

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA EXTRUSORA PARA POTENCIAR LA
INVESTIGACIÓN EN EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS
COMUNES**

DEIVY DAVID CASTAÑO CANO

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA, MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS**



**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, DICIEMBRE DE 2021**

**Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el
aprovechamiento de residuos plásticos comunes**

DEIVY DAVID CASTAÑO CANO

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

Director: BLADIMIR RAMON VALENCIA

PhD. Ingeniería de los Materiales

hbladimir@unipamplona.edu.co

Codirector: William Javier Mora

M.Sc. Ingeniería Ambiental

william.espinosa@unipamplona.edu.co

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA, MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA, DICIEMBRE DEL 2021**

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

Nota de aceptación:

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Dedicatoria

Especialmente a DIOS y a mi familia, a mi madre ROSALIA CANO CASTAÑEDA que me ha apoyado de principio a fin de esta carrera y sé que me seguirá apoyando en el transcurso de la vida. A mi padre ARMANDO CASTAÑO que a pesar de vivir separados me ha enviado los mejores deseos y las mejores energías y fue quien me apoyo en el inicio de este reto, a ellos le dedico este logro, esta meta y sueño con el cual puedo decir con gratitud, soy ingeniero.

AGRADECIMIENTOS

Un especial agradecimiento a todas aquellas personas que estuvieron cerca y me brindaron algo de su apoyo, de su tiempo, su sabiduría y entendimiento para que yo pudiera avanzar en mi estudio como profesional. Agradezco de antemano a la **Universidad de Pamplona** por recibirme y haberme formado como un profesional más de este país.

Al cuerpo de docentes que conforman el programa de ingeniería mecánica y en especial al **Dr. Bladimir Valencia y el Ms. William Mora**, quienes aceptaron mi propuesta y me guiaron por el mejor camino para finalizar este proyecto. A mis padres, mis hermanos que me han servido de ejemplo y apoyo para culminar mis estudios. GRACIAS TOTALES

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	13
2. JUSTIFICACIÓN	14
3. OBJETIVOS	15
3.1 Objetivo general.....	15
3.2 Objetivos específicos.....	15
4. Marco conceptual	16
4.1 El plástico	16
4.2 Denominación de los plásticos	17
4.3 Síntesis de polímeros	17
4.3.1 Polimerización.....	18
4.3.2 Policondensación	19
4.3.3 Poliadición.....	¡Error! Marcador no definido.
4.4 Clasificación de los polímeros	20
4.4.1 Elastómeros	21
4.4.2 Termoestable	21
4.4.3 Termoplásticos.....	23
4.5 Propiedades de los plásticos	24
4.5.1 Relación entre las propiedades y la estructura	25
4.5.2 Propiedades que no dependen del tiempo.....	26
4.5.2.1 Comportamiento mecánico.....	26
4.5.2.2 Comportamiento eléctrico.....	26
4.5.2.3 Comportamiento térmico	27
4.5.2.4 Comportamiento frente a agentes ambientales	27
4.5.2.5 Absorción en humedad.....	28
4.5.3 Propiedades que dependen del tiempo.....	28
4.5.3.1 Deformación Permanente	28
4.5.4 Aditivos.....	30
4.5.5 Compatibilidad	31
4.5.6 Miscibilidad.....	31
5. EXTRUSIÓN DE PLÁSTICOS	32
5.1 Transporte de sólidos (zona de alimentación)	35
5.1.1 Transporte de sólidos en la tolva.....	35

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

5.1.2	Transporte de sólidos en el cilindro.....	36
5.2	Fusión (zona de transición).....	39
5.3	Transporte del fundido (zona de dosificación)	42
5.4	Configuración del tornillo	42
5.5	Técnicas de extrusión.....	43
5.6	Componentes de la extrusora.....	45
5.6.1	Tolva de alimentación	45
5.6.2	Camisa.....	46
5.6.3	Tornillo	47
5.6.4	Resistencias eléctricas.....	48
5.6.5	Controlador de temperatura	49
5.6.6	Motorreductor.....	49
5.6.6.1	Elementos de un motorreductor.....	49
5.6.6.2	Cómo funciona un motorreductor	50
5.6.7	Variador de velocidad.....	51
6.	EL PROCESO DEL RECICLAJE	52
6.1	¿Por qué reciclar plásticos?.....	53
6.2	Residuos sólidos en Colombia.....	54
6.3	¿Qué plásticos son reciclables?	55
6.4	La necesidad de la separación	56
6.4.1	Los códigos de separación.....	57
7.	MARCO REFERENCIAL.....	60
7.1	Modificación reológica de poli (tereftalato de etileno) reciclado: mezcla y extrusión reactiva	60
7.2	Un caso de estudio real de reciclaje mecánico como alternativa de manejo de film plástico de polietileno presentado en residuos sólidos urbanos mixtos ..	61
7.3	De residuos plásticos a materias primas industriales: una evaluación del ciclo de vida de la práctica de reciclaje mecánico de plástico basada en un estudio de caso del mundo real	62
7.4	El modelado de procesos de extrusión.....	63
7.5	Métodos recientes para la optimización de la extrusión de plástico	63
7.6	Estudio de la fluencia térmica del pet en el proceso de termoformado.....	64
8.	METODOLOGIA, ejecución DE OBJETIVOS.....	64
8.1	Identificar los diferentes residuos plásticos y sus propiedades para establecer los parámetros de diseño y simulación.	64

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

8.2	Diseñar el modelo óptimo de extrusora que se ajuste a los requerimientos de los residuos mediante software como herramientas CAD	65
8.3	Realizar los cálculos acordes a las variables de funcionamiento para así seleccionar materiales y procesos de construcción y ensamble.	65
8.4	Simular el comportamiento bajo cargas estáticas de la estructura y piezas en el proceso de extrusión.....	66
8.5	Desarrollar planos y presupuesto general del proyecto.....	66
9.	RECURSOS NECESARIOS.....	67
9.1	Recursos humanos.....	67
9.2	Recursos financieros	67
9.3	Gastos de planificación y organización.....	67
9.3.1	Gastos de materiales	67
9.3.2	Gasto de equipos	68
10.	CALCULOS DE DISEÑO	69
10.1	Medidas reales del husillo	69
10.2	Diseño del husillo	70
10.2.1	Ángulo del filete	71
10.2.2	Ancho del filete	71
10.2.3	Paso de la rosca	72
10.2.4	Holgura	72
10.3	Diseño de la camisa	72
10.4	Flujo volumétrico	73
10.4.1	Flujo de arrastre.....	75
10.4.2	Flujo de presión	75
10.4.3	Flujo de fugas	76
10.4.4	Constante de cabezal k.....	76
10.4.5	Velocidad de cortadura	77
10.5	Potencia requerida	79
10.6	Consumo eléctrico.....	81
10.7	Presión máxima.....	82
10.8	Fuerza del husillo	83
10.9	Transferencia de calor.....	89
11.	PASOS PARA SEGUIR BASADO EN CATALOGO LENTAX.....	91
11.1	Potencia de cálculo (NA).....	91
12.	RESULTADOS - DISEÑO DE LA MAQUINA.....	93

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

12.1	Estructura	93
12.2	Diseño de la tolva	93
12.3	Camisa	93
12.4	Husillo	93
12.5	Motorreductor	93
12.6	Acoples	93
12.7	Piñones	93
12.8	Tapas protectoras	93
12.9	Sistema de transmisión de potencia	93
12.10	Sistema de alimentación	93
12.11	Extrusora	93
12.12	Simulación en CAE, análisis estructural	93
13.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	93
13.1	Simulación	95
14.	CONCLUSIONES	95
15.	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	96
16.	Bibliografía	97
17.	ANEXOS	104
17.1	Planos del CAD	104
17.2	Características del catálogo Lentax n° 222 para el motorreductor	110

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Comparación de las tres clases de polímeros</i>	21
<i>Tabla 2. Diseño del tornillo para reducir el coeficiente de fricción entre el material y el tornillo.....</i>	38
<i>Tabla 3. Propiedades visuales de los plásticos comunes, Precius Plastics.....</i>	60
<i>Tabla 4. Recursos financieros.....</i>	67
<i>Tabla 5. Recursos económicos para materiales</i>	67
<i>Tabla 6. Equipos que utilizar para futura construcción</i>	68
<i>Tabla 7. Elección del tipo de cabezal</i>	76
<i>Tabla 8. Densidad y flujo masico de polímeros comunes.....</i>	79
<i>Tabla 9. Características de polímeros comunes</i>	80
<i>Tabla 10. Potencia necesaria para extruir polímeros comunes, datos basados en el husillo y camisa disponibles en el campus universitario.....</i>	81
<i>Tabla 11. Temperatura de los polímeros en la extrusora.....</i>	90
<i>Tabla 12. Propiedades térmicas del acero 4140</i>	95
<i>Tabla 13. Factor de servicio</i>	110
<i>Tabla 14. Selección de motorreductores.....</i>	111
<i>Tabla 15. Serie de medidas tipo C</i>	112

LISTA DE GRÁFICAS

<i>Gráfica 1. Modulo de cizalla de los plásticos reticulados.....</i>	22
<i>Gráfica 2. Distribución de masas molares</i>	23
<i>Gráfica 3. Cambios de forma de un termoplástico parcialmente cristalino</i>	25
<i>Gráfica 4. Comportamiento Esfuerzo-Deformación de materiales tradicionales y poliméricos.....</i>	28
<i>Gráfica 5. Curvas deformación – Tiempo a carga constante</i>	29
<i>Gráfica 6. Curvas a carga constante a diferentes temperaturas</i>	29
<i>Gráfica 7. Curvas de rompimiento por deformación permanente en tracción para algunos polímeros.....</i>	30
<i>Gráfica 8. Temperaturas de una mezcla compatible de polímeros</i>	31
<i>Gráfica 9. Representación del caudal de salida frente a la presión, para un cilindro liso y para uno estriado</i>	38
<i>Gráfica 10 Relación entre la longitud de fusión y la temperatura del cilindro para una velocidad del tornillo constante</i>	41
<i>Gráfica 11. Jerarquía del manejo de residuos</i>	53
<i>Gráfica 12. Perfil de velocidades originado por el flujo de arrastre</i>	74
<i>Gráfica 13. Perfil de velocidades debido al flujo de presión</i>	74
<i>Gráfica 14. Perfil de velocidad del flujo volumétrico total</i>	74
<i>Gráfica 15. Velocidad de cortadura para los distintos procesos de plástico.....</i>	77
<i>Gráfica 16. Comportamiento del flujo masico en los plásticos comunes debido al aumento de rpm.</i>	79
<i>Gráfica 17. Intervalos de viscosidad efectiva</i>	83
<i>Gráfica 18. Transferencia de calor en un tubo cilíndrico</i>	89

LISTA DE IMÁGENES

<i>Imagen 1. Polímeros</i>	16
<i>Imagen 2. Síntesis de polímeros</i>	17
<i>Imagen 3. Representación esquemática de una extrusora de husillo sencillo</i>	33
<i>Imagen 4. Zonas de una extrusora y evolución de la presión a lo largo de las mismas</i>	34
<i>Imagen 5. Flujo del material en una tolva de alimentación</i>	35
<i>Imagen 6. Corte transversal de la extrusora en la zona de transición</i>	39
<i>Imagen 7. Ancho del pozo de fundido a lo largo de la zona de transición</i>	40
<i>Imagen 8. Tipos de tornillos para diferentes fines</i>	43
<i>Imagen 9. Disposición posible de los husillos en las extrusoras de doble husillo; giro contrario y giro en paralelo; diferentes grados de interpretación de los tornillos</i>	44
<i>Imagen 10. Tipos de tolvas</i>	45
<i>Imagen 11. Ejemplo de un tornillo de alimentación</i>	46
<i>Imagen 12. Sistema cilindro-calefacción de los tornillos</i>	46
<i>Imagen 13. Tornillo de una Extrusora</i>	47
<i>Imagen 14. Resistencia de abrazadera</i>	48
<i>Imagen 15. Termostato (Control Digital de Temperatura)</i>	49
<i>Imagen 16. Motorreductor</i>	50
<i>Imagen 17. Variador de velocidad</i>	52
<i>Imagen 18. Plásticos comunes reciclables</i>	57
<i>Imagen 19. Propiedades flotantes, Precious Plastics</i>	58
<i>Imagen 20. Características del husillo</i>	70
<i>Imagen 21. Vista de sección del husillo</i>	71
<i>Imagen 22. Diagrama de fuerzas del husillo extrusor</i>	84
<i>Imagen 23. Estructura de la extrusora</i>	93
<i>Imagen 24. Diseño de la tolva</i>	93
<i>Imagen 25. Diseño de camisa</i>	93
<i>Imagen 26. Diseño de husillo</i>	93
<i>Imagen 27. Diseño de Motorreductor</i>	93
<i>Imagen 28. Acople husillo</i>	93
<i>Imagen 29. Acople al reductor</i>	93
<i>Imagen 30. Piñón acople reductor 24 dientes</i>	93
<i>Imagen 31. Piñón acople husillo 24 dientes</i>	93
<i>Imagen 32. Tapa protectora</i>	93
<i>Imagen 33. Tapa protectora</i>	93
<i>Imagen 34. Diseño de transmisión por cadena</i>	93
<i>Imagen 35. Diseño de transmisión por cadena</i>	93
<i>Imagen 36. Vista de sección de la zona de alimentación</i>	93
<i>Imagen 37. Vista trimétrico de la máquina</i>	93
<i>Imagen 38. Vista frontal de la máquina</i>	93
<i>Imagen 39. Vista trimétrico trasera de la máquina</i>	93
<i>Imagen 40. Vista frontal trasera de la máquina</i>	93
<i>Imagen 41. Total deformation in base structural</i>	93
<i>Imagen 45. Plano 1 del CAD</i>	104
<i>Imagen 46. Plano 2 del CAD</i>	105

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

<i>Imagen 47. Plano 3</i>	105
<i>Imagen 48. Plano 4</i>	106
<i>Imagen 49. Plano 5</i>	106
<i>Imagen 50. Plano 6</i>	107
<i>Imagen 51. Plano 7</i>	107
<i>Imagen 52. Plano 8</i>	108
<i>Imagen 53. Plano 9</i>	108
<i>Imagen 54. Plano 10</i>	109

LISTA DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1. Ejemplo de polimerización</i>	18
<i>Ecuación 2. Transformación de polímeros</i>	19
<i>Ecuación 3. Ejemplo de Poliadicción</i>	20
<i>Ecuación 4. Cálculo del ángulo de filete o hélice de tornillo</i>	71
<i>Ecuación 5. Ancho de filete del tornillo o husillo</i>	72
<i>Ecuación 6. Paso de la rosca (w) en un tornillo extrusor</i>	72
<i>Ecuación 7. Cálculo de la holgura</i>	72
<i>Ecuación 8. Medida de la camisa</i>	73
<i>Ecuación 9. Flujo volumétrico</i>	75
<i>Ecuación 10. Flujo de arrastre</i>	75
<i>Ecuación 11. Flujo de presión</i>	75
<i>Ecuación 12. Flujo de fugas</i>	76
<i>Ecuación 13. Constante de cabezal</i>	77
<i>Ecuación 14. Velocidad de cortadura</i>	77
<i>Ecuación 15. Flujo volumétrico a flujo másico</i>	78
<i>Ecuación 16. Cálculo de potencia requerida</i>	80
<i>Ecuación 17. Cálculo de consumo eléctrico</i>	81
<i>Ecuación 18. Cálculo de consumo eléctrico</i>	81
<i>Ecuación 19. Cálculo del consumo eléctrico</i>	82
<i>Ecuación 20. Cálculo de presión máxima</i>	82
<i>Ecuación 21. Cálculo del husillo</i>	84
<i>Ecuación 22. Cálculo del momento de inercia</i>	84
<i>Ecuación 23. Cálculo de la sección transversal del husillo</i>	85
<i>Ecuación 24. Cálculo del radio de la inercia</i>	86
<i>Ecuación 25. Cálculo de fuerza axial</i>	86
<i>Ecuación 26. Cálculo tensión tangencial máxima</i>	86
<i>Ecuación 27. Peso del husillo</i>	87
<i>Ecuación 28. Cálculo tensión normal</i>	87
<i>Ecuación 29. Momento de resistencia</i>	87
<i>Ecuación 30. Momento de resistencia respecto al eje neutro</i>	88
<i>Ecuación 31. Tercera teoría de resistencia</i>	88
<i>Ecuación 32. Flecha máxima del husillo</i>	88
<i>Ecuación 33. Cálculo temperatura requerida</i>	89
<i>Ecuación 34. De Celsius a Kelvin</i>	89
<i>Ecuación 35. El calor transferido por la potencia de las resistencias eléctricas</i>	90

1. INTRODUCCIÓN

La extrusión de polímeros es un proceso para crear piezas donde el material plástico atraviesa por un cambio térmico para obtener unidades transversales definidas y fijas, se pueden obtener diferentes formas y objetos debido a su gran variedad de adaptaciones. Existen diferentes tipos de máquina de extrusión que dependen del tipo de material a trabajar, la gran mayoría se ajustan a las propiedades mecánicas y térmicas de un solo polímero. (Beltrán & Marcilla, 2011)

La extrusión como proceso de transformación también es utilizada en diferentes materiales como productos alimenticios, cerámicas, metales. Se trabaja el plástico como materia prima en este proyecto aprovechando así ventajas como su versatilidad, facilidad de fabricación y economía. Son cada vez mayores las aplicaciones que tiene teniendo en cuenta que puede reemplazar a diversos materiales como caucho, papel, cerámica, metal, vidrio, madera, y otros. Esto hace casi nula la posibilidad de que en algún ámbito de nuestra sociedad no se encuentren objetos fabricados con materiales plásticos (Mijangos & Serafín, 2007)

El reciclaje de plástico es hoy en día un tema que hasta ahora está empezando a tomar importancia en la sociedad debido a la falta de cultura para reciclar y al menor interés de los gobiernos e instituciones por no generar planes de aprovechamiento de residuos plásticos, dejando pasar la oportunidad de proyectar un cambio en la población. (Reyes Curcio et al, 2015)

Diseñar una máquina de extrusión permite implementar una visión diferente a lo que llamamos residuos plásticos al tener la capacidad de procesar y disminuir el impacto ambiental de este material utilizando este diseño, este proyecto se enfoca en el desarrollo de un equipo para el proceso de extrusión usando polímeros reciclados como materia prima, las diferentes fases del proyecto incluye la investigación y estudio de tipos de polímeros, el diseño y ensamblaje en un software CAD de la extrusora ajustada a los diversos tipos de polímeros reciclables. Luego

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

el desarrollo de una simulación en CAE del prototipo validando su funcionamiento y finalmente elaboración de planos, presupuesto de piezas. Al aumentar el proceso del reciclaje y aprovechamiento del plástico en la zona urbana permite un segundo uso de estos y evitan que sigan afectando nuestro ecosistema.

2. JUSTIFICACIÓN

El plástico se está tomando nuestra tierra, su rápida producción y uso amenazan cada vez más con contaminar nuestros territorios. En nuestro país se usan aproximadamente 1.000.000 de toneladas por año de plástico, de toda esta cantidad de plástico solamente se recicla un 7%, el 93% restante termina llegando a rellenos sanitarios, montañas, mares, ríos o a nuestras calles (Cámara de Comercio de Bogotá, 2019). Es de vital importancia generar un impacto ambiental positivo con el aprovechamiento de este material mediante los procesos de transformación como son la extrusión e inyección del plástico.

En Colombia no se tiene la cultura de reutilización de materiales como el plástico, solo se consume a gran escala, pero no existen estrategias o normas sobre cómo aprovecharlo. Las entidades gubernamentales aunque generan políticas poco propician el desarrollo de metodologías prácticas para la reutilización de materiales de reciclaje, los entes de educación no desarrollan planes para el aprovechamiento de estos materiales debido a que no hay una cultura de reciclaje y poco se conoce sobre los métodos de hacerlo, es necesario empezar a crear espacios donde se pueda aprender cómo desarrollar e implementar un proyecto de reutilización de plástico con tecnología que permita procesar una gran cantidad de material (Ministerio de ambiente, 2005).

En la industria del plástico es posible observar maquinaria para procesar polímeros individualmente, limitando el tipo y cantidad de plástico que se puede procesar (Buezas Sierra, 2010). Es primordial empezar a contribuir en la solución de estos problemas ambientales mediante el diseño de un prototipo de extrusora que permita desarrollar investigación sobre el aprovechamiento de los residuos

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

plásticos más comunes permitiendo determinar las variables que permitan el desarrollo de equipos multipropósito que procesen diversos tipos de polímeros y generen una cadena de valor mediante la implementación de una economía circular amigable con el medio ambiente.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

- Diseñar y simular una máquina de extrusión que permita realizar procesos de investigación sobre el aprovechamiento de residuos plásticos comunes.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar y analizar los diferentes residuos plásticos y sus propiedades para establecer los parámetros de diseño y simulación.
- Diseñar el modelo óptimo de extrusora que se ajuste a los requerimientos de los residuos mediante software como herramientas CAD – CAE.
- Realizar los cálculos acordes a las variables de funcionamiento para así seleccionar materiales, procesos de construcción y ensamble.
- Simular el comportamiento bajo cargas estáticas de la estructura en el proceso de extrusión.
- Desarrollar planos y presupuesto general del proyecto.

4. MARCO CONCEPTUAL

4.1 El plástico

Imagen 1. Polímeros



Fuente: Cáp México, 2019

A través de los años el plástico ha ido convirtiéndose en uno de los grupos de materiales más usados por los seres humanos reemplazando otros materiales tradicionales. Esto sucede por su fácil adaptación, facilidad de producción, tiempo de vida etc., se utiliza también como material de ingeniería donde por un proceso termo mecánico transforman la materia prima a producto terminado. (Universidad de Burgos, 2019)

La producción en serie de los plásticos comienza a partir de la década de los 50, en gran parte el crecimiento acelerado de la producción de plásticos se debe a la gran cantidad de inversión en investigación de la industria química y por esto hoy en día son grandes productores de materias primas.

¿Qué son los plásticos?

Plástico, en términos generales, se refiere a una gran cantidad de sustancias que se distinguen entre sí por sus propiedades, composición, y estructura. Tienen en común su unión a través del entrecruzamiento o encadenamiento de moléculas muy largas llamadas macromoléculas. Debido a que están formadas por bastantes unidades estructurales sencillas llamadas monómeros, también comúnmente se le denominan polímeros. Estos no siempre los componen moléculas iguales, sino que son grupos que varían en la longitud, tamaño y masa; no poseen muchos puntos de fusión o punto de fluidez, este se define entre intervalos de temperaturas en un estado viscoelástico. (Coreños y Mendez, 2010)

4.2 Denominación de los plásticos

De acuerdo con la Norma Din 7728, el plástico se denomina a través de unas series de signos llamados abreviaturas, que facilitan la identificación química por medio de códigos. Estas dan indicios de su utilidad, de las cargas que poseen y de algunas propiedades significativas como viscosidad o densidad (Loaiza, Ossa, y Ramírez, 1997). Ejemplo:

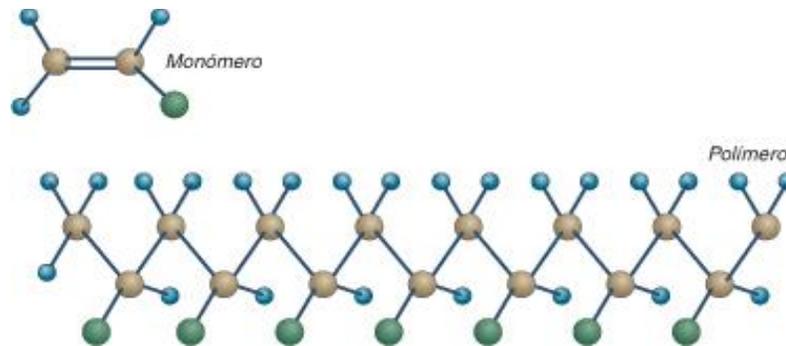
Denominación: PE-LD

Nombre del producto: Polietileno lineal de baja densidad.

Abreviatura al grupo a que pertenece: PE

4.3 Síntesis de polímeros

Imagen 2. Síntesis de polímeros



Fuente: Madrid Taller Experimentos, 2000

Aquellos que denominamos plásticos suelen ser materiales de un alto peso molecular, hoy en día son fabricados únicamente por vía sintética y su principal fuente de extracción es el petróleo crudo, gas natural y carbón, estos son materiales que portan carbono, oxígeno y nitrógeno, la gran cantidad de variedades que se pueden fabricar da como resultado una amplia gama de productos que son denominados copolímeros, homopolímeros, sistemas reticulados y mezclas de polímeros.

Las vías más importantes para la obtención de los sintéticos son: la polimerización, la policondensación y la poli adición, en diferentes ocasiones se

acude a dos vías simultáneas o en serie para adquirir el producto. (Loaiza, Ossa, y Ramírez, 1997)

4.3.1 Polimerización

Se le llama polimerización a la acoplación de monómeros o de elementos individuales. Esta se lleva a cabo entre monómeros análogos (homopolimerización) o con la intervención de átomos distintos al carbono en la reacción (copolimerización). Allí es donde se conforman las cadenas o macromoléculas y estas no desprenden un producto secundario. La polimerización da origen a la conformación de macromoléculas al abrir los enlaces dobles de los monómeros. Esto sucede por medio de una reacción inicial con ayuda de la temperatura, presión y catalizadores. (Carrasquero, 2005)

Cuando la reacción es exotérmica se desarrolla una salida al calor producido, el polímero creado asume una composición química parecida a la del monómero, sino que su proceso molecular es comparativamente mayor. Una vez iniciada la polimerización, esta avanza por sí misma y con rapidez en una reacción en cadena.

Al respecto, Loaiza, Ossa, y Ramírez (1997) mencionan que “Los homopolímeros y unipolímeros por ejemplo PE, PP, PS, PMMA, POM, PTFE se componen de un eslabón monomérico único y repetido.”

Ecuación 1. Ejemplo de polimerización

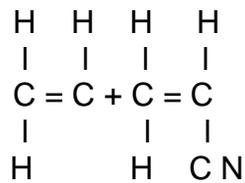


En los copolímeros SAN, ABS, UP actúan diversos monómeros en la estructura de la cadena que tienen la finalidad de transformar las características del polímero:

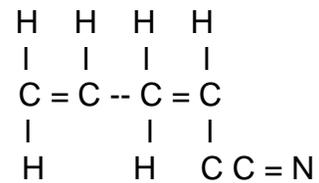
Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

Ecuación 2. Transformación de polímeros

Estireno más acrilonitrilo



Copolímero, estirenoacrilonitrilo (san)



En conclusión, la polimerización es una reacción química que contiene de iniciación, propagación, terminación (ruptura), entre otros monómeros similares o distintos para alcanzar copolímeros o polímeros, que aparecen por ruptura de un enlace múltiple entre ellos. Por lo general el termoplástico se consigue de esa forma. (Loaiza, Ossa, y Ramírez, 1997)

4.3.2 Policondensación

Es la reacción de diversos materiales de partida a varios grupos reactivos que pertenecen con el objetivo de convertirse en polímeros, pero con la formación lateral de micromoléculas que se dividen de la reacción. Gracias a ello se transforma el orden de los átomos y la estructura principal porcentual. Inverso a lo que sucede en la polimerización, en la policondensación se necesita la intervención de macromoléculas con más de un grupo funcional. Para que esto sea constante debe plasmarse en grados el subproducto al mismo tiempo que se conforma. Así mismo se producen materiales termoestables y termoplásticos como el P.C. (Mariano, 2014)

4.3.3 Poli adición

Esta reacción sucede sin la disociación de materiales volátiles y a temperaturas menores. Aquí los átomos de hidrogeno se trasladan de grupo funcional a otro. Para la conformación de un enlace por poli adición se necesitan dos grupos funcionales diferentes, la reacción sucede en las siguientes etapas:

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

- Por un lado, un extremo de molécula con un enlace fácilmente escindible y, por otro, se cuenta con el extremo de una molécula que tiene un átomo de hidrogeno disociable con facilidad.
- El átomo de hidrógeno se disocia y el enlace del grupo funcional se abre.
- El átomo de hidrogeno pasa a formar un enlace con uno de los electrones del enlace escindido forman un nuevo enlace y la cadena aumenta.
(Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA Regional del Valle)

Por ejemplo:

Ecuación 3. Ejemplo de Poli adición

Reacción $R - N = C = O$

$R_1 - N = C = O + HO - R_2$

Isocianato **Alcohol**

$R_1 - N - C - O - R_2$

O H

$R_1 - N - C - O - R_2$
 || ||
 H H

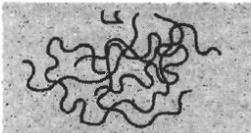
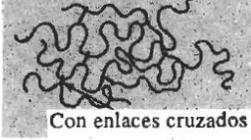
4.4 Clasificación de los polímeros

- De acuerdo con la forma como las moléculas son sintetizadas.
- Según su estructura molecular.
- Por su familia química.
- Uno de los métodos más empleados es en función de su comportamiento mecánico y térmico.

La tabla 1 compara las tres clases principales de polímeros. (Askeland, Fulay, y Wrigth, 2013)

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

Tabla 1. Comparación de las tres clases de polímeros

Comportamiento	Estructura general	Diagrama
Termoplástico	Cadenas lineales flexibles	
Termoestable	Red rígida tridimensional	 Con enlaces cruzados
Elastómero	Cadenas lineales con enlaces cruzados	 Con enlaces cruzados

Fuente: Askeland, Fulay, y Wrigth, 2013, P. 7

4.4.1 Elastómeros

También llamados Mero de parte o Elastos de muelle, son hinchables, insolubles e infusibles, por lo general están conformados por moléculas reticuladas de malla de escaso tupido (enlaces de valencia principal y secundario) las cuales se originan durante el inicio del moldeo y, después de ello, no se puede cambiar la soldadura o forma.

La cantidad de puntos de unión varía en función del número de grupos polifuncionales del monómero de partida y afecta la elasticidad. Es posible contraer y estirar los elastómeros, también someter a cargas mecánicas creando una imperfección que le permite regresar a su forma inicial. (Canales sectoriales Interempresas, 1995)

4.4.2. Termoestable

Están compuestos por moléculas con enlaces de valencia principal, reticuladas en mallas estrechas en múltiples direcciones o lo que se llamaría, tridimensionales. No tienen ningún punto de fluidez y no es posible moldearlos. Debido a que están reticulados de manera densa no es posible disolverlos y por lo general no se hinchan, lo que les permite resistir temperaturas superiores.

Los enlaces de valencia principales permiten que los termoestables sean rígidos; contribuyen a la resistencia mecánica. En los procesos de mutación los

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

enlaces persisten inalterables hasta que se llegue a la temperatura de descomposición T_K . Ejemplo: UP, PF, MF, DE.

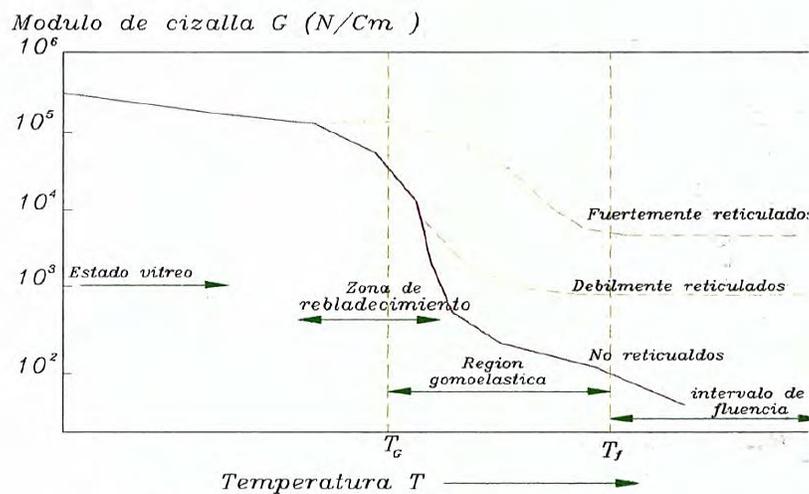
El grado de reticulación es una magnitud que identifica a los elastómeros y termoestables. Se refiere al porcentaje de puntos de reticulación en el conjunto del sistema que se obtiene de la transformación. Si aumenta el grado de reticulación, también aumenta:

- Resistencia mecánica
- Rigidez
- Resistencia a deformación por calor
- La elasticidad, esta es posible ajustarla variando el grado de reticulación en el rango de amplios intervalos.

(Casillería de cultura, educación y universidad, s.f.)

Además del punto de reticulación, los termoestables son muy rígidos gracias a su grado superior de reticulación. Por lo anterior, poseen una alta resistencia al calor, es decir, que no presenta una zona de conformabilidad o de deformación definida si al material se le aplica el calentamiento. Esto sucede solamente antes de la temperatura de descomposición T_z y permanece durante algunos segundos, como se puede observar en la Gráfica 1.

Gráfica 1. Modulo de cizalla de los plásticos reticulados



Fuente: Loaiza, Ossa, y Ramírez, 1997, p. 9

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

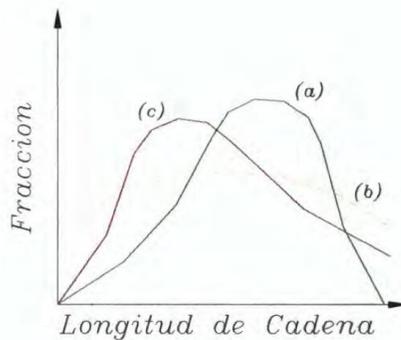
Debido a lo anterior, no es posible que los termoestables se transformen de la misma manera que lo harían otros polímeros.

4.4.3 Termoplásticos

Proviene de *Thermos* que significa 'caliente' y *Plasto* de 'formar'. Están compuestos por cadenas lineales con uniones laterales entre los átomos y secundarias de poca energía del tipo de *Van der Waals*. Poseen solubilidad y fluidez, también se hinchan cuando entra en contacto con múltiples disolventes. Entre los termoplásticos se distinguen los parcialmente cristalinos y los amorfos. (Loaiza, Ossa, y Ramírez, 1997)

Los termoplásticos poseen una magnitud casi exclusiva: el grado de polimerización. Se refiere al número de eslabones o monómeros que conforman la cadena molecular o macromolécula. Este valor da pistas sobre la longitud de las cadenas de moléculas que puede variar, pero cuenta con una distribución parecida a una campana de Gauss. En ese sentido, el grado de polimerización medio está determinado por un punto medio que presenta la curva de distribución normal. Para conseguir algunas características de fluidez se apunta a que los valores de la curva se apilen en el centro y así esta posea poca dispersión, como lo evidencia la gráfica 2.

Gráfica 2. Distribución de masas molares



Fuente: Loaiza, Ossa, y Ramírez, 1997, p. 10

Nota: a) Distribución normal; b) Distribución simétrica amplia; c) Distribución asimétrica, que es una forma común.

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

En la medida que crece el grado de polimerización (P), aumentará la resistencia a la tracción, a desgarrarse, la viscosidad del material; lo que disminuye la fluidez y aumentará la dureza. Al tiempo, disminuyen el hinchamiento, fisuras por tensión la fluidez y la tendencia a la cristalización. (Loaiza, Ossa, y Ramírez, 1997).

Por ejemplo:

Molécula C₂H₄

$$\begin{array}{ll} \text{C} = 12; & 12 \cdot 2 = 24 \\ \text{H} = 1; & 1 \cdot 4 = 4 > 28 \end{array}$$

Corresponde con un grado de polimerización de $n=1000$ y 10.000 a un peso molecular promedio $M = 28.000$ Y 280.00 .

En cuanto a la estructura de los termoplásticos tenemos aquellos que son amorfos (desordenado) que tienen un estado de orientación molecular similar a la del vidrio, por lo que también son transparentes. Los termoplásticos amorfos constan de cadenas moleculares largas que, en el momento de formarse, se enredan entre sí. Por otra parte, tenemos a los termoplásticos parcialmente cristalinos, estos presentan zonas de moléculas con un ordenamiento especial, estas zonas se denominan cristalinas. Tales ordenamientos se dan en estructuras moleculares simétricas, esto hace que su apariencia óptica sea opaca.

Por lo general estos polímeros se encuentra por encima de la temperatura T_g del material amorfo, por tanto, su dureza depende de la zona cristalina, a medida que se calienta llega a la temperatura de reblandecimiento de las cristalitas, que es donde se dan altas deformaciones con bajos esfuerzos y pérdida de la rigidez. Esto se da antes de la temperatura de descomposición T_z como se observa en la Grafica 3.

4.5 Propiedades de los plásticos

Estas propiedades derivan de su morfología y no de la estructura molecular. Un ejemplo de ello es que son poco conductores eléctricos y térmicos; la estabilidad al calor es reducida debido a que su descomposición se da a bajas temperaturas, su densidad es más baja que la de otros materiales, tienen óptima resistencia química;

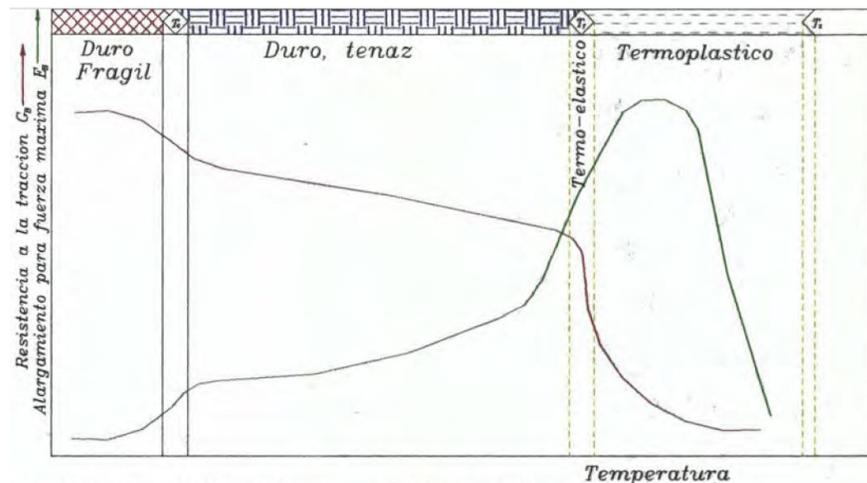
Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

por lo tanto, no requieren superficiales recubrimientos específicos. (Ingeniería mecánica, 2021)

Las ventajas más importantes del uso de los plásticos son:

“Fácil moldeo a temperaturas relativamente bajas, fabricación de piezas complicadas a bajos costos, buena atenuación del ruido, bajos coeficientes de rozamiento, buenos para empaques de alimentos y embalajes.”

Gráfica 3. Cambios de forma de un termoplástico parcialmente cristalino



Fuente: Loiza, Ossa, y Ramírez, 1997, p. 16

4.5.1 Relación entre las propiedades y la estructura

El número de propiedades físicas de algunos polímeros cambia de manera similar al cambio de estado: al pasar por la zona de transición vítrea. Al fundirse una sustancia se incrementa el movimiento molecular que pasa a estar determinado por los cambios en las propiedades observables y el calor latente de fusión. Esto produce cambios en el coeficiente de expansión y el calor focalizado.

La transición vítrea resulta de cambiar la cantidad de movimiento molecular; aunque no exista calor latente y la transición no pueda estimarse como un cambio termodinámico propio. En las propiedades térmicas se evidencian transformaciones en el calor específico que establece la calidad técnica de determinación de polímeros llamada calorimetría diferencial de barrido. (Coreño y Méndez, 2010)

4.5.2 Propiedades que no dependen del tiempo

4.5.2.1 Comportamiento mecánico

La naturaleza del plástico y la cualidad de las fuerzas intermoleculares revelan que posea una estructura con menor grado de compactación en relación con el empaquetamiento denso de los metales.

- Resistencia mecánica relativamente menor.
- Un módulo de rigidez menor.
- Dependencia de propiedades mecánicas con respecto al tiempo, sobre todo en termoplásticos inclusive a temperatura ambiente.
- Marcada dependencia de la temperatura, sobre todo en los termoplásticos.
- Sensibles al impacto y a la entalla, aunque dentro de los termoplásticos hay grandes diferencias desde quebradizos, hasta resistentes.

Es posible variar el comportamiento mecánico de los plásticos añadiendo materiales de refuerzo como polvo de madera, esferas de vidrio, fibra de vidrio, etc. El mismo se evalúa con una sucesión de pruebas como son de tracción, flexión, compresión, impacto, dureza, etc.

Los ensayos de poca duración son muy significativos para el control de fabricación, optimización de los procesos y en la admisión de la materia prima.

Los ensayos de larga duración (velocidades muy bajas) son sustanciales para lograr medidas como: módulo de plasto-deformación, módulo de elasticidad en función del tiempo y temperatura, utilizados para el diseño de piezas de ingeniería y técnicas. (Centro de Innovación Educativa Regional -SIERSUR, 2021)

4.5.2.2 Comportamiento eléctrico

Los plásticos no sitúan electrones libres, por lo que poseen propiedades aislantes que se usan comúnmente en electricidad y electrónica. Algunas propiedades adicionales son:

- “Rigidez dieléctrica.

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

- Resistencia superficial
- Resistencia transversal.
- Resistencia a las corrientes parasitas” (Tecnología materiales, 2020)

4.5.2.3 Comportamiento térmico

El comportamiento térmico de los plásticos fluctúa dependiendo de los diversos arquetipos que hay: los termoestables suelen ser quebradizos y rígidos en la medida en que se acrecienta la temperatura; no se reblandecen y no fluyen, poseen un mínimo tiempo de alineación, pero esto sucede a una temperatura próxima a la de descomposición, por ello, no se les puede dar una forma diferente a la que ya tienen.

En bajas temperaturas la rigidez y lo quebradizo del termoplástico aumenta. Si la temperatura crece se provoca una caída continua del módulo de rigidez. Los termoplástico amorfos soportan un reblandecimiento, en otras palabras, la transición a una fase termoelastico, en esta es suficiente con estímulos leves y se obtienen grandes deformaciones. Al continuar aumentando la temperatura la movilidad térmica se amplía al punto en el que las cadenas se deslizan entre ellas.

Los termoplásticos semi-cristalinos posteriormente de que pasa por la temperatura de reblandecimiento de la zona amorfa, sigue el reblandecimiento de la zona cristalina, donde cambiaría su forma con esfuerzos leves. Esta zona ya está cercana a la de descomposición del material.

En general, los plásticos al aumentar su temperatura toleran una dilatación volumétrica grande, aunque un poco menor en los plásticos reforzados (Universidad Politécnica de Valencia, s.f.)

4.5.2.4 Comportamiento frente a agentes ambientales

Este comportamiento logra orientarse frente al ataque de productos químicos sólidos, líquido o gaseosos, es significativo el comportamiento en disolución y en hinchamiento, la absorción de humedad y reacción frente a radiaciones solares, o radiaciones energéticas fuertes. (Universidad Pontificia Bolivariana, 2015)

4.5.2.5 Absorción en humedad

Esta se inicia en el aire o de la inmersión en agua varía considerablemente según el plástico, por esto los no polares absorben muy insuficiente agua, como el PE, PS, PP, Etc. Los polares como la PUR, los esteres de celulosa, las poliamidas, el PMMA absorben una considerable cantidad de agua. El porcentaje de humedad afecta de manera directa las propiedades del material, por eso se pide hacer un presecado previo a algún proceso de modificación. (Roca, 2005)

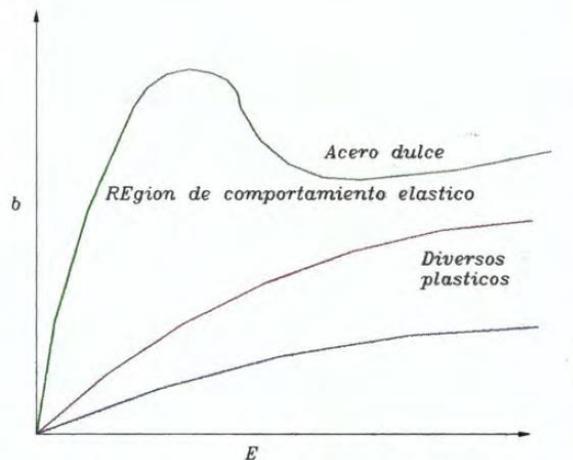
4.5.3 Propiedades que dependen del tiempo

Estas propiedades pueden ser las características físicas más significativas de los polímeros ya que, de acuerdo con ellas, los productos y materiales soportarán más o menos carga.

4.5.3.1 Deformación Permanente

Cuando algún material es sometido a una carga se generan estímulos en él y se puede deformar o flexionar. En los materiales frecuentes esta particularidad sigue a la ley de Hooke (es lineal); pero los polímeros funcionan de otra manera: se deforman bastante y se comporta de manera no lineal. Si el esfuerzo se mantiene, se incrementa progresivamente la deformación (Sanger, 2021) como se evidencia en las gráficas 4 y 5.

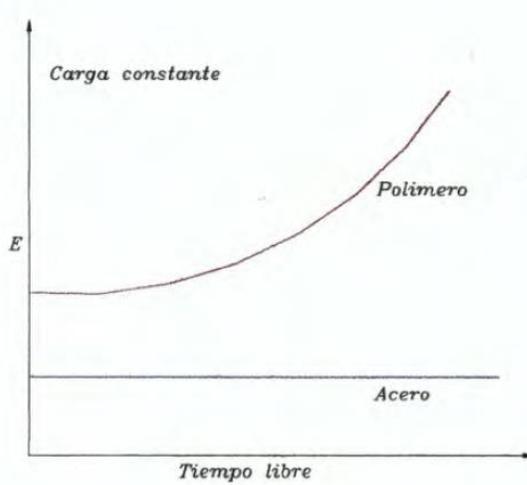
Gráfica 4. Comportamiento Esfuerzo-Deformación de materiales tradicionales y poliméricos



Fuente: Loaiza, Ossa, y Ramírez, 1997, p. 23

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

Gráfica 5. Curvas deformación – Tiempo a carga constante



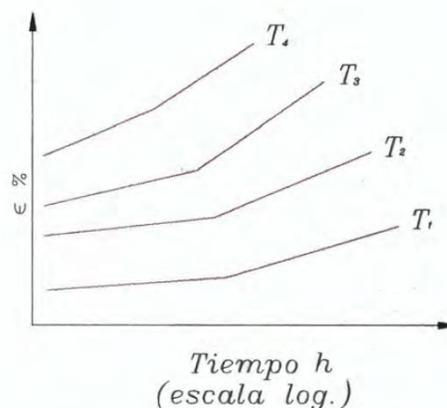
Fuente: Loaiza, Ossa, y Ramírez, 1997, p. 23

Un resultado del comportamiento de la deformación continua es que el módulo de elasticidad del polímero no es constante, sino que decrece con el tiempo en que se emplea la carga.

Como se modifica con un esfuerzo constante, E también cambia, un defecto llamado módulo de deformación permanente.

Se deben tomar en cuenta dos elementos en el comportamiento de deformación permanente: 1. los polímeros tienen diversas familias de curvas. 2. Las propiedades también se transforman con la temperatura (Loaiza, Ossa, y Ramírez, 1997). Ver Gráfica 6. *Curvas a carga constante a diferentes temperaturas.*

Gráfica 6. Curvas a carga constante a diferentes temperaturas

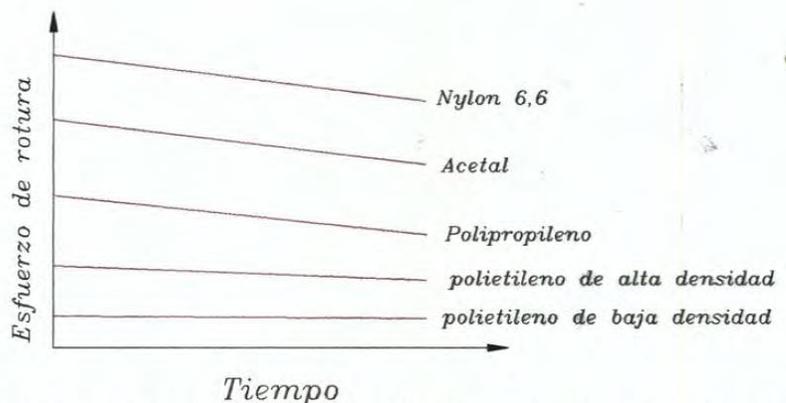


Fuente: Loaiza, Ossa, y Ramírez, 1997, p. 24

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

Un resultado de la curva isométrica es la curva de rompimiento de deformación permanente (Gráfica 7). Al aplicar una carga constante la deformación continúa hasta la rotura, y se anota el tiempo transcurrido. El experimento se hace con otras cargas. El elemento isométrico es la deformación que causa en las cargas en el momento de la falla. La naturaleza anexa del tiempo de las propiedades mecánicas de los polímeros se debe a los viscoelásticos (Guerra y Gonzáles, 2002)

Gráfica 7. Curvas de rompimiento por deformación permanente en tracción para algunos polímeros



Fuente: Loaiza, Ossa, y Ramírez, 1997, p. 27

4.5.4 Aditivos

Gracias al proceso de fabricación poseen cantidades pequeñas de materiales foráneos como catalizadores y emulsionantes. Para convertirlos en granulados en la formulación posterior, algunos aditivos facilitan su transformación y mejoran sus propiedades, por ejemplo:

- “Lubricantes para facilitar la transformación.
- Estabilizantes contra degradación térmica y protección contra la radiación ultravioleta.
- Productos anti elásticos para evitar la carga electroestática
- Aditivos eléctricos para reducir la resistencia eléctrica
- Ignifugantes para bajar la combustibilidad
- Hinchantes para espumar

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

- Cargas minerales y fibras de refuerzo para variar propiedades mecánicas.” (Ministerio de Educación - Instituto Nacional de Educación Tecnológica, 2011)

4.5.5 Compatibilidad

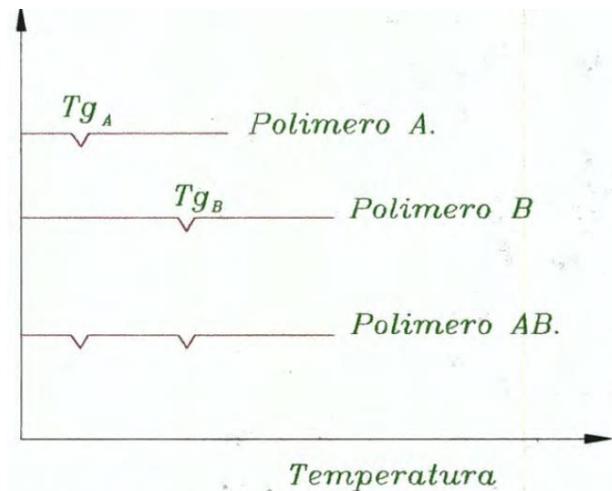
Se refiere a la capacidad que presentan los materiales para conformar la unidad estructural homogénea, aunque termodinámicamente evidencia separación de fases:

$$A + B > AB$$

En el ejemplo anterior, el producto AB es homogéneo en su estructura, pero termodinámicamente distinto, en un análisis de calorimetría de segregación de fases, cada una concierne al elemento que conforma la mezcla.

Las propiedades se traslapan entre sí, o, en otras palabras, se equiparán. (Sandoval, Fernández, y Fernández, 2004).

Gráfica 8. Temperaturas de una mezcla compatible de polímeros



Fuente: Loaiza, Ossa, y Ramírez, 1997, p. 29

4.5.6 Miscibilidad

Producto con distribución estructural homogénea diferente a la de los polímeros base, con alineación de una fase única que parten de fases distintas.

Con esta propiedad las ventajas de los polímeros perfeccionan las desventajas de otros (efecto sinérgico). Las mezclas generalmente se dan entre termoplásticos amorfos con parcialmente cristalinos con las resinas termoestables. (Universidad Politécnica de Valencia, s.f.)

5. EXTRUSIÓN DE PLÁSTICOS

Este se refiere a todos los tipos de operaciones de transformación en las que un material fundido se fuerza para que cruce con una boquilla para originar un artículo de sección transversal continuo y, en principio, longitud indefinida. Adicional a los plásticos, “muchos otros materiales se procesan mediante extrusión, como los metales, cerámicos y alimentos, obteniéndose productos muy variados como son marcos de ventanas en aluminio o PVC, tuberías pastas alimenticias, etc.” (Beltrán y Marcilla, 2011)

Desde la perspectiva del plástico, la extrusión se refiere al proceso más crucial de la transformación y se desarrolla en máquinas denominadas extrusoras o extrusores. Pese a que existen múltiples extrusoras, las más usadas son las de tornillo o de husillo simple. Generalmente en la extrusión los polímeros se nutren en forma sólida y surge de la extrusora en estado fundido. A veces los polímeros se pueden alimentar fundidos, que viene de un reactor. Allí la extrusora opera como una bomba, suministrando la presión suficiente para que el polímero pase a través de la boquilla. En otros momentos se extruyen los materiales sólidos, como en el procesado de fibras en que se necesitan elevadas orientaciones en el material.

Para la situación más común de la extrusión de un polímero en principio sólido que se funde en el proceso, la extrusora, y en concreto una de husillo único, realizan seis funciones primordiales:

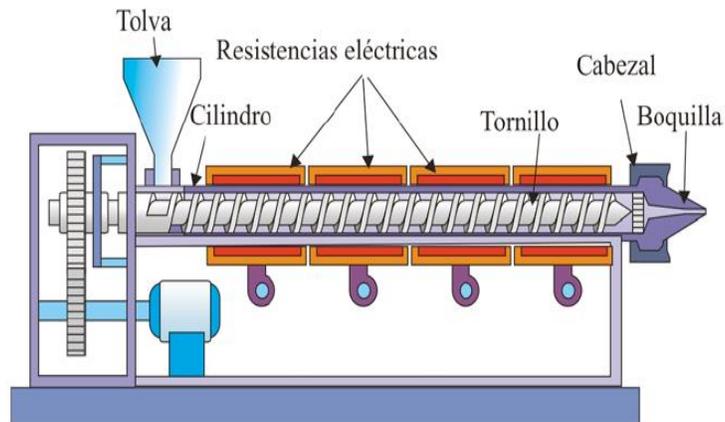
- “Transporte del material sólido hacia la zona de fusión
- Fusión o plastificación del material
- Transporte o bombeo y presurización del material fundido
- Mezclado
- Desgasificado
- Conformado”

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

Es necesario mencionar que todas las funciones anteriores no ocurren mientras operan todas las extrusoras. Un ejemplo sería que el desgaseado o venteo solamente ocurre en las máquinas dispuestas para ello. Además, el conformado no necesariamente es definitivo; algunas veces el producto que se obtiene toma su forma final en el proceso secundario puesto que las extrusoras se usan frecuentemente con el objetivo de mezclar los componentes de formulaciones que se resolverán después a través de otras técnicas o lograrán preformas que se procesarán a través del soplado o termoconformado. (Tecnología materiales, 2020)

Según el objetivo que se trace, una extrusora dispondrá de un sistema de alimentación del material, un sistema de fusión- plastificación de este, el sistema de bombeo y presurización, que normalmente creará un efecto de mezclado y finalmente, el dispositivo para que se permita el conformado del material fundido. Lo anterior se puede evidenciar en la Imagen 3, la cual tiene una representación esquemática de la extrusora común de husillo único.

Imagen 3. Representación esquemática de una extrusora de husillo sencillo



Fuente: Ojeda, 2019, p. 3

De acuerdo con lo que se evidencia en el sistema de alimentación común es una tolva en la que el material que está siendo procesado se alimenta en forma de polvo o grana. El dispositivo de fusión-plastificación, bombeo y mezclado está formado por un tornillo de Arquímedes que gira en el interior de un cilindro calentado, por lo general, gracias a resistencias eléctricas. En la parte del cilindro más lejos de la tolva de alimentación se ajusta un cabezal cuya boquilla de salida

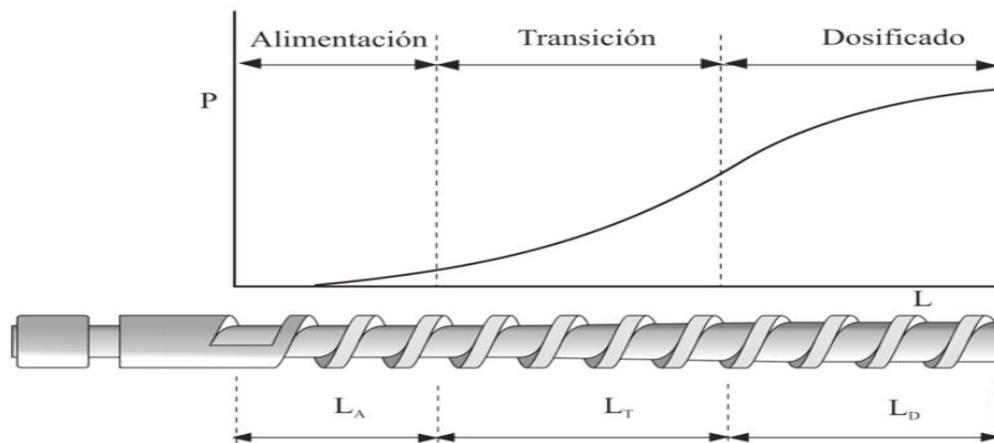
Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

tiene el diseño adecuado para que surja el conformado del producto. La zona más importante de la máquina es el sistema cilindro- tornillo que, como resultado del giro, compacta el alimento sólido, dando paso a la fusión del material y transportándolo hasta la boquilla de conformado, que, por último, produce la presurización y, al tiempo, el mezclado del material. (Amaya, Molina, y Sánchez, 2018)

Las extrusoras se dividen en tres zonas: 1. la de alimentación es un poco más cercana a la tolva, en la cual la profundidad del canal del tornillo es máxima. Tiene como objeto la compactación del alimento para hacerlo más sólido y denso y transportarlo hacia la próxima zona a una velocidad adecuada. La zona de transición o compresión es la zona intermedia en la que la profundidad del canal se minimiza de modo más o menos gradual. Conforme el material sólido va compactándose en esta zona el aire que haya quedado atrapado se escapa del material vía la tolva de alimentación. En la zona de transición, además, ocurre la fusión del material. La zona de dosificado se ubica al final, en el área más cerca a la boquilla y tiene una profundidad de canal muy pequeña y constante. En esta zona el material fundido es homogeneizado y presurizado para obligarlo a pasar a presión la boquilla de conformado, ver Imagen 4. (Arredondo, Del Río, y Ávila, 2018)

Se debe mencionar que las funciones de cada zona de la extrusora no son únicas; por ejemplo, el transporte, presurización y homogeneización ocurren a lo largo de toda la extrusora. Las extrusoras existentes operan en promedio entre 10 y 500 rpm y según su tamaño, proporcionan caudales de 2000 kg/h de material.

Imagen 4. Zonas de una extrusora y evolución de la presión a lo largo de las mismas



Fuente: Ojeda, 2019, p. 4

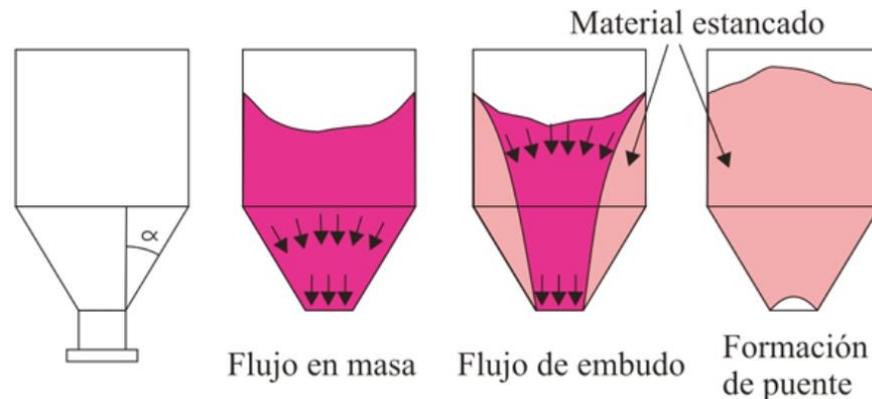
5.1 Transporte de sólidos (zona de alimentación)

Los materiales sólidos que nutren a una extrusora son transportados en dos regiones: la tolva de alimentación y la propia extrusora.

5.1.1 Transporte de sólidos en la tolva

El transporte de sólidos en la tolva indica un flujo por gravedad de las partículas; el material se mueve hacia la parte inferior de la tolva por acción de su propio peso. Esto puede producir un *flujo de masa*, como se evidencia en la imagen 5, en la que no existen regiones estancadas y la totalidad del material próximo a las paredes de la tolva se estanca. Este flujo en masa es predilecto sobre el flujo tipo embudo. Otro material que posea un flujo muy deficiente en estado sólido quedaría atascado en la garganta de entrada a la extrusora y esto generaría una dificultad denominada formación de “puente” o “arco”. (Beltrán y Marcilla, 2011)

Imagen 5. Flujo del material en una tolva de alimentación



Fuente: Beltrán & Marcilla, 2011, p. 89

Tal como las particularidades del material, el diseño de la tolva también afecta al transporte de sólidos en esta parte de la máquina. Es preferible una tolva con una sección circular que una tolva con sección cuadrada o rectangular, esto es porque la compresión gradual en el material en una sección circular es uniforme en comparación a las de sección cuadrada que compresional menos uniforme, provocando que el material se detenga. Además, se puede tomar acciones como añadir un sistema vibratorio que facilite la eliminación del puente formado o

incorporar agitadores para evadir dicho material (De Luca y Assennato, 1993). Las características del material que afectan al transporte del sólido en la tolva son:

- **Densidad aparente:** es la densidad del material e incluye el aire entre sus partículas. Esta es inferior a la densidad real. Si esta es principalmente baja (no superior al 20 o 30% de la densidad real), el material presentará dificultades de fluidez, porque si se desea obtener caudal específico se necesita alimentar bastante volumen de material. Así que se facilita más la manipulación de materiales con una densidad aparente medianamente alta (alrededor del 60% de la densidad real). (Beltrán y Marcilla, 2011)
- **Compresibilidad:** es el aumento producido en la densidad aparente de un plástico cuando se le hace presión. En esta se prefieren materiales con factor de compresibilidad bajo, o en otras palabras, que cambien poco ante la densidad aparente al aplicarles presión.
- **Coefficiente de fricción:** es posible diferenciar el coeficiente de fricción interno, que se refiere a la fricción que existe entre las propias partículas del polímero, y el coeficiente de fricción externo, que es la fricción de las partículas del plástico y la superficie del cilindro con la que interactúa el plástico. Para tener un flujo en la tolva adecuado, estos dos coeficientes deben ser bajos, ya que en ocasiones se requerirá emplear el lubricante. (Vicente y López, 2006)
- **Distribución del tamaño de partícula de la granza (DTP):** debe ser lo más uniforme posible para mitigar algunas dificultades de fluidez de la granza. Si el material presenta una DTP ancha, las partículas se empaquetarán, lo que dificulta el flujo de estas en la tolva. Generalmente el flujo de material por gravedad que la tolva proporciona supera al que se necesita en la extrusión, excepto cuando se produce punteado. (Araque De Los Rios y Gómez, 2008)

5.1.2 Transporte de sólidos en el cilindro

Con respecto al transporte de sólidos al interior de la extrusora, cuando el material sólido cae dentro del canal de la extrusora, el mecanismo de transporte y es no es controlado por la gravedad y es transformado en un transporte inducido

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

por arrastre. Este tipo de flujo ocurre debajo de la tolva a lo largo del tornillo en una distancia relativamente corta. (Beltrán y Marcilla, 2011)

Con respecto a una descripción desde lo cuantitativo, el flujo del material sólido en la extrusora fue propuesta por Darnell y Mol (1956) y las ideas centrales de sus hallazgos permanecen en la actualidad. Según los estudiosos hay dos fuerzas de fricción primordiales que actúan sobre la masa sólida: primero, la superficie del cilindro y la otra en la superficie del tornillo. La fuerza de fricción en la superficie del cilindro produce que la masa sólida se mueva hacia la salida de la extrusora, y la fuerza de fricción en la superficie del tornillo es la fuerza retardante.

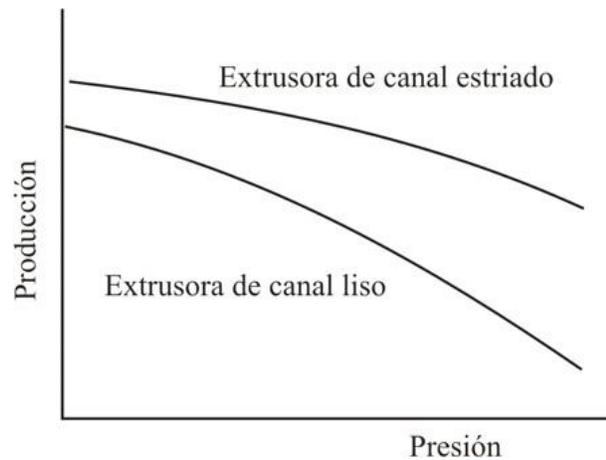
El hecho de que la fuerza de fricción en la superficie del cilindro es la que genera el movimiento al sólido, se puede apreciar si se tiene en cuenta una situación extrema: si la fuerza de fricción con la superficie del cilindro fuese cero y estuviera alta con el tornillo, la masa sólida rotaría meramente con el tornillo, y no se produciría el movimiento hacia adelante, algo así pasaría con una tuerca sobre un tornillo que gira. Pero, si existe una fuerza de fricción lo suficiente elevada con el cilindro y baja con el tornillo, en principio el material se trasladará hacia adelante. Según el modelo expuesto se puede mejorar el transporte de sólidos y esto aumentaría el coeficiente de fricción del material con el cilindro y disminuyéndolo con el tornillo. (Darnell y Mol, 1956)

Para que aumente el coeficiente de fricción con el cilindro se puede disminuir la temperatura de este o de la garganta de alimentación. Otra opción es hacer uso de cilindros con superficies rugosas con el empleo de cilindros estriados. Las ventajas de usar cilindros estriados en lugar de lisos son:

- “Para una misma caída de presión a lo largo de la máquina, el caudal obtenido con un cilindro estriado es mayor que el obtenido con uno liso. Esto se aprecia en la Grafica 9.
- Hay una mayor estabilidad en el caudal que proporciona el cilindro estriado, de modo que las oscilaciones de la presión a lo largo de la extrusora afectan más al caudal con el cilindro liso que con el estriado.”

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

Gráfica 9. Representación del caudal de salida frente a la presión, para un cilindro liso y para uno estriado



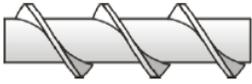
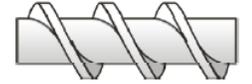
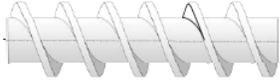
Fuente: Beltrán y Marcilla, 2011, p. 91

Con respecto al diseño del tornillo se debe tener presente:

- Se necesita un filete del tornillo debe simple, no doble. El filete doble agranda la fricción.
- El ángulo de los filetes debe ser grande.
- El radio de los flancos del filete debe ser tan grandes como se pueda.

En la tabla 2 se muestran dos tornillos, el de la izquierda es de diseño adecuado desde el punto de vista del flujo del material sólido, en la misma idea de lo expuesto.

Tabla 2. Diseño del tornillo para reducir el coeficiente de fricción entre el material y el tornillo

Características del tornillo	Diseño adecuado	Diseño defectuoso
Número de filetes	Sencillo 	Doble 
Ángulo del filete	Grande 	Pequeño 
Radio del flanco del filete	Grande 	Pequeño 

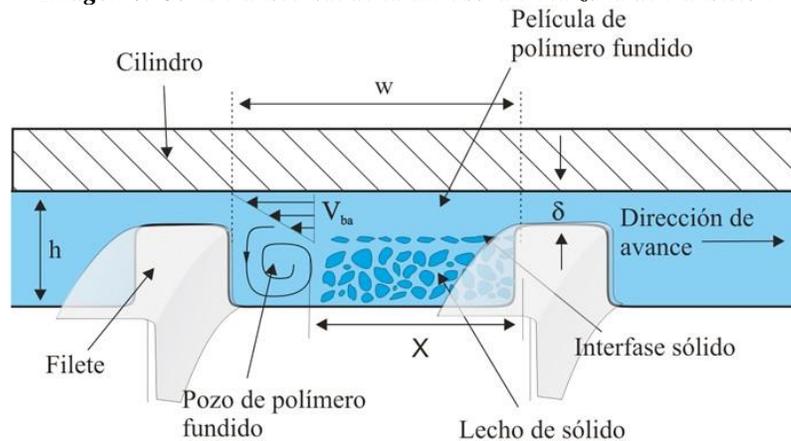
Fuente: Beltrán y Marcilla, 2011, p. 99

5.2 Fusión (zona de transición)

La zona de transporte de sólidos termina al comenzar la formación de la fina película de polímero fundido. La fusión se inicia como resultado del calor conducido desde la superficie del cilindro y del creado por fricción a lo largo de las superficies del cilindro y del tornillo. Generalmente se produce una enorme cantidad de calor por fricción, por lo que a veces, es factible iniciar la fusión sin necesitar la aplicación del calor externo. (Ojeda, 2019)

En primer lugar, se evidenciará una delgada capa de material fundido junto con cilindro, que crecerá hasta que su espesor sea igual al de la tolerancia radial entre el cilindro y el filete del tornillo o al tiempo que el material se encuentra formando un lecho sólido. Como efecto del movimiento del tornillo se crea un gradiente de velocidad en la película fundida puesta entre la capa sólida y la superficie del cilindro. El polímero fundido en la película es barrido por el filete que se anticipa, logrando que se separe del cilindro. El polímero fundido se reúne en una zona o pozo situado al frente del filete que avanza en la parte de adelante del canal. (Acuña y Salamanca, 2016) (Véase Imagen 6)

Imagen 6. Corte transversal de la extrusora en la zona de transición



Fuente: Ojeda, 2019, p. 12

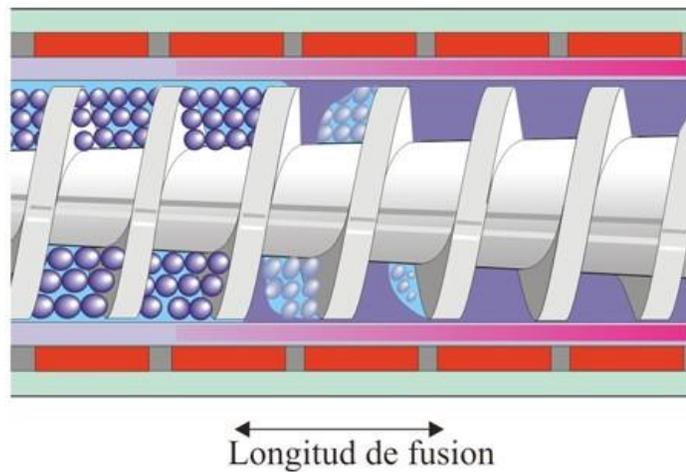
A medida que se acumula más fundido en el pozo de polímero, aumentará el tamaño del pozo, mientras que el ancho de la capa sólida se disminuirá. Es así como se creará una presión que empuja a la capa sólida y la ubica en la parte anterior del canal. Por ello, pese a que la mayoría de la fusión transcurre en la

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

superficie del cilindro, la altura de la capa sólida aumenta y lo que disminuye es su anchura, como se puede apreciar en la imagen 7, en la cual también se evidencia la longitud de fusión de tornillo desde que comienza la fusión hasta que ésta termina.

La transmisión de calor es óptima en una extrusora función que funciona adecuadamente, debido a que de manera continua se cuenta con una fina capa de material nuevo en contacto con el cilindro. Generalmente se aprecia la transmisión de calor del pozo fundido y la capa sólida. La existencia de la capa sólida revela también la eliminación del aire atrapado en las partículas sólidas. En cuanto la capa sólida es compactada y comprimida en el pozo de fundido, el aire atrapado entre las partículas escapa hacia el exterior vía la tolva de alimentación. (Textoscientíficos.com, 2005)

Imagen 7. Ancho del pozo de fundido a lo largo de la zona de transición



Fuente: Ojeda, 2019, p. 12

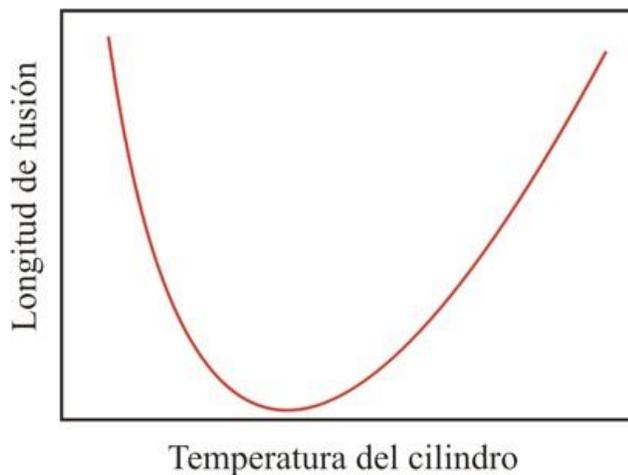
En ese sentido, el calor que se necesita puede ser producido desde la superficie caliente del cilindro, mediante la película fundida o por disipación viscosa (cizalla) gracias a las fuertes cizallas a que está sometida la delgada película de fundido. La relación entre estas dos cantidades de calor estriba en las situaciones de operación y del polímero usado. El flujo de calor por disipación viscosa está mejorado mientras aumenta la velocidad del tornillo. Sin embargo, la contribución de la transmisión de calor por conducción a la fusión se reduce con el aumento del caudal, y como consecuencia, se disminuye el tiempo de residencia del material en la extrusora.

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

En otro sentido, el aumento de la temperatura del cilindro implica, en primera medida, un aumento del flujo de calor por conducción, y consecuentemente, el aumento de la velocidad de fusión. Sin embargo, al aumentar la temperatura disminuye la viscosidad del material y así, la generación de calor por disipación viscosa. Por ello, a aquellos polímeros con una viscosidad es muy sensible a la temperatura se les puede reducir la velocidad de fusión. Esto se evidencia en la gráfica 10, donde se representa la longitud de fusión en función de la temperatura del cilindro para una velocidad del tornillo constante. (García, 2013)

De acuerdo con lo anterior, la longitud de fusión disminuye aumentando la velocidad de fusión y, al aumentar la temperatura del cilindro hasta donde la longitud de fusión aumenta, pero al disminuir la cantidad de calor creado por disipación viscosa.

Gráfica 10 Relación entre la longitud de fusión y la temperatura del cilindro para una velocidad del tornillo constante



Fuente: Beltrán & Marcilla, 2011, p. 125

En otro sentido, se ha comprobado que se necesita la menor holgura entre el filete del tornillo y el cilindro para que el proceso de fusión tenga lugar de forma conveniente. Con respecto a la profundidad del canal, en la mayoría de los tornillos se reduce gradualmente su profundidad entre la zona de transporte de sólidos y la de dosificado del fundido, la cual se encuentra fijada por la relación de compresión.

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

En general la velocidad de fusión aumenta al disminuir la profundidad del canal, porque se provoca una compresión del pozo de sólido hacia la capa de fundido que mejora la transmisión de calor y aumenta la cizalla. Pese a ello, si se comprime rápidamente el pozo de sólido se puede desarrollar un taponamiento de la extrusora. (Uribe, 2020)

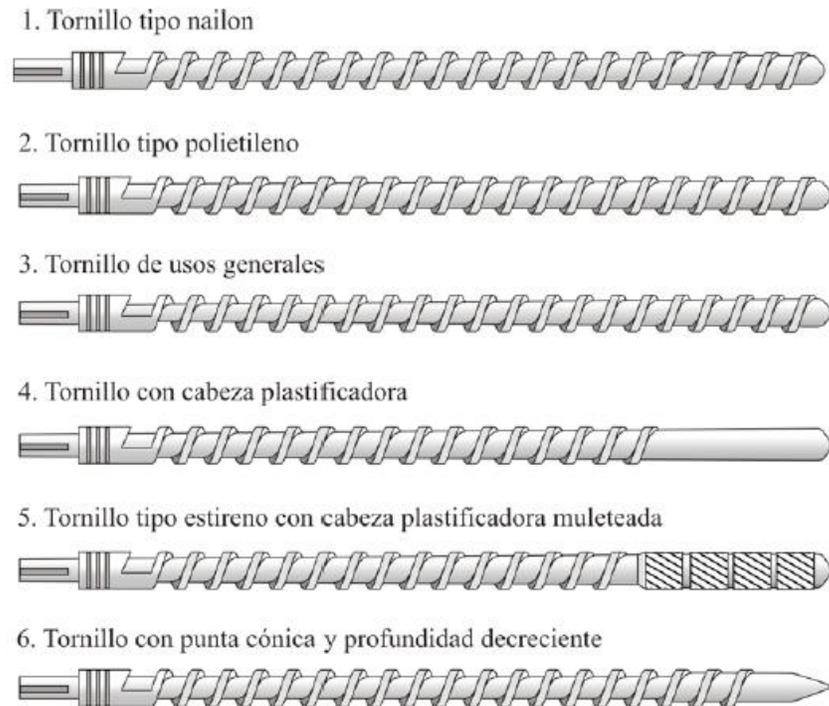
5.3 Transporte del fundido (zona de dosificación)

La zona de dosificado en el punto en que finaliza la fusión se inicia cuando la partícula de polímero se funde. De hecho, la profundidad del canal es uniforme en la zona de dosificado, por lo que todo el lecho sólido desaparece o sino el aire se eliminaría con mucha dificultad y quedaría atrapado en el fundido. La zona de dosificado del fundido actúa como una bomba en la que la corriente del material fundido hacia la salida de la extrusora se produce como consecuencia del giro del tornillo y de la disposición helicoidal de este. (Beltrán y Marcilla, 2011)

5.4 Configuración del tornillo

La elección del número y del diseño geométrico de las zonas del tornillo es un aspecto de gran complejidad e importancia, con base en ella se obtiene el diseño de la boquilla y de las velocidades de flujo esperadas, y las características de fusión del polímero, de su comportamiento reológico y de la velocidad del tornillo. Un tornillo simple, de tres zonas, está definido por el número de vueltas de hélice en las zonas de alimentación, compresión y dosificado. A continuación, en la imagen 8 se evidencia un ejemplo de diferentes configuraciones de tornillo. (Moya, 2016)

Imagen 8. Tipos de tornillos para diferentes fines



Fuente: Beltrán y Marcilla, 2011, p. 88

5.5 Técnicas de extrusión

De acuerdo Gómez y Gutiérrez (2007) La clasificación de las diferentes técnicas para extrusión de polímeros son:

- “Extrusión con un solo husillo
 - Extrusores convencionales o típicos
 - Extrusores con ventilación (o venteo) o desgasificación
 - Extrusores co-mezcladores
- Extrusores sin husillos
 - Bombas
 - Extrusores de disco
- Extrusores de husillo múltiple
 - Extrusores de doble husillo
 - Husillo que engranan
 - Husillos que engranan

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

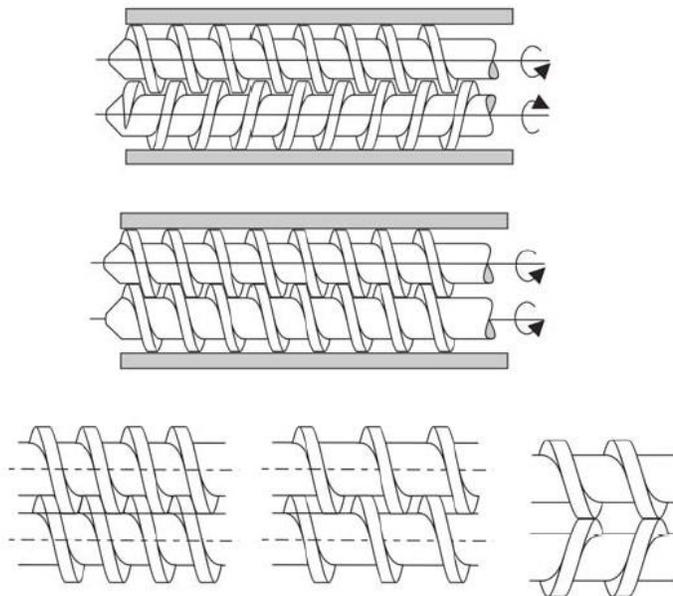
- Rotación en el mismo sentido
- Rotación en sentido inverso
- Extrusores con más de dos husillos
- Rodillos planetarios
- De 4 husillos (construcción particular para cada máquina)”

(P. 18)

Las extrusoras como son las multitornillo tienen más de un tornillo en las que hay gran variedad teniendo en cuenta si los tornillos tienen giro contrario (lo más corriente ya que ejercen más fuerza de cizalla) o paralelo, y el grado de interpenetración entre los mismos. En la Imagen 9 se evidencian algunas variantes posibles.

Las extrusoras de dos tornillos tienen opciones que superan en su mayoría a las de un solo tornillo. Algunas de sus ventajas son una mejor capacidad de mezclado y desgasificación, y un buen control del tiempo de residencia y de su distribución. En cuanto a sus desventajas se encuentran el precio, que es superior al de las de tornillo único y que sus prestaciones son difícilmente predecibles. (Beltrán & Marcilla, 2011)

Imagen 9. Disposición posible de los husillos en las extrusoras de doble husillo; giro contrario y giro en paralelo; diferentes grados de interpenetración de los tornillos



Fuente: Beltrán y Marcilla, 2011, p. 81

5.6 Componentes de la extrusora

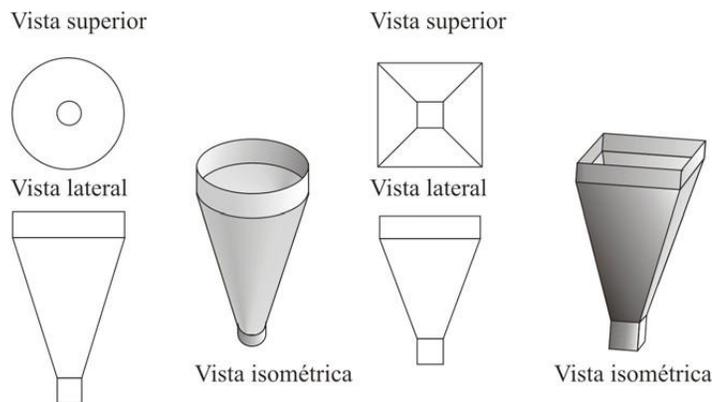
En esta sección se presentan las partes más importantes de la máquina que intervienen en la plastificación del polímero:

- Tolva de alimentación
- Camisa
- Tornillo
- Resistencias Eléctricas
- Controlador de Temperatura
- Motorreductor
- Variador de Velocidad

5.6.1 Tolva de alimentación

La tolva es el contenedor que introduce el material en la máquina. Es importante que la tolva, garganta de alimentación y boquilla de entrada estén ensambladas a la perfección y diseñadas de manera para que se proporcione un flujo constante de material. Esto se obtiene con facilidad con tolvas de sección circular, aunque son más costosas y complejas de construir que las rectangulares (ver Imagen 10). Su diseño posee un volumen que facilita el almacenamiento de material para 2 horas de trabajo. (Galán y Ojeda, 2020)

Imagen 10. Tipos de tolvas

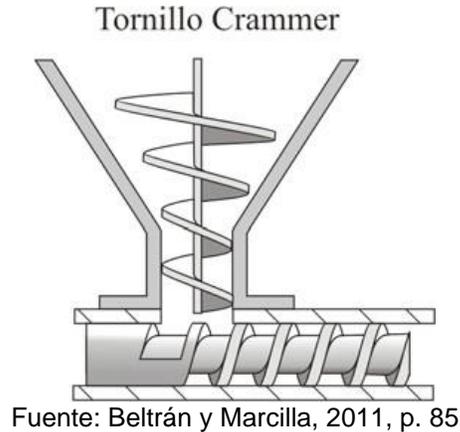


Fuente: Beltrán y Marcilla, 2011, p. 84

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

En ocasiones se asegura el flujo continuo del material usando dispositivos de vibración, agitadores e incluso tornillos como los que se evidencian en la Imagen 11.

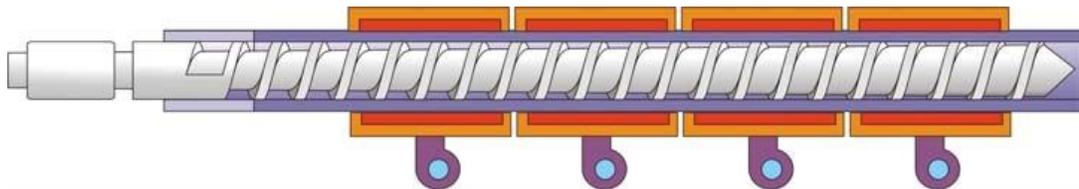
Imagen 11. Ejemplo de un tornillo de alimentación



5.6.2 Camisa

El cilindro de calefacción aloja en su interior al tornillo como se evidencia en la Imagen 12. Es necesario que la superficie del cilindro sea rugosa para aumentar las fuerzas de cizalla que soporta el material y permitir que éste fluya a lo largo de la extrusora. Para que no se oxide o desgaste mecánicamente, el cilindro, por lo general, se construye de acero muy resistente y a veces se equipa con un revestimiento bimetálico que le concede una elevada resistencia, en la mayoría de los casos superior a la del tornillo porque éste es más reemplazable. (Acuña y Salamanca, 2016)

Imagen 12. Sistema cilindro-calefacción de los tornillos



Generalmente el cilindro tiene sistemas de transferencia de calor. El calentamiento se realiza a través de resistencias eléctricas circulares ubicadas en

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

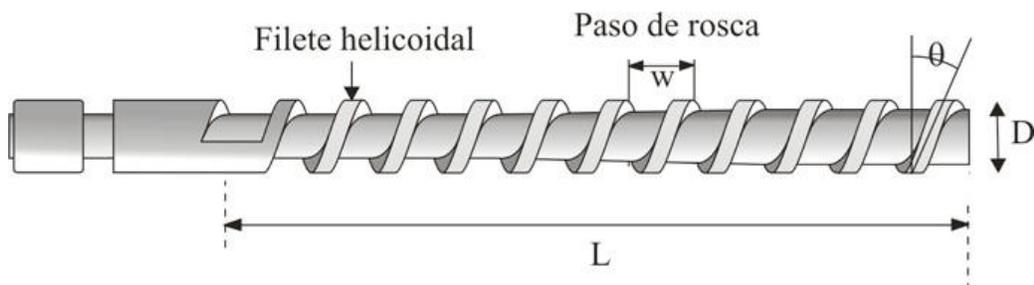
toda su longitud como se evidencia en la Imagen 12, y también, aunque es menos común, a través de la radiación o encamisado con fluidos refrigerantes o calefactores. El cilindro, por lo general, se divide en al menos tres zonas de calefacción, con control independiente en cada una de ellas, lo que facilita la consecución de un gradiente de temperatura razonable desde la tolva hasta la boquilla.

Es necesario que el cilindro se enfríe como producto de la generación interna de calor originada por la cizalla a la que es sometido el plástico se rebasa la temperatura nominal del proceso (lo que ocurre con normalidad). El enfriamiento en la menor parte de las ocasiones se hace con líquidos, ya que, pese a que posean más capacidad para la eliminación del calor que el aire, la temperatura es más difícil de controlar. Por lo general se utilizan soplantes. Es necesario considerar que los sensores de control de temperatura están situados en el cilindro, lo que produce que la temperatura del material sea más alta que la indicada por los controles. (Barbosa, 2012)

5.6.3 Tornillo

El tornillo o husillo radica en un cilindro largo cercado por un filete helicoidal (Imagen 13). El tornillo es una parte muy importante porque gracias a él se realizan las funciones de transporte, calentamiento, fundición y mezcla del material. La estabilidad del proceso y la calidad del producto que se consigue dependen mayormente del diseño del tornillo. (López, Maravillo, Martínez, y Palomec, 2020)

Imagen 13. Tornillo de una Extrusora



Fuente: Beltrán y Marcilla, 2011, p. 82

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

El material se presuriza mientras se desplaza por el tornillo, comienza con presión atmosférica en la tolva y aumenta hasta la salida por la boquilla. La sección de paso del tornillo no es continua, sino que es mayor en la zona de alimentación (mayor profundidad de canal). Por lo general el tornillo no está acompañado de ningún sistema de calentamiento o enfriamiento, pero en ciertas oportunidades se utilizan tornillos huecos por los que se hace circular un fluido refrigerante o calefactor.

Los materiales termoplásticos utilizados durante el proceso de extrusión difieren entre ellos. 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 complejidad para el diseño del tornillo, es lógico que se necesite usar diversos tipos de tornillos para tratar de manera acertada los diferentes materiales. En la práctica no es común que un tornillo permita el trabajo con materiales muy diversos; cada tornillo se diseña o elige para el trabajo con una combinación específica boquilla/material. (Plastyc Engineering Company, 2009)

5.6.4 Resistencias eléctricas

Las resistencias abrazaderas se usan en la industria del plástico para calentar el husillo y la camisa de la maquinaria de inyección. Para mayor precisión en la disipación del calor, las resistencias de abrazadera deben estar apretadas a la camisa totalmente. (Trullás Resistencias Eléctricas, 2016)

Imagen 14. Resistencia de abrazadera



Fuente: Trullás Resistencias Eléctricas, 2016, p. 10

5.6.5 Controlador de temperatura

Los controladores de temperatura brindan un rápido ajuste y suministran una gestión de temperatura justa para el control de múltiples aplicaciones al ofrecer el mejor precio, diseño y fácil funcionamiento. (Punina, 2015)

Imagen 15. Termostato (Control Digital de Temperatura)



Fuente: Punina, 2015, p. 56

5.6.6 Motorreductor

Se le llama motorreductor a una máquina bastante compacta que mezcla un reductor de rapidez y un motor. Estos van juntos en una sola pieza y se utilizan para minimizar la rapidez de un equipo de manera automática (Imagen 16). En la actualidad la evolución de este sistema reductor se perfeccionó y monumentales industrias la utilizan en sus procesos. (Roydisa, s.f.)

5.6.6.1 Elementos de un motorreductor

Un motorreductor tiene diversos elementos. Los 3 principales son: cuando se afirma que algún par o torque son parte del funcionamiento óptimo de esta máquina es porque sin ellos no podrían girar. Se trata de la fuerza que acciona al equipo para que este gire a una velocidad definitiva. Cuando es activada esta fuerza se le denomina flecha de salida que es lo mismo a la fuerza con que gira un motor. Sus unidades de medida son en kilogramos, metro o libra, pie, pulgadas, entre otras. Cuando este primer elemento se une con un tiempo determinado en que se ejecuta el giro, es lo que se conoce como potencia de un motorreductor.

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

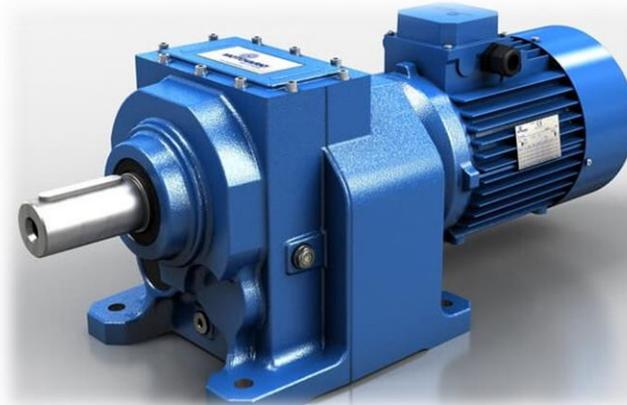
Ese es el segundo elemento de la máquina, que junto con la velocidad permiten que el motor se libere. En otras palabras, el par o torque depende directamente de la fuerza de giro y para esto la carga debe ser proporcional a ella. La velocidad de giro que toma la máquina varía de acuerdo con la potencia aplicada al motorreductor. (Roydisa, s.f.)

5.6.6.2 Cómo funciona un motorreductor

Primordialmente un motorreductor fundamenta su desempeño a minimizar la rapidez de las máquinas. Una vez que estas sobrepasan en fuerza al equipo que quiere desplazar, un reductor de rapidez es la solución. La particularidad de dichos modelos es que integran un motor que posibilita la reducción. Tenemos la posibilidad de resumir sus funcionalidades en un variador de rapidez y par. Lo cual disminuye de manera directa es la rapidez de giro del par o torque. El mejor indicador de en qué momento es mejor usarlo es hacer un examen al reductor indica qué tipo de carga es idónea para esta potencia. Para esto se usa un indicador de reducción para decidir si se incrementa o reduce la rapidez.

La finalidad es que la rapidez de acceso se regule y haga otra rapidez de salida. Abriendo la posibilidad de desplazar la maquinaria bajo una fuerza regulada que no afecte de manera negativa a los accesorios. (Roydisa, s.f.)

Imagen 16. Motorreductor



Fuente: Roydisa, s.f.

5.6.7 Variador de velocidad

Los variadores de frecuencia son sistemas usados para controlar la rapidez rotacional de un motor de corriente alterna. Un variador de frecuencia es una vertiente de un variador de rapidez, debido a que llevan un control de frecuencia de ingesta de alimentos, la cual se suministra por un motor. También se les conoce a los variadores de frecuencia como drivers debido a que sea de frecuencia ajustable (ADF) o de CA, VVVF (variador de voltaje variador de frecuencia), micro drivers o inversores; esto es dependiente en parte importante del voltaje que se trabaje.

Para que se conserven los motores eléctricos en funcionamiento al 100% se necesita regular de manera adecuada su manejo. El variador de frecuencia tiene justamente esta funcionalidad. Los demás denominados drivers de frecuencia regulan la electricidad que llega al motor.

El regulador o variador de frecuencia, acomoda la tensión antecedente de que llegue al motor. Del mismo modo, el variador acomoda la rapidez de las revoluciones del motor. Labores como la época de arranque y el paro de este como parte de sus funcionalidades fundamentales, estas funcionalidades, además de permitir muchas de las funcionalidades de procesos de automatización, además poseen la virtud de defender los motores.

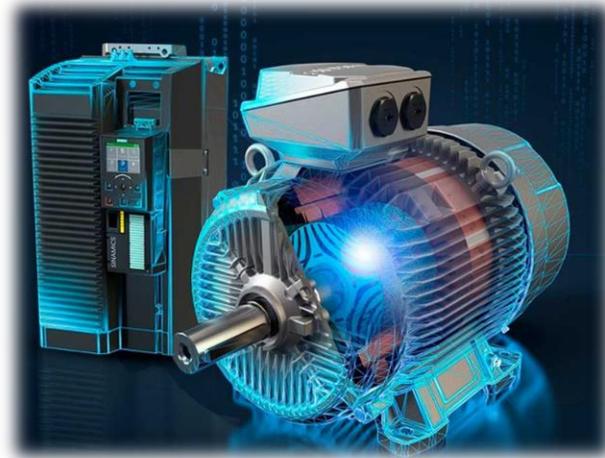
El variador de frecuencia representa grandes ventajas en inversión para las organizaciones dedicadas a la automatización y control de procesos. Dichos beneficios no son solo financieros, sino además operativos, ya que es viable usar un variador de frecuencia específico para cada plan. Estos tienen la posibilidad de ser de tipo monofásico, trifásico y hasta de placas solares. Todo dependerá del voltaje a regular y la frecuencia que se busque en el motor. Se aporta al ahorro energético en su uso, reducción de temperatura y seguridad para los equipos, entre otras ventajas se encuentran:

- Es posible conectar a motores trifásicos de corriente 220
- Facilita el control de velocidad del motor
- Facilita la regulación de presión de electrobombas y ventiladores
- Corrige la potencia del motor

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

- Elimina corrientes reactivas
- Garantiza el arranque suave de los motores
- Se necesita menor mantenimiento para los dispositivos. (Centro de formación técnica para la industria, s.f.)

Imagen 17. Variador de velocidad



Fuente: Roydisa, s.f.

6. EL PROCESO DEL RECICLAJE

La generación de residuos y su desempeño correcto son 2 de los monumentales desafíos que combaten las comunidades recientes para asegurar su viabilidad y sustentabilidad. Hay diferentes tácticas para manejarlos, que buscan reducir su porción y los impactos que producen en el ambiente (Grafica 11). La mejor alternativa es la reducción, o sea, el cambiar los procesos, ocupaciones y patrones de consumo, de manera que se reduzca la generación de residuos. A esta alternativa le siguen la reutilización, el reciclaje, la valorización energética, el procedimiento y la disposición en rellenos sanitarios.

Una vez que se disminuye la masa de residuos realizados hasta donde es posible, y por el momento no es probable reutilizarlos en su estado original, el reciclaje constituye la mejor alternativa para su desempeño. El reciclaje es la transformación de los residuos por medio de diversos procesos, que permiten restituir su costo económico y, al tiempo, de esta forma evitar su disposición final,

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

constantemente y una vez que esta reintegración favorezca un ahorro de energía y materias primas sin perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus recursos.

Aunque el reciclaje se estima principalmente como una forma de desempeño de residuos, realmente constituye una actividad que posibilita cambiar todo el periodo de vida de los productos, puesto que al reciclar un residuo se reduce la necesidad de sustraer y procesar novedosas materias primas. Con ello, además de eludir la debilidad de los recursos naturales, se ahorra la enorme proporción de energía y agua solicitada para obtenerlos, transportarlos y procesarlos. El reciclaje, además, puede tener relevantes beneficios para las economías locales, puesto que reduce la dependencia hacia las materias primas que se importan de otros territorios. (Moyano y Paez, 2019)

Gráfica 11. Jerarquía del manejo de residuos



Fuente: Diaz, s.f. [Sitio web]

6.1 ¿Por qué reciclar plásticos?

La existencia de plásticos en los residuos se ha aumentado de manera continua en las últimas décadas. Esto obedece a diversas razones, en medio de las que destaca su implementación en productos de vida eficaz corta que son desechados velozmente por los usuarios; se hapreciado que en torno al 50% de los plásticos que se generan se destina a aplicaciones de un solo uso, entre 20 y 25% se emplean en la obra y lo demás en la construcción de otros productos, como

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

electrónicos, muebles y vehículos. Los plásticos con más presencia en los residuos son el polietileno y el PET, ya que representan la más grande proporción en los envases y embalajes.

Como la gran mayoría de los plásticos no son degradables, cuando se desechan se acumulan en los rellenos sanitarios o tiraderos, o en los distintos hábitats que componen el planeta, a los que llegan debido a su mal manejo. (Díaz, s.f.)

6.2 Residuos sólidos en Colombia

Según datos de la Superintendencia de Servicios Públicos (2017) (en adelante, SSP) en Colombia se produjeron 10.3 millones de toneladas de residuos sólidos (SSP, 2018). “En promedio, Colombia dispuso alrededor de 30.081 Ton/día de residuos sólidos. La cifra promedio de reproducción de residuos sólidos en un hogar de Colombia es de 4.3 Kg/día” (Departamento Nacional de Estadística - DANE, 2018, pág. 7). Se debe destacar que de plástico en Colombia es de 1.250.000 ton/año y en materias primas, materiales y empaques consumidos y comprados. Además, en promedio un colombiano genera 24 kg al año (Departamento Nacional de Estadística - DANE, 2018)

El Régimen de Iván Duque ha hecho hincapié en la economía circular y sustentable como mecanismo para solucionar los primordiales desafíos de las localidades sobre la base de un modelo de 8 magnitudes: ambiental, económica, sociocultural, educativa, político-normativa, científico-tecnológica; intentando encontrar la recirculación de productos, generación de residuos y una disminución en el consumo de recurso que posibilite la coherencia con un mundo de recursos finitos (Garrido & Gándara, 2013). Sin embargo, en Colombia sólo el 17% de todos los residuos firmes incluyendo los plásticos son reutilizados, razón por la cual esta perspectiva de economía circular y de un desempeño correcto de los residuos debería ir más allá de la disposición correcta. Se necesita modificar este ritmo insostenible de consumo y generación de residuos y optar por un cambio de mentalidad integral a causa de las administraciones públicas, la zona privada y la ciudadanía (ONU, 2018)

Cabe mencionar que son las metrópolis los sitios en donde hay un más grande consumo generalizado de bienes y servicios como agua, energía, alimentos y transporte, por consiguiente, son el sitio en donde se crean gigantes volúmenes de residuos. Esto, sumado a que los individuos se acostumbraron a la inmediatez y la tranquilidad referentes a un ritmo de vida frenético, han llevado a que el cuidado del ambiente y el interés por un desarrollo sustentable hayan pasado a segundo plano (Universidad de los Andes; Greenpace, 2019)

6.3 ¿Qué plásticos son reciclables?

Los plásticos, en funcionalidad de su composición y su comportamiento una vez que son expuestos a la temperatura tienen la posibilidad de clasificarse en termoplásticos, termofijos y elastómeros. Los termoplásticos, al estar conformados por cadenas lineales y ramificadas, se fusionan al ser sometidos al calor y tienen la posibilidad de adoptar novedosas maneras. Esta propiedad es primordial para el reciclaje, puesto que posibilita recobrar los materiales y volver a utilizarlos por medio de procesos físicos primordiales, como el calentamiento. Ya que alrededor del 80% de los plásticos que se generan son termoplásticos, puede afirmarse que la enorme mayor parte de los plásticos son reciclables. Los termoplásticos, paralelamente, tienen la posibilidad de separarse en 2 equipos:

- “Commodities: son plásticos de bajo precio que se generan en gigantes volúmenes, por lo cual son extensamente empleados en aplicaciones de vida eficaz corta. Este conjunto, que incluye a los polietilenos (PE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS), polietileno tereftalato (PET) y sus copolímeros, constituye la proporción primordial de los plásticos reutilizados”. (Diaz, s.f.)
- “Plásticos de ingeniería: poseen superiores características mecánicas, resistencia al calor y al efecto, por lo cual tienen la posibilidad de usarse para suplir metales en productos como los coches y equipo electrónico. Su precio podría ser entre 2 y 20 veces el de los commodities, por lo cual se utilizan principalmente en aplicaciones de más grande vida eficaz, que

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

se hapreciado en por lo menos 3 años. No obstante, pese a que conforman una proporción menor en los residuos plásticos, su presencia va en crecimiento gracias a componentes como la obsolescencia programada de varios productos. Su reciclaje es complejo, puesto que usualmente se hallan incluidos con otros materiales, por lo cual necesitan numerosas fases previas de división. Una vez que el proceso se hace, principalmente se basa en su trituración para ser utilizados como cargas”. (Escuela Colombiana de Ingeniería, 2008)

Los termofijos y elastómeros muestran construcciones más complicadas que los termoplásticos, en las que las diversas cadenas de polímeros permanecen unidas entre sí mediante enlaces químicos, conformando redes. Al calentarse no se juntan, empiezan a descomponerse y se convierten en otras sustancias. Su reciclaje es, por consiguiente, semejante al de los termoplásticos de ingeniería, puesto que sólo se muelen o pulverizan para ser utilizados como cargas en matrices de otros polímeros. (Diaz, s.f.)

6.4 La necesidad de la separación

La mayor parte de los termoplásticos son reciclables. No obstante, una vez que diversos tipos de resinas se hallan mezclados el proceso principalmente no es posible, ya que no son miscibles (no se mezclan al calentarse) y cada una necesita diferentes condiciones de procesamiento. El costo que alcanzan en el mercado las resinas reutilizadas está estrechamente ligado a su nivel de pureza, empero purificar plásticos es mucho más difícil que purificar metales. Inclusive en mezclas del mismo tipo de plástico, algunas veces hay diferencias de color, peso molecular y presencia de aditivos que tienen la posibilidad de dañar las propiedades finales de los productos. A esto se debe aumentar la existencia de contaminantes gracias a su uso y de etiquetas y otro tipo de materiales con los que logren estar incluidos.

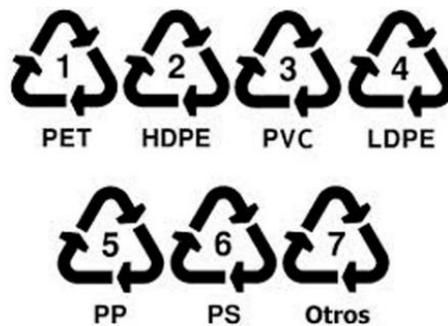
El reciclaje de plásticos mezclados, como el que se hace para crear madera plástica, necesita de aditivos para mejorar la miscibilidad de los plásticos y poder extruirlos en grupo, y principalmente se aplica en productos de bajo costo añadido. (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales - SEMARNAT, s.f.)

6.4.1 Los códigos de separación

La división es un paso vital en cualquier proceso de reciclaje, y de ella es dependiente en enorme medida la calidad de los nuevos productos que se fabricarán. Para que usuarios como recicladores logren diferenciar a los diferentes plásticos con más facilidad y los separen mejor, en 1988 la Sociedad de la Industria de los Plásticos (SPI, por sus siglas en inglés) planteó un código en el cual se designó a los commodities más relevantes un número de identificación como se observa en la imagen 18, en orden decreciente basado en el volumen que se reciclaba en aquel entonces de cada uno. El sistema, que ha sido creado para ser utilizado voluntariamente, fue adoptado internacionalmente, y se aplica a los productos plásticos mediante impresiones o inclusive en el molde en que se fabrica el producto.

Al instante de elegir el plástico es fundamental considerar como detectar dichos materiales para lograr clasificarlos. Hay diferentes procedimientos, como saber sus características físicas, flotabilidad, su color al entrar en combustión etcétera. Esto se hace a fin de poder procesarlos para un segundo uso en procesos como son la extrusión y la inyección. (ConcienciaEco, 2010)

Imagen 18. Plásticos comunes reciclables



Fuente: ConcienciaEco, 2010 [Sitio Web]

En ocasiones los productos no poseen el código SPI, quizás jamás ha sido impreso o se ha desvanecido con la época.

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

A continuación, algunos métodos de identificación, que, aunque no sean muy precisos conforman un punto de partida para este trabajo.

- Flotar, esta técnica es aprovechada para distinguir la densidad de los tipos de plástico. Cada tipo de plástico tiene una densidad específica que va a hacer que flote de maneras diferentes sobre diferentes líquidos. No obstante, en ocasiones es un poco difícil descifrar puesto que los aditivos tienen la posibilidad de modificar y hacen que la densidad sea un poco irregular. En la imagen 19 se puede observar algunas sustancias con las que podríamos identificar los polímeros.

Imagen 19. Propiedades flotantes, Precious Plastics

floats on:		alcohol	vegetable oil	water	glycerin
PET		no	no	no	no
HDPE		no	no	yes	yes
PVC		no	no	no	no
LDPE		yes	no	yes	yes
PP		yes	yes	yes	yes
PS		no	no	no	yes

Fuente: ConcienciaEco, 2010 [Sitio Web]

- Fuego, El plástico muestra sus características una vez que se le prende fuego. Para esta técnica debes cortar un trozo al artículo que no se encuentre marcado, y mirar su olor, color, y naturaleza.
- Golpear, una vez que golpeas el plástico con un martillo, este se rompe de diferentes maneras. Ciertos se quebrarán en pedazos gigantes, otros en pedacitos bastante pequeños y otros no se romperán para nada.

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

- Sonido, el plástico suena distinto cuando se cae a un piso de pavimento. Por ejemplo, el PP y el PE no suenan casi nada, mientras que el PS suena mucho más.
- Rasgar, los termoplásticos y termoestables tienen la posibilidad de ser diferenciados de forma sencilla con esta técnica. El termoplástico al ser cortado con un cuchillo queda limpio.
- Tipo de objeto, los productos comerciales, frecuentemente permanecen hechos del mismo plástico. Esta es otra forma de detectar qué tipo de plástico son.

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

Tabla 3. Propiedades visuales de los plásticos comunes, Precius Plastics

Type		name	properties	common uses	burning
PET		polyethylene terephthalate	clear, tough, solvent resistant, barrier to gas and moisture, softens at 80°	Soft drink, water bottles, salad domes, bisquit trays, food containers	yellow flame little smoke
HDPE		high-density polyethylene	Hard to semi-flexible, resistant to chemicals and moisture, waxy surface, softens at 75°	Shopping bags, freezer bags, milk bottles, juice bottles, icecream containers, shampoo, crates	difficult to ignite smells like candle
PVC		polyvinyl chloride	Strong, tough, can be clear and solvent, softens at 60°	Cosmetic containers, electrical conduit, plumbing pipes, blister packs, roof sheeting, garden hose	yellow flame green spurts
LDPE		low-density polyethylene	Soft, flexible, waxy surface, scratches easily, softens at 70°	Cling wrap, garbage bags, squeeze bottles, refuse bags, mulch film	difficult to ignite smells like candle
PP		polypropylene	Hard but still flexible, waxy surface, translucent, withstands solvents, softens at 140°	Bottles, icecream tubes, straws, flower-pots, dishes, garden furniture, food containers	blue yellow tipped flame
PS		polystyrene	Clear, glassy, opaque, semi tough, softens at 95°	CD cases, plastic cutlery, imitation glass, foamed meat trays, brittle toys,	dense smoke
OTHER		all other plastics	Properties depend on the type of plastic	automotive, electronics, packaging	all other plastics

Fuente: ConcienciaEco, 2010 [Sitio Web]

7. MARCO REFERENCIAL

7.1 Modificación reológica de poli (tereftalato de etileno) reciclado: mezcla y extrusión reactiva

El uso de PET reciclado (rPET) en aplicaciones a extenso plazo, como compuestos, se convierte en una solución ecológica para los desperdicios de PET. Una dificultad importante para superar por usar rPET en compuestos es su alta viscosidad que afecta la impregnación con las fibras a lo largo del proceso de

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

consolidación. Esto sucede porque el PET sufre una degradación termo mecánica e hidrolítica durante su reciclado mecánico reduciendo su viscosidad que ocasiona una pérdida de características mecánicas.

Por esta razón, se realizan las modificaciones reológicas durante el reciclaje mecánico y se consigue la fluidez que se necesita para los compuestos mientras se mantienen las propiedades mecánicas. La modificación reológica se desarrolla a través de métodos físicos y químicos, el primero consiste en mezclar con PET virgen (vPET) de baja viscosidad en estado fundido.

El segundo, se lleva a cabo en rPET, vPET y sus mezclas por extrusión reactiva. Se estudió el efecto de las modificaciones reológicas sobre las propiedades térmicas y mecánicas finales. Los resultados más significativos evidenciaron que los dos métodos disminuirían la viscosidad sin comprometer las propiedades mecánicas. Además, el método químico durante la extrusión reactiva suministró valores de módulo elástico más altos. (Asensio, *et.al.*, 2020)

7.2 Un caso de estudio real de reciclaje mecánico como alternativa de manejo de film plástico de polietileno presentado en residuos sólidos urbanos mixtos

Este trabajo presenta una investigación sobre el reciclaje mecánico de plásticos con el fin de promover la tasa de este reciclaje en la película plástica de polietileno presente en los residuos sólidos urbanos, que no habían sido recolectados de manera selectiva. El objetivo de ello es disminuir la cantidad de este material depositado en los rellenos sanitarios. El estudio aporta información sobre la composición principal de la materia prima, las características del film de plástico reciclado y los efluentes obtenidos durante su proceso de reciclaje que incluyó lavado (sin químicos), secado y extrusión.

A nivel metodológico, en primer lugar, se realizó una caracterización de la materia prima que incluyó la determinación de las principales propiedades del agua de lavado obtenida después de su limpieza. Luego, se realizó el análisis de los principales efluentes del proceso de reciclaje mecánico. Finalmente, se determinó el contenido de cenizas, densidad relativa, propiedades térmicas, propiedades

mecánicas, propiedades reológicas, entre otras, para el material reciclado y se comparó con el material virgen. (Jose Manuel Soto, 2018)

7.3 De residuos plásticos a materias primas industriales: una evaluación del ciclo de vida de la práctica de reciclaje mecánico de plástico basada en un estudio de caso del mundo real

El reciclaje mecánico de residuos plásticos es una alternativa medioambiental que contribuye a la eliminación de residuos plásticos y ha tenido una acogida significativa en la industria. Sin embargo, se puede encontrar información limitada sobre el reciclaje de plástico industrializado o sobre los materiales reciclados, a pesar de que el uso de plásticos reciclados ya se ha extendido a la producción de automóviles.

Este estudio investiga los impactos ambientales del ciclo de vida de la práctica de reciclaje mecánico de plástico de una empresa de reciclaje de plástico en China. Los residuos plásticos de diversas fuentes, como los residuos agrícolas, los fabricantes de productos plásticos, los residuos plásticos sólidos recogidos y las piezas desmontadas de los residuos de equipos eléctricos y electrónicos, se procesan en tres rutas y los productos terminan en diferentes mercados.

Los resultados de las evaluaciones del ciclo de vida muestran que el proceso de extrusión tiene los mayores impactos ambientales, seguido por el uso de cargas y aditivos. En comparación con la producción de plásticos vírgenes y compuestos, el reciclaje mecánico ha demostrado ser una alternativa superior en la mayoría de los aspectos medioambientales.

La sustitución de compuestos plásticos vírgenes por compuestos plásticos reciclados ha logrado los mayores beneficios medioambientales, ya que la producción de compuestos vírgenes tiene un impacto casi 4 veces mayor que la producción de compuestos reciclados en cada factor de daño de punto final de ReCiPe. Este estudio proporciona la información necesaria sobre la práctica de reciclaje de plástico industrializado existente y se dan recomendaciones. Las

implicaciones de la investigación se presentan con el propósito de lograr una mayor tasa de sustitución y un menor impacto ambiental. (Fu Gu, 2017)

7.4 El modelado de procesos de extrusión.

Los procesos de extrusión se utilizan ampliamente en industrias que tienen como objetivo producir soluciones avanzadas para demandas cada vez más sofisticadas en los sectores del plástico, la alimentación y la farmacéutica. Aunque el proceso se ha utilizado desde la década de 1930, se dispone de información limitada sobre el cálculo analítico de la extrusión. Generalmente, la producción se ha realizado sobre la base de la experiencia empírica y enfoques de prueba y error. Sin embargo, el desarrollo de las operaciones industriales se aborda mejor modelando los procesos involucrados, y el flujo de polímeros fundidos y fibras en las extrusoras se ha sometido a algunos estudios previos. También se incluye una descripción general del diseño de una matriz, así como los desafíos en la producción de láminas / películas. Este artículo revisa de manera sistemática y crítica la literatura relacionada con el diseño de procesos, diseño de máquinas, parámetros de proceso, modelos de flujo. (Marco Hivarinen, 2020)

7.5 Métodos recientes para la optimización de la extrusión de plástico

La extrusión de plástico ha sido un proceso desafiante para muchos fabricantes e investigadores para producir productos que cumplan con los requisitos al menor costo. Frente a la competencia global en la industria de productos plásticos, utilizar el enfoque de prueba y error para determinar los parámetros del proceso para la extrusión de plástico no es ya es suficientemente bueno. Durante la producción, las características de calidad pueden desviarse debido a la deriva o el cambio de las condiciones de procesamiento causado por el desgaste de la máquina, cambio ambiental o fatiga del operador. Determinando el proceso óptimo La configuración de los parámetros influye críticamente en la productividad, la calidad y el costo de producción en las industrias relacionadas con el plástico. El objetivo de este artículo es revisar la investigación de la determinación de

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

parámetros de proceso y diseño de matrices para extrusión de plástico. Investigación basada en varios enfoques, incluido Taguchi técnica, redes neuronales artificiales (ANN), lógica difusa, algoritmos genéticos (GA), el modelado no lineal y la metodología de superficie de respuesta se discuten. (Geo Raju, 2014)

7.6 Estudio de la fluencia térmica del pet en el proceso de termoformado

En la actualidad los estudios de investigación en el proceso de termoformado son muy limitados y en idioma español aun lo son más. El estudio de la fluencia térmica del PET y su relación con un buen acabado de piezas termoformadas no se ha reportado en estudios de investigación preliminares, aunque un estudio reciente de Sánchez López et al. (2012) reportaron que en el Instituto Tecnológico de Aguascalientes se ha estado trabajando en la Caracterización del Proceso de Extrusión de PET Reciclado. Para tal efecto se requirió diseñar y construir una máquina extrusora y la conceptualización de la extrusora se basó en la caracterización de los parámetros del proceso de extrusión del PET reciclado, en donde se identificó que uno de los principales parámetros es la fluencia térmica del material, ya que influye directamente en el tiempo, la velocidad y la presión de extrusión. En esta investigación se relacionará la deflexión de las láminas producto de la fluencia térmica del PET para relacionarlas con un buen acabado de las piezas termoformadas. (Hancock R. M., 2014)

8. METODOLOGIA, EJECUCIÓN DE OBJETIVOS

Las actividades según los objetivos específicos planteados en este proyecto se describen a continuación.

8.1 Identificar los diferentes residuos plásticos y sus propiedades para establecer los parámetros de diseño y simulación.

- Seleccionar el tipo de polímero a utilizar basado en la clasificación de los plásticos
- Reconocer las propiedades mecánicas del material

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

- Reconocer acerca de los métodos de separación y tratamientos del material
- Aprender acerca del proceso de transformación del material.

8.2 Diseñar el modelo óptimo de extrusora que se ajuste a los requerimientos de los residuos mediante software como herramientas CAD

- Dibujar Husillo
- Dibujar Camisa
- Dibujar Estructura de la maquina
- Dibujar Tolva
- Diseñar y dibujar acople de transmisión de potencia
- Diseñar Transmisión de potencia
- Boquilla
- Tapas de protección
- Motorreductor
- Resistencias eléctricas
- Caja de control
- Pernos
- Realizar ensamblaje de piezas por partes
- Realizar ensamblaje total

8.3 Realizar los cálculos acordes a las variables de funcionamiento para así seleccionar materiales y procesos de construcción y ensamble.

- Calcular el ángulo del filete
- Calcular el ancho del filete
- Calcular el paso de la rosca
- Calcular la holgura
- Calcular el flujo de arrastre
- Calcular el flujo de presión
- Calcular el flujo de fugas
- Calcular constante de cabezal

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

- Calcular velocidad de cortadura
- Calcular el flujo volumétrico
- Calcular la potencia requerida
- Calcular el consumo eléctrico
- Calcular la presión máxima
- Calcular la fuerza del husillo
- Calcular la transferencia de calor
- Calcular el motorreductor

8.4 Simular el comportamiento bajo cargas estáticas de la estructura en el proceso de extrusión.

- Importar el CAD
- Realizar análisis estructural al soporte
- Leer e interpretar resultados

8.5 Desarrollar planos y presupuesto general del proyecto.

- Plano de la estructura
- Plano de camisa y discos de agarre
- Plano del husillo
- Plano de Tolva
- Plano de piñones
- Plano de acople
- Plano de tapas de protección
- Plano de resistencias
- Tabla de presupuestos para el personal
- Tabla de presupuestos de materiales
- Lista de equipos a utilizar que tienen costos dependiendo del tipo de trabajo.

9. RECURSOS NECESARIOS

9.1 Recursos humanos

Para el desarrollo de este proyecto contaremos con el apoyo de:

- Director de trabajo de grado quien será el encargado de verificar y aprobar el cumplimiento de los objetivos propuestos.
- Codirector de trabajo de grado el cual guiara y aportara conocimientos para la realización satisfactoria del proyecto.
- Estudiante del programa de ingeniería mecánica que llevara a cabo la investigación y el estudio requerido para la finalización exitosa del trabajo de grado.

9.2 Recursos financieros

Los recursos económicos son una parte fundamental a la hora de presentar un proyecto, a continuación, un resumen del costo total.

9.3 Gastos de planificación y organización

Tabla 4. Recursos financieros

Personal	Valor monetario (Pesos)
ESTUDIANTE	2 SMMLV
DIRECTOR	5 SMMLV
CODIRECTOR	5 SMMLV
TOTAL	11.304.000

Fuente: Elaboración propia, 2021

9.3.1 Gastos de materiales

Materiales necesarios para poder construir la extrusora.

Tabla 5. Recursos económicos para materiales

TAMAÑO	MATERIAL	CANTIDAD	VALOR Uní. (Pesos)
3/16	Lamina de acero	1/2	250.000
1" ½	Tornillo 3/8	25	1000
1" ½	Tuerca	25	500
1" ½	Arandela	50	200

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

70x70x1.5x6	Perfil cuadrado	2	166.800
111 CM	Husillo	1	750.000
1 M	Camisa	1	750.000
15 HP	Motor	1	2.600.000
I10	Reductor	1	700.000
3/8"	Chumacera	1	40.000
Ø 60MM X 30MM L	Eje de acero	1	80.000
Ø55MM X 100MM L	Eje de acero	1	70.000
Ø 115 MM	Piñones	2	60.000
1400 MM	Cadena de moto	1	138.000
	Resistencia eléctrica tipo Abrazadera	5	65.000
	Termocuplas	5	7.000
	Control de temperatura	5	150.000
	Interruptor	1	6.000
	Variador de velocidad	1	1.200.000
	Boquilla	1	200.000
Total			7.447.100

Fuente: Elaboración propia, 2021

9.3.2 Gasto de equipos

Recurso de equipos para el momento de la construcción de la máquina.

Tabla 6. Equipos que utilizar para futura construcción

EQUIPOS	CANTIDAD	PRECIO (PESOS)
Soldadura	2	15.000 PAQUETE ELECTRODO
Torno	1	50.000 LA HORA
Fresadora	1	50.000 LA HORA
Dobladora de lamina	1	N/A
Disco de corte	1	15.000
Esmeril	1	N/A

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

Pulidora	1	N/A
Juego de copas y llaves	1	N/A
Pintura negra, azul y amarilla	1	70.000
Total		Aproximadamente 215.000

Fuente: Elaboración propia, 2021

10. CALCULOS DE DISEÑO

El diseño de la máquina está basado en un tornillo sin fin de usos generales o husillo y una camisa, estas partes fueron compradas usadas a un proveedor en la ciudad de Bogotá, y fue puesto a disposición en la universidad de Pamplona, sin embargo, se realiza el estudio correspondiente del proceso de fabricación.

En cuanto a los conceptos matemáticos, el trabajo de una extrusora puede obtenerse al aplicar en conjunto las ecuaciones correspondientes a las leyes de la conservación de la masa, energía y número de movimientos, con las que se describe el estado físico de un líquido a presión, un polímero en este caso.

10.1 Medidas reales del husillo

Longitud total: 111 cm

Longitud zona de filete: 100 cm

Diámetro exterior: 5 cm

Profundidad zona de dosificación: 4 mm

Diámetro de raíz: 3.5 cm

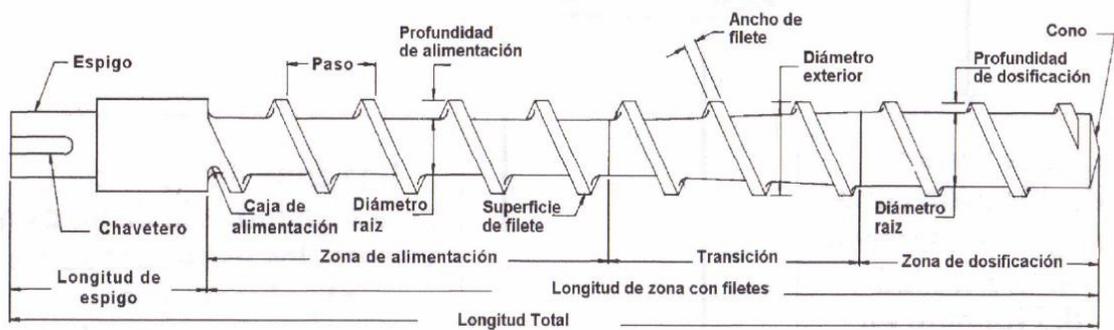
Profundidad zona de alimentación: 6 mm

Diámetro raíz: 3 cm

Ancho de filete: 5 mm

Paso: 3.5 cm

Imagen 20. Características del husillo



Fuente: Gómez y Gutiérrez, 2007, p. 16

10.2 Diseño del husillo

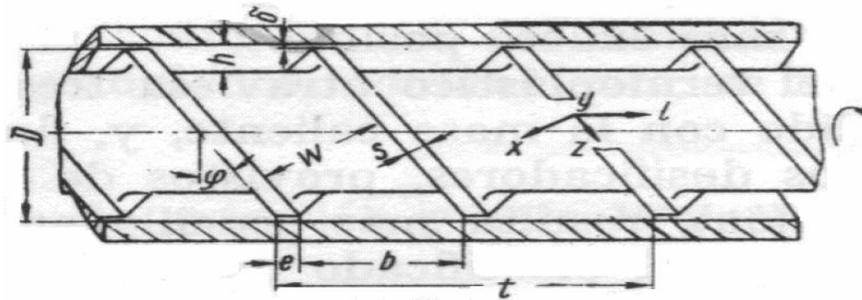
El tornillo sin fin o husillo consiste en un rotor que representa de hélice continua (tornillo) que al girar apoyado en sus dos extremos al interior de una camisa fija imparte movimiento axial al material que se deposita, este se transporta, funde y homogeniza aumentando la presión para que pueda salir a través de la boquilla.

El husillo consta de 3 zonas básicas que se pueden observar en la Imagen 20:

1. la zona de alimentación que moviliza los *pellets* sólidos y ahí mismo comienza la elevación de la temperatura.
2. La zona de transición en la que se comprime el material y a la vez están sujetos a fricción y esfuerzos cortantes, en esta zona se logra una fusión efectiva.
3. La zona de dosificación en la que se homogeniza el material fundido y se llevan a cabo las mezclas. Esta pieza está elaborada en un acero 4140 tratado térmicamente en el cual la resistencia a la tracción es típica para tornillos de extrusión con una dureza de 32 Rc.

Los parámetros más significativos para el diseño de un husillo son su longitud (L), diámetro (D), el ángulo del filete (φ) y el paso de la rosca.

Imagen 21. Vista de sección del husillo



Fuente: Gómez y Gutiérrez, 2007, p. 40

10.2.1 Ángulo del filete

El transporte de material desde la zona de alimentación hasta la salida depende del ángulo de filete (φ), basados en los principios básicos de diseños de tornillos el ángulo (φ) no debe ser menor a 17° ni mayor a 30° , de lo contrario se vería afectada la velocidad de transporte del material. En esta máquina se utilizará un ángulo de filete de 24° ya que es con el que estaba fabricado el husillo y vemos que este se encuentra en el rango apropiado.

Sin embargo, para el cálculo del ángulo de filete o hélice de tornillo el cual va a ser constante se hace uso de la siguiente ecuación matemática.

Ecuación 4. Cálculo del ángulo de filete o hélice de tornillo

$$\mathbf{Tan}(\varphi) = \frac{w}{\pi \cdot D}$$

Donde:

w: Paso de la rosca

φ : Angulo del filete

D: Diámetro exterior del husillo

Es importante tener en cuenta que siempre que se cumpla la relación $w=D$ el ángulo (φ) va a ser igual a 17° .

10.2.2 Ancho del filete

El ancho de filete del tornillo o husillo esta descrito mediante la siguiente ecuación dada por el científico Savgorodny (1973) en el libro *Transformación de plásticos*.

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

Ecuación 5. Ancho de filete del tornillo o husillo

$$\begin{aligned}e &= 0,1 * D \\e &= 0,1 * 50 \text{ mm} \\e &= 5 \text{ mm}\end{aligned}$$

Al utilizar la ecuación podemos ver que el valor coincide con las medidas tomadas al caracterizar el husillo.

10.2.3 Paso de la rosca

El paso de la rosca (w) en un tornillo extrusor es la distancia que avanza un tornillo por cada vuelta realizada. Para determinar qué medida debe ser el paso de la rosca se aplica la siguiente ecuación.

Ecuación 6. Paso de la rosca (w) en un tornillo extrusor

$$w = \pi * D * \tan(\varphi)$$

Debido a que se utilizará un tornillo ya existente tomaremos el valor medio de 3.5 mm para los cálculos respectivos.

10.2.4 Holgura

La holgura (δ) es la diferencia entre el diámetro exterior del husillo y el diámetro interior de la camisa, este parámetro es muy importante a la hora de transportar el plástico en el interior del cilindro porque mejora la homogeneidad y eficiencia del flujo del plástico. Se determina mediante la siguiente ecuación matemática según Savgorodny (1973).

Ecuación 7. Cálculo de la holgura

$$\begin{aligned}\delta &= 0.002 * D \\ \delta &= 0.002 * 50 \text{ mm} \\ \delta &= 0.01 \text{ cm}\end{aligned}$$

10.3 Diseño de la camisa

La camisa o cilindro de calefacción alberga en su interior al husillo, es necesario que la superficie sea muy rugosa para aumentar las fuerzas de cizalla que soportará el material y facilite que este fluya a lo largo de la extrusora. Esta

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

pieza suele construirse en aceros muy resistentes para evitar la corrosión y el desgaste mecánico, está fabricada en un acero 8630 AISI templado en aceite.

Las medidas de la camisa son las siguientes:

Diámetro externo (D_e):

Diámetro interno (D_i):

Esta medida (D_i) se puede obtener midiendo la pieza en físico o si no de acuerdo con la siguiente ecuación.

Ecuación 8. Medida de la camisa

$$D_i = D + \delta$$

$$D_i = 50 \text{ mm} + 0,1 \text{ mm}$$

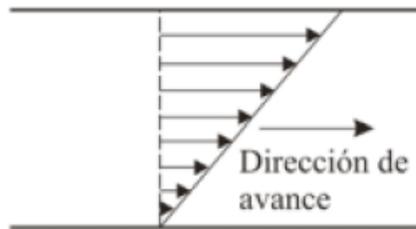
$$D_i = 51 \text{ mm}$$

10.4 Flujo volumétrico

El estudio del movimiento de un material viscoso a través del husillo de una máquina de extrusión se basa en tres tipos diferentes de flujo: el flujo de arrastre o de fricción (α) que actúa gracias a la fricción del material con el tornillo y con las paredes de la camisa (Grafica 12), siendo el responsable del movimiento del material desde la tolva de alimentación hasta la boquilla; el flujo de presión o de retroceso (β), contrario al anterior y debido a la diferencia de presión entre la tolva y el cabezal de la máquina, la presión última que se crea por la restricción que impone la boquilla o el plato rompedor, finalmente, el flujo de pérdida o de fugas (γ) que tiene lugar entre el cilindro y el filete del tornillo y es también opuesto al flujo de arrastre y originado por el gradiente de presión a lo largo del tornillo. La tolerancia radial de ajuste entre el tornillo y las paredes internas de la camisa son por lo general muy reducidas (del orden de 0,1 milímetros) y, por lo tanto, el flujo de pérdidas es mucho más pequeño que los dos mencionados anteriormente. (Beltrán y Marcilla, 2011)

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

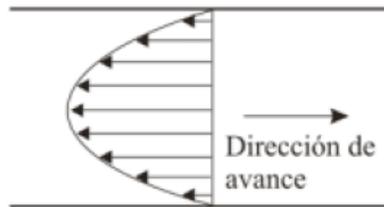
Gráfica 12. Perfil de velocidades originado por el flujo de arrastre



Fuente: Beltrán y Marcilla, 2011, p. 96

El flujo de presión se debe, como ya se ha indicado, al gradiente de presión a lo largo del cilindro. La presión es mayor en el lado de la boquilla, y este gradiente de presión tiende a hacer que el material fluya hacia atrás a lo largo del canal del tornillo oponiéndose pues al flujo de arrastre y suponiendo un retroceso del material en el canal del tornillo. El perfil de velocidades de presión es parabólico debido a la existencia de un gradiente y se representa de la siguiente Grafica 13.

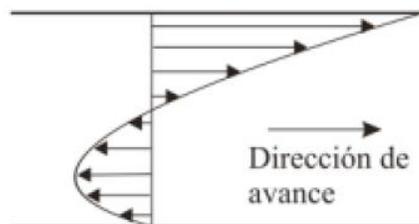
Gráfica 13. Perfil de velocidades debido al flujo de presión



Fuente: Beltrán y Marcilla, 2011, p. 96

Como el flujo de perdidas es muy pequeño comparado a los dos anteriores y no es preciso considerarlo, el flujo total a lo largo del canal del tornillo es el resultado del flujo de avance y del de presión y su perfil de velocidades se determina al sumar algebraicamente los dos de la siguiente manera, (Grafica 14).

Gráfica 14. Perfil de velocidad del flujo volumétrico total



Fuente: Beltrán y Marcilla, 2011, p. 96

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

Para determinar el flujo volumétrico de la máquina se utiliza la siguiente ecuación.

Ecuación 9. Flujo volumétrico

$$Q = \left(\frac{\alpha * K}{K + \beta + \gamma} \right) * n$$

Donde:

α : Flujo de arrastre

β : Flujo de presión

γ : Flujo de fuga

k= Constante total de la forma geométrica del cabezal

n= RPM

10.4.1 Flujo de arrastre

Ecuación 10. Flujo de arrastre

$$\alpha = \frac{\pi * m * D * h d \left(\frac{w}{m} - e \right) * \cos^2(\varphi)}{2}$$

m: Número de canales del husillo

hd: Profundidad dosificación

w: Paso del filete

e: Ancho de filete

D: Diámetro del husillo

$$\alpha = \frac{\pi * 1 * 5cm * 0.4cm \left(\frac{3.5cm}{1} - 0.5cm \right) * \cos^2(24)}{2}$$

$$\alpha = 7.8655 \text{ cm}^3$$

10.4.2 Flujo de presión

Ecuación 11. Flujo de presión

$$\beta = \frac{m * h d^3 \left(\frac{w}{m} - e \right) * \sin^2(\varphi) * \cos^2(\varphi)}{12 * L}$$

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

$$\beta = \frac{1 * 0.4^3 \text{ cm} \left(\frac{3.5 \text{ cm}}{1} - 0.5 \text{ cm} \right) * \sin^2(24^\circ) * \cos^2(24^\circ)}{12 * 100 \text{ cm}}$$

$$\beta = 5.9421 \times 10^{-5} \text{ cm}^3$$

10.4.3 Flujo de fugas

Ecuación 12. Flujo de fugas

$$\gamma = \frac{\pi^2 * D^2 * \delta^3 * \tan \varphi}{10 * e * L}$$

$$\gamma = \frac{\pi^2 * 5^2 \text{ cm} * 0.01^3 \text{ cm} * \tan(24^\circ)}{10 * 0.5 \text{ cm} * 100 \text{ cm}}$$

$$\gamma = 2.1971 \times 10^{-7} \text{ cm}^3$$

10.4.4 Constante de cabezal k

Según el investigador soviético Savgorodny, para determinar la constante de cabezal k (coeficiente de la forma geométrica), el cabezal se divide convencionalmente en sucesivas zonas de diferente configuración (Tabla 7), estableciendo para cada una de estas zonas la constante K.

Tabla 7. Elección del tipo de cabezal

TIPO DE GEOMETRIA	FÓRMULA	NOMENCLATURA
RECTANGULAR	$K = \frac{b * h^3}{12 * L}$	b: base, h: altura y L: longitud del canal
CILINDRICA	$K = \frac{\pi * d^4}{128 * L}$	d: diámetro del canal de la boquilla, L: longitud del canal
CONICA	$K = \frac{3\pi * d_0^3 * d_1^3}{128 * L(d_0^2 + d_1 * d_0 + d_1^2)}$	d_0 : Diámetro de entrada del material en un canal anular cilíndrico. d_1 : Diámetro de salida del material en un canal anular cilíndrico.

Fuente: Basado en Savgorodny, 1973

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

Para este diseño se escogió la geometría cónica con la cual se espera obtener un filamento delgado como resultado del proceso de extrusión.

Ecuación 13. Constante de cabezal

$$K = \frac{3\pi * d_0^3 * d_1^3}{128 * L * (d_0^2 + d_1 * d_0 + d_1^2)}$$

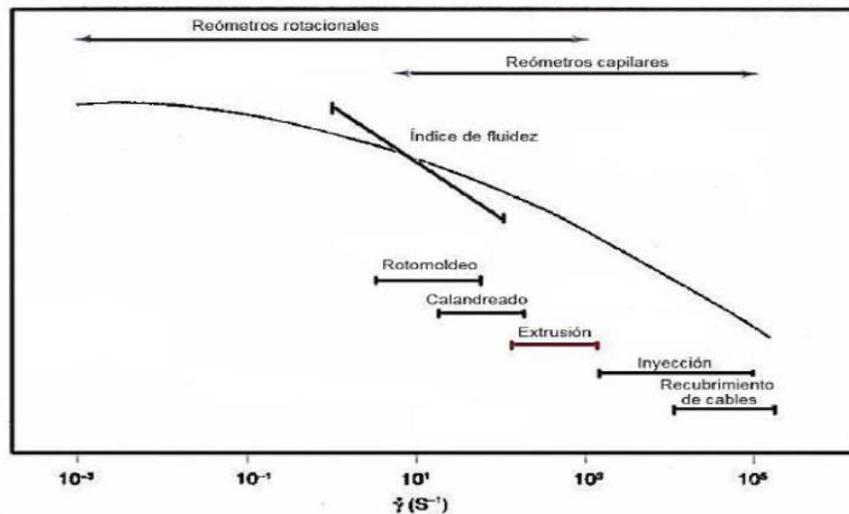
$$K = \frac{3\pi * 50^3 mm * 43^3 mm}{128 * 1000(50^2 + 43 * 50 + 43^2)}$$

$$K = 0.11259 \text{ cm}^3$$

10.4.5 Velocidad de cortadura

La velocidad efectiva (u) se establece en función de la velocidad de cortadura por medio de diagramas (Grafica 15), preparados para los diferentes materiales, en función de la temperatura. En la siguiente grafica se toman los datos de velocidad de cortadura $100s^{-1}$ y es donde comienza el proceso de extrusión.

Gráfica 15. Velocidad de cortadura para los distintos procesos de plástico



La velocidad de cortadura que se utiliza para el PET, con relación a los Parámetros de rpm esta entre 85 a 165. Mediante la siguiente ecuación matemática se determina los rpm necesarios para el desempeño óptimo de la máquina.

Ecuación 14. Velocidad de cortadura

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi * D * \eta}{h_d}$$

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

\dot{Y} : Velocidad de cortadura

η : Revoluciones por minuto

h_d : Profundidad del canal en la zona de dosificación

D: Diámetro del husillo

$$\frac{100}{s} = \frac{\pi * 50\text{mm} * \eta}{4}$$

$$100 = 39.26 * 1s * \frac{1 \text{ min}}{60s} * \eta$$

$$\frac{100}{0.6544} = \eta$$

$$152.78 = \eta$$

Teniendo los datos correspondientes a la Ecuación 9 el siguiente paso es reemplazar.

$$Q = \left(\frac{7.8655 + 0.11259}{0.11259 + 5.9421 \times 10^{-5} + 2.1971 \times 10^{-7}} \right) * 153$$

$$Q = 1202.78 \text{ cm}^3/\text{min}$$

Es necesario trabajar en kg/h, para esto se convierte el flujo volumétrico en flujo masico multiplicando el caudal por la densidad de los polímeros comunes.

Ecuación 15. Flujo volumétrico a flujo másico

$$\dot{m} = Q * \rho * \frac{60\text{min}}{1\text{h}} * \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}}$$

\dot{m} = Flujo masico

Q = Flujo volumétrico

ρ = Densidad

$$\dot{m} = 1202.78 \text{ cm}^3/\text{min} * 1.38 \text{ gr}/\text{cm}^3 * \frac{60\text{min}}{1\text{h}} * \frac{1\text{kg}}{1000\text{g}}$$

$$\dot{m} = 99.59 \text{ kg}/\text{h}$$

Se aplica el mismo proceso para cada plástico, a continuación, una tabla que representa los diferentes resultados.

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

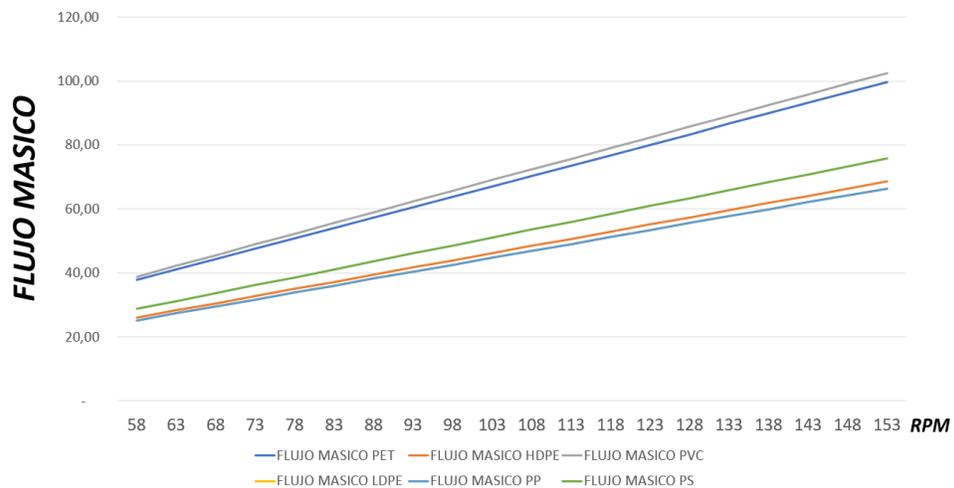
Tabla 8. Densidad y flujo masico de polímeros comunes

Polímeros	Densidad en [g/cm ³]	Flujo masico [kg/h]
PET	1.38	99.59
HDPE	0.95	68.91
PVC	1.42	102.47
LDPE	0.92	66.39
PP	0.92	66.39
PS	1.05	75.77

Fuente: elaboración propia, 2021

Teniendo en cuenta que el caudal es proporcional a las RPM, se puede variar la velocidad de giro para tener una idea de cómo puede cambiar la producción de la máquina. A continuación, la Gráfica 16 representa este suceso.

Gráfica 16. Comportamiento del flujo masico en los plásticos comunes debido al aumento de rpm.



Fuente: elaboración propia, 2021

10.5 Potencia requerida

Al requerir movimiento en el husillo es necesario proporcionar energía mecánica, para esto se realizan los cálculos correspondientes que dependen estrictamente de las dimensiones, características del husillo, RPM y el factor de proporcionalidad y así poder seleccionar el motor el cual es el responsable de

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

suministrar la energía, mediante la siguiente ecuación matemática se obtiene la potencia:

Ecuación 16. Cálculo de potencia requerida

$$P = 32 \times 10^{-5} * \dot{m} * C * (T_m - T_0)$$

P = potencia

\dot{m} = Flujo Masico (Kg/h)

C = Capacidad calorífica del PP (J/Kg*°C)

T_m = Temperatura de trabajo de extrusión.

T₀ = Temperatura ambiente.

A continuación, una tabla con características de los plásticos comunes reciclables.

Tabla 9. Características de polímeros comunes

TIPO DE PLASTICO	USO PARA EXTRUSION	TEMPERATURA DE FUSION (°C)	RANGO DE PRESION DE MOLDEO (MPA)	CAPACIDAD CALORIFICA (J/KG*°C)
1. PET (Polietileno tereftalato)	Uso limitado	234 – 310	68,8 – 138	1.42 * 10 ³
2. HDPE (Polietileno de alta densidad)	Aceptable	137 – 316	68,8 – 138	1.66 * 10 ³
3. PVC (Polivinilcloruro)	Aceptable	182 – 227	103 – 275	1.34 * 10 ³
4. LDPE (Polietileno de baja densidad)	Excelente	121 – 232	34,4 – 103	1.92 * 10 ³
5. PP (Polipropileno)	Excelente	203 – 251	18,6 – 95,6	1.7 * 10 ³
6. PS (Poliestireno)	Excelente	177 – 260	34,4 – 138	1.3 * 10 ³

Fuente: elaboración propia, 2021

Se aplica la Ecuación 16, para obtener la potencia necesaria para trabajar los diferentes polímeros, se usa el mayor valor para la selección del motor y así trabajar

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

sin ningún problema con los otros materiales. Se sigue el orden de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**Tabla 9.

- **PET**

$$P = 32 \times 10^{-5} * 99.59 * 1420 * (260 - 17)$$

$$P = 10996.64 \text{ w}$$

$$P = 10996.64 \text{ w} * \frac{1 \text{ kw}}{1000 \text{ w}} * \frac{1 \text{ hp}}{0,745}$$

$$P = 14.76 \text{ hp}$$

Se aplica el mismo proceso para cada plástico, a continuación, la Tabla 10 que representa los diferentes resultados.

Tabla 10. Potencia necesaria para extruir polímeros comunes, datos basados en el husillo y camisa disponibles en el campus universitario

POLIMEROS	POTENCIA [hp]	POTENCIA [kW]
PET	14.76	10.99
HDPE	4.56	3.40
PVC	11.50	8.56
LDPE	6.18	4.60
PP	8.87	6.60
PS	9.43	7.03

Fuente: elaboración propia, 2021

10.6 Consumo eléctrico

Ecuación 17. Cálculo de consumo eléctrico

Consumo = Potencia requerida *horas de trabajo*días al mes

Se realiza un promedio con los resultados de la potencia requerida en KW para tener una idea del valor del consumo de la máquina mensualmente.

Ecuación 18. Cálculo de consumo eléctrico

$$\text{Promedio} = \frac{\text{Suma de n datos}}{n}$$

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

$$\text{Promedio} = \frac{10.99+3.40+8.56+4.60+6.60+7.03}{6}$$

$$\text{Promedio} = 6.86 \text{ kw}$$

$$\text{Consumo} = \text{kw} * \frac{8h}{\text{dia}} * 30 \text{ dias}$$

$$\text{Consumo} = 6.86 \text{ kw} * \frac{8h}{\text{dia}} * 30 \text{ dias}$$

$$\text{Consumo} = 1,646.4 \frac{\text{kw}}{h}$$

Si se multiplica el total del consumo por el costo del kilovatio hora en la ciudad de Pamplona norte de Santander se obtiene lo siguiente:

Costo del consumo eléctrico = consumo x precio kW/h

Ecuación 19. Cálculo del consumo eléctrico

$$\text{Costo del consumo electrico} = 1,646.4 \frac{\text{kw}}{h} * 519.86 \frac{\text{pesos}}{\frac{\text{kw}}{h}}$$

$$\text{Costo del consumo electrico} = 855,897.5 \text{ COP}$$

10.7 Presión máxima

Este cálculo es importante ya que se determina la presión máxima en la que la extrusora de plástico va a trabajar y se determina mediante el uso de la siguiente ecuación matemática:

Ecuación 20. Cálculo de presión máxima

$$P_{MAX} = \frac{6 * \pi * D * L * \eta * \mu}{h_d * \tan(\varphi)}$$

Donde:

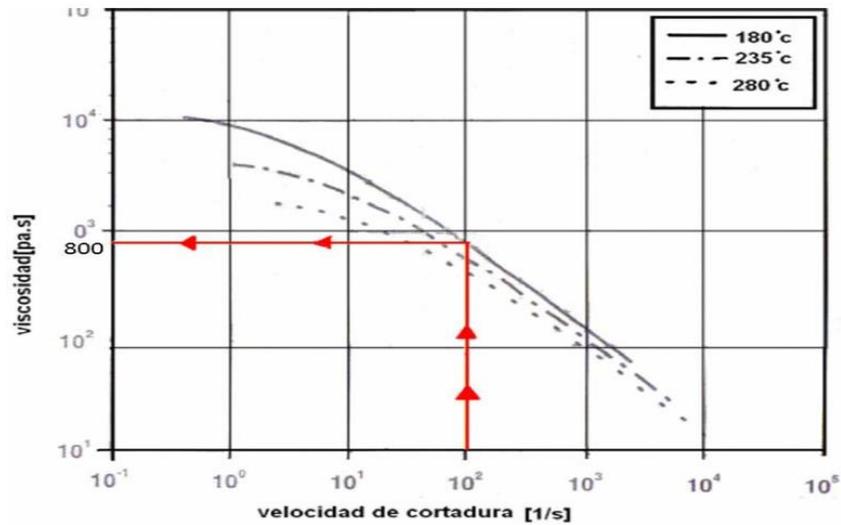
pmax = presión máxima

n = revoluciones

μ = viscosidad efectiva (Gráfica 17)

Gráfica 17. Intervalos de viscosidad efectiva

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes



Fuente: Savgorodny, 1973

De lo anterior se obtiene lo siguiente:

$$p_{MAX} = \frac{6 * \pi * 0.05 \text{ m} * 1 \text{ m} * \left(153 \text{ rpm} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right) * 800 \text{ pa.s}}{0.004^2 * \tan(24^\circ)}$$

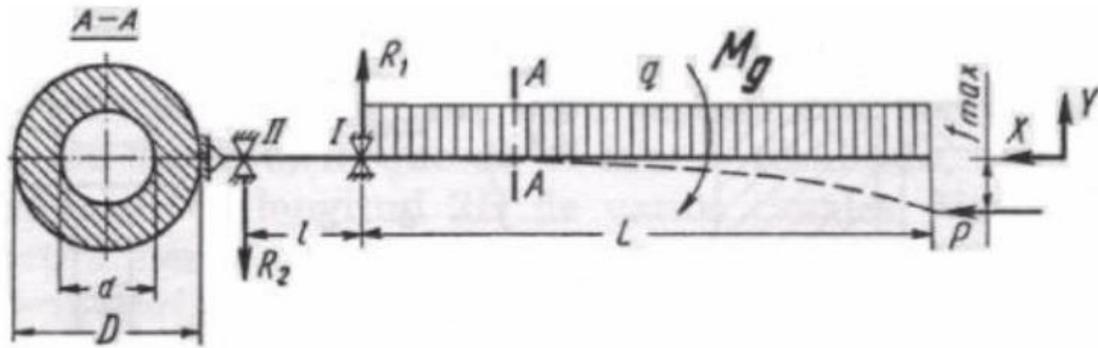
$$p_{MAX} = 269.89 \text{ MPa}$$

10.8 Fuerza del husillo

La misión fundamental de un cálculo de resistencia es la comprobación de las dimensiones previamente determinadas del husillo y la determinación de la flecha máxima admisible. Sobre el husillo la fuerza axial P, el momento de giro M, y la carga uniformemente repartida que, originada por el propio peso del husillo. Las fuerzas P y q provocan la flecha de giro (Savgorodny, 1973)

Imagen 22. Diagrama de fuerzas del husillo extrusor

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes



Fuente: Savgorodny, 1973

Los valores iniciales para el cálculo del husillo se determinan fácilmente por la fórmula siguiente:

Ecuación 21. Cálculo del husillo

$$M_g = 9950 \frac{P}{\eta}$$

Donde:

Mg = Momento de giro.

P = Potencia

η = Revoluciones

Reemplazando en la $M_g = 9950 \frac{P}{\eta}$

y

se obtiene lo siguiente:

$$M_g = 9950 \frac{10.99 \text{ Kw}}{153 \text{ rpm}}$$

$$M_g = 714.70 \text{ N.M}$$

Para calcular las fuerzas que actúan sobre el husillo (Imagen 22) es necesario encontrar el momento de inercia de la sección transversal de la siguiente manera.

Ecuación 22. Cálculo del momento de inercia

$$U = \frac{d}{D}$$

Donde:

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

J = momento de inercia del husillo

D = diámetro del husillo

u = relación entre diámetros del husillo

$$J = \frac{\pi * D^4}{64} * (1 - U^4)$$

Debido a que el diámetro interno varía entre la zona de alimentación y dosificación se sacó un promedio para tener un valor más real.

$$U = \frac{\left(\frac{d_{za} + d_{zd}}{2}\right)}{D_{ex}}$$

$$U = \frac{3.25 \text{ cm}}{5 \text{ cm}} = 0.65$$

$$U = 0.65$$

Teniendo los datos de la relación entre los diámetros del husillo, se obtiene fácilmente el momento de inercia:

$$J = \frac{\pi * 0,050^4}{64} * (1 - 0,65^4)$$

$$J = 2.5203 * 10^{-7} \text{ m}^4$$

Ahora se calcula la superficie de la sección transversal del husillo mediante la siguiente ecuación matemática:

Ecuación 23. Cálculo de la sección transversal del husillo

$$F = \frac{\pi * D^2}{4} * (1 - U^2)$$

F = superficie de la sección transversal

Reemplazando los datos en la $F = \frac{\pi * D^2}{4} * (1 - U^2)$ se obtiene lo siguiente:

$$F = \frac{\pi * 0,050^2}{4} * (1 - 0,65^2)$$

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

$$F = 0,001134 \text{ m}^2$$

Teniendo los datos de momento inercia y superficie de sección transversal se puede calcular el radio de inercia de la sección transversal de la siguiente manera:

Ecuación 24. Cálculo del radio de la inercia

$$R = \sqrt{\frac{J}{F}}$$

Reemplazando los datos en la Ecuación 24 obtenemos lo siguiente:

$$R = \sqrt{\frac{2.5203 * 10^{-7} \text{ m}^4}{0.001134 \text{ m}^2}}$$

$$R = 14.9 * 10^{-3} \text{ m}$$

Para determinar la fuerza axial P, que se ejerce en el husillo se realiza a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 25. Cálculo de fuerza axial

$$P = F * p_{max}$$

Reemplazando los datos en la $P=F * p_{max}$ se obtiene lo siguiente:

$$P = 0.001134 * 269.89$$

$$P = 0.3060 \text{ MN}$$

La tensión tangencial máxima sobre la superficie del husillo se calcula mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 26. Cálculo tensión tangencial máxima

$$\tau = \frac{16 * M_g}{\pi * D^3 * (1 - U^4)}$$

Obtenemos lo siguiente:

$$\tau = \frac{16 * 714.70}{\pi * (0.05)^3 * (1 - 0,65^4)}$$

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

$$\tau = 35.44 \text{ MN/m}^2$$

Puesto que las tensiones normales son provocadas por la fuerza axial P y la carga repartida q, las tensiones máximas surgirán en el apoyo del árbol (en el primer cojinete).

Ecuación 27. Peso del husillo

$$q = \frac{\text{Peso del tornillo}}{\text{longitud del tornillo}}$$

El peso del husillo se obtuvo pesando el tornillo en una báscula en la ciudad de Pamplona.

$$q = \frac{8 \text{ kg}}{1 \text{ m}}$$

$$q = 8 \text{ kg/m}$$

La tensión normal está dada por la siguiente ecuación:

Ecuación 28. Cálculo tensión normal

$$\sigma = \frac{P}{F} + \frac{M_f}{W_o}$$

Donde:

P = Fuerza axial

F = Superficie de la sección transversal del husillo

M_f = Momento de flexión máximo

W_o = Momento de resistencia respecto al eje neutro

Ecuación 29. Momento de resistencia

$$M_f = \frac{q * L^2}{2}$$

$$M_f = \frac{8 * 1^2}{2}$$

$$M_f = 4$$

El momento de resistencia respecto al eje neutro W_o, se puede determinar utilizando la siguiente ecuación.

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

Ecuación 30. Momento de resistencia respecto al eje neutro

$$W_o = \frac{\pi * D^3}{32} * (1 - U^4)$$

$$W_o = \frac{\pi * 0.050^3}{32} * (1 - 0.65^4)$$

$$W_o = 1.0082 * 10^{-5}$$

Reemplazando los datos en la ecuación 28 se obtiene lo siguiente:

$$\sigma = \frac{0.3060 * 10^6}{0.001134} + \frac{4}{1.0082 * 10^{-5}}$$

$$\sigma = 270.23 \frac{Mn}{m^2}$$

La solidez del husillo aplicando la tercera teoría de resistencia, será:

Ecuación 31. Tercera teoría de resistencia

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma^2 + 4 * \tau^2}$$

$$\sigma_r = \sqrt{270.23^2 + 4 * 35.44^2}$$

$$\sigma_r = 279.37 \frac{Mn}{m^2}$$

La flecha máxima del husillo al aplicar la carga repartida se determina a partir de:

Ecuación 32. Flecha máxima del husillo

$$f_{max} = \frac{q * L^4}{8 * E * J}$$

Donde:

E = Modulo de elasticidad del material

$$f_{max} = \frac{8 * 1^4}{8 * (207 * 10^9) * 2.5203 * 10^{-7}}$$

$$f_{max} = 1.9168 * 10^{-5}$$

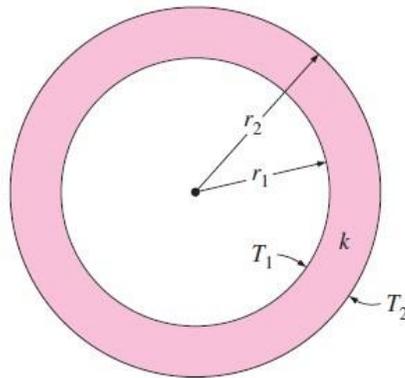
Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

La flecha es muy reducida, esto significa que existe una deflexión mínima del mismo como producto de los esfuerzos implicados.

10.9 Transferencia de calor

Es necesario determinar la transferencia de calor para el interior del husillo, calculando la temperatura T_2 que se necesita suministrar para que T_1 alcance la temperatura de fundición de los plásticos comunes.

Gráfica 18. Transferencia de calor en un tubo cilíndrico



Fuente: Yunus y Afshin, 2011

Mediante la ecuación de transferencia de calor por conducción en cilindros huecos es fácil determinar la temperatura requerida, de la siguiente manera.

Ecuación 33. Cálculo temperatura requerida

$$Q_{cond,cil} = \frac{2\pi * L * K * (T_2 - T_1)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

$Q_{cond, cil}$ = Calor Transferido por unidad de tiempo

L = longitud del cilindro fijo

K = conductividad térmica

La temperatura la tenemos que trabajar en grados kelvin, a continuación, la manera en que se convierte de Celsius a kelvin:

Ecuación 34. De Celsius a Kelvin

$$K = 273,15 + ^\circ C$$

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

El calor transferido por la potencia de las resistencias eléctricas está dado por la siguiente ecuación:

Ecuación 35. El calor transferido por la potencia de las resistencias eléctricas

$$P = \frac{V^2}{R}$$

P= Potencia

V = Voltaje

R = Resistencia

$$P = \frac{220^2}{24}$$

$$P = 2000 W$$

Teniendo el valor de Q se reemplaza en la ecuación 33 con los datos correspondientes al PET, posteriormente se realizará una tabla para observar la temperatura de trabajo que corresponde a cada tipo de plástico.

$$2000 W = \frac{2\pi * 1 m * 44,5 \frac{W}{m * K} * (T_2 - 523,15)}{\ln\left(\frac{0,078}{0,051}\right)}$$

$$T_2 = 536,15 \text{ } ^\circ K$$

$$T_2 = 263,4 \text{ } ^\circ C$$

Aplicamos el mismo proceso para cada plástico, a continuación, una tabla que representa los diferentes resultados.

Tabla 11. Temperatura de los polímeros en la extrusora

POLIMERO	T1 EN °C	T1 EN °K	T2 EN °K	T2 EN °C
PET	250	523,15	536,19	263,04
HDPE	110	383,15	386,19	113,04
PVC	212	485,15	488,19	215,04
LDPE	130	403,15	406,19	133,04
PP	200	473,15	476,19	203,04
PS	240	513,15	516,19	243,04

Fuente: elaboración propia, 2021

11. PASOS PARA SEGUIR BASADO EN CATALOGO LENTAX.

- Calcular la potencia absorbida (N_{abs}).
- Calcular la potencia de entrada (N_e).
- Determinar el factor de servicio (f_s).
- Calcular la potencia de entrada equivalente ($N_{eq} = N_e * f_s$).
- Calcular la relación ($i = n_e/n_s$).
- Preseleccionar un modelo.
- Comprobar que ($N_{nominal} > N_{eq}$).
- Controlar la potencia de arranque ($N_{arr} < 2.5 * N_{nominal}$).
- Controlar cargas radiales.

11.1 Potencia de cálculo (NA).

$$P = 10,99 \text{ KW}$$

$$P = 14,75 \text{ HP}$$

- **Potencia de entrada (N_e).**

El fabricante indica rendimiento del 97%

$$N_e = \frac{N_a}{r} = \frac{14.52 \text{ HP}}{0.97} = 14.96 \text{ HP} = 11 \text{ KW}$$

- **Velocidad de salida del reductor (N_s).**

$$N_s = 153 \text{ RPM}$$

- **Preselección del motor**

Se selecciona un motor de 15 HP (11 KW) del catálogo Lentax en los anexos, ya que es el siguiente a nuestros cálculos y aseguramos las exigencias correspondientes.

MODELO C4T220

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

- **Relación de transmisión**

$$I = \frac{1465 \text{ RPM}}{155 \text{ RPM}} = 9.57$$

- **Factor de servicio**

Se obtiene de la tabla 13 en los anexos.

$$f_s = 1.65$$

- **Potencia de mando (Nm)**

$$Nm = Ne * f_s$$

$$Nm = 14.96 * 1.65$$

$$Nm = 24.684 \approx 25 \text{ HP}$$

Con esto es posible dirigirse a la tabla 14 en anexos y definir el modelo final del motorreductor.

MODELO FINAL: C4T25 – 150 – B3

Valores adicionales disponibles en la tabla 15.

Peso = 272 KG aproximadamente

Factor de seguridad = 1,65

Carga radial = 1610 KG

Carga axial = 644 KG

12. RESULTADOS - DISEÑO DE LA MAQUINA

13. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

El proceso de someter materiales plásticos usados y transformarlos para convertirlos en un producto nuevamente útil requiere de un análisis que va más allá de simplemente separar el material, hay que tener en cuenta que las propiedades mecánicas de los polímeros no son iguales, existen materiales que cumplen con unas expectativas muy amplias pero a la vez son más escasos de encontrar siendo esto un impedimento para poder contar con ellos, se recurrió directamente a los materiales que son más comunes y que generalmente se reciclan en las ciudades y pueblos de nuestro país.

Es interesante resaltar que los parámetros para que la maquina funcione eficientemente con diferentes polímeros están basados según la reacción de estos al someterlos a temperaturas que los llevan a un estado de transición, se estudió las variables como flujos de presión, viscosidad y todo esto para poder obtener uno de los datos más importantes que es la potencia que debe de suministrar la principal fuente de energía que es el motor. Los resultados obtenidos indican que se necesitan 14, 76 HP de potencia, suficientes para trabajar con todos los polímeros seleccionados. Se añade un reductor a la salida del motor eléctrico con el cual se podría aumentar la potencia y disminuir los rpm, con esto podemos trabajar con un factor de seguridad 1,6 en cuanto a lo que es la potencia, el reductor seleccionado según catálogo de venta maneja una relación de 110, entregando como resultado a la salida 170 rpm dado que la salida del motor eléctrico es de 1700 rpm. Para poder tener un manejo adecuado de la velocidad angular que recibe el husillo es necesario implementar un variador de velocidad, este va directamente conectado al motor eléctrico con el fin de poder manejar diferentes velocidades porque el objetivo del proyecto es trabajar con varios polímeros y como cada uno tiene propiedades reológicas diferentes se tiene que manejar diferentes velocidades de giro.

Para transmitir de una forma segura la potencia se eligió una transmisión por cadena que va desde la salida del reductor hasta el acople acoplado al husillo. Este

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

sistema también permite que en una sobrecarga falle el acople protegiendo así la integridad del tornillo y la camisa.

Se ideó implementar una chumacera al sistema para darle más estabilidad al husillo, esta va instalada después del acople. Además, el diseño de la tolva en forma de pirámide truncada facilita el deslizamiento del material hacia el tornillo

El sistema de calentamiento está integrado por 5 resistencias en forma de abrazadera, cada una con su respectiva termocupla para lograr medir y ajustar la temperatura de todas las resistencias. El orden desde la primera que esta junto a la tolva la temperatura es ascendente para lograr calentar el material adecuadamente y no llevarlo a un cambio brusco. Cabe destacar que la temperatura final está calculada pero la transición de esta en cada resistencia sí está sujeta a prueba y error por motivos de ambiente, material y velocidad de calentamiento. Cada termocupla está conectada a su controlador de temperatura digital con el cual graduamos las diferentes temperaturas.

Al final de la camisa podemos ver el resultado de un material reciclado y tratado para un segundo uso, la forma final de la materia prima depende de la boquilla que se implemente, generalmente sin boquilla el material tiende a salir sin forma precipitándose por gravedad y con una temperatura elevada, sin embargo, al no tener la boquilla disminuye el trabajo que tiene que hacer la máquina. Los cálculos están realizados con una boquilla que a la salida tiene un orificio circular de modo que, al obligar a un material a salir, este cambio de sección transversal genera una resistencia la cual la potencia del motor debe vencer.

El diseño general de la máquina es un modelo simple que se piensa implementar en las instalaciones del campus, es un modelo sujeto a cambios con el que se podrían realizar ensayos para los estudiantes, es una máquina que se puede replicar con una facilidad debido a su sencillo pero eficiente modelo, se resalta que es un proyecto que colabora con el medio ambiente y con el proceso de aprendizaje académico, cuenta con análisis de las diferentes ramas del programa de ingeniería mecánica. El diseño total de la máquina fue realizado en el software SolidWorks presentando una vista previa de lo que sería el resultado final de la máquina.

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

De acuerdo con el resultado de la ecuación 32, es posible concluir que el husillo no sufrirá deformación al momento de trabajar la máquina, la flecha es muy reducida, esto significa que existe una deflexión mínima del mismo como producto de los esfuerzos implicados. Por otra parte, como podemos observar en la tabla 12 la máxima temperatura de servicio del material del husillo es de 650 °C, esto indica que no hay ningún problema con el husillo al someterlo a la temperatura mayor que es 250 °C que maneja el PVC.

Tabla 12. Propiedades térmicas del acero 4140

Thermal properties		
Melting point	1.43e3 - 1.5e3	°C
Maximum service temperature	* 613 - 650	°C
Minimum service temperature	* -68 - -38	°C
Thermal conductivity	42 - 48	W/m.°C
Specific heat capacity	450 - 490	J/kg.°C
Thermal expansion coefficient	11.5 - 13.5	µstrain/°C
Latent heat of fusion	* 265 - 280	kJ/kg

Fuente: CES, Edupack 2019

13.1 Simulación

- El resultado obtenido al realizar la simulación de carga a la estructura (imagen 41) muestra que la deformación es mínima en la base, donde mayormente se observa deformación es la parte donde va soportada el motor, se tienen valores de deformación de 0,04 mm lo cual no afecta el funcionamiento de la máquina.

14. CONCLUSIONES

- El apoyo de los programas de diseño CAD y simulación en un software CAE, representa para el proyecto un ahorro significativo de tiempo y dinero al permitir cambiar las variables del proceso, geometrías, materiales y parámetros antes de llegar a la etapa de construcción, validando de forma anticipada los esfuerzos, factores de seguridad y condiciones de operación garantizando un modelo ajustado a las condiciones de operación requeridas.

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

- Como el equipo diseñado tiene fines académicos e investigativos debe manejar diferentes materiales reciclados, por esto se seleccionó el rango de operación de acuerdo con la viscosidad de estos materiales, siendo el material más viscoso el PET, requiriendo según los cálculos una potencia de 14.76 HP. De esta forma se puede garantizar el procesamiento de los otros materiales variando solo parámetros de velocidad y temperatura.
- La estructura de la extrusora se diseñó de acuerdo con las dimensiones del tornillo y la camisa que fueron adquiridos previamente. Dentro de los aspectos más relevantes están, la optimización del espacio, sencillez de fabricación y uso de componentes comerciales que faciliten su reparación y mantenimiento.
- El sistema de control de la máquina queda sujeto a los parámetros del proceso como tamaño de partícula, dosificación, rango de temperatura y velocidad, por tanto, puede requerir pequeñas modificaciones en su estructura relacionados con la tolva, la ubicación y cantidad de resistencias y los sensores de temperatura. El motorreductor, sistema de transmisión y soporte no requerirán modificaciones.

15. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

- Realizar una separación y un lavado adecuado del material a trabajar ya que esto puede afectar el proceso y el producto obtenido en la máquina.
- Para hacer las pruebas es recomendable empezar con una velocidad mínima para probar el desempeño de la máquina, las temperaturas no deben ser superiores a las indicadas en el desarrollo del proyecto ya que esto puede generar imperfecciones en el producto final o daños en la máquina.
- Utilizar aislante térmico en la cubierta protectora para intentar mantener la temperatura constante.

16. BIBLIOGRAFÍA

- Ministerio de Educación - Instituto Nacional de Educación Tecnológica. (2011). *Polímeros*. Argentina: Guía Didáctica.
- Acuña, G., & Salamanca, M. (2016). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MAQUINA EXTRUSORA PARA LA FABRICACIÓN DE FILAMENTOS TERMOPLÁSTICOS PARA IMPRESORA 3D*. Tunja: UNIVERSIDAD SANTO TOMAS TUNJA. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Frepository.usta.edu.co%2Fbitstream%2Fhandle%2F11634%2F30834%2F2016geiberacu%25C3%25B1a.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&clen=3005748&chunk=true
- Amaya, E., Molina, F., & Sánchez, M. (2018). *Producción de Polipropileno*. Mendoza: Universidad Nacional de Cuyo.
- Araque De Los Rios, O., & Gómez, J. (2008). *Diseño de un sistema de transporte de material de arrastre triturado de río*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.redalyc.org%2Fpdf%2F849%2F84920454016.pdf&clen=337826
- Arredondo, M., Del Río, E., & Ávila, O. (2018). *Proyecto para la actualización de una extrusora para el reciclaje de poliestireno de alto impacto*. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Ftesis.ipn.mx%2Fbitstream%2Fhandle%2F123456789%2F27688%2FProyecto%2520para%2520la%2520actgualizaci%25C3%25B3n%2520de%2520una%2520extructora%2520para%2520el%2520reciclaje%2
- Asensio, M., Nuñez, K., Guerrero, J., Herrero, M., Merino, J., & Pastor, J. (2020). Polymer degradation of recycled poly (ethylene terephthalate). *Elsevier*. Obtenido de <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0141391020301907?token=08D35F928B5788DF07C9369A6B5BD240678195A611A50A28589CF1FFDEF3FDED6C3E73AA8944741B74CA53D0999ADA03&originRegion=us-east-1&originCreation=20211119120847>
- Askeland, P., Fulay, P., & Wriqth, W. (2013). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. México: CENGAGE Learning. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fosvaldoweb.files.wordpress.com%2F2016%2F04%2Fciencia-e-ingenieria-de-materiales-sexta-edicic3b3n.pdf&clen=53256656&chunk=true
- Barbosa, J. (2012). *DISEÑO DE UNA MAQUINA EXTRUSORA DE PLASTICO PARA LOS PRODUCTORES DE MAGUERA DE OCAÑA*. Ocaña: UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F%2Frepositorio.ufpso.edu.co%2Fbitstream%2F123456789%2F2362%2F1%2F30895.pdf&clen=4719990

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

- Beltrán, M., & Marcilla, A. (2011). *Tecnología de Polímeros*. M. Beltrán y A. Marcilla. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Frua.ua.es%2Fdspace%2Fbitstream%2F10045%2F16897%2F1%2FTEMA_4_extrusion.pdf&clen=5105522.
- Buezas Sierra, N. (2010). *Guía plásticos y fuego*. Valencia. España: Aimplas Instituto tecnológico del plástico.
- Cámara de Comercio de Bogotá. (2019). *Colombia entierra anualmente 2 billones de pesos en plásticos que se pueden reciclar*. Obtenido de <https://www.ccb.org.co/Clusters/Cluster-de-Comunicacion-Grafica/Noticias/2019/Julio-2019/Colombia-entierra-anualmente-2-billones-de-pesos-en-plasticos-que-se-pueden-reciclar>
- Canales sectoriales Interempresas. (1995). *Moldes para compresión de termoestables*. Obtenido de <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/3197-Moldes-para-compresion-de-termoestables.html>
- Cáp México. (2019). *¿Usar Plástico Virgen o Plástico Reciclado?!* Obtenido de <https://www.capmexico.com/plastico-virgen-reciclado/>
- Carrasquero, F. (2005). *Fundamentos de polímeros*. Mérida: Escuela Venezolana para la Enseñanza de la Química. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F%2Fwww.saber.ula.ve%2Fbitstream%2Fhandle%2F123456789%2F16743%2Fpolimeros.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&clen=1005128
- Casillería de cultura, educación y universidad. (s.f.). *Clasificación y propiedades de polímeros*. Obtenido de https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947174/contido/51_clasificacin_y_propiedades.html
- Centro de formación técnica para la industria. (s.f.). *Qué es y qué hace un Variador de Frecuencia*. Obtenido de Aula 21: <https://www.cursosaula21.com/que-es-variador-de-frecuencia/>
- Centro de Innovación Educativa Regional -SIERSUR. (2021). *¿CÓMO AFECTAN LAS FUERZAS INTERMOLECULARES LAS PROPIEDADES DE LOS COMPUESTOS?* (Colombiaaprende.edu.co, Editor) Obtenido de https://www.colombiaaprende.edu.co/sites/default/files/files_public/contenido/osaprender/G_10/S/S_G10_U03_L03/S_G10_U03_L03_03_03_00.html
- Clayton, R. (2021). *Solucionario III Examen de Materiales-final*. Obtenido de <https://pdfcoffee.com/solucionario-iii-examen-de-materiales-final-4-pdf-free.html>
- ConcienciaEco. (2010). *Cómo diferenciar los diferentes tipos de plásticos recic.* Obtenido de <https://www.concienciaeco.com/2010/04/24/como-diferenciar-los-diferentes-tipos-de-plasticos-reciclad/>
- Coreño, C., & Méndez, M. (2010). Relación estructura-propiedades de polímeros. *Educación química*, 21(4), 291-299. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2010000400006

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

- Coreños, J., & Mendez, M. (2010). Relación estructura-propiedades de polímeros. *Educación química*, 21(4), 291-299. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2010000400006
- Darnell, W., & Mol, A. (1956). Transporte de sólidos en extrusoras de tornillo. *Soc. Plastics Engng J*(12), 20-29.
- De Luca, M., & Assennato, D. (1993). *La ingeniería en el desarrollo - Manejo y tratamiento de granos poscosecha*. Roma. doi:ISBN 92-5-303108-5
- Departamento Nacional de Estadística - DANE. (2018). *Cuentas ambientales y económicas de flujos de materias de residuos sólidos*. DANE. Obtenido de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/cuentas_ambientales/cuentas-residuos/Pt-Cuenta-Residuos-2016p.pdf
- Díaz, C. (s.f.). *Fichas reciclaje*. Obtenido de <https://www.goconqr.com/flashcard/3575674/fichas-reciclaje>
- Escuela Colombiana de Ingeniería. (2008). *Identificación de plásticos*. (F. d. ambiental, Editor) Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fescuelaing.s3.amazonaws.com%2Fstaging%2Fdocuments%2F1960_idplasticosr2.pdf%3FAWSAccessKeyId%3DAKIAWFY3NGTFBJGCIWM%26Signature%3DsQS%252B7bCORap4IAAnA1DuCKYoZ%252Fw0%253D%2520
- Fu Gu, J. G. (2017). De residuos plásticos a materias primas industriales: una evaluación del ciclo de vida de la práctica de reciclaje mecánico de plástico basada en un estudio de caso del mundo real. *SciendeDirect*, 1192-1207.
- Galán, J., & Ojeda, O. (2020). *DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO PARA LA PRODUCCIÓN DE FILAMENTOS, INTEGRADO EN LA REUTILIZACIÓN DE PET (POLIETILENO TEREFALATO), ÚTIL PARA LA IMPRESORA 3D*. Barrancabermeja: Unidades Tecnológicas de Santander. Obtenido de <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F%2Frepositorio.uts.edu.co%3A8080%2Fxmlui%2Fbitstream%2Fhandle%2F123456789%2F3145%2FR-DC-95%2520%2520INFORME%2520FINAL%2520-%2520OK.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&clen=380>
- García, R. (2013). *Diseño y comportamiento de uniones estructurales mecánicas y adhesivas*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Foa.upm.es%2F22235%2F1%2FRICARDO_GARCIA_LEDESMA.pdf&clen=3982888&chunk=true
- Garrido, A., & Gándara, G. (2013). *Nuestras ciudades del futuro: ¿CÓMO HACER SOSTENIBLES LOS ESPACIOS URBANOS? (EMPRENDER EL PRESENTE)*. Capítulo 8. CEPAL.
- Geo Raju, M. L. (2014). Métodos recientes para la optimización de la extrusión de plástico. *Research Indian Publications*, 6.

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

- Gómez, J., & Gutiérrez, J. (2007). <https://docer.com.ar/doc/nccs8v1>. Pereira: Universidad tecnológica de Pereira. Obtenido de <https://docer.com.ar/doc/nccs8v1>
- Guerra, F., & Gonzáles, J. (2002). Caracterización morfométrica de la cuenca de la quebrada La bermeja, San Cristóbal, Estado Táchira, Venezuela. *Geoenseñanza*, 7(1), 88-108. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.redalyc.org%2Fpdf%2F360%2F36070208.pdf&clen=677709
- Hanco, R. M. (2014). Estudio de la fluencia termica del pet en el proceso de termoformado. Arequipa, Peru.
- Hanco, R. M. (2014). *Estudio de la fluencia termica del pet en el proceso de termoformado*. Universidad Nacional de San Agustin, Arequipa, Peru.
- Ingeniería mecánica. (2021). *Propiedades y Aplicaciones del Grafeno*. Obtenido de <https://ingemecanica.com/tutorialesemanal/tutorialn119.html>
- J, A., & M, B. (2010). Relación estructura-propiedades de polímeros. *Educación química*, 21(4), 291-299. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2010000400006
- Jose Manuel Soto, G. B. (2018). Un caso de estudio real de reciclaje mecánico como alternativa de manejo de film plástico de polietileno presentado en residuos sólidos urbanos mixtos. *ScienceDirect*, 777-787.
- Loaiza, G., Ossa, O., & Ramírez, P. (1997). *Cálculo y diseño del extruder y cabezal para una máquina de soplado de película de polipropileno*. Cali: Universidad Autónoma de Occidente.
- López, D., Maravillo, J., Martínez, J., & Palomec, E. (2020). *Reporte del video del taller de manufactura enfocado a las máquinas procesadoras de polímeros*. Tecnológico Nacional de México.
- Madrid Taller Experimentos. (2000). *Síntesis de un polímero entrecruzado*. Obtenido de <http://www.madrimasd.org/cienciaysociedad/taller/experimentos/quimica/polimero/default.asp>
- Marco Hivarinen, R. j. (2020). El modelado de procesos de extrusion. *MDPI Open Access Journal*, 16.
- Mariano. (2014). *Tecnología de los plásticos*. Obtenido de <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/>
- Mijangos, C., & Serafín, M. J. (2007). *Nuevos materiales en la sociedad del sigloXXI*. Madrid. España: Consejo superior de investigaciones científicas.
- Ministerio de ambiente, v. y. (2005). *Política ambiental para la gestión integral de residuos o desechos peligrosos*. Republica de Colombia. Dirección de desarrollo sectorial disponible. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/526371/POLITICA+AMBIENTAL+PARA+LA+GESTION+INTEGRAL+DE+RESPEL.pdf/fb42059d-77ec-423b-8306-960dee6bb9c6>
- Moya, G. (2016). *Estudio, diseño, simulación y optimización de una matriz de extrusión de plástico*. Universidad Politécnica de Valencia. Obtenido de chrome-

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

- extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Friunet.upv.es%2Fbitstream%2Fhandle%2F10251%2F72723%2FM OYA%2520-%2520Estudio%252C%2520dise%25C3%25B1o%252C%2520%2520simulaci%25C3%25B3n%2520y%2520optimizaci%25C3%25B3n%2520
- Moyano, I., & Paez, E. (2019). *Estudio de Prefactibilidad Producción de Tejas de Caucho y PEBD reciclados*. Mendoza, Argentina: Universidad Nacional de Cuyo. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fplanificacion.bdigital.uncu.edu.ar%2Fobjetos_digitales%2F13043%2Fproyecto-final.pdf&clen=5433188&chunk=true
- Ojeda, M. (2019). *StuDocu*. Obtenido de Extrusión: <https://www.studocu.com/bo/document/universidad-mayor-de-san-simon/quimica-general/375954303-extrusora-recuperado-automaticamente/7552268>
- ONU, O. d. (2018). *Regreso al futuro a medida que los innovadores buscan alternativas a los plásticos*. Obtenido de <https://www.unenvironment.org/news-and-stories/story/back-future-innovators-look-for-plastic-alternatives>
- Plastyc Engineering Company. (2009). *Consejos para el Diseño de la Unidad de Inyección*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.plenco.com%2Fplenco_processing_guide_spanish%2FSect%25205%2520Injection%2520Unit%2520Design%2520Tips%2520(Spanish).pdf&clen=55923&chunk=true
- Punina, S. (2015). *Estudio de un sistema de refrigeración de elementos electrónicos para el control de temperatura en tierra del uav gavián del centro de investigación y desarrollo de la fuerza aérea ecuatoriana*. Universidad técnica de Ambato.
- RAMTEC . (s.f.). *Resistencia mecánica en los plásticos*. Obtenido de <https://ramtec.com.mx/uncategorized/resistencia-mecanica-en-los-plasticos/>
- Reyes Curcio et al. (2015). El reciclaje como alternativa de manejo de los residuos sólidos en el sector minas de Baruta, Estado Miranda, Venezuela. *Revista de Investigación*, 39(86), pp. 157-170.
- Roca, I. (2005). ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES Y APLICACIONES INDUSTRIALES DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PEAD). Guatemala: UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F%2Fbiblioteca.usac.edu.gt%2Ftesis%2F08%2F08_0639_Q.pdf&clen=247033&chunk=true
- Roca, I. (s.f.). ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES Y APLICACIONES INDUSTRIALES DEL POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PEAD). Guatemala: UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

- [%2F%2Fbiblioteca.usac.edu.gt%2Ftesis%2F08%2F08_0639_Q.pdf&clen=247033&chunk=true](https://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0639_Q.pdf&clen=247033&chunk=true)
- Roydisa. (s.f.). *¿Qué es un motorreductor?* Obtenido de <https://www.roydisa.es/archivos/5419>
- Sandoval, A., Fernández, A., & Fernández, A. (2004). Aplicación del análisis por calorimetría diferencial de escaneado (DSC) para la caracterización de las modificaciones del almidón. *Dyna*, 72(146). Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532005000200004
- Sanger, A. (2021). *Las fuerzas y su medición: ley de Hooke*. Malvinas: Escuela de Enseñanza Media N° 221 "Malvinas Argentinas". Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F%2Fwww2.ib.edu.ar%2Fbecaib%2Fcd-ib%2Ftrabajos%2FSanger.pdf&clen=406307&chunk=true
- Savgorodny, v. (1973). *Transformación de plásticos*. Barcelona: Gustavo Gili. doi:ISBN 13: 9788425207464
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales - SEMARNAT. (s.f.). *GUÍA PARA LA ELABORACIÓN DE LA CÉDULA DE OPERACIÓN ANUAL*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fapps1.semarnat.gob.mx%3A8443%2Fretc%2Fguias%2Fg_qumc.pdf&clen=15147302&chunk=true
- Servicio Nacional de Aprendizaje - SENA Regional del Valle. (s.f.). *Mecanizado de plásticos. Teoría de los materiales plásticos*. (M. d. Social, Ed.) Cali. Obtenido de https://repositorio.sena.edu.co/bitstream/11404/4312/1/1853_mecanizado_de_plasticos.pdf
- Sidorovas, L. (2010). *MONOGRAFÍA DE LA METALURGIA DE LOS POLVOS (PULVIMETALURGIA)*. Carabobo: Universidad de Carabobo. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F%2Fmriuc.bc.uc.edu.ve%2Fbitstream%2Fhandle%2F123456789%2F7196%2Fusidorovasing.pdf%3Fsequence%3D1&clen=4084076
- SSP. (2018). *Superintendencia de Servicios Públicos. Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos – 2017*. Superintendencia de Servicios Públicos. Obtenido de https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2018/Dic/2._disposicion_final_de_residuos_solidos_-_informe_2017.pdf.
- Tecnología materiales. (2020). *Propiedades de los materiales para ingeniería eléctrica*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/470954517/Tecnologiamateriales-2020>
- Textoscientíficos.com. (2005). *MOLDEADO, INYECCIÓN, EXTRUSIÓN*. Obtenido de <https://www.textoscientificos.com/polimeros/moldeado>
- Todoenpolimeros.com. (2021). *Procesos de Extrusión*. Obtenido de <https://todoenpolimeros.com/procesos-de-extrusion/>

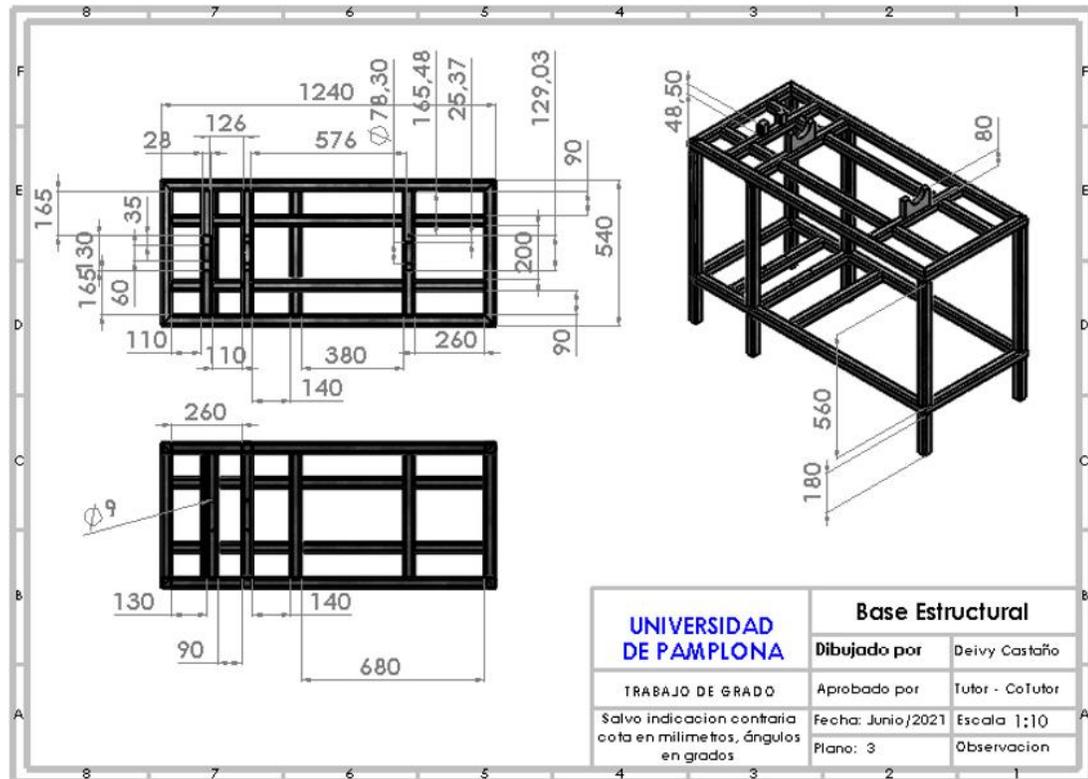
Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

- Trullás Resistencias Eléctricas. (2016). *Resistencias eléctricas industriales*. Obtenido de <https://docplayer.es/27110500-Trullas-resistencias-electricas.html>
- Universidad de Burgos. (2019). *Historia de los plásticos*. Obtenido de <https://historiamateriales.ubuinvestiga.es/plasticos/>
- Universidad de los Andes; Greenpace. (2019). *Informe elaborado por la Clínica Jurídica de Medio Ambiente y Salud Pública (MASP) de la Facultad de Derecho de la Universidad de los Andes y Greenpeace Colombia*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F%2Fgreenpeace.co%2Fpdf%2F2019%2Fgp_informe_plasticos_colombia_02.pdf&clen=4899271&chunk=true
- Universidad Politécnica de Valencia. (s.f.). *Curso de Fundamentos de Ciencia de Materiales*. Obtenido de Características dieléctricas y aislantes de los materiales: https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm09/trb9_2.html
- Universidad Pontificia Bolivariana. (2015). *Guía 4. Guía para el diseño de edificaciones sostenibles*. Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fwww.metropol.gov.co%2Fambiental%2FDocuments%2FConstruccion_sostenible%2FGuia-4-GCS4EdificacionesSostenibles.pdf&clen=13807221&chunk=true
- Uribe, L. (2020). *Visita industrial y practica en laboratorio de manufactura campus II sobre procesos de polímeros*. Ciudad de México: Instituto tecnológico de México en Celaya. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=http%3A%2F%2Ftigger.itc.mx%2Fconacad%2Fcargas%2FN9N8XEJ45F%2F69%2Fareas%2F16940_A_REPORTE_MAQUINAS_EXTRUSORA_E_INYECTOR_A.pdf&clen=704410&chunk=true
- Vicente, J., & López, J. (2006). *DISEÑO DE UNA MÁQUINA PARA LA FABRICACIÓN DE PRODUCTOS DE GRAN VOLUMEN EN POLIPROPILENO RECICLADO*. Medellín: UNIVERSIDAD EAFIT. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Frepository.eafit.edu.co%2Fbitstream%2Fhandle%2F10784%2F4497%2FJuanLopez_JuanVicente_2006.pdf%3Fsequence%3D2%26isAllowed%3Dy&clen=8052008
- Yunus, A., & Afshin, J. (2011). *Transferencia de calor y masa*. México: Mc Graw Hill Education. Obtenido de <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fitscv.edu.ec%2Fwp-content%2Fuploads%2F2019%2F06%2FTtransferencia-de-calor-y-masa.-Fundamentos-y-aplicaciones-Cuarta-Edici%25C3%25B3n.pdf&clen=16339212&chunk=true>

17. ANEXOS.

17.1 Planos del CAD

Imagen 42. Plano 1 del CAD



Fuente: elaboración propia, 2021

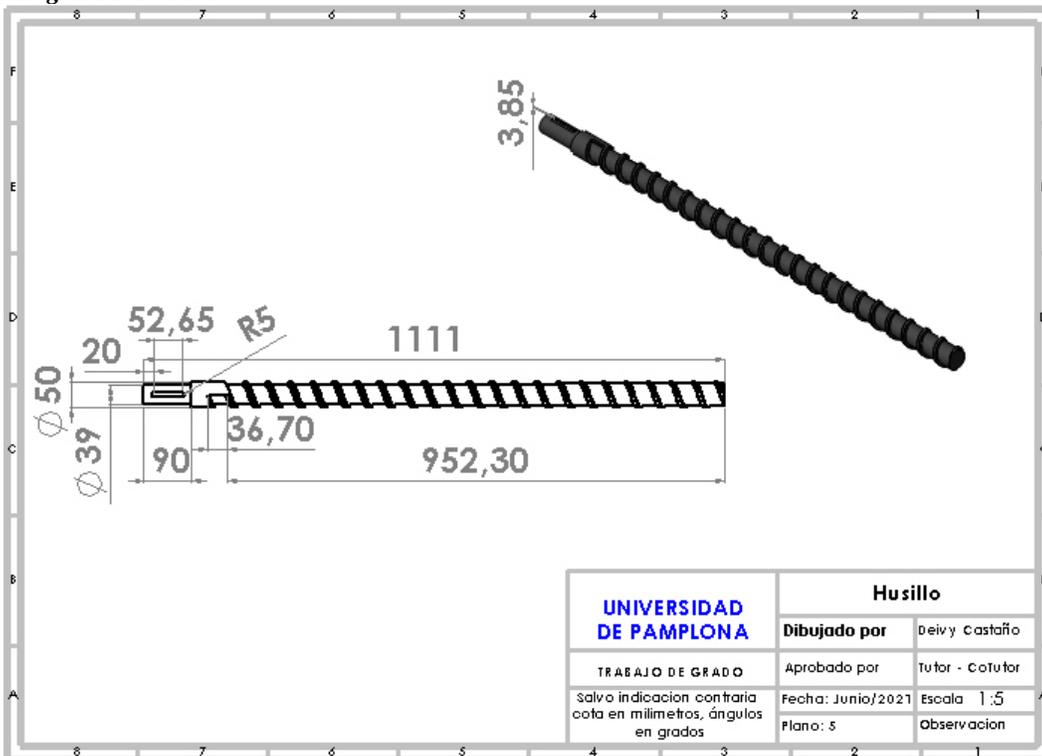
Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

Imagen 43. Plano 2 del CAD



Fuente: elaboración propia, 2021

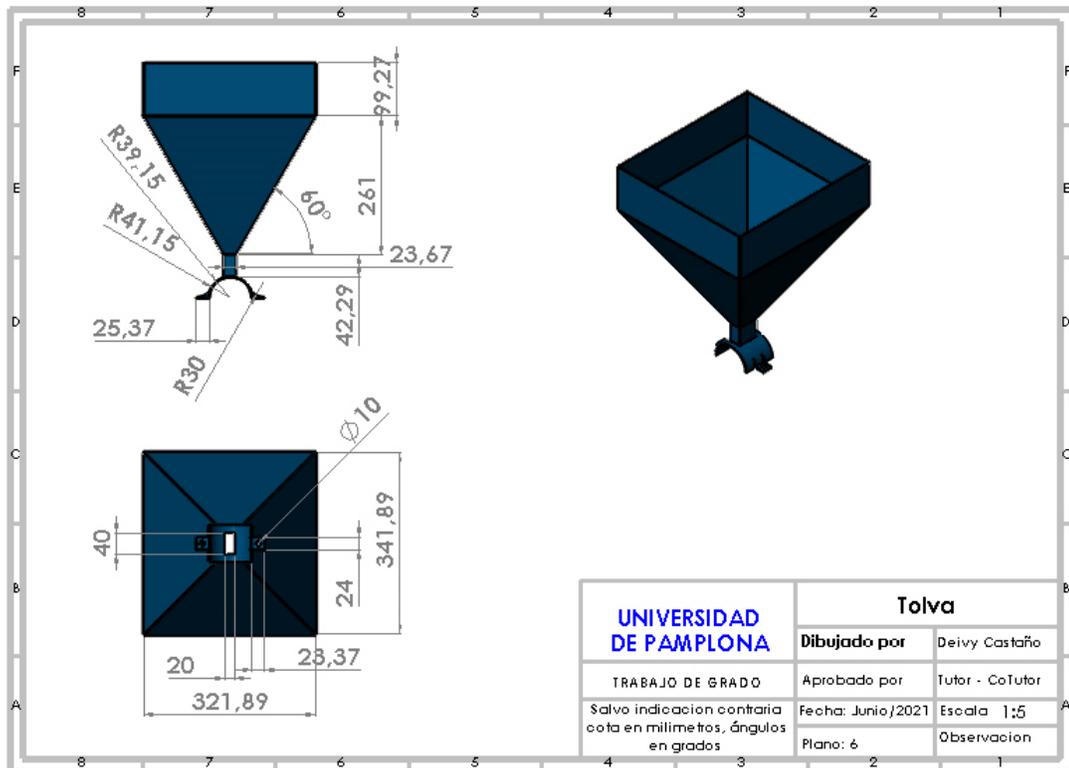
Imagen 44. Plano 3



Fuente: elaboración propia, 2021

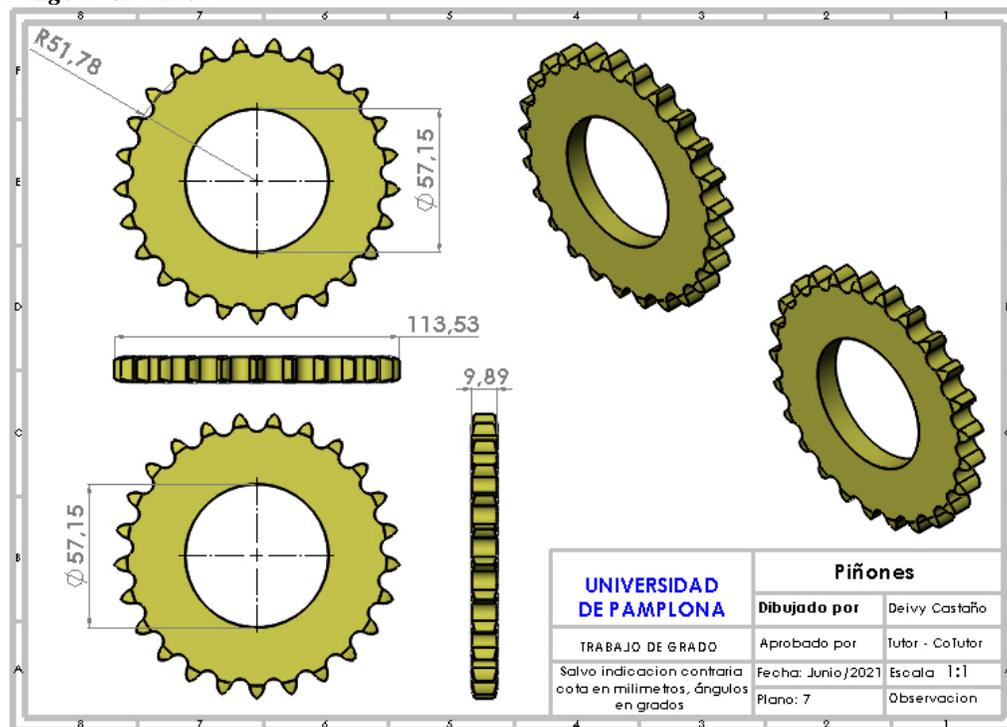
Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

Imagen 45. Plano 4



Fuente: elaboración propia, 2021

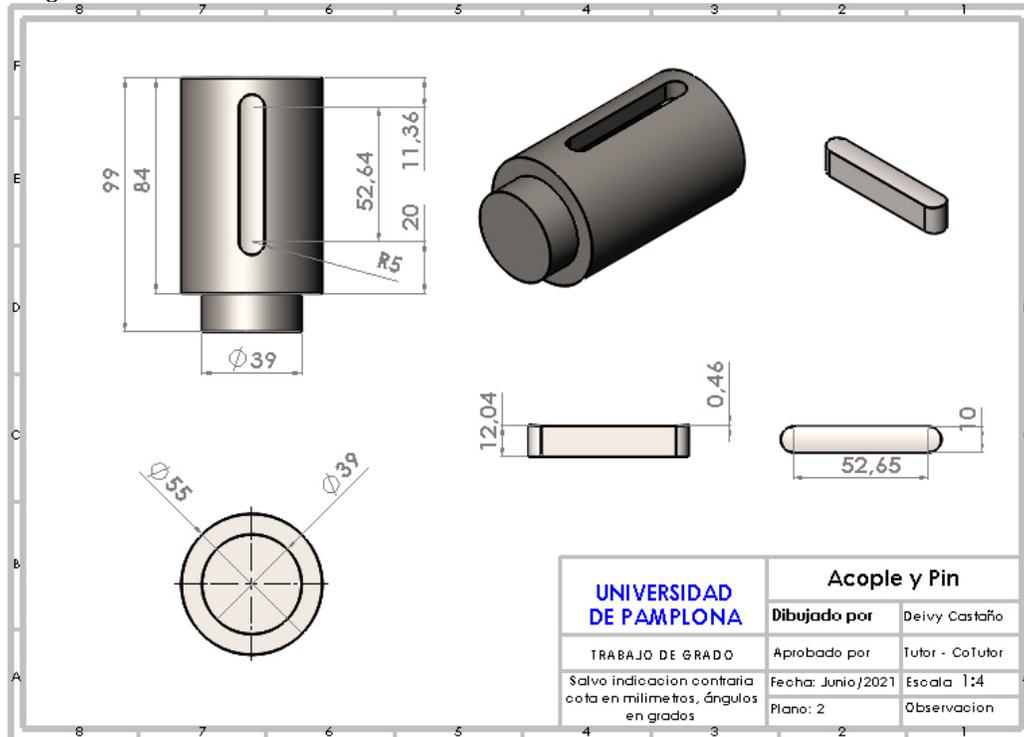
Imagen 46. Plano 5



Fuente: elaboración propia, 2021

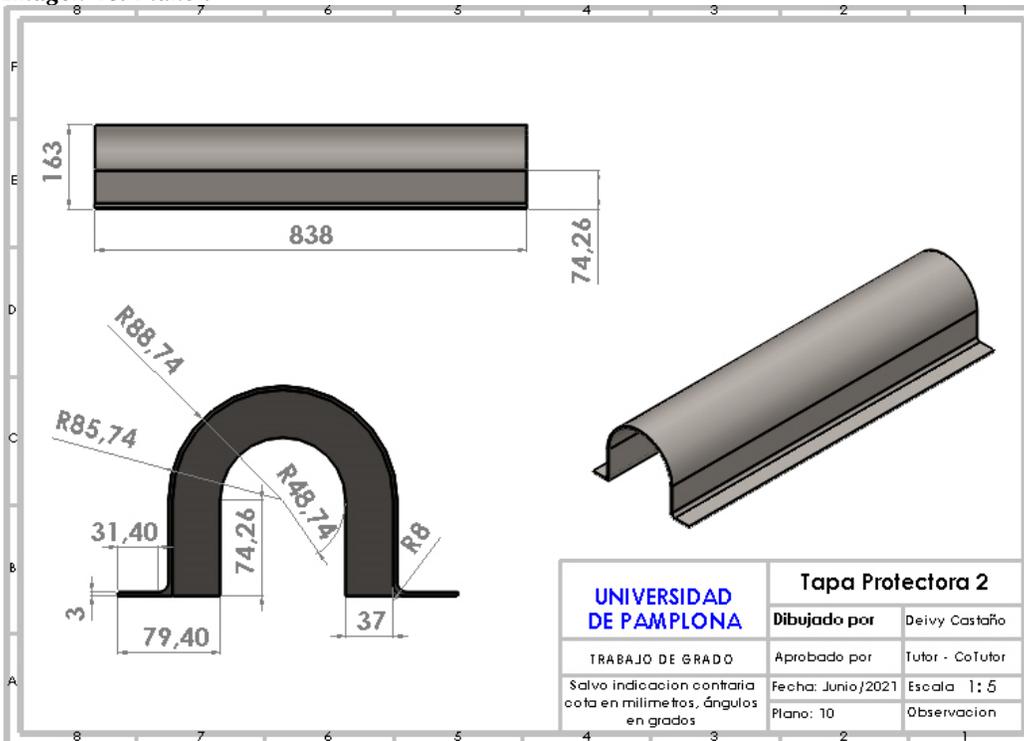
Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

Imagen 47. Plano 6



Fuente: elaboración propia, 2021

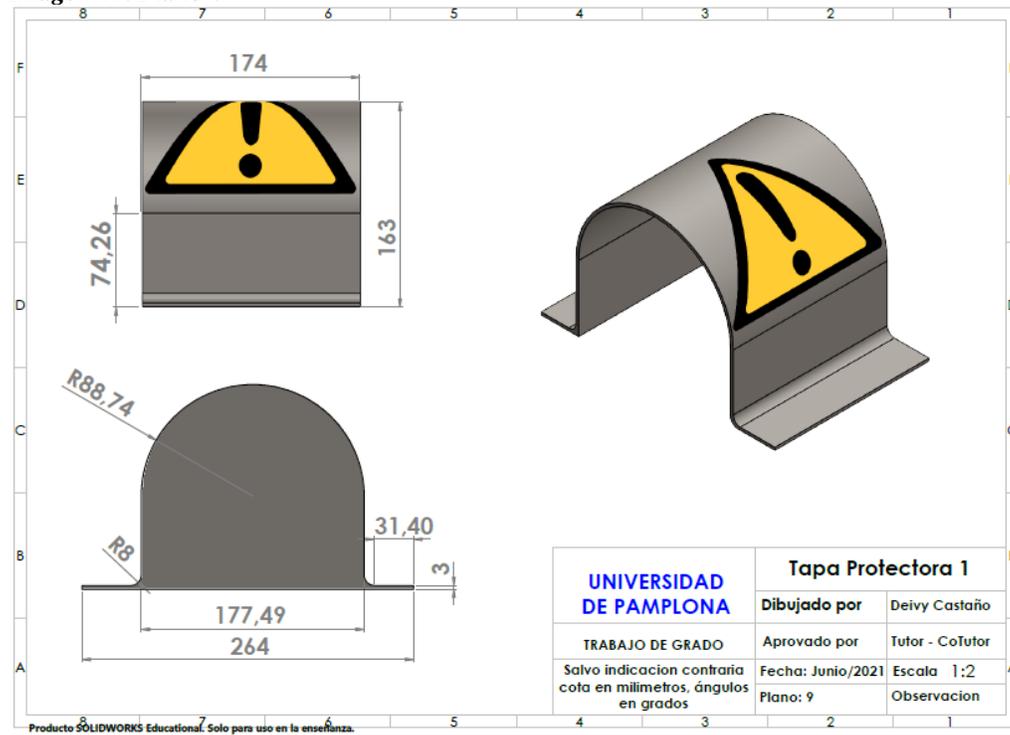
Imagen 48. Plano 7



Fuente: elaboración propia, 2021

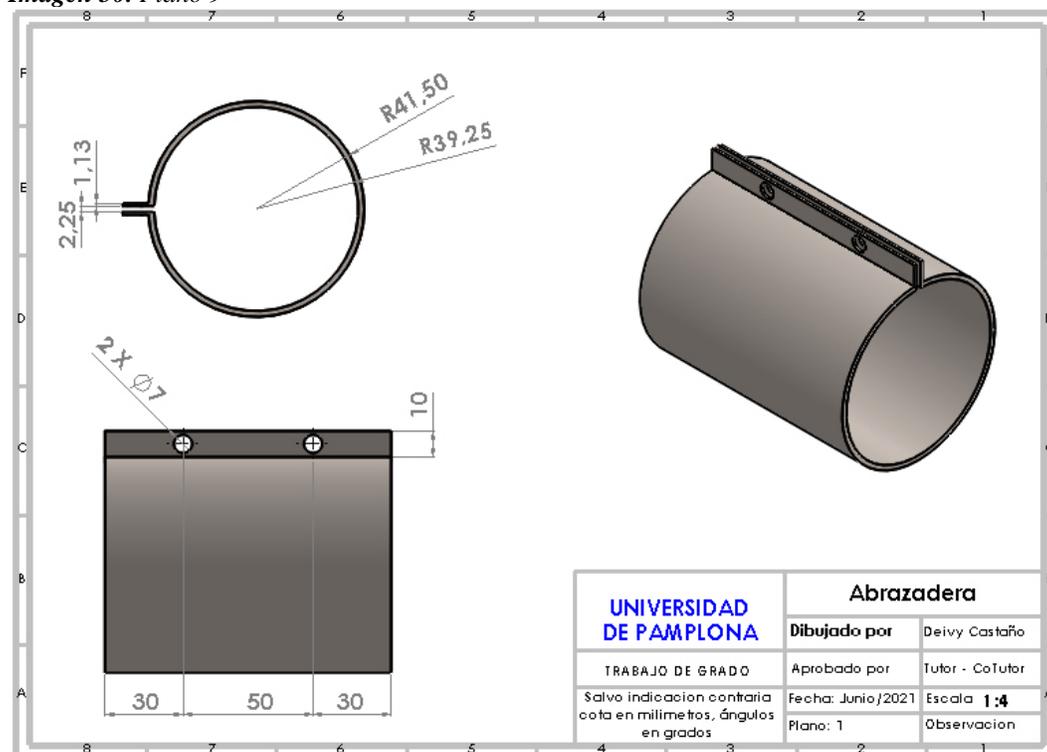
Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

Imagen 49. Plano 8



Fuente: elaboración propia, 2021

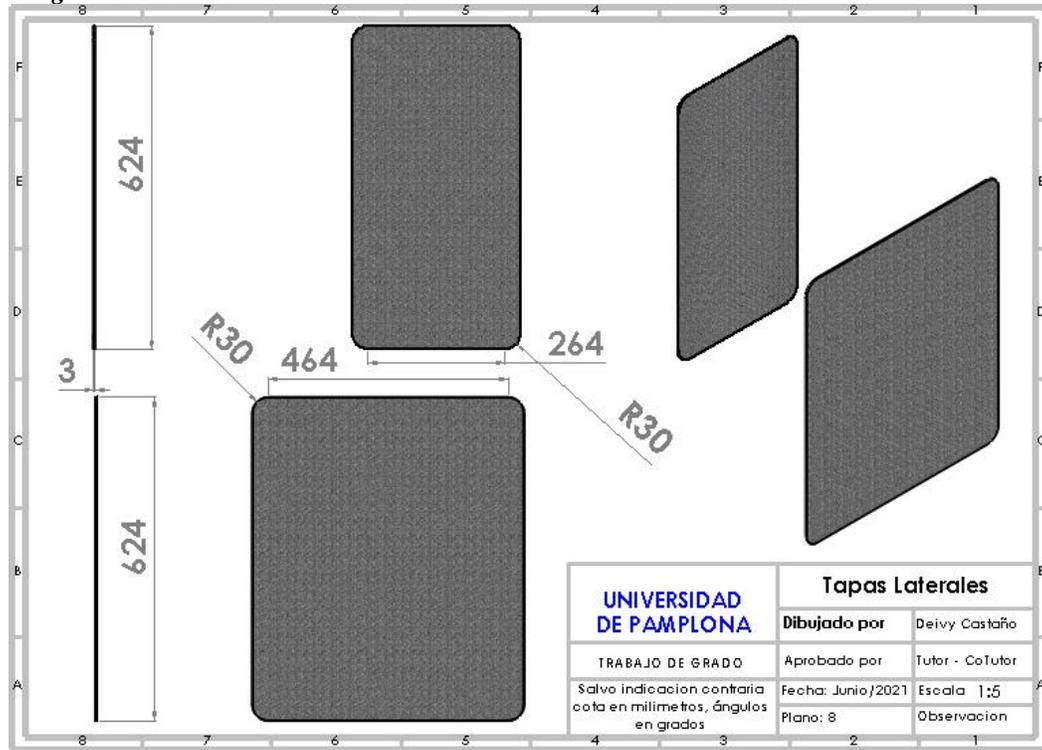
Imagen 50. Plano 9



Fuente: elaboración propia, 2021

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

Imagen 51. Plano 10



Fuente: elaboración propia, 2021

17.2 Características del catálogo Lentax n° 222 para el motorreductor

Tabla 13. Factor de servicio

MAQUINA ACCIONADA TIPO DE MAQUINA	FACTOR f_s f_s FACTOR hs. de Servicio Service hrs. 8 16 24			APPLICATIONS AND INDUSTRY DRIVEN MACHINE
MAQUINAS PARA PLASTICOS				PLASTIC INDUSTRY MACHINERY
Calandras	1.5	1.6	1.6	Calenders
Extrusoras	1.65	1.8	1.8	Extruders
Desmenzadoras	1.5	1.6	1.6	Crushers
Mezcladoras	1.65	1.8	1.8	Mixers
MAQUINAS PARA TRABAJAR METALES				METAL WORKING MACHINE
Máquinas dobladoras	1.5	1.6	1.6	Sheet metal bending machines
Enderezadoras de chapas	1.65	1.8	1.8	Plate straightening machines
Balancines	1.65	1.8	1.8	Punch presses
Cizallas	1.5	1.6	1.6	Shears
Prensas de forja	1.65	1.8	1.8	Forging presses
Prensas de estampado	1.65	1.8	1.8	Stamping presses
Mandos principales de máquinas herramientas	1.5	1.6	1.6	Machine tools, main drives.
Mandos secundarios de máquinas herramientas	1.15	1.4	1.5	Machine tools, auxiliary drives.
Cepillos	1.65	1.8	1.8	Metal planing machines
GRUAS				CRANES
Mecanismo de elevación	1.3	1.5	1.6	Luffing gear
Mecanismo de Giro	1.5	1.6	1.6	Bull gear
Mecanismo de Traslación	1.65	1.8	1.8	Travelling gear
Mando de Pluma articulada	1.5	1.6	1.6	Derricking jib gear

Fuente: Catalogo Lentax n° 222, línea coaxial, 2021

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

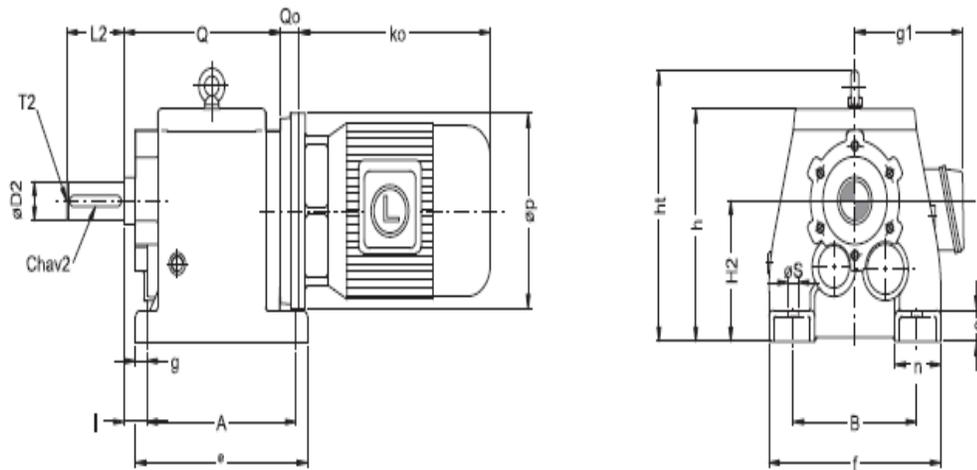
Tabla 14. Selección de motorreductores

Potencia Entrada		Velocidad Salida aprox.	Relación	MODELO	Factor de Seguridad	Momento Util	Velocidad Entrada aprox.	Carga Radial adm.	Carga Axial adm.	Peso aprox.	Medidas	Repuestos
kW	HP	(RPM)	(i)		(fz)	(Nm)	(RPM)	(kg)	(kg)	(kg)	Página	Página
18,50 kW	25,00 HP	66,0	22,29	C5T2 25,00	2,55	2642	1465	4070	1628	451	pag 57	pag 75
		78,0	18,86	C5T2 25,00	2,90	2236	1465	4070	1628	451	pag 57	pag 75
		91,0	16,16	C5T2 25,00	3,30	1916	1465	3520	1408	451	pag 57	pag 75
		105,0	13,99	C5T2 25,00	3,70	1659	1465	3520	1408	451	pag 57	pag 75
		38,1	38,41	C45T3 25,00	1,10	4413	1465	4020	1608	360	pag 57	pag 76
		44,1	33,20	C45T3 25,00	1,25	3814	1465	3600	1440	360	pag 57	pag 76
		50,5	29,00	C45T3 25,00	1,45	3332	1465	3600	1440	360	pag 57	pag 76
		57,4	25,54	C45T3 25,00	1,65	2934	1465	3600	1440	360	pag 57	pag 76
		75,1	19,51	C45T2 25,00	1,75	2241	1465	3120	1248	343	pag 57	pag 75
		91,1	16,08	C45T2 25,00	2,15	1847	1465	2450	980	343	pag 57	pag 75
		108,7	13,48	C45T2 25,00	2,55	1549	1465	2450	980	343	pag 57	pag 75
		113,6	12,90	C45T2 25,00	3,15	1482	1465	2450	980	343	pag 57	pag 75
		128,2	11,43	C45T2 25,00	3,00	1313	1465	2260	904	343	pag 57	pag 75
		137,7	10,64	C45T2 25,00	3,70	1222	1465	2260	904	343	pag 57	pag 75
		80,0	18,21	C4T2 25,00	1,00	2159	1465	2220	888	272	pag 57	pag 75
		92,0	15,87	C4T2 25,00	1,15	1882	1465	1740	696	272	pag 57	pag 75
		105,0	13,94	C4T2 25,00	1,25	1653	1465	1740	696	272	pag 57	pag 75
		119,0	12,32	C4T2 25,00	1,35	1461	1465	1740	696	272	pag 57	pag 75
		134,0	10,95	C4T2 25,00	1,50	1298	1465	1610	644	272	pag 57	pag 75
		150,0	9,77	C4T2 25,00	1,65	1158	1465	1610	644	272	pag 57	pag 75
		157,0	9,34	C4T2 25,00	1,65	1107	1465	1280	512	272	pag 57	pag 75
		179,0	8,20	C4T2 25,00	1,85	972	1465	1280	512	272	pag 57	pag 75
		202,0	7,25	C4T2 25,00	2,05	859	1465	1280	512	272	pag 57	pag 75
		227,0	6,44	C4T2 25,00	2,15	764	1465	1280	512	272	pag 57	pag 75
		255,0	5,75	C4T2 25,00	2,35	681	1465	1280	512	272	pag 57	pag 75

Fuente: Catalogo Lentax n° 222, línea coaxial, 2021

Diseño y simulación de una extrusora para potenciar la investigación en el aprovechamiento de residuos plásticos comunes

Tabla 15. Serie de medidas tipo C



Modelo Model	D2ø	L2	chav 2 keway 2	T2	H2	A	B	Sø	I	Q0						
										IEC 71	IEC 80-90	IEC 100-112	IEC 132	IEC 160-200	IEC 225-280	
C00T	mm	25	50	8x7	M10	90	130	110	9	25	20	35	---	---	---	---
	inch	1.000	2	1/4 x 1/8	UNC 3/8"	3.543	5 1/8	4 11/32	3/8"	1	25/32	1 3/8	---	---	---	---
C0T	mm	30	60	8x7	M10	115	165	135	14	30	20	35	---	---	---	---
	inch	1.188	2 3/8	1/4 x 1/8	UNC 3/8"	4.528	6 1/2	5 5/16	9/16	1 3/16	25/32	1 3/8	---	---	---	---
C1T	mm	35	70	10x8	M12	130	195	150	14	30	20	35	42	64	---	---
	inch	1.375	2 3/4	5/16 x 5/32	UNC 1/2"	5.118	7 11/16	5 29/32	9/16	1 3/16	25/32	1 3/8	1 21/32	2 17/32	---	---
C2T	mm	40	80	12x8	M16	140	205	170	18	35	20	35	42	64	---	---
	inch	1.625	3 1/8	3/8 x 3/16	UNC 5/8"	5.512	8 1/16	6 11/16	23/32	1 3/8	25/32	1 3/8	1 21/32	2 17/32	---	---
C3T	mm	50	100	14x9	M16	180	260	215	18	40	---	32	32	52	82	---
	inch	2.000	4	1/2 x 1/4	UNC 5/8"	7.087	10 1/4	8 15/32	23/32	1 9/16	---	1 1/4	1 1/4	2 1/16	3 7/32	---
C4T	mm	60	120	18x11	M20	225	310	250	22	40	---	32	32	52	82	---
	inch	2.375	4 3/4	5/8 x 5/16	UNC 3/4"	8.858	12 7/32	9 27/32	7/8	1 9/16	---	1 1/4	1 1/4	2 1/16	3 7/32	---
C45T	mm	70	140	20 x 12	M20	250	370	290	26	45	---	---	45	45	75	105
	inch	2.750	5 1/2	5/8 x 5/16	UNC 3/4"	9.843	14 9/16	11 7/16	1 1/32	1 3/4	---	---	1 25/32	1 25/32	2 15/16	4 1/8
C5T	mm	90	170	25 x 14	M24	315	410	340	33	50	---	---	45	45	75	105
	inch	3.500	6 3/4	7/8 x 7/8	UNC 1"	12.402	16 1/8	13 3/8	1 5/16	1 31/32	---	---	1 25/32	1 25/32	2 15/16	4 1/8
C6T	mm	110	210	28 x 16	M24	355	500	380	39	50	---	---	---	45	75	105
	inch	4.313	8 1/4	1 x 1	UNC 1"	13.976	19 11/16	14 31/32	1 17/32	1 31/32	---	---	---	1 25/32	2 15/16	4 1/8