciar que la máquina fibradora va a procesar 4800 gramos de hojuelas PET en 60 minutos, por lo que se puede concluir que la capacidad real de la máquina es de 4.8 Kg/h.

#### 4.3. Resultado final

La materia prima PET reciclado, se alimenta por la tolva y a su vez se funde en el cañón a 260 °C, esta resina cae sobre la centrifugadora que gira a 3520 RPM, haciendo que pase por las perforaciones de 3mm provista en el plato, dando como resultado la fibra PET. La Figura 48 muestra la fibra PET como producto final.



**Figura 47.** Fibra PET obtenida

## Conclusiones

- Se diseñó y construyó una máquina para el fibrado de hojuelas de PET reciclado, que servirá para la reducción de residuos sólidos de la ciudad de Quito, así también se crea un futuro proyecto de reciclaje.
- Se obtuvo una deflexión de 0.144 mm y un factor de seguridad de 13, por lo que se concluye que la máquina operará sin riesgo de falla mecánica.
- Se llegó a la fibra PET por dos fenómenos, el calor de 260 °C producido por las resistencias eléctricas en el cañón y la fuerza centrífuga que gira a 3520 RPM en el plato de fibrado, sin estos dos fenómenos la fibra no se produciría.
- En base a las pruebas que se realizaron, se determinó que la fibradora recibe una carga de 160 gramos de hojuelas y le toma 2.5 minutos en transformarle en fibra, con lo que se puede decir que la capacidad de la máquina es de 4.8 Kg/h.
- Comparando la capacidad teórica de la máquina que es de 5 Kg/h, y la capacidad real de la máquina que es de 4.5 Kg/h, hay un error del 4 %.
- Los indicadores financieros VAN = 181.34 Y TIR = 0.9769, indican que el proyecto es completamente rentable, y el periodo de recuperación de la inversión es de aproximadamente 7 meses.

### **Recomendaciones**

- La temperatura de operación no debe exceder los 290 °C, debido a que el material se degrada y como resultado se llega a obtener material quemado.
- El calor que se produce en el cañón de la máquina se disipa al ambiente, esto hace que tarde mucho tiempo en llegar a la temperatura de operación, aproximadamente 16 minutos, se recomienda poner a la máquina en un lugar aislado para reducir dicho tiempo de calentamiento.
- Se recomienda tener un sistema de triturado y tamizado para obtener mejores hojuelas de PET y optimizar el tiempo de fundición.
- La fibra PET al ser hipoalergénica, no requiere el uso de guantes y mascarilla para su manipulación.
- La boquilla del cañón es soldada, lo que se recomienda es usar una unión roscada para facilidad de desmontaje y limpieza del cañón.

## Referencias

- [1] S. Heinrichs, «Noticias ONU,» 5 Junio 2018. [En línea]. Available: <https://news.un.org/es/story/2018/06/1435111>. [Último acceso: 17 Diciembre 2020].
- [2] P. Ruggeri, «¿Que es el PET y como se recicla?,» 28 Enero 2013. [En línea]. Available: <https://espaciosustentable.com/que-es-el-pet-y-como-se-recicla/>. [Último acceso: 17 Diciembre 2020].
- [3] Ministerio del Medio Ambiente y Agua del Ecuador, «Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos,» 2002. [En línea]. Available: <https://www.ambiente.gob.ec/programa-pngids-ecuador/>. [Último acceso: 17 Diciembre 2020].
- [4] R. Geyer, J. Jambeck y K. Lavender Law, «Production, use, and fate of all plastics ever made,» *Science Advances*, vol. 3, n° 7, pp. 25-29, 2017.
- [5] SYSTEMIQ, «Rompiendo la Ola de Plástico,» Julio 2020. [En línea]. Available: [https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2020/07/Spanish\\_Summary.pdf](https://www.systemiq.earth/wp-content/uploads/2020/07/Spanish_Summary.pdf). [Último acceso: 20 Enero 2021].
- [6] INEC, «Según la última estadística de información ambiental: Cada ecuatoriano produce 0,58 kilogramos de residuos sólidos al día,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/segun-la-ultima-estadistica-de-informacion-ambiental-cada-ecuatoriano-produce-058-kilogramos-de-residuos-solidos-al-dia/>. [Último acceso: 17 Diciembre 2020].
- [7] EMASEO, «Quito a Reciclar,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.emaseo.gob.ec/gestion-ambiental/quitoareciclar/>. [Último acceso: 11 Febrero 2021].
- [8] M. S. Narváez Vásconez y J. P. Luna Marín, «Estudio de factibilidad de empresa de alquiler de máquinas para reciclaje de botellas plásticas,» Abril 2014. [En línea]. Available: <https://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/64/1/T-UIDE-0018.pdf>. [Último acceso: 11 Febrero 2021].
- [9] L. Tapia Nuñez, «Políticas para la gestión integral de plástico en Ecuador,» 03 Abril 2014. [En línea]. Available: <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/06/Acuerto-19.pdf>. [Último acceso: 22 Diciembre 2020].
- [10] D. Builes, A. Franco y E. Tous, «Reciclado Botellas de PET en Resinas de Poliéster Insaturado,» *AEMAC*, vol. 3, n° 4, pp. 1-6, 2019.
- [11] L. Redes, «¿Por qué es importante reciclar el plástico?,» 26 Julio 2019. [En línea]. Available: <https://www.leonardo-gr.com/es/blog/por-qu-es-importante-reciclar-el-pl-stico>. [Último acceso: 20 Enero 2021].

- [12] M. v. Elven, «How sustainable is recycled polyester?,» FASHIONUNITED, 15 Noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://fashionunited.uk/news/fashion/how-sustainable-is-recycled-polyester/2018111540000>. [Último acceso: 20 Enero 2021].
- [13] WRAP, «PET Plastic Bottles,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.wrap.org.uk/collections-and-reprocessing/dry-materials/plastics/guidance/pet-plastic-bottles>. [Último acceso: 20 Enero 2021].
- [14] S. Webster, «¿What is recycled polyester?,» tscudo, 10 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://tscudo.com.au/blogs/news/what-is-recycled-polyester>. [Último acceso: 21 Enero 2021].
- [15] National Geographic, «PET: el mejor aliado del medio ambiente, ¿lo sabías?,» 7 Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.ngenespanol.com/ecologia/pet-el-mejor-aliado-del-ambiente-ecoce/>. [Último acceso: 20 Enero 2021].
- [16] D. Gallo, «Así se transforman las botellas pet para su reutilización,» EL TIEMPO, 04 Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/como-es-el-proceso-de-reciclaje-y-reutilizacion-de-las-botellas-plasticas-416636>. [Último acceso: 20 Enero 2021].
- [17] ECOCE, «Beneficios Economicos-sociales,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.ecoce.mx/reciclaje#beneficios>. [Último acceso: 20 Enero 2021].
- [18] E. Johnson, «Recycling Plastic into Textiles,» Sustain the Mag, 2020. [En línea]. Available: <https://www.sustainthemag.com/style/is-recycling-plastic-into-textiles-really-the-best-option>. [Último acceso: 21 Enero 2021].
- [19] E. Sarioğlu y H. Kübra Kaynak, «PET Bottle Recycling for Sustainable Textile,» *Intechopen Limited*, vol. 2, pp. 1-16, 2017.
- [20] R. Gupta, V. Kumar Shukla y P. Agarwal, «Sustainable Transformation in Modest Fashion Through “RPET Technology” and “Dry-Dye” process, using Recycled PET Plastic,» *International Journal of Recent Technology and Engineering*, vol. 8, n° 3, pp. 1-7, 2019.
- [21] AUARA, «Ventajas de utilizar material reciclado,» 06 Junio 2018. [En línea]. Available: <https://auara.org/blogs/news/ventajas-de-utilizar-material-reciclado>. [Último acceso: 21 Enero 2021].
- [22] E. Martínez, «México Recicla "Una empresa con economía circular en el ADN",» *Magazine Reciclado*, vol. 1, n° 11, pp. 1-16, 2020.
- [23] A. S. Manjarekar, R. D. Gulpatil, V. P. Patil, R. S. Nikam y C. M. Jeur, «Utilization of Plastic Waste in Foundry Sand Bricks,» *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, vol. 5, n° 4, pp. 1-8, 2017.

- [24] I. Almeshal, B. A. Tayeh, R. Alyousef, H. Alabduljabbar y A. M. Mohamed, «Eco-friendly concrete containing recycled plastic as partial replacement for sand,» *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, nº 3, pp. 4631-4643, 2020.
- [25] G. O. Bamigboye, B. U. Ngene, D. Ademola y J. K. Jolayemi, «Experimental Study on the Use of Waste Polyethylene Terephthalate (PET) and River Sand in Roof Tile Production,» *Journal of Physics: Conference Serie*, vol. 1378, nº 4, pp. 1-10, 2019.
- [26] B. Dobón Oliver, «Materiales de construcción reciclados y reutilizados para la arquitectura sostenible,» Octubre 2018. [En línea]. Available: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/115062/memoria\\_44533185.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/115062/memoria_44533185.pdf?sequence=1&isAllowed=y). [Último acceso: 10 Marzo 2021].
- [27] Y. Martínez Lopez, J. Benigno Paes, E. Martínez Rodríguez, F. Gomes Gonçalves y D. Gustave, « Wood particleboards reinforced with thermoplastics to improve thickness swelling and mechanical properties,» *CERNE*, vol. 24, nº 4, pp. 369-378, 2018.
- [28] M. Beltrán Rico y A. Marcilla Gomis, *Tecnología de los polímeros*, Universidad de Alicante campus San Vicente: UNE, 2012.
- [29] A. Labeaga Viteri, «Polímeros biodegradables. Importancia y potenciales aplicaciones,» Febrero 2018. [En línea]. Available: [http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-Ciencias-CyTQ-Alabeaga/Labeaga\\_Viteri\\_Aitziber\\_TFM.pdf](http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-Ciencias-CyTQ-Alabeaga/Labeaga_Viteri_Aitziber_TFM.pdf). [Último acceso: 11 Enero 2021].
- [30] T. M. Gutiérrez Valencia, D. M. Chito Trujillo y G. Cuervo Ochoa, *Polímeros*, Colombia: Universidad del Cauca, 2019.
- [31] A. Besednjak Dietrich, *Materiales Compuestos*, Barcelona: UPC, 2005.
- [32] Creative Mechanisms, «Everything you Need to Know About The World's Most Useful Plastic (PET and Polyester),» 20 Junio 2016. [En línea]. Available: <https://www.creativemechanisms.com/blog/everything-about-polyethylene-terephthalate-pet-polyester>. [Último acceso: 08 Enero 2021].
- [33] F. Gomollón-Bel, «Polyethylene terephthalate,» 12 Octubre 2016. [En línea]. Available: <https://www.chemistryworld.com/podcasts/polyethylene-terephthalate/1017555.article>. [Último acceso: 08 Enero 2021].
- [34] F. Leon Olivares, A. Gutiérrez Rodríguez y J. Palacio Alquisira, «PET, Poli (tereftalato de etileno),,» *Educación Química*, vol. 13, nº 1, p. 13, 2001.
- [35] QuimiNet, «Todo lo que quería saber del PET,» 22 Noviembre 2005. [En línea]. Available: <https://www.quiminet.com/articulos/todo-lo-que-queria-saber-del-pet-2806.htm>. [Último acceso: 08 Enero 2021].

- [36] Tecnología de los Plásticos , «PET,» 30 Mayo 2011. [En línea]. Available: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html>. [Último acceso: 08 Enero 2021].
- [37] GoodFellow, «Politereftalato de etileno (poliester, PET, PETP),» 2020. [En línea]. Available: <http://www.goodfellow.com/S/Politereftalato-de-Etileno.html>. [Último acceso: 08 Enero 2021].
- [38] J. Thomas, «Importance and Applications of Polyethylene Terephthalate wastes in the Coating Industry: A Review,» *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 5, nº 3, pp. 2350-0328, 2018.
- [39] P. Verma, «An Overview of Polyethylene Terephthalate (PET) Uses and Features,» 10 Agosto 2019. [En línea]. Available: <https://medium.com/@mgpolycubes/an-overview-of-polyethylene-terephthalate-pet-uses-and-features-64d462d700bc>. [Último acceso: 11 Marzo 2021].
- [40] ShinaDT Co., «Polyethylene Terephthalate, PET,» 2019. [En línea]. Available: [https://shinadt.com/polymer/polyethylene-terephthalate\(pet\).html](https://shinadt.com/polymer/polyethylene-terephthalate(pet).html). [Último acceso: 11 Marzo 2021].
- [41] «¡ Cuidemos el Planeta!,» 2021. [En línea]. Available: <https://cuidemoselplaneta.org/reciclaje/>. [Último acceso: 12 Enero 2021].
- [42] Alternativa Ecológica, «Reciclar no es lo mismo que reutilizar,» 13 Abril 2015. [En línea]. Available: <https://www.alternativaecologica.com/reciclar-no-es-lo-mismo-que-reutilizar/>. [Último acceso: 12 Enero 2021].
- [43] M. N. Ortega Leiva, «El reciclaje de PET está en su mejor momento,» Tecnología del plástico, Agosto 2011. [En línea]. Available: <https://www.plastico.com/temas/El-reciclaje-de-PET-esta-en-su-mejor-momento+3084014>. [Último acceso: 12 Enero 2021].
- [44] CORDIS, «Un nuevo proyecto permite reciclar el PET a través de la potencia de las radiaciones de microondas,» 26 Noviembre 2019. [En línea]. Available: <https://iresiduo.com/noticias/italia/cordis/19/11/26/nuevo-proyecto-permite-reciclar-pet-traves-potencia-radiaciones>. [Último acceso: 12 Enero 2021].
- [45] E. Joo y J.-E. Oh, «Los Retos del PET Reciclado,» Textil Word, 31 Julio 2019. [En línea]. Available: <https://www.textileworld.com/textile-world/features/2019/07/challenges-facing-recycled-polyester/>. [Último acceso: 21 Enero 2021].
- [46] POLYMETRIX, «V-PET for bottle grade applications,» Sanlian Bühler Company, 2021. [En línea]. Available: <https://www.polymetrix.com/en/materials-applications/vpet-for-food-packaging/vpet-for-bottle-grade-applications/>. [Último acceso: 12 Enero 2021].

- [47] P. T. Benavides, J. Dunn, J. Han, M. Bidy y J. Markham, «Exploring Comparative Energy and Environmental Benefits of Virgin, Recycled, and Bio-Derived PET Bottles,» *ACS, Sustainable Chemistry and Engineering*, vol. 6, n° 9725-9733, p. 9, 2018.
- [48] twenergy, «¿Cómo se realiza el reciclaje de plásticos?,» 30 Mayo 2019. [En línea]. Available: <https://twenergy.com/ecologia-y-reciclaje/reciclaje/reciclado-de-plasticos-542/>. [Último acceso: 13 Enero 2021].
- [49] S. Al-Salem, P. Lettieri y J. Baeyens, «. Thermal treatment of different grades and types of Polyethylene (PE) wasted,» *Proceedings of 8th World Congress of Chemical Engineering Montreal (Quebec)*, pp. 1-4, 2009.
- [50] K. Ragaert, L. Delva y K. Van Geem, «Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste,» *Science Direct*, p. 35, 2017.
- [51] E. Verdejo y L. Roca, «El reciclado de plásticos se transforma,» 17 Septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/313531-El-reciclado-de-plasticos-se-transforma.html>. [Último acceso: 13 Enero 2021].
- [52] A. Méndez Prieto, «Rutas opcionales para el reciclado de materiales plásticos,» 03 Enero 2017. [En línea]. Available: <https://www.pt-mexico.com/articulos/rutas-opcionales-para-el-reciclado-de-materiales-plsticos>. [Último acceso: 13 Enero 2021].
- [53] A. Méndez, Prieto, «Reciclado químico: una reflexión técnica sobre la depolimerización del PET,» 01 Septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.pt-mexico.com/articulos/reciclado-quimico-una-reflexion-tecnica-sobre-la-depolimerizacion-del-pet->. [Último acceso: 13 Enero 2021].
- [54] B. Bertolotti, J. Chávez, R. Laos, C. Rospigliosi y J. Nakamatsu, «Poliésteres y Reciclaje Químico del Poli(tereftalato de etileno),» *Revista de Química*, n° 20, pp. 1-8, 01 Octubre 2005.
- [55] ambientum, «Hilos obtenidos con reciclado químico y extrusión reactiva,» 15 Octubre 2020. [En línea]. Available: <https://www.ambientum.com/ambientum/residuos/hilos-obtenidos-reciclado-quimico-y-extrusion-reactiva.asp>. [Último acceso: 13 Enero 2021].
- [56] R. Zambrano, «¿Cómo se recicla una botella de plástico PET en Ecuador?,» *ELUNIVERSO*, 7 Octubre 2018.
- [57] K. Torres, «La producción de la recicladora Intercia llega a Estados Unidos y Europa.,» *eltelégrafo*, 01 Enero 2016.
- [58] R. Gonzales, «Maquinaria para Reciclaje,» *EcologiaHoy*, 06 Junio 2019. [En línea]. Available: <https://www.ecologiahoy.com/maquinaria-para-reciclaje>. [Último acceso: 14 Enero 2021].

- [59] M. V. Coppini, «La importancia de las máquinas de reciclaje en la economía circular,» Geoinnova, 05 Diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://geoinnova.org/blog-territorio/maquinas-reciclaje-economia-circular/>. [Último acceso: 14 Enero 2021].
- [60] E. Baño Martí, «Extrusora para grancear plástico ¿Qué es y cómo funciona?,» interempresas, 10 Diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/260036-Extrusora-para-grancear-plastico-Que-es-y-como-funciona.html>. [Último acceso: 14 Enero 2021].
- [61] TecnoBioMetric, «Máquinas Extrusoras de plástico. Qué son y para qué sirven,» 18 Enero 2019. [En línea]. Available: <https://www.tecnobiometric.com/maquinas-extrusoras-de-plastico-que-son-y-para-que-sirven/>. [Último acceso: 14 Enero 2021].
- [62] M. Gneuss, «Extrusión de PET libre de secado con control de viscosidad,» 23 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/141553-Extrusion-de-PET-libre-de-secado-con-control-de-viscosidad.html>. [Último acceso: 17 Febrero 2021].
- [63] F. Capella, «Moldeo por soplado: equipos y accesorios,» interempresas, 01 Noviembre 1995. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/3629-Moldeo-por-soplado-equipos-y-accesorios.html>. [Último acceso: 14 Enero 2021].
- [64] L. Reis Gonçalves, «Development and Application of Barrier Coating on PET,» January 2014. [En línea]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/143413735.pdf>. [Último acceso: 2014 Enero 2021].
- [65] Shanghai Hongde Chemical Fiber Machinery CO., LTD., «Recycled Polyester Staple Fiber Machine,» trade india, 21 Marzo 2013. [En línea]. Available: <https://www.tradeindia.com/fp1023556/Recycled-Polyester-Staple-Fiber-Machine.html>. [Último acceso: 11 Febrero 2021].
- [66] HONGE, «Automatic PET Fiber Textile Carding Machine For Spray - Bonded / Chemical Bonded,» 2021. [En línea]. Available: <http://www.nonwovenfabricmakingmachinery.com/sale-8464277-automatic-pet-fiber-textile-carding-machine-for-spray-bonded-chemical-bonded.html>. [Último acceso: 11 Febrero 2021].
- [67] E. A. Nantes, «El Método Analytic Hierarchy Process para la toma de decisiones,» *Investigación Operativa*, vol. 27, n° 46, pp. 54-73, 2019.
- [68] C. López, «Reciclado de plástico PET para la obtención de fibra textil,» Universidad Tecnológica Nacional, Santa Cruz, 2016.

- [69] N. E. Zander, M. Guillan y D. Sweetser, «Composite Fibers from Recycled Plastics Using Melt Centrifugal Spinning,» *Materials (MDPI)*, vol. 10, n° 9, pp. 1-13, 2017.
- [70] WEG, «Motor Eléctrico Catálogo Comercial Mercado Latinoamericano,» 2021. [En línea]. Available: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h35/h2b/WEG-w22-motor-electrico-monofasico-50070884-brochure-spanish-web.pdf>. [Último acceso: 11 Marzo 2021].
- [71] R. G. Budynas y K. J. Nisbett, *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*, New York: McGraw-Hill, 2012.
- [72] R. L. Norton, *Diseño de Máquinas un enfoque integrado*, México: Pearson Educación, 2011.
- [73] R. L. Mott, *Diseño de Elementos de Maquinas*, México: Person Education, 2006.
- [74] R. C. Juvinall y K. M. Marshek, *Fundamentals of Machine Component*, New York: Hoboken, NJ : John Wiley & Sons,, 2017.
- [75] V. M. Faires, *Diseño de Elementos de Máquina*, Barcelona: Montaner y Simon S.A., 2012.
- [76] American Institute of Steel Construction, *Manual of Steel Construction Allowable Stress Design*, Minnesota: AISC, 2010.
- [77] J. C. McCormac y S. . F. Csernak, *Diseño de Estructuras de Acero.*, México: Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C. V., 2013.
- [78] A. Pytel y F. L. Singer, *Resistencia de Materiales*, México: Harla S.A., 2013.
- [79] R. C. Hibbeler, *Mecánica de Materiales*, México: Prentice-hall Hispanoamericana S.A., 2011.
- [80] J. M. Gere y B. J. Goodno, *Mecánica de Materiales*, Georgia: Cengage Learning Latin America, 2009.
- [81] F. P. Beer y R. E. Johnson, *Mecánica de Materiales*, México: McGraw-Hill, 2013.
- [82] M. Cervera Ruiz y E. Blanco Diaz, *Mecánica de estructuras*, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, SL, 2003.
- [83] V. B. Bhandari, *Design of Machine Elements*, New Delhi: Tata McGraw Hill Education Private Limited, 2010.
- [84] R. L. Mott, E. M. Vavrek y J. Wang, *Machine Elements in Mechanical Design*, New York: Pearson, 2018.
- [85] W. Jiang, *Analysis and Design of Machine Elements*, China: Wiley, 2019.

- [86] Grupo SKF, Rodamientos, Gotenburgo: SKF, 2019.
- [87] C. C. Rosario, Diseño de conexiones, vol. 1, Guadalajara: Gerdau Corsa, 2021, p. 25.
- [88] arquitectura+acero, «Conexiones típicas en estructuras de acero,» 2021. [En línea]. Available: <http://www.arquitecturaenacero.org/uso-y-aplicaciones-del-acero/soluciones-constructivas/conexiones-tipicas-en-estructuras-de-acero>. [Último acceso: 13 04 2022].
- [89] V. M. Faires, Diseño de Elementos de Máquinas, Barcelona: Montaner y Simon S.A., 1977.
- [90] R. Hernandez Ortega y F. Fernandez Castañeda, Cálculo de uniones roscadas, Villa Clara: Feijóo, 2012.
- [91] L. Jeffus, Soldadura Principios y Aplicaciones, Madrid: Paraninfo, 2009.
- [92] M. Rodriguez Guiso, «Proceso de Soldadura - SMAW,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.esab.com.ar/ar/sp/education/blog/proceso-soldadura-smaw.cfm>. [Último acceso: 13 04 2022].
- [93] S. Crawley, R. Dillon y W. Carter, Estructuras de Acero Análisis y Diseño, Mexico: Limusa, 1992.
- [94] P. Ringegni, «Cálculo de uniones soldadas,» Universidad Nacional de la Plata, Argentina, 2013.
- [95] DIPAC, «Eje AISI 1018 (Transmisión),» 29 04 2022. [En línea]. Available: <https://dipacmanta.com/producto/eeje-aisi-1018-transmision/>. [Último acceso: 29 04 2022].
- [96] Dipacmanta, «Catalogo general de productos de acero,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.dipacmanta.com/Catalogos-descargas/catalogo-2020.pdf>. [Último acceso: 06 05 2022].
- [97] P. Ringegni, «Cálculo de uniones soldadas,» de *Mecanismos y elementos de máquinas*, Buenos Aires, Departamento de aeronautica U.N.P.L., 2013, p. 21.
- [98] V. V. Morales, «Valor Actual Neto (VAN),» Economipedia, 25 05 2022. [En línea]. Available: <https://economipedia.com/definiciones/valor-actual-neto.html>. [Último acceso: 21 06 2022].
- [99] A. S. Arias, «Tasa Interna de Retorno,» Economipedia, 20 04 2022. [En línea]. Available: <https://economipedia.com/definiciones/tasa-interna-de-retorno-tir.html>. [Último acceso: 21 06 2022].
- [100] M. A. Moreno, «El flujo de caja y su importancia en la toma de decisiones,» El Blog Salmón, 29 06 2021. [En línea]. Available:

<https://www.elblogsalmon.com/conceptos-de-economia/el-flujo-de-caja-y-su-importancia-en-la-toma-de-decisiones>. [Último acceso: 21 06 2022].

- [101] S. García, «Contaminación por el plástico,» 21 Julio 2015. [En línea]. Available: <https://www.elfinanciero.com.mx/opinion/salvador-garcia-linan/contaminacion-por-el-plastico>. [Último acceso: 14 Diciembre 2020].
- [102] R. Mesquita, «rockcontent,» 04 08 2017. [En línea]. Available: <https://rockcontent.com/es/blog/payback/>. [Último acceso: 16 06 2022].

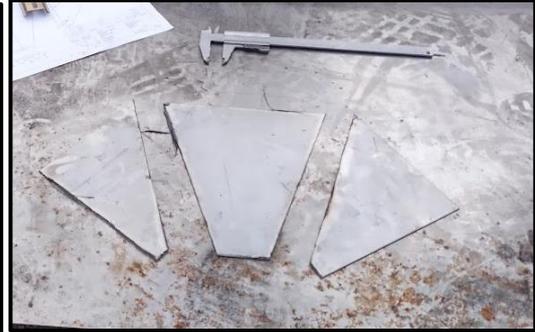
## Anexos

### Anexo 1. Construcción de la estructura de la máquina



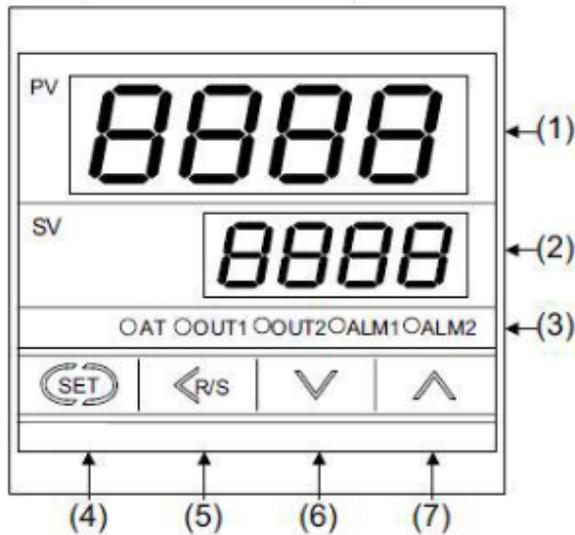
Elaborado por: Paúl Cárdenas e Iván Morales

**Anexo 2. Construcción y ensamble del cañón, tolva y plato de fibrado**



Elaborado por: Paúl Cárdenas e Iván Morales

### Anexo 3. Especificaciones del control de temperatura



- (1) Temperatura medida, valor actual de la temperatura, color rojo.
- (2) Temperatura objetivo, valor fijado para la temperatura, color verde.
- (3) Indicadores de alarma, led de color rojo.
  - a. ALM1 y ALM2, color rojo.  
Cuando están iluminadas, indica que la salida correspondiente esta activada.
  - b. AT. Autoajuste, color verde.  
Parpadea cuando esta en proceso de calibrado automatico (autotuning).  
Cuando el proceso finalizada, se apaga.
  - c. OUT1 y OUT2, color verde.  
Cuando estan iluminadas, indica que la salida correspondiente esta activada.
- (4) **SET** tecla set, Selección de parametros y validación de datos.
- (5) **<R/S** tecla de retorno, cambio de digito a la izquierda y tecla run/stop.
- (6) **V** tecla bajar valor.
- (7) **^** tecla subir valor.

#### Características técnicas:

- Denominación de la serie: CHxx2 (CH102, CH402, CH502, CH702 y CH902).
- Tensiones de alimentación: 100 ÷ 240Vac 50/60Hz.
- Tolerancia de tensión de alimentación: -15% + 10%.
- Frecuencia de la tensión de alimentación: 50/60Hz ±2Hz.
- Potencia consumida: 10VA.
- Precisión de medida: ±0,5% sobre fondo de escala.
- Compensación de error: ±2°C.
- Resolución: 14 bit.
- Tipo de control: PID, ON/OFF, P, PI o PD.
- Resistencia de aislamiento: ≥50MΩ (500Vdc).
- Condiciones de instalación: 0~50°C, 30~85%RH, no condensado.
- Tipo de salida: Relé de estado sólido (SSR) y 1 contacto conmutado.
- Tipo de entrada:
  - o Termopares: K, J, R, S, B, E y T.
  - o Sondas: Pt100 y Cu50.
  - o Voltaje: 0~5Vdc; 1~5Vdc.
  - o Corriente: 0~20mA; 4~20mA.
- Ciclo de trabajo: 0,5 segundos.
- Rango de entrada: Ver tabla.
- Tipo de salida (Depende de modelos):
  - o Salida mediante relé: 250Vac, 3 A. Carga resistiva. Vida eléctrica 300.000 o más.
  - o Salida pulso de tensión: 0/12Vdc (Resistencia de carga 600Ω o mayor).
  - o Salida corriente: 4 a 20mA (Resistencia de carga 600Ω o menor).
  - o Salida Triac: 0,5 A (Temperatura ambiente 40°C o menor).
- Salida de alarma. Contacto conmutado, 250 Vac, 1 A (carga resistiva), Vida eléctrica: 50.000 o más.
- Precisión de visualización (a temperatura ambiente de 23°C ±2°C).
  - o Termopar: ±0,3% del valor mostrado + 1 dígito, o ±2 °C. (Seleccionar el mayor).  
R, S y B: 0 a 399°C. (La precisión no esta garantizada).  
T y U: -199,9 a -100,0°C (La precisión no esta garantizada).
  - o Sonda (RTD): ±0,3% del valor mostrado + 1 dígito, o ±2 °C. (Seleccionar el mayor).
  - o Voltaje/corriente: ±0,3% del muestreo + 1 dígito.
- Memoria de respaldo:
  - o Tipo de memoria: No volátil.
  - o Numero de escrituras: 1.000.000 de veces aproximadamente.
  - o Periodo de duración: 10 años aproximadamente.
- Visualización: Mediante display led de 7 segmentos, y led de estado.

## Anexo 4. Especificaciones de Relé térmico CHINT

### RELÉ TÉRMICO Reg. (A): 7-10 - PARA NXC-M

COMANDO, RELEVO TÉRMICO



#### SKU

NXR-12 7-10A

#### DESCRIPCIÓN

RELES DE SOBRECARGA TERMICOS CHINT NXR-12, Regulación 7-10A



#### INFORMACIÓN TÉCNICA

#### DESCARGAS

Nombre	Información
Polos	3
Norma	IEC 60947-4-1 / IEC 60947-5-1
Contactos Auxiliares	1NA + 1NC
Corriente de Ajuste (A)	7-10 A
Montaje	BAJO EL CONTACTOR
Compatibilidad	NXC 06M-09M-12M
Fusible de protección gG (A)	20

## Anexo 5. Especificaciones del relé SSR

### Entrada (a una temperatura ambiente de 25°C)

Modelo	Tensión nominal	Tensión de servicio	Impedancia (Ver la nota 1).	Nivel de tensión	
				Tensión mínima de operación	Tensión máxima de reposición
G3NA-2□□B-UTU	5 a 24 Vc.c.	4 a 32 Vc.c.	15 mA máx. (ver nota 2.)	4 Vc.c. máx.	1 Vc.c. mín.
	100 a 120 Vc.a.	75 a 132 Vc.a.	36 kΩ±20%	75 Vc.a. máx. (ver nota 3.)	20 Vc.a. mín. (ver nota 3.)
	200 a 240 Vc.a.	150 a 264 Vc.a.	72 kΩ±20%	150 Vc.a. máx. (ver nota 3.)	40 Vc.a. mín. (ver nota 3.)
G3NA-4□□B-UTU	5 a 24 Vc.c.	4 a 32 Vc.c.	7 mA máx. (ver nota 2.)	4 Vc.c. máx.	1 Vc.c. mín.
	100 a 240 Vc.a.	75 a 264 Vc.a.	72 kΩ±20%	75 Vc.a. máx.	20 Vc.a. mín.
G3NA-275B-UTU	5 a 24 Vc.c.	4 a 32 Vc.c.	15 mA máx. (ver nota 2.)	4 Vc.c. máx.	1 Vc.c. mín.
G3NA-290B-UTU	100 a 240 Vc.a.	75 a 264 Vc.a.	72 kΩ±20%	75 Vc.a. máx.	20 Vc.a. mín.
G3NA-475B-UTU					
G3NA-490B-UTU					
G3NA-D210B-UTU					

**Nota: 1.** La impedancia de entrada se mide al valor máximo de la tensión nominal de entrada (por ejemplo, en el modelo que permite de 100 a 120 Vc.a., la impedancia de entrada se mide a 120 Vc.a.).

**2.** Con circuito de entrada de corriente constante.

**3.** Consulte información más detallada en *Características de temperatura (con tensión de operación y tensión de reposición)* en *Datos técnicos*.

### Salida

Modelo	Tensión de carga nominal	Rango de tensión de carga	Carga aplicable		Corriente de pico
			Corriente de carga (ver nota 1).		
			Con disipador de calor (Ver nota 2).	Sin disipador de calor	
G3NA-205B-UTU	24 a 240 Vc.a.	19 a 264 Vc.a.	0,1 a 5 A (a 40°C)	0,1 a 3 A (a 40°C)	60 A (60 Hz, 1 ciclo)
G3NA-210B-UTU			0,1 a 10 A (a 40°C)	0,1 a 4 A (a 40°C)	150 A (60 Hz, 1 ciclo)
G3NA-410B-UTU	200 a 480 Vc.a.	180 a 528 Vc.a.	0,2 a 10 A (a 40°C)	0,2 a 4 A (a 40°C)	
G3NA-220B-UTU	24 a 240 Vc.a.	19 a 264 Vc.a.	0,1 a 20 A (a 40°C)	0,1 a 4 A (a 40°C)	220 A (60 Hz, 1 ciclo)
G3NA-425B-UTU	200 a 480 Vc.a.	180 a 528 Vc.a.	0,2 a 25 A (a 40°C)	0,2 a 4 A (a 40°C)	
G3NA-240B-UTU	24 a 240 Vc.a.	19 a 264 Vc.a.	0,1 a 40 A (a 40°C)	0,1 a 6 A (a 40°C)	440 A (60 Hz, 1 ciclo)
G3NA-250B-UTU	24 a 240 Vc.a.	19 a 264 Vc.a.	0,1 a 50 A (a 40°C)	0,1 a 6 A (a 40°C)	
G3NA-450B-UTU	200 a 480 Vc.a.	180 a 528 Vc.a.	0,2 a 50 A (a 40°C)	0,2 a 6 A (a 40°C)	
G3NA-275B-UTU	24 a 240 Vc.a.	19 a 264 Vc.a.	1 a 75 A (a 40°C)	1 a 7 A (a 40°C)	
G3NA-290B-UTU	200 a 480 Vc.a.	180 a 528 Vc.a.	1 a 75 A (a 40°C)	1 a 7 A (a 40°C)	800 A (60 Hz, 1 ciclo)
G3NA-475B-UTU	24 a 240 Vc.a.	19 a 264 Vc.a.	1 a 90 A (a 40°C)	1 a 7 A (a 40°C)	1.000 A (60 Hz, 1 ciclo)
G3NA-490B-UTU	200 a 480 Vc.a.	180 a 528 Vc.a.	1 a 90 A (a 40°C)	1 a 7 A (a 40°C)	1.000 A (60 Hz, 1 ciclo)
G3NA-D210B-UTU	5 a 200 Vc.c.	4 a 220 Vc.c.	0,1 a 10 A (a 40°C)	0,1 a 4 A (a 40°C)	20 A (10 ms)

**Nota: 1.** La corriente de carga varía en función de la temperatura ambiente. Consulte *Corriente de carga vs. Temperatura ambiente* en *Datos técnicos*.

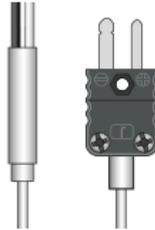
**2.** Si se utiliza el disipador de calor de OMRON (consulte *Opciones*) o un disipador de calor del tamaño especificado.

## Anexo 5. Especificaciones termocupla tipo J

### Tipo J: Hierro / Cobre - Níquel, IEC 60584-1

Termopar Tipo J, comúnmente llamado Hierro/Constantán, es uno de los pocos termopares que se pueden utilizar de forma segura en atmósferas reductoras. La degradación es rápida en ambientes oxidantes por encima de los 550°C. La temperatura máxima de funcionamiento en continuo es de aproximadamente 800°C, aunque para usos en cortos plazos de tiempo pueden alcanzar temperaturas de hasta 1000°C. La temperatura mínima es de -210°C, pero se debe tener cuidado con la condensación a temperaturas por debajo de las ambientales ya que los conductores pueden debilitarse o sufrir la oxidación del conductor compuesto de hierro.

### Termopar Tipo J - Construcciones Típicas

 <p>Termopar Tipo J de Aislamiento Mineral</p> <p>Amplia variedad de terminaciones: casquillo, cable, conector, cabezal, etc.</p>	 <p>Termopar Tipo J de Vaina Reducida</p> <p>Sensores de respuesta rápida ideales para aplicaciones industriales así como otras aplicaciones</p>	 <p>Termopar Tipo J Miniatura</p> <p>Ideales para medidas de precisión de temperatura donde se requiera una respuesta rápida.</p>	 <p>Termopar Tipo J Industrial</p> <p>Para aplicaciones industriales como hornos, quemadores, altos hornos, etc. Disponemos de gran variedad de tipos de vaina</p>	 <p>Termopar Tipo J de Propósito General</p> <p>Con mango, de superficie, bayoneta, tornillo, de parche, etc.</p>	 <p>Termopares Tipo J con Aprobación ATEX/IECEX</p> <p>Amplia variedad de terminaciones para los termopares tales como casquillos, cabezales, zocalos... etc</p>
--	---	--	--	--	---

### Tipo J - Datos Técnicos

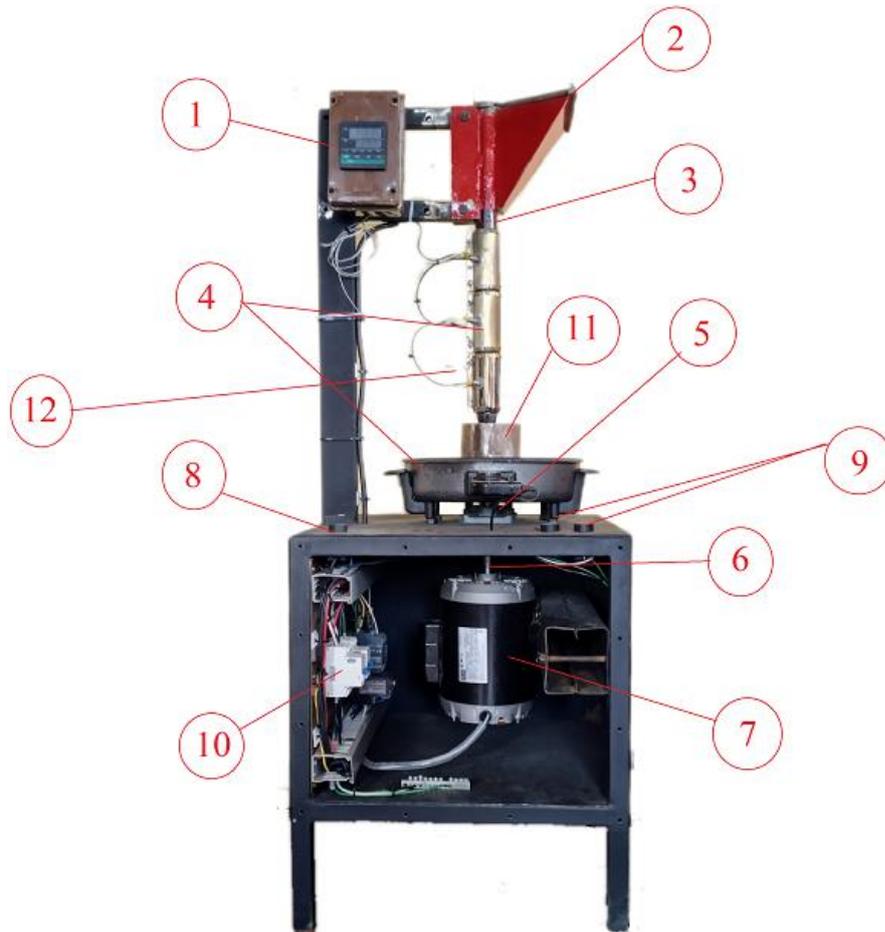
Combinación de Conductores		Cambio aproximado de las F.E.M. Generadas por grado celsius con la unión de referencia a 0°C, µV			Rango de funcionamiento aproximado de temperatura de la unión de medida			Tolerancias de salida de termopar a IEC 60584-1		
Conductor +	Conductor -	100°C	500°C	1000°C	Continuo	Puntual	Tipo	Clase 1	Clase 2	Clase 3
Hierro (Magnético) También conocido como: Fe	Cobre - Níquel También conocido como: Nickel-Copper, Constantan, Advance™, Cupron™	54	56	59	+20 a +700°C	-180 a +750°C	Rango de Temperatura Tolerancia Rango de Temperatura Tolerancia	-40°C a +375°C ±1.5°C 375°C a 750°C ±0.004 ·  t	-40°C a +333°C ±2.5°C 333°C a 750°C ±0.0075 ·  t	N/A

1. La tolerancia está expresada como desviación en °C ó en función de la temperatura medida.

2. Los termopares se suelen suministrar de forma que cumplan las tolerancias especificadas en la tabla de temperaturas por encima de -40°C. No obstante, estos materiales pueden no estar dentro de tolerancia para bajas temperaturas indicadas en la clase 3 para los termopares tipo T, E y K. Si los termopares deben cumplir la tolerancia clase 3, así como los de clase 1 ó clase 2, el cliente debe indicar este dato, ya que es preciso seleccionar el material

## Manual de operación

### Descripción de la máquina



1	Controlador de temperatura	7	Motor
2	Tolva de alimentación	8	Encendido del controlador de temperatura
3	Cañón de fundición	9	Encendido/Apagado del motor
4	Resistencias eléctricas	10	Sistema eléctrico
5	Chumaceras	11	Plato de fibrado
6	Flecha (eje de transmisión)	12	Termocupla

## **Montaje de la máquina**

La máquina está dividida en tres secciones:

1. Tolva y Caño de alimentación
2. Motor, eje de transmisión y plato de fibrado
3. Sistema eléctrico

### **Tolva y cañón de alimentación.**

- La tolva y el cañón son un solo cuerpo y va apernada a la estructura de máquina.
- Colocar las resistencias eléctricas tipo abrazaderas en el cañón.
- Colocar la termocupla cerca a la boquilla del cañón.
- Revisar que todas las conexiones eléctricas estén bien ajustadas.

### **Motor, eje de transmisión y plato de fibrado.**

- Centrar y nivelar el motor con respecto al cañón.
- Montar las chumaceras y ajustar todos los pernos
- Acoplar eje de transmisión, y ajustar los prisioneros del eje y de las chumaceras
- Montar la resistencia eléctrica circular, y atornillar el plato al eje de transmisión.
- Realizar una pequeña prueba para ver el correcto sentido de giro del motor.

### **Sistema eléctrico**



- Desmontar el doble fondo y colocar el riending.
- Montar los elementos eléctricos de acuerdo con el requerimiento.
- Los elementos utilizados son: un breaker de dos polos 16 amperios, breaker de dos polos 20 amperios, un contactor bobina 220 voltios 9 amperios tres polos, un relé térmico de 7-10 amperios y un relé SSR de voltaje de entrada 3-32 Vdc y voltaje de salida 24-480 Vac.
- Montar el doble fondo con todos los elementos y conectar motor, control de temperatura, resistencias eléctricas, selector y pulsadores.
- Si no está familiarizado con estas conexiones llamar a un técnico.

### Características de la máquina

<b>Datos Generales</b>			
<b>Modelo</b>	<b>Voltaje (V)</b>	<b>Tamaño de alimentación (mm)</b>	<b>Capacidad (Kg/h)</b>
Máquina fibradora PET	220	10	4.8
<b>Potencia del motor (Hp)</b>	<b>Funcionamiento (RPM)</b>	<b>Dimensiones generales (mm)</b>	<b>Peso (Kg)</b>
2	3520	1400x500x500	37
<b>Datos Específicos</b>			
<b>Lubricación</b>	<b>Rodamientos (chumaceras)</b>		<b>Eje de transmisión</b>
Grasa LGHB 2/18	2 chumaceras de pared SFK		1 con rosca de 1 pulgada UNF

### Instrucciones de Seguridad

- Colocar la máquina sobre una superficie plana
- Conectar la máquina a un tomacorriente de 220V con neutro o tierra.
- Usar el equipo de seguridad personal: ropa de trabajo, botas punta de acero, guantes, gafas y mascarilla.
- Encender el controlador de temperatura con el selector, la temperatura de operación de 260 °C ya está programada. Si se desea modificar la temperatura, consultar con el técnico.

- Dejar que la máquina llegue a la temperatura de operación, aproximadamente le toma 16 minutos.
- Evitar alimentar a la máquina con material que no sea plástico PET.
- Arrancar el motor con el pulsador verde cuando la resina caiga sobre el plato, y pulsar el botón rojo para detener el motor.
- Internamente la máquina consta de protecciones termoelectricas, si ocurre algún desperfecto, desconectar la máquina y quitar la tapa delantera de la máquina para la revisión de dichos elementos termoelectricos.

### **Puesta en marcha de la máquina**

- Antes de conectar la máquina, revisar con un multímetro que la conexión sea de 220V con neutro o tierra.
- Cerciorarse que todos los prisioneros y pernos estén bien ajustados.
- Revisar que los rodamientos estén lubricados.
- Controlar que las hojuelas de PET no estén mezcladas con algún otro material.
- Encender el controlador de temperatura y esperar que la máquina llegue a la temperatura de operación.
- Alimentar a la máquina con 200 gramos de hojuelas de PET o lo que es igual a una tasa de hojuelas.
- Encender el motor cuando la resina caiga sobre el plato de fibrado, tener cuidado con las salpicaduras.
- Seguir alimentado a la máquina con hojuelas PET, ayudarse de una barra delgada para taconear y no se atoren las hojuelas.
- Recoger y almacenar la fibra PET.
- Al finalizar el proceso dejar enfriar y dar limpieza al plato de fibrado.
- Si la máquina no va a hacer usada continuamente, desconectar de la fuente de alimentación.
- Si hay algún desperfecto con la máquina, desconectar y destapar la máquina, revisar el sistema eléctrico y mecánico, si el desperfecto continúa contactarse con un técnico.