



**DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE  
FILAMENTOS, INTEGRADO EN LA REUTILIZACIÓN DE PET (POLIETILENO  
TEREFTALATO), ÚTIL PARA LA IMPRESORA 3D**

**JOAN SEBASTIÁN GALÁN LUNA, CÓDIGO: 13570735**

**ORLANDO OJEDA PIÑEREZ, CÓDIGO: 1104125312**

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA  
BARRANCABERMEJA**

**20-04-2020**



**DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE  
FILAMENTOS, INTEGRADO EN LA REUTILIZACIÓN DE PET (POLIETILENO  
TEREFTALATO), ÚTIL PARA LA IMPRESORA 3D**

**JOAN SEBASTIÁN GALÁN LUNA, CÓDIGO: 13570735**

**ORLANDO OJEDA PIÑEREZ, CÓDIGO: 1104125312**

**Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electromecánico**

**DIRECTOR**

**ING. LUIS OMAR SARMIENTO ÁLVAREZ**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS SOCIALES -  
DIANOIA**

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA  
BARRANCABERMEJA**

**20-04-2020**

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del Jurado

**DEDICATORIA**

Este trabajo de grado se lo dedico a Dios por su gran amor y bondad para conmigo permitiéndome llegar a este momento tan especial, por darme vida, salud y sabiduría para superar cada prueba y obtener el título profesional.

A toda familia por el apoyo dado en todo el proceso de superación que he tenido a lo largo de mi vida.

A mi hija María José por llegar en un momento importante en mi vida y carrera, porque a pesar de ser un ser indefenso ha estado presente dándome fuerza y energía para continuar en el proceso brindándome el amor más puro que Dios me puede ofrecer en la tierra siendo mi ángel y aliento.

A mi compañera de vida Lina Patricia por ser mi apoyo incondicional en cada etapa de mi carrera siendo mi bastón ofreciéndome su amor y comprensión.

A mi madre por ser una mujer justa, honrada y comprensiva inculcándome los mejores valores, por regalarme la dicha de conocer el amor de una madre.

A mis hermanas, en especial a Jineth Piñerez, por ser ese motor que siempre está ahí para que yo siga marchando, por ser especial, cuidar y proteger a María.

**Orlando Ojeda Piñerez**

Dedico este trabajo principalmente a Dios, por haberme dado la vida y permitirme haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mis padres, Ana Joaquina Luna, Sebastián Galán Avellaneda por ser el pilar más importante demostrándome siempre su cariño y apoyo incondicional.

A mi esposa Maira Alejandra e hijos Luciana y Mathias, por compartir momentos significativos y el apoyo, amor y cariño que nos rodea.

A todos ellos, muchas gracias de corazón.

**Joan Sebastián Galán Luna**

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por darnos la sabiduría y salud para realizar este proyecto para obtener el título de profesional ya que con su bendición y amor fue posible.

A las Unidades Tecnológicas de Santander (UTS) por brindarnos la oportunidad y las herramientas necesarias que permitieron nuestra formación académica.

A los docentes que con sus conocimientos y habilidades nos orientaron académicamente para ver culminada esta etapa en nuestras vidas.

Al ingeniero Luis Omar, director del proyecto, por su dedicación, coordinación y asesoría en el trabajo.

A todas las personas que de una u otra forma colaboraron en la realización del proyecto.

**Orlando Ojeda Piñerez**

Agradecer a las personas que se han involucrado en la realización de este trabajo, sin embargo, merecen reconocimiento especial a mi familia que con su esfuerzo y dedicación me ayudaron a culminar mi carrera universitaria y me dieron el apoyo suficiente para no decaer cuando todo parecía complicado e imposible.

Mi profundo agradecimiento a la Unidades Tecnológicas de Santander (UTS) y todos sus docentes quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron realidad este triunfo.

De igual forma, agradezco a mi director Luis Omar Sarmiento, que gracias a sus consejos y correcciones hoy puedo culminar este trabajo con éxito.

Mil gracias.

**Joan Sebastián Galán Luna**

**TABLA DE CONTENIDO**

	<b>Pág.</b>
<b><u>RESUMEN EJECUTIVO .....</u></b>	<b>16</b>
<b><u>INTRODUCCIÓN .....</u></b>	<b>17</b>
<b><u>1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN .....</u></b>	<b>18</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	18
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	20
1.3. OBJETIVOS .....	21
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	21
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	21
1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES.....	22
<b><u>2. MARCO REFERENCIAL .....</u></b>	<b>26</b>
2.1. MARCO TEÓRICO .....	26
2.1.1. IMPRESIÓN 3D .....	26
2.1.2. MATERIALES QUE SE UTILIZAN EN LA IMPRESIÓN 3D .....	29
2.1.2.1 Filamento PLA (ácido poliláctico) .....	30
2.1.2.2 Filamento ABS (acrilonitrilo butadieno estireno).....	30
2.1.2.3 Filamento PET (Tereftalato de polietileno) .....	31
2.1.3. TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET).....	32
2.1.4. RECICLADO DEL PET .....	34
2.1.4.1 Reciclado mecánico .....	34
2.1.4.2 Reciclado químico .....	36
2.1.5. EXTRUSIÓN.....	37
2.1.6. COMPONENTES DE LA EXTRUSORA .....	39
2.1.6.1 Tornillo de extrusión .....	39
2.1.6.2 Cilindro .....	41

2.1.6.3	Garganta de alimentación .....	42
2.1.6.4	Tolva.....	43
2.1.6.5	Plato rompedor y filtros.....	44
2.1.6.6	Cabezal y boquilla .....	45
2.1.6.7	Sistema de motor .....	47
2.1.6.8	Sistema de instrumentación y control.....	48
<b>2.2.</b>	<b>MARCO CONCEPTUAL.....</b>	<b>48</b>
<b>2.3.</b>	<b>MARCO LEGAL .....</b>	<b>52</b>
<b>3.</b>	<b><u>DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO.....</u></b>	<b><u>55</u></b>
<b>3.1.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DEL TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET).....</b>	<b>55</b>
<b>3.2.</b>	<b>VARIABLES DE DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO .....</b>	<b>58</b>
3.2.1.	MÁQUINA TRITURADORA .....	60
3.2.2.	MÁQUINA EXTRUSORA .....	60
<b>3.3.</b>	<b>DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES QUE CONFORMAN LA PLANTA PILOTO.....</b>	<b>61</b>
3.3.1.	MÁQUINA TRITURADORA .....	61
3.3.1.1	Dimensionamiento de la tolva trituradora .....	61
3.3.1.2	Determinación del torque que necesitan las cuchillas ( $T$ ) .....	62
3.3.1.3	Determinación de la potencia ( $P$ ) .....	63
3.3.2.	MÁQUINA EXTRUSORA .....	63
3.3.2.1	Dimensionamiento del cilindro ( $LCil$ ).....	64
3.3.2.2	Dimensionamiento del tornillo de extrusión .....	65
3.3.2.3	Longitud del tornillo de extrusión ( $L_{torn}$ ) .....	66
3.3.2.4	Paso del tornillo de extrusión ( $t$ ) .....	67
3.3.2.5	Anchura de la cresta del filete ( $e$ ) .....	67
3.3.2.6	Profundidad del canal helicoidal de la zona de alimentación ( $h1$ ) .....	67
3.3.2.7	Profundidad del canal helicoidal de la zona de dosificación ( $h2$ ) .....	68

3.3.2.8	Ángulo de hélice del canal helicoidal ( $\Psi$ ).....	68
3.3.2.9	Número de filetes ( $NF$ ) .....	68
3.3.2.10	Determinación de la producción del tornillo de extrusión ( $Q$ ).....	69
3.3.2.11	Potencia requerida para accionar el tornillo ( $N$ ).....	75
3.3.2.12	Viscosidad efectiva ( $\mu$ ).....	76
3.3.2.13	Presión en la extrusora.....	76
3.3.2.13.1	Presión máxima en el tornillo ( $P_{max}$ ) .....	77
3.3.2.13.2	Presión de operación ( $P_{oper}$ ).....	77
3.3.2.14	Fuerza en el tornillo .....	78
3.3.2.15	Dimensiones de la tolva de la extrusora .....	85
3.3.2.16	Sistema de calefacción.....	86
<b>3.4.</b>	<b>SELECCIÓN DE MATERIALES .....</b>	<b>90</b>
3.4.1.	TOLVA DE ALIMENTACIÓN DE LA TRITURADORA .....	90
3.4.2.	MOTOR DE LA TRITURADORA .....	90
3.4.3.	CUCHILLAS MÓVILES Y FIJAS DE LA TRITURADORA .....	91
3.4.4.	CILINDRO DE LA EXTRUSORA .....	92
3.4.5.	TORNILLO DE EXTRUSIÓN.....	92
3.4.6.	MOTOR DEL TORNILLO DE EXTRUSIÓN .....	93
3.4.7.	TOLVA DE ALIMENTACIÓN DE LA EXTRUSORA.....	94
3.4.8.	CABEZAL O BOQUILLA DE EXTRUSIÓN .....	94
3.4.9.	SISTEMA DE CALEFACCIÓN DE LA EXTRUSORA.....	95
3.4.10.	SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DE LA EXTRUSORA .....	96
<b>3.5.</b>	<b>MODELADO DE LA PLANTA MEDIANTE HERRAMIENTA DE SOFTWARE</b>	<b>97</b>
<b>3.6.</b>	<b>PRESUPUESTO.....</b>	<b>99</b>
<b>4.</b>	<b><u>RESULTADOS .....</u></b>	<b><u>101</u></b>
<b>4.1.</b>	<b>MODELADO DE LA TRITURADORA EN SOLIDWORKS .....</b>	<b>101</b>

4.1.1.	CUCHILLAS MÓVILES.....	101
4.1.2.	CUCHILLAS FIJAS.....	102
4.1.3.	DISTANCIADOR.....	103
4.1.4.	EJE PORTA CUCHILLAS.....	104
4.1.5.	BASTIDOR O MÓDULO DE TRITURACIÓN.....	105
4.1.6.	MALLA PERFORADA O CRIBA.....	105
4.1.7.	TOLVA TRITURADORA.....	106
4.1.8.	ESTRUCTURA SOPORTE TRITURADORA.....	107
4.1.9.	ENSAMBLE DE LA TRITURADORA.....	107
<b>4.2.</b>	<b>MODELADO DE LA EXTRUSORA EN SOLIDWORKS.....</b>	<b>109</b>
4.2.1.	CILINDRO.....	109
4.2.2.	TORNILLO DE LA EXTRUSORA.....	109
4.2.3.	PLATO ROMPEDOR.....	110
4.2.4.	BOQUILLA.....	111
4.2.5.	TOLVA EXTRUSORA.....	111
4.2.6.	ESTRUCTURA SOPORTE EXTRUSORA.....	112
4.2.7.	ENSAMBLE DE LA EXTRUSORA.....	112
<b>5.</b>	<b><u>CONCLUSIONES.....</u></b>	<b>114</b>
<b>6.</b>	<b><u>RECOMENDACIONES.....</u></b>	<b>115</b>
<b>7.</b>	<b><u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u></b>	<b>116</b>

**ANEXOS**

**LISTA DE FIGURAS**

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Tecnología de impresión 3D - Modelado por Deposición Fundida (FDM). .....	28
<b>Figura 2.</b> Formula química del PET. ....	32
<b>Figura 3.</b> Reciclado mecánico del PET. ....	35
<b>Figura 4.</b> Reciclado químico del PET. ....	37
<b>Figura 5.</b> Esquema de una extrusora. ....	38
<b>Figura 6.</b> Tornillo de una extrusora. ....	39
<b>Figura 7.</b> Zonas de una extrusora – sección del tornillo. ....	41
<b>Figura 8.</b> Sistema cilindro de calefacción - tornillo de una extrusora. ....	42
<b>Figura 9.</b> Garganta de alimentación. ....	43
<b>Figura 10.</b> Tipos de tolvas. ....	44
<b>Figura 11.</b> Plato rompedor. ....	45
<b>Figura 12.</b> Boquilla anular y cabezal. ....	46
<b>Figura 13.</b> Partes diferenciadas en una boquilla de extrusión. ....	46
<b>Figura 14.</b> Diagrama de proceso para el diseño de la trituradora. ....	59
<b>Figura 15.</b> Diagrama de proceso para el diseño de la extrusora ....	59
<b>Figura 16.</b> Dimensiones de la tolva de alimentación trituradora ....	62
<b>Figura 17.</b> Componentes principales de la extrusora ....	64
<b>Figura 18.</b> Partes del tornillo de extrusión ....	66
<b>Figura 19.</b> Viscosidad efectiva Vs. Velocidad de cortadura. ....	76
<b>Figura 20.</b> Diagrama de fuerzas de un tornillo. ....	78
<b>Figura 21.</b> Dimensiones de la tolva de alimentación de la extrusora. ....	85
<b>Figura 22.</b> Modelo simplificado del cilindro junto con el calentador eléctrico tipo banda. ....	87
<b>Figura 23.</b> Motor para girar las cuchillas en la trituradora. ....	91
<b>Figura 24.</b> Motorreductor para girar el tornillo de extrusión. ....	93

<b>Figura 25.</b> Resistencia tipo banda para calentar el PET .....	96
<b>Figura 26.</b> Sistema de refrigeración tipo ventilador modelo GDSTime 12025 .....	97
<b>Figura 27.</b> Metodología de diseño en solidWorks .....	98
<b>Figura 28.</b> Diseño final de la cuchilla móvil de la trituradora .....	102
<b>Figura 29.</b> Diseño final de las cuchillas fijas de la trituradora .....	103
<b>Figura 30.</b> Distanciador .....	104
<b>Figura 31.</b> Eje porta cuchillas .....	104
<b>Figura 32.</b> Módulo de trituración .....	105
<b>Figura 33.</b> Malla perforada o criba .....	106
<b>Figura 34.</b> Tolva trituradora .....	106
<b>Figura 35.</b> Estructura soporte trituradora .....	107
<b>Figura 36.</b> Ensamble de la trituradora .....	108
<b>Figura 37.</b> Cilindro .....	109
<b>Figura 38.</b> Tornillo extrusor .....	110
<b>Figura 39.</b> Plato rompedor .....	110
<b>Figura 40.</b> Boquilla .....	111
<b>Figura 41.</b> Tolva extrusora .....	111
<b>Figura 42.</b> Estructura soporte extrusora .....	112
<b>Figura 43.</b> Ensamble de la extrusora .....	113

**LISTA DE TABLAS**

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Tecnologías para impresión 3D. ....	27
<b>Tabla 2.</b> Características del PET. ....	58
<b>Tabla 3.</b> Dimensiones del cilindro .....	65
<b>Tabla 4.</b> Dimensiones del tornillo de extrusión.....	68
<b>Tabla 5.</b> Flujo volumétrico del Tereftalato de Polietileno.....	74
<b>Tabla 6.</b> Dimensiones canal cónico, canal cilíndrico y placa rompedora .....	75
<b>Tabla 7.</b> Características del motor trifásico marca Siemens .....	91
<b>Tabla 8.</b> Características del motorreductor sinfín – corona SI .....	94
<b>Tabla 9.</b> Características de la resistencia tipo banda.....	96
<b>Tabla 10.</b> Costos de fabricación.....	99

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo A.</b> Propiedades del acero inoxidable AISI 4140 .....	122
<b>Anexo B.</b> Planos de la trituradora.....	124
<b>Anexo C.</b> Planos de la extrusora .....	142

## RESUMEN EJECUTIVO

La inapropiada distribución de los residuos sólidos genera contaminación, daños en varias ocasiones irreparable al medio ambiente y enfermedades que afectan a los seres humanos. Los problemas de contaminación son ocasionados por la actividad humana y aumentan conforme pasa el tiempo por la gran cantidad de residuos producidos diariamente, teniendo como resultado final grandes superficies de residuos sólidos contaminantes sin explotar su capacidad aprovechamiento y reutilización.

Con el objetivo de encontrar soluciones para el aprovechamiento de residuos sólidos del Tereftalato de Polietileno (PET), el cual es un insumo de gran demanda tanto en el mercado interno como externo, requerido para la fabricación de envases de botellas para bebidas de gaseosas, refrescos, etc., se presenta el diseño y modelado en SolidWorks de una planta piloto conformada por una máquina trituradora y una máquina extrusora para producir filamentos de diámetro de 1,75 mm, a fin de ser usados en las impresoras 3D..

**PALABRAS CLAVE.** Extrusión, filamento para impresoras 3D, modelado, Tereftalato de Polietileno (PET).

## INTRODUCCIÓN

La impresión en tercera dimensión (3D) es una de las tendencias tecnológicas con mayor proyección de impacto económico y productivo. Su funcionamiento se basa en el depósito de varias capas de material, hasta obtener la creación de un objeto tridimensional.

Existe una gran variedad de insumos, denominado “filamentos”, que pueden ser utilizados en la impresión 3D. Los que más se destacan son el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y PLA (Ácido Poliláctico); sin embargo, existen otros filamentos menos populares tales como el PET (Tereftalato de Polietileno) que igualmente brindan soluciones a aplicaciones específicas.

El presente proyecto se realizó pensando en ayudar a disminuir el impacto ambiental ocasionado por los plásticos, ya que este material se demora en degradar varios años. En vista de ello, se propuso el diseño mediante el uso de SolidWorks, de una planta piloto conformada por una trituradora de botellas plásticas tipo PET y una extrusora que toma como materia prima el material previamente triturado para producir filamentos de diámetro de 1,75 mm, el cual tiene como fin, su uso en las impresoras 3D para la creación de objetos tridimensionales.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El Tereftalato de Polietileno, mejor conocido como PET, fue patentado como un polímero para fibra por los científicos británicos Whinfield y Dickinson en 1941. La producción comercial de fibra de poliéster comenzó en 1955, desde entonces se registra un crecimiento exponencial del producto a partir del descubrimiento de sus múltiples posibilidades de uso, pues ofrece ventajas sobre otros materiales porque es ligero, resistente, económico y duradero. A partir de 1976 se le usa para la fabricación de envases, principalmente para bebidas.

Solheim (2018) afirma que:

Desde la década de los años 50 la producción del plástico ha superado a la de casi todos los otros materiales. Mucho del plástico que producimos está diseñado para ser desechado después de haber sido utilizado una sola vez. Como resultado, los envases plásticos representan aproximadamente la mitad de los residuos plásticos en el mundo. La mayor parte de estos residuos se generan en Asia, mientras que Estados Unidos, Japón y la Unión Europea son los mayores productores mundiales per cápita de envases plásticos.

Sólo el 9% de los nueve mil millones de toneladas de plástico que se han producido hasta ahora en el mundo han sido recicladas. La mayoría termina en vertederos, basureros o en el medio ambiente. Si los patrones de consumo y prácticas de gestión de residuos actuales continúan, entonces para el año 2050 habrá aproximadamente unos 12 mil millones de toneladas de basura plástica en los vertederos y en el medio ambiente (p.VI).

Los residuos plásticos causan enormes problemas ambientales, pues estos tardan casi 1.000 años en degradarse, tiempo suficiente en el que se puede ocasionar daños irreversibles al ecosistema.

El reciclaje es un proceso que tiene como objetivo la transformación de los residuos en nuevos productos; de esta manera se restituye su valor económico, evitando así su disposición final.

Aunque el PET es 100% reciclable y fácilmente reprocesable, estas cualidades están lejos de ser consideradas una ventaja. En Colombia para el año 2015, sólo el 26% de envases PET fueron reciclados. Estudios realizados por Enka de Colombia demostró que Colombia es un país que está ubicado por debajo de la media mundial en el reciclaje de botellas elaboradas con material PET (promedio de 41%); países como Japón (78%), Brasil (56%) y Australia (42%) superan la media (Suárez, 2016).

Una de las grandes revoluciones tecnológicas de los últimos años es la impresión en 3D. Se trata del proceso de creación de un objeto físico tridimensional a partir del uso de un filamento, materia prima de la impresión 3D. Por tanto, una alternativa amigable con el medio ambiente es la fabricación de filamentos para impresión 3D a partir del uso de material reciclado PET.

Por lo anterior, el interrogante que surge en nuestro proyecto es: ¿Cómo diseñar una planta piloto que transforme el Tereftalato de Polietileno o más comúnmente llamado PET en filamentos para impresión 3D?

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

Los plásticos y el reciclaje siempre son un tema actual, debido a que se trata de materiales de alto valor. El material PET es uno de ellos, ya que como plástico reciclado, es de gran uso en la industria de bebidas, textilera o automotriz. Por consiguiente, se desea desarrollar una planta piloto que transforme el material plástico desechado, en este caso los residuos PET, en filamentos utilizados particularmente en impresoras 3D. La idea de implementación de esta planta se ha realizado para ser llevada a cabo en la ciudad de Barrancabermeja, dado que no existe ninguna planta de esta índole en la ciudad.

El proyecto pretende reutilizar las propiedades tanto químicas como mecánicas de las botellas PET como fuente generadora para la fabricación de filamentos. Además, el modelo de software SolidWorks permitirá utilizar las herramientas fundamentales de simulación y control de calidad en la creación del diseño de la planta piloto, que tiene como principal tarea realizar los procedimientos y requerimientos adecuados para la extrusión del material PET, permitiendo así salvaguardar la producción final de los filamentos empleados en la impresión 3D.

Por último, es importante mencionar que el principal beneficiado de este proyecto es la sociedad en sí misma, ya que tiene como intención principal incentivar el reciclaje y aprovechamiento de los desechos que provienen en su mayoría del consumo domiciliario y urbano, experimentando también un crecimiento de responsabilidad social y satisfaciendo la creciente demanda de material para impresión tridimensional.

Con este proyecto se pretende optar al título de “Ingeniero Electromecánico”. Así mismo, los autores desarrollarán habilidades competitivas que implican los campos de diseño de ingeniería y proyectos de investigación industrial a partir del uso eficiente de las 3R (reducir, reutilizar y reciclar) en la innovación de material PET.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. *Objetivo general*

Diseñar una planta piloto para producir filamentos de impresoras 3D a partir del uso de material reciclado de Tereftalato de Polietileno (PET).

#### 1.3.2. *Objetivos específicos*

- Caracterizar el Tereftalato de Polietileno (PET) tomando como referencia estudios previos realizados que permitan la identificación de las propiedades fisicoquímicas que favorezcan la transformación del material en filamentos útiles para impresoras 3D.
- Definir las variables de diseño fundamentales de la planta piloto mediante el estudio de prototipos ya existentes, a fin de garantizar la producción de filamentos a base de material reciclado de Tereftalato de Polietileno (PET).
- Dimensionar los componentes de la planta piloto a partir del desarrollo de cálculos matemáticos para realizar el diseño del mismo.
- Modelar la planta piloto mediante el uso de un software de diseño (SolidWorks o AutoCAD) con su respectivo sistema mecánico, eléctrico y de instrumentación, que permita visualizar cada uno de los elementos que la conforman con sus respectivas dimensiones para su fabricación en una segunda fase del proyecto.

#### 1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES

En los últimos años, los métodos de impresiones en 3D se han incrementado de forma exponencial. Estas máquinas de impresión son fáciles de adquirir y están presentes en la mayoría de empresas, específicamente en los sectores industriales, de manufactura, y en instituciones de educación, investigación y desarrollo.

Pachón (2007) planteó en su proyecto desarrollado bajo el título “Plan de negocios para una empresa recicladora de plástico PET, en la ciudad de Bogotá D.C.” que es viable económica, ecológica y socialmente el desarrollo de empresas con exclusividad de reciclar residuos PET; así mismo afirmó que “Las investigaciones de mercado realizadas, arrojan información positiva; en cuanto al mercado hay un gran potencial de clientes, la abundancia de materia prima y de proveedores que pueden cubrir las necesidades de materia prima a bajos costos en la ciudad de Bogotá, localidad de Suba, el proyecto es económicamente rentable, profesionalmente exitoso y deja la satisfacción del crecimiento personal en el desarrollo de una oportunidad visualizada” (p. 14).

Vela, Robles & Urrego (2016) exploraron la posibilidad de implementar nuevos métodos de recolección de material PET, basados en el desarrollo de un estudio de mercado, un estudio técnico y finalmente un estudio administrativo y financiero del modelo de un proyecto que brinda alternativas para la implementación de nuevos métodos que contribuyan a la recolección eficiente de materiales sólidos con potencial a ser reciclados para disminuir el impacto ambiental.

Ortega & Vitola (2011) propusieron el rediseño básico de una planta de Reciclaje de PET de Polisuin S.A. en Cartagena, cuyo proceso operativo permite un reciclaje mecánico de PET post-consumo, y un sistema de tratamiento de los efluentes producidos en el transcurso del mismo. Este proyecto es una referencia valiosa ya que el rediseño propuesto de la planta representa una considerable reducción del

consumo de agua en el proceso con la fusión de las operaciones de lavado y enjuague en un mismo equipo, y una operación de secado eficiente conservando un movimiento continuo que facilita el empaque de PET.

Castillo, Macero & Villacreses (2004) determinaron la viabilidad técnica y financiera del “Proyecto de inversión para la instalación de una planta recicladora de Polietilén Tereftalato (PET) para transformar los desperdicios plásticos de PET generados por la ciudad Guayaquil en escamas recicladas para destinarlas a la exportación”. Estimaron que en promedio se podría reciclar el 35% del volumen de desperdicio plástico que la ciudad de Guayaquil produce, siendo éste cerca de 178 Toneladas/mes. La inversión que se requiere para poner en marcha la planta es de \$687.788, con un periodo de recuperación de la inversión de aproximadamente 7 años y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 26%, lo que deduce que el proyecto planteado es rentable.

Arteaga (2015) fabricó y caracterizó filamentos para impresoras 3D a partir de materiales reciclados, como PLA (ácido poliláctico) o ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), recuperando piezas defectuosas de otras impresiones y utilizando otros polímeros con composición adecuada y materiales en forma de cargas como fibras naturales o polvo de residuos. Los resultados evidenciaron que el filamento fabricado posee buenas características una vez probado en la impresión de piezas en 3D mediante el uso de la impresora RepRap del Laboratorio de Fabricación Digital de la Universidad de La Laguna - España, ya que se ajustaron los parámetros de temperatura tanto de extrusión como de refrigeración, se estableció el método de recogida del filamento y se determinó el diámetro óptimo del hilo para su uso.

Gutiérrez & Vargas (2017) diseñaron y fabricaron una maquina extrusora para la fabricación de filamentos de impresoras 3D, utilizando polipropileno obtenido mediante la trituración de tapas de botellas. El dimensionamiento de la máquina extrusora se basó en 1 m de alto, 6,60 m de ancho y 1,5 m de largo. El diseño dio

como resultado un diámetro del huesillo de 0,0277 m, longitud del huesillo de 0,557 m, número de filetes del huesillo 20, potencia requerida de 1 HP, revoluciones del huesillo 36 rpm para obtener una producción de 3,3 kg/h de filamento de 3 mm de diámetro. La fabricación de la máquina se realizó a partir del diseño elaborado en SolidWorks. Se logró que el filamento saliera sin problemas, en un rango de temperaturas entre 165 a 175 °C.

García (2015) diseñó una máquina capaz de tratar materiales termoplásticos, para generar a partir de éstos, un filamento útil para impresoras 3D. Para ello, se estudió el comportamiento de una extrusora previamente diseñada con partes fabricadas; posteriormente se definió la geometría general y las variables de diseño más adecuadas para representar un calefactor para la extrusión de filamento. Una vez definida la forma general del calefactor, se modeló a partir de diferencias finitas su campo de temperaturas en operación. Para lograr la solución de las ecuaciones desarrolladas, se programó una aplicación computacional en lenguaje Java, lo que permitió resolver el calefactor con medidas, materiales y estado de operación particular, dando como resultado el campo de temperaturas de todo el equipo.

Parra (2017) propone el diseño de una extrusora de filamento a partir de plásticos reciclados, los cuales pueden ser empleados para técnicas de impresión 3D. El diseño desarrollado produjo filamento de PLA (ácido poliláctico) y ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) en diferentes diámetros, con un caudal mínimo de 0,25 kg/h (un kilogramo cada 4 h para el ABS de 1,75 mm) y un caudal máximo de 0,66 kg/h (un kilogramo cada 1,5 h para el PLA de 3 mm). El dimensionamiento del diseño fue de 0,2 m de alto, 1,2 m de largo y 0,2 m de ancho y el costo total de la máquina fue de 360 USD. Las funcionalidades de la extrusora incorporaron motor del huesillo con velocidad regulable, zona de control de temperatura, diseño modular, sistema de extracción de velocidad regulable que permite la fabricación de diferentes diámetros

y tolerancias, sistema de refrigeración por aire, sistema repartidor de filamentos y sistema de bobinado del filamento en carretes.

Chávez (2018) diseñó una extrusora de filamento para impresora 3D, basado en el funcionamiento de polipropileno reciclado, con capacidad de producción de 0,250 kg/h. Este diseño contempló el desarrollo de cálculos matemáticos de cada uno de los componentes de la extrusora hasta la etapa de modelado en 3D donde se visualiza el diseño al detalle (planos y despiece del prototipo) y su funcionamiento.

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1. MARCO TEÓRICO

#### 2.1.1. *Impresión 3D*

Las tecnologías de impresión 3D están basadas en las denominadas “tecnologías de procesos aditivos”, donde un objeto es creado mediante la superposición de varias capas de un material, generalmente plástico, hasta lograr la pieza deseada. Estas máquinas operan a través de un inyector de material, que se desplaza en tres dimensiones (X, Y, Z), controlado por un software, el cual usa como patrón de fabricación un modelo 3D.

Dentro de las ventajas que sobresalen del uso de esta tecnología está la capacidad de obtener piezas personalizadas con formas complejas, casi imposibles de fabricarse con tecnologías tradicionales. También se destaca la capacidad de resultado, de un objeto físico totalmente listo para el uso, directamente desde el modelo 3D, sin necesidad de pasar por otros procesos.

Existe una gran diversidad de métodos disponibles para la impresión 3D. Sus principales diferencias se encuentran en la forma en la que se usan las diferentes capas para crear piezas. Algunos métodos como el Modelado por Deposición Fundida (FDM) o el Sinterizado Selectivo por Láser (SLS) utilizan fundido o ablandamiento del material para producir las capas, mientras que otros depositan materiales líquidos que son tratados con diferentes tecnologías (López, 2016). En la

**Tabla 1** se resumen las principales tecnologías disponibles:

**Tabla 1.** Tecnologías para impresión 3D.

Tipo	Tecnología	Material
Extrusión	Modelado por Deposición Fundida (FDM)	Termoplásticos (PLA, ABS), metales eutécticos, materiales comestibles
Hilado	Fabricación por Haz de Electrones (EBF3)	Casi cualquier aleación de metal
Granulado	Sinterizado de Metal por Láser (DMLS)	Casi cualquier aleación de metal
	Fusión por Haz de Electrones (EBM)	Aleaciones de Titanio
	Sinterizado Selectivo por Calor (SHS)	Polvo termoplástico
	Sinterizado Selectivo por Láser (SLS)	Termoplásticos, polvos metálicos, polvos cerámicos
	Proyección Aglutinante (DSPC)	Yeso
Laminado	Laminado de Capas (LOM)	Papel, papel de aluminio, capa de plástico
Fotoquímicos	Estereolitografía (SLA)	Fotopolímeros y resinas fotosensibles
	Fotopolimerización por Luz Ultravioleta (SGC)	Fotopolímeros y resinas fotosensibles

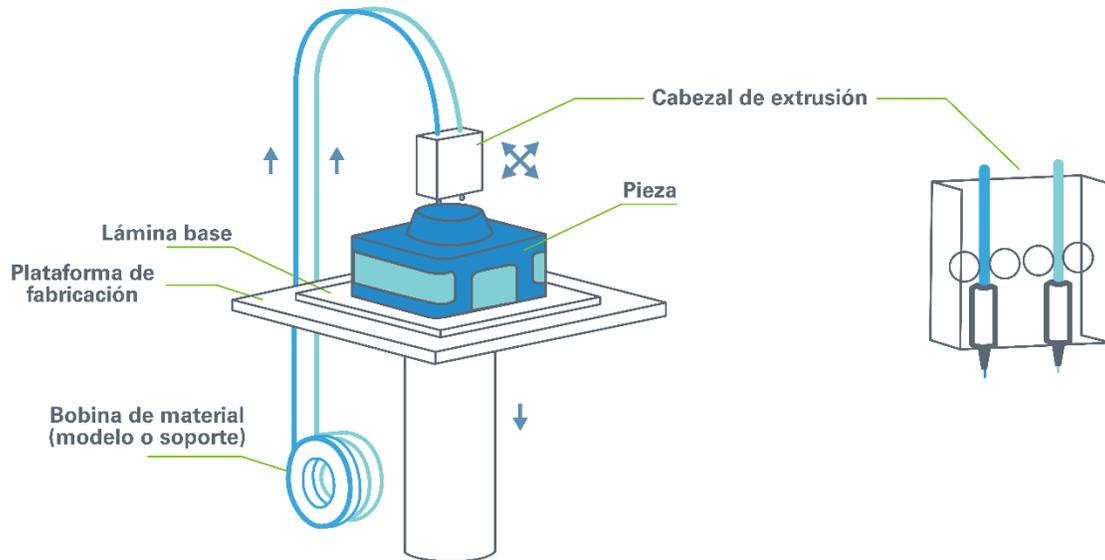
Fuente: López Conde, J.E. (2016). *Impresoras 3D*. Recuperado de [https://intranet.bibliotecasgc.bage.es/intranet-tmpl/prog/local\\_repository/documents/17854.pdf](https://intranet.bibliotecasgc.bage.es/intranet-tmpl/prog/local_repository/documents/17854.pdf)

A continuación se describen los tres procesos de fabricación aditiva más comunes actualmente:

- Modelado por Deposición Fundida (FDM):** utiliza una técnica aditiva; un filamento plástico o metálico es introducido en una boquilla o extrusor que cuenta con una resistencia que emite calor hasta llegar por encima de la temperatura de fusión del material. El extrusor tiene, además, un mecanismo que permite controlar el flujo de material que vierte. Con la ayuda de motores y elementos mecánicos controlados electrónicamente, se producen los desplazamientos en los ejes X, Y, Z. En este sistema deben agregarse estructuras de soporte para las geometrías, ya que el material fundido demora en volver a solidificarse y, sin un lugar donde apoyarse, termina deformándose por efecto de la gravedad (ver Figura 1). Dichos soportes deben ser diseñados de forma tal que utilicen la menor cantidad de insumo y sean fáciles de retirar. Una vez finalizado el proceso, la pieza se somete a tratamientos superficiales (pulidos, lijados) para terminar el proceso de fabricación digital. En la

actualidad, esta modalidad de impresión es la que implica equipos de menor costo (Bordignon, Iglesias y Hahn, 2018).

**Figura 1.** Tecnología de impresión 3D - Modelado por Deposición Fundida (FDM).



Fuente: Mizar (2016). *Tecnologías de fabricación aditiva: fused deposition modeling*. Recuperado de <http://mizaradditive.com/fused-deposition-modeling/>

- **Estereolitografía (SLA):** Soporta su funcionamiento en fotopolímeros en un estado líquido viscoso capaz de cambiar a un estado sólido mediante la exposición a la luz. Sobre un recipiente lleno de este fotopolímero, situado encima de una plataforma, se ubica un láser que se va desplazando sobre el líquido siguiendo la forma del objeto a reproducir y consiguiendo que la resina pase de estado líquido a sólido. Cuando el láser termina de recorrer toda la superficie de una capa, un pistón hace descender la plataforma una distancia igual al grosor de la siguiente capa y se repite el proceso hasta terminar totalmente la pieza. Una vez finalizado el proceso, se eleva la pieza para que se elimine el excedente. Para el acabado final se le somete a un baño de luz intensa en una caja parecida a un horno, llamada aparato de poscurado. Esto le permite tener propiedades adecuadas para procesos posteriores como el

lijado, el arenado, el pintado, etc. Las piezas realizadas con esta técnica tienen un gran terminado estético (Bordignon *et al.*, 2018).

- **Sinterizado Selectivo por Láser (SLS):** es otra técnica de diseño rápido que fabrica las piezas por capas. El material de base es un polvo, hecho de diferentes materiales, cuyas partículas miden casi cincuenta micromilímetros. Un láser sinteriza las partículas de las áreas seleccionadas, causando que estas se fusionen y solidifiquen. El modo de generación de las piezas es muy similar al de la estereolitografía, solo que en lugar de una resina se utiliza un polvo como insumo. El láser fusiona el material en una cubeta mediante el barrido de finas capas transversales. Una vez que la capa se forma, la cubeta de polvo desciende una distancia equivalente al espesor de la capa formada y una nueva capa de material base es añadida a la superficie. El proceso se repite tantas veces como capas se necesite fundir para crear el objeto tridimensional. Un equipo SLS usa un láser de pulso y precalienta el polvo base en la cubeta a una temperatura ligeramente inferior a la de fusión de dicho material. De esta forma, hace que la fusión del material por calentamiento sea más sencilla. Al contrario que en otros procesos de fabricación por adición, como la Estereolitografía y el Modelado por Deposición Fundida, en este no se necesitan soportes ya que la parte sinterizada está todo el tiempo rodeada de polvo sin sinterizar que actúa de apoyo. Esto le confiere una ventaja sobre los otros métodos (Bordignon *et al.*, 2018).

### **2.1.2. Materiales que se utilizan en la impresión 3D**

Existe una gran variedad de insumos que pueden ser utilizados en la impresión aditiva por deposición de material. A los insumos que utilizan estas impresoras se les denomina filamentos, se presentan en estado sólido y suelen almacenarse en bobinas; hay dos tipos de diámetros estándar: 1,75 y 3 mm. También existe una gran diversidad de colores (incluidos los fosforescentes) y propiedades que, por

ejemplo, aportan flexibilidad o resistencia. Algunos materiales incluso son capaces de conducir electricidad y formar circuitos (Bordignon *et al.*, 2018). Los productos que se destacan en este ámbito son los filamentos de plástico como el ácido poliláctico (PLA), el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y el tereftalato de polietileno (PET).

### **2.1.2.1 Filamento PLA (ácido poliláctico)**

El PLA es un termoplástico biodegradable que se deriva de recursos renovables como maicena, caña de azúcar, raíces de tapioca y almidón de patata. Este filamento de impresión 3D es más amigable con el medio ambiente en comparación con otros materiales plásticos. Su temperatura de fusión está en un rango de 160° a 230°C, los modelos impresos en PLA son más frágiles que los impresos en ABS, no necesita cama caliente por lo que el proceso de impresión es más rápido (Macas y Pilco, 2016).

Se utiliza en implantes quirúrgicos, envases de alimentos, envolturas de dulces, vajillas desechables, prendas desechables, productos de higiene, pañales, etc. El acabado es ideal para objetos con paredes finas, recomendado para prototipos de exhibición, maquetas, juguetes, decoración, promocionales, etc.

### **2.1.2.2 Filamento ABS (acrilonitrilo butadieno estireno)**

El ABS es un material compuesto por tres grandes componentes acrilonitrilo, butadieno y estireno. Cada uno de estos componentes aporta características diferentes a este material. El acrilonitrilo aporta rigidez, resistencia a ataques químicos, dureza y estabilidad a altas temperaturas. El butadieno aporta tenacidad a bajas temperaturas y resistencia al impacto. Por último, el estireno aporta resistencia mecánica, rigidez, brillo y dureza (Macas y Pilco, 2016).

El ABS es un material de impresión 3D bastante utilizado para hacer piezas duraderas que necesitan soportar temperaturas más altas. En comparación con el filamento PLA, el plástico ABS es menos frágil y más dúctil. Su punto de fusión está en el rango de 210 a 260°C.

El ABS es ideal para piezas móviles, piezas de automóviles, carcasas electrónicas y juguetes. De hecho, se utiliza en tuberías, componentes automotrices, conjuntos electrónicos, cascos protectores, instrumentos de música, electrodomésticos de cocina, ladrillos LEGO y más (Gomes, 2017).

### **2.1.2.3 Filamento PET (Tereftalato de polietileno)**

El PET es otro filamento 3D muy popular. Es un plástico estable e inofensivo, no produce ningún olor raro, tiene buena resistencia química, térmica, al desgaste y a la corrosión y es totalmente reciclable. En su estado original es incoloro y cristalino. Sin embargo, cuando se expone al calor o al frío el material cambia su transparencia. Cuando el filamento de PET se enfría lentamente después de la impresión, tiene una estructura cristalina (Gomes, 2017). Para obtener los mejores resultados al imprimir con PET es necesario alcanzar temperaturas entre 75 - 90°C. Es el filamento ideal para piezas destinadas al contacto alimentario.

Existe una versión modificada del filamento PET, debido al cambio en la estructura química del polímero por la adición de glicol, el PETG (Tereftalato de polietileno modificado con glicol), el cual lo hace más transparente, menos frágil y más fácil de procesar que el PET común. Con estas mejoras y su facilidad de impresión el PETG se ha convertido en uno de los materiales más usados en impresión 3D (Trapero, 2017). El PETG es un material menos rígido (más elástico) que el PLA, es más fácil doblarlo y es menos frágil que el PLA. También es menos rígido que el ABS, pero en este caso la diferencia es mucho menor. En general el PETG resiste mejor los golpes, los esfuerzos y es más difícil de romper tanto que el PLA como el ABS. El

PETG es un poco más resistente a la temperatura que el PLA, pero menos que el ABS.

Si bien las opciones previamente mencionadas son válidas para la mayoría de proyectos, la elección del tipo de plástico a utilizar depende de la funcionalidad del producto final. En impresión 3D, se busca que el filamento que se emplee, produzca una impresión de piezas con buen acabado, duraderas y resistentes.

### **2.1.3. Tereftalato de polietileno (PET)**

El PET es un poliéster termoplástico que se produce a partir de dos compuestos principalmente, el ácido tereftálico y el etilenglicol; aunque también puede obtenerse utilizando dimetiltereftalato en lugar de ácido tereftálico. Este material tiene una baja velocidad de cristalización y puede encontrarse en estado amorfo-transparente o cristalino.

El PET en general se caracteriza por ser extremadamente duro, resistente al desgaste, dimensionalmente estable, resistente a los químicos y tiene buenas propiedades dieléctricas. Es un polímero plástico, lineal, con alto grado de cristalinidad y termoplástico en su comportamiento, lo cual lo hace apto para ser transformado mediante procesos de extrusión, inyección, inyección-soplado y termoformado (QuimiNet, 2005). Su fórmula química se presenta en la Figura 2.

**Figura 2.** Formula química del PET.



Fuente: Wikipedia (2020). *Tereftalato de polietileno*. Recuperado de [https://es.wikipedia.org/wiki/Tereftalato\\_de\\_polietileno](https://es.wikipedia.org/wiki/Tereftalato_de_polietileno)

A continuación se describen otras características importantes que presenta el PET (García, 2017):

- Buen comportamiento frente a esfuerzos permanentes.
- Alta resistencia a la fricción, a la fatiga y al desgaste.
- Muy buen coeficiente de deslizamiento.
- Buena resistencia química, alta resistencia a los ataques químicos como ácidos y álcalis suaves y solventes orgánicos, no se daña por grasas o aceites.
- Buena resistencia térmica, es un buen conductor de la temperatura.
- Muy buena barrera a CO<sub>2</sub>, aceptable barrera a O<sub>2</sub> y humedad.
- Totalmente reciclable, aunque tiende a disminuir su viscosidad con la historia térmica.
- Aprobado para su uso en productos que deban estar en contacto con productos alimentarios. Alto grado de transparencia y brillo con efecto lupa, conserva el sabor y el aroma de los alimentos.
- Apto para producir botellas, películas, láminas, planchas y piezas.
- Compatible con otros materiales barrera que mejoran en su conjunto la calidad barrera de los envases y por lo tanto permiten su uso en mercados específicos.
- Excelentes propiedades mecánicas, material duro con magníficas conductas a la flexión y al impacto elástico, además de ser ligero y translúcido.
- Esterilizable por rayos gamma y óxido de etileno.
- Buena relación costo/rendimiento.
- Excelente estabilidad dimensional y propiedades barrera para la retención de gases.

En general, estas propiedades características del PET lo convierten en el material idóneo para la realización de aplicaciones de uso común y principalmente, para la producción de distintos tipos de envases. Tanto la industria comercial alimentaria como la industria manufacturera son las que más provecho le sacan a este polímero termoplástico.

#### **2.1.4. Reciclado del PET**

El reciclaje es la actividad de recuperar los desechos sólidos a fin de reintegrarlos al ciclo económico, reutilizándolos o aprovechándolos como materia prima para nuevos productos. El reciclado de los envases de PET se consigue por dos métodos:

##### **2.1.4.1 Reciclado mecánico**

Consiste en un proceso físico en el que el PET luego de ser utilizado en procesos industriales, se vuelve a poner en circulación para su reutilización.

Es la técnica más utilizada en la actualidad, consiste en la molienda, separación y lavado de los envases. Las escamas resultantes de este proceso se pueden destinar en forma directa, sin necesidad de volver a hacer pellets, en la fabricación de productos por inyección o extrusión.

El primer paso para su reciclado es su selección desde los residuos procedentes de recogida selectiva o recogida común. En el primer caso, el producto recogido es de mucha mayor calidad; principalmente por una mayor limpieza.

El proceso de recuperación mecánico del PET se divide en dos fases. En la primera fase se procede a la identificación y clasificación de botellas, lavado y separación de etiquetas, triturado, separación de partículas pesadas de otros materiales como polipropileno, polietileno de alta densidad, etc., lavado final, secado mecánico y almacenamiento de la escama. En la segunda fase, esta escama de gran pureza se grancea; se seca, se incrementa su viscosidad y se cristaliza, quedando apta para su transformación en nuevos elementos de PET (ver Figura 3).

**Figura 3.** Reciclado mecánico del PET.



Fuente: Miralba (2016). *Tipos de reciclaje*. Recuperado de <https://lamateriadelsaber.wordpress.com/2016/02/09/tipos-de-reciclaje/>

El plástico recuperado debe ser analizado para saber el nivel de aditivos que contiene y, en función del destino que tendrá la granza recuperada, seleccionar el material de partida y equilibrar, reponiendo los estabilizantes, antioxidantes, etc., que sean necesarios para obtener pellets lo más parecido al plástico virgen empleado para su destino.

La granza de plásticos reciclados se puede utilizar de diferentes maneras, según los requerimientos para el producto final (Röben, 2003):

- Procesado del producto reciclado directamente, con la formulación que sea adecuada a su aplicación concreta. En este caso, las piezas obtenidas tienen en general propiedades menores a las fabricadas con polímero virgen, lo que es suficiente para la utilidad deseada.
- Mezcla de granza reciclada con polímero virgen para alcanzar las prestaciones requeridas. El ejemplo típico es la adición de polímero virgen a la mezcla de termoplásticos.

- Coextrusión del producto reciclado. Un ejemplo de esta técnica es la fabricación de recipientes para detergentes, en la que la capa intermedia puede ser de polímero reciclado y al interior (contacto con el producto) y la exterior son de polímero virgen.

#### 2.1.4.2 Reciclado químico

No todos los plásticos pueden ser sometidos al reciclado mecánico, bien sea porque presentan un grado de degradación o porque se encuentran mezclados con otras sustancias cuya separación y limpieza no son rentables.

El reciclado químico implica realizar el proceso inverso a la obtención de materiales poliméricos, es decir, provocar el fraccionamiento de los materiales poliméricos en pequeños componentes, que posteriormente pueden utilizarse y transformarse por reacción química (ver Figura 4). El objetivo ideal es recuperar los monómeros para volver a fabricar los mismos polímeros (Solano y Vera, 2011). Los residuos plásticos se someten a diversos procesos químicos para descomponerlos en productos más sencillos, de los cuales los más importantes son: metanogénesis, glicolisis e hidrolisis (Quintero, 2015).

- **Metanolisis:** es un avanzado proceso de reciclaje que consiste en la aplicación de metanol en el PET. Este poliéster se descompone en sus moléculas básicas, incluidos el dimetiltereftalato y el etilenglicol, que pueden polimerizarse nuevamente para producir resina virgen.
- **Glicolisis:** despolimerización parcial por acción del etilenglicol y en condiciones menos severas que la metanolisis y la hidrólisis, lo que reduce los costes económicos, aunque es menos eficaz que ellas para el tratamiento de desechos coloreados y mezclados. Los productos de la reacción pueden utilizarse para recuperar PET o como precursores de espumas de poliuretano o poliésteres insaturados.

- **Hidrólisis:** normalmente se realiza en medio básico (saponificación), lo que facilita el proceso, pero necesita una etapa de post-tratamiento para transformar el producto en monómeros utilizables. Este procedimiento permite tratar los desechos coloreados y mezclados.

**Figura 4.** Reciclado químico del PET.



Fuente: Rojas, J. (2010). *Reducir, Reutilizar y Reciclar el Plástico*. Recuperado de <https://civilgeeks.com/2012/01/06/reducir-reutilizar-y-reciclar-el-plastico/>

En comparación, el reciclado químico es sumamente complejo y necesita costos de inversión mucho más altos que el reciclaje mecánico.

### **2.1.5. Extrusión**

La extrusión es un proceso industrial mecánico, en donde se realiza una acción de moldeado, que por flujo continuo con presión y empuje, se le hace pasar por un molde para producir un artículo de sección transversal constante, y en principio, de longitud definida (Parra, 2017).

Este proceso es utilizado principalmente por las industrias de plástico para generar productos de gran calidad a una rápida velocidad. Tiene por objetivo usarse para la producción de perfiles, tubos, mangueras, películas, hojas, filamentos continuos, entre muchos otros.

El proceso de extrusión de plásticos se lleva a cabo en máquinas denominadas extrusoras o extrusores. Aunque existen extrusoras de diversos tipos, las más utilizadas son las de tornillo o de husillo simple. En la extrusora, el polímero fundido o en estado viscoelástico es forzado a pasar a través de un cabezal, por medio del empuje generado por la acción giratoria de un husillo o tornillo que gira concéntricamente en una cámara a temperaturas controladas llamada cañón, con una separación milimétrica entre ambos elementos. El material polimérico es alimentado por medio de una tolva en un extremo de la máquina y debido a la acción de empuje se funde, fluye y mezcla en el cañón y se obtiene por el otro lado con un perfil geométrico preestablecido (Interempresas, 2015). En la Figura 5 se puede observar una representación esquemática de una extrusora.

**Figura 5.** Esquema de una extrusora.



Fuente: Mariano (2011). *Tecnología de los plásticos*. Recuperado de <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html>

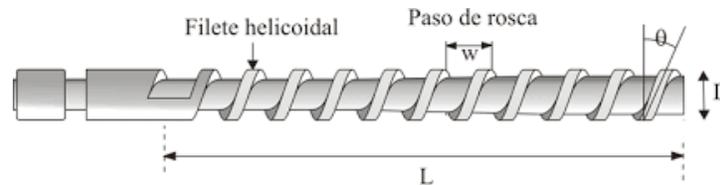
## 2.1.6. Componentes de la extrusora

La extrusora cuenta con una serie de componentes para crear un producto terminado, que se describirán en detalle a continuación (Moya, 2016):

### 2.1.6.1 Tornillo de extrusión

El tornillo o huesillo consiste en un cilindro largo rodeado por un filete helicoidal (ver Figura 6). El tornillo es una de las partes más importantes ya que contribuye a realizar las funciones de transportar, calentar, fundir y mezclar el material. La estabilidad del proceso y la calidad del producto que se obtiene dependen en gran medida del diseño del tornillo. Los parámetros más importantes en el diseño del tornillo son su longitud ( $L$ ), diámetro ( $D$ ), el ángulo del filete ( $\theta$ ) y el paso de la rosca ( $W$ ).

**Figura 6.** Tornillo de una extrusora.



Fuente: Beltrán, M. & Marcilla, A. (2019). *Extrusión*. Recuperado de <http://iq.ua.es/TPO/Tema4.pdf>

El material se va presurizando a medida que avanza por el tornillo, comenzando con presión atmosférica en la tolva y aumentando hasta la salida por la boquilla. La sección de paso del tornillo no es constante, sino que es mayor en la zona de alimentación (mayor profundidad de canal). Normalmente el tornillo no viene acompañado de ningún sistema de calentamiento o enfriamiento, aunque en algunos casos se emplean tornillos huecos por los que se hace circular un fluido refrigerante o calefactor.

Los materiales termoplásticos que se usan en el proceso de extrusión difieren notablemente entre sí. La elasticidad, calor específico, coeficiente de fricción, temperatura de fusión, viscosidad del fundido, etc., cubren un amplio rango de

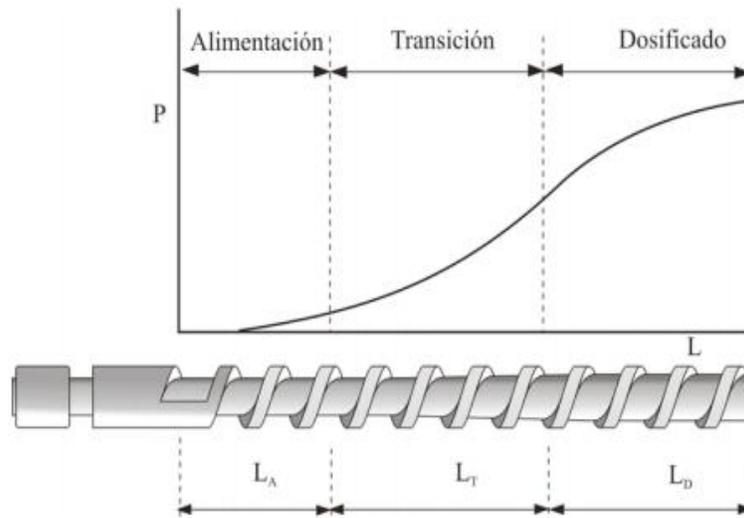
valores, y puesto que todas estas propiedades tienen su importancia en el momento de diseñar el tornillo, es lógico que sea necesario utilizar diferentes tipos de tornillo para trabajar adecuadamente cada material. En la práctica es muy raro que un tornillo determinado sea adecuado para trabajar con materiales muy diversos; de hecho, cada tornillo se diseña o elige para trabajar con una determinada combinación boquilla/material.

En general, el tornillo presenta tres zonas claramente diferenciadas que cumplen tres misiones principales: alimentación, compresión y dosificación (ver Figura 7). A veces existen algunas zonas complementarias (por ejemplo, desgasificación). Las funciones de cada una de las zonas se presentan a continuación:

- **Zona de alimentación:** en esta zona se precalienta y transporta el polímero a las partes siguientes. La profundidad del tornillo es constante y la longitud de esta zona es tal que se produzca una alimentación correcta, ni deficiente ni excesiva, hacia las zonas delanteras del tornillo. Esta alimentación varía un poco para los diferentes tipos de polímeros con el fin de obtener una eficiencia óptima.
- **Zona de compresión:** esta zona tiene una profundidad de canal decreciente y tiene diferentes funciones. Primeramente, se expulsa el aire atrapado entre los gránulos originales (compactación), en segundo lugar, se mejora la transferencia de calor desde las paredes de la camisa calentada conforme disminuye el espesor de la capa de material y en tercer lugar, se da el cambio de densidad que ocurre durante la fusión. Esta se logra por fricción y por conducción de calor, a lo que ayuda la reducción del espesor del material.
- **Zona de dosificación:** una vez más se encuentra una profundidad de tornillo constante. Su función es la de homogenizar el material fundido y con ello

suministrar a la región de la matriz un material de calidad homogéneo a temperatura y presión constantes.

**Figura 7.** Zonas de una extrusora – sección del tornillo.



Fuente: Beltrán, M. & Marcilla, A. (2019). *Extrusión*. Recuperado de <http://iq.ua.es/TPO/Tema4.pdf>

### 2.1.6.2 Cilindro

El cilindro de calefacción alberga en su interior al tornillo como se muestra en la Figura 8. La superficie del cilindro debe ser muy rugosa para aumentar las fuerzas de cizalla que soportará el material y permitir así que éste fluye a lo largo de la extrusora. Para evitar la corrosión y el desgaste mecánico, el cilindro suele construirse de aceros muy resistentes y en algunos casos viene equipado con un revestimiento bimetálico que le confiere una elevada resistencia, en la mayoría de los casos superior a la del tornillo, ya que éste es mucho más fácil de reemplazar.

**Figura 8.** Sistema cilindro de calefacción - tornillo de una extrusora.



Fuente: Beltrán, M. & Marcilla, A. (2019). *Extrusión*. Recuperado de <http://iq.ua.es/TPO/Tema4.pdf>

El cilindro por lo general posee sistemas de transferencia de calor. El calentamiento se puede realizar mediante resistencias eléctricas circulares localizadas en toda su longitud como se muestra en la Figura 8, y también, aunque es menos usual, mediante radiación o encamisado con fluidos refrigerantes o calefactores. El cilindro suele dividirse en varias zonas de calefacción, al menos tres, con control independiente en cada una de ellas, lo que permite conseguir un gradiente de temperatura razonable desde la tolva hasta la boquilla.

El cilindro debe enfriarse si como consecuencia de la generación interna de calor originada por la cizalla a la que se somete al plástico se rebasa la temperatura nominal del proceso (lo que ocurre normalmente). El enfriamiento en la menor parte de las ocasiones se hace con líquidos, ya que, aunque tengan una mayor capacidad para eliminar calor que el aire, la temperatura es más difícil de controlar. Normalmente se usan soplantes como las representadas en la Figura 8. Hay que tener en cuenta que los sensores de control de temperatura quedan situados en el cilindro, por lo que la temperatura del material será siempre superior a la que indican los controles.

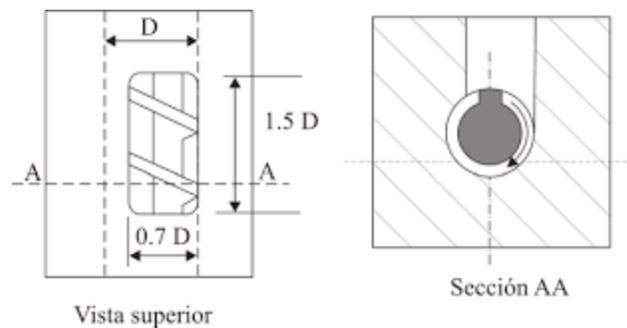
### **2.1.6.3 Garganta de alimentación**

El cilindro puede estar construido en dos partes, la primera se sitúa debajo de la tolva y se denomina garganta de alimentación. Suele estar provista de un sistema de refrigeración para mantener la temperatura de esta zona lo suficientemente baja

para que las partículas de granza no se adhieran a las paredes internas de la extrusora.

La garganta de alimentación está conectada con la tolva a través de la boquilla de entrada o de alimentación. Esta boquilla suele tener una longitud de 1,5 veces el diámetro del cilindro y una anchura de 0,7 veces el mismo (ver Figura 9), y suele estar desplazada del eje del tornillo para facilitar la caída del material a la máquina.

**Figura 9.** Garganta de alimentación.



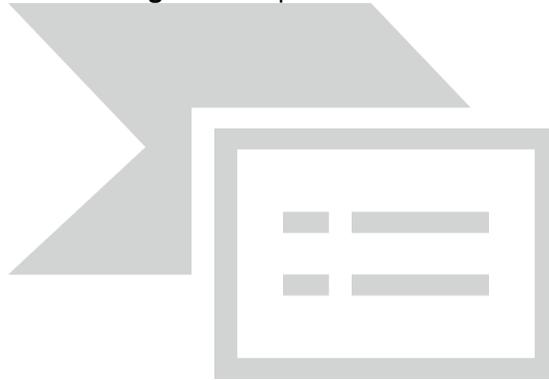
Fuente: Beltrán, M. & Marcilla, A. (2019). *Extrusión*. Recuperado de <http://iq.ua.es/TPO/Tema4.pdf>

#### 2.1.6.4 Tolva

La tolva es el contenedor que se utiliza para introducir el material en la máquina. La tolva, la garganta de alimentación y la boquilla de entrada deben estar ensambladas perfectamente y diseñadas de manera que proporcionen un flujo constante de material. Esto se consigue más fácilmente con tolvas de sección circular, aunque son más caras y difíciles de construir que las de sección rectangular (ver Figura 10). Se diseñan con un volumen que permita albergar material para 2 horas de trabajo.

En ocasiones para asegurar el flujo constante del material se usan dispositivos de vibración, agitadores e incluso tornillos (tornillo de Crammer).

**Figura 10.** Tipos de tolvas.



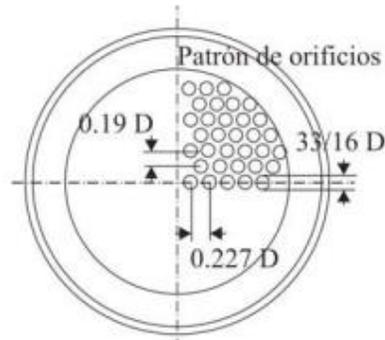
Fuente: Moya Verdú, G. (2016). *Estudio, diseño, simulación y optimización de una matriz de extrusión de plástico* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

#### **2.1.6.5 Plato rompedor y filtros**

El plato rompedor se encuentra al final del cilindro. Se trata de un disco delgado de metal con agujeros, como se muestra en la Figura 11. El propósito del plato es servir de soporte a un paquete de filtros cuyo fin principal es atrapar los contaminantes para que no salgan con el producto extraído. Los filtros además mejoran el mezclado y homogenizan el fundido. Los filtros van apilados delante del plato rompedor, primero se sitúan los de malla más ancha, reduciéndose el tamaño de malla progresivamente. Detrás se sitúa un último filtro también de malla ancha y finalmente el plato rompedor que soporta los filtros.

Conforme se ensucian las mallas es necesario sustituirlas para evitar una caída de presión excesiva y que disminuya la producción. Por ello, el diseño del plato debe ser tal que pueda ser reemplazado con facilidad.

**Figura 11.** Plato rompedor.



Fuente: Beltrán, M. & Marcilla, A. (2019). *Extrusión*. Recuperado de <http://iq.ua.es/TPO/Tema4.pdf>

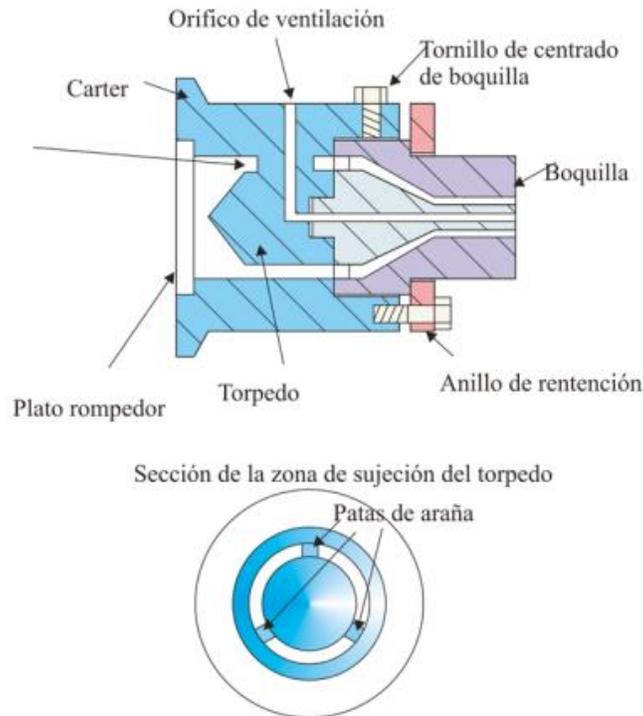
### 2.1.6.6 Cabecal y boquilla

El cabecal es la pieza situada al final del cilindro, que se encuentra sujetando la boquilla y por lo general manteniendo el plato rompedor. Generalmente va atornillado al cilindro. El perfil interno del cabecal debe facilitar lo más posible el flujo del material hacia la boquilla. La Figura 12 muestra un sistema cabecal-boquilla de forma anular. En la Figura 12 el material fluye del cilindro a la boquilla a través del torpedo, situado en el cabecal. La sección transversal de los soportes del torpedo se diseña para proporcionar el flujo de material a velocidad constante.

La función de la boquilla es la de moldear el plástico. Las boquillas se pueden clasificar por la forma del producto, teniendo así boquillas anulares como la mostrada en la Figura 12 (por ejemplo, para la fabricación de tuberías o recubrimientos de materiales cilíndricos), boquillas planas como la de la Figura 13 (con las que se obtienen planchas y láminas), boquillas circulares (con las que se obtienen fibras y productos de forma cilíndrica), etc.

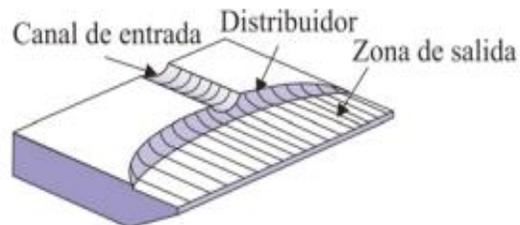
Se puede distinguir tres partes diferenciadas en todas las boquillas que se muestran en la Figura 13 (corte de boquilla plana): la primera parte es el canal de entrada, luego el distribuidor y por último la zona de salida.

**Figura 12.** Boquilla anular y cabezal.



Fuente: Beltrán, M. & Marcilla, A. (2019). *Extrusión*. Recuperado de <http://iq.ua.es/TPO/Tema4.pdf>

**Figura 13.** Partes diferenciadas en una boquilla de extrusión.



Fuente: Beltrán, M. & Marcilla, A. (2019). *Extrusión*. Recuperado de <http://iq.ua.es/TPO/Tema4.pdf>

Las dimensiones de la boquilla no son exactamente las mismas que las del producto extruido. Hay varias razones para ello: la recogida del material, el enfriamiento y el fenómeno de relajación contribuyen a que el material cambie de tamaño e incluso de forma.

Excepto para las boquillas circulares es prácticamente imposible fabricar una boquilla en la que la geometría del canal sea tal que la boquilla puede ser empleada para un número amplio de materiales y de condiciones de operación. En cualquier caso, el diseño de la boquilla debería tener en cuenta en la medida de lo posible una serie de consideraciones como son emplear radios amplios en todas las esquinas, evitar canales estrechos o pequeños y partes profundas.

### **2.1.6.7 Sistema de motor**

El sistema de motor de una extrusora es el componente responsable de suministrar la energía necesaria para producir: la alimentación, el transporte, mezclado y bombeo del material hacia la boquilla y parte de la fusión del material. Se encarga de impulsar y transmitir potencia al tornillo con un movimiento de rotación para poder producir el extruido. Los motores más empleados son eléctricos, por su facilidad de control y operan con voltajes de 220 y en ocasiones especiales a 440. Las extrusoras modernas trabajan con motores de corriente continua, ya que permiten un amplio rango de velocidades de giro, bajo nivel de ruido y un control preciso de la velocidad, característica importante en la calidad del extruido. Se recomienda que la potencia de diseño sea 1 Hp por cada 4,5 a 7 kg/h, aunque esto dependerá de la aplicación y el requerimiento de la mezcla.

Es necesario tener en cuenta que la velocidad alcanzada por motores resulta muy elevada que la requerida por el tornillo, por lo cual se suele trabajar con cajas reductoras de velocidad para tener un óptimo desempeño.

Para producir un extruido de dimensiones estables y de buena calidad, el tornillo debe girar a velocidad constante para mantener las condiciones del proceso invariables (Parra, 2017).

### 2.1.6.8 Sistema de instrumentación y control

Estos elementos varían de acuerdo a lo necesario para el proceso. Por lo general, se requiere una serie de sensores distribuidos en la extrusora a modo de controlar las variables del proceso (Parra, 2017). Los sensores más utilizados son:

- **Sensores de temperatura en el cilindro:** generalmente se utilizan termopares, que se acoplan en agujeros en el cilindro, de forma de estar más cerca del fluido.
- **Sensor de presión en el cabezal:** necesario para controlar la presión y así controlar la calidad del producto.
- **Tacómetro:** necesario para conocer la velocidad del tornillo y regular el movimiento del material.

## 2.2. MARCO CONCEPTUAL

**Ácido poliláctico (PLA).** Es un polímero construido por moléculas de ácido láctico, con propiedades semejantes a las del tereftalato de polietileno (PET) que se utiliza para hacer envases, pero que además es biodegradable. Se degrada fácilmente en agua y óxido de carbono. Es un termoplástico que se obtiene a partir de almidón de maíz o de yuca o mandioca, o de caña de azúcar. Se utiliza ampliamente en la impresión 3D bajo el proceso de modelado por deposición fundida (FDM).

**Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).** Es un termoplástico duro, resistente al calor y a los impactos. Es un copolímero obtenido de la polimerización del estireno y acrilonitrilo en la presencia del polibutadieno, resultado de la combinación de los tres monómeros, originando un plástico que se presenta en una gran variedad de grados dependiendo de las proporciones utilizadas de cada uno. Básicamente, el estireno contribuye a la facilidad de las características del proceso, el acrilonitrilo imparte la resistencia química e incrementa la dureza superficial y el butadieno contribuye a la fuerza de impacto y dureza total. Las porciones pueden variar del

15-35% de acrilonitrilo, 5-30% de butadieno y 40-60% de estireno. El resultado es una larga cadena de polibutadieno entrecruzada con cadenas más cortas de poli (estireno-co-acrilonitrilo). Los grupos nitrilo de las cadenas vecinas, siendo polares, atacan cada una de las bandas de las cadenas juntas haciendo el ABS más fuerte que el poliestireno puro. Se emplea en la impresión 3D cuando son piezas que posteriormente se quieren mecanizar.

**Diseño asistido por computadora (CAD).** Hace referencia al uso de diferentes programadores gráficos para lograr crear una serie de imágenes que conjuntas crean una imagen más grande o más conocida como dibujo. El CAD es también utilizado como un medio de expresión mediante un ordenador y un gestor gráfico; a su vez, se puede decir que también es considerado como una relativamente nueva técnica de dibujo revolucionaria, con la cual se pueden realizar dibujos y/o planos. Estas herramientas se pueden dividir básicamente en programas de dibujo 2D y de modelado 3D. Las herramientas de dibujo en 2D se basan en entidades geométricas vectoriales como puntos, líneas, arcos y polígonos, con las que se puede operar a través de una interfaz gráfica. Los modeladores en 3D añaden superficies y sólidos. El CAD fue principalmente inventado por un francés, Pierre Bézier, ingeniero de los Arts et Métiers Paris Tech. El ingeniero desarrolló los principios fundamentales del CAD con su programa UNISURF en 1966.

**Extrusión.** Es un proceso utilizado para crear objetos con sección transversal definida y fija. El material se empuja o se extrae a través de un troquel de una sección transversal deseada. Las dos ventajas principales de este proceso por encima de procesos manufacturados son la habilidad para crear secciones transversales muy complejas con materiales que son quebradizos, porque el material solamente encuentra fuerzas de compresión y de cizallamiento. Además, las piezas finales se forman con una terminación superficial excelente. La extrusión puede ser continua, produciendo teóricamente de forma indefinida materiales

largos, o semicontinua, produciendo muchas partes. El proceso de extrusión puede hacerse con el material caliente o frío.

**Impresión 3D.** Es una máquina capaz de realizar réplicas de diseños en 3D, creando piezas o maquetas volumétricas a partir de un diseño hecho por ordenador, descargado de internet o recogido a partir de un escáner 3D. Surgen con la idea de convertir archivos de 2D en prototipos reales o 3D. Comúnmente se ha utilizado en el prefabricado de piezas o componentes, en sectores como la arquitectura y el diseño industrial. En la actualidad se está extendiendo su uso en la fabricación de todo tipo de objetos, modelos para vaciado, piezas complicadas, alimentos, prótesis médicas (ya que la impresión 3D permite adaptar cada pieza fabricada a las características exactas de cada paciente), etc.

**Modelado por deposición fundida (FDM).** Es un proceso de fabricación utilizado para el modelado de prototipos y la producción a pequeña escala. El modelado por deposición fundida utiliza una función aditiva, depositando el material en capas, para conformar la pieza. Un filamento plástico o metálico que inicialmente se almacena en rollos, es introducido en una boquilla. La boquilla se encuentra por encima de la temperatura de fusión del material y puede desplazarse en tres ejes controlada electrónicamente. La boquilla normalmente la mueven motores a pasos o servomotores. La pieza es construida con finos hilos del material que solidifican inmediatamente después de salir de la boquilla. Esta técnica fue desarrollada por S. Scott Crump a finales de la década de 1980 y fue comercializada en 1990.

**Poliéster.** Es una cadena de elastómeros que contiene el grupo funcional éster en su cadena principal. Los poliésteres que existen en la naturaleza son conocidos desde 1830, pero el término poliéster generalmente se refiere a los poliésteres sintéticos (plásticos), provenientes de fracciones pesadas del petróleo. El poliéster termoplástico más conocido es el PET. El poliéster es muy resistente a la humedad, a los productos químicos y a las fuerzas mecánicas.

**Polímero.** Son macromoléculas, generalmente orgánicas, formadas por la unión mediante enlaces covalentes de una o más unidades simples llamadas monómeros. Estos forman largas cadenas que se unen entre sí por fuerzas de Van der Waals, puentes de hidrógeno o interacciones hidrofóbicas.

**Reciclaje.** Es un proceso cuyo objetivo es convertir desechos en nuevos productos o en materia prima para su posterior utilización. Gracias al reciclaje se previene el desuso de materiales potencialmente útiles, se reduce el consumo de nueva materia prima, además de reducir el uso de energía, la contaminación del aire (a través de la incineración) y del agua (a través de los vertederos), así como también disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con la producción de plásticos. El reciclaje es un componente clave en la reducción de desechos contemporáneos y es el tercer componente de las 3R (reducir, reutilizar y reciclar).

**SolidWorks.** Es un software CAD para modelado mecánico en 2D y 3D. La primera versión fue lanzada al mercado en 1995 con el propósito de hacer la tecnología CAD más accesible. El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en traspasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, construyendo virtualmente la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones, planos y ficheros de intercambio, se realizan de manera bastante automatizada.

**Tereftalato de Polietileno (PET).** Tipo de plástico muy usado en envases de bebidas. Químicamente el PET es un polímero que se obtiene mediante una reacción de policondensación entre el ácido tereftálico y el etilenglicol. Pertenece al grupo de materiales sintéticos denominados poliésteres. Es un polímero termoplástico lineal, con un alto grado de cristalinidad. Como todos los termoplásticos puede ser procesado mediante extrusión, inyección y soplado.

**Termoplástico.** Es un material que, a temperaturas relativamente altas, se vuelve deformable o flexible, se derrite cuando se calienta y se endurece en un estado de transición vítrea cuando se enfría lo suficiente. La mayor parte de los termoplásticos son polímeros de alto peso molecular, los cuales poseen cadenas asociadas por medio de fuerzas de Van del Waals débiles; fuertes interacciones dipolo-dipolo y enlace de hidrógeno, o incluso anillos aromáticos apilados. Los polímeros termoplásticos difieren de los polímeros termoestables o termofijos en que después de calentarse y moldearse pueden recalentarse y formar otros objetos.

### 2.3. MARCO LEGAL

- **Resolución No. 1407 de 2018 del Ministerio de ambiente y Desarrollo Sostenible**

“Por el cual se reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y se toman otras determinaciones”. La resolución tiene por objeto reglamentar la gestión ambiental de residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio y metal. Se establece a los productores la obligación de formular, implementar y mantener actualizado un Plan de Gestión Ambiental de Residuos de Envases y Empaques, que fomenten el aprovechamiento. Tanto el productor, como el comercializador, el fabricante e importador de envases y empaques, el gestor de residuos, las empresas transformadoras del material aprovechable en materia prima y el consumidor son responsables de fomentar el aprovechamiento de los residuos de envases y empaques.

- **Decreto 2811 de 1974 República de Colombia**

“Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente”. Este decreto tiene como propósito que el ser humano tome conciencia de la importancia de preservar los recursos naturales, ya que son patrimonio común de la humanidad, necesarios para el desarrollo en el ámbito económico y social del país. Prevenir y controlar los efectos nocivos de la explotación de los recursos naturales no renovables sobre los demás recursos. Regular la conducta humana, individual o colectiva y la actividad de la administración pública, respecto del ambiente y de los recursos naturales renovables y las relaciones que surgen del aprovechamiento y conservación de tales recursos y de ambiente.

- **Resolución No. 754 de 2014 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible**

“Por el cual se adopta la metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos”.

- **Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos - Consejo Nacional de Política Económica y Social - CONPES 3874.**

La Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos, busca a través de la gestión integral de residuos sólidos aportar a la transición de un modelo lineal hacia una economía circular donde, haciendo uso de la jerarquía en la gestión de los residuos, se prevenga la generación de residuos y se optimice el uso de los recursos para que los productos permanezcan el mayor tiempo posible en el ciclo económico y se aproveche al máximo su materia prima y potencial energético. Además, tiene como objetivo principal, implementar la gestión integral de residuos sólidos como política nacional de interés social, económico, ambiental y sanitario,

para contribuir al fomento de la economía circular, desarrollo sostenible, adaptación  
y mitigación al cambio climático

### 3. DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO

A continuación se describe la metodología empleada para el diseño de la planta piloto que tiene como objetivo obtener filamentos de diámetro de 1,75 mm útiles en impresoras 3D.

Para el cumplimiento de los objetivos se plantearon cinco (5) etapas, las cuales se abordarán en los siguientes apartados del documento:

1. Caracterización del Tereftalato de Polietileno (PET)
2. Variables de diseño de la planta piloto
3. Dimensionamiento de los componentes que conforman la planta piloto
4. Selección de materiales
5. Presupuesto

#### 3.1. CARACTERIZACIÓN DEL TEREFTALATO DE POLIETILENO (PET)

De la revisión bibliográfica realizada en revistas científicas, libros y tesis de grado se concluye que el Tereftalato de Polietileno PET es un material dimensionalmente estable, con alto grado de cristalinidad y termoplástico en su comportamiento, por lo cual es apto para ser transformado mediante el proceso de extrusión.

Durante el proceso en fundido del PET para fibra, es importante controlar los siguientes parámetros de modo que se consigan las propiedades físicas y mecánicas deseadas (Méndez *et al.*, 2017):

- a) Cristalinidad y orientación: la influencia de la cristalinidad contribuye con la resistencia del flujo molecular durante el proceso de estiramiento, el grado de tensión aumenta, resultando el producto más rígido y quebradizo. El desempeño del estiramiento del PET, depende de la temperatura, peso molecular, velocidad de cristalización, tipo de copolímero y de la composición. Por lo que propiedades como transparencia, resistencia y rigidez son fuertemente afectadas por el nivel

de cristalización y la morfología, además de la temperatura, la presión de soplado y el tiempo de estirado.

- b) Viscosidad: una de las características más importantes del PET es su viscosidad intrínseca. La viscosidad intrínseca del material depende de la longitud de sus cadenas poliméricas. Cuanto más largas sean las cadenas, más rígido será el material y, por tanto, mayor será la viscosidad.
- c) Temperatura de transición vítrea y temperatura de fusión: la temperatura de transición vítrea es la temperatura a la cual un polímero amorfo se ablanda. Bajo esta temperatura, el polímero disminuye drásticamente su densidad y porcentaje de elongación, además se vuelve rígido y quebradizo. El PET tiene una temperatura de transición vítrea baja lo que da lugar a que los productos realizados con PET no se puedan calentar por encima de esta temperatura. Por otro lado, la temperatura de fusión es la temperatura a la cual la cadena polimérica abandona su estructura cristalina y se transforma en un líquido desordenado. La porción amorfa del polímero sólo experimentará la fase vítrea y la porción cristalina sólo la fase de fusión.
- d) Secado del PET: el PET se caracteriza por su alto grado higroscópico, es decir, absorben humedad del medio ambiente por lo que requieren de una obligada etapa de secado. En el caso del PET, la humedad contenida no sólo se encuentra en la superficie, sino que se transporta en el interior del gránulo por difusión. Debido a la penetración de la humedad, se requieren tiempos relativamente largos y altas temperaturas de operación. Para lograr un procesamiento eficiente del PET se requiere que la humedad sea menor de 0.004-0.005% antes de inyectar el material. La humedad presente, a la temperatura de fusión causa la degradación hidrolítica del polímero; resultando en una disminución de la viscosidad intrínseca que genera un decremento del peso molecular. Disminuyendo consecuentemente la dureza y la resistencia del

producto final modificando las propiedades de flujo, provocando que se adhieran partes del material al molde y aparezcan nubes sobre la superficie del artículo.

Otras propiedades físicas y químicas que también son importantes describir del material PET son (Suasnavas, 2017):

- La densidad: es un factor económico de alto valor en la industria plástica ya que es determinante al momento de elegir el uso de un plástico con otro. El PET en estado amorfo tiene una densidad que oscila entre  $1,33 - 1,37 \text{ g/cm}^3$ , en estado cristalino una densidad que oscila entre  $1,45 - 1,51 \text{ g/cm}^3$ .
- Conductividad térmica: se define como la cantidad de calor que transmite un cuerpo, en este caso, es la cantidad de calor que transmiten los materiales plásticos a través de ellos. Con esta propiedad se conoce si el plástico tiene un buen aislamiento térmico, siendo mejores los que presentan valores bajos. El PET presenta un valor de conductividad térmica de  $0,24 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ .
- Propiedades ópticas: las propiedades ópticas están relacionadas con la morfología y estructura del material; las principales son: índice de refracción y transmisión de la luz. Estas propiedades influyen en la turbidez, brillo y transparencia del material. Los materiales amorfos cuando no contienen impurezas poseen mayor transparencia, por el contrario, cuando contienen estructuras cristalinas estas pueden interferir con el paso de la luz. El PET tiene una transmisión de luz del 89% y un índice de refracción de 1,5750.
- Propiedades biológicas: el PET es un plástico resistente al ataque microbiológico, ya que estos no poseen mecanismos para atacarlo, por esta característica en el PET no hay la proliferación de bacterias, hongos o parásitos relacionados con la putrefacción. Al ser no biodegradable mantiene sus características a través del tiempo, lo que le proporciona una larga vida útil.

En la Tabla 2 se detalla las principales propiedades del Tereftalato de Polietileno.

**Tabla 2.** Características del PET.

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	1,370 amorfo 1,455 cristalino
Presión	MPa	55 - 75
Prueba de impacto	kJ/m <sup>2</sup>	3,6
Módulo de elasticidad	MPa	2100 – 2400 amorfo 2800 – 3100 cristalino
Dilatación térmica	10 <sup>-4</sup> /°C	15,2 - 24
Resistencia dieléctrica	V/mm	13780 - 15750
Constante dieléctrica (60 Hz)	--	3,65
Absorción de agua	ASTM	0,16
Velocidad de combustión	mm/min	Consumo lento
Índice de refracción	--	1,5750
Temperatura de fusión	°C	256 - 271
Temperatura de transición vítrea	°C	70
Conductividad térmica	W/m°C	0,24
Calor específico	J/Kg °C	1000

Fuente: García Sánchez, M. O. (2017). *Ingeniería básica de una planta de producción de Polietileno Tereftalato* (Tesis de pregrado). Universidad de Sevilla, Sevilla, España y [https://es.wikipedia.org/wiki/Tereftalato\\_de\\_polietileno](https://es.wikipedia.org/wiki/Tereftalato_de_polietileno).

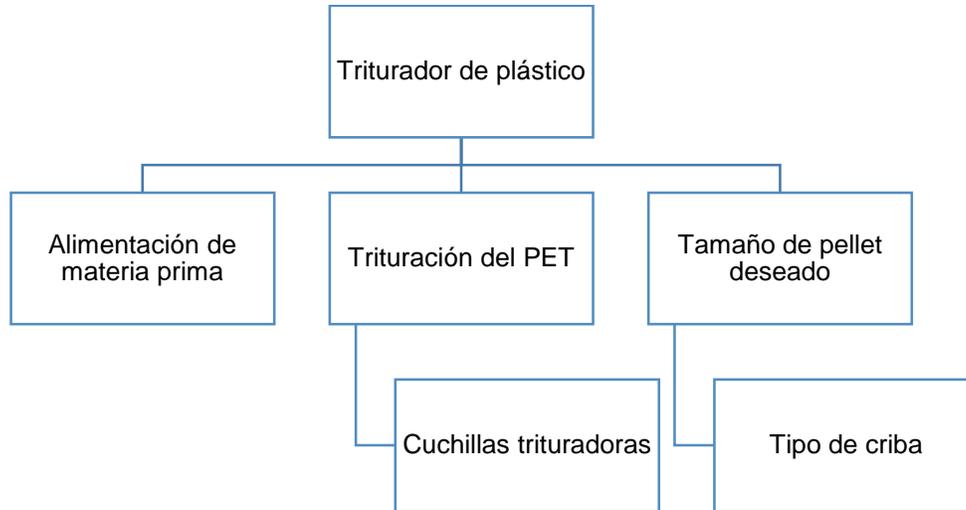
Nótese, que la temperatura de fusión del Tereftalato de Polietileno PET oscila entre 256°C y 271°C, de manera que la temperatura de trabajo que se seleccionó para realizar la extrusión del PET fue 260 °C, siendo está la temperatura promedio de fusión.

### 3.2. VARIABLES DE DISEÑO DE LA PLANTA PILOTO

Con el fin de realizar un correcto diseño de la planta piloto para la producción de filamentos útiles para impresión 3D, se realizó un estudio de los principales procesos que intervienen en la máquina trituradora y extrusora (ver

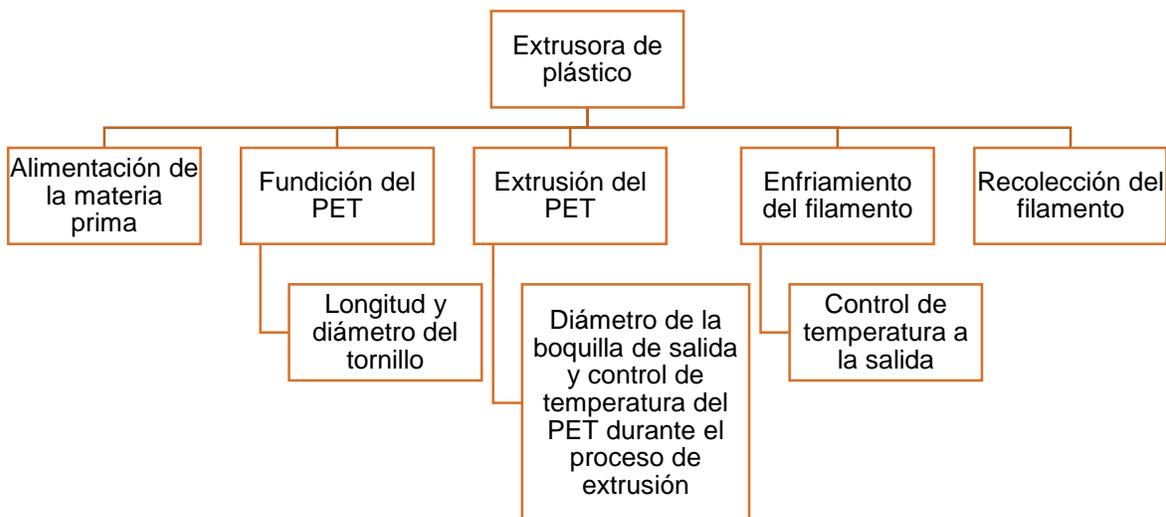
Figura 14 y Figura 15).

**Figura 14.** Diagrama de proceso para el diseño de la trituradora



Fuente: Autores

**Figura 15.** Diagrama de proceso para el diseño de la extrusora



Fuente: Autores

A continuación se especifican las variables de diseño fundamentales a tener en cuenta en el diseño de la planta piloto para la máquina trituradora y extrusora.

### **3.2.1. Máquina trituradora**

- a) Diseño de las cuchillas: se debe diseñar un tipo de cuchilla que permita atrapar el material PET para triturarlo según las especificaciones que se deseen.
- b) Arreglo de las cuchillas: la forma del arreglo de las cuchillas debe garantizar la recirculación del material; un arreglo muy empleado es el de forma helicoidal.
- c) Diseño de la criba: el diseño de la criba debe garantizar que el material que no ha pasado por éste, nuevamente sea triturado hasta cumplir con las especificaciones de salida de pasar por los orificios de la criba.

### **3.2.2. Máquina extrusora**

- a) Diámetro del cilindro (D): afecta en gran medida la velocidad de flujo; la mayoría de las extrusoras se diseñan teniendo en cuenta diámetros que oscilan entre 2 y 90 cm.
- b) Relación longitud/diámetro (L/D): es difícil la construcción de tornillos excesivamente largos, así mismo es compleja la alineación del mismo dentro del cilindro, de modo que son poco operativos. La relación L/D típica para la extrusión de polímeros termoplásticos varía generalmente entre 20:1 y 30:1.
- c) Configuración del tornillo: un tornillo tiene tres zonas definidas (alimentación, compresión y dosificado); la elección del diseño geométrico de las zonas del tornillo depende no sólo del diseño de la boquilla y de las velocidades de flujo esperadas, sino también de las características de fusión del polímero, de su comportamiento reológico y de la velocidad del tornillo.

- d) Temperatura de trabajo para realizar el proceso de extrusión del PET: 260°C. Esta temperatura fue seleccionada en el apartado 3.1., de este documento.
- e) Diámetro de la boquilla: se debe garantizar filamentos de diámetro de 1,75 mm.

### **3.3. DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES QUE CONFORMAN LA PLANTA PILOTO**

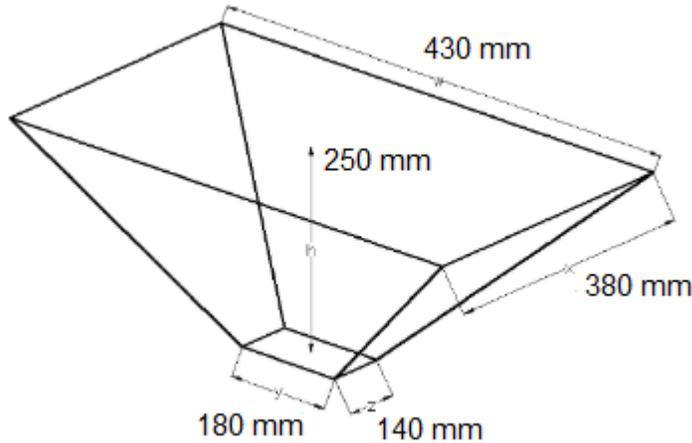
Se realizaron cálculos previos para determinar las dimensiones de los componentes de la planta piloto las cuales se especificarán a continuación. Para efectos de cálculo se trabajó en mm.

#### **3.3.1. Máquina trituradora**

##### **3.3.1.1 Dimensionamiento de la tolva trituradora**

Se diseñó una tolva con forma de tronco piramidal que se adapta a la cámara de trituración. Para determinar el largo y ancho de la tolva se tomó como referencia una botella PET de 500 mL la cual tiene dimensiones de 230 mm de alto y 60 mm de ancho; por tanto su base se diseñó con dimensiones de 140 mm X 180 mm, con una altura de 250 mm (ver Figura 16). Lo anterior permitió el cálculo del volumen ( $V$ ) de la tolva mediante el uso de la ecuación 1.

**Figura 16.** Dimensiones de la tolva de alimentación trituradora



Fuente: Autores

$$V = \frac{h}{3} * (A_1 + A_2 + \sqrt{(A_1 * A_2)}) \quad \text{Ec. 1}$$

$$V = \frac{250 \text{ mm}}{3} * (163.400 \text{ mm}^2 + 25.200 \text{ mm}^2 + \sqrt{(163.400 \text{ mm}^2 * 25.200 \text{ mm}^2)}) \rightarrow V$$

$$= 21.064,10 \text{ cm}^3$$

Donde:

$A_1$ : Área de la parte superior de la tolva

$A_2$ : Área de la parte inferior de la tolva

$h$ : Altura de la tolva

### 3.3.1.2 Determinación del torque que necesitan las cuchillas ( $T$ )

Para determinar el esfuerzo que las cuchillas deben ejercer sobre los trozos de material PET se empleó la ecuación 2 (Ortiz, 2016, pág. 37).

$$T = F_{\text{corte}} * R_{\text{cuchilla}} \quad \text{Ec. 2}$$

$$T = 37,33 \text{ N} * 0,07 \text{ m} \rightarrow T = 2,61 \text{ Nm}$$

Donde:

$F_{corte}$ : Fuerza de corte de las cuchillas (N). Estudios de ensayo de corte realizados a muestras de envase plástico realizados por Chapa y Martínez (2019), evidencian una carga máxima de corte de 37,33 N.

$R_{cuchilla}$ : Radio de la cuchilla de cizalladura (m). Para este diseño se propuso un radio de 70 mm de la cuchilla o 0,07 m.

### 3.3.1.3 Determinación de la potencia (P)

Para determinar la potencia de funcionamiento del motor del sistema se empleó la ecuación 3 (Ortiz, 2016, pág. 38).

$$P = T * W \quad \text{Ec. 3}$$

$$P = 2,61 Nm * 188,496 \frac{rad}{s} \rightarrow P = 491,97 W \text{ o } 0,65 Hp$$

Donde:

$T$ : Torque necesario de las cuchillas (Nm). Valor previamente calculado en el numeral 3.3.1.2.

$W$ : Velocidad angular del motor (rad/s). Se asume una velocidad de salida del motor de 1.800 r.p.m. o 188,496 rad/s.

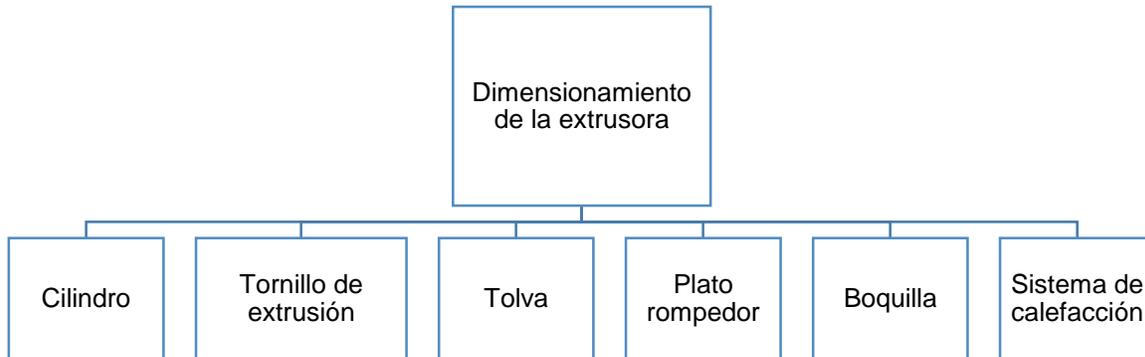
Los cálculos reflejan que se requiere un motor eléctrico de corriente alterna de 0,75 Hp para hacer girar las cuchillas en el sistema.

### 3.3.2. Máquina extrusora

A continuación se detallan las dimensiones de cada uno de los componentes que conforman la extrusora (ver

Figura 17).

**Figura 17.** Componentes principales de la extrusora



Fuente: Autores

### 3.3.2.1 Dimensionamiento del cilindro ( $L_{cil}$ )

Groover (2007, pág. 261) ha definido que el diámetro interno del cilindro para una extrusora comúnmente debe oscilar entre 25 y 150 mm; así mismo, la relación entre el largo y el diámetro (L/D) por lo general debe oscilar entre 10 y 30.

Lo anterior permitió tomar como referencia un diámetro de tubería ya definido en el mercado. Por tanto, a partir de los catálogos comerciales de la empresa Arminox se seleccionó un cilindro o tubo en acero inoxidable de diámetro nominal de 1 pulgada (cédula 5, diámetro exterior de 33,4 mm y espesor de 1,7 mm). De esta manera, se garantizó que el diámetro cumpla con  $25\text{ mm} \leq D \leq 150\text{ mm}$ .

Para el cálculo del largo del cilindro se tomó una relación L/D de 20, rango intermedio en relación a la definición dada por Groover (2007), para ello, se empleó la ecuación 4.

$$L_{cil} = 20 * D_i \quad \text{Ec. 4}$$

$$L_{cil} = 20 * 30\text{mm} \rightarrow L_{cil} = 600\text{mm}$$

Donde:

$D_i$ : Diámetro interior del cilindro (mm)

Por otra parte, el cilindro debe tener una garganta de alimentación que se conecta con la tolva (ver numeral 3.3.2.15.), la cual se expresa mediante la ecuación 5 y 6:

$$L_{garg} = 1,5 * D_i \quad \text{Ec. 5}$$

$$L_{garg} = 1,5 * 30mm \rightarrow L_{garg} = 45mm$$

$$D_{garg} = 0,7 * D_i \quad \text{Ec. 6}$$

$$D_{garg} = 0,7 * 30mm \rightarrow D_{garg} = 21mm$$

Donde:

$L_{garg}$ : Longitud de la garganta del cilindro (mm)

$D_{garg}$ : g Diámetro de garganta del cilindro (mm)

En la Tabla 3 se presenta las dimensiones finales del cilindro:

**Tabla 3.** Dimensiones del cilindro

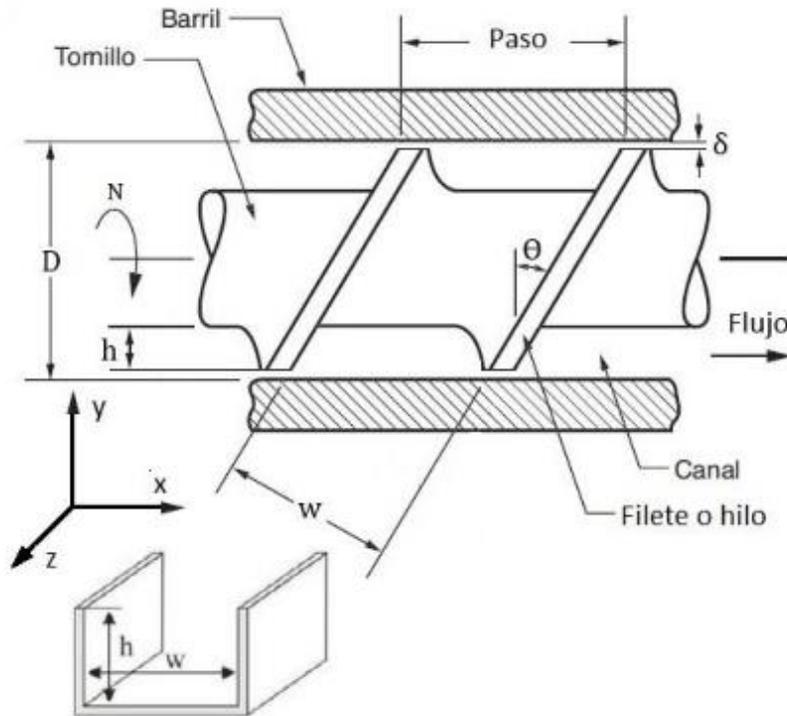
Diámetro exterior	Diámetro interior	Espesor	Longitud	Longitud de la garganta	Diámetro de la garganta
mm	mm	Mm	Mm	mm	mm
33,4	30	1,7	600	45	21

Fuente: Autores

### 3.3.2.2 Dimensionamiento del tornillo de extrusión

El tornillo de extrusión o husillo es el componente principal en la máquina extrusora (ver Figura 18), por tanto, la producción como la aplicación de la extrusora dependen del diámetro del tornillo o husillo, de la longitud del tornillo, de la velocidad de giro, del diseño del canal helicoidal, del perfil de los filetes del cabezal, del número de zonas, de las cabezas perfiladoras, las cuales se especificarán a continuación:

**Figura 18.** Partes del tornillo de extrusión



Fuente: Moya Verdú, G. (2016). *Estudio, diseño, simulación y optimización de una matriz de extrusión de plástico* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Para este diseño, se estimó una holgura entre el tornillo y el cilindro de 1 mm, lo cual evitará la fricción entre estos. Lo anterior permitió calcular el diámetro del tornillo ( $D_{torn}$ ) de 29 mm.

### 3.3.2.3 Longitud del tornillo de extrusión ( $L_{torn}$ )

De igual forma, éste se calculó empleando la relación L/D de 20 y la ecuación 7.

$$L_{torn} = 20 * D_{torn} \quad \text{Ec. 7}$$

$$L_{torn} = 20 * 29mm \rightarrow L_{torn} = 580mm$$

Para calcular la longitud útil del tornillo se especificaron las 3 zonas: zona de alimentación, zona de compresión y zona de dosificación. Para extrusoras universales ya existen intervalos recomendados para cada una de las zonas, por tanto, se emplearán las ecuaciones definidas por Savgorodny (1978, pág. 19).

- La longitud del tornillo en la zona de alimentación ( $L_{ali}$ ) se calculó mediante la ecuación 8:

$$L_{ali} = 8 * D_{torn} \quad \text{Ec. 8}$$

$$L_{ali} = 8 * 29mm \rightarrow L_{ali} = \mathbf{232mm}$$

- La longitud del tornillo en la zona de compresión ( $L_{com}$ ) se calculó mediante la ecuación 9:

$$L_{com} = 7 * D_{torn} \quad \text{Ec. 9}$$

$$L_{com} = 7 * 29mm \rightarrow L_{com} = \mathbf{203mm}$$

- La longitud del tornillo en la zona de dosificación ( $L_{dos}$ ) se calculó mediante la ecuación 10:

$$L_{dos} = 7 * D_{torn} \quad \text{Ec. 10}$$

$$L_{dos} = 5 * 29mm \rightarrow L_{dos} = \mathbf{145mm}$$

#### 3.3.2.4 Paso del tornillo de extrusión ( $t$ )

El paso del tornillo de la extrusora se calculó empleando la ecuación 11.

$$t = 1 * D_{torn} \quad \text{Ec. 11}$$

$$t = 1 * 29mm \rightarrow t = \mathbf{29mm}$$

#### 3.3.2.5 Anchura de la cresta del filete ( $e$ )

La anchura de la cresta se calculó empleando la ecuación 12.

$$e = 0,08 * D_{torn} \quad \text{Ec. 12}$$

$$e = 0,08 * 29mm \rightarrow e = \mathbf{2,32mm}$$

#### 3.3.2.6 Profundidad del canal helicoidal de la zona de alimentación ( $h_1$ )

La profundidad del canal helicoidal de la zona de alimentación se calculó empleando la ecuación 13.

$$h_1 = 0,14 * D_{torn} \quad \text{Ec. 13}$$

$$h_1 = 0,14 * 29mm \rightarrow h_1 = \mathbf{4,06mm}$$

### 3.3.2.7 Profundidad del canal helicoidal de la zona de dosificación ( $h_2$ )

La profundidad del canal helicoidal de la zona de dosificación se calculó empleando la ecuación 14; para efectos de cálculo se consideró un grado de compresión ( $i = 3$ ).

$$h_2 = 0,5 * \left[ D_{torn} - \sqrt{(D_{torn})^2 - \frac{4 * h_1}{i} * (D_{torn} - h_1)} \right] \quad \text{Ec. 14}$$

$$h_2 = 0,5 * \left[ 29mm - \sqrt{(29mm)^2 - \frac{4 * 4,06mm}{3} * (29mm - 4,06mm)} \right] \rightarrow h_2 = 1,21mm$$

### 3.3.2.8 Ángulo de hélice del canal helicoidal ( $\Psi$ )

El ángulo de hélice del canal helicoidal se calculó empleando la ecuación 15.

$$\tan \Psi = \frac{t}{\pi * D_{torn}} \quad \text{Ec. 15}$$

$$\Psi = \tan^{-1} \left( \frac{29 \text{ mm}}{3,1416 * 29mm} \right) \rightarrow \Psi = 17,66^\circ$$

### 3.3.2.9 Número de filetes ( $NF$ )

El número de filetes se calculó empleando la ecuación 16.

$$NF = L_{torn} / D_{torn} \quad \text{Ec. 16}$$

$$NF = 580 \text{ mm} / 29 \text{ mm} \rightarrow NF = 20$$

En la Tabla 4 se presenta las dimensiones finales del tornillo.

**Tabla 4.** Dimensiones del tornillo de extrusión

Descripción	Valor
Diámetro del tornillo	29 mm
Longitud del tornillo	580 mm
Longitud del tornillo en la zona de alimentación	232 mm
Longitud del tornillo en la zona de compresión	203 mm
Longitud del tornillo en la zona de dosificación	145 mm
Paso del tornillo	29 mm
Anchura de la cresta del filete	2,32 mm

Descripción	Valor
Profundidad canal helicoidal zona alimentación	4,06 mm
Profundidad canal helicoidal zona dosificación	1,21 mm
Ángulo de hélice	17,66°
Holgura	1 mm
Número de filetes	20

Fuente: Autores

### 3.3.2.10 Determinación de la producción del tornillo de extrusión ( $Q$ )

La producción expresada como flujo volumétrico, es el resultado de tres diferentes flujos a lo largo del cilindro. El primero hace referencia al flujo directo o también llamado forzado ( $\alpha$ ), constituye un movimiento de arrastre, originado por el desplazamiento relativo del tornillo respecto al cilindro. El material acumulado en el espacio anular formado por el núcleo del tornillo y la superficie interior del cilindro, es sometido a deformaciones de cizallamiento que las paredes del canal helicoidal transforman en movimiento de avance. El segundo, el flujo inverso o de presión ( $\beta$ ), es el componente que se opone al flujo en el sistema. Por último, el flujo de fugas ( $\gamma$ ), el cual reduce la producción debido a pérdidas de material entre la holgura del tornillo y el cilindro. Por tanto, la ecuación 17 representa el flujo volumétrico del tornillo (Savgorodny, 1978, pág. 13).

$$Q = \left( \frac{\alpha K}{K + \beta + \gamma} \right) n \quad \text{Ec. 17}$$

Donde:

$\alpha$ : constante del flujo directo

$\beta$ : constante del flujo inverso

$\gamma$ : constante del flujo de fugas

$K$ : constante total de la forma geométrica de la cabeza perfiladora

$n$ : número de revoluciones del tornillo por unidad de tiempo (r.p.m.)

Cada una de las constantes están definidas por su propia ecuación.

- La constante del flujo directo ( $\alpha$ ) se calculó mediante la ecuación 18 (Savgorodny, 1978, pág. 7).

$$\alpha = \frac{\pi * m * D_{torn} * h_1 * \left(\frac{t}{m} - e\right) * \cos^2 \Psi}{2} \quad \text{Ec. 18}$$

$$\alpha = \frac{3,1416 * 1 * 29 * 4,06 * \left(\frac{29}{1} - 2,32\right) * \cos^2(17,66)}{2} \rightarrow \alpha = 683,10 \text{ mm}^3$$

Donde:

$m$ : número de canales (1 canal)

$D_{torn}$ : diámetro del tornillo (mm)

$h_1$ : profundidad del canal helicoidal de la zona de alimentación (mm)

$t$ : paso del tornillo (mm)

$e$ : anchura de la cresta del filete (mm)

$\Psi$ : ángulo de hélice del canal helicoidal

- La constante del flujo inverso ( $\beta$ ) se calculó mediante la ecuación 19 (Savgorodny, 1978, pág. 7).

$$\beta = \frac{m * h_1^3 * \left(\frac{t}{m} - e\right) * \sin \Psi * \cos \Psi}{12 * L_{torn}} \quad \text{Ec. 19}$$

$$\beta = \frac{1 * (4,06)^3 * \left(\frac{29}{1} - 2,32\right) * \sin(17,66) * \cos(17,66)}{12 * 580} \rightarrow \beta = 0,0886 \text{ mm}^3$$

Donde:

$L_{torn}$ : longitud del tornillo (mm)

- La constante del flujo de fugas ( $\gamma$ ) se calculó mediante la ecuación 20 (Savgorodny, 1978, pág. 13).

$$\gamma = \frac{\pi^2 * D_{torn}^2 * \delta^3 * \tan \Psi}{12 * e * L_{torn}} \quad \text{Ec. 20}$$

$$\gamma = \frac{3,1416^2 * 29^2 * 1^3 * \tan(17,66)}{12 * 2,32 * 580} \rightarrow \gamma = 1,2823 \text{ mm}^3$$

Donde:

$\delta$ : holgura del filete (mm)

- Coeficiente total de la forma geométrica de la cabeza perfiladora ( $K$ ) (Savgorodny, 1978, pág. 9-10).

El cabezal se divide convencionalmente en sucesivas zonas de diferentes configuraciones, estableciendo para cada zona una constante  $K$ . Por tanto, las geometrías que representaron el diseño del cabezal de este trabajo iniciaron con una geometría cónica a la entrada del cabezal y posteriormente una geometría cilíndrica en la boquilla hasta dar la forma del filamento deseado (diámetro de filamento de 1,75 mm).

a) Para un canal cónico ( $K_1$ ) se empleó la ecuación 21:

$$K_1 = \frac{3 * \pi * d_0^3 * d_1^3}{18 * L_{can} * (d_0^2 + d_0 * d_1 + d_1^2)} \quad \text{Ec. 21}$$

$$K_1 = \frac{3 * 3,1416 * 30^3 * 1,75^3}{18 * 15 * (30^2 + 30 * 1,75 + 1,75^2)} \rightarrow K_1 = 5,2860 \text{ mm}^3$$

Donde:

$d_0$ : diámetro de entrada del material en el canal cónico (es el mismo diámetro interior del cilindro  $D_i = 30 \text{ mm}$ ).

$d_1$ : diámetro de salida del material en el canal cónico (filamento de salida de 1,75 mm).

$L_{can}$ : longitud del canal cónico (se sugiere 15 mm).

b) Para un canal cilíndrico ( $K_2$ ) se empleó la ecuación 22:

$$K_2 = \frac{\pi * d_{cilin}^4}{128 * L_{can}} \quad \text{Ec. 22}$$

$$K_2 = \frac{3,1416 * 1,75^4}{128 * 30} \rightarrow K_2 = 0,0076 \text{ mm}^3$$

Donde:

$d_{cilin}$ : diámetro del canal cilíndrico (filamento de salida de 1,75 mm).

$L_{can}$ : longitud del canal cilíndrico (se sugiere 30 mm, el doble de la longitud del canal cónico para garantizar una leve disminución de la temperatura a la salida de la boquilla).

c) Para una malla filtrante (placa rompedora) ( $K_3$ ) se empleó la ecuación 23:

Se utilizó una placa rompedora para el diseño de la extrusora con el propósito de mejorar el mezclado y la homogenización del mismo. Por tanto, se calculó el diámetro del orificio ( $d_{orif}$ ) en la placa rompedora (ver ecuación 23), la distancia entre los centros horizontales entre orificios (ver ecuación 24) y la distancia entre los centros verticales entre orificios (ver ecuación 25).

- Diámetro del orificio en la placa rompedora ( $d_{orif}$ )

$$d_{orif} = \frac{3}{16} * D_{torn} \quad \text{Ec. 23}$$

$$d_{orif} = \frac{3}{16} * 29\text{mm} \rightarrow d_{orif} = 5,437 \text{ mm}$$

- Distancia entre los centros horizontales entre orificios ( $L_{horiz}$ )

$$L_{horiz} = 0,227 * D_{torn} \quad \text{Ec. 24}$$

$$L_{horiz} = 0,227 * 29mm \rightarrow L_{horiz} = \mathbf{6,583 mm}$$

- Distancia entre los centros verticales entre orificios ( $L_{vert}$ )

$$L_{vert} = 0,19 * D_{torn} \quad \text{Ec. 25}$$

$$L_{vert} = 0,19 * 29mm \rightarrow L_{vert} = \mathbf{5,51 mm}$$

Por consiguiente, se calculó la constante para la placa rompedora mediante la ecuación 26:

$$K_3 = \frac{\pi * n_{orif} * d_{orif}^4}{128 * b_{placa}} \quad \text{Ec. 26}$$

$$K_3 = \frac{\pi * 10 * 5,437^4}{128 * 10} \rightarrow K_3 = \mathbf{21,44 mm^3}$$

Donde:

$n_{orif}$ : número de orificios en la placa (se realizó el diseño con 10 orificios)

$d_{orif}$ : diámetro del orificio en la placa (mm)

$b_{placa}$ : espesor de la placa (se realizó el diseño con un grosor de 10 mm)

El coeficiente total de la forma geométrica de la cabeza perfiladora ( $K$ ) se puede determinar como la suma de las resistencias experimentadas en las diferentes zonas mediante el uso de la ecuación 27:

$$K = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_1} + \sum \frac{1}{K_2} + \sum \frac{1}{K_3}} \quad \text{Ec. 27}$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{5,2860} + \frac{1}{0,0076} + \frac{1}{21,44}} \rightarrow K = \mathbf{0,00758 mm^3}$$

Con los resultados anteriores se calculó el flujo volumétrico del tornillo a diferentes revoluciones por unidad de tiempo (ver Tabla 5). Para obtener el flujo en ( $kg/h$ ), se tuvo en cuenta la densidad del Tereftalato de Polietileno ( $1380 kg/m^3$ ) o  $1,380 g/cm^3$ .

**Tabla 5.** Flujo volumétrico del Tereftalato de Polietileno

$n$ (r. p. m.)	$Q$ ( $mm^3/min$ )	$Q$ ( $g/min$ )	$Q$ ( $kg/h$ )
5	18,7812	0,02591804	0,09330493
10	37,5624	0,05183607	0,18660987
15	56,3436	0,07775411	0,27991480
20	75,1247	0,10367215	0,37321974
25	93,9059	0,12959019	0,46652467
30	112,6871	0,15550822	0,55982961
35	131,4683	0,18142626	0,65313454
40	150,2495	0,20734430	0,74643948
45	169,0307	0,23326234	0,83974441
50	187,8119	0,25918037	0,93304935
55	206,5931	0,28509841	1,02635428
60	225,3742	0,31101645	1,11965922
65	244,1554	0,33693449	1,21296415
70	262,9366	0,36285252	1,30626909
75	281,7178	0,38877056	1,39957402
80	300,4990	0,41468860	1,49287895
85	319,2802	0,44060664	1,58618389
90	338,0614	0,46652467	1,67948882
95	356,8425	0,49244271	1,77279376
100	375,6237	0,51836075	1,86609869

Fuente: Autores

A mayor r.p.m. mayor es la producción de Tereftalato de Polietileno; sin embargo, se estimó para el desarrollo de este proyecto la producción óptima del tornillo de 100 r.p.m. ya que con ello se produce 0,5183 g/min, equivalente también a 1,86 kg/h.

A continuación se presenta un resumen de las dimensiones finales del canal cónico, canal cilíndrico y placa rompedora:

**Tabla 6.** Dimensiones canal cónico, canal cilíndrico y placa rompedora

Descripción	Valor
Producción del tornillo de extrusión	0,518360 g/min
r.p.m.	100
<b>Canal cónico</b>	
Diámetro de entrada en el canal cónico	30 mm
Diámetro de salida en el canal cónico (filamento de salida)	1,75 mm
Longitud del canal cónico	15 mm
<b>Canal cilíndrico</b>	
Diámetro del canal cilíndrico	1,75 mm
Longitud del canal cilíndrico	30 mm
<b>Placa rompedora</b>	
Diámetro del orificio en la placa rompedora	5,437 mm
Distancia entre los centros horizontales entre orificios	6,583 mm
Distancia entre los centros verticales entre orificios	5,51 mm
Número de orificios en la placa	10
Espesor de la placa	10 mm

Fuente: Autores

### 3.3.2.11 Potencia requerida para accionar el tornillo ( $N$ )

La ecuación 28 define la potencia necesaria para girar el tornillo a la velocidad requerida para producir el material extruido de Tereftalato de Polietileno (Savgorodny, 1978, pág. 17).

$$N = \frac{\pi * n * D_{torn}^3}{k^2} \quad \text{Ec. 28}$$

$$N = \frac{3,1416 * 100 * 29^3}{66,7^2} \rightarrow N = 1722,23 \text{ W o } 2,31 \text{ Hp}$$

Donde:

$k$ : factor de proporcionalidad (66,7)

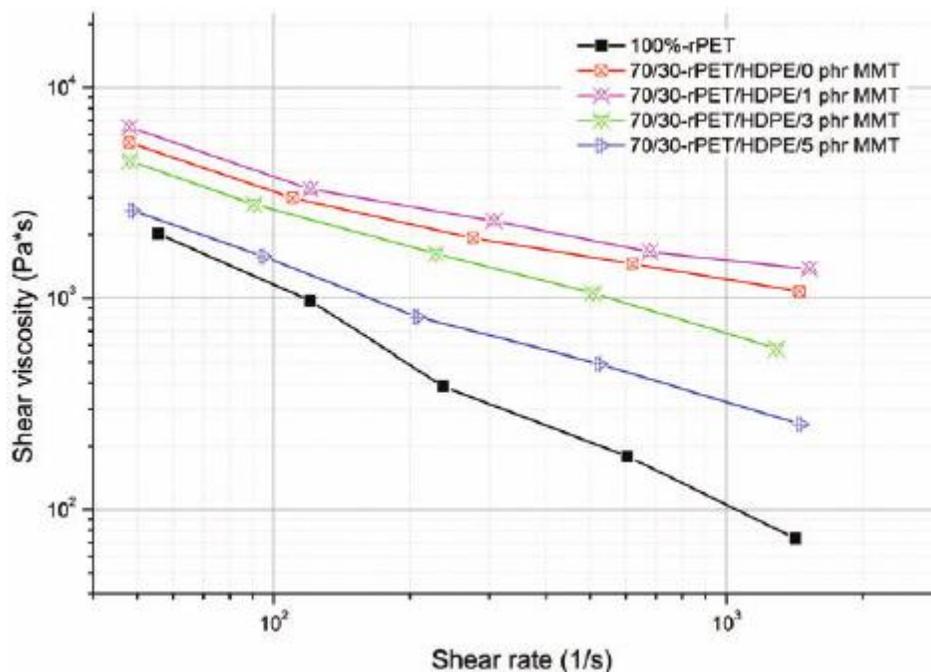
Los cálculos reflejan que se requiere un motor de 2,5 Hp para hacer girar el tornillo en el sistema.

### 3.3.2.12 Viscosidad efectiva ( $\mu$ )

La viscosidad efectiva se calcula en función de la velocidad de corte mediante el uso de diagramas según el material empleado. Para efectos de cálculo, se consideró que la velocidad de corte para realizar el proceso de extrusión es  $10^2 \text{ s}^{-1}$ .

Para el caso del Tereftalato de Polietileno (PET), la temperatura de trabajo oscila en el intervalo de  $256 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $271 \text{ }^\circ\text{C}$  (Ver Tabla 2), por lo que la viscosidad efectiva se evaluará a la temperatura de trabajo promedio de  $260 \text{ }^\circ\text{C}$ . Mediante el uso de la Figura 19 se determinó que la viscosidad efectiva para el PET es de  $500 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

Figura 19. Viscosidad efectiva Vs. Velocidad de cortadura



Fuente: Rosnan, R.M. & Bin Arsad, A. (2013). Effect of MMT concentrations as reinforcement on the properties of recycled PET/HDPE nanocomposites. *Journal of Polymer Engineering*, 33(7), pp. 1-9.

### 3.3.2.13 Presión en la extrusora

La presión en la máquina extrusora se genera a medida que el material avanza a través del tornillo, donde la presión generada en la parte delantera del tornillo,

cumple un papel importante en el proceso y acabado del material, el cual debe ser considerada para el diseño de la máquina (Parra, 2017).

### 3.3.2.13.1 Presión máxima en el tornillo ( $P_{max}$ )

La presión máxima en el tornillo se genera cuando no existe movimiento de caudal en el interior del cilindro, por lo cual la masa esta estática y no existe flujo de arrastre. Por tanto, la presión máxima en el tornillo ( $P_{max}$ ) se calculó mediante la ecuación 29:

$$P_{max} = \frac{6 * \pi * D_{torn} * L_{torn} * n * \mu}{h_2^2 * \tan \Psi} \quad \text{Ec. 29}$$

$$P_{max} = \frac{6 * 3,1416 * 0,029 * 0,58 * 1,66 * 500}{0,00121^2 * \tan 17,66} \rightarrow P_{max} = 72 \text{ MPa}$$

Donde:

$D_{torn}$ : diámetro del tornillo (m)

$L_{torn}$ : longitud del tornillo (m)

$n$ : número de revoluciones del tornillo por unidad de tiempo (rev/s)

$\mu$ : viscosidad efectiva (Pa.s)

$h_2$ : profundidad del canal helicoidal de la zona de dosificación (m)

$\Psi$ : ángulo de hélice del canal helicoidal

### 3.3.2.13.2 Presión de operación ( $P_{oper}$ )

La presión de operación se define como la presión a la que opera la maquina extrusora, se centra principalmente en la parte de la boquilla de extrusión y se determinó mediante la ecuación 30:

$$P_{oper} = \frac{2 * \pi * \mu * D_{torn}^2 * n * h_2 * \sin \Psi * \cos \Psi}{\left(\frac{R_{cilin}^4}{2 * L_{can}}\right) + \left(\frac{D_{torn} * h_2^3 * \sin^2 \Psi}{2 * L_{torn}}\right)} \quad \text{Ec. 30}$$

$$P_{oper} = \frac{2 * 3,1416 * 500 * 0,029^2 * 1,66 * 0,00121 * \sin 17,66 * \cos 17,66}{\left(\frac{0,000875^4}{2 * 0,03}\right) + \left(\frac{0,029 * 0,00121^3 * \sin^2 17,66}{2 * 0,58}\right)} \rightarrow P_{oper}$$

$$= 38 \text{ MPa}$$

Donde:

$R_{cilin}$ : radio del canal cilíndrico o boquilla de salida (m), donde el diámetro de salida es 1,75 mm.

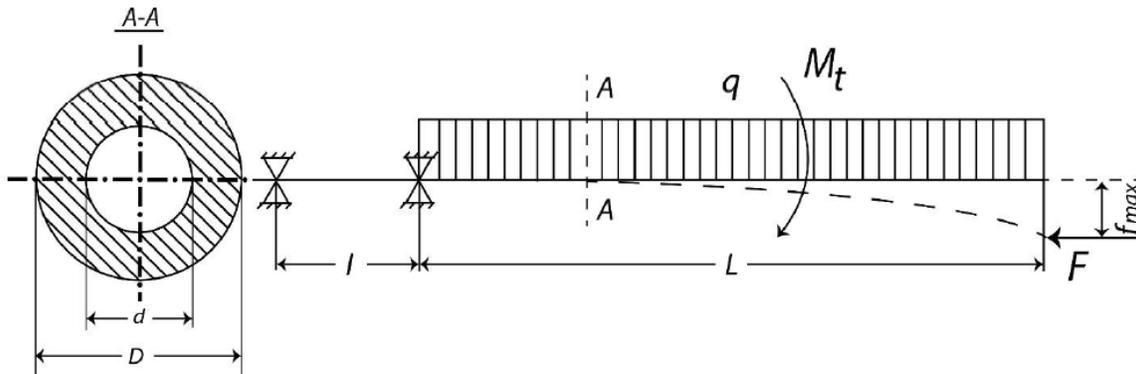
$L_{can}$ : longitud del canal cilíndrico o boquilla de salida (m)

### 3.3.2.14 Fuerza en el tornillo

Una vez definidas previamente las dimensiones del tornillo, se hace necesario corroborar y determinar la flecha máxima admisible.

En la Figura 20 se puede observar las fuerzas que actúan sobre el tornillo, fuerza axial  $P$ , momento de giro  $M_g$  y la carga uniformemente repartida  $q$  originada por el propio peso del tornillo (Savgorodny, 1978, pág. 24 - 25).

Figura 20. Diagrama de fuerzas de un tornillo



Fuente: Savgorodny, V. K. (1978). *Transformación de plásticos*. Barcelona, España: Editorial Gustavo Gili.

Para determinar el momento de giro ( $M_g$ ) se empleó la ecuación 31:

$$M_g = \frac{9550 * N}{n} \quad \text{Ec. 31}$$

$$M_g = \frac{9550 * 1,722}{100} \rightarrow M_g = \mathbf{164,4 Nm}$$

Donde:

$N$ : Potencia requerida para accionar el tornillo (Kw)

$n$ : número de revoluciones del tornillo por unidad de tiempo (rpm)

A continuación se calculó la relación entre los diámetros del tornillo ( $u$ ) mediante la ecuación 32:

$$u = \frac{d}{D} \quad \text{Ec. 32}$$

$$u = \frac{17,4}{29} \rightarrow u = \mathbf{0,6}$$

Donde:

$d$ : Diámetro de la zona de alimentación (mm), calculado mediante la siguiente expresión ( $0,6 * D_{torn} = 17,4mm$ )

$D$ : Diámetro de la zona de dosificación (mm) que es el mismo diámetro del tornillo  
 $D_{torn} = 29mm$

Para calcular el momento de inercia ( $J$ ) de la sección transversal A - A se empleó la ecuación 33:

$$J = \frac{\pi D^4}{64} * (1 - u^4) \quad \text{Ec. 33}$$

$$J = \frac{3,1416 * (0,029)^4}{64} * (1 - 0,6^4) \rightarrow J = \mathbf{3,021E - 8 m^4}$$

Donde:

$D$ : Diámetro de la zona de dosificación (m) o diámetro del tornillo  $D_{torn} = 29mm$  o  $0,029 m$ .

Para calcular la superficie transversal ( $F$ ) del tronillo seccionado por A - A se utilizó la ecuación 34:

$$F = \frac{\pi D^2}{4} * (1 - u^2) \quad \text{Ec. 34}$$

$$F = \frac{3,1416 * (0,029)^2}{4} * (1 - 0,6^2) \rightarrow F = 4,227E - 4 m^2$$

Otro calculo que se debe tener en cuenta es el radio de inercia de la sección ( $Ri$ ), el cual se calculó mediante la ecuación 35:

$$Ri = \sqrt{\frac{J}{F}} \quad \text{Ec. 35}$$

$$Ri = \sqrt{\frac{3,021E - 8}{4,227E - 4}} \rightarrow Ri = 8,454E - 3 m$$

Para calcular las fuerzas que actúan sobre el tornillo, se debe comprobar la esbeltez de éste mediante el uso de la ecuación 36:

$$\lambda = \frac{\alpha * L}{Ri} \quad \text{Ec. 36}$$

$$\lambda = \frac{2 * 0,58}{8,454E - 3} \rightarrow \lambda = 137,19$$

Donde:

$\alpha$ : Coeficiente que por literatura es igual a 2.

$L$ : Longitud del tornillo (m) previamente definido como  $L_{torn} = 0,58m$ .

Luego, se calcula la fuerza axial ( $P$ ) que se ejerce sobre el tornillo, para ello, hay que tener en cuenta la superficie de la sección transversal del tornillo ( $F$ ) y la presión del material en la parte delantera ( $p$ ), la cual será la presión máxima de trabajo en el tornillo, de acuerdo a la ecuación 37:

$$P = F * p \quad \text{Ec. 37}$$

$$P = 4,227E - 4 * 72 \rightarrow P = 30,436 \text{ kN}$$

Donde

$F$ : Superficie transversal del tronillo seccionado por A - A ( $m^2$ )

$p$ : Presión del material en la parte delantera del tornillo ( $N/m^2$ ), o  $P_{max} = 72 \text{ MPa}$

Otro calculo que se debe tener en cuenta es la tensión tangencial máxima sobre la superficie del tornillo ( $\tau$ ), la cual está definida por la ecuación 38:

$$\tau = \frac{M_g}{W_p} \quad \text{Ec. 38}$$

Donde:

$M_g$ : Momento de giro (Nm)

$W_p$ : Momento polar de resistencia ( $m^3$ )

La ecuación 39 define el momento polar de resistencia.

$$W_p = \frac{\pi D^3}{16 * (1 - u^4)} \quad \text{Ec. 39}$$

$$W_p = \frac{3,1416 * (0,029)^3}{16 * (1 - 0,6^4)} \rightarrow W_p = 5,501E - 6 \text{ m}^3$$

Reemplazando en la ecuación 38, se obtuvo que la tensión tangencial máxima sobre la superficie del tornillo fue de:

$$\tau = \frac{164,4}{5,501E - 6} \rightarrow \tau = 29,88 \text{ MPa}$$

Por otra parte, las tensiones normales son provocadas por la fuerza axial ( $P$ ) y la carga repartida debido al peso del tornillo, las cuales se expresan mediante la ecuación 40:

$$\sigma = \frac{P}{F} + \frac{M_f}{W_o} \quad \text{Ec. 40}$$

Donde:

$P$ : Fuerza axial (N)

$F$ : superficie de la sección transversal del tornillo ( $m^2$ )

$M_f$ : Momento de flexión máximo (Nm)

$W_o$ : Momento de inercia respecto al eje neutro ( $m^3$ )

La ecuación 41 define el momento de flexión máximo.

$$M_f = \frac{\rho * g * L^2}{2} * \frac{\pi D^2}{4} * (1 - u^3) \quad \text{Ec. 41}$$

$$M_f = \frac{7850 * 9,81 * (0,58)^2}{2} * \frac{3,1416 * (0,029^2)}{4} * (1 - 0,6^3) \rightarrow M_f = 6,707 Nm$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del material del tornillo (acero 7850  $kg/m^3$ )

$g$ : Gravedad ( $m/s^2$ )

$L$ : Longitud del tornillo (m) previamente definido como  $L_{torn} = 0,58m$ .

$D$ : Diámetro de la zona de dosificación (m) o diámetro del tornillo  $D_{torn} = 29mm$  o  $0,029 m$ .

$u$ : relación entre los diámetros del tornillo

La ecuación 42 define el momento de inercia respecto al eje neutro.

$$W_o = \frac{\pi D^3}{32} * (1 - u^4) \quad \text{Ec. 42}$$

$$W_o = \frac{3,1416 * (0,029^3)}{32} * (1 - 0,6^4) \rightarrow W_o = 2,084E - 6 \text{ m}^3$$

Reemplazando en la ecuación 40, se obtuvo el valor de tensión:

$$\sigma = \frac{30436}{4,227E - 4} + \frac{6,707}{2,084E - 6} \rightarrow \sigma = 75,22 \text{ MPa}$$

Aplicando esfuerzos equivalentes para una combinación de cargas, entre un esfuerzo tangencial y tensor, se busca obtener una tensión resultante ( $\sigma_r$ ) mediante el empleo de la ecuación 43:

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \quad \text{Ec. 43}$$

$$\sigma_r = \sqrt{(75,22)^2 + 4 * (29,88)^2} \rightarrow \sigma_r = 96,06 \text{ MPa}$$

Donde:

$\sigma$ : Tensión máxima (MPa)

$\tau$ : Tensión tangencial (MPa)

El resultado previamente obtenido deber ser comparado con la tensión admisible del material seleccionado para fabricar el tornillo, a fin de asegurar que el tornillo será capaz de soportar la tensión máxima de 96,06 MPa. En el apartado 3.4., se describirá las propiedades del acero inoxidable AISI 4140, material seleccionado para el diseño del tornillo y de las piezas de la planta piloto. La ficha técnica del acero inoxidable AISI 4140 describe que el valor de tensión admisible de este material es 414 MPa (Material mundial, 2019). Por lo anterior, es evidente que el tornillo soportará la tensión de 96,06 MPa ya que la tensión admisible del material es 5 veces mayor.

$$\sigma_r < \sigma_{AISI\ 4140} \rightarrow \sigma_r = \mathbf{96,06\ MPa} < \sigma_{AISI\ 4140} = \mathbf{414\ MPa}$$

Finalmente, se calcula la flecha máxima del tornillo ( $f_{max}$ ) una vez se aplica la carga repartida; para ello se empleó la ecuación 44:

$$f_{max} = \frac{qL^4}{8EJ} \quad \text{Ec. 44}$$

Donde:

$q$ : Peso lineal del tornillo (N/m)

$L$ : Longitud del tornillo (m) previamente definido como  $L_{torn} = 0,58\text{m}$ .

$E$ : Módulo de elasticidad del tornillo (Pa);  $E = 2,1E + 11\ N/m^2$

$J$ : Momento de inercia de la sección transversal ( $\text{m}^4$ )

Para calcular el peso lineal del tornillo ( $q$ ) se empleó la ecuación 45:

$$q = \rho g F \quad \text{Ec. 45}$$

$$q = 7850 * 9,81 * 4,227E - 4 \rightarrow \mathbf{q = 32,55\ N/m}$$

Donde:

$\rho$ : Densidad del material del tornillo (acero 7850  $\text{kg/m}^3$ )

$g$ : Gravedad ( $\text{m/s}^2$ )

$F$ : Sección transversal del tornillo seccionado por A - A ( $\text{m}^2$ );  $F = 4,227E - 4\ \text{m}^2$

Reemplazando en la ecuación 44, se obtiene el valor de la flecha máxima del tornillo:

$$f_{max} = \frac{32,55 * (0,58)^4}{8 * 2,1E + 11 * 3,021E - 8} \rightarrow \mathbf{f_{max} = 7,25E - 5\ m\ o\ 0,0725\ mm}$$

$$\mathbf{f_{max} = 0,0725\ mm}$$

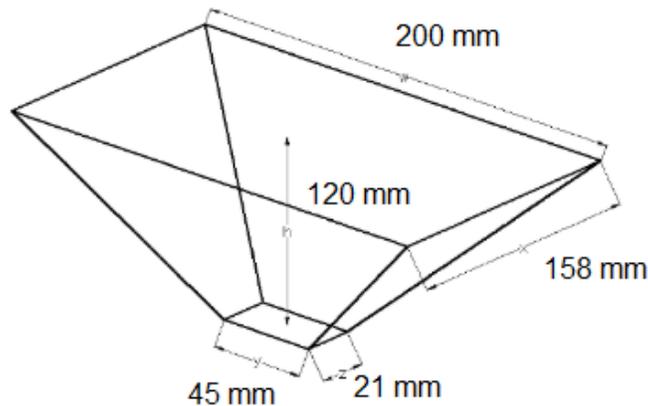
El resultado previamente obtenido del valor de la flecha máxima del tornillo es suficientemente menor que la holgura del filete entre el tornillo y el cilindro, lo que permitirá garantizar que no exista interferencia entre estos.

$$f_{max} < \delta \rightarrow f_{max} = 0,0725 \text{ mm} < \delta = 1 \text{ mm}$$

### 3.3.2.15 Dimensiones de la tolva de la extrusora

Se diseña una tolva con forma de tronco piramidal, que se adapta a la garganta de alimentación del cilindro – tornillo de extrusión; por tanto, su base es de 45 mm X 21 mm y una altura de 120 mm (ver Figura 21). Lo anterior permite el cálculo del volumen ( $V$ ) de la tolva mediante el uso de la ecuación 46.

**Figura 21.** Dimensiones de la tolva de alimentación de la extrusora



Fuente: Autores

$$V = \frac{h}{3} * (A_1 + A_2 + \sqrt{(A_1 * A_2)}) \quad \text{Ec. 46}$$

$$V = \frac{120}{3} * (31.600 \text{ mm} + 945 \text{ mm} + \sqrt{(31.600 \text{ mm} * 945 \text{ mm})}) \rightarrow V$$

$$= 1.520,38 \text{ cm}^3$$

Donde:

$A_1$ : Área de la parte superior de la tolva

$A_2$ : Área de la parte inferior de la tolva

$h$ : Altura de la tolva

### 3.3.2.16 Sistema de calefacción

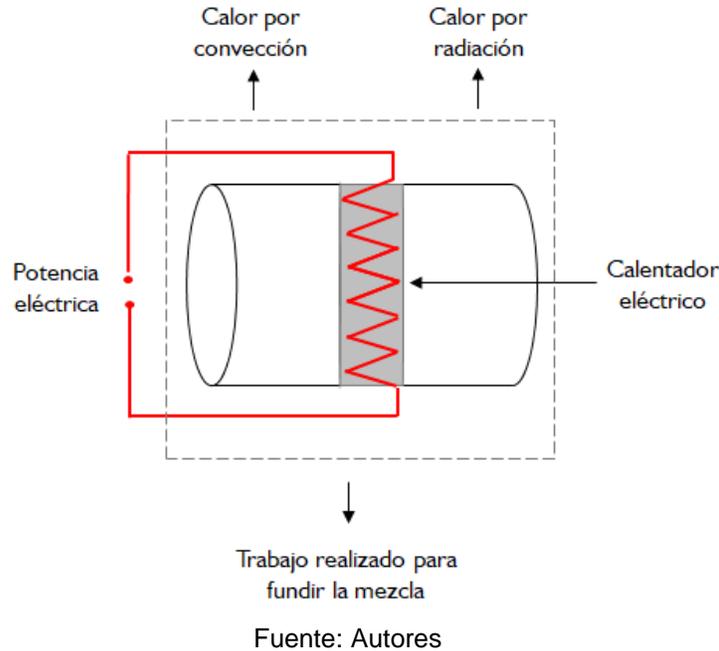
El sistema de calefacción que se utilizará para la extrusora es un calefactor eléctrico tipo banda, ya que éste se caracteriza por soportar altas temperaturas. Se usa principalmente en la industria del plástico (inyectoras, extrusoras, sopladoras) o para cualquier uso de calefacción de tubos.

Para el dimensionamiento de la resistencia eléctrica de banda se requiere el conocimiento de los datos técnicos esenciales como diámetro interno, potencia y alimentación de tensión. Por lo anterior, es necesario realizar cálculos de transferencia de calor para simular el problema.

La

Figura 22 representa el modelo simplificado del calentador eléctrico a desarrollar; la potencia eléctrica que debe entregar el calentador debe ser igual a la potencia requerida para fundir la mezcla más las pérdidas que existen en el ambiente. Para ello, se estableció que el flujo de calor es unidimensional, régimen estacionario y sin aislamiento.

**Figura 22.** Modelo simplificado del cilindro junto con el calentador eléctrico tipo banda.



Para encontrar la potencia que debe entregar la banda se utiliza la ecuación 47:

$$q_{eléctrica} = q_{trabajo} + q_{pérdidas} \quad \text{Ec. 47}$$

Donde:

$q_{eléctrica}$ : Potencia que entrega el calentador eléctrico (W)

$q_{trabajo}$ : Potencia necesaria para llevar a cabo la mezcla del PET a las condiciones de trabajo (W)

$q_{pérdidas}$ : Potencia de pérdidas que existen en el ambiente (calor por convección y por radiación) (W)

Para calcular la potencia de trabajo se empleó la ecuación 48.

$$q_{trabajo} = \dot{m} * C_p * (T_{trabajo} - T_{ambiente}) \quad \text{Ec. 48}$$

Donde:

$\dot{m}$ : Flujo másico del material. En el numeral 3.3.2.10., se estimó matemáticamente la producción de Tereftalato de Polietileno de 0,5183 g/min o 8,6383 E-6 Kg/s a 100 r.p.m.

$C_p$ : Calor específico del material. En el numeral 3.1., se especificó que el calor específico del PET es 1000 J/Kg °C.

$T_{trabajo}$ : Temperatura de trabajo para fundir el PET (°C). Igualmente, en el numeral 3.1. se especificó que la temperatura de trabajo para realizar la extrusión del PET debe ser 260 °C.

$T_{ambiente}$ : Temperatura ambiente (°C); para ello se tomará como referencia una temperatura de 25 °C.

Reemplazando los valores en la ecuación 48 se obtiene que la potencia de trabajo es:

$$q_{trabajo} = 8,6383 E - 6 \frac{Kg}{s} * 1000 \frac{J}{Kg \text{ } ^\circ C} * (260 \text{ } ^\circ C - 25 \text{ } ^\circ C) \rightarrow q_{trabajo} = 2,030 W$$

Para calcular la potencia de pérdidas que existen en el ambiente por convección y radiación se emplearon las ecuaciones 49 y 50.

$$q_{Convección} = h * A * (T_{Super} - T_{\infty}) \quad \text{Ec. 49}$$

Donde:

$h$ : Coeficiente de convección (W/m<sup>2</sup>K); se estimó un valor del aire de 16,01 W/m<sup>2</sup>K

$A$ : Área superficial en contacto con la mezcla de trabajo (m<sup>2</sup>). Para calcular el área superficial se resalta que el diámetro externo del cilindro es 33,4 mm y la longitud del cilindro de 600 mm, de manera que  $A = \pi DL = 3,1416 * 33,4 * 600 = 0,0629 m^2$ .

$T_{Super}$ : Temperatura de la superficie (K); la temperatura de trabajo para realizar la extrusión del PET alcanza hasta 260 °C o 533 K.

$T_{\infty}$ : Temperatura lejos de la superficie (K); se tomará como referencia una temperatura ambiente de 25 °C o 298 K.

Reemplazando los valores en la ecuación 49 se obtiene que la potencia de pérdida por convección:

$$q_{Convección} = 16,01 \frac{W}{m^2K} * 0,0629m^2 * (533 K - 298 K) \rightarrow q_{Convección} = \mathbf{236,868 W}$$

La ecuación 50 expresa las pérdidas por radiación:

$$q_{Radiación} = e * \sigma * A * (T_{Super}^4 - T_{\infty}^4) \quad \text{Ec. 50}$$

Donde:

$e$ : Emisividad del material; para el acero inoxidable AISI 4140  $e = 0,52$

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann ( $W/m^2K^4$ );  $\sigma = 5,67E - 8 \frac{W}{m^2K^4}$

$A$ : Área superficial expuesta a la radiación ( $m^2$ );  $A = \pi DL = 3,1416 * 33,4 * 600 = 0,0629 m^2$ .

$T_{Super}$ : Temperatura absoluta de la superficie (K); la temperatura de trabajo para realizar la extrusión del PET alcanza hasta 260 °C o 533 K.

$T_{\infty}$ : Temperatura absoluta lejos de la superficie (K); se tomará como referencia una temperatura ambiente de 25 °C o 298 K.

Reemplazando los valores en la ecuación 50 se obtiene que la potencia de pérdida por radiación:

$$q_{Radiación} = 0,52 * 5,67E - 8 \frac{W}{m^2K^4} * 0,0629m^2 * (533^4 K^4 - 298^4 K^4) \rightarrow q_{Radiación} = \mathbf{135,048 W}$$

Finalmente, reemplazando en la ecuación 47 se obtiene la potencia total requerida que debe entregar la banda.

$$q_{el\acute{e}ctrica} = 2,030 W + 236,868 W + 135,048 W$$

$$\rightarrow q_{el\acute{e}ctrica} = 373,946 W$$

### **3.4. SELECCIÓN DE MATERIALES**

#### **3.4.1. Tolva de alimentación de la trituradora**

La tolva es el componente de la máquina trituradora que permite la alimentación de las botellas de volumen de 500 mL, fabricadas con Tereftalato de Polietileno (PET). Por tanto, el material que se seleccionó para su construcción fue lámina Cold rolled, esta es una lámina de acero laminada en frío de banda en caliente mediante reducción mecánica de espesor (estiramiento) y aplicando tratamientos térmicos para obtener características finales, que van desde espesores de 0,46 mm hasta 2,50 mm. Se utiliza para la fabricación de techos, perfiles soldados, piezas automotrices, tubos soldados, electrodomésticos, carpintería metálica, en la construcción, etc. Para este diseño se puede utilizar una lámina de acero Cold rolled calibre 18 o espesor de 1,20 mm.

#### **3.4.2. Motor de la trituradora**

En el numeral 3.3.1.3. se describió mediante el uso de ecuaciones matemáticas, la potencia necesaria para hacer girar las cuchillas en la trituradora; los cálculos reflejaron que se requiere un motor de 0,75 Hp. En aplicaciones industriales, los motores trifásicos son los más comunes, debido a su mayor eficiencia con respecto a los motores monofásicos. Por lo anterior, se seleccionó un motor trifásico marca Siemens (ver Figura 23).

**Figura 23.** Motor para girar las cuchillas en la trituradora



Fuente: Sea Ingeniería (2019). *Motores eléctricos*. Recuperado de <https://seaing.cl/motores-electricos/26-motor-siemens-1le0-t-075-hp-4-p.html>

En la Tabla 7 se presenta las características del motor seleccionado para el diseño.

**Tabla 7.** Características del motor trifásico marca Siemens

Parámetro	Valor
Motor:	Trifásico
Potencia:	0,75 Hp o 0,55 KW
Corriente:	Trifásica (380 V)
Velocidad:	1.500 r.p.m./4 polos
Diámetro eje:	19 mm
Protección:	IP 55
Temperatura de trabajo:	Clase F – 155°C

Fuente: Sea Ingeniería (2019). *Motores eléctricos*. Recuperado de <https://seaing.cl/motores-electricos/26-motor-siemens-1le0-t-075-hp-4-p.html>

### **3.4.3. Cuchillas móviles y fijas de la trituradora**

Las cuchillas son el componente fundamental de la trituradora; el diseño que se planteó en este trabajo de grado se basa en el uso de cuchillas giratorias y fijas para producir un efecto de cizalla, lo que permite cortar el material PET. Por lo anterior, se busca un material que sea altamente resistente al desgaste y con excelente rendimiento para el corte.

El acero inoxidable AISI 314 es es una mezcla de elementos como cromo, carbono, níquel y molibdeno. Este tipo de acero presenta una elevada pureza y una excelente resistencia a la corrosión, además se destaca por su alta resistencia mecánica. En el mercado existen láminas de acero inoxidable desde calibres de 5/8” hasta 24”.

Para el diseño de las cuchillas móviles se empleará acero inoxidable calibre 3/16”

(4,50 mm) y para el diseño de las cuchillas fijas se emplearán dos calibres, 3/16” (4,50 mm) y 1/4” (6,35 mm). Para profundizar en el diseño de las cuchillas, ver Anexo B.

#### **3.4.4. Cilindro de la extrusora**

El cilindro es un componente de la máquina extrusora que permite la transferencia de calor hacia la materia prima de Tereftalato de Polietileno (PET). Por lo anterior, se busca un material que sea altamente resistente a efectos térmicos que soporte temperaturas de trabajo de hasta 300°C, altas presiones de trabajo y suficientemente resistente al desgaste y a la corrosión.

El SAE/AISI 4140 es un material que cumple con las especificaciones previamente descritas. Este material pertenece al grupo de aceros de baja aleación, es un acero de medio carbono, aleado al cromo y molibdeno, muy resistente a la torsión, buena resistencia al desgaste y al impacto, responde de manera excelente a todos los tratamientos térmicos, tiene un grado alto de templabilidad, ya que el Cromo proporciona gran penetración de dureza y el Molibdeno le ayuda a dar uniformidad de dureza en toda la pieza.

Este grado de acero por las características que tiene, se utiliza para diversas aplicaciones en la industria metalmecánica, aeroespacial, de petróleo y gas y automotriz. Los usos típicos son piezas para maquinaria en general, cigüeñales, flechas de transmisión, pernos, engranajes de transmisión, ejes, husillos, collares, abrazaderas, bonete de válvula, tuercas, pinzas, barras de torsión y varias piezas carburadas (Material mundial, 2019). En el Anexo A se describen las principales propiedades físicas y mecánicas del acero inoxidable AISI 4140.

#### **3.4.5. Tornillo de extrusión**

El tornillo es el componente fundamental de la máquina de extrusión, el cual permite el transporte del PET, contribuye al calentamiento del mismo y provoca la

homogenización del PET hasta lograr filamentos de diámetro de 1,75 mm. Los desgastes más típicos en los tornillos son los abrasivos y corrosivos. Los tornillos deben tener una alta dureza ya que deben minimizar el desgaste provocado por las partículas abrasivas. También deben tener alta resistencia a la corrosión para evitar el deterioro del mismo. Por último, los tornillos deben soportar altas cargas de torsión y flexión.

Por lo anterior, se seleccionó como material idóneo para la construcción del tornillo de extrusión el acero SAE/AISI 4140. Las bondades de este material ya se describieron en el numeral 3.4.4., de este documento.

#### **3.4.6. Motor del tornillo de extrusión**

En el numeral 3.3.2.11., se describió, mediante el uso de ecuaciones matemáticas, la potencia necesaria para girar el tornillo de extrusión; los cálculos reflejaron que se requiere un motor de 2,5 Hp para ello. Por lo anterior, se seleccionó un motorreductor de tornillo sinfín – corona NORD (ver Figura 24).

**Figura 24.** Motorreductor para girar el tornillo de extrusión



Fuente: Variadores (2017). *Sinfin corona SI*. Recuperado de <http://www.variadores.com.co/producto/sinfin-corona-si/>

En la Tabla 8 se presenta las características del motorreductor seleccionado para el diseño.

**Tabla 8.** Características del motorreductor sinfín – corona SI

Parámetro	Valor
Motor:	Trifásico
Tipo:	sinfín – corona
Potencia:	0,12 kW a 4,0 kW
Par de detenimiento:	21 - 407 Nm
Relación de transmisión:	18:1
Otras características:	Ejes de entrada y salida formando un ángulo de 90°. Es completamente sellado, con una carcasa no corrosiva, y un peso reducido debido al aluminio.

Fuente: Variadores (2017). *Sinfín corona SI*. Recuperado de  
<http://www.variadores.com.co/producto/sinfin-corona-si/>

### 3.4.7. Tolva de alimentación de la extrusora

La tolva es el componente de la máquina extrusora que permite la alimentación del Tereftalato de Polietileno (PET) en forma de pellet o granulo. Por tanto, el material que se seleccionó para su construcción fue lámina Cold rolled (ver especificaciones del material en el numeral 3.4.1. Para este diseño se utilizará una lámina de acero Cold rolled calibre 18 o espesor de 1,20 mm.

### 3.4.8. Cabezal o boquilla de extrusión

El cabezal o boquilla de extrusión es el componente encargado de la conformación final del extrudado. Se debe velar por que el polímero fluya, con volumen y velocidad de flujo uniforme, alrededor de toda la circunferencia de la boquilla, de manera de lograr espesores uniformes. El diseño del cabezal presenta dos secciones claramente definidas (ver numeral 3.3.2.10., - Coeficiente total de la forma geométrica de la cabeza perfiladora), inicia con una geometría cónica a la entrada del cabezal y posteriormente con una geometría cilíndrica hasta dar la forma del filamento deseado (diámetro de filamento de 1,75 mm). Por lo anterior, se eligió un material con excelentes propiedades térmicas y mecánicas como el latón, que es una aleación compuesta principalmente de cobre y zinc. Este se destaca por ser resistente al desgaste por frotamiento, no produce chispas por impacto mecánico, presenta buena conductividad térmica de 119,4 W/m\*K a 20°C en comparación con

el acero con una conductividad térmica de 58 W/m\*K a 20°C, excelentes propiedades de soldadura, no se altera a temperaturas comprendidas entre 100°C y 200°C y es resistente a la corrosión.

Cabe resaltar que, para facilitar la fijación del cabezal con el cilindro, así como su fácil montaje y desmontaje para su limpieza, este diseño debe tener un sistema de rosca.

#### **3.4.9. Sistema de calefacción de la extrusora**

Las resistencias eléctricas tipo banda son elementos que suministran energía en forma de calor a procesos con elementos de superficies cilíndricas, por ello son perfectos para el diseño de la máquina extrusora. Las resistencias tipo banda tienen forma cilíndrica hueca; la fabricación de la resistencia banda está en función de las características del proceso a calentar, dimensiones, montaje y capacidades eléctricas. De manera la banda térmica debe tener un diámetro de 33,4 mm y una longitud de 40 mm, con una potencia de 400 W y que soporte temperaturas hasta 300 °C, datos previamente calculados en el numeral 3.3.2.16. Esta banda térmica debe ser ubicada al final del cilindro. Por otra parte, se requiere otra banda térmica para ubicar al inicio del cilindro o en la zona de alimentación y otra en la zona de compresión, con el propósito de mantener la temperatura uniforme a lo largo del cilindro, por lo tanto, las bandas térmicas deben tener un diámetro de 33,4 mm y una longitud de 40 mm, con una potencia de 200 W y que soporte temperaturas hasta 300 °C.

Como especificaciones generales, la banda debe ser fabricada con un recubrimiento o blindaje en acero inoxidable AISI 304, voltaje de 220 V y que posibilite la facilidad de realizar orificios para los sensores de temperatura (ver Figura 25).

**Figura 25.** Resistencia tipo banda para calentar el PET



Fuente: IPISA (2019). *Resistencias eléctricas*. Recuperado de  
<https://ipisa5.wixsite.com/importacionesipisa/resistencias>

En la Tabla 9 se presenta las características de la resistencia tipo banda para el diseño.

**Tabla 9.** Características de la resistencia tipo banda

Parámetro	Valor
Voltaje:	220 V
Potencia:	200 W y 400W
Armadura:	Acero inoxidable AISI 304 resistente a la corrosión
Temperatura máxima:	300°C
Diámetro de la resistencia:	33,4 mm
Longitud de la resistencia:	40 mm

Fuente: Autores

#### **3.4.10. Sistema de enfriamiento de la extrusora**

Para disminuir la temperatura del filamento a la salida de la boquilla en la extrusora se empleó un ventilador. Cabe resaltar que la temperatura que se desea alcanzar no debe sobrepasar la temperatura de transición vítrea del PET, de manera que la temperatura no debe superar los 70°C, ya que por debajo de ésta el PET será rígido y quebradizo y por encima de éste es blando y flexible, lo que facilita el almacenamiento del filamento en un rodete.

Se seleccionaron dos ventiladores modelo GDSTime 12025 (ver Figura 26, de dimensiones de 120x120x25mm, velocidad de flujo de aire de 3000 r.p.m. y potencia

nominal de 12 V. Se estima que estos ventiladores favorecerán la disminución de la temperatura de manera óptima.

**Figura 26.** Sistema de refrigeración tipo ventilador modelo GDSTime 12025



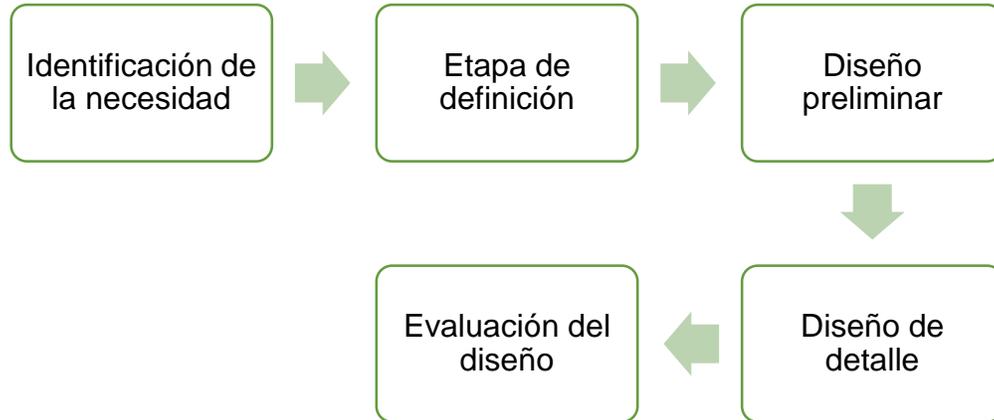
Fuente: Mercado Libre (2019). Recuperado de <https://listado.mercadolibre.com.co/ventilador-3000rpm>

### **3.5. MODELADO DE LA PLANTA MEDIANTE HERRAMIENTA DE SOFTWARE**

En la

Figura 27 se presenta la metodología empleada para el desarrollo del modelado en SolidWorks de cada una de las piezas de la planta en 3D.

**Figura 27.** Metodología de diseño en solidWorks



Fuente: Autores

### **a) Identificación de la necesidad**

En la identificación del diseño se expresa de manera detallada el objetivo o la necesidad de diseño. Por tanto, lo que se requiere es el diseño de una planta piloto que procese filamentos de 1,75 mm de diámetro, empleando material PET, a fin de ser útiles en impresoras 3D.

### **b) Etapa de definición**

Con el fin de definir adecuadamente el diseño, se debe tener en cuenta la geometría, el tamaño, el tipo de material, las características específicas según cálculos matemáticos previos, tolerancias de fabricación, entre otros.

### **c) Diseño preliminar**

Se realiza un bosquejo preliminar de las piezas, controlando todas las variables y parámetros de diseño, que cumplan con las medidas en el espacio, así como ajustes

de las piezas que se deben ensamblar, tomando como referencia la biblioteca virtual de SolidWorks.

#### d) Diseño de detalle

Hace referencia a todos los cálculos matemáticos que se deben hacer para el diseño de las piezas, tales como ajuste de piezas según los requerimientos del mercado.

#### e) Evaluación del diseño

Esta etapa se basa en la parte dimensional, en la que se verifica el funcionamiento de las piezas, se analizan las posibles interferencias, fallos de posicionamiento de las mismas, holguras incorrectas, entre otras.

### 3.6. PRESUPUESTO

A continuación, se presenta una relación de costos para la fabricación de la planta piloto con los componentes principales de la trituración y extrusión en función del salario mínimo legal vigente (SMMLV) para el año 2020.

**Tabla 10.** Costos de fabricación

Descripción	Cantidad	Precio unitario (SMMLV) 2020	Precio total (SMMLV) 2020
Motorreductor de sinfín – corona SI trifásico potencia hasta de 4,0 kW	1	1,10	1,10
Motor trifásico potencia de 0,75 Hp	1	0,450	0,450
Resistencia eléctrica tipo banda, diámetro de 33,4 mm, longitud de 40 mm y potencia de 400W	1	0,14	0,14
Resistencia eléctrica tipo banda diámetro de 33,4 mm, longitud de 40 mm y potencia de 200W	2	0,10	0,20
Ventilador GDSTime 12025 de 3.000 r.p.m. y potencia de 12 V	2	0,15	0,30
Lámina de acero inoxidable AISI 304 calibre 10 de 5x10 pies	1	0,097	0,097
Lámina de acero inoxidable AISI 304 calibre 1/4 de 5x10 pies	1	0,181	0,181
Lámina de acero inoxidable AISI 304 calibre 3/16 de 5x10 pies	1	0,145	0,145

Descripción	Cantidad	Precio unitario (SMMLV) 2020	Precio total (SMMLV) 2020
Lámina Cold rolled calibre 18 de dimensione 1x2 m	1	0,228	0,228
Barra de acero AISI 4140 de 40x1000 mm	1	0,18	0,18
Tubo cilíndrico AISI 4140 de 33,4x1000 mm	1	0,11	0,11
Barra de latón para boquilla de 30 mm de diámetro	1	0,12	0,12
Cojinete de rodamiento	3	0,036	0,108
Piñones	2	0,034	0,068
Carrete plástico	1	0,072	0,072
Apoyo de carrete	1	0,054	0,054
Kit controlador de temperatura REX-C100 + Termocupla tipo K + Relé CJX2	3	0,193	0,579
Tubo cuadrado 30x30x3 mm x 6 m	20	0,072	1,44
Ángulos 1.1/4" x 1/8" x 6 m	1	0,11	0,11
Tornillos	30	0,001	0,03
Costos de fabricación	1	0,6	0,6
		<b>TOTAL</b>	<b>6,31</b>

Fuente: Autores

Por tanto, el costo total de la planta piloto conformado por la máquina trituradora y extrusora es de 6,31 SMMLV.

## 4. RESULTADOS

Concluido el dimensionado de cada uno de los elementos que conforman la planta piloto, a continuación, se describen los resultados obtenidos mediante el uso del software SolidWorks versión 2017 para el dibujo de las piezas de la trituradora y extrusora.

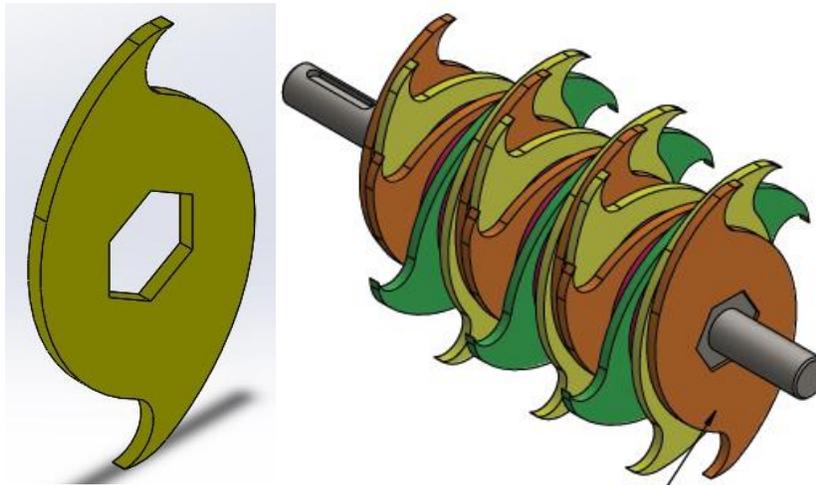
### 4.1. MODELADO DE LA TRITURADORA EN SOLIDWORKS

#### 4.1.1. *Cuchillas móviles*

Las cuchillas son elementos mecánicos de corte que permiten la transformación del material PET. Las cuchillas se diseñaron teniendo en cuenta un radio de 70 mm, medida tomada desde el centro hexagonal con diámetro de 31,75 mm, y un espesor de 4,76 mm (ver Figura 28). Estas se encuentran distribuidas a lo largo del eje porta cuchillas. La forma correcta de ensamblarlas es formando una hélice entre cuchilla y cuchilla con un ángulo de desfase de 30°; esta configuración permite una distribución de fuerza de corte uniforme. En total la trituradora tiene dieciséis (16) cuchillas.

Adicionalmente, en medio de cada cuchilla se colocó un distanciador para mejorar el diseño de la máquina trituradora (ver apartado 4.1.3.). Cabe resaltar que este tipo de cuchilla en forma de helicoidal hace que el material se atrape de mejor manera y la forma del arreglo de las cuchillas genera que se recircule de manera efectiva el material PET.

**Figura 28.** Diseño final de la cuchilla móvil de la trituradora



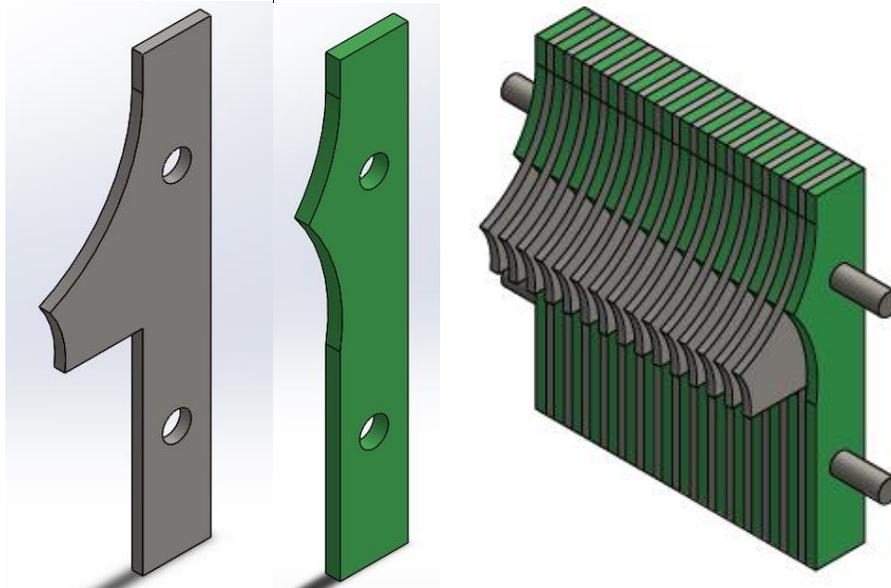
. a) Diseño de la cuchilla. b) Ensamble de las cuchillas

Fuente: Autores

#### 4.1.2. Cuchillas fijas

El diseño de la trituradora tiene acoplado un diseño de cuchillas fijas a fin de mejorar la eficiencia del triturado del material PET, estas cuchillas varían con respecto al tamaño de las cuchillas móviles y a su vez producen un efecto de corte tipo tijera que mejora la calidad del triturado y minimiza el tamaño de partícula. En total se cuenta con dos tipos de cuchillas, las cuales se colocan una de por medio. Un tipo de cuchilla tiene geometría de número uno (1) para cortes más rápidos (en total 15 cuchillas), con dimensiones de alto, ancho y espesor de 200 mm x 30 mm x 4,76 mm. Por otra parte, la otra cuchilla tiene una geometría menos pronunciada de número uno (1) con dimensiones similares, pero con la leve diferencia de un espesor más grueso (6,35 mm), a fin de realizar cortes más finos del material PET y así mismo evita el aglomerado de material sin corte (en total 16 cuchillas). Los dos (2) tipos de cuchillas van soportados sobre dos (2) varillas de acero fijas, de diámetro de 12,70 mm y largo de 233 mm; la distancia entre varilla y varilla es de 100 mm, medida referenciada desde el centro de cada varilla (ver Figura 29).

**Figura 29.** Diseño final de las cuchillas fijas de la trituradora



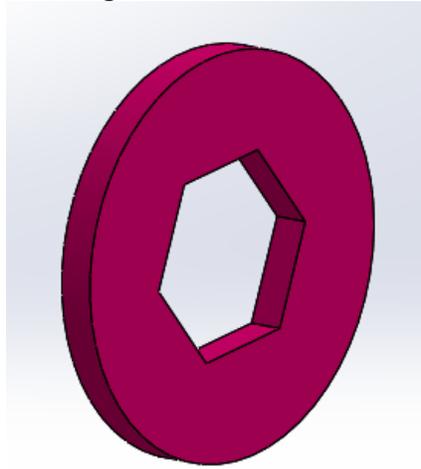
. a) Diseño de los dos tipos de cuchillas fijas. b) Ensamble de las cuchillas

Fuente: Autores

#### **4.1.3. Distanciator**

El distanciator se diseñó para colocarse entre cuchilla y cuchilla a fin de evitar la fricción entre las mismas. En total son 15 distanciatoros con dimensiones de 70 mm de diámetro y 6,35 mm de espesor, con centro hexagonal de diámetro de 31,75mm (ver Figura 30).

**Figura 30.** Distanciador

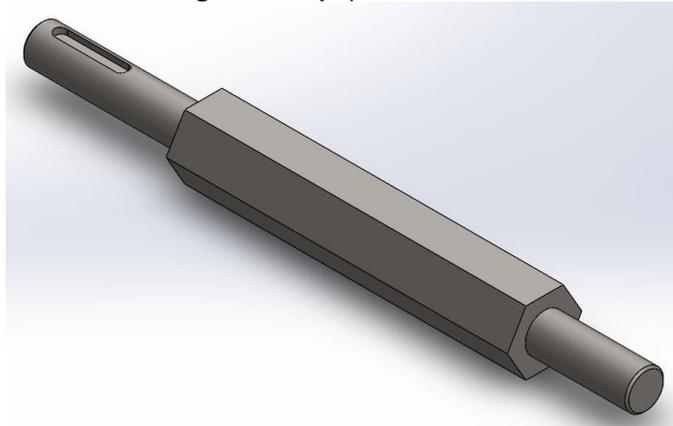


Fuente: Autores

#### **4.1.4. Eje porta cuchillas**

El eje soporta las cuchillas de corte (ver Figura 31).

**Figura 31.** Eje porta cuchillas



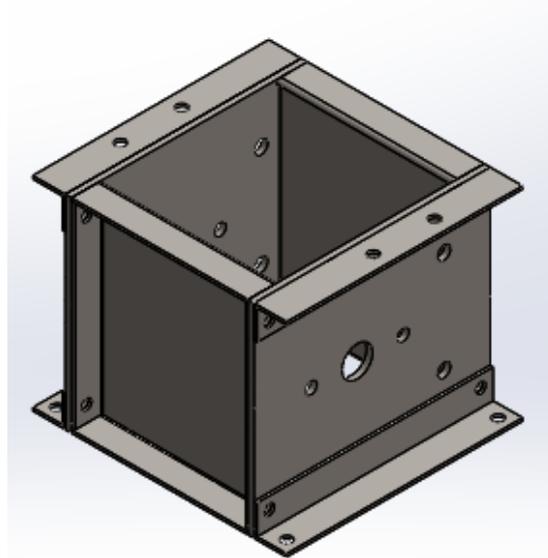
Fuente: Autores

Su parte central tiene una geometría hexagonal que va acorde con el diseño de las cuchillas para que exista un acoplamiento ideal al movimiento que se genere. El eje porta cuchillas tiene una longitud total de 298; la longitud donde están acopladas las cuchillas es de 168 mm con un diámetro de 31,75 mm.

#### **4.1.5. Bastidor o módulo de trituración**

El bastidor es donde se produce el proceso de trituración del material PET; sus dimensiones de alto, ancho y espesor son 200 mm x 173 mm x 3 mm. Se compone de los elementos descritos anteriormente, cuchillas móviles, cuchillas fijas, distanciadores y eje porta cuchillas (ver Figura 32).

**Figura 32.** Módulo de trituración

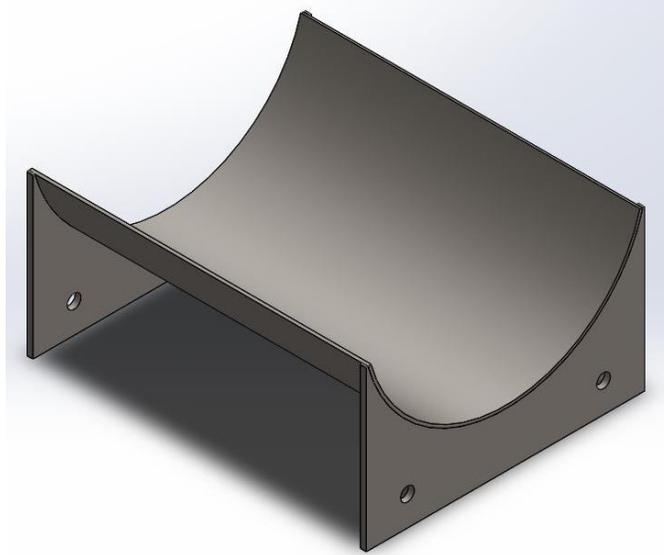


Fuente: Autores

#### **4.1.6. Malla perforada o criba**

La malla permite la selección del pellet adecuado del material PET para su posterior uso en la máquina extrusora (ver Figura 33). Su diseño se realizó en forma de medio cilindro con radio de 73 mm y largo de 173 mm. Presenta una pequeña holgura o distancia con el eje de las cuchillas, a fin que éstas recojan nuevamente el material que no cumpla con la especificación de un tamaño de hojuela inferior a 5 mm. Tiene dos soportes para los laterales que encajan con la malla de geometría de medio cilindro, sus dimensiones de largo y alto son 142 mm x 81 mm.

**Figura 33.** Malla perforada o criba

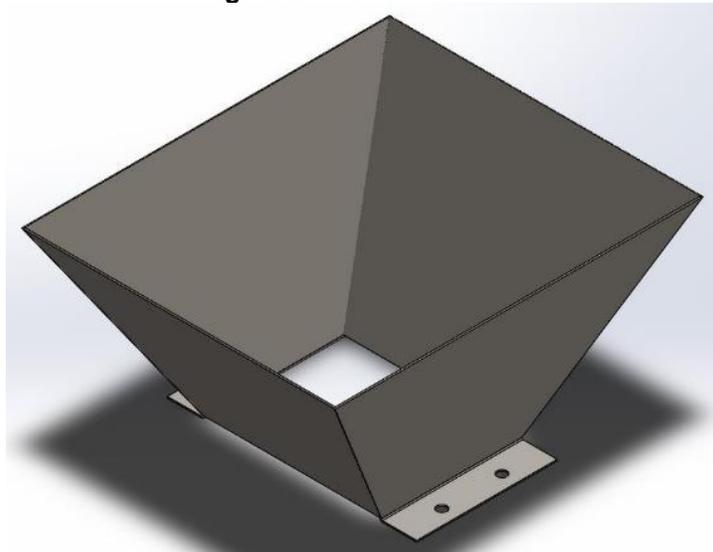


Fuente: Autores

#### **4.1.7. Tolva trituradora**

Diseñada para recibir las botellas PET de 500 mL. Tiene una altura máxima de 250 mm, dimensiones acopladas al tamaño de la botella PET y con dimensiones de largo y ancho de 430 mm x 380 mm (ver Figura 34).

**Figura 34.** Tolva trituradora



Fuente: Autores

#### **4.1.8. Estructura soporte trituradora**

Esta estructura tiene dimensiones de ancho, alto y profundo de 530 mm x 815 mm x 430 mm (ver Figura 35). Diseñada con tubo cuadrado de 30 mm x 30 mm x 3 mm. Soporta la tolva, la cámara de trituración y el motor trifásico.

**Figura 35.** Estructura soporte trituradora

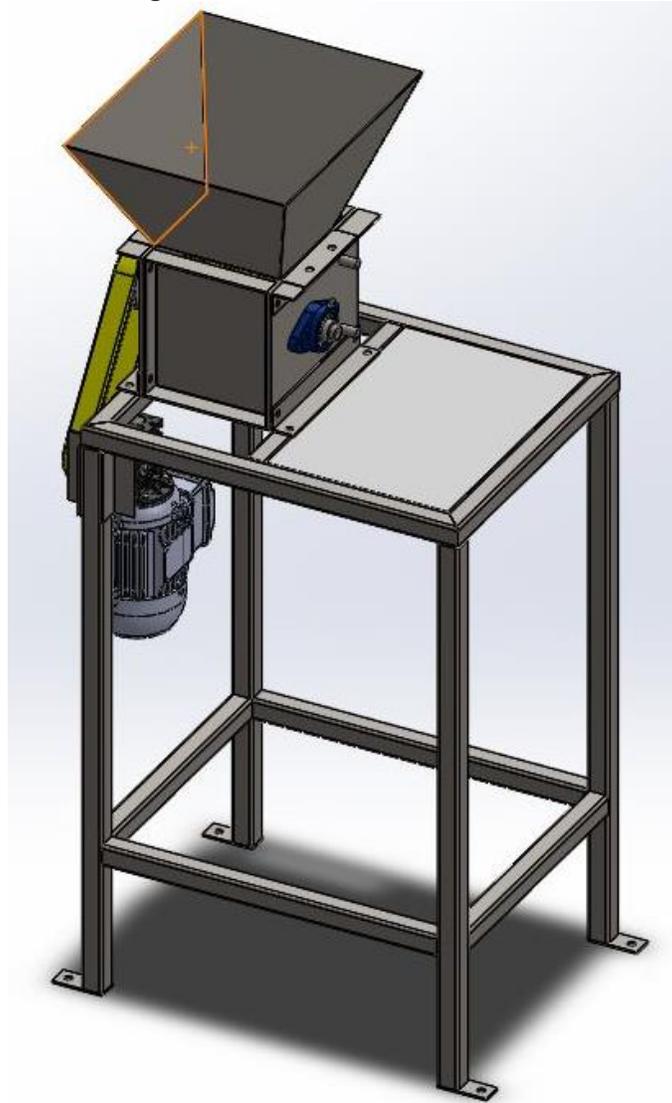


Fuente: Autores

#### **4.1.9. Ensamble de la trituradora**

Finalmente se realiza el ensamble de cada uno de los elementos que conforman la trituradora para obtener material PET triturado, con tamaño de perforación máximo de 5 mm (ver Figura 36).

**Figura 36.** Ensamble de la trituradora



Fuente: Autores

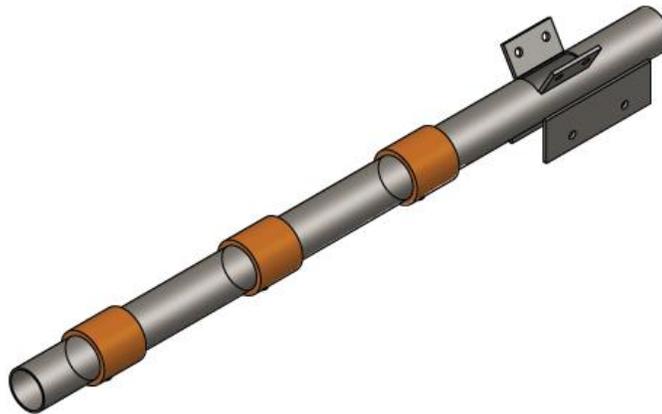
Los planos de todas las piezas de la trituradora se pueden encontrar en el Anexo B.

## 4.2. MODELADO DE LA EXTRUSORA EN SOLIDWORKS

### 4.2.1. Cilindro

Elemento en el cual se encuentra instalado el tornillo de extrusión y por donde se transporta el material procesado (ver Figura 37). Se diseñó con una longitud de 600 mm, con apertura de alimentación donde se ubica el elemento tolva con dimensiones 45 mm x 21 mm. Adicionalmente, en su diámetro exterior se le adaptan tres resistencias tipo banda para generar el calentamiento del material PET.

**Figura 37.** Cilindro

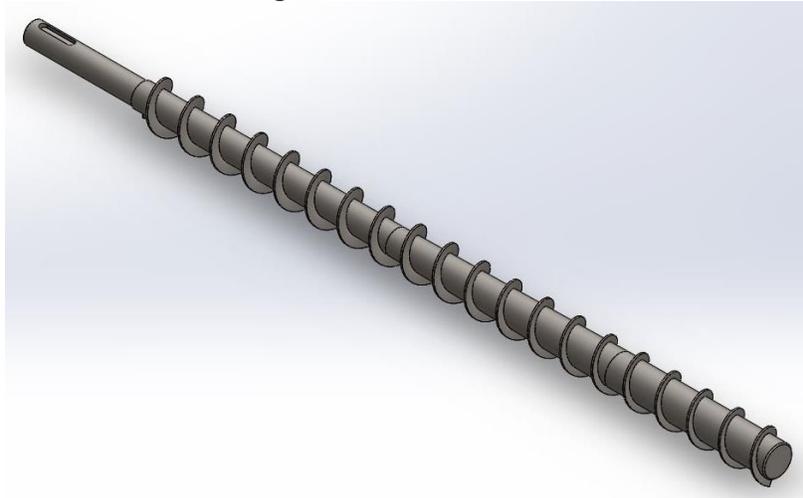


Fuente: Autores

### 4.2.2. Tornillo de la extrusora

El tornillo de extrusión es el elemento fundamental de la extrusora, ya que contribuye al calentamiento y fundición del material PET. Se diseñó con una longitud de 680 mm, diámetro de 29 mm, ángulo de filete de 17,66° y paso de la rosca de 29 mm (ver Figura 38).

**Figura 38.** Tornillo extrusor

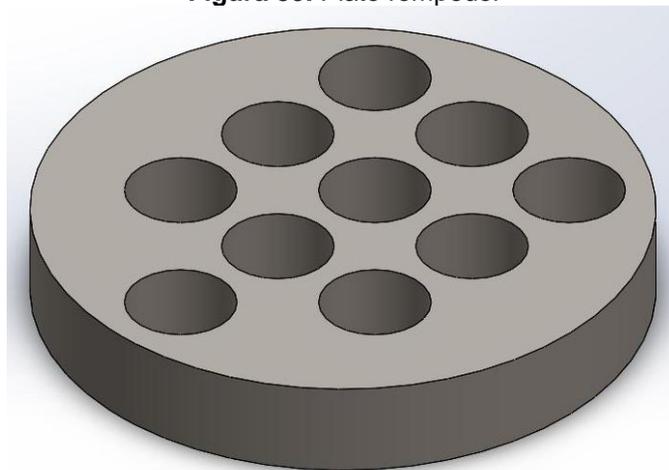


Fuente: Autores

#### **4.2.3. Plato rompedor**

Elemento encargado de retener el material PET que no se logra fundir a lo largo del proceso; su principal función es prevenir la obstrucción de la boquilla de extrusión. Fue diseñado con 10 agujeros, diámetro exterior de 30 mm y espesor de plato de 5 mm (éste último valor se modificó de 10 mm a 5 mm, debido a que el diseño inicial era muy robusto en la práctica) (ver Figura 39).

**Figura 39.** Plato rompedor

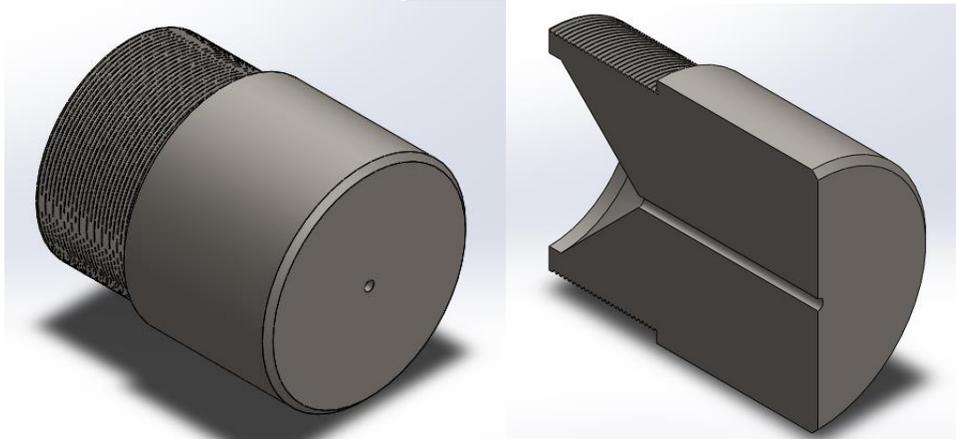


Fuente: Autores

#### 4.2.4. Boquilla

La boquilla se diseñó teniendo en cuenta inicialmente una geometría cónica con longitud de 15 mm, seguidamente una geometría cilíndrica con longitud de 30 mm para garantizar la disminución de la temperatura del filamento (ver Figura 40).

**Figura 40.** Boquilla

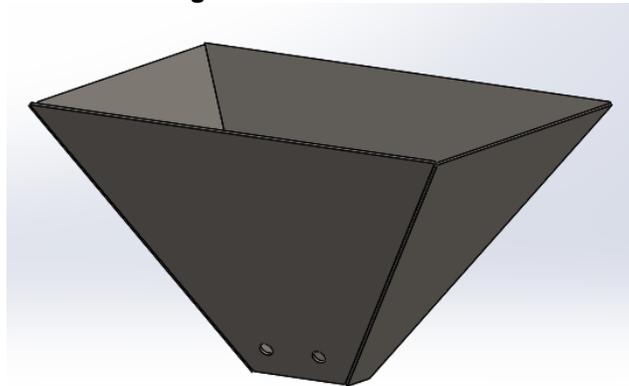


Fuente: Autores

#### 4.2.5. Tolva extrusora

Diseñada para recepcionar los pellets de tamaño de hojuela inferiores o iguales a 5 mm, provenientes de la máquina trituradora. Tiene una altura máxima de 120 mm y dimensiones de largo y ancho de 200 mm x 158 mm (ver Figura 41).

**Figura 41.** Tolva extrusora



Fuente: Autores

#### **4.2.6. Estructura soporte extrusora**

Esta estructura tiene dimensiones de ancho, alto y profundo de 910 mm x 797 mm x 500 mm (ver Figura 42). Diseñada con tubo cuadrado de 30 mm x 30 mm x 3 mm. La estructura soporta la tolva, el tornillo de extrusión, el motorreductor, el sistema de refrigeración y de recolección del filamento.

**Figura 42.** Estructura soporte extrusora

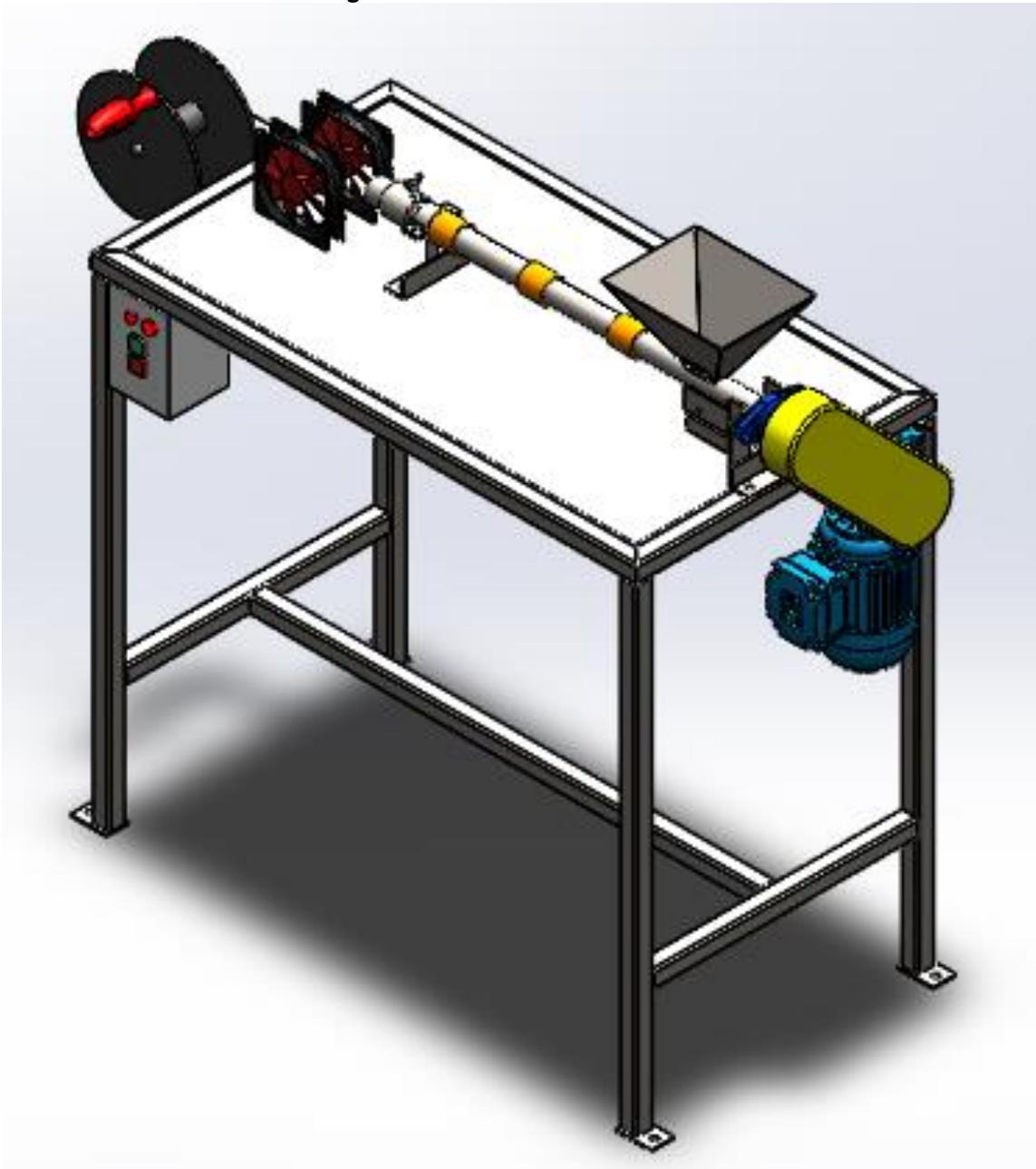


Fuente: Autores

#### **4.2.7. Ensamble de la extrusora**

Finalmente se realiza el ensamble de cada uno de los elementos que conforman la extrusora para obtener como producto filamento de 1,75 mm a partir de material PET (ver Figura 43).

**Figura 43.** Ensamble de la extrusora



Fuente: Autores

Los planos de todas las piezas de la extrusora se pueden encontrar en el Anexo C.

## 5. CONCLUSIONES

El desarrollo de este trabajo permitió el diseño y modelado de la planta piloto conformada por la trituradora y extrusora. Para el modelado de la planta se empleó el programa de SolidWorks versión 2017, que tiene como objetivo producir filamentos de diámetro de 1,75 mm, a fin de utilizarlos en impresoras 3D, a partir de material reciclado de Tereftalato de Polietileno (PET).

La trituradora se diseñó con una tolva de alimentación para triturar botellas PET de 500 mL, un juego de cuchillas móviles (16 en total) desfasadas 30° una de la otra y de cuchillas fijas de dos clases (31 en total) para garantizar el corte del material PET; también cuenta una criba con geometría semicilíndrica con una matriz de agujeros de 5 mm de diámetro. La máquina es accionada con un motor trifásico de 0,75 Hp de potencia.

La extrusora está diseñada para obtener una producción de 0,51 g/min o 1,8 kg/h de filamento a una temperatura de trabajo de 260°C. Sus dimensiones fundamentales fueron: diámetro del tornillo de 29 mm, longitud del tornillo incluido eje del rotor de 680 mm, número de filetes del tornillo 20, la potencia necesaria para hacer girar el tornillo de 2,3 Hp y 100 r.p.m. Es importante resaltar que en dado caso que se requiera producir una mayor cantidad de filamento por hora, se puede variar las revoluciones del motor del huesillo o tornillo de extrusión.

## 6. RECOMENDACIONES

El diseño de esta planta permitió cumplir con los objetivos planteados en este proyecto, además brindo destreza en el diseño y manejo del software SolidWorks. Con el propósito de mejorar el diseño de la planta piloto, se recomienda para futuros trabajos:

- Diseñar un sistema que pueda tomar directamente el filamento que sale de la boquilla de la extrusora para eliminar el proceso realizado manualmente en el diseño de la planta piloto.
- Adaptar un motorreductor al sistema de recolección del filamento de la extrusora, a fin de mejorar el almacenamiento del mismo.
- Diseñar otro tipo de boquilla con el propósito de tener varios tamaños de filamentos comerciales para el uso en impresoras 3D.
- Rediseñar la distribución de los agujeros del plato rompedor para mejorar el mezclado y homogenización del material PET fundido.
- Hacer varios diseños de las mallas con perforaciones superiores a 5 mm, para seleccionar diferentes tamaños del material PET triturado en la máquina trituradora.
- Evaluar el uso de otras materias primas de plástico como el Ácido Poliláctico (PLA) y el Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS) en la máquina extrusora, que también se emplean como filamentos en las impresoras 3D.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arteaga Medina, L. (2015). *Fabricación y caracterización de filamentos para impresoras 3D a partir de materiales reciclados* (Tesis de pregrado). Universidad de La Laguna - Escuela Superior de Ingeniería y Tecnología Sección de Ingeniería Industrial, San Cristóbal de La Laguna, España.

Bordignon, F., Iglesias, A. A. y Hahn, A. (2018). *Diseño e impresión de objetos 3D: una guía de apoyo a escuelas*. Buenos Aires, Argentina: UNIPE - Editorial Universitaria.

Castillo C., V. A., Macero C., X. I. y Villacreses C., L. G. (2004). *Proyecto de inversión para la instalación de una planta recicladora de Polietilén Tereftalato (PET) para transformar los desperdicios plásticos de PET generados por la ciudad Guayaquil en escamas recicladas para destinarlas a la exportación* (Tesis de pregrado). Escuela superior Politécnica del Litoral – Instituto de Ciencias Humanísticas y Económicas, Guayaquil, Ecuador.

Chapa Cordova, O., Martínez E. (2019). Diseño de equipo para molienda y lavado de PET (Polietileno Tereftalato). Recuperado de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/2342/1/4626.pdf>

Chávez Martínez, J. E. (2018). *Diseño de extrusora de filamento para impresora 3D fabricado a partir de polipropileno reciclado* (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de la Mixteca, Oaxaca, México.

García Acevedo, C. A. (2015). *Diseño de una extrusora para filamento de impresión 3D* (Tesis de pregrado). Universidad de Chile, Santiago de Chile, Chile.

García Sánchez, M. O. (2017). *Ingeniería básica de una planta de producción de Polietileno Tereftalato* (Tesis de pregrado). Universidad de Sevilla, Sevilla, España.

Gomes, D. (2017). Filamentos para impresoras 3D. Recuperado de <https://lasmejoresimpresoras.com/todos-los-filamentos-impresoras-3d/>.

Groover, M. P. (1978). *Fundamentos de manufactura moderna. Materiales, procesos y sistemas*. México D.C, México: Editorial McGraw – Hill Interamericana – Tercera edición.

Gutiérrez Paredes, C. A. y Vargas Ayala, L. E. (2017). *Diseño y fabricación de una máquina extrusora para crear el filamento de la impresora 3D a partir de material plástico* (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Interempresas (2015). *Extrusión*. Recuperado de <http://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/138574-Extrusion.html>.

López Conde, J. E. (2016). *Impresoras 3D*. Recuperado de [https://intranet.bibliotecasgc.bage.es/intranet-tmpl/prog/local\\_repository/documents/17854.pdf](https://intranet.bibliotecasgc.bage.es/intranet-tmpl/prog/local_repository/documents/17854.pdf).

Macas Montaña, C. C. y Pilco Llerena, K. J. (2016). *Construcción de un modelo de fundición mediante la utilización de tecnología de impresión 3D* (Tesis de pregrado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Material mundial (2019). *SAE AISI Acero 4140 ficha técnica, propiedades, dureza, características, tratamiento térmico*. Recuperado de <https://www.materialmundial.com/sae-aisi-acero-4140-ficha-tecnica-propiedades/>.

Méndez Prieto, A., Cedillo García, R., Concepción, M. (2017). *Parámetros clave a considerar durante el procesamiento del PET*. Recuperado de <https://www.pt-mexico.com/art%C3%ADculos/parmetros-clave-a-considerar-durante-el-procesamiento-del-pet>.

Moya Verdú, G. (2016). *Estudio, diseño, simulación y optimización de una matriz de extrusión de plástico* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Ortega Acevedo, B. S. y Vitola Reyes, T. P. (2011). *Modernización de la planta de reciclaje de Polietilen Tereftalato de la Empresa Polisuin S.A. acoplado un sistema de tratamiento de efluentes* (Tesis de pregrado). Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia.

Ortiz Palacios, J. A. (2016). *Diseño y construcción de una máquina trituradora automatizada para envases plásticos* (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica Equinoccial, Quito, Ecuador.

Pachón Bejarano, Y. M. (2007). *Plan de negocios para una empresa recicladora de plástico PET, en la ciudad de Bogotá D.C.* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Parra Brito, R. N. (2017). *Diseño de extrusora de filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados* (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

Suasnavas Flores, D. F. (2017). *Degradación de materiales plásticos “PET” (polyethylene terephthalate), como alternativa para su gestión* (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, Ecuador.

QuimiNet (2005). *Todo lo que quería saber del PET*. Recuperado de <https://www.quiminet.com/articulos/todo-lo-que-queria-saber-del-pet-2806.htm>.

Quintero Díaz, L. A. (2015). *Diseño de una planta de reciclado de Tereftalato de Polietileno (PET)* (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Röben, E. (2003). *El Reciclaje. Oportunidades para reducir la generación de los desechos sólidos y reintegrar materiales recuperables en el círculo económico*. Recuperado de [http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/guialcalde/3residuos/d3/062\\_Reciclaje/Reciclaje.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/guialcalde/3residuos/d3/062_Reciclaje/Reciclaje.pdf).

Savgorodny, V. K. (1978). *Transformación de plásticos*. Barcelona, España: Editorial Gustavo Gili.

Solano Albuja, X. R. y Vera Ríos, E. G. (2011). *Estudio de mercado para la implementación de un proyecto de reciclaje de plástico en el Distrito Metropolitano de Quito* (Tesis de pregrado). Escuela Politécnica del Ejercito, Sangolquí, Ecuador.

Solheim, E. (2018). *Plástico de un solo uso. Una hoja de ruta para la sostenibilidad*. Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (ONU). Kenia, África Oriental.

Suárez Zarta, D. (2016). Solo el 26% de las botellas plásticas se recicla. *La República*. Recuperado de [http://www.larepublica.co/solo-26-de-las-botellas-plasticas-se-recicla\\_357536](http://www.larepublica.co/solo-26-de-las-botellas-plasticas-se-recicla_357536).

Trapero, D. (2017). *Todo sobre el PETG en impresión 3D*. Recuperado de <https://bitfab.io/es/blog/petg-impresion-3d/>.

Vela Celis, J. A., Robles Jiménez, S. H. y Urrego Roldan, J. A. (2016). *Diseño de máquina multifuncional de reciclaje de botellas PET, para el aprovechamiento de material sólido con potencial a ser reciclado en una Gestión Integral de Residuos Sólidos* (Tesis de pregrado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

**ANEXOS**

## Anexo A. Propiedades del acero inoxidable AISI 4140

**Acero SISA 4140T**  
**Tratado y Revenido**

acero grado maquinaria



---

SERVICIO INDUSTRIAL, S.A. DE C.V.

Desde 1947

---

Color de distinción

negro

rojo

---

CARACTERÍSTICAS

Acero grado maquinaria al Cromo-Molibdeno. Se suministra **Tratado, Enfriado al Aceite y Revenido** con dureza aprox. de 28/34 HRC. Buena resistencia a la tensión, torsión y a la flexión. Para piezas y partes de maquinaria de uso general. Normalmente no requiere un tratamiento térmico adicional, sin embargo el acero SISA 4140T se puede templar a durezas mayores para incrementar su resistencia. Debe ser recocido antes de un temple posterior.

COMPOSICIÓN QUÍMICA - % PROMEDIO

C	Mn	Si	Cr	Mo
0.40	0.90	0.30	1.00	0.20

---

NORMAS:

SAE / AISI	DIN
4140	1.7225 - 42CrMo4

---

APLICACIONES TÍPICAS

Piezas para Maquinaria en General  
Cigüeñales  
Flechas de Transmisión  
Pernos  
Engranajes  
Engranajes de Transmisión  
Ejes  
Bielas  
Portamoldes

---

*Nota: Estas son algunas de las aplicaciones típicas. No debe intentar su aplicación específica sin un estudio independiente y una evaluación de funcionalidad.*

*Las propiedades indicadas en esta hoja técnica son valores típicos. Variaciones como sea en la química, tamaño y condiciones de tratamiento térmico pueden producir desviaciones de estos valores. Para datos adicionales o asistencia en ingeniería tecnológica, favor de acudir al departamento técnico de SISA.*

**SISA 4140T**

PROPIEDADES FÍSICAS

Densidad (kg/cm<sup>3</sup>) 7.85

Módulo de Elasticidad

10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>	210
	100°C 200°C 300°C 400°C 500°C
10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup>	205 195 185 175 165

Conductividad Térmica

W/m·K	42
-------	----

Coeficiente de Dilatación Térmica

	mm/mm°C
0-100°C	11.1 x10 <sup>-6</sup>
0-200°C	12.1 x10 <sup>-6</sup>
0-300°C	12.9 x10 <sup>-6</sup>
0-400°C	13.5 x10 <sup>-6</sup>
0-500°C	13.9 x10 <sup>-6</sup>

---

TRATAMIENTO TÉRMICO

Para recomendaciones y temperaturas de tratamiento térmico del Acero SISA 4140T, referirse la hoja técnica del Acero SISA 4140R.

TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

El Acero SISA 4140T puede ser nitrurado o recubierto con cromo duro.

RELEVADO DE ESFUERZOS

En el caso de un maquinado extenso y debido a las tensiones producidas por dicho maquinado, se recomienda relevar esfuerzos antes de llegar a la medida final para evitar deformaciones posteriores.

Temperatura de relevado: 500 - 550 °C (930 - 1020 °F)

SOLDADURA

No se recomienda soldar el SISA 4140T (Templado y Revenido) y de ser posible, se debe evitar ya que las propiedades mecánicas son alteradas en las zonas afectadas por el calor del proceso de soldadura.

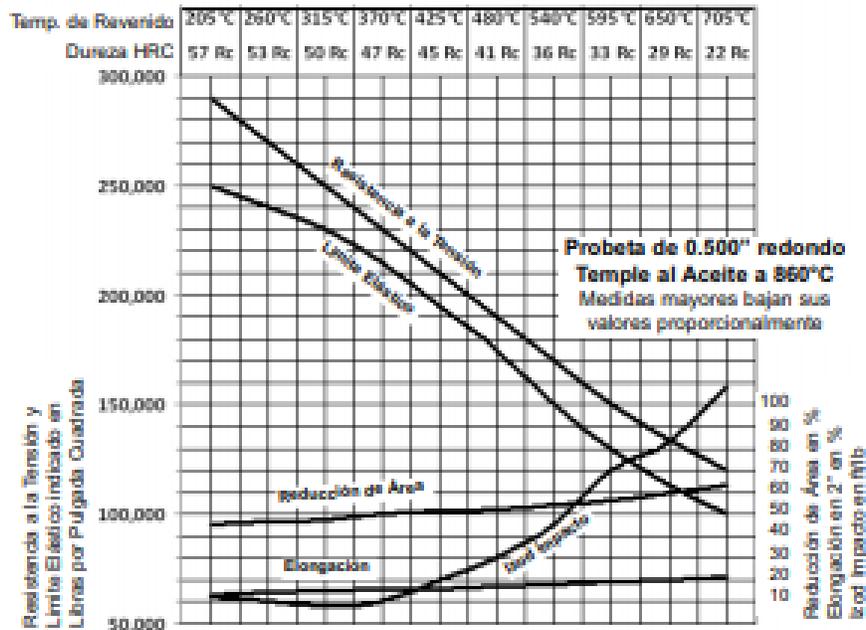
Es preferible aplicar soldadura al SISA 4140R (Recocido) y cuando la pieza se enfrie a aprox. 50°C, esta sea inmediatamente relevada de esfuerzos de 595°C a 620°C antes del templado y revenido.

En caso de que la soldadura sea realmente necesaria con el SISA 4140T (Templado y Revenido), una vez que la pieza se enfrie a aprox. 50°C, esta sea inmediatamente relevada de esfuerzos a 30°C a 50°C por debajo de la temperatura original de revenido.

En cualquier caso, antes de aplicar soldadura, la pieza debe ser precalentada a 300°C a 400°C.

**908A-41-MT**

**PROPIEDADES MECÁNICAS**



**TEMPLE AL ACEITE de 860°C a 845°C - REVENIDO A 595°C**

	Resistencia a la Tensión	Límite Elástico	Elongación en 2"	Reducción de Área	Dureza Brinell	Izod Impacto
Rd 1/2"	157,500	148,750	18.1	59.4	321	68.0
Rd 1"	140,250	135,000	19.5	62.3	285	70.5
Rd 2"	127,500	102,750	21.7	65.0	262	84.0
Rd 4"	118,750	87,000	21.5	62.1	235	82.5

Resistencia a la Tensión y Límite Elástico indicado en Libras por Pulgada Cuadrada

Elongación en 2" en %  
Reducción de Área en %  
Izod Impacto en ftlb



Servicio Industrial, S.A. de C.V.

www.sisa1.com.mx

Aceros Especiales Grados Herramienta y Maquinaria

Aceros SISA-MET® de Metalurgia en Polvo (PM)

Piezas Industriales Forjadas

DF: Naranjos 6 - Col. San Francisco Cuauhtlapan, Naucalpan - cp 50560, Estado de México

Tel - (55) 5576-4011 Fax - (55) 5576-4997 sisa@sisa1.com.mx

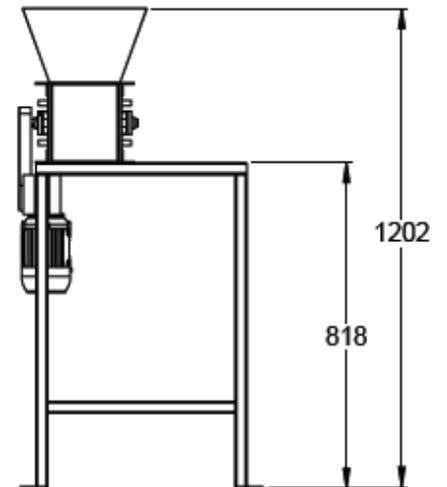
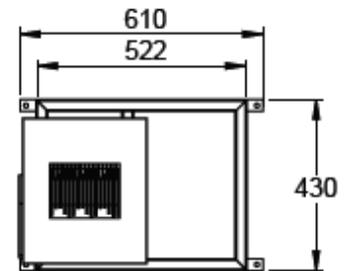
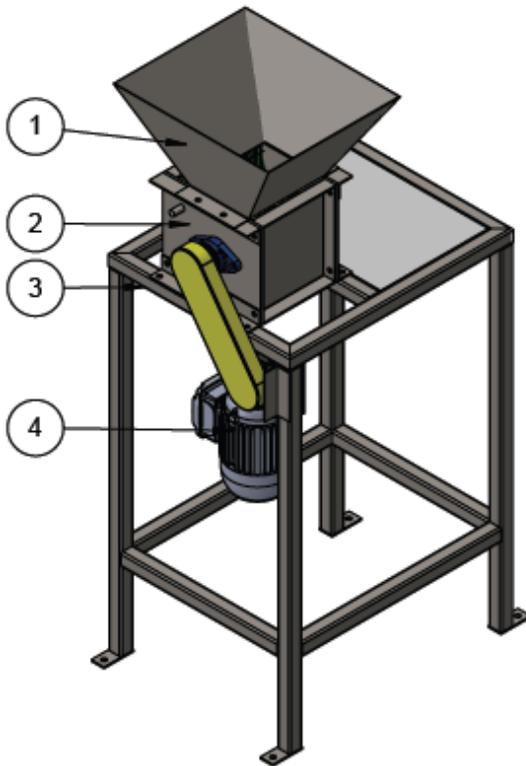
MTY: Guerrero Norte 4120 - Col. del Norte, Monterrey - cp 64500, Nuevo León

Tel - (81) 8201-7220 Fax - (81) 8201-2981 sisaoty@sisa1.com.mx

**Anexo B. Planos de la trituradora**

**TRITURADOR**

#	COMPONENTE
1	TOLVA DE ALIMENTACIÓN
2	CAMARA DE TRITURADO
3	ESTRUCTURA SOPORTE
4	MOTORREDUCTOR



ESCALA	1:7	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE COMPLETO TRITURADORA

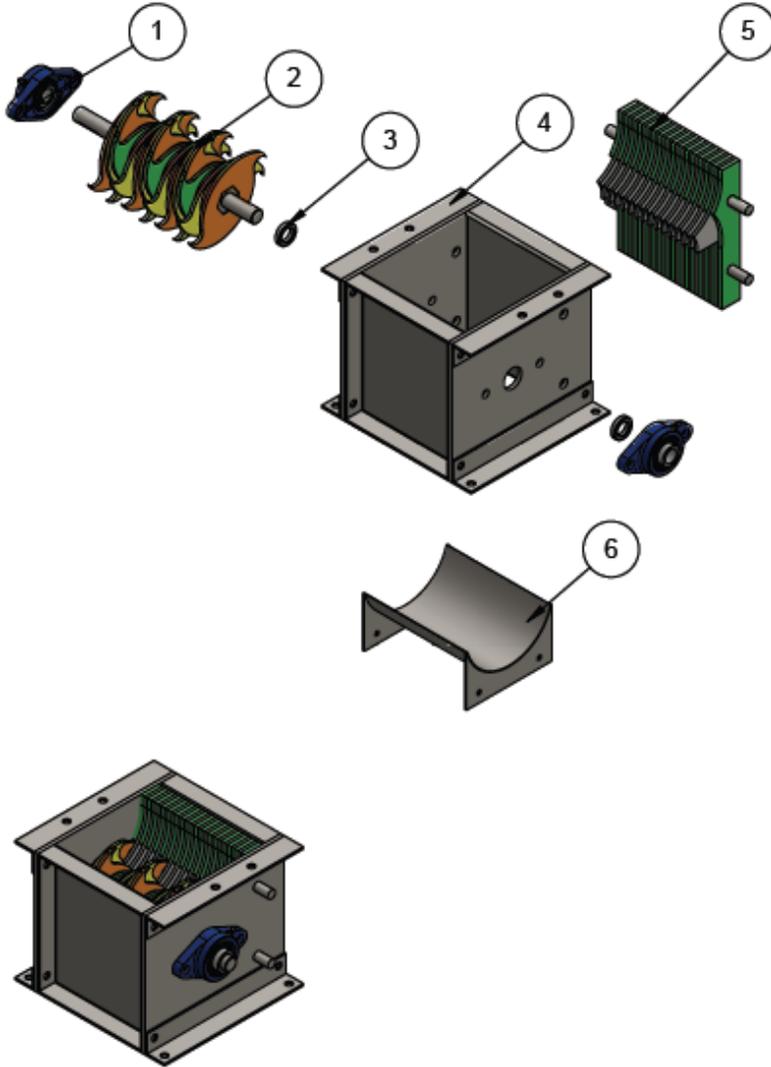
IN-17-148 - REV. 01 - 11/03/2019

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

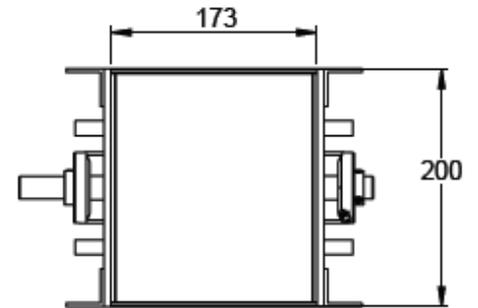
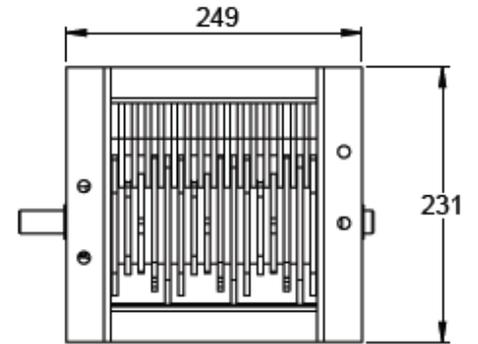
REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**TRITURADOR**



#	COMPONENTE	CANT
1	CHUMACERA FY 3-4"	2
2	ROTOR CUCHILLAS	1
3	CENTRADOR	2
4	BASTIDOR	1
5	CONTRACUCHILLAS	1
6	FONDO	1



ESCALA	1:4	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE ROTOR TRITURADOR

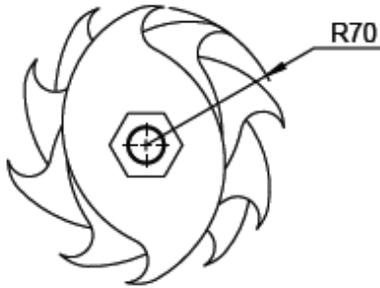
IM-FO-08 REV. 01 19/03/19

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

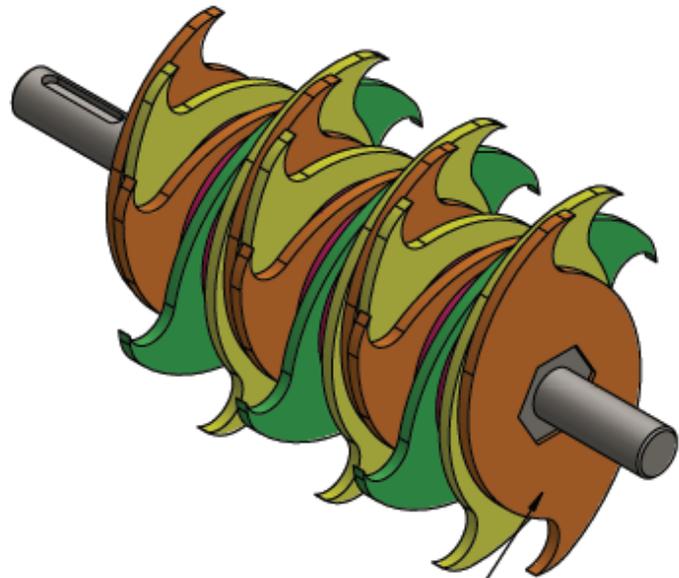
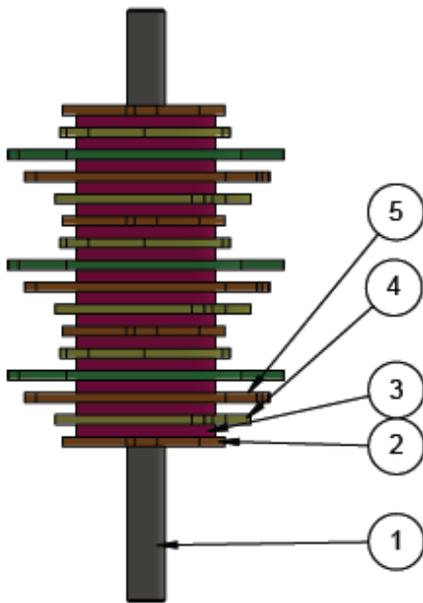
REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**TRITURADOR**



#	COMPONENTE	CANT
1	EJE	1
2	CUCHILLA 1	7
3	DISTANCIADORES	15
4	CUCHILLA 2	6
5	CUCHILLA 3	3



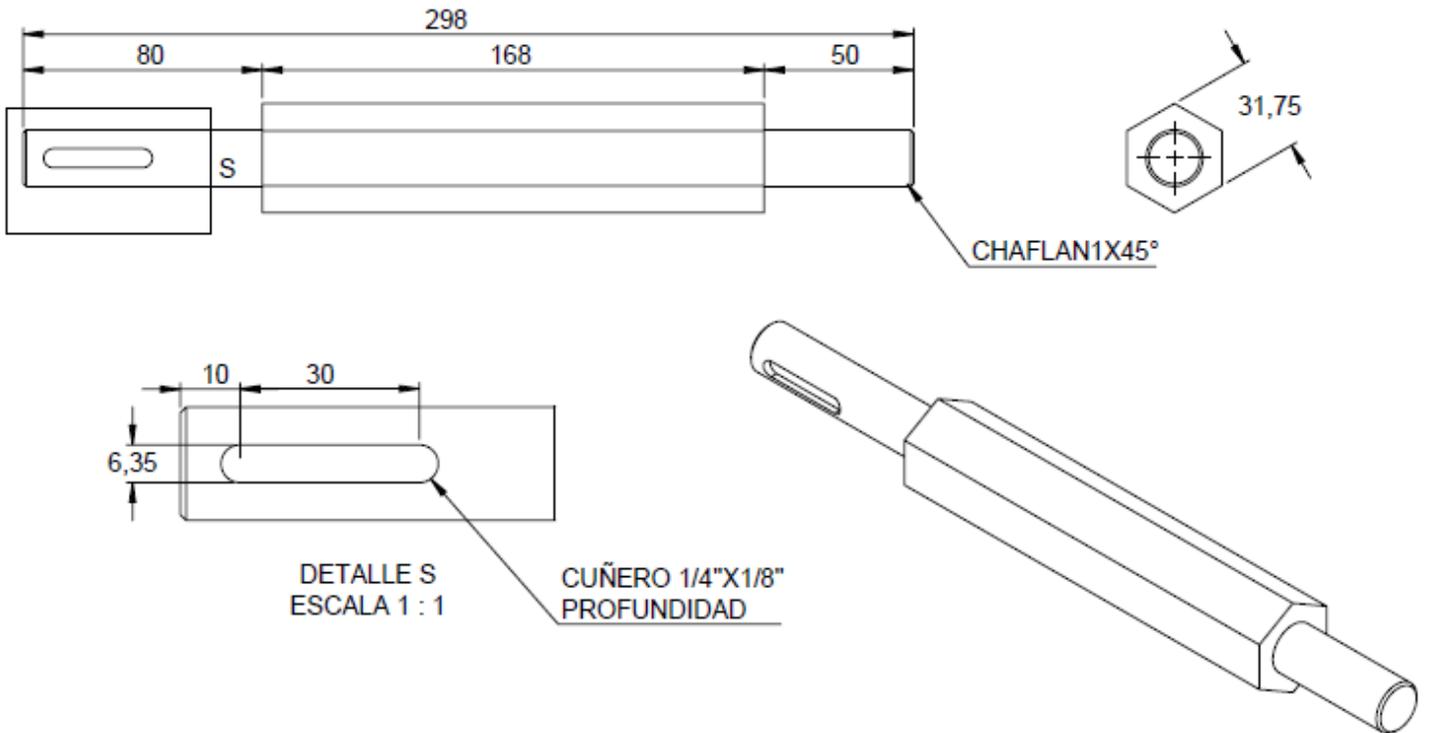
ENSAMBLAR FORMANDO  
UNA HÉLICE TENER  
EN CUENTA LOS TRES  
TIPOS DE CUCHILLA

ESCALA	1:1	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE BOQUILLA TRITURADOR

14/11/2019 8:20:01 AM

**TRITURADOR**

MATERIAL:  
ACERO HEX. 1.1/4"  
CANTIDAD: 1 X298MM



ESCALA	1:1	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE BOQUILLA TRITURADOR

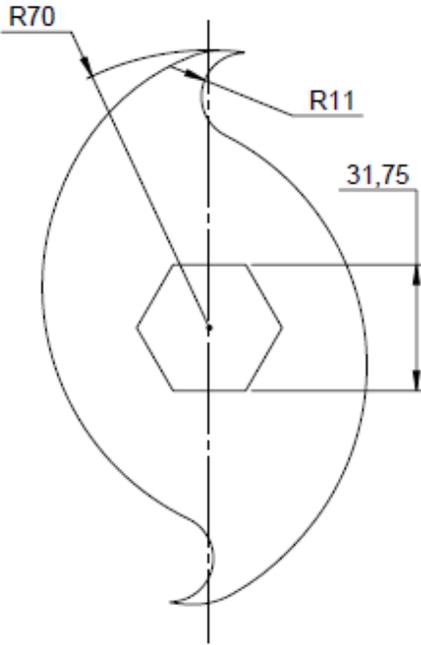
ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

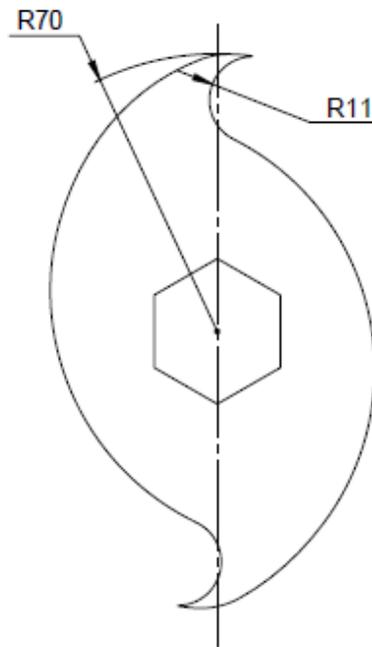
APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**TRITURADOR**

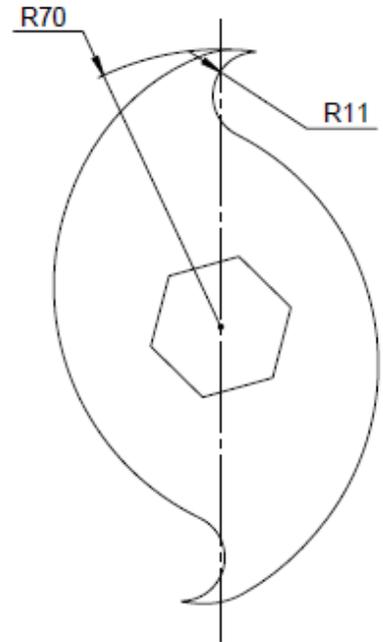
MATERIAL: LAM INOX CAL 3/16"  
CUCHILLA 1  
CANT: 7



MATERIAL: LAM INOX CAL 3/16"  
CUCHILLA 1  
CANT: 6



MATERIAL: LAM INOX CAL 3/16"  
CUCHILLA 1  
CANT: 3



ESCALA	1:1	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TITULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE BOQUILLA TRITURADOR

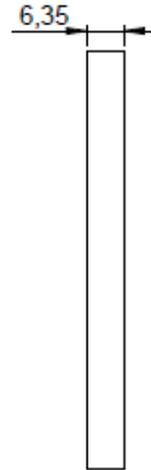
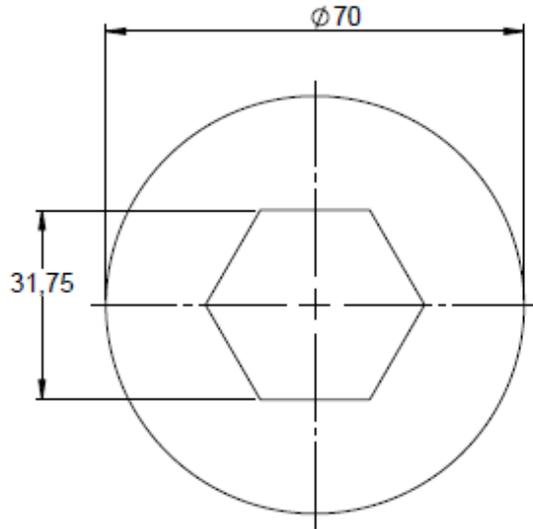
ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**TRITURADOR**

MATERIAL: LAM INOX CAL 1/4"  
DISTANCIADOR 1  
CANT: 15



ESCALA	1:1	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TITULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE BOQUILLA TRITURADOR

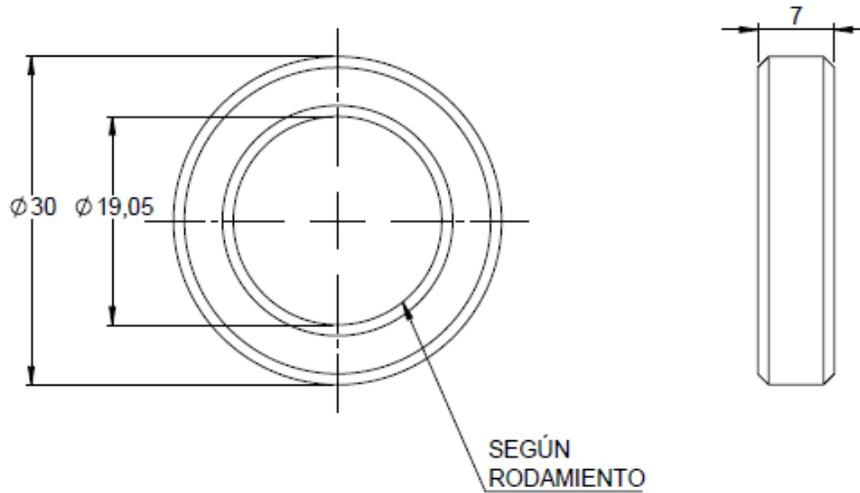
ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**TRITURADOR**

MATERIAL: ACERO RED. CAL. 1.1/4"  
CANT: 2



ESCALA	1:1	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE BOQUILLA TRITURADOR

IN. P. C. E. REV. 01 11/2019

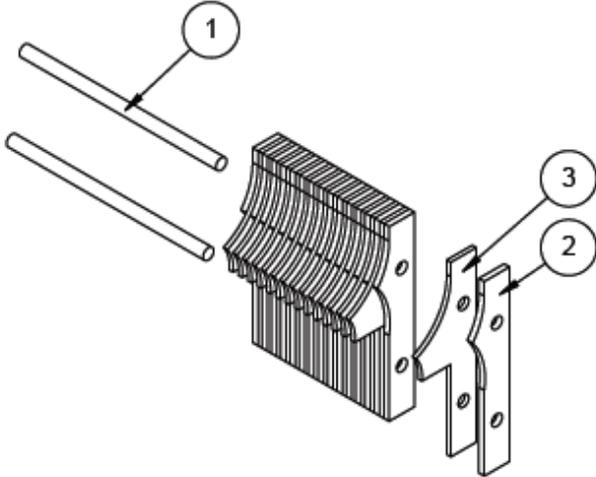
NOTA: D:\Carros\Carros\plano\triturador\_MODELO 2D\

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

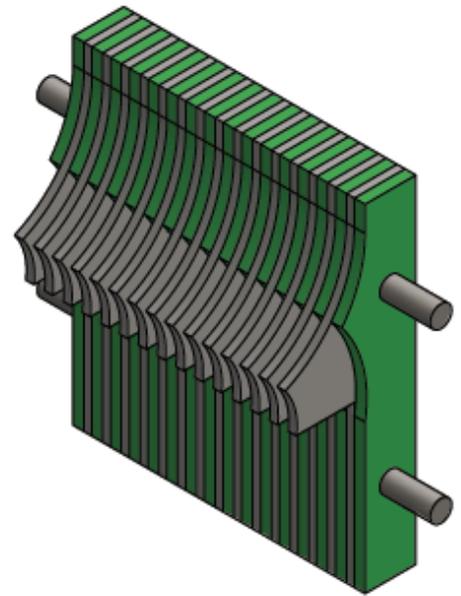
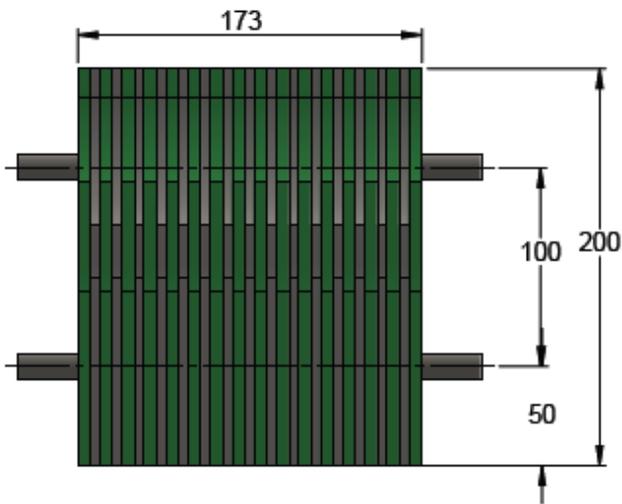
REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**TRITURADOR**



#	COMPONENTE	CANT
1	ACERO ROSCADO 1/2X233MM	2
2	CONTRCUCHILLA 1	15
3	CONTRACUCHILLA 2	16

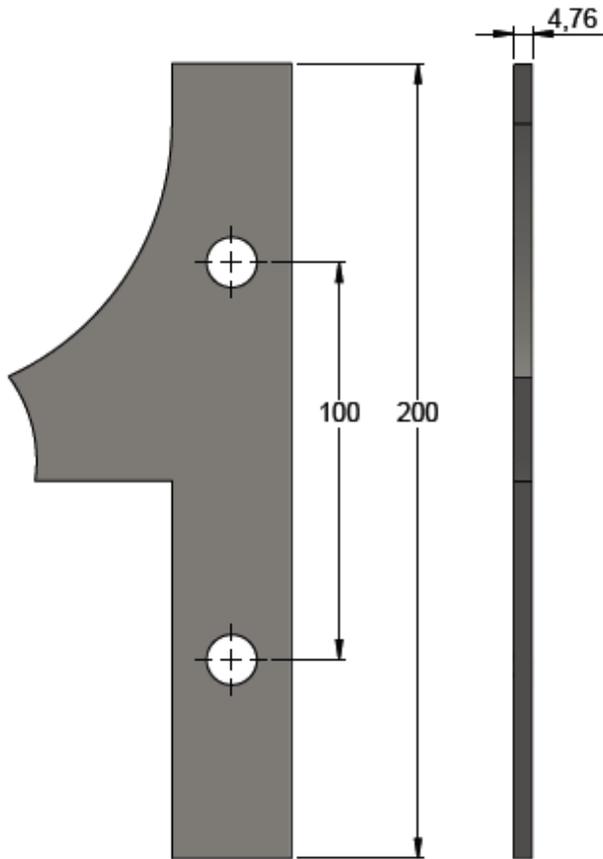


ENSAMBLAR 1 DE POR MEDIO

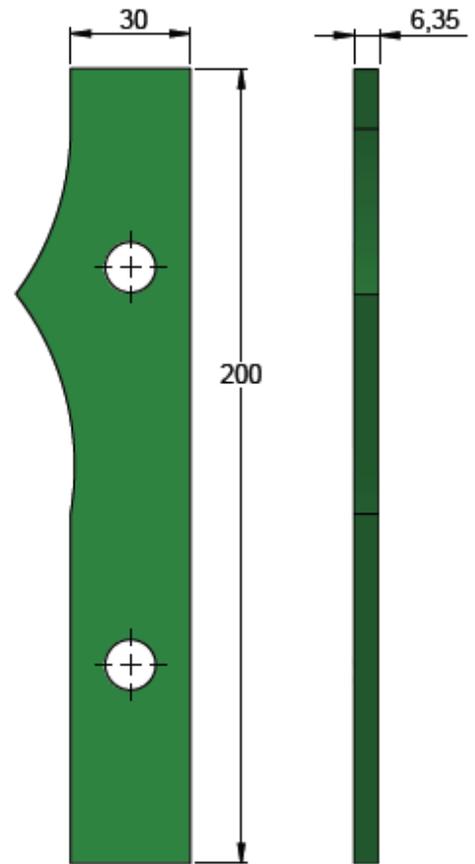
ESCALA	1:1	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE BOQUILLA TRITURADOR

**TRITURADOR**

MATERIAL: LAM INOX CAL 3/16"  
CONTRACUCHILLA 1  
CANT: 15



MATERIAL: LAM INOX CAL 1/4"  
CONTRACUCHILLA 2  
CANT: 16



ESCALA	1:1	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE BOQUILLA TRITURADOR

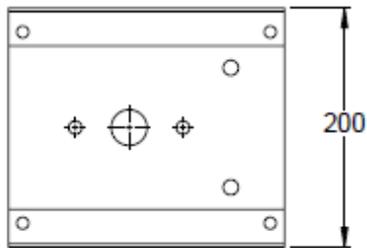
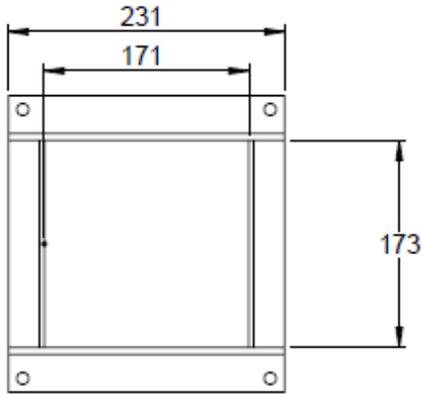
IN. 17.002 REV. 01 FEBR 2018

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

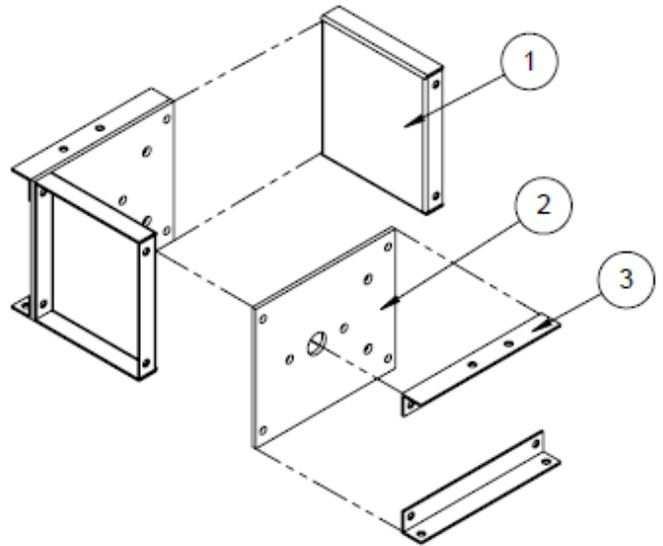
REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**TRITURADOR**



#	COMPONENTE	CANT.
1	TAPA POSTERIOR	2
2	LATERALES	2
3	ANGULOS DE SOPORTE	4



ESCALA	1:7	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TITULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE COMPLETO TRITURADOR

137-DC-95 - REV. 01 - 11/2019

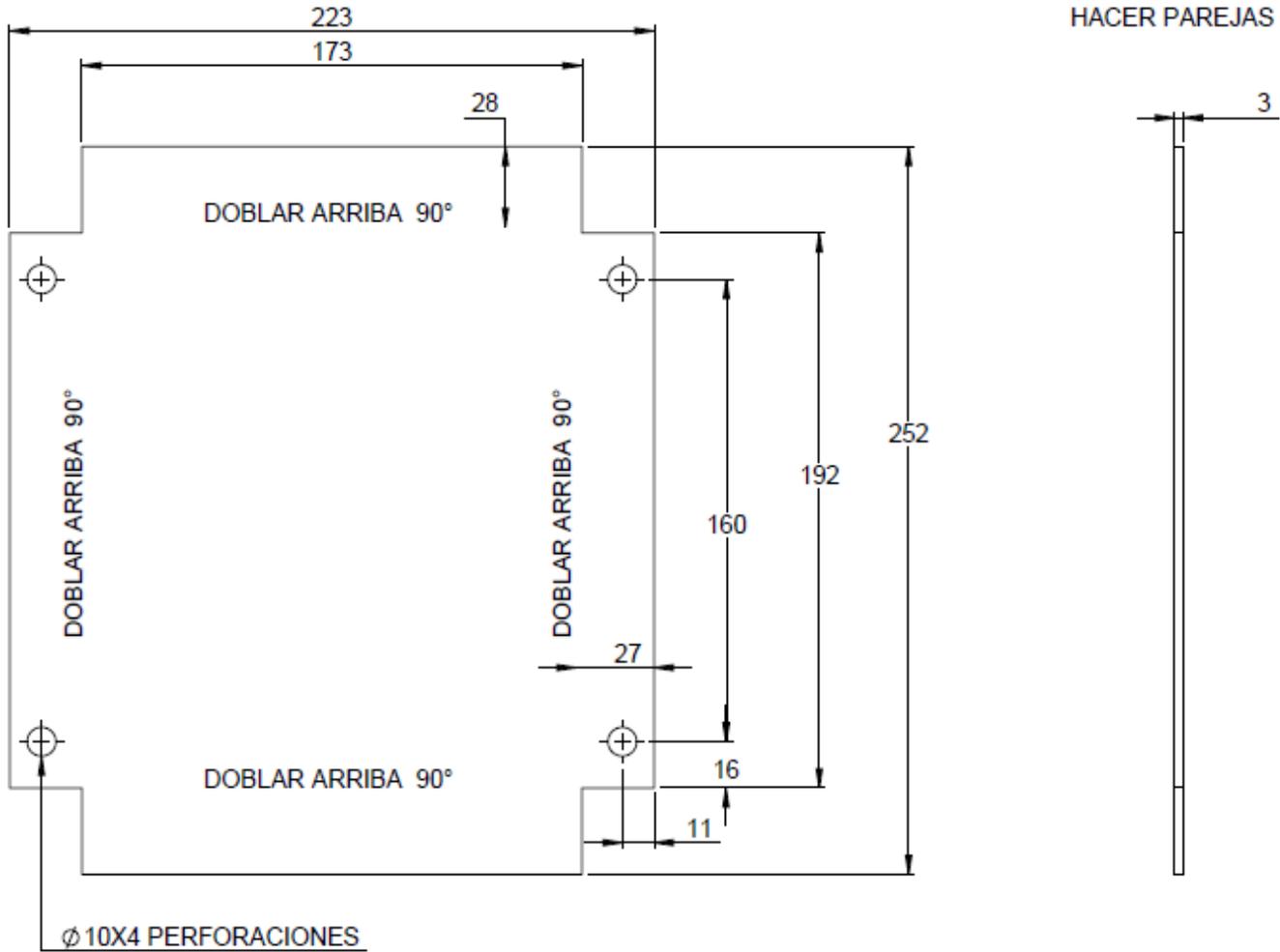
ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**TRITURADOR**

LAM INOX CAL 10  
CANT: 2  
HACER PAREJAS



ESCALA	1:7	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE COMPLETO TRITURADOR

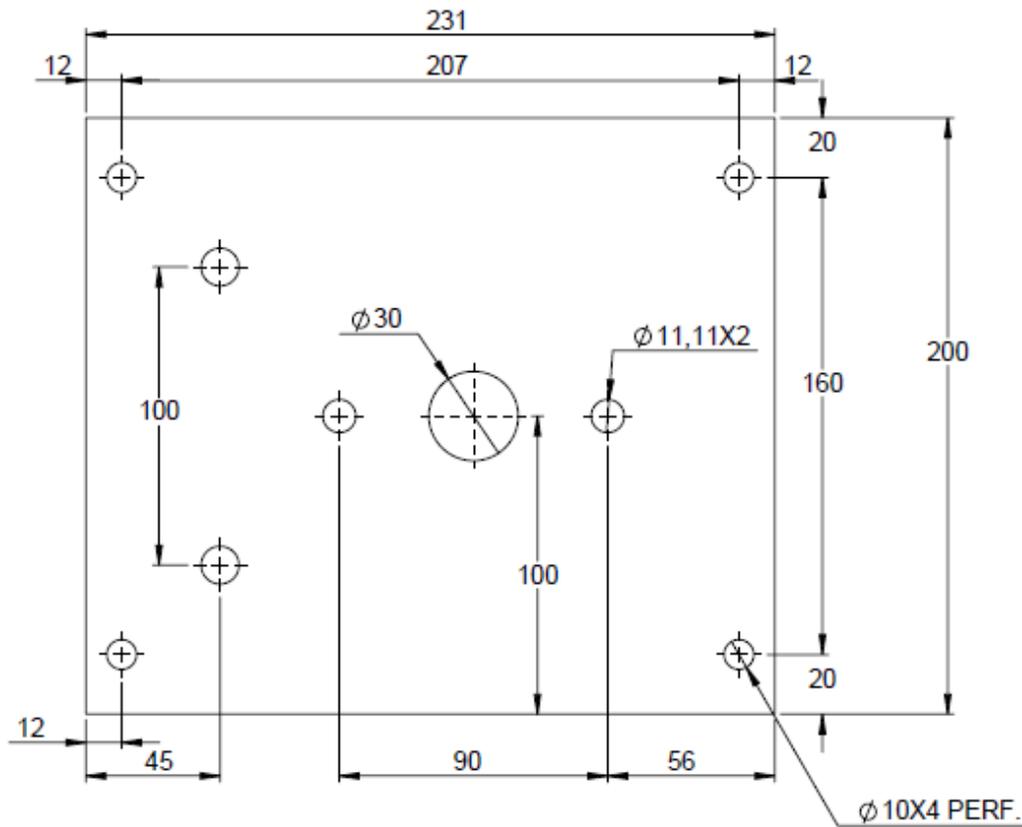
ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**TRITURADOR**

LAM INOX CAL 10  
CANT: 2



ESCALA	1:7	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TITULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE COMPLETO TRITURADOR

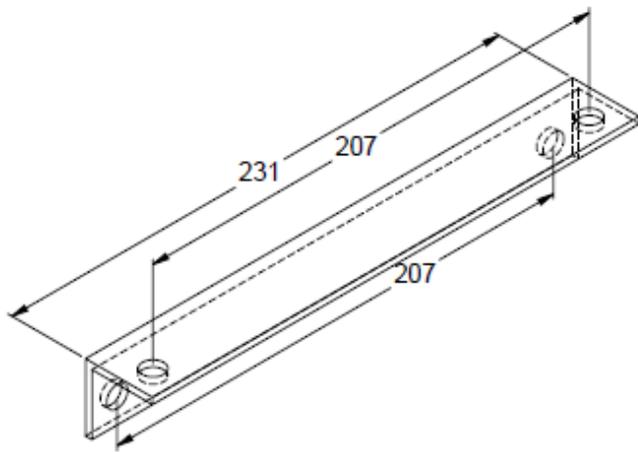
ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

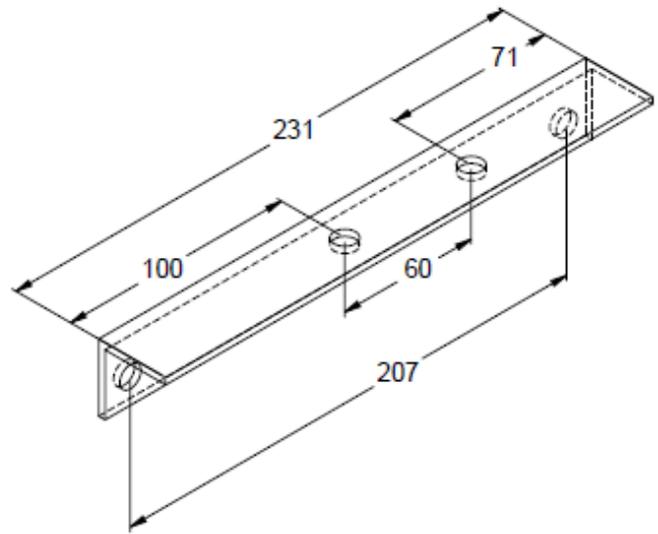
APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**TRITURADOR**

ANGULO CR 1/8X1.1/4"  
CANT: 2



ANGULO CR 1/8X1.1/4"  
CANT: 2  
HACER PAREJA



ESCALA	1:7	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TITULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE COMPLETO TRITURADOR

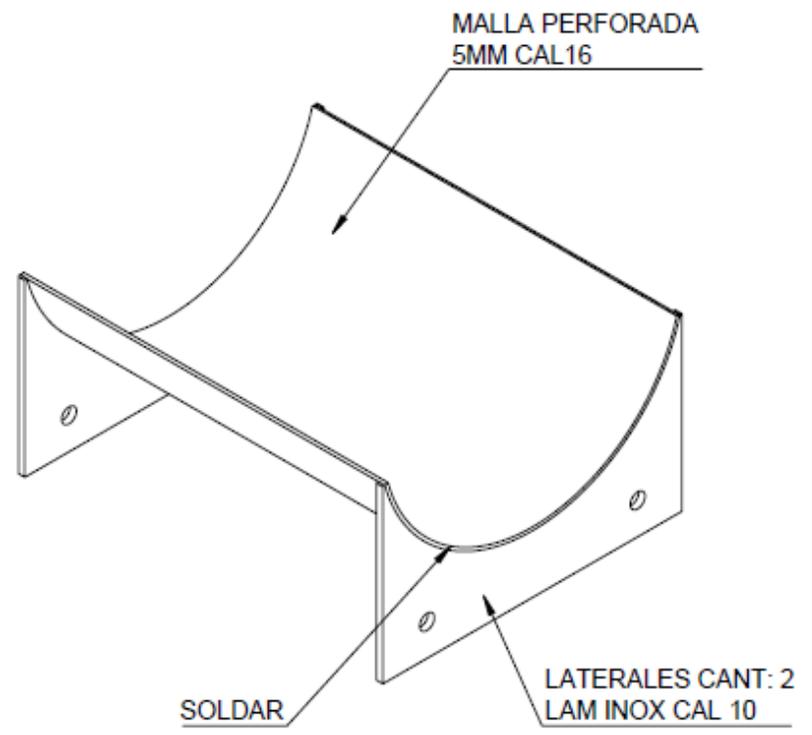
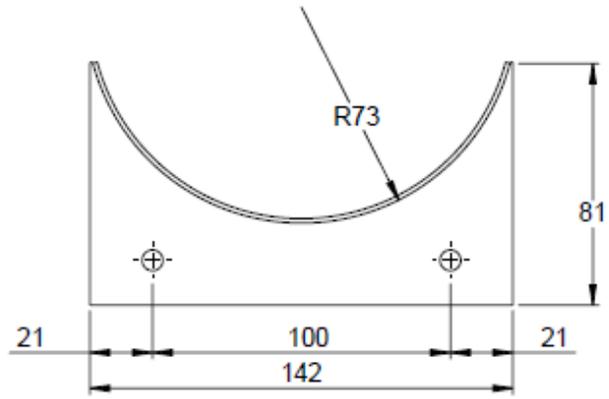
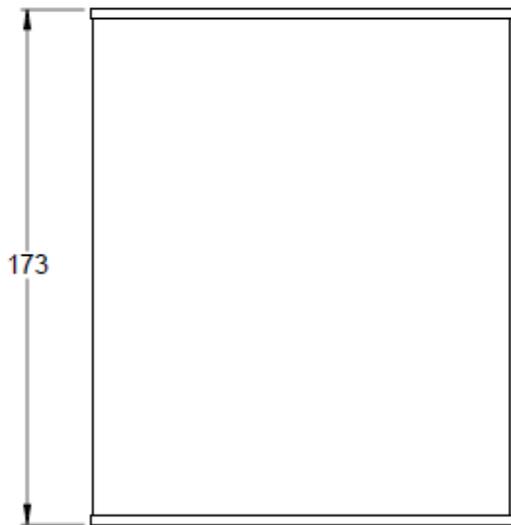
18/11/2019 10:05:11

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**TRITURADOR**



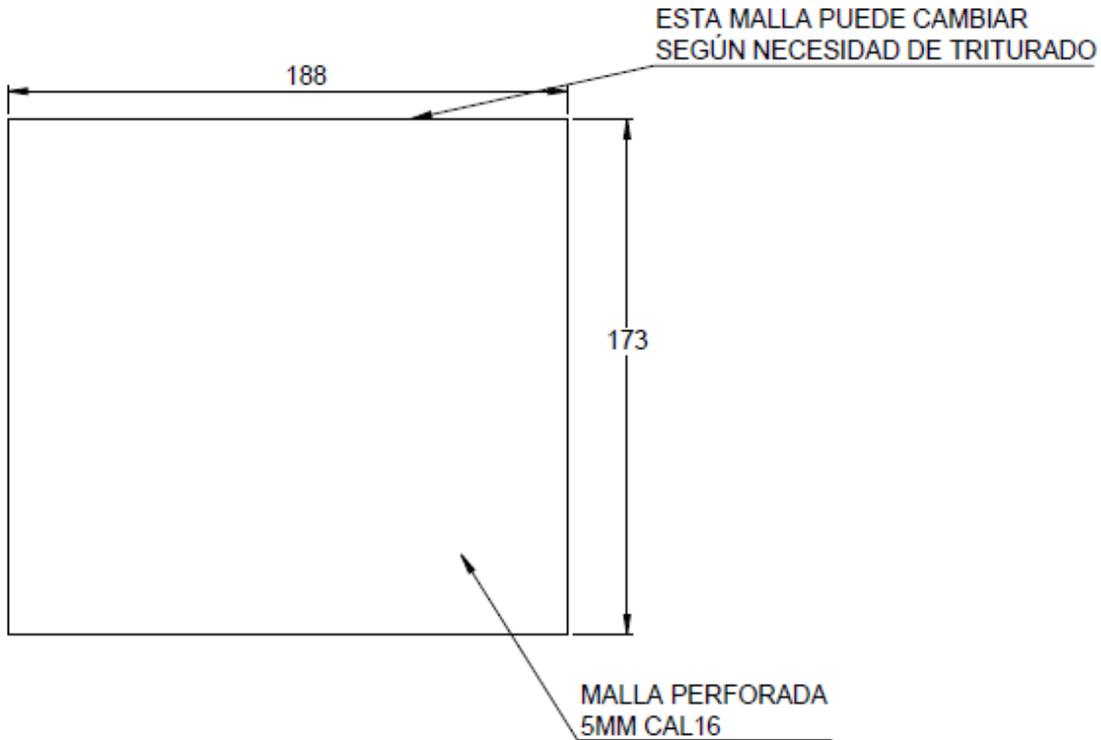
ESCALA	1:7	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TITULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE COMPLETO TRITURADOR

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**TRITURADOR**



ESCALA	1:7	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE COMPLETO TRITURADOR

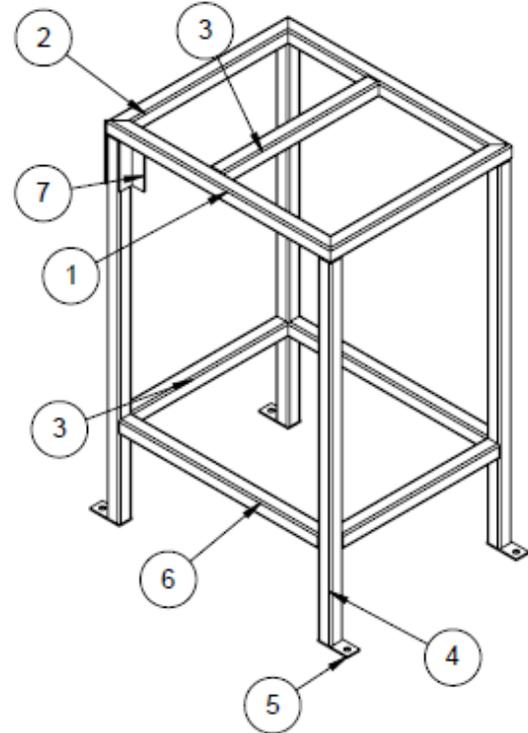
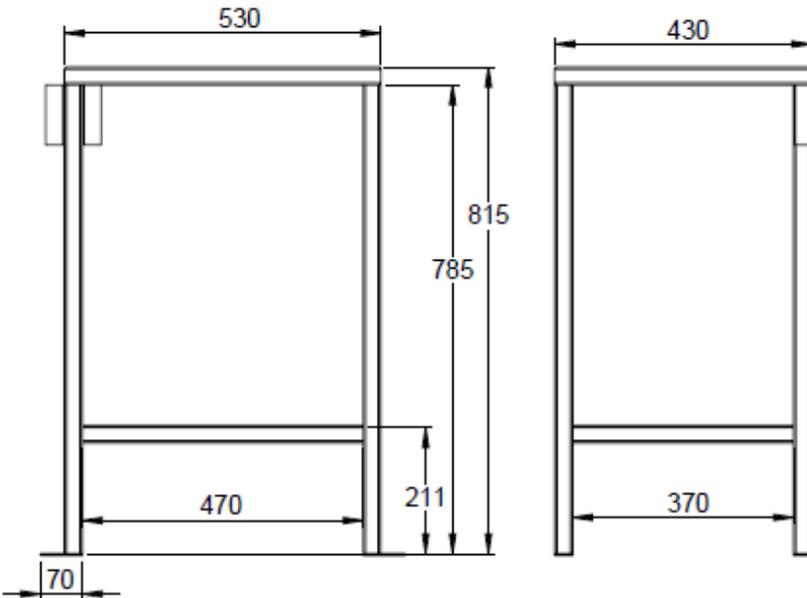
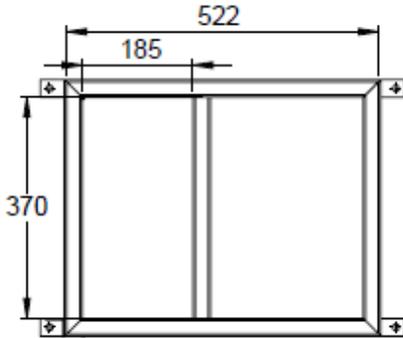
IMP. PÁG. 142 DE 160

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**TRITURADOR**



N.º	CANT.	DESCRIPCIÓN	LONGITUD
1	2	TUBO 30X30X3	530
2	2	TUBO 30X30X3	430
3	3	TUBO 30X30X3	370
4	4	TUBO 30X30X3	785
5	4	PLATINA 1/1/4"X1/8"X70MM	
6	2	TUBO 30X30X3	470
7	2	ANG. 1.1/4"X1/8"X100MM	

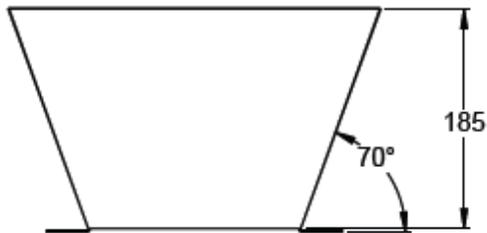
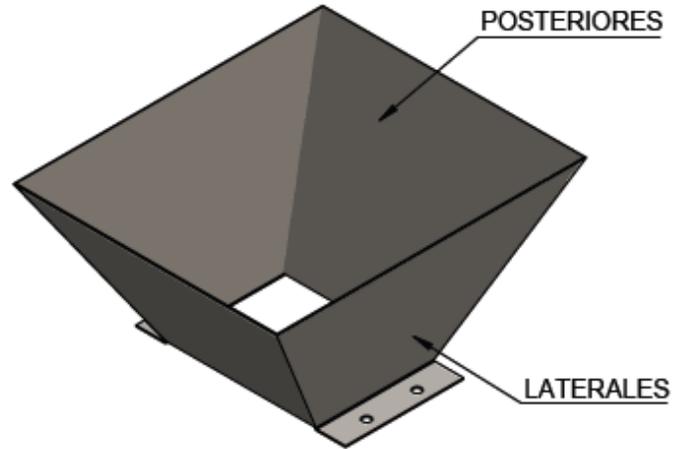
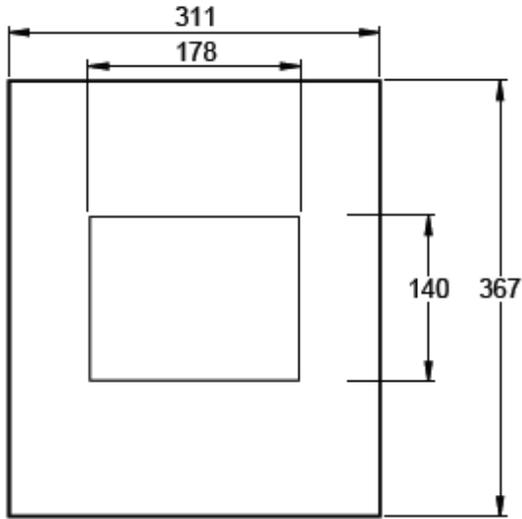
ESCALA	1:1	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE COMPLETO TRITURADOR

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**TRITURADOR**



ESCALA	1:7	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE COMPLETO TRITURADOR

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

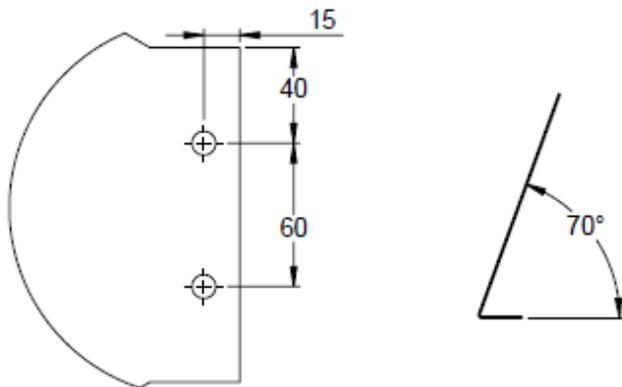
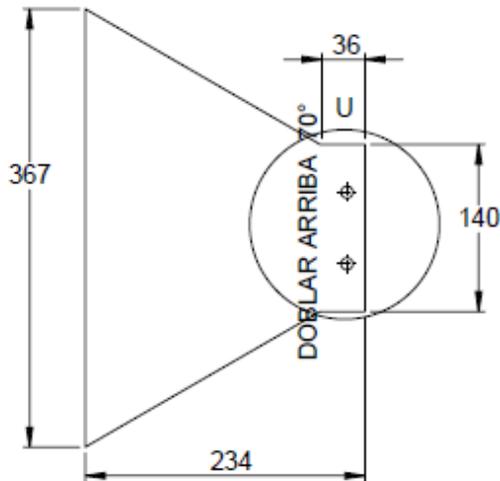
REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

IMP. 048 E.N. 11/02/2019

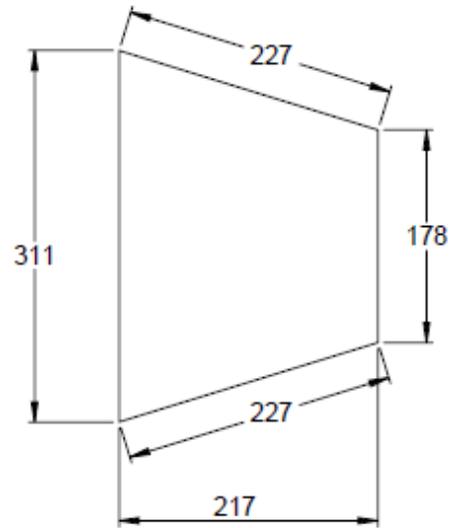
**TRITURADOR**

LAM CAL 18  
CANTIDAD 2



DETALLE U  
ESCALA 2 : 5

LAM CAL 18  
CANTIDAD 2



ESCALA	1:7	PROCESO:	VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:	
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE COMPLETO TRITURADOR	

UN. DC. 95 - REV. 01 - 11/09/2019

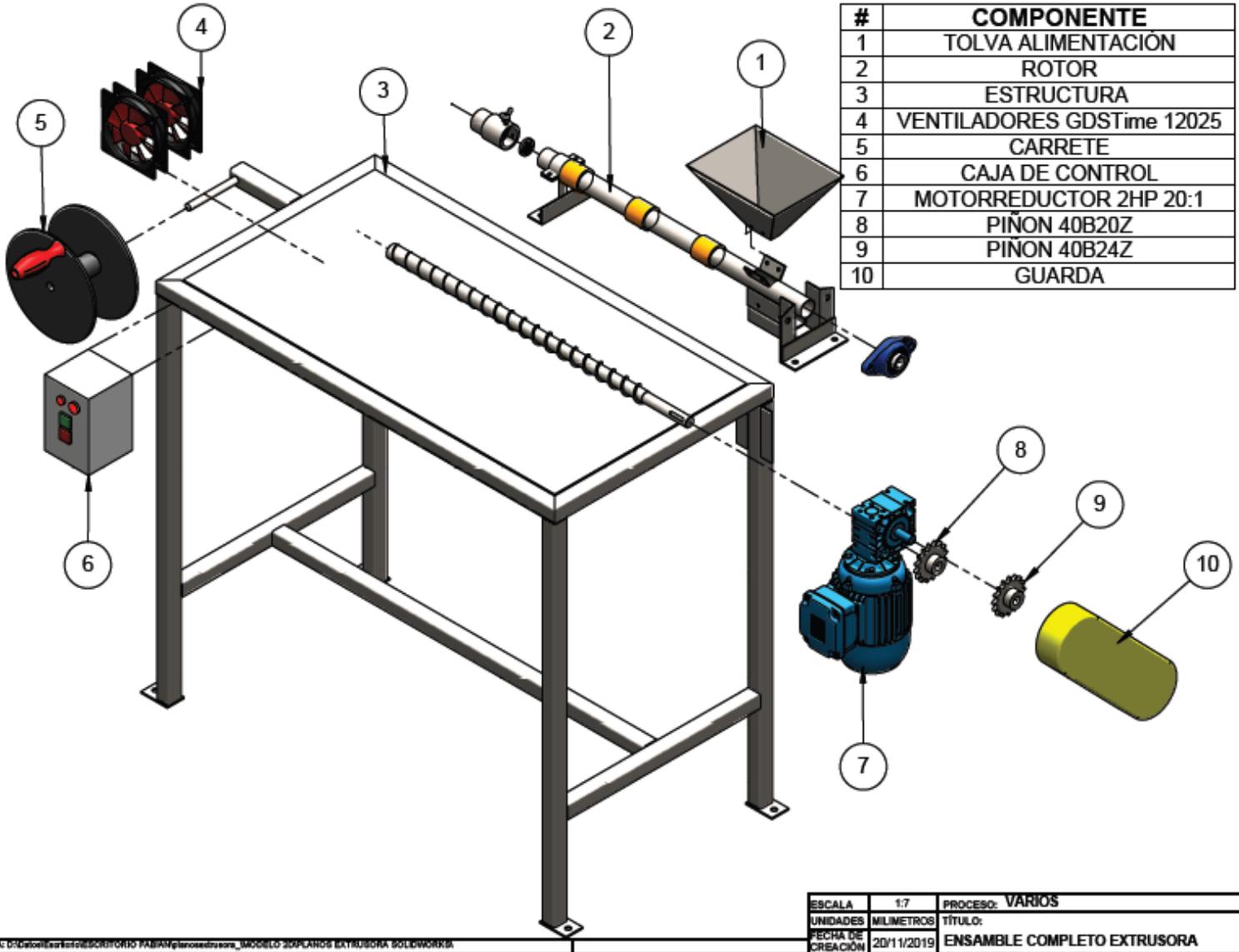
ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

### Anexo C. Planos de la extrusora

#### EXTRUSORA DE PLÁSTICO



ESCALA	1:7	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE COMPLETO EXTRUSORA

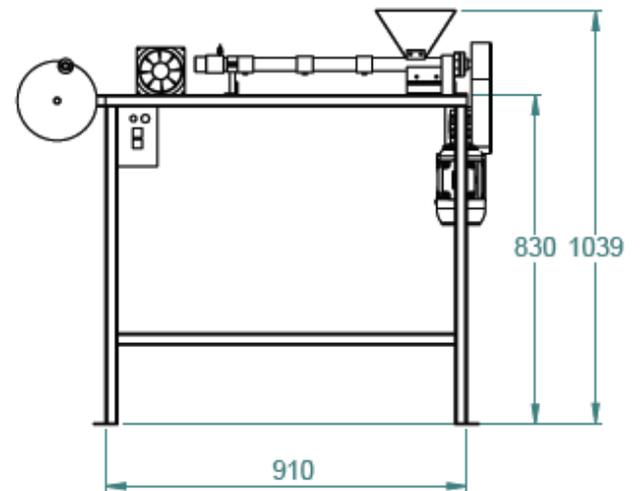
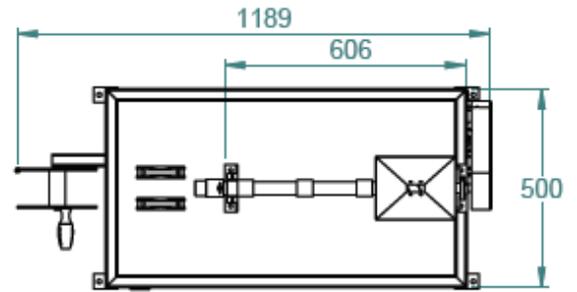
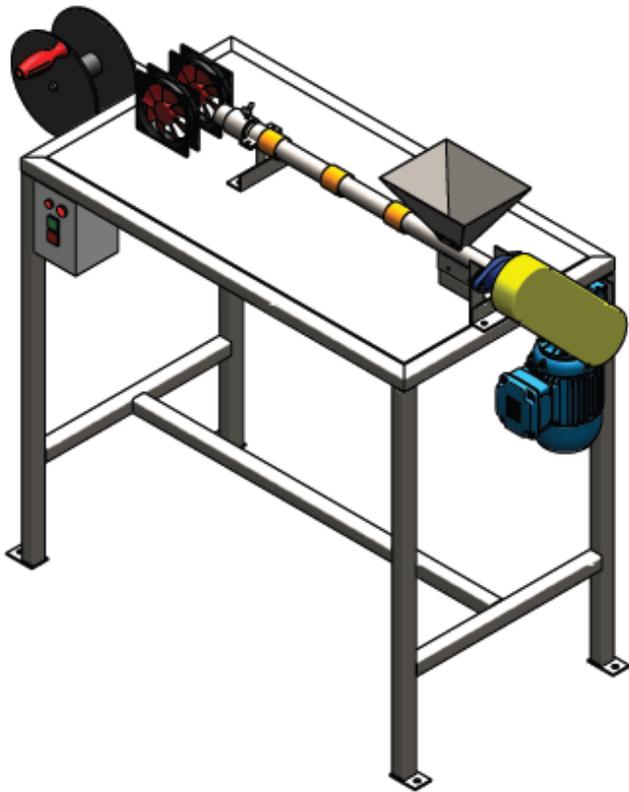
IM-10-02 REV. 01 11/03/2015

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**EXTRUSORA DE PLÁSTICO**



ESCALA	1:7	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE COMPLETO EXTRUSORA

147 DE 160

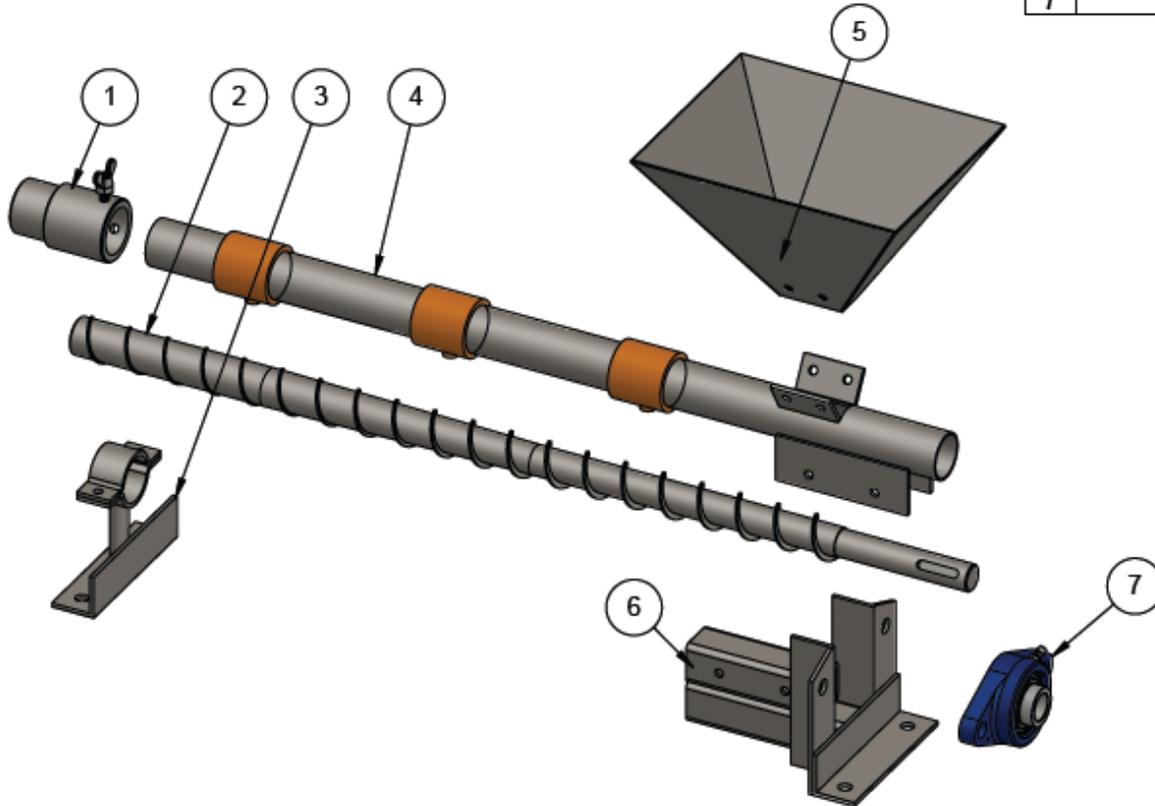
ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**EXTRUSORA DE PLÁSTICO**

#	COMPONENTE
1	BOQUILLA
2	ROTOR EXTRUSOR
3	SOPORTE TUBO 1
4	TUBO EXTRUSOR
5	TOLVA RECEPCIÓN
6	SOPORTE TUBO 2
7	CHUMACERA SY 3/4"



ESCALA	1:4	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE ROTOR EXTRUSOR

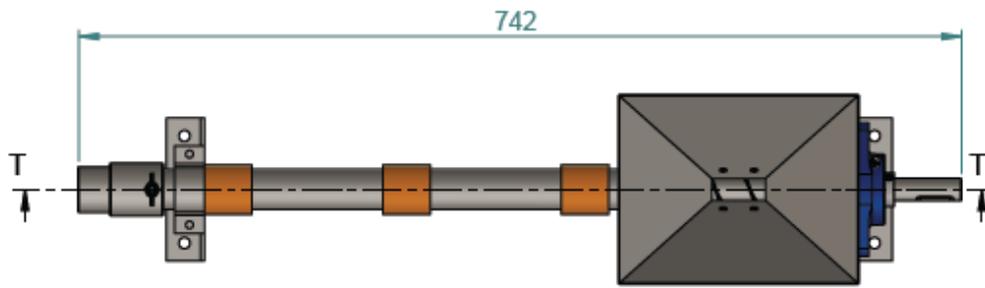
ROYAL D:\Cobol\Car\trabajo\PROYECTO TAB\AN\planos\extrusora\_MODELO 20 PLANOS EXTRUSORA SOLIDWORKS

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

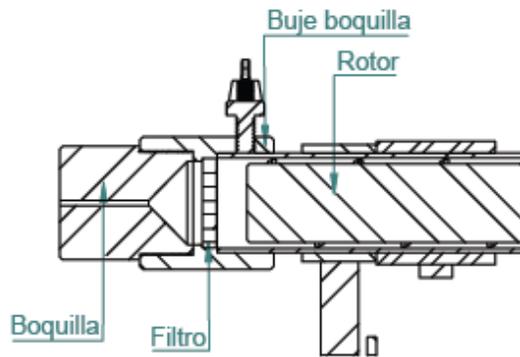
REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**EXTRUSORA DE PLÁSTICO**



SECCIÓN T-T  
ESCALA 1 : 5



DETALLE U  
ESCALA 1 : 2

ESCALA	1:4	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE ROTOR EXTRUSOR

14-10-2019 REV: 01 14/10/2019

MUYAC D:\Cursos\extrusora\PROYECTO FABIAN\planos\ensamblaje\_MODELO 2D\PLANOS EXTRUSORA SOLIDWORKS

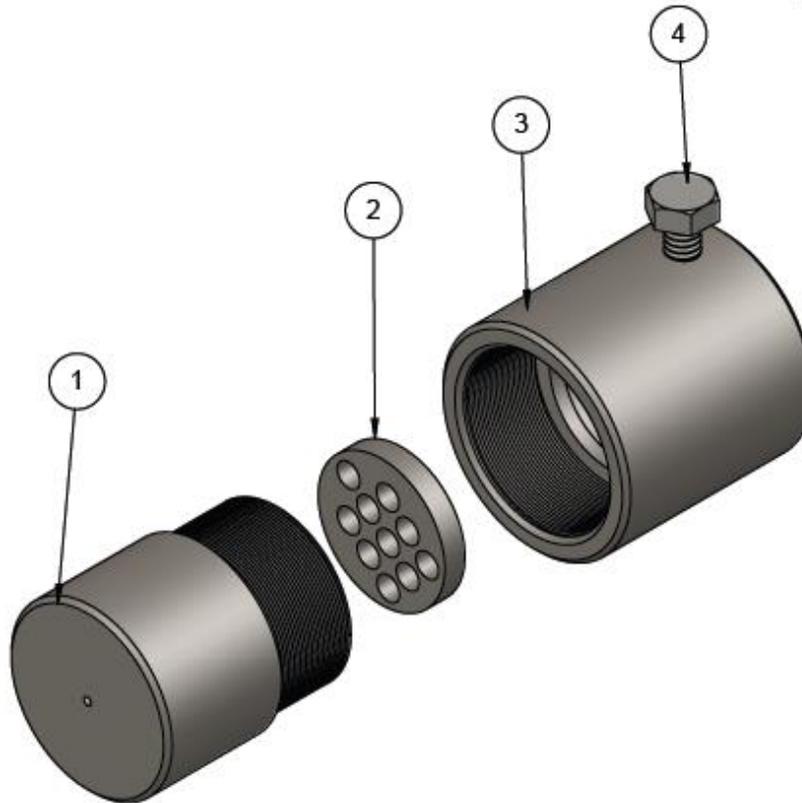
ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**EXTRUSORA DE PLÁSTICO**

#	COMPONENTE
1	BOQUILLA
2	FILTRO BOQUILLA
3	BUJE BOQUILLA
4	TORN. MAQ. 1/4" x 3/4"



ESCALA	1:1	PROCESO: VARIOS
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ENSAMBLE BOQUILLA EXTRUSORA

15.10.2019 15:01 15/10/2019

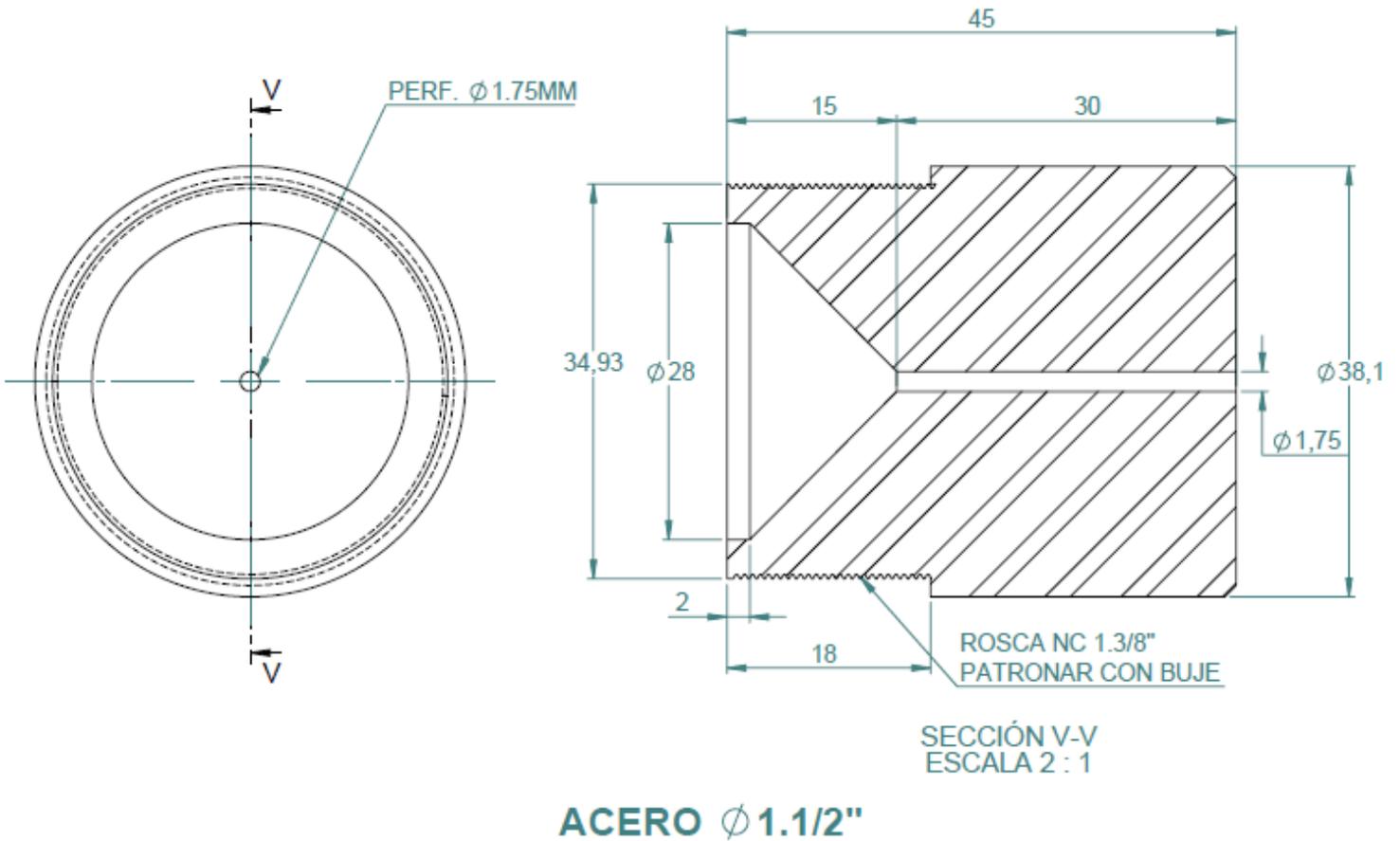
MUYAC D:\Cursos\extrusora\PROYECTO FABIAN\planos\extrusora\_MODELO 20 PLANOS EXTRUSORA.SOLIDWORKS

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**EXTRUSORA DE PLÁSTICO**



SECCIÓN V-V  
ESCALA 2 : 1

ACERO Ø 1.1/2"

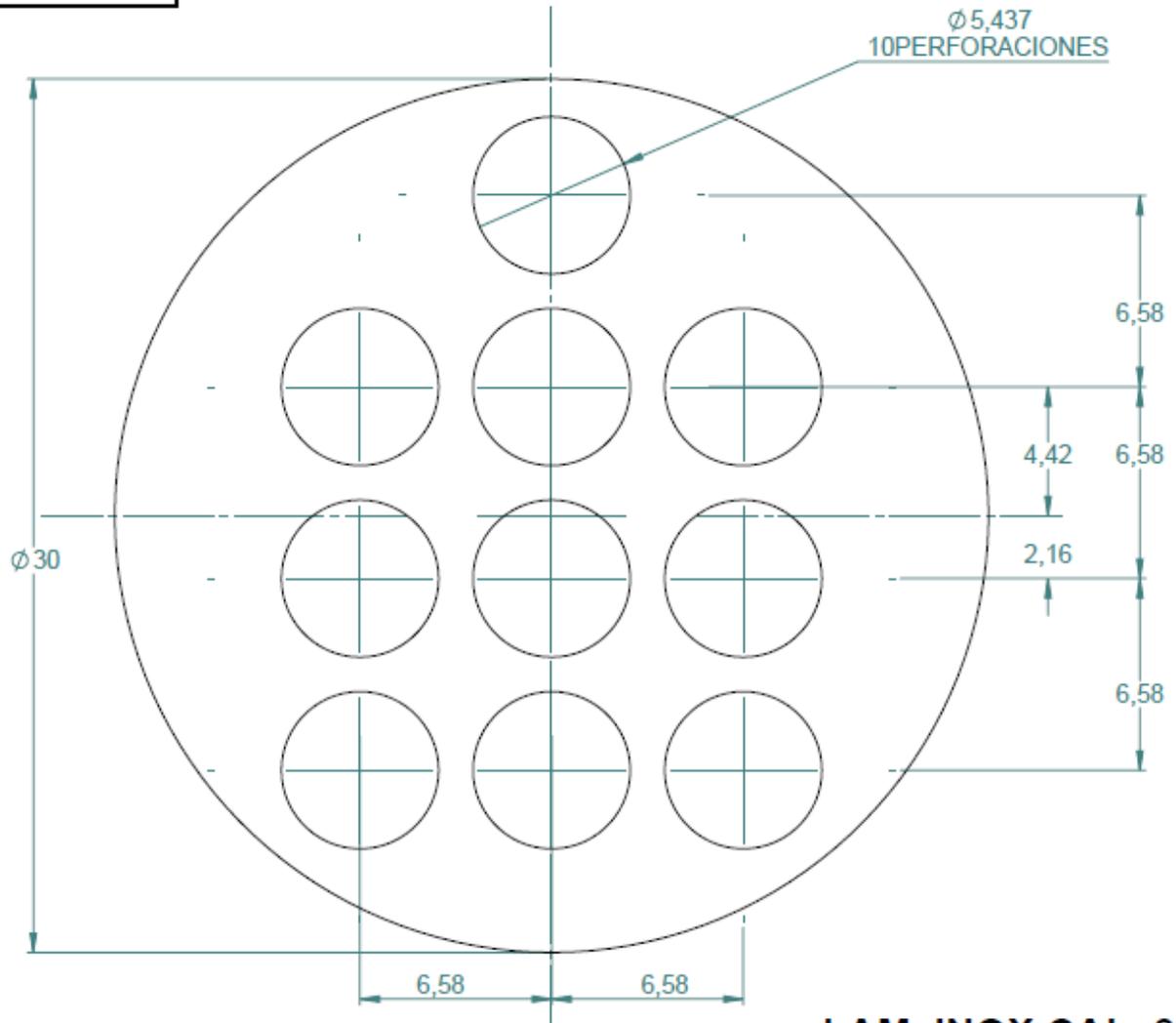
ESCALA	3:1	PROCESO:	MECANIZADO
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:	
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019		BOQUILLA MECANIZADO

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**EXTRUSORA DE PLÁSTICO**



**LAM. INOX CAL. 3/16"**

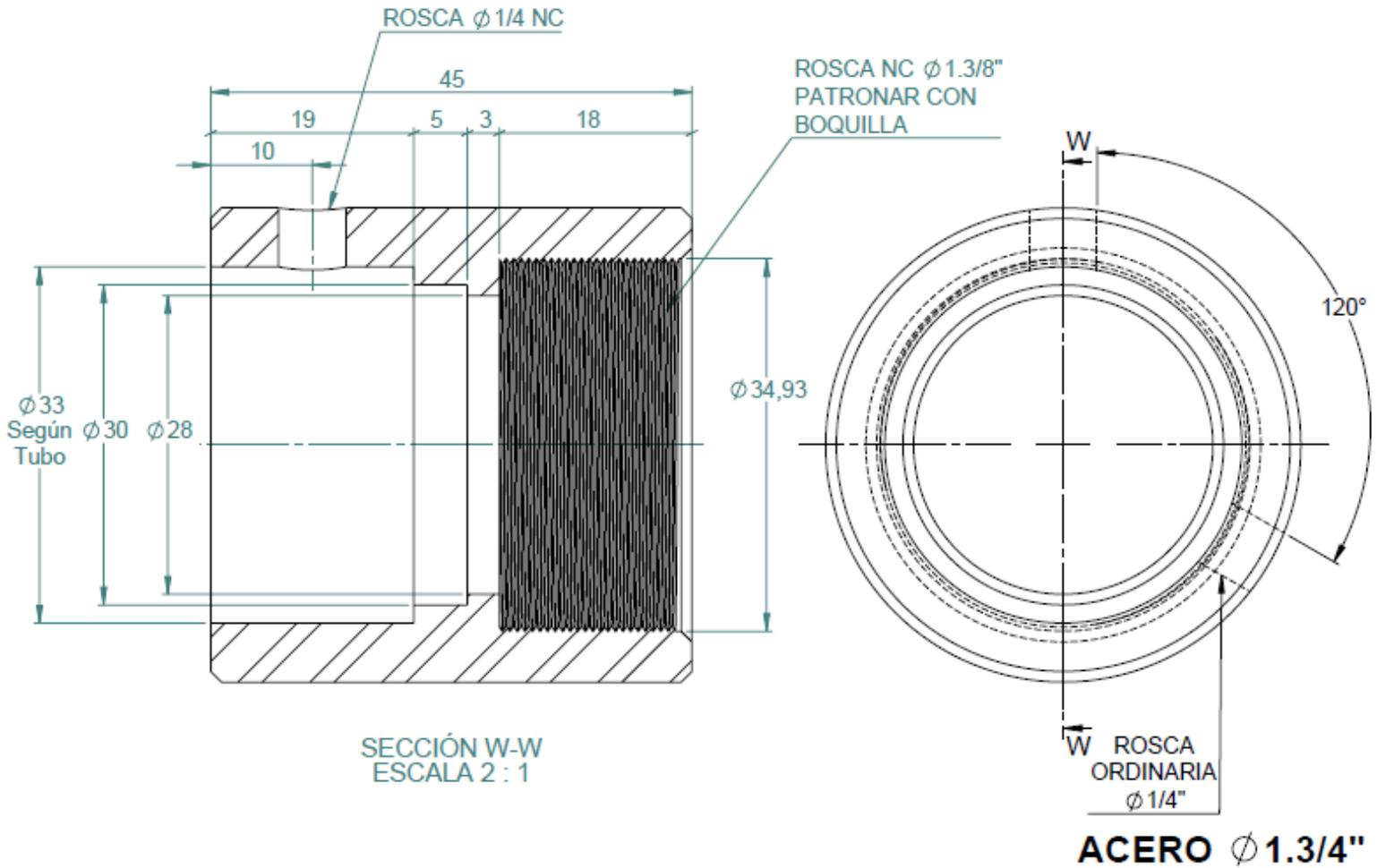
ESCALA	5:1	PROCESO:	MECANIZADO
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:	
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019		FILTRO BOQUILLA EXTRUSORA

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**EXTRUSORA DE PLÁSTICO**



ESCALA	3:1	PROCESO:	MECANIZADO
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:	
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	BUJE BOQUILLA EXTRUSORA	

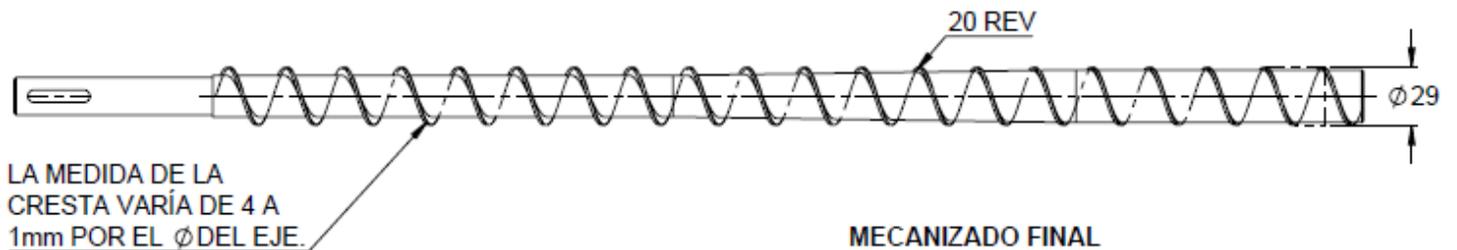
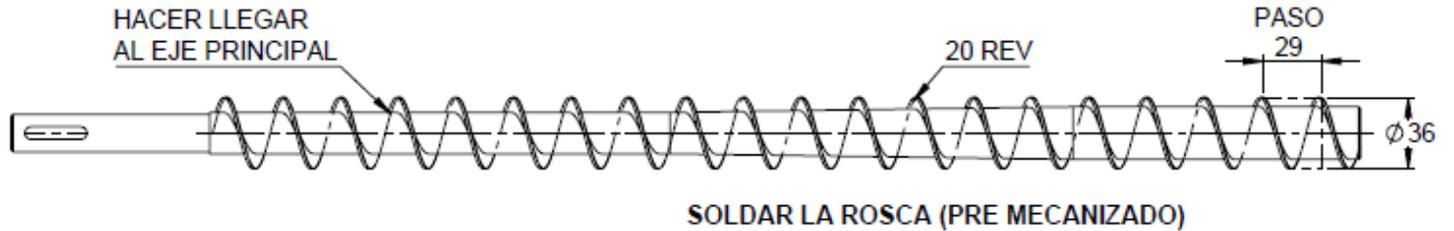
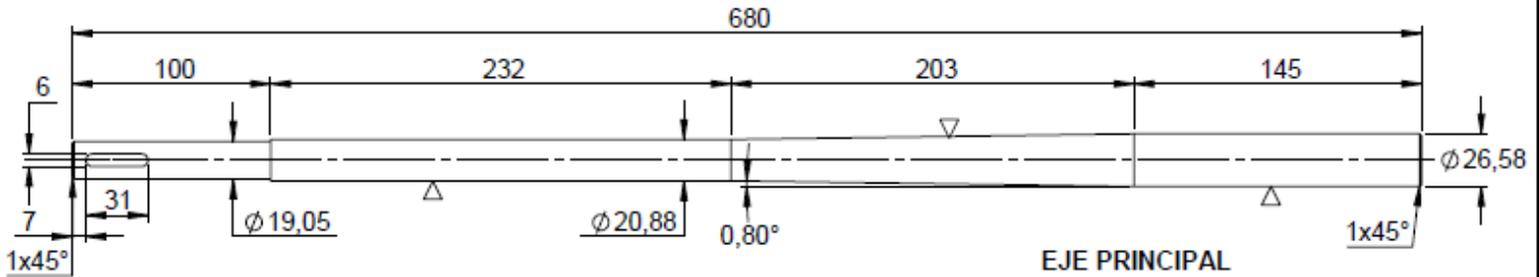
19.11.2019 - REV. 01 - 10/09/2019

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**EXTRUSORA DE PLÁSTICO**



**ACERO AISI 4140  $\phi$  1.1/8"**

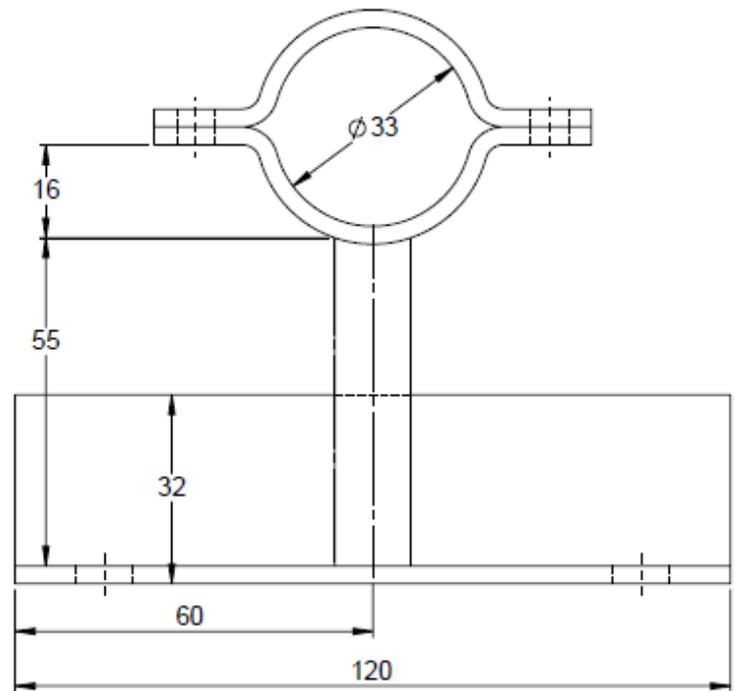
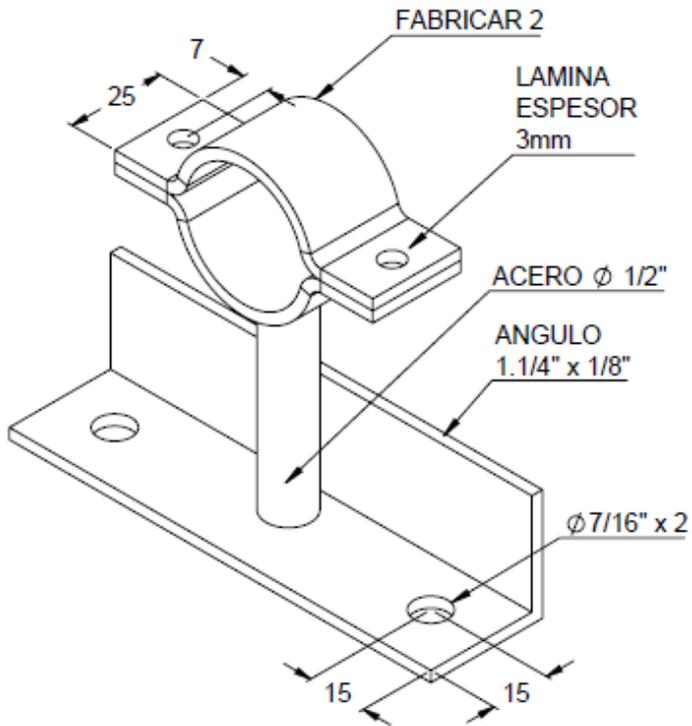
ESCALA	1:3	PROCESO:	MECANIZADO
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:	
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	EJE ROTOR EXTRUSOR	

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**EXTRUSORA DE PLÁSTICO**



ESCALA	1:1	PROCESO: ENSAMBLE
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	SOPORTE TUBO EXTRUSOR 1

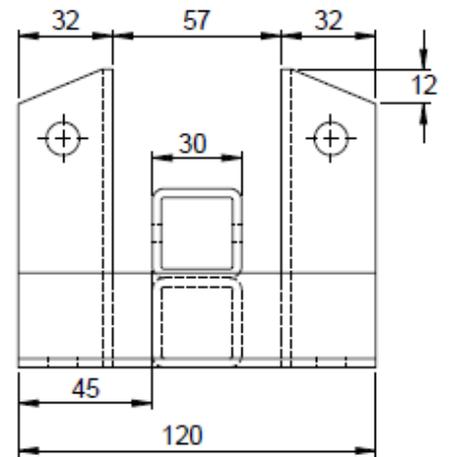
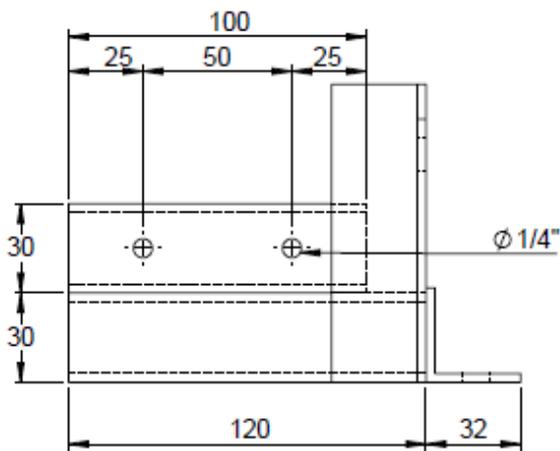
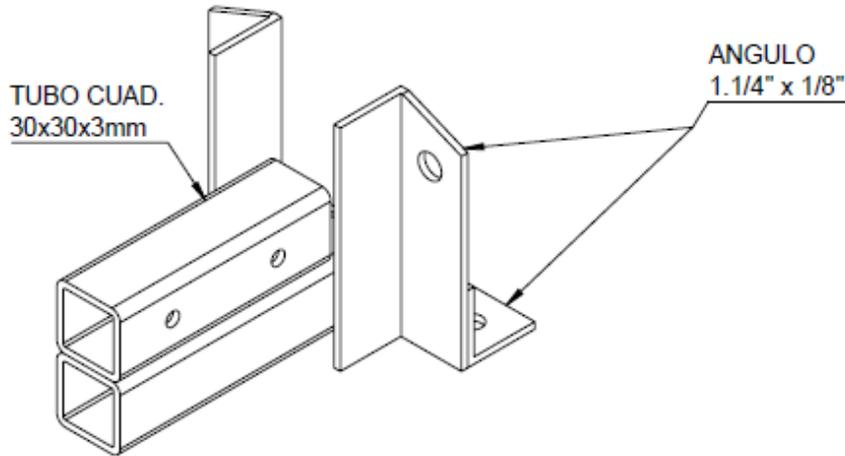
IMPRESO EN: 01/11/2019

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**EXTRUSORA DE PLÁSTICO**



ESCALA	1:2	PROCESO:	ENSAMBLE
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:	
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	SOPORTE TUBO EXTRUSOR 2	

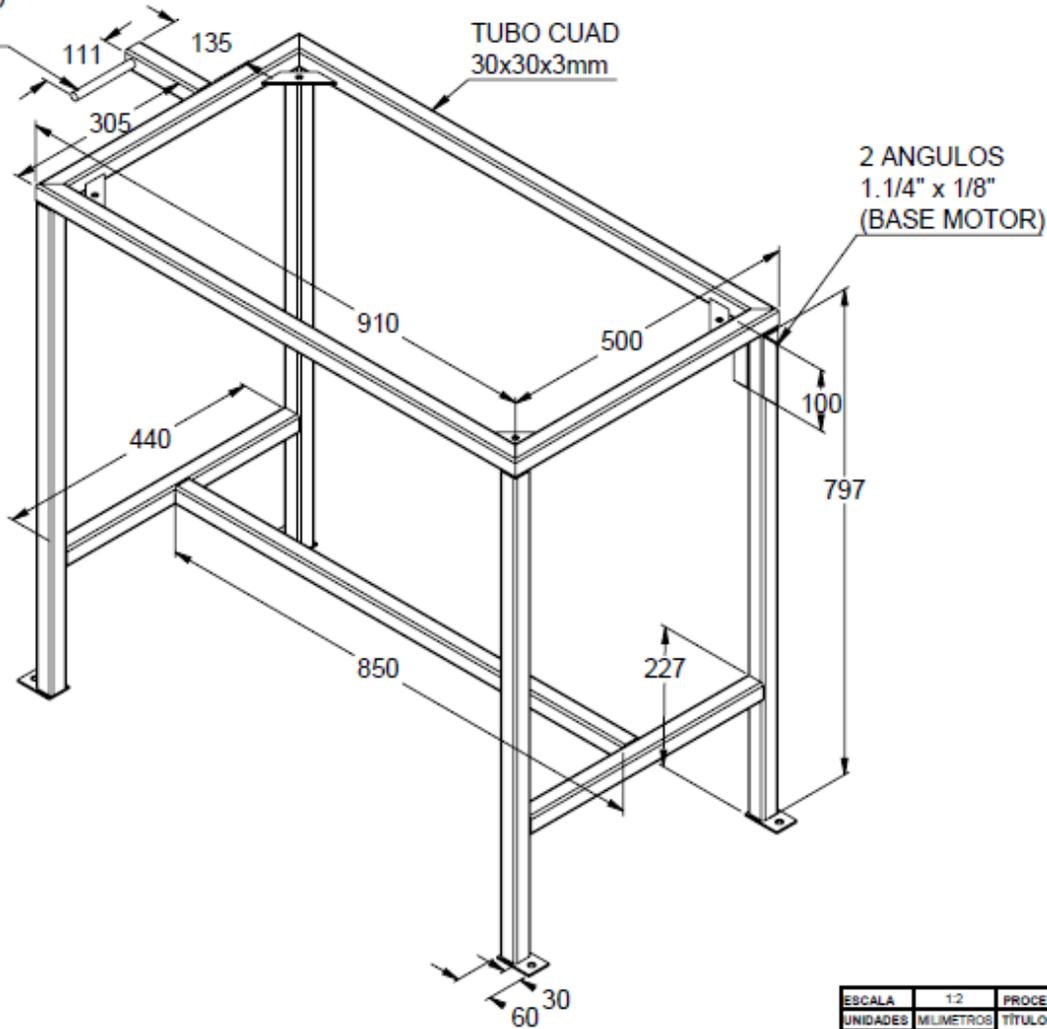
ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**EXTRUSORA DE PLÁSTICO**

ACERO  
ROSCADO  
Ø 1/2"



TUBO 30x30x3mm

#	MEDIDA (mm)	CANT
1	610	2
2	500	2
3	550	1
4	440	2
5	797	4
6	135	1

ESCALA	1:2	PROCESO:	ENSAMBLE
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:	
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	ESTRUCTURA PRINCIPAL	

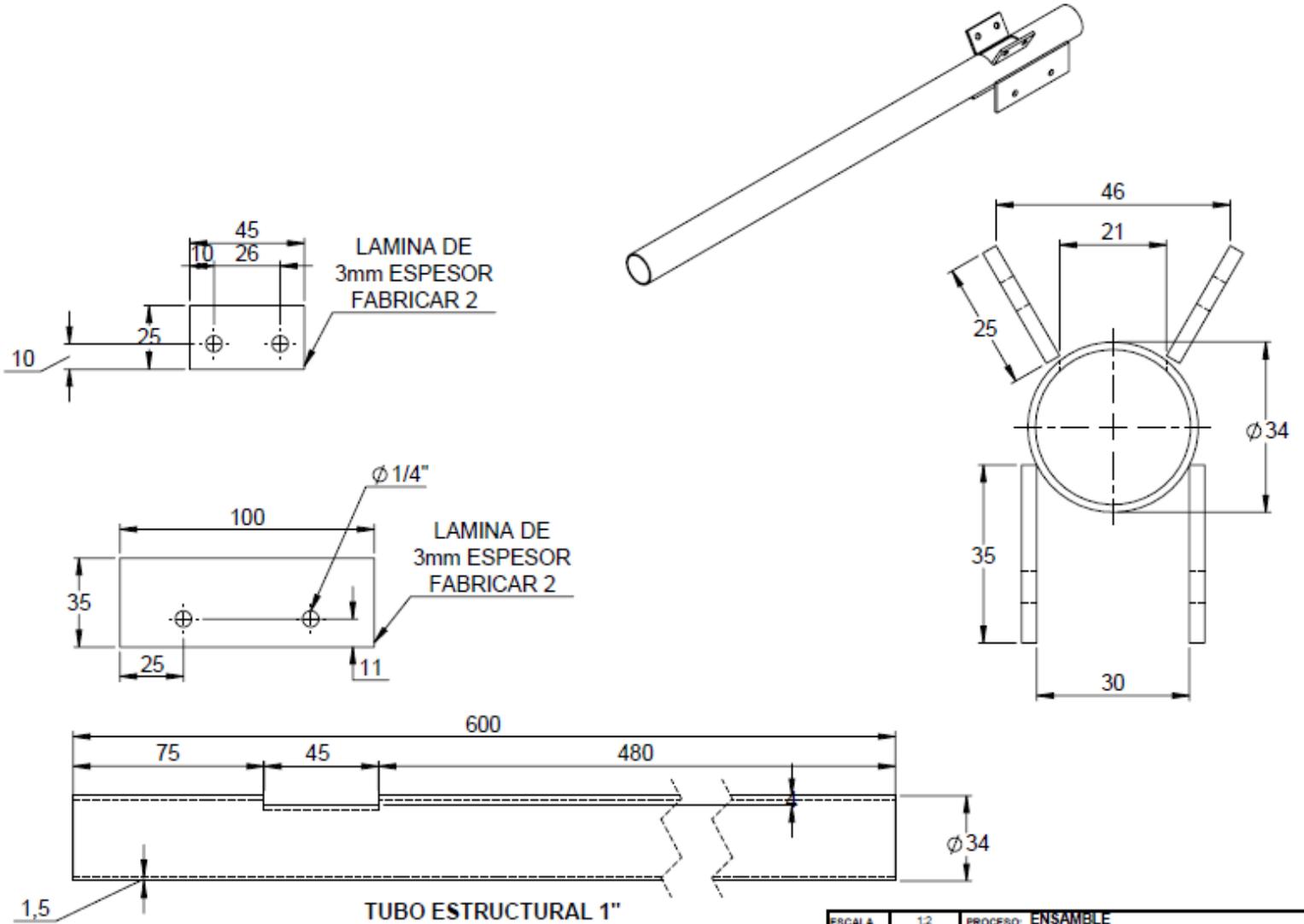
18.11.19 10:01 11.09.2019

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**EXTRUSORA DE PLÁSTICO**



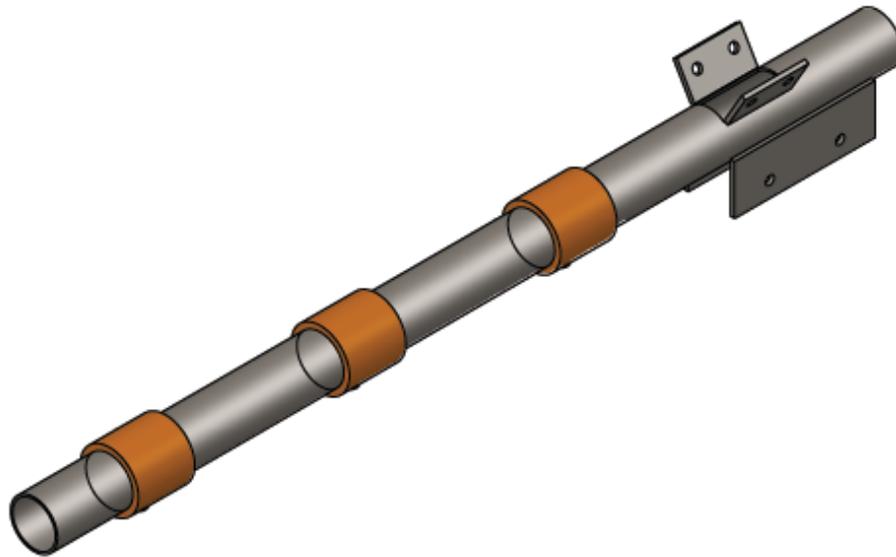
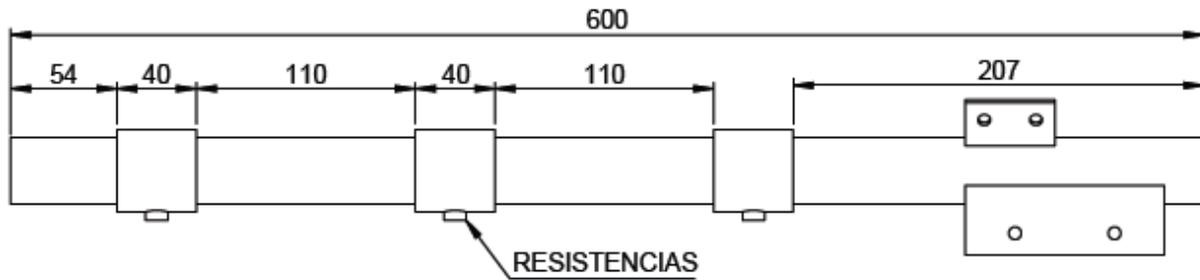
ESCALA	1:2	PROCESO:	ENSAMBLE
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:	
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019		TUBO EXTRUSOR EXTERNO

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

**EXTRUSORA DE PLÁSTICO**



ESCALA	1:3	PROCESO: ENSAMBLE
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	TUBO EXTRUSOR EXTERNO

14.10.2019 8:20:01 14.10.2019

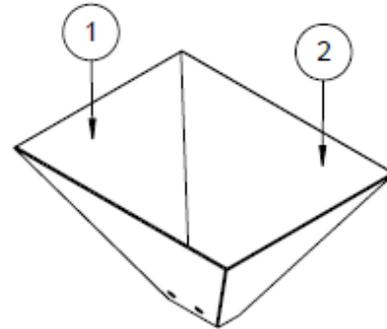
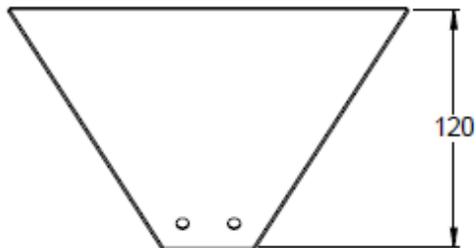
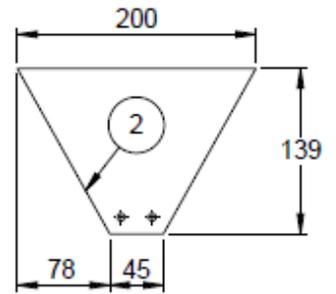
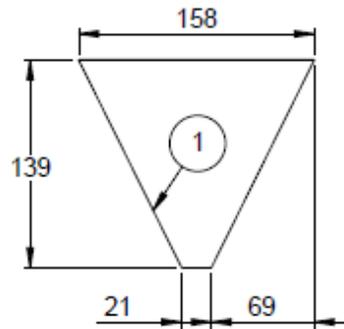
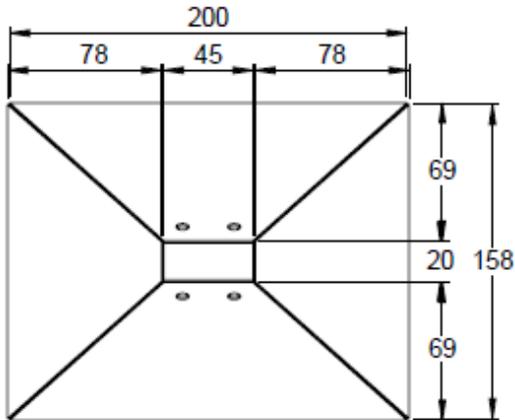
ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION:

NOTA: D:\Caton\Escritorio\planos\extrusora\_MODELO 3D\PLANO8 EXTRUSORA SOLIDWORKS

**EXTRUSORA DE PLÁSTICO**



ESCALA	1:5	PROCESO:	ENSAMBLE
UNIDADES	MILIMETROS	TÍTULO:	
FECHA DE CREACIÓN	20/11/2019	TOLVA RECEPCIÓN	

18/11/2019 10:00:00

ELABORADO POR:  
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:  
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR: Asesor de planeación  
FECHA APROBACION: