

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA RECICLADORA
DE POLÍMEROS PARA LA ELABORACIÓN DE FILAMENTO PARA
IMPRESIÓN 3D.



Universidad Autónoma de Bucaramanga

VIGILADA MINEDUCACIÓN

JUAN DAVID NAVARRO NÁJERA
YORMAN ANDRES TORRES PAEZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BUCARAMANGA-COLOMBIA

2022

DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE MÁQUINA RECICLADORA
DE POLÍMEROS PARA LA ELABORACIÓN DE FILAMENTO PARA
IMPRESIÓN 3D.



Universidad Autónoma de Bucaramanga

VIGILADA MINEDUCACIÓN

JUAN DAVID NAVARRO NÁJERA
YORMAN ANDRES TORRES PAEZ

DIRECTOR: SERGIO ANDRES ARDILA GOMEZ, MSc.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BUCARAMANGA-COLOMBIA

2022

AGRADECIMIENTOS

Primero queremos agradecerle a Dios por darnos la salud y el bienestar para completar nuestros estudios logrando una meta importante para nuestra vida.

A nuestras madres Ligia Nájera y Ovadis Paez por ser nuestro apoyo incondicional y a quienes les debemos todo en la vida.

Queremos agradecer especialmente al director de tesis, el profesor Sergio Ardila, sirviendo como guía para el desarrollo y culminación del proyecto de grado.

A la Universidad Autónoma de Bucaramanga por darnos la oportunidad de desarrollar nuestros estudios en el programa de pregrado en Ingeniería Mecatrónica, permitiéndonos formarnos como profesional siempre acompañados de un gran cuerpo de docentes.

Agradecemos también a todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron a que este documento culminara de manera exitosa.

CONTENIDO

| | | |
|---|---|-----------|
| 1. | RESUMEN | 8 |
| 2. | PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 9 |
| 3. | JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA | 10 |
| 4. | OBJETIVOS | 11 |
| 4.1. | OBJETIVO GENERAL | 11 |
| 4.2. | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 11 |
| 5. | ANTECEDENTES | 12 |
| 6. | MARCO TEORICO | 15 |
| COMPARATIVA MATERIALES PARA IMPRESIÓN 3D | | 16 |
| RESULTADOS DE LA SELECCIÓN..... | | 17 |
| 6.1. | RECICLAJE DE MATERIALES PLÁSTICOS | 19 |
| 6.1.1. | <i>Tereftalato de Polietileno (PET)</i> | 19 |
| 6.1.2. | <i>Procesamiento de materiales plásticos</i> | 20 |
| 6.1.3. | <i>Proceso de triturado de plásticos</i> | 20 |
| 6.1.4. | <i>Proceso de extrusión de plásticos</i> | 21 |
| 6.2. | MODELO MATEMÁTICO DEL FLUJO FUNDIDO EN EL EXTRUSOR | 22 |
| 6.3. | TRANSFERENCIA DE CALOR | 23 |
| 6.4. | SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO | 25 |
| 7. | METODOLOGÍA | 26 |
| 8. | DESARROLLO | 28 |
| 8.1. | SISTEMA DE TRITURADO | 28 |
| 8.2. | DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE CORTE. | 29 |
| 8.3. | DISEÑO EN INVENTOR 2022 DEL SISTEMA DE TRITURADO. | 33 |
| 8.4. | SISTEMA DE FUNDICIÓN | 35 |
| 8.5. | PRODUCCIÓN DEL TORNILLO EXTRUSOR | 35 |
| 8.6. | DISEÑO EN INVENTOR 2022 DEL SISTEMA DE FUNDICIÓN. | 39 |
| 9. | SISTEMA DE CALOR | 40 |
| 10. | EMBOBINADO | 45 |
| 11. | SELECCIÓN DE ACTUADORES Y SENSORES PARA EL SISTEMA CALEFACTOR. | 47 |
| 12. | CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO | 50 |
| 12.1. | SISTEMA DE TRITURADO | 50 |
| 12.2. | SISTEMA DE FUNDICIÓN Y EXTRUSIÓN..... | 53 |
| 12.3. | SISTEMA DE BOBINADO..... | 55 |
| 12.4. | CARACTERIZACIÓN DE LA PLANTA | 57 |
| 13. | CONSTRUCCIÓN FINAL DEL PROTOTIPO DE MAQUINA RECICLADORA | 60 |
| 14. | RESULTADOS | 61 |
| 15. | CONCLUSIONES | 63 |
| 16. | BIBLIOGRAFÍA | 64 |

17. ANEXOS66

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------|--|----|
| FIGURA 1. | LYMAN FILAMENT STRUDER (LYMAN, 2012)..... | 13 |
| FIGURA 2. | DISEÑO DE MÁQUINA TRITURADORA. (CLEVEL, 2020)..... | 13 |
| FIGURA 3. | MÓDULO DE TRITURADO Y EXTRUSIÓN DEL FILAMENTO. (RAMOS, 2019)..... | 14 |
| FIGURA 4. | PARTICIPACIÓN PORCENTUAL EN RESIDUOS PLÁSTICOS. (GUAJARDO, NAJAR, PRÓSPERI, & MOLINA, 2000) 15 | 15 |
| FIGURA 5. | RESULTADOS DE LOS DIFERENTES POLÍMEROS EVALUADOS (NOGUERA, 2020)..... | 17 |
| FIGURA 6. | FIGURA 6. BOTELLAS PET EN SUS DIFERENTES PRESENTACIONES. | 18 |
| FIGURA 7. | CLASIFICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS RECICLABLES. | 19 |
| FIGURA 8. | CUCHILLAS DE MOLINO CONVENCIONALES. (CLEVEL, 2020)..... | 21 |
| | 21 | |
| FIGURA 9. | TAMIZ PARA FILTRAR LOS TROZOS. (CLEVEL, 2020)..... | 21 |
| FIGURA 10. | MÁQUINA EXTRUSORA BATTENFEL (RAMOS, 2019)..... | 22 |
| FIGURA 11. | COMPONENTES Y CARACTERÍSTICAS DE UN EXTRUSOR (DE UN SOLO TORNILLO) PARA PLÁSTICOS Y ELASTÓMEROS. (GROOVER, 2007) | 23 |
| FIGURA 12. | DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE LAZO ABIERTO. (OGATA, 2010)..... | 25 |
| FIGURA 13. | DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SISTEMA DE LAZO CERRADO. (OGATA, 2010) | 25 |
| FIGURA 14. | METODOLOGÍA EN V PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO. FUENTE: LOS AUTORES. | 26 |
| FIGURA 15. | BOSQUEJO DE LOS SISTEMAS DE LA MÁQUINA..... | 28 |
| FIGURA 16. | DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE UNA CUCHILLA DE TRITURADO EN EL MOMENTO DE CORTE..... | 28 |
| FIGURA 17. | BOTELLA PET 500ML. TOMADO DE: HTTPS://WWW.REMSAPLASTICOS.COM/PRODUCTOS/BOTELLAS- PET/BOTELLA-PET-500ML-45 | 29 |
| FIGURA 18. | MÁQUINA TRITURADORA DE DOBLE EJE. FUENTE: LOS AUTORES. | 32 |
| FIGURA 19. | MÁQUINA TRITURADORA DE UN EJE CON CUCHILLAS FIJAS. FUENTE: LOS AUTORES. | 32 |
| FIGURA 20. | CUCHILLA DE CORTE PARA MOLINO. FUENTE: LOS AUTORES. | 33 |
| FIGURA 21. | EJE DE TRITURADORA. FUENTE: LOS AUTORES. | 33 |
| FIGURA 22. | SEPARADOR DE CUCHILLAS. FUENTE: LOS AUTORES. | 33 |
| FIGURA 23. | CAJA DE TRITURADORA. FUENTE: LOS AUTORES..... | 34 |
| FIGURA 24. | CUCHILLAS LATERALES DE CORTE..... | 34 |
| FIGURA 25. | ENSAMBLE DE EJE PARA MOLINO DE CORTE. | 34 |
| FIGURA 26. | ENSAMBLE COMPLETO DE MÁQUINA TRITURADORA. FUENTE: LOS AUTORES..... | 34 |
| FIGURA 27. | TORNILLO SIN FIN TIPO BARCO. FUENTE: LOS AUTORES. | 39 |
| FIGURA 28. | EXTRUSORA. FUENTE: LOS AUTORES. | 40 |
| FIGURA 29. | PUNTA DE EXTRUSOR. FUENTE: LOS AUTORES..... | 40 |
| FIGURA 30. | ENSAMBLE EXTRUSOR. FUENTE: LOS AUTORES. | 40 |
| FIGURA 31. | ESQUEMA DEL SISTEMA DE CALEFACCIÓN. | 41 |
| FIGURA 32. | RESISTENCIA ELÉCTRICA TIPO TUBULAR..... | 43 |
| FIGURA 33. | DIAGRAMA DE RESISTENCIAS TÉRMICAS..... | 43 |
| FIGURA 34. | FIBRA DE CERÁMICA. | 44 |
| FIGURA 35. | SISTEMA DE BOBINADO..... | 45 |
| FIGURA 36. | SISTEMA DE EMBOBINADO, VISTA ISOMÉTRICA. FUENTE: LOS AUTORES. | 46 |
| FIGURA 37. | VISTA ISOMÉTRICA DEL ENSAMBLE FINAL. FUENTE: LOS AUTORES..... | 46 |
| FIGURA 38. | DIAGRAMA QFD PARA LA SELECCIÓN DEL SISTEMA CALEFACTOR. | 47 |
| FIGURA 39. | DIAGRAMA QFD PARA LA SELECCIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA | 48 |
| FIGURA 40. | CONTROL DE TEMPERATURA DIGITAL EBCHQ 48X48MM 58008. | 49 |
| FIGURA 41. | OXICORTE PARA LA CREACIÓN DE LA MÁQUINA TRITURADORA. | 50 |
| FIGURA 42. | MODELO CAD DEL NUEVO SISTEMA DE TRITURADO..... | 51 |

| | | |
|------------|---|----|
| FIGURA 43. | VISTA ISOMÉTRICA SECCIONADA DE LA TRITURADORA..... | 52 |
| FIGURA 44. | CUCHILLA DE CORTE Y SISTEMA DE TAMIZAJE. | 52 |
| FIGURA 45. | SISTEMA DE TRITURADO Y RESULTADO DE TRITURACIÓN. | 52 |
| FIGURA 46. | TORNILLO TIPO BARCO 3/8" Y TOLVA SOLDADA AL CILINDRO DE EXTRUSIÓN. | 53 |
| FIGURA 47. | SISTEMA CALEFACTOR ACOPLADO A LA PLANTA. | 53 |
| FIGURA 48. | DIAGRAMA DE CONEXIÓN DEL MOTOR SELECCIONADO. | 54 |
| FIGURA 49. | SISTEMA EXTRUSOR ENSAMBLADO Y FIJADO. | 54 |
| FIGURA 50. | SISTEMA DE BOBINADO..... | 55 |
| FIGURA 51. | MOTORREDUCTOR DE SISTEMA EMBOBINADO. | 56 |
| FIGURA 52. | DIAGRAMA UNILINEAL DEL CONTROL DE TEMPERATURA A LAZO CERRADO. | 57 |
| FIGURA 53. | COMPORTAMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL | 58 |
| FIGURA 54. | COMPORTAMIENTO DEL MODELO SIMULADO Y OBTENIDO POR EL SISTEMA DE PRIMER ORDEN | 58 |
| FIGURA 55. | COMPARACIÓN ENTRE LOS MODELOS | 59 |
| FIGURA 56. | PROTOTIPO CONSTRUIDO. | 60 |
| FIGURA 57. | INTERFAZ DE MANDO PARA EL ACCIONAMIENTO DE LAS ETAPAS. | 60 |
| FIGURA 58. | FILAMENTO EXTRUIDO Y BOBINADO EN UN CARRETE. | 61 |
| FIGURA 59. | RESULTADO DE IMPRESIÓN USANDO EL FILAMENTO EXTRUIDO. | 61 |

LISTA DE TABLAS

| | | |
|----------|--|----|
| TABLA 1. | CARACTERÍSTICAS DE LOS POLÍMEROS..... | 15 |
| TABLA 2. | CARACTERÍSTICAS DE LOS POLÍMEROS..... | 16 |
| TABLA 3. | RESISTENCIA DE CORTE DE LOS POLÍMEROS..... | 29 |
| TABLA 4. | FLUJO VOLUMÉTRICO DEL EXTRUSOR | 38 |

1. RESUMEN

Este trabajo consta del diseño y la construcción de un prototipo de máquina recicladora de polímeros para la elaboración de filamento para impresión 3D con el fin de poder darle una segunda vida útil a los recipientes plásticos que abundan la vida diaria, al mismo tiempo se tiene en consideración una de las problemáticas mundiales del siglo 21, la contaminación ambiental.

El proyecto representa el ciclo de reciclaje completo de los polímeros que están en las botellas plásticas debido a que cuenta con tres etapas. La etapa de triturado consiste en desgarrar el material para obtener trozos más pequeños del mismo, este proceso proporciona un material más homogéneo y ayuda a disminuir el volumen del mismo debido a que los plásticos presentan poca densidad. La segunda etapa es la de fundición y extrusión en la cual se utiliza el material previamente triturado y se transforma en el producto final con un control de temperatura se alcanza la temperatura de fundición del plástico y se extruye a través de una boquilla que da el diámetro necesitado para cumplir con el diámetro estándar usado en impresiones 3D.

El filamento extruido de aproximadamente un diámetro de 1.75mm es dirigido a la etapa de bobinado, en esta tercera etapa se busca presentar el filamento en carretes para su posterior uso en trabajos de impresión 3D. Resulta relevante ya que se convierte en una alternativa ecológica debido al uso de materiales que comúnmente se desechan y no se les da un valor agregado, siendo las botellas recicladas un plástico con propiedades óptimas en la fundición y extrusión, ideales en el proceso de elaboración de piezas en la impresión 3D.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dentro de los plásticos, el Tereftalato de polietileno (PET) se ha convertido en uno de los materiales más manipulados por las personas en sus actividades diarias (Estrada, 2020); se usa principalmente en la industria de alimentos, bebida, limpieza y cosméticos, con el fin de envasar y proteger el producto de agentes externos que afectan la calidad del contenido; según (Ferro Nieto, Toledo arguelles, & Cadalso Basadre, 2008) entre sus aplicaciones se encuentran el envasado de “agua mineral, aceite, zumos, bebidas isotónicas, detergentes, productos de higiene corporal, etc.”

Según (Semana Sostenible, 2019) “en Colombia de las 49.000 toneladas que se producen anualmente, solo se reciclan el 30% de estas”, problemática que se presenta debido a la poca conciencia y desinterés que tienen las personas, al no percibir directamente los daños que ocasiona este material en los ecosistemas y sus especies, haciendo que los niveles de desperdicios que terminan en los ecosistemas acuáticos, año tras año sigan en aumento.

Desde el punto de vista medioambiental, el reciclaje centralizado (puntos de acopio para posterior traslado y tratamiento en plantas especializadas) sólo por conceptos de recolección, transporte y transferencia, aporta gases de efecto invernadero que se agregan a los del proceso global. Por lo que el reciclaje de materiales plásticos para impresión 3D, podría ser una solución adicional para reducir estas emisiones y disminuir la huella de carbono.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Este proyecto busca desarrollar un prototipo de máquina procesadora de botellas que permita obtener un filamento útil para las impresoras 3D existentes en el mercado, tomando como insumos algunos plásticos seleccionados de acuerdo a la investigación. La fabricación de una máquina recicladora de botellas PET, resulta relevante ya que se convierte en una alternativa ecológica debido al uso de materiales que comúnmente se desechan y no se les da un valor agregado, siendo las botellas recicladas un plástico con propiedades óptimas en la fundición y extrusión, ideales en el proceso de elaboración de piezas en la impresión 3D. Se debe resaltar que este proyecto se encuentra alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 12 y 13 (ONU, 2015), planteados por las Naciones Unidas. Los cuales específicamente son:

12) Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles.

13) Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos.

Resulta natural pensar en el procesamiento de los residuos y la producción del propio filamento, no sólo contrae beneficios medioambientales, económicamente es muy atractivo para los usuarios de las tecnologías de impresión 3D que ha tenido una tendencia positiva en cuanto a desarrollo de productos e investigaciones orientadas a este campo.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un Prototipo de máquina recicladora de polímeros para la elaboración de filamento en impresión 3D.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar el levantamiento de los requerimientos necesarios para el diseño de la construcción de la máquina recicladora de polímeros.
- Diseñar la estructura mecánica de los subsistemas de triturado, fundición, extrusión, embobinado y los circuitos electrónicos y seleccionar los sensores y actuadores del sistema de control que conforman el prototipo de la máquina recicladora.
- Construir el prototipo de la máquina recicladora de polímeros para la extrusión de filamento.
- Diseñar la interfaz HMI y el controlador del prototipo de la máquina.
- Validar el funcionamiento del prototipo de la máquina extruyendo un carrete de 250 gramos y la impresión de una pieza funcional.

5. ANTECEDENTES

Investigadores como J. Whinfield y J. Dickson del poliéster termoplástico, definieron el polietileno tereftalato (PET) como un polímero para fibra. Desde que comenzó la producción comercial del PET, este ha producido un gran desarrollo tecnológico, logrando de esta manera un alto nivel de sofisticación por su crecimiento a nivel mundial. De ahí parten numerosos proyectos a través de los años para definir, diseñar y construir conocimientos aplicativos para dar provecho a diferentes tipos de materiales mediante el reciclado, procesamiento y distribución de los mismos, creando una nueva oportunidad en su ciclo de vida.

Laura Arteaga en 2015 demostraba en su investigación titulada “fabricación y caracterización de filamentos para impresora 3D a partir de materiales reciclados” (Arteaga, 2015) el potencial de los distintos materiales para generar filamento válido para la impresión 3D. Durante el proceso de desarrollo del trabajo, se empleó una extrusora para llevar a cabo el proceso de fabricación de filamento, además de una impresora 3D de tipología RepRap para generar piezas a partir del filamento confeccionado, para ensayarlas mecánicamente y caracterizar así el filamento y sus propiedades. En el trabajo se pueden encontrar conclusiones importantes acerca de la obtención de materia prima a través de trituración y extrusión de material, hasta la impresión y el trabajo mecánico de las piezas conformadas.

En el año 2012, una competencia abierta al público general; la DFC (“Desktop Factory Competition”) (Lyman, 2012), retó a sus participantes a crear una máquina, de software y diseño libre a la comunidad, capaz de producir filamento para las impresoras 3D por menos de USD \$250. El premio de USD \$40.000 fue adjudicado al estadounidense Hugh Lyman, un inventor de 83 años de edad y 17 años de jubilado. La “Lyman Filament Extruder” ya se encuentra en su segunda versión y es posible descargar toda su documentación e instrucciones de diseño y construcción, la cual se construye con componentes de HomeDepot, RadioShack y menos de USD \$200.

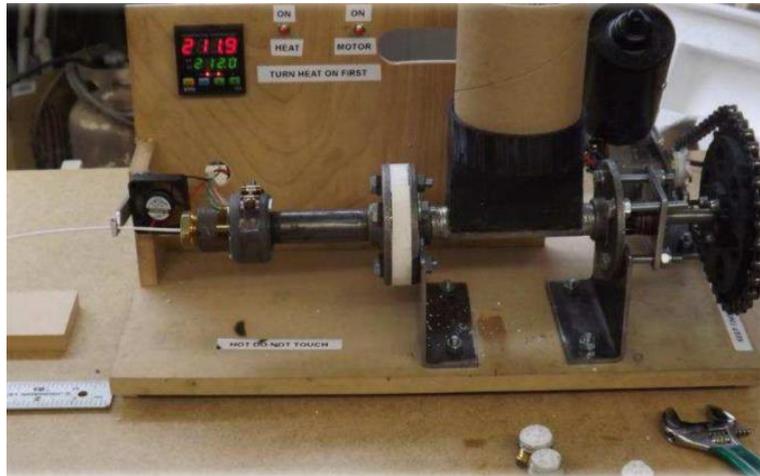


Figura 1. Lyman Filament Struder (Lyman, 2012)

Así mismo, en el proyecto titulado “diseño de una trituradora de PET como herramienta de apoyo para las asignaturas de ingeniería de unicatólica” (Clevel, 2020). Jesus Clevel Angulo en el año 2020 presentó el diseño de una máquina trituradora PET haciendo uso de la metodología del prototipo evolutivo, para que pueda implementar el uso de este material en las asignaturas del área de producción y de esta forma se logre disminuir el impacto de los desechos de PET en el medio ambiente. En este proyecto se evalúan diferentes sistemas de triturado de material reciclado, lo que brinda un primer plano de análisis para el diseño de una máquina que tenga fases de triturado y extrusión.

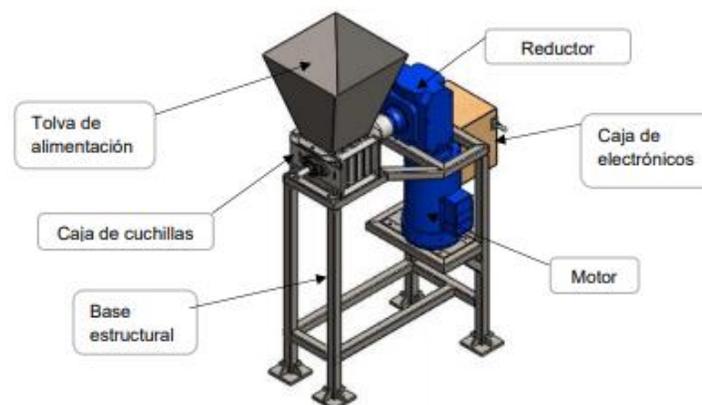


Figura 2. Diseño de máquina trituradora. (Clevel, 2020)

En el año 2019 Giancarlo Ramos Espinosa y Guillermo Andres Lombana Gómez a través de su proyecto titulado “diseño e implementación de un sistema de extrusión de filamento para impresión 3D a partir de botellas recicladas” (Ramos, 2019) desarrollan una máquina que se compone de dos etapas, la primera es la de trituración, en ella el material plástico reciclado se convierte en pequeños trozos a través de un sistema de cuchillas. La segunda etapa es la de extrusión de filamento, utilizando el material previamente triturado se obtiene el filamento de 1.75mm de diámetro, siendo este el producto final del proceso que será utilizado en impresiones 3D. En este trabajo también se concluye que los pasticos con mejor manejo y calidad para la extrusión de filamento son el HDPE y el PP, encontrados comúnmente en envases, tapas y contenedores de productos de aseo y comida.

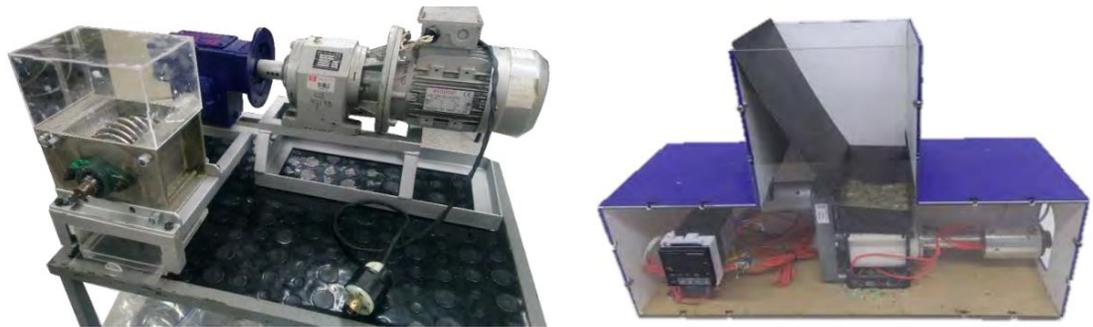


Figura 3. Módulo de triturado y extrusión del filamento. (Ramos, 2019)

6. MARCO TEORICO

Composición de los residuos plásticos

Entre la selección de residuos plásticos que encontramos en el reciclaje se encuentra una amplia variedad de plásticos, por lo tanto, resulta necesario hacer el levantamiento de los requerimientos para determinar las características físicas y químicas de cada uno de los componentes y así poder determinar cuáles resultan los materiales óptimos para la elaboración del filamento PET.

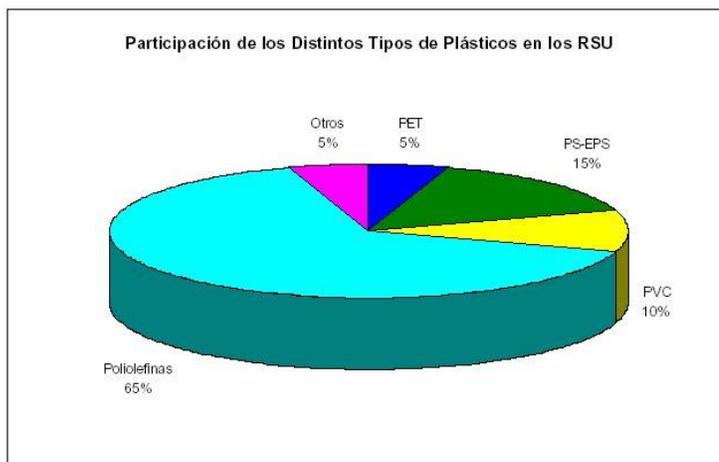


Figura 4. Participación porcentual en residuos plásticos. (GUAJARDO, NAJAR, PRÓSPERI, & MOLINA, 2000)

Del análisis gráfico se puede concluir que de los diversos plásticos que son reciclados, en el que podemos encontrar en una mayor proporción son las poliolefinas que están compuestas de **polipropileno (PP)** y **elastómeros de poliolefina (POE)**, esto es debido a que la mayoría de los plásticos en la industria son derivados de este polímero como los son los distintos envases o embalajes. Ente los diferentes plásticos se ve resaltado la amplia cantidad de botellas PET, esto es debido al gran incremento en el consumo de bebidas como gaseosas o aguas cuyos envases son derivados de este material.

Caracterización de diferentes plásticos reciclados

| | Densidad (g/cm ³) | Resistencia a la rotura(kg/cm ³) | Dureza (Rockwell Brinell H.) |
|--------------|-------------------------------|--|------------------------------|
| Poliolefinas | 0,97 | 300 | D,73 |
| PS-EPS | 1,05 | 250 | D,65 |
| PVC | 1,3 | 550 | D.65 |
| PET | 1,38 | 750 | M.94 |

Tabla 1. Características de los polímeros

| | Alargamiento a la rotura (%) | Absorción del agua (%) | Temperatura de fusión (°C) |
|---------------|------------------------------|------------------------|----------------------------|
| Poliiolefinas | 650 | 0,01 | 160 |
| PS-EPS | 450 | 0,01 | 220 |
| PVC | 150 | 0,1 | 110 |
| PET | 15 | 0,2 | 230 |

Tabla 2. Características de los polímeros

De acuerdo a caracterización de los distintos polímeros que son reciclados se realizó una identificación de sus propiedades respecto a sus características físicas, mecánicas y químicas y así de esta forma poder determinar cuál de los diferentes plásticos resulta el óptimo de acuerdo a los requerimientos de las máquinas en el momento de realizar una impresión 3D.

COMPARATIVA MATERIALES PARA IMPRESIÓN 3D

De acuerdo con el artículo titulado “**Comparación entre materiales para impresión 3D FDM**” (Paz, 2018). en el que relaciona la aparición regular de nuevos materiales en el mercado de la impresión 3D, hace que sea cada vez más difícil elegir el material adecuado para imprimir un objeto en particular. En la impresión 3D de estilo FDM, el PLA y ABS son siempre los polímeros más utilizados, pero el predominio inicial es casi aleatorio, por lo que no hay obstáculos importantes para que otros polímeros jueguen un papel importante en el futuro. Hoy en día, hay cada vez más productos nuevos, tanto polímeros puros como sintéticos. Este estudio se centró en los polímeros más utilizados del mercado en la actualidad: PLA, ABS, PET, nylon, TPU (plástico) y PC. Se analizarán las diferencias más significativas de las propiedades de los polímeros para determinar el óptimo de acuerdo al uso requerido.

Los materiales generalmente se dividen en tres categorías: rendimiento mecánico, percepción y proceso. En este caso, estas clasificaciones se subdividen para determinar de una forma más específica las propiedades del polímero. La selección del material depende de acuerdo con lo que el operario desee imprimir, por lo que se caracterizan los principales determinantes (además del costo y la velocidad) necesarios para la selección del material:

- Fácil impresión.
- percepción
- Esfuerzo máximo
- Alargamiento en el punto de rotura

- Resistencia al impacto
- Grado de adherencia
- Resistencia al calor

RESULTADOS DE LA SELECCIÓN

Cada material se califica en una escala de bajo, medio y alto de acuerdo con diferentes criterios: Estos son grados relativos del proceso FDM. Utilizando la información de Optimatter, se consideran los polímeros clasificados según diferentes criterios:

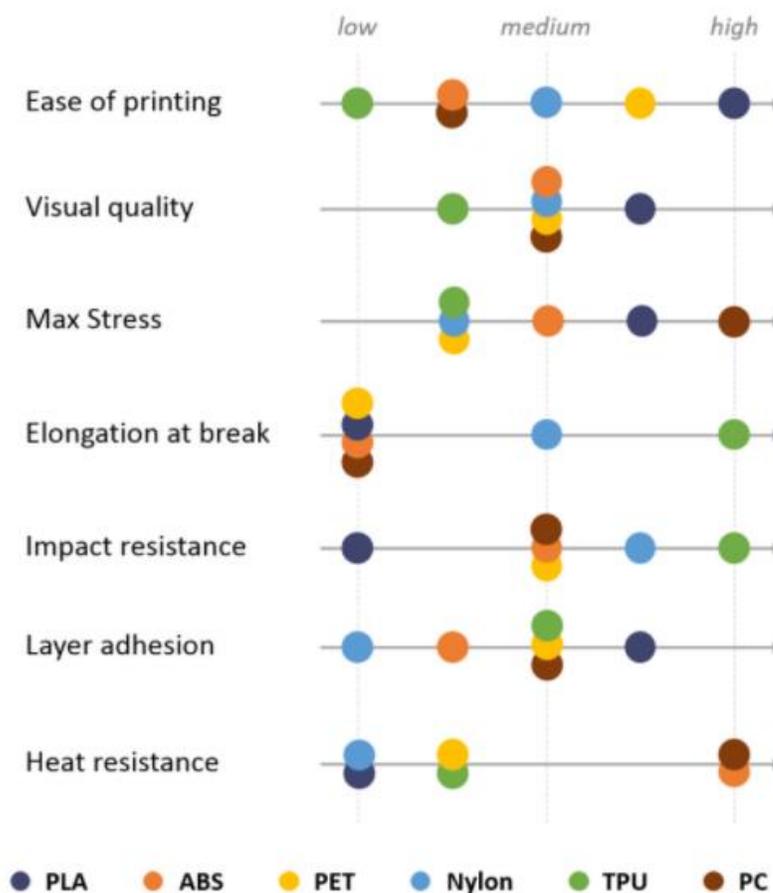


Figura 5. Resultados de los diferentes polímeros evaluados (Noguera, 2020)

El PET es un polímero bastante blando que tiene algunas propiedades adicionales interesantes, además de no contar con inconvenientes importantes, tal como se evidencia en los siguientes criterios:

Pros:

- Licencia sanitaria (aprobada por la FDA).
- Alta resistencia a la humedad.
- Alta resistencia a los agentes químicos.
- Reciclable
- Alta resistencia al desgaste.

Contras:

- Dificultad de impresión
- Difícil adhesión entre capas

De acuerdo con el levantamiento de los requerimientos de distintos polímeros reciclados se decidió tomar el PET como el polímero más adecuado para la realización del carrete a extruir, esto debido a sus propiedades tanto físicas como químicas que este material presenta y de las cuales resultan características óptimas en la extrusión de filamentos que se lleva a cabo en la impresión 3D.

Presentaciones comerciales de botellas PET



Figura 6. Figura 6. Botellas PET en sus diferentes presentaciones.

En relación con la selección del tamaño de las botellas PET a procesar, este proyecto estará enfocado únicamente a envases de tamaño pequeño y personal, ya que, aunque esta máquina puede ser diseñada para el reciclaje de cualquier presentación de botellas, este proyecto es un prototipo el cual se desea construir en un tamaño portátil para su facilidad de construcción, transporte y precio al momento de su fabricación.

6.1. RECICLAJE DE MATERIALES PLÁSTICOS

La base del proyecto se encuentra en la transformación del plástico desde recipientes y contenedores a filamento extruido. La atención se centra en el PET, el polietileno de alta densidad, el polipropileno y el poliestireno que se encuentran en elementos de uso cotidiano como el transporte de alimentos y bebidas, dejando a un lado el PVC debido a que es un material nocivo en los procesos de fundición de plástico para los humanos por sus gases emitidos y el LDPE (Polietileno de baja densidad) ya que este se encuentran principalmente en bolsas plásticas y su comportamiento en procesos de triturado supone problemas de homogeneidad.

La clasificación de plásticos se realiza según el SPI (Sistema de Identificación de Plásticos). Dentro de estos se encuentra el Tereftalato de polietileno (*PET*), codificado con el número 1, utilizado en envases de bebidas, cosméticos, fibras textiles, películas radiográficas, entre otras aplicaciones similares a estas; otro de los plásticos de uso muy común es el *Polietileno de alta densidad*, (PEAD) utilizado comúnmente en envases de aceites de vehículos, detergente, bolsas para supermercados, baldes para pinturas, tuberías para gas, drenaje y uso sanitario

En la Figura 7 se muestra una imagen de la clasificación de los plásticos reciclables, el grupo 7 pertenece a aquellos plásticos cuyo proceso de reciclaje es mucho más complejo y por eso recibe el nombre de “otros”.

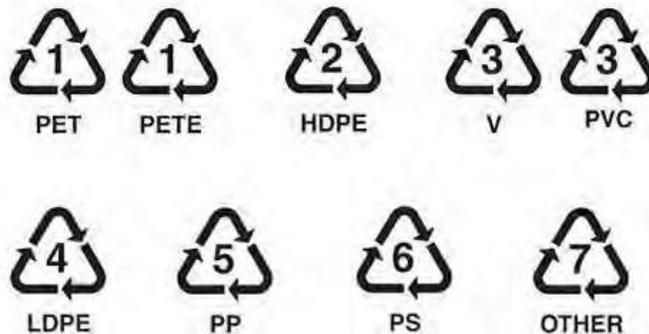


Figura 7. Clasificación de los plásticos reciclables.

6.1.1. Tereftalato de Polietileno (PET)

Es un termoplástico, o sea que es un material que a temperaturas relativamente altas se deforma hasta ser un líquido viscoso y al enfriarse se endurece en su punto de transición vítrea sin presentar un cambio químico, este polímero tiene un punto de transición vítrea de 60 a 80°C y un punto de fusión de 255 a 265°C, “un kilogramo de PET está compuesto por 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos de gas natural y 13% de aire.” El PET resulta de la combinación del ácido tereftálico y el etilenglicol. Entre los usos más generalizados de este polímero destaca la fabricación de preformas de botellas para la industria de bebidas gaseosas y agua mineral, así como para cosméticos, medicinas, aceites y frascos de todo tipo.

También se fabrican cintas de video y audio, bandejas para microondas, geotextiles y fibras para la industria textil. (Granta, 2018)

Frente a la demás familia de material plástico, el PET posee la característica de necesitar un tratamiento especial en su proceso de reciclaje, debido a las exposiciones térmicas en la vida útil del material, este logra reducir su viscosidad intrínseca pasando de 0,82 dl/g a 0,76 dl/g por lo que la integridad de este plástico es afectada negativamente, la empresa OHL Apparatebau & Verfahrenstechnik GmbH de Alemania desarrolla el proceso de reciclaje de PET Stehning para combatir este problema agregando aditivos (blanqueadores o abrillantadores ópticos o extensores de cadena para aumentar la viscosidad), las etapas del proceso que se utilizan son:

- Lavado y separación del desperdicio de PET.
- Separación de PET transparente y de color.
- Remoción de contaminantes como metales y PVC.
- Molienda, lavado y secado.
- Extrusión reactiva con aditivos y filtración de material fundido.
- Post-condensación de material reciclado. (Mexpolimeros, 2012)

6.1.2. Procesamiento de materiales plásticos

Gracias a las características de los materiales plásticos, estos pueden cambiar su forma y dimensiones aplicando calor y presión; entre estos procesos de transformación de plásticos se encuentra la extrusión, moldeo por inyección, soplado, calandrado, inmersión, rotomoldeo, compresión, termoformado, etc. Sin embargo, para el proceso de obtención de filamento que se desarrolla en este trabajo se centrará la mirada en el proceso de extrusión e inyección.

6.1.3. Proceso de triturado de plásticos

El proceso de triturado es uno de los mecanismos más comunes al momento de reciclar plásticos, consiste en desgarrar el material para obtener trozos más pequeños del mismo, este proceso proporciona un material más homogéneo; la razón por la que se recicla es que es un material con mucho volumen y poca densidad, en otras palabras, ocupa mucho y pesa muy poco, por lo que este proceso permite reducir su volumen para aprovecharse en otros mecanismos de transformación de material (Tritotutto, 2019)

La molienda se realiza dentro de un molino de cuchillas giratorias, que tienen como función triturar las botellas hasta convertirlas en hojuelas con dimensiones específicas, dichas cuchillas están unidas a unos porta cuchillas; los porta cuchillas están unidos a un eje rotatorio por medio de cuñas colocado sobre un par de chumaceras; en un extremo del eje está acoplado un volante de inercia, el cual tiene como función almacenar energía para moderar las fluctuaciones de la velocidad a la que gira el eje cuando se esté triturando el material, y por el otro extremo del eje está unida una polea que es parte del sistema de transmisión de potencia. (Medina, 2011)

Para determinar la capacidad del molino se debe tomar en cuenta la cantidad de plástico que se quiere triturar, la velocidad con la que el material será alimentado y cómo el material será transportado después de obtenido. Todos estos factores ayudan a determinar el tamaño apropiado de la trituradora, el sistema de alimentación, la cámara de molienda, la disposición del rotor y las cuchillas, la velocidad de giro del rotor, la potencia del motor, la configuración de la criba y el sistema de extracción del material molido.

Un árbol en los sistemas de triturado hace referencia a los ejes que poseen carga de cuchillas, así una trituradora de 4 árboles hace referencia a una trituradora que posee 4 ejes con juegos de cuchillas, en la Figura 8 se visualizan ejemplos de cuchillas de molinos tradicionales. Las cuchillas suelen ser nombradas como fresas dentro de los catálogos de las trituradoras. Es común que en los procesos de triturado se encuentre una criba o tamiz que filtra el paso de los trozos triturados de un tamaño deseado como lo muestra la Figura 9.



Figura 8. Cuchillas de molino convencionales. (Clevel, 2020)

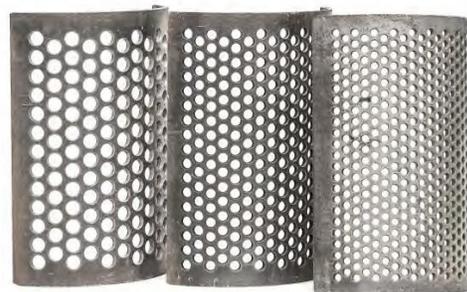


Figura 9. Tamiz para filtrar los trozos. (Clevel, 2020)

6.1.4. Proceso de extrusión de plásticos

Este es un proceso por el cual es posible obtener productos acabados o semiacabados en régimen continuo. Utilizándose equipos que funden, homogeneizan y fuerzan al polímero a pasar a través de matrices de forma definida asociados a equipos auxiliares como corte, conformación, etc. se pueden producir

tubos, películas, chapas, filamentos perfiles, frascos, bidones, etc. Este proceso puede ser también empleado para el revestimiento de sustratos como papel, aluminio y conductores eléctricos.

Existen varios tipos de extrusión, pero el más utilizado en el mercado es aquel que utiliza un husillo roscado para transportar y generar presión al material, forzando a pasar por la matriz dándole al producto su forma final. En la Figura 10 se muestra la estructura de una extrusora industrial.



Figura 10. Máquina extrusora battenfel (Ramos, 2019)

Las principales partes de un sistema de extrusión convencional son:

- Tolva de alimentación: Es por donde se introduce el material plástico en polvo o en pellets, ya sea en súper-sacos o por el sistema neumático.
- Dosificador: Sirve para controlar la alimentación del material hacia la extrusora y así evitar variaciones de amperaje muy fuertes por la demanda excesiva de torque para el movimiento del husillo.
- Tablero de control: Mediante el cual se controlan los parámetros de la extrusora, temperatura del barril, temperatura del cabezal, velocidad del motor principal, velocidad del dosificador y también sirve para monitorear parámetros como: temperatura de la masa, presión de fundido, así como verificar las alarmas que se presenten durante el proceso.
- Cañón o Barril: Es donde se alojan los tornillos (husillos) y donde se lleva a cabo la plastificación por métodos de calentamiento de material, es en esta zona donde se encuentran los actuadores de calor.
- Tornillos o husillos: Se encargan del transporte del material por medio de movimiento rotatorio y también acelera el proceso de plastificación.

6.2. MODELO MATEMÁTICO DEL FLUJO FUNDIDO EN EL EXTRUSOR

En el extremo del barril opuesto al troquel se localiza una tolva que contiene el material que se alimenta. Los pellets se alimentan por gravedad al tornillo rotatorio, cuya rosca mueve al material a lo largo del barril. Se utilizan calentadores eléctricos para fundir al inicio los pellets sólidos; después, la mezcla y el trabajo mecánico del material generará calor adicional, lo que mantiene fundido al material. El material se

hace avanzar a lo largo del barril hacia la abertura del troquel, por medio de la acción del tornillo extrusor, que gira a unas 60 rev/min. El tornillo tiene varias funciones y se divide en secciones que son: 1) sección de alimentación, en la que el material se mueve del puerto de la tolva y recibe precalentamiento; 2) sección de compresión, en la que el polímero se transforma para adquirir consistencia líquida, se extrae del fundido el aire atrapado entre los pellets y se comprime el material; y 3) sección de medición, en la que se homogeniza al fundido y se genera presión suficiente para bombearlo a través de la abertura del troquel.

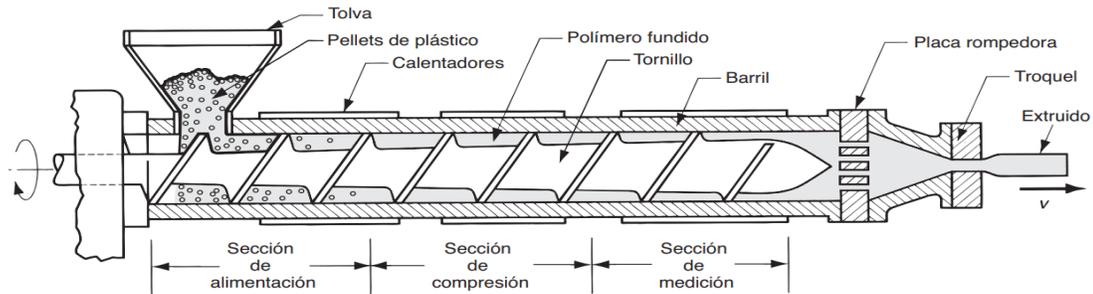


Figura 11. Componentes y características de un extrusor (de un solo tornillo) para plásticos y elastómeros. (Groover, 2007)

Conforme el tornillo gira dentro del barril, el polímero fundido se ve forzado a moverse hacia delante, en dirección del troquel; el sistema opera en forma muy parecida a un tornillo de Arquímedes. El mecanismo principal de transporte es el flujo por arrastre, que resulta de la fricción entre el líquido viscoso y las dos superficies opuestas que se mueven una respecto de la otra; 1) el barril estacionario y 2) el canal del tornillo giratorio. Dado que la placa móvil tiene una velocidad v , se puede pensar que la velocidad promedio del fluido es $v/2$, lo que da por resultado un gasto volumétrico de:

$$Q_d = 0.5v dw \quad \text{Ecuación 1.}$$

Donde:

Q_d = gasto volumétrico por arrastre, m^3/s ó (in^3/s) .

v = velocidad de la placa móvil, m/s ó (in/s) .

d = distancia que separa las dos placas, m ó (in) .

w = el ancho de las placas perpendicular a la dirección de la velocidad, m ó (in) .

6.3. TRANSFERENCIA DE CALOR

Desde la Termodinámica, se define un sistema como una parte del universo que se aísla para su estudio. Un Sistema Aislado es aquel que no intercambia ni masa ni energía con su entorno; un Sistema Cerrado es aquel que intercambia energía, pero

no materia con su ambiente; un Sistema Abierto es aquel que intercambia masa y energía con su medio. Por otro lado, un sistema puede estar en régimen o estado Estacionario cuando no presenta variaciones con el paso del tiempo. Por el contrario, un estado o régimen Transitorio, es aquel que varía o depende del tiempo.

El Calor es la energía que se transfiere de un cuerpo o sistema a otro, debido a una diferencia de temperatura entre los participantes. La ciencia que estudia la velocidad en que esa energía se transmite es la transferencia de Calor. El Joule (J) es la unidad del Sistema Internacional para medir el calor (q), mientras que la velocidad de transferencia de calor (\dot{q}), se cuantifica mediante el Watt (W). Existen 3 mecanismos de transferencia de calor; conducción, convección y radiación.

La Conducción es el mecanismo por el que partículas adyacentes intercambian energía a través de sus interacciones. En los gases y líquidos la conducción se debe a colisiones y a la difusión de moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos, la conducción es resultado de vibraciones moleculares y transporte de energía por medio de electrones libres.

La Convección es el modo en que la energía se transfiere por el movimiento de un fluido (gas o líquido). Dependiendo del tipo de movimiento del flujo, la convección se clasifica en convección Forzada, cuando el flujo es causado por medios externos, y convección Natural o Libre, cuando el flujo es resultado de fuerzas de empuje originadas por los cambios de densidad inducidas por el cambio de temperatura en el fluido.

La Radiación es la transferencia de energía mediante la emisión de ondas electromagnética (o fotones), como resultado de reconfiguración electrónica de átomos o moléculas. Dado el origen electromagnético, la radiación no requiere un medio para transferir calor.

En condiciones de estado estacionario y en ausencia de cualquier interacción de trabajo, la relación de conservación de energía se traduce a la expresión indicada en la Ecuación 1.

$$\dot{q} = \dot{m} * C_p * \Delta T$$

Donde:

\dot{m} = Gasto de masa o flujo masico expresado en Kg/s.

C_p = Calor especifico en J/(kgx·K). Expresa la cantidad de calor necesario para elevar en una unidad de temperatura.

ΔT = Diferencia de temperatura del material estudiado.

Control de lazo abierto

Son sistemas de control en los que la salida o resultado del proceso no tiene ningún efecto sobre la acción de control, es decir, en un sistema de control de lazo abierto la salida no se mide (no se retroalimenta) para compararla con lo que se desea obtener y así verificar que tanto se está desviando de ello.

La precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada. En la práctica, el control en lazo abierto solo se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y en la ausencia de perturbaciones externas o internas.

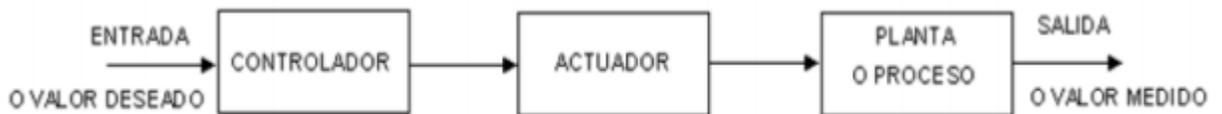


Figura 12. Diagrama de bloques de un sistema de lazo abierto. (Ogata, 2010)

6.4. SISTEMA DE CONTROL DE LAZO CERRADO

En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la propia señal de salida o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema.

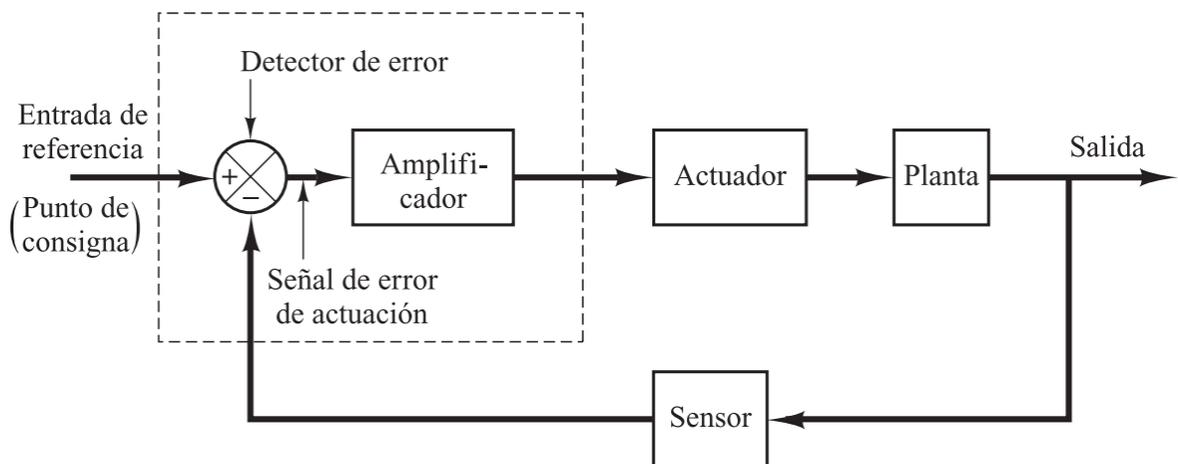


Figura 13. Diagrama de bloques de un sistema de lazo cerrado. (Ogata, 2010)

7. METODOLOGÍA

Se optó por implementar la metodología en V para el diseño en ingeniería y desarrollo de software debido que comprende las etapas necesarias (diseño y validación) para garantizar el funcionamiento del sistema desarrollado.

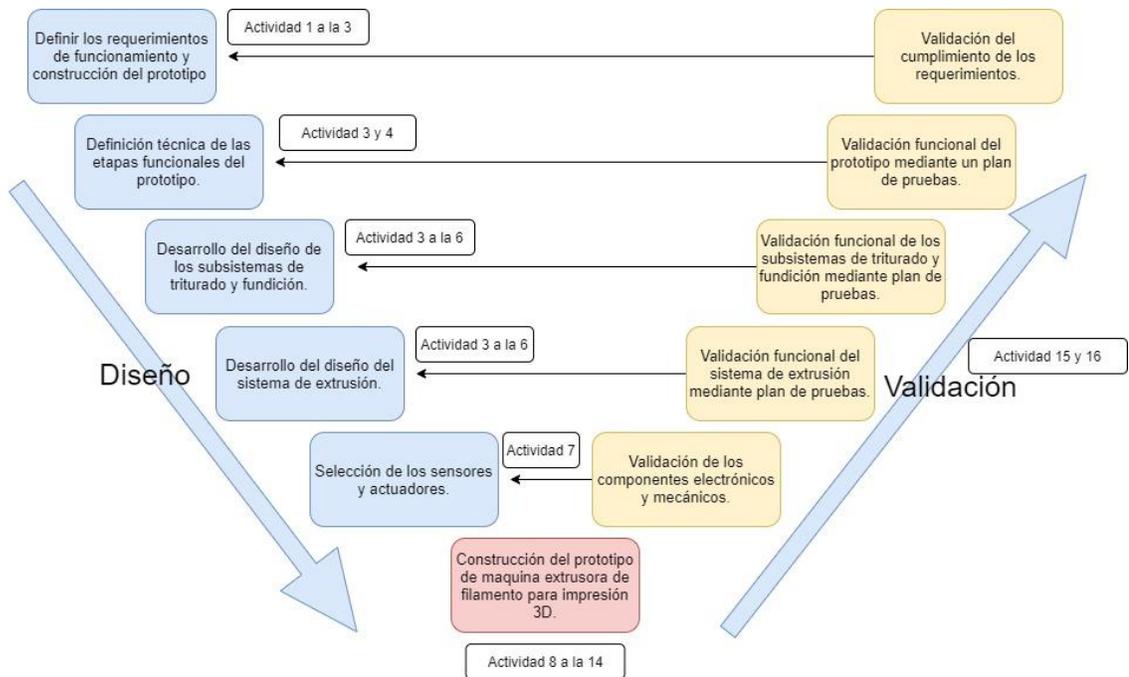


Figura 14. Metodología en V para el desarrollo del proyecto. Fuente: Los autores.

La metodología se basa en realizar actividades específicas que conllevan las etapas de diseño y validación para el desarrollo del proyecto. La parte izquierda de la V representa la corriente donde se definen las especificaciones del sistema. La parte derecha de la V representa la corriente donde se comprueba el sistema (contra las especificaciones definidas en la parte izquierda).

Para la definición técnica de las etapas funcionales se necesita una revisión de literatura y bibliografía sobre los estados de investigación y desarrollo de prototipos

y sistemas funcionales afines al proyecto. Esto con el fin de definir las condiciones mecánicas, eléctricas, de control y de materiales en las cuales el prototipo va ser desarrollado y su puesta en marcha. En ella se busca evaluar características del material reciclable y diferentes estrategias para cumplir tal fin, como resultado se obtendrá una vista previa de las diferentes etapas que van a componer el prototipo.

Se realizará una lluvia de ideas para identificar el modelo conceptual de los diseños de los subsistemas de triturado, fundición y extrusión se plasmará de manera clara los planos, circuitos y análisis acerca de las etapas que componen el prototipo y los diferentes componentes que lo componen. Aquí se definirán el modelo CAD y diagramas de los circuitos electrónicos y eléctricos del prototipo, desarrollado en softwares como SolidWorks y Proteus, respectivamente.

Para la selección de los sensores y actuadores se evaluarán las diferentes características como tamaño, rango de operación, sistema de medición, condiciones de trabajo, forma de alimentación, material y costo a través de estrategias de selección como matriz QFD. Las variables fundamentales a medir para este proyecto son: la temperatura del sistema de fundición, la velocidad de extrusión del filamento y el movimiento mecánico para el sistema de triturado. Luego de seleccionar y realizar el ajuste de diseño para incorporar los dispositivos seleccionados.

Para la construcción del prototipo, se tendrán en cuenta los análisis durante el desarrollo del modelo CAD para la elección de los materiales de las piezas que van a componer las etapas del prototipo. Se ensambla la estructura mecánica de los subsistemas y sobre estas se implementan los diferentes sensores y actuadores electromecánicos. Finalmente, el prototipo será puesto a preba mediante diferentes validaciones funcionales siguiendo un plan de pruebas definido previamente, hasta obtener la puesta a punta que otorguen los resultados esperados.

8. DESARROLLO

En este capítulo se obtiene el diseño mecánico de la máquina recicladora para la creación de filamentos, las etapas a desarrollar se encuentran en la siguiente figura.

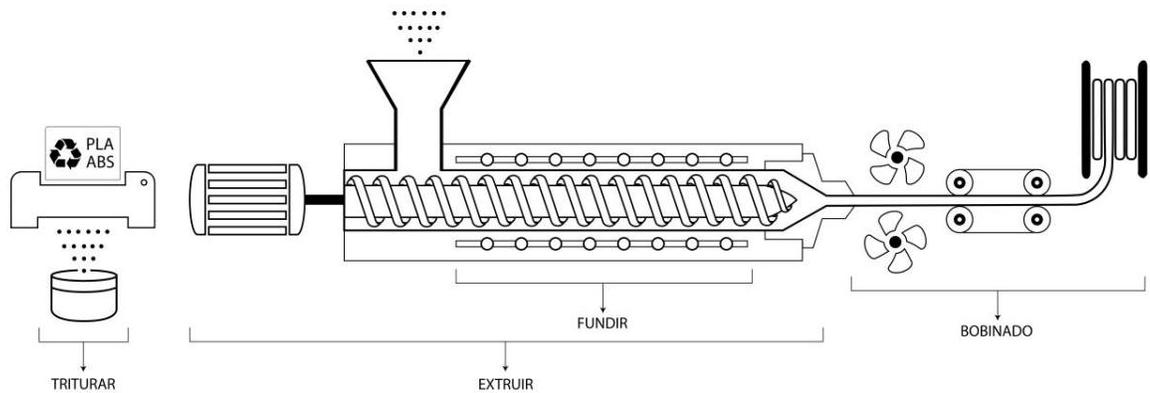


Figura 15. Bosquejo de los sistemas de la máquina.

8.1. SISTEMA DE TRITURADO

Este sistema es el encargado de transformar los elementos plásticos en pequeños trozos que puedan depositarse en el sistema de extrusión. Para la trituradora se usa como guía el diseño presentado por la compañía Precious Plastic.

El primer paso es calcular el torque y potencia necesario que debe poseer el motor a utilizar para el sistema, para hallar estos valores es necesario inicialmente definir la fuerza que ejercerán los materiales de corte (cuchillas de corte). En la Figura 16. se muestra la forma de las cuchillas y la fuerza crítica a la que estará sometida justo en la punta P, la distancia radial desde el punto de aplicación del torque M_0 y la fuerza es de 50 mm.

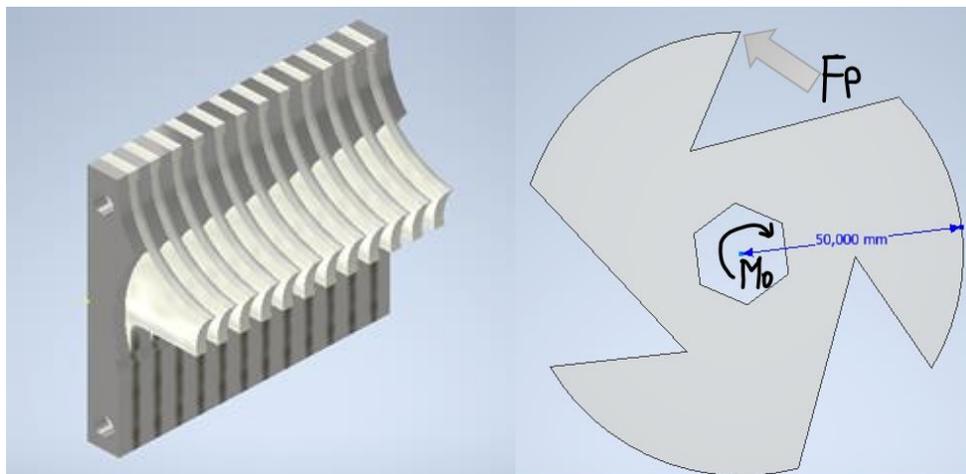


Figura 16. Diagrama de cuerpo libre de una cuchilla de trituración en el momento de corte.

Para poder lograr que la trituradora desgarre el material plástico es necesario que la fuerza de contacto entre la punta de cuchilla (F) y el área transversal (A) del objeto a romper sea igual o mayor al esfuerzo cortante (shear stress τ_{max}) del polímero en caso, el valor del esfuerzo cortante tiende a ser el 50% del valor de resistencia a la tracción (límite elástico). El valor de resistencia a la tracción se define con la ecuación $\sigma_{max} = F/A$ y es un valor único para cada material.

Para la ejecución del cálculo lo primero que se debe tener en cuenta es las dimensiones del objeto a triturar y su a la tracción y corte. Para ello se toma como modelo una botella de plástico de 500ml.



Figura 17. Botella PET 500ml.

Tomado de: <https://www.remsaplasticos.com/productos/botellas-pet/botella-pet-500ml-45>

Dimensiones de la botella:

- Capacidad: 500 ml
- Altura: 200 mm
- Diámetro: 115 mm
- Espesor: 0.5mm

8.2. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE CORTE.

Tabla 2. Valores de resistencia a la tracción y esfuerzo cortante.

| Material | PET | PP | PS | HDPE |
|----------------|--------|-----------|-----------|----------|
| σ_{max} | 50 MPa | 34,65 MPa | 35,05 MPa | 28,6 MPa |
| τ_{max} | 25 MPa | 17,33 MPa | 17,53 MPa | 14,3 MPa |

Tabla 3. Resistencia de corte de los polímeros

La trituradora se diseñará con el fin de procesar el material plástico, cuyas dimensiones no deberán superar 200mm de largo y 1mm de espesor.

El área del plástico a triturar se determina mediante la siguiente fórmula:

$$A = l \times a \times 10^{-2}(\text{cm}^2)$$

Donde:

$$A = \text{Área de la sección a cortar en } (\text{cm}^2)$$

$$l = \text{Longitud de la sección a cortar (mm)}$$

$$a = \text{ancho de la sección a cortar (mm)}$$

$$A = 200 \times 0.5 \times 10^{-2}(\text{cm}^2)$$

$$A = 1 (\text{cm}^2) = 100 (\text{mm})^2$$

Esta área corresponde a la máxima longitud y espesor a cizallar.

Para la ejecución de los cálculos se escoge el valor mayor de τ_{max} debido a que este sería el material que requiere de un mayor esfuerzo para corte, en este caso es el PET con un $\tau_{max} = 25 \text{ MPa}$. El valor del área transversal de corte se define a 100 mm^2 . De la ecuación de σ_{max} se despeja el valor de la fuerza F y se obtiene

$$F = A * \tau_{max}$$

$$F = (100 \text{ mm}) (25 \text{ Mpa}) = 2500 \text{ N}$$

El momento en un sistema es la multiplicación de la fuerza ejercida (F) por la distancia desde su punto de aplicación (r). La distancia radial en la cuchilla desde el punto de aplicación del momento y la fuerza es de 50 mm.

$$M = Fr \Rightarrow M = (2500 \text{ N})(50 \text{ mm}) = 125 \text{ Nm} = 92.1953 \text{ lb} * \text{ft}$$

Por lo que el torque o momento máximo requerido es de $92.1953 \text{ lb} * \text{ft}$.

Para el funcionamiento de la trituradora se desea una velocidad nominal de 45 RPM con el fin de que el impacto generado por la fuerza de corte no produzca un momento demasiado grande en las partículas y salgan con gran fuerza hacia la persona que opera el dispositivo.

Para hallar la potencia del motor se utiliza la siguiente ecuación que relaciona la velocidad y torque con la potencia.

$$\text{Potencia (hp)} = \frac{\text{Torque (libra - pie)} * \text{Velocidad motor (RPM)}}{5252}$$

El valor 5252 es una constante que representa la conversión de rpm a radianes por segundo.

$$Potencia (hp) = \frac{92.1953 \text{ lb/f} * 45 \text{ RPM}}{5252} = 0.78994 \text{ hp}$$

Definido esto el valor de potencia de salida del eje debe ser de 0.78994 hp, proporcionar una velocidad de 45 RPM y un torque de 92.1953 lb/f o 125 Nm.

Para calcular la potencia eléctrica requerida para el trabajo del dispositivo teniendo en cuenta el desgaste mecánico se utiliza la siguiente fórmula.

$$Pot_{electrica} = \frac{Pot_{consumida} * FS}{\eta_{fuente} \Pi \eta_{transmitida}}$$

Donde,

$Pot_{consumida}$, se refiere a la potencia calculada a la salida del eje, en este caso es de 0.78994 hp.

FS , el cual es un factor de servicio y se recomienda $FS > 1$, se utilizará un valor de 1.5.

η_{fuente} es la eficiencia de la fuente, definiremos al 98%.

$\eta_{transmitida}$ es la eficiencia de transmisión y depende del tipo de elemento del sistema. Para engranajes es de 90% y para ejes es de 99% debido a la fricción en los cojinetes y elasticidad torsional.

$$Pot_{electrica} = \frac{0.78994 \text{ hp} * 1,5}{0.98 * (0,90 * 0,99)} = 1.3570 \text{ hp} = 1.011 \text{ kW}$$

Por lo que para un funcionamiento más confiable se debe recurrir a un motor cercano a los 1.011 kW que supere el desgaste mecánico generado por las cajas reductoras y la transmisión por eje.

Selección de diseño para Máquina trituradora de botellas PET.

Para el diseño de la maquina trituradora se seleccionaron los dos diseños más usados en la industria, el primero consiste en una maquina trituradora de doble eje y relación por engranaje, el segundo diseño consiste en una trituradora de un solo eje central con cuchillas fijas laterales que permitan el corte de las botellas PET.

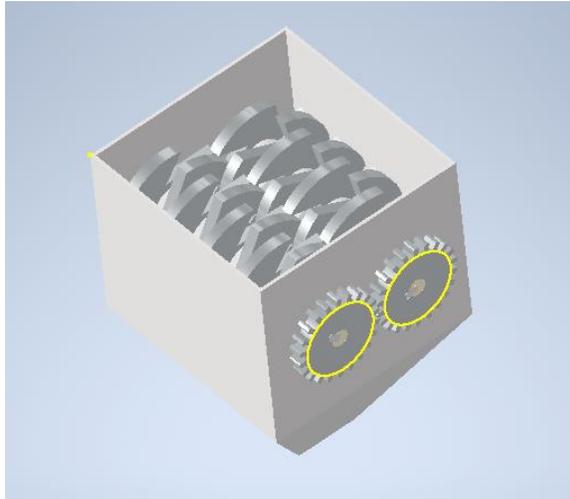


Figura 18. Máquina trituradora de doble eje. Fuente: Los autores.

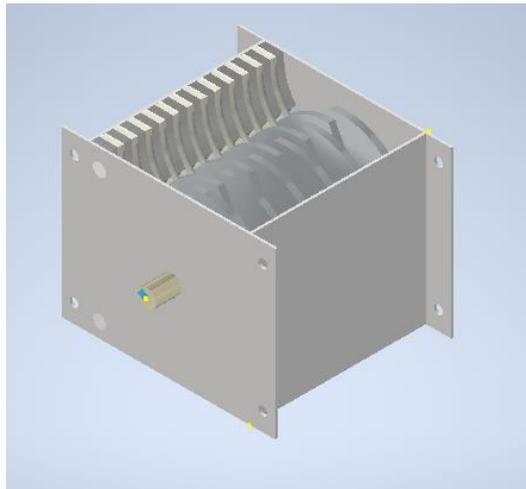


Figura 19. Máquina trituradora de un eje con cuchillas fijas. Fuente: Los autores.

En la trituradora de un solo eje, se alimenta mediante la tolva y mediante el movimiento se desplaza el material hacia el eje de corte para garantizar que el material se triture de manera eficiente por medio de las cuchillas de corte giratorias. El material se tritura repetidamente hasta que los fragmentos son lo suficientemente pequeños como para pasar el rendimiento de la malla del tamiz.

En una trituradora de doble eje, los dos ejes de las cuchillas de corte atrapan el material, lo muerden hasta que pasa por completo en la cámara de descarga. Los fragmentos que son cortados por este proceso resultan ser de un tamaño más aleatorio.

Se decidió que el diseño de la maquina trituradora de un solo eje y cuchillas fijas laterales es el óptimo, debido a que al contar con un solo eje se evitan posibles fallas que este pueda presentar al tener contacto, también al contar con un diseño más simple se reducen costos en la construcción de piezas como un segundo eje y la construcción de engranajes. Este Diseño también presenta un producto final hojuelas más pequeñas y uniformes.

8.3. DISEÑO EN INVENTOR 2022 DEL SISTEMA DE TRITURADO.

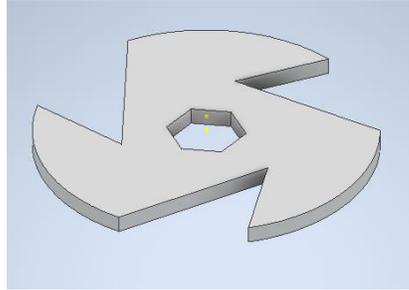


Figura 20. Cuchilla de corte para molino. Fuente: Los autores.



Figura 21. Eje de trituradora. Fuente: Los autores.

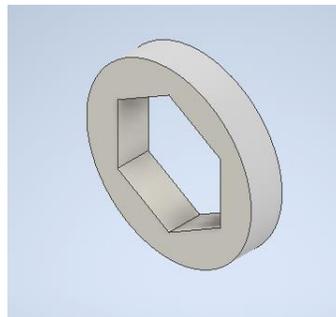


Figura 22. Separador de cuchillas. Fuente: Los autores.

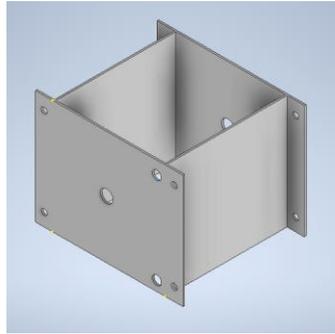


Figura 23. Caja de trituradora. Fuente: Los autores.

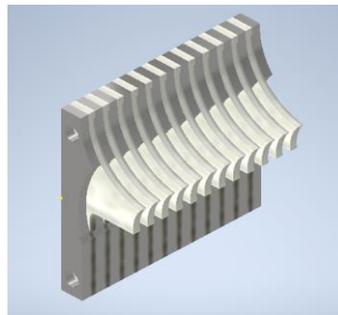


Figura 24. Cuchillas laterales de corte.

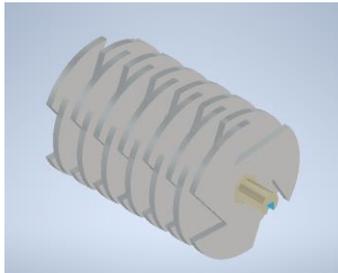


Figura 25. Ensamble de eje para molino de corte.

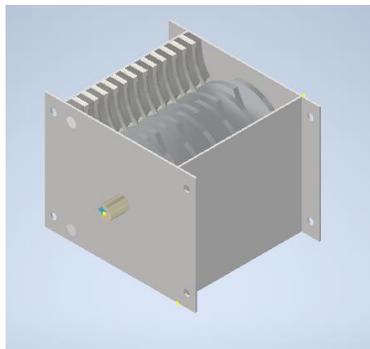


Figura 26. Ensamble completo de máquina trituradora. Fuente: Los autores.

Las cuchillas trituradoras móviles son las encargadas de girar y moler el material, presionándolo contra las cuchillas fijas. El material de ellas debe ser acero con una buena resistencia al desgaste, larga vida útil y una gran dureza. Para ello se utiliza un acero AISI 304.

8.4. SISTEMA DE FUNDICIÓN

El extrusor es una máquina diseñada para empujar un material a través de una boquilla (die). En el contexto de este trabajo (extrusión de polímeros), se refiere a un aparato que funde y transporta un material plástico para hacerlo pasar a través de una boquilla, para producir un producto de sección constante. Existen diferentes tipos de mecanismos en las extrusoras capaces de realizar este proceso, entre ellos se cuenta: de pistón y de uno o varios husillos, cada una con sus ventajas y desventajas. En el caso de este trabajo, se referirá a una extrusora de un solo husillo, la cual es una extrusora continua y directa.

En el proceso de extrusión de plástico, la unidad de extrusión se alimenta con material plástico granulado (pellets), el cual es transformado en un producto extruido al pasar por las tres secciones en las que se divide el husillo, como se puede ver en la. La primera zona, es la llamada sección de alimentación en donde se recibe el material desde la tolva y se le aplica un precalentamiento, para ser transportado hacia la siguiente zona. La segunda sección, es conocida como la zona de compresión, en la cual el polímero se transforma para adquirir consistencia líquida (fusión del material), se extrae el aire comprimido entre los pellets y se comprime el material. La última zona corresponde a la sección de medición, donde se homogeniza el material fundido y se genera presión para bombearlo hacia la boquilla de conformado.

8.5. PRODUCCIÓN DEL TORNILLO EXTRUSOR

La producción expresada como flujo volumétrico, es el resultado de tres diferentes flujos dentro del canal. El primero, el flujo de arrastre (α), es el provocado por el giro del tornillo. El segundo, el flujo de presión (β), es el componente que se opone al flujo en el sistema. Por último, el flujo de filtración (γ), el cual reduce la producción debido a pérdidas de material entre la holgura del husillo-cilindro. Por lo tanto, la producción en la zona de medición es la equivalente a la producción total del tornillo. Según Savgorodny, el flujo volumétrico unitario se puede determinar por:

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

Donde

α : Volumen unitario del Flujo de arrastre [mm³]

β : Volumen unitario del Flujo de presión [mm³]

γ : Volumen unitario del Flujo de filtración [mm³]

K : Constante total de la forma geométrica del cabezal [mm³]

η : RPM del husillo [rev/min]

ρ : Densidad del material [Kg/mm³]

Cada uno de estos parámetros están definidos por su propia ecuación, que relaciona las dimensiones del husillo con las variables de la máquina. A continuación, se calcula cada una de estas variables.

• Volumen unitario flujo de arrastre (α)

$$\alpha = \left(\frac{\pi * m * D * h1 * (t/m - e) * \cos^2 \varphi}{2} \right) [mm^3]$$

Donde

m : Número de canales del husillo [-]

D : Diámetro del husillo [mm]

$h1$: Profundidad del canal en la zona de alimentación [mm]

t : Paso del husillo [mm] e : Ancho del filete [mm]

φ : Ángulo de la Hélice [°]

Reemplazando, se obtiene:

$$\alpha = \left(\frac{\pi * 1 * 16 * 3,2 * (16/1 - 1,6) * \cos^2 (17,6)}{2} \right) [mm^3]$$

$$\alpha = 1051,5 [mm^3]$$

Volumen unitario flujo de presión (β)

$$\beta = \left(\frac{m * h1^3 * (t/m - e) * \sen \varphi * \cos^2 \varphi}{12 * L} \right)$$

Donde:

L : Longitud del husillo [mm]

Reemplazando, se obtiene:

$$\beta = \left(\frac{1 * 3,2^3 * (16/1 - 1,6) * \sen (17,6) * \cos^2 (17,6)}{12 * 320} \right)$$

$$\beta = 0,0355 [mm^3]$$

• Constante total de la forma geométrica del cabezal

Esta constante representa el coeficiente de la forma geométrica del cabezal, por lo que dependerá de las diferentes configuraciones en él. Las geometrías presentes en el cabezal serán un canal cónico en la entrada del cabezal y un canal cilíndrico en la boquilla, para dar forma al material a extruir. Se desarrollará esta fórmula para el diámetro de la boquilla (1,75 [mm])

o Canal Cónico

$$K1 = \left(\frac{3 * \pi * do^3 * d1^3}{128 * L_{canal} * (do^2 + do * d1 + d1^2)} \right)$$

Donde

do : Diámetro de entrada del material en un canal cónico [mm]

$d1$: Diámetro de salida del material en un canal cónico [mm]

Para el caso, $do = 16$ [mm] y $d1 = 1,75$ [mm]

$$K1 = \left(\frac{3 * \pi * 16^3 * 1.75^3}{128 * 10 * (16^2 + 16 * 1.75 + 1.75^2)} \right)$$

$$K1 = 0,563[mm^3]$$

Canal Cilíndrico

$$K2 = \frac{\pi * d^4}{128 * L_{canal}}$$

Donde

d : Diámetro del canal cilíndrico [mm]

Para el caso, $d = 1,75$ [mm]

$$K2 = \frac{\pi * 1.75^4}{128 * 10}$$

$$K2 = 0,023[mm^3]$$

La constante común del cabezal se determina como la suma de las resistencias experimentadas en las zonas de trabajo, la cual se presenta a continuación:

$$K = \frac{1}{\sum 1/K1 + \sum 1/K2 + \dots + \sum 1/Ki * 10}$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{0.563} + \frac{1}{0.023}}$$

$$K = 0,0221[mm^3]$$

Con estos resultados, se puede obtener el flujo volumétrico del husillo para cada uno de los casos. Las RPM del husillo se variarán para obtener distintos flujos volumétricos y seleccionar el adecuado de acuerdo con las necesidades del cliente.

Para obtener el flujo volumétrico en Kg/h, se hará la conversión necesaria según la densidad del material.

$$Q = \left(\frac{1051,5 * 0,0221}{0,0221 + 0,0355} \right) \eta * 0.000138$$

Se realiza una tabla comparativa del flujo volumétrico con diferentes velocidades de extrusión, teniendo en cuenta la densidad del PLA de 1.38 g/cm³.

Tabla 3. Flujo volumétrico a diferentes RPM

| Plástico PLA-Boquilla de 1.75mm | |
|--|---------------------------------|
| RPM | FLUJO VOLUMETRICO [Kg/h] |
| 5 | 0.27 |
| 8 | 0.4 |
| 12 | 0.6 |
| 15 | 0.75 |

Tabla 4. Flujo volumétrico del extrusor

Potencia Requerida La potencia de accionamiento del husillo es la necesaria para girar el husillo a la velocidad requerida para producir el material extruido. Esta dependerá de la potencia necesaria para desplazar el material y la energía consumida por la holgura del cilindro, la cual queda expresada por:

$$N = \left(\frac{\pi^3 * D^3 * \eta^2}{h_1} \right) * L * \mu + \frac{(\alpha * \Delta P)}{\cos^2(\varphi)} + \left(\frac{\pi^2 * D^2 * \eta^2 * e}{\delta * \tan(\varphi)} \right) * L * \mu [W]$$

Donde

η : Revoluciones del husillo [rev/s]

D : Diámetro del husillo [m]

L : Longitud del husillo [m]

μ : Viscosidad efectiva del material [Pas]

h_1 : Profundidad del canal en la zona de alimentación

$[\text{m}] \alpha$: Volumen unitario del Flujo de arrastre $[\text{m}^3]$

ΔP : Diferencia de presiones en el husillo $[\text{Pa}]$

φ : Ángulo de la Hélice $[\text{°}]$

e : Ancho del filete $[\text{m}]$

δ : Holgura del husillo/cilindro $[\text{m}]$

Se utilizará la viscosidad efectiva de mayor magnitud en el husillo (Tabla 18 y Tabla 19) para obtener la potencia máxima requerida, y se utilizará la presión de operación del husillo. Por lo tanto, se obtiene:

$$N = \left(\frac{\pi^3 * (0.016)^3 * \frac{10^2}{60}}{0.0032} \right) * 0.75 * 2100$$
$$+ \frac{((1051,57 * 10^{-9}) * (13443990 - 101325))}{\cos^2(17,6)}$$
$$+ \left(\frac{\pi^2 * (0.016)^2 * \frac{10^2}{60} * 0.006}{0,00008 * \tan(17,6)} \right) * 0.75 * 2100$$
$$N = 16,4 [W]$$

8.6. DISEÑO EN INVENTOR 2022 DEL SISTEMA DE FUNDICIÓN.



Figura 27. Tornillo sin fin tipo barco. Fuente: Los autores.

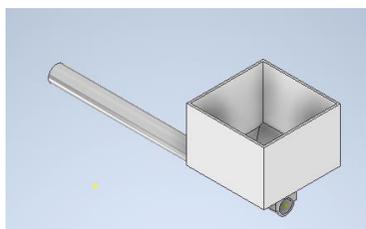


Figura 28. *Extrusora. Fuente: Los autores.*

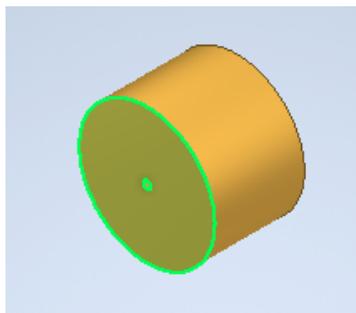


Figura 29. *Punta de Extrusor. Fuente: Los autores.*

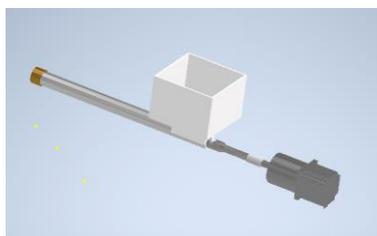


Figura 30. *Ensamble extrusor. Fuente: Los autores.*

9. SISTEMA DE CALOR

Para calcular la potencia necesaria de la banda, se debe tener en cuenta la velocidad de extrusión, la cual va a depender de la velocidad de giro del husillo y el diámetro de la boquilla de extrusión. Utilizando las velocidades de extrusión de la boquilla de 1.75mm y la sección transversal de ella y el cilindro, se calculó la velocidad al interior del cilindro.

Para ello se utilizó:

$$A_1V_1 = A_2V_2$$

Donde

A_1 : Área de la sección transversal de la boquilla [mm²]

V_1 : Velocidad del flujo en la boquilla [m/s]

A_2 : Área de la sección transversal del cilindro [mm²]

V_2 : Velocidad del flujo en el cilindro [m/s]

Por lo tanto, se obtuvo:

$$V_2 = 3.27 \times 10^{-10} \text{ [m/s]}$$

Usando la velocidad dentro del cilindro, se calculó el flujo masico de material dentro del cilindro utilizando:

$$\dot{m} = \rho \times A_{cilindro} \times V_{cilindro}$$

Donde:

ρ : Densidad del material a trabajar en kg/m³

$A_{cilindro}$: Area de la sección transversal del cilindro en mm²

$V_{cilindro}$: Velocidad del flujo en el cilindro en m/s

Así se obtiene que con una boquilla:

$$\dot{m} = 1380 \times 283.385 \times 3.27 \times 10^{-10}$$

$$\dot{m} = 0.00012 \text{ Kg/s}$$

Ahora para el cálculo de la potencia eléctrica que debe entregar el calentador, se iguala a la requerida para fundir la mezcla (trabajo) más las pérdidas que existen en el ambiente (convección y radiación).

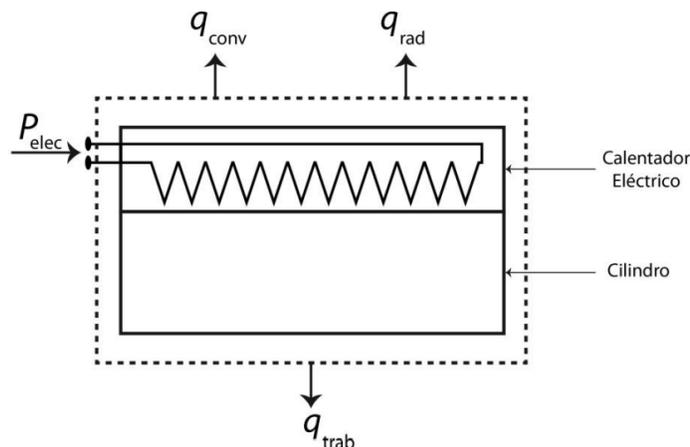


Figura 31. Esquema del sistema de calefacción.

Para encontrar la potencia necesaria que debe entregar la banda, se utiliza:

$$q_{elec} = q_{trabajo} + (q_{conv} + q_{rad}) = q_{trabajo} + q_{perdidas}$$

Donde q_{elec} es la potencia que entrega el calentador eléctrico [W]

q_{conv} Potencia perdida hacia el ambiente mediante convección [W]

q_{rad} Potencia perdida hacia el ambiente mediante radiación [W]

$q_{trabajo}$ Potencia necesaria para llevar la mezcla a la temperatura de trabajo [W]

$q_{perdidas}$ Potencia perdida hacia el ambiente [W]

Para calcular la potencia de trabajo, es necesario conocer las temperaturas de trabajo la temperatura de trabajo para el PET será de 260°C con una temperatura ambiente de 20°C.

Cabe destacar que los polímeros trabajados son amorfos, por lo tanto, no presentan una zona de calor latente de fusión para llevar a cabo esta fase, por lo que no será necesario energía adicional para el cambio de fase.

Con estos datos, se utiliza la siguiente fórmula para calcular el calor de trabajo

$$q_{trabajo} = \dot{m} * C_p * (T_m - T_i)$$

Donde

\dot{m} : Flujo másico de material [Kg/s]

C_p : Calor específico del material [J/Kg°C]

T_m : Temperatura de la mezcla [°C]

T_i : Temperatura ambiente [°C]

Por lo tanto, el calor necesario para llevar la mezcla a la temperatura de trabajo será:

$$q_{PET} = 0.00012 * 1300 * (260 - 20)$$

$$q_{PET} = 37.44 \text{ Watts}$$

Para calcular la potencia perdida al ambiente, es necesario calcular la resistencia térmica del sistema. Esta resistencia dependerá del intercambio de calor del cilindro con el ambiente: a través de la convección y la radiación. Para ello, se utilizan las siguientes fórmulas:

$$R_{conv} = \frac{1}{h * A_s}$$

Donde:

h : Coeficiente de transferencia de calor en convección natural [W/m²°C]

A_s : Área de la superficie expuesta a convección [m²]

$$R_{rad} = \frac{1}{A * \epsilon * \sigma * (T_s^2 + T_i^2) * (T_s + T_i)}$$

Donde

| | |
|--------------|--|
| A_s : | Área de la superficie expuesta a radiación [m ²] |
| ϵ : | Emisividad del material (0,27 para el AISI 316) [-] |
| σ : | Constante de Stefan-Boltzmann [W/m ² k ⁴] |
| T_s : | Temperatura absoluta de la superficie [°K] |
| T_{sur} : | Temperatura Absoluta del ambiente [°K] |

En esta ocasión el sistema calefactor estará cubierto por una capa de fibra de cerámica, lo que permite que la pérdida de energía calórica por medio del ambiente sea casi nula.



Figura 32. Resistencia eléctrica tipo tubular.

La posible existencia de un espesor de aislamiento óptimo para sistemas radiales lo sugiere la presencia de efectos que compiten asociados con un aumento en este espesor. En particular, aunque la resistencia de conducción aumenta al agregar un aislante, la resistencia de convección disminuye debido al aumento del área de la superficie exterior. Por ello puede existir un espesor de aislamiento que minimice la pérdida de calor al maximizar la resistencia total a la transferencia de calor. (Incropera, 1999)

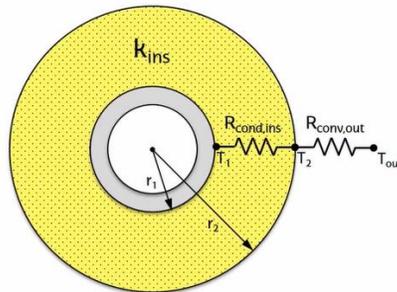


Figura 33. Diagrama de resistencias térmicas.

Para el material de aislamiento se seleccionó la fibra de cerámica.



Figura 34. Fibra de cerámica.

Teniendo en cuenta que tenemos una fuente de calor constante y que el calor necesario para el proceso de fundición es de 37.44 W. Según CEC la conductividad térmica del acero es igual a $17 \frac{W}{m \cdot K}$ y la de la fibra de cerámica es $0.08 \frac{W}{m \cdot K}$, se tiene que:

$$\text{Largo de tubería}(L) = 0.18m$$

$$\text{Diámetro interno} = 0.015m$$

$$\text{Diámetro externo} = 0.0213m$$

$$r_1 = 0.0075m$$

$$r_2 = 0.01065m$$

$$Q = 37.44 W$$

$$T_i = 240^\circ C = 513.15^\circ K$$

$$T_e = 25^\circ C = 298.15^\circ K$$

$$K_{ais} = 0.08 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$K_T = 17 \frac{W}{m \cdot K}$$

Ahora:

$$Q = \frac{2 * L * \pi * (T_i - T_e)}{\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{K_T} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{K_{ais}}}$$

Donde r_3 representa el radio externo hasta el aislante, se tiene que:

$$37.44 \frac{\ln \frac{0.01065}{0.0075}}{17} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{0.08} = 2 * 0.18 * \pi * (513.15 - 298.15)$$

$$\ln \frac{r_3}{r_2} = 6.46938 * 0.08$$

$$r_3 = r_2 * e^{0.51755}$$

$$r_3 = 0.01786m$$

Por lo tanto, el espesor del aislante para mantener la temperatura de 240°C con la fuente constante de calor va a ser igual a un mínimo de:

$$\begin{aligned} \text{Espesor} &= 0.01786 - 0.01065 \\ \text{Espesor} &= 0.00721\text{m} = 7.21\text{mm} \end{aligned}$$

10. EMOBINADO

El PET tiene un punto de transición vítrea entre 60 a 80°C y un punto de fusión de 255 a 265°C. El sistema Puller es el encargado de tirar el filamento para que el material salga de la boquilla del extrusor a una velocidad constante. Este sistema es importante para la calidad del filamento extruido, ya que la estabilidad del diámetro del filamento depende de gran medida de la velocidad con que se extrae el filamento y que no se produzcan movimientos oscilatorios mediante su funcionamiento. Debido a lo anterior, es necesario que el sistema pueda tirar el filamento a la velocidad de salida desde la boquilla, como un requerimiento mínimo para mantener la calidad del filamento. Es necesario regular la velocidad para el diámetro del filamento, por lo que la velocidad del motor debe ser regulable.

Independientemente del tipo de embobinado a utilizar, ya sea por contacto o central, se observa el siguiente comportamiento en la bobina.

La velocidad tangencial de la bobina se puede expresar como:

$$V = \omega \cdot r$$

Considerando que la velocidad tangencial o de suministro del filamento es constante, y que es de interés conocer la velocidad angular para elegir el motor de la bobina, teniendo que:

$$\omega = V_{\text{constante}} / r$$

Como se muestra en la Figura la velocidad va cambiando con respecto al radio de la bobina en cada capa, teniendo que:

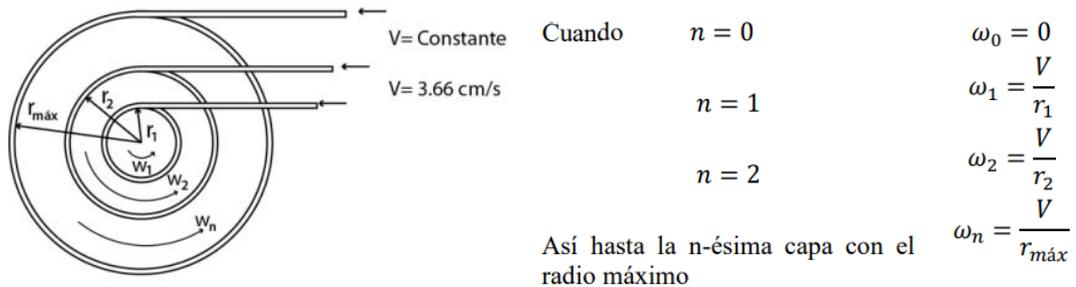


Figura 35. Sistema de bobinado

Particularmente, en un embobinado central, el eje motriz y el eje de la bobina son los mismos, por lo que se tiene que ir ajustando la velocidad angular para que el filamento sea enrollado uniformemente. Para ello es necesario el control de la velocidad angular del motor, del cual se realiza el análisis de comportamiento para un correcto embobinado.

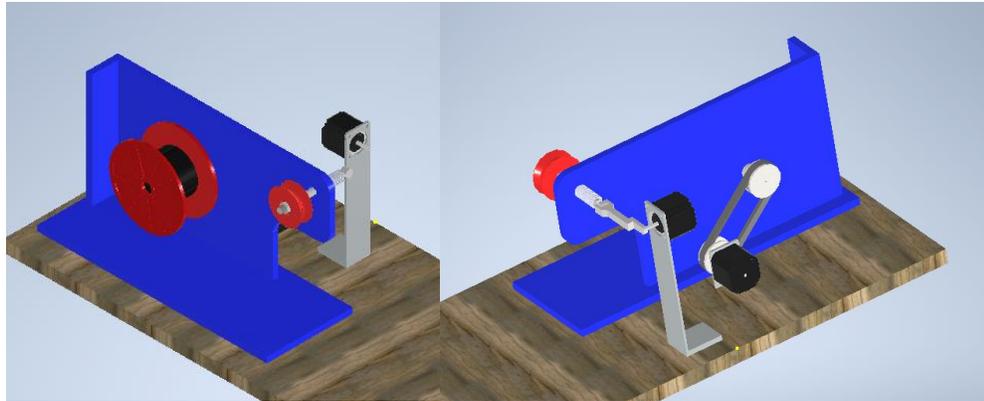


Figura 36. Sistema de embobinado, vista isométrica. Fuente: Los autores.

Finalmente si juntamos todos los diseños de las diferentes etapas del prototipo obtenemos como resultado el siguiente modelo.

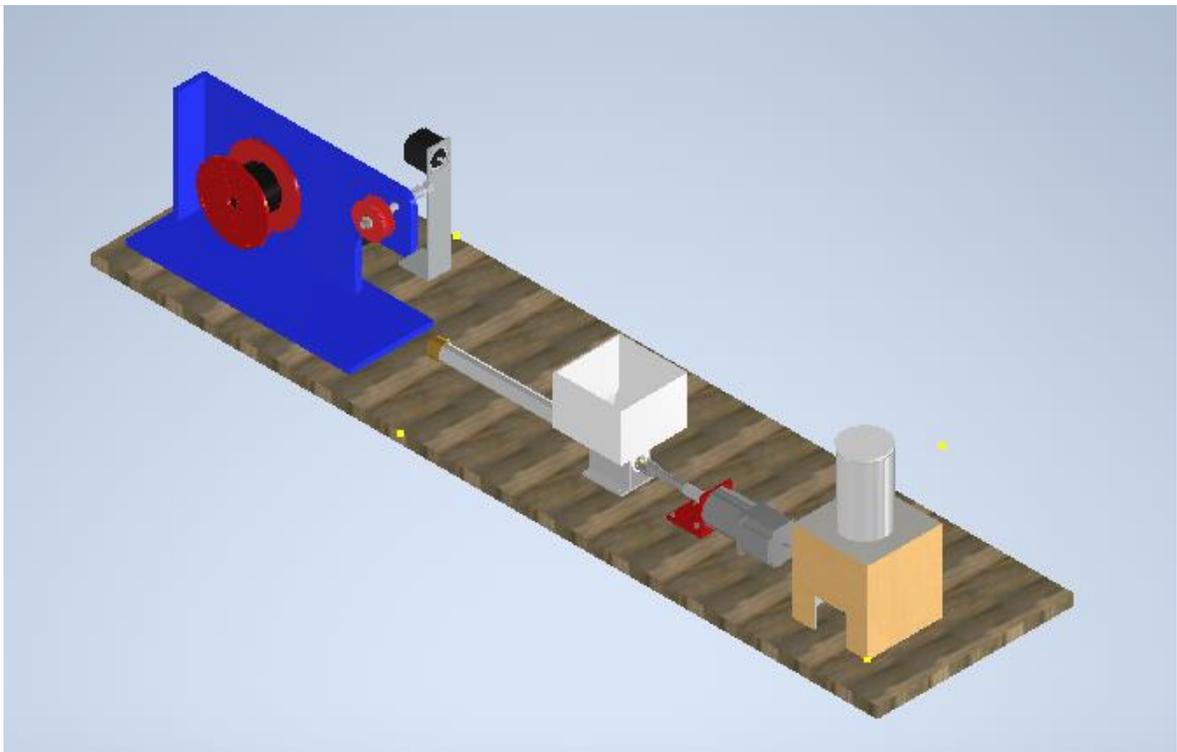


Figura 37. Vista isométrica del ensamble final. Fuente: Los autores

11. SELECCIÓN DE ACTUADORES Y SENSORES PARA EL SISTEMA CALEFACTOR.

Para esta sección se hizo el despliegue de la matriz QFD para seleccionar los actuadores y sensores a implementar teniendo en cuenta características intrínsecas de los mismos que son evaluadas con un nivel de importancia respectivamente para así obtener al mejor candidato que cumpla con las condiciones deseadas para su posterior implementación.

| Row # | Max Relationship Value in Row | Relative Weight | Weight / Importance | Demedanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats") | Column # | | | Legend |
|---|-------------------------------|-----------------|---------------------|---|---------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------------|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | |
| Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x) | | | | | | | | |
| Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows") | | | | | Resistencia de abrazadera | Resistencia tipo calafucho | Resistencia tipo tubular | |
| 1 | 9 | 7,1 | 3,0 | Peso del sistema | ○ | ○ | ○ | ○ Strong Relationship 9 |
| 2 | 9 | 7,1 | 3,0 | Potencia eléctrica consumida | ○ | ○ | ○ | ○ Moderate Relationship 3 |
| 3 | 9 | 14,3 | 6,0 | Tiempo y requerimientos de instalación | ○ | ○ | ○ | ▲ Weak Relationship 1 |
| 4 | 3 | 14,3 | 6,0 | Dimensiones del producto | ○ | ○ | ○ | ++ Strong Positive Correlation |
| 5 | 9 | 21,4 | 9,0 | Rango de temperatura de trabajo | ○ | ○ | ○ | + Positive Correlation |
| 6 | 9 | 14,3 | 6,0 | Eficiencia en superficies cilíndricas | ○ | ○ | ○ | - Negative Correlation |
| 7 | 3 | 21,4 | 9,0 | Costo | ○ | ○ | ▲ | ▼ Strong Negative Correlation |
| 8 | | | | | | | | ▼ Objective Is To Minimize |
| 9 | | | | | | | | ▲ Objective Is To Maximize |
| 10 | | | | | | | | X Objective Is To Hit Target |
| Target or Limit Value | | | | | | | | |
| Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult) | | | | | | | | |
| Max Relationship Value in Column | | | | | 9 | 9 | 9 | |
| Weight / Importance | | | | | 685,7 | 514,3 | 557,1 | |
| Relative Weight | | | | | 39,0 | 29,3 | 31,7 | |

Figura 38. Diagrama QFD para la selección del sistema calefactor.

En este apartado se obtuvo como resultado que la resistencia tipo abrazadera y la de tipo lobular cumplen las condiciones de operación para ser seleccionadas. Se selecciono la de tipo lobular por su mayor adaptabilidad a la forma del barril y su precio más económico comparado con la de abrazadera.

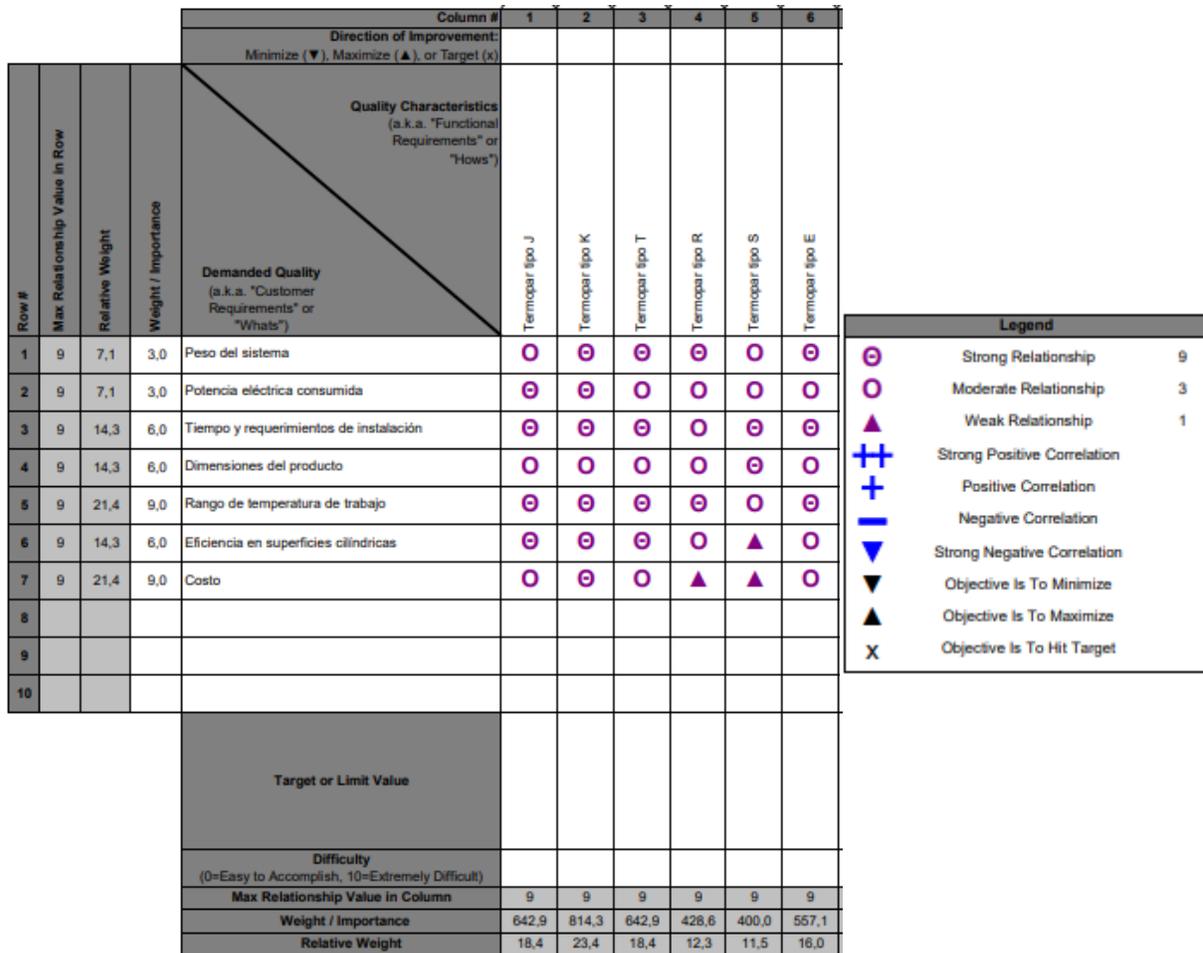


Figura 39. Diagrama QFD para la selección del sensor de temperatura

Se obtuvo como resultado que el sensor de temperatura a utilizar sería la termocupla tipo k, junto con el controlador y la resistencia formarían el lazo cerrado que permitirá el control de temperatura satisfactoriamente.

Diseñada la planta se procede a seleccionar el controlador y a instalar los dispositivos en la planta para el control de temperatura, factor clave para el proceso de extrusión. Para ello se implementó el controlador EBCHQ 58008.



Figura 40. Control de Temperatura Digital EBCHQ 48X48mm 58008.

Acoplado con una termocupla tipo K previamente seleccionada y un dimmer analógico para el control de la potencia se obtuvieron los siguientes resultados de construcción de planta instrumentada.

12. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

12.1. SISTEMA DE TRITURADO

El desarrollo de este sistema se basó principalmente en el modelo estudiado en el desarrollo del proyecto teniendo como base el diseño de Precious Plastic. Debido a complicaciones en la etapa de construcción de la máquina cortando las piezas que conforman el sistema se decidió recurrir a otro modelo más asequible que cumpla con la misma función para el desarrollo de este proyecto. Como futuras mejoras se tendrá en cuenta el modelo de la máquina estudiado y diseñado debido a que tiene ventajas de eficiencia, poder y autonomía, además de ser menos ruidoso durante el proceso del triturado del plástico.

La técnica que se usó para el corte de las piezas que conforman el ensamblaje de la máquina de triturado fue oxicorte, con la cual no se obtuvo resultados favorables para el acabado necesario de las piezas con el fin de que puedan triturar el plástico eficientemente.



Figura 41. Oxicorte para la creación de la máquina trituradora.

La imagen anterior es una de las cuchillas que se obtuvo con oxicorte para la construcción de la máquina de triturado, como se puede observar el filo de la cuchilla es casi nulo y la precisión del corte comprometió la integridad del material en sus acabados. No se pueden utilizar estas piezas con este acabado debido a que la precisión de las cuchillas debe ser milimétrica con el fin de realizar el triturado de manera eficiente, los resultados obtenidos no fueron los esperados. Se exploraron técnicas como corte a laser, sin embargo, debido a su gran costo de producción se prescindió de la idea y se dejará en este trabajo como futura mejora para la máquina.

Después de concluir que era inviable para el desarrollo de este proyecto la construcción de la maquina diseñada para la etapa de trituración, se optó por un modelo diferente, el cual cumple con la misma función.

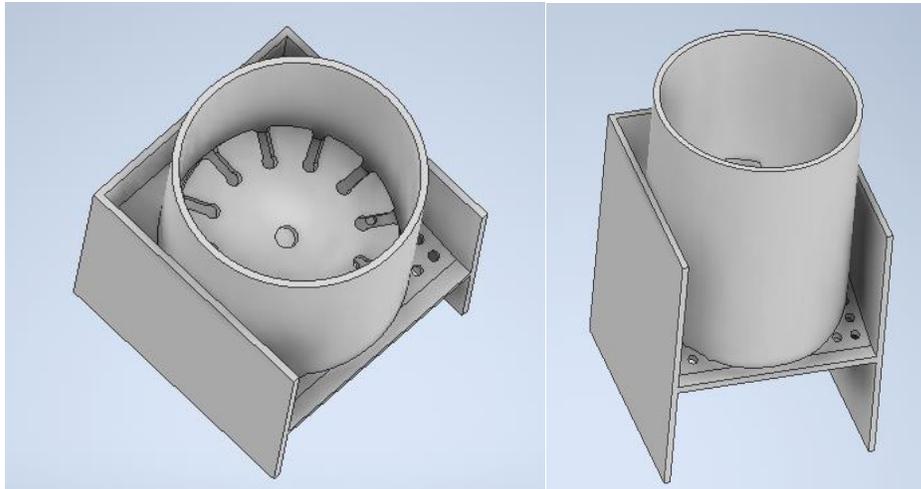


Figura 42. Modelo CAD del nuevo sistema de triturado.

Este modelo consiste en un cilindro en el cual se introduce el material previamente cortado en trazos mas pequeños que una botella completa. Este ayuda a que las cuchillas puedan procesar el corte que luego será tamizado con una placa con orificios homogéneos para garantizar la forma en la que obtendremos el resultado final de trituración.

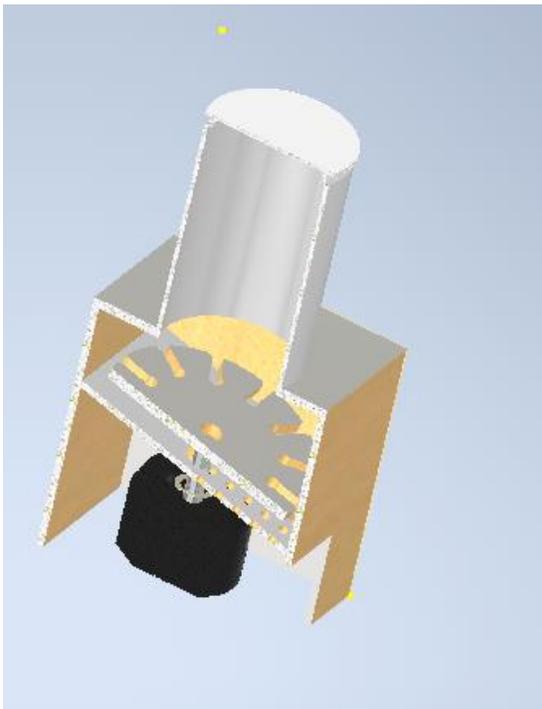


Figura 43. Vista isométrica seccionada de la trituradora.

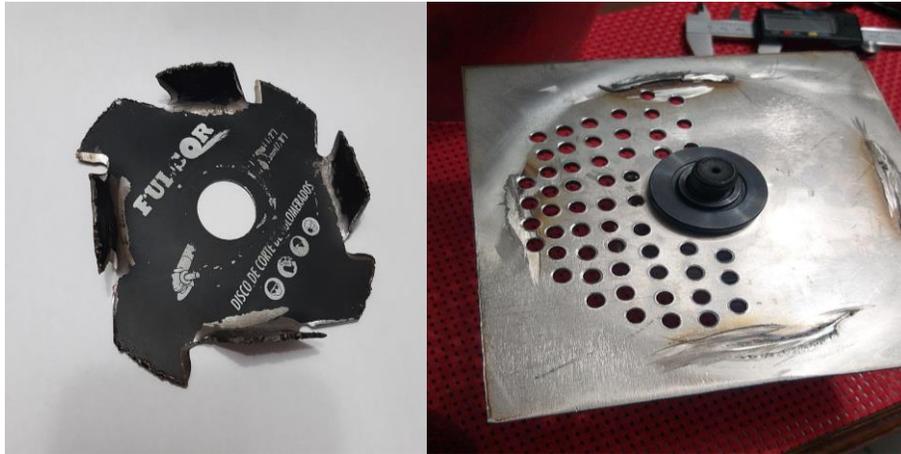


Figura 44. Cuchilla de corte y sistema de tamizaje.

La potencia que necesita el sistema de triturado es entregada por un sistema acoplado de rotación mediante una pulidora, esto con el fin de poder acoplar las cuchillas a un eje que suministre el suficiente momento de corte para que el plástico pueda ser reducido al tamaño deseado para que pueda ser procesado en la etapa de extrusión.



Figura 45. Sistema de triturado y resultado de trituración.

12.2. SISTEMA DE FUNDICIÓN Y EXTRUSIÓN

Este sistema es el encargado extruir el plástico previamente procesado por la etapa de trituración como un filamento de 1.75mm. Está conformado por un tornillo tipo barco de 3/8" ajustado concéntricamente con un cilindro en acero inoxidable AISI 304 que esta soldado a una tolva que cumple la función de entrada del suministro de plástico. Este sistema permite el suministro y transporte del plástico triturado hacia la zona de extrusión.



Figura 46. Tornillo tipo barco 3/8" y tolva soldada al cilindro de extrusión.

Para la calefacción del sistema extrusor se seleccionó la resistencia eléctrica de tipo tubular, la cual se acoplo a lo largo del cilindro para suministrar la temperatura necesaria que fundirá el material ingresado para poder darle forma de filamento.

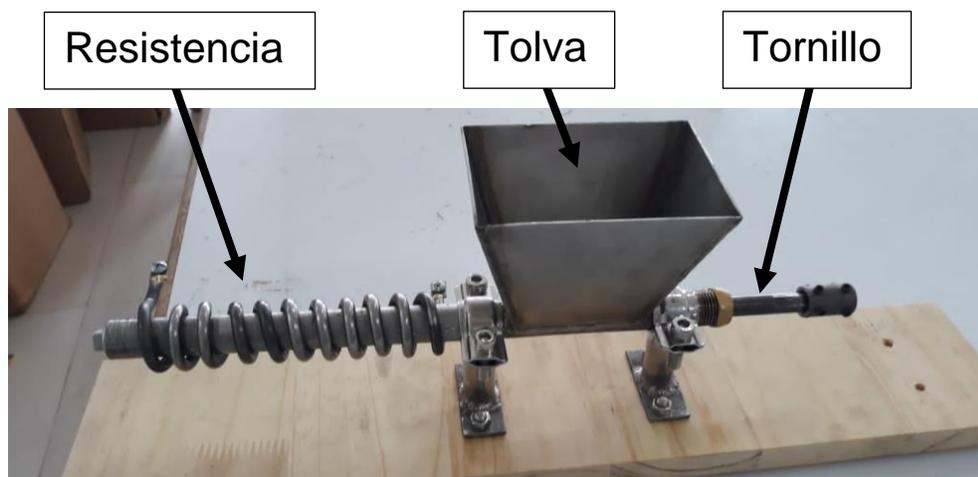


Figura 47. Sistema calefactor acoplado a la planta.

Para otorgarle la potencia al sistema extrusor, se seleccionó el motor 5IK90GN-AF del fabricante DIXUS, cuyo funcionamiento 110V, funcional a una frecuencia de 50hz a 60hz, cuya corriente nominal es de 1.4A para finalmente otorgar una potencia de funcionamiento nominal de 90W. El diagrama de conexión del motor es recomendado por el fabricante.

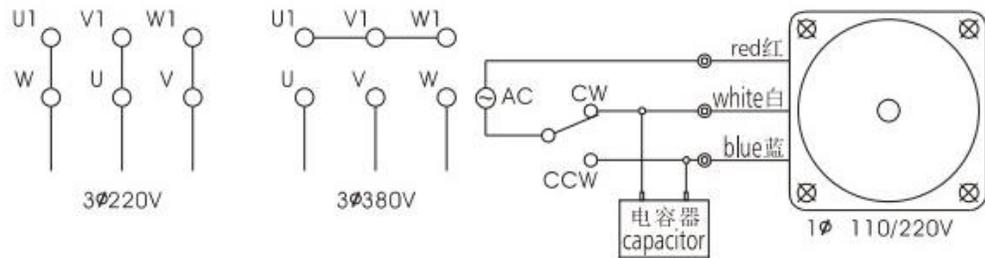


Figura 48. Diagrama de conexión del motor seleccionado.

Para la construcción y ensamble del sistema extrusor se usó una base de madera en la cual se acoplo y fijó el motor dando como resultado el siguiente ensamble. También se agregó una cubierta de fibra de cerámica alrededor del sistema calefactor para evitar la pérdida de energía por el ambiente y conservar la temperatura haciendo el sistema más eficiente.

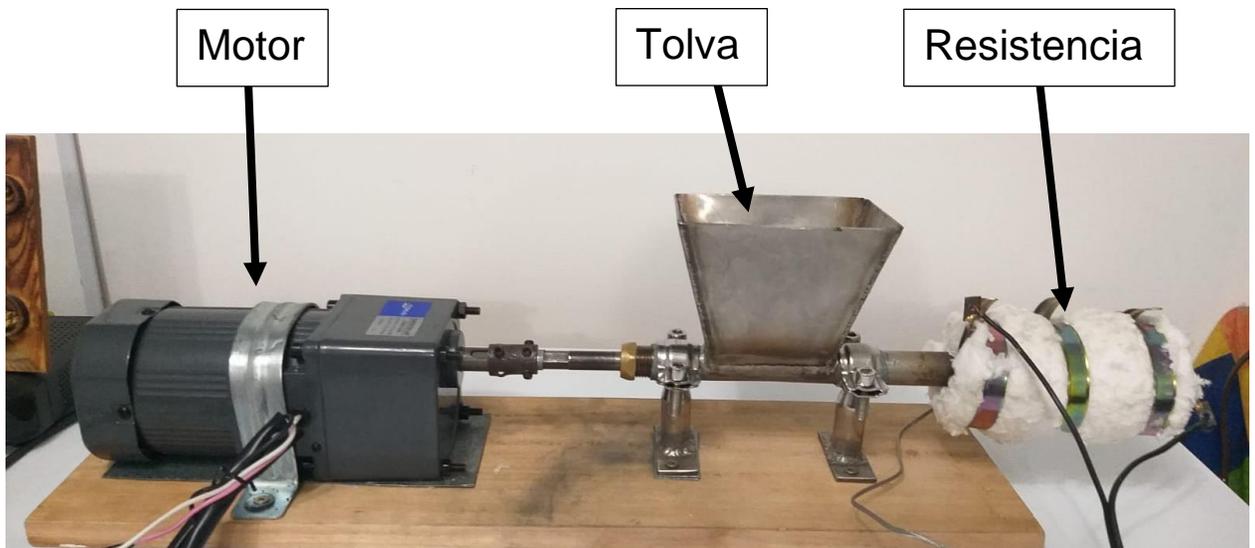


Figura 49. Sistema extrusor ensamblado y fijado.

12.3. SISTEMA DE BOBINADO

Este sistema es el encargado de bobinar el filamento en un carrete para que pueda ser usado posteriormente en impresiones 3D sin ocupar mucho espacio o enredarse durante el proceso. Está conformado por un puller de movimiento transversal que garantiza la distribución del filamento a lo largo del carrete y un movimiento rotacional por un motor DC acoplado directamente al carrete donde se bobinara el resultado final.

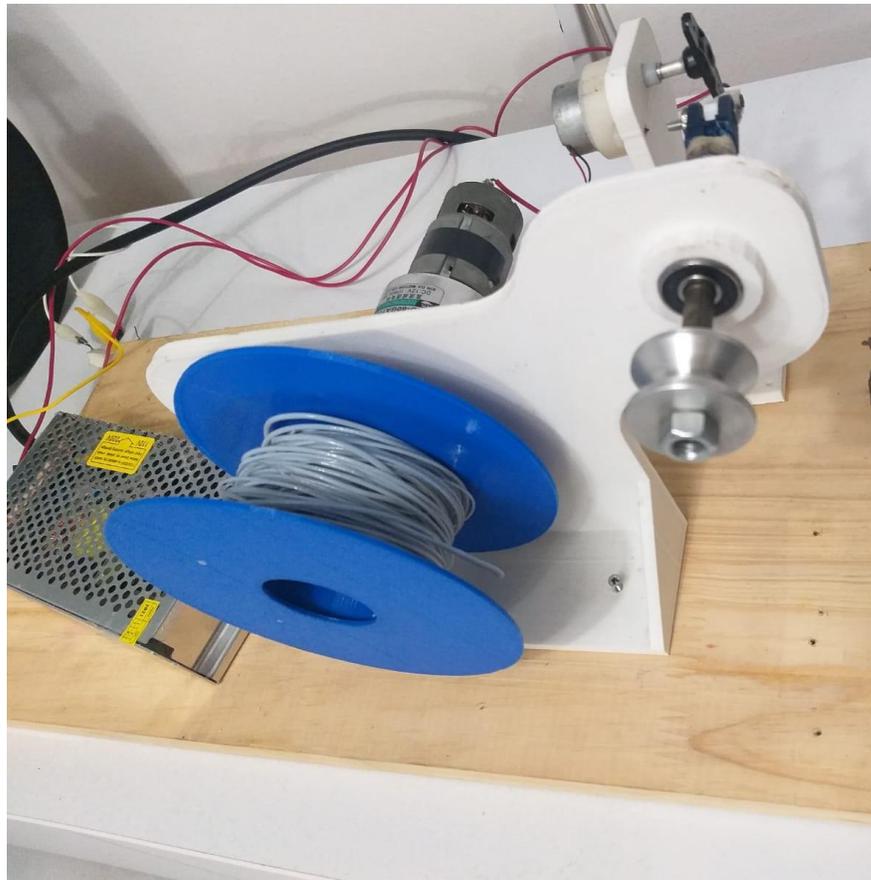


Figura 50. Sistema de bobinado

Para diseñar la relación de bobinado es necesario primero realizar una serie de cálculos, en cuyo caso es necesario conocer la velocidad de salida del filamento en el extrusor, el tiempo que tarda en dar una vuelta en la bobina y el peso de la bobina. Para determinar la velocidad necesaria de bobinado

$$v = \frac{Q}{s}, \text{ m/s}$$

V = Velocidad de salida del filamento

Q = Caudal

S = Sección de boquilla

$$v = \frac{409,9 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}}}{\pi * \left(\frac{1,75\text{mm}}{2}\right)^2} = 170,41 \text{ mm/min}$$

Para determinar las RPM necesarias aplicamos los cálculos, ya teniendo la velocidad y el perímetro de la boquilla.

$$\text{Rpm} = \frac{v}{p}$$

$$\text{Rpm} = \frac{170,41 \frac{\text{mm}}{\text{pmin}}}{204,2 \text{ mm}} = 0,83 \text{ rpm} \approx 1 \text{ rpm}$$

Teniendo en cuenta que la velocidad de bobinado es de 1 rpm y el carrete cuenta con un peso de 250 gramos, seleccionamos un motorreductor 60GA775 que cuenta con gran torque a 10 rpm, el ajuste final se llevó a cabo mediante un dimmer para regular la velocidad a la necesitada.



Figura 51. Motorreductor de sistema embobinado.

12.4. CARACTERIZACIÓN DE LA PLANTA

En este apartado se caracterizó la planta para conocer el comportamiento de la misma ante las entradas (tensión) y poder verificar el correcto funcionamiento validando la salida del sistema (temperatura). Se tomó en cuenta el sistema de calefacción para este modelo debido a que es el sistema que buscamos controlar con precisión para ofrecer una temperatura de fundición estable a lo largo del proceso de extrusión.

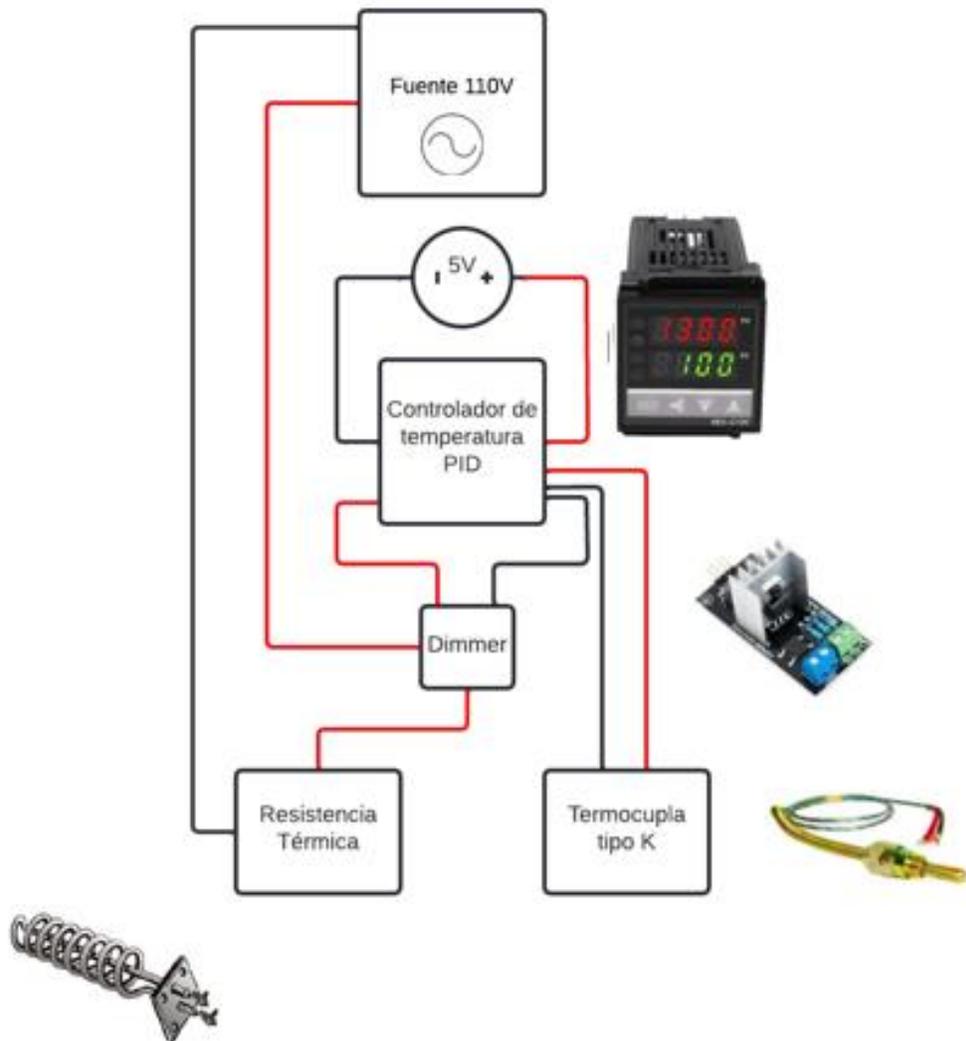


Figura 52. Diagrama unilineal del control de temperatura a lazo cerrado.

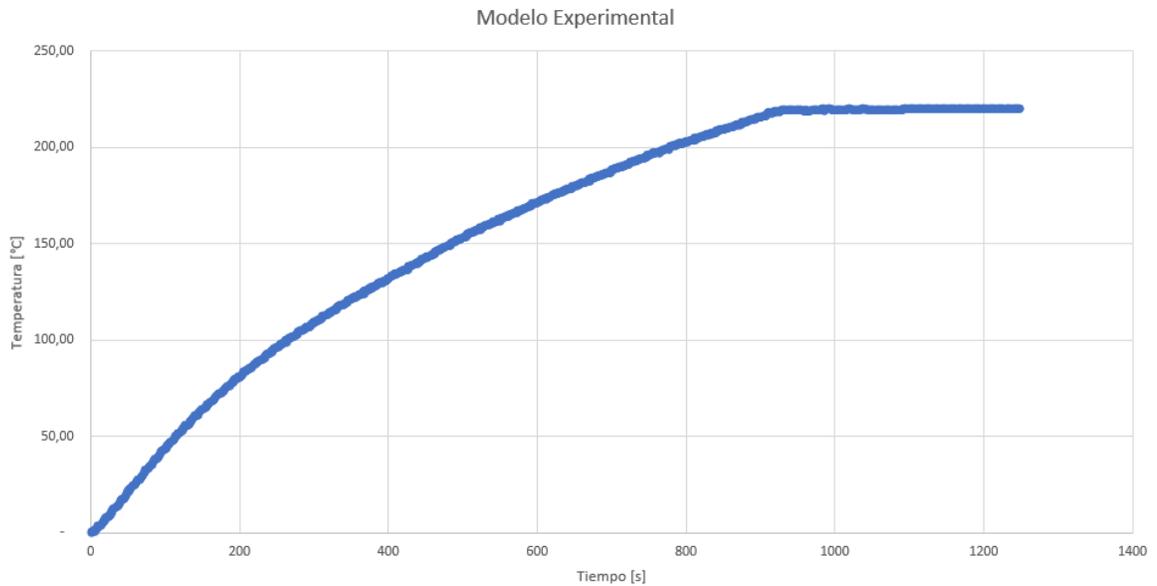


Figura 53. Comportamiento del modelo experimental

Como se puede observar se obtuvo un sistema de primer orden. La gráfica corresponde al comportamiento de la planta ante una señal de PWM del 20% que es equivalente a unos 24v AC, con un tiempo de estabilización de 1100s a lazo abierto. Con estos datos se procedió a analizar el sistema y se obtuvo la función de transferencia equivalente al sistema real.

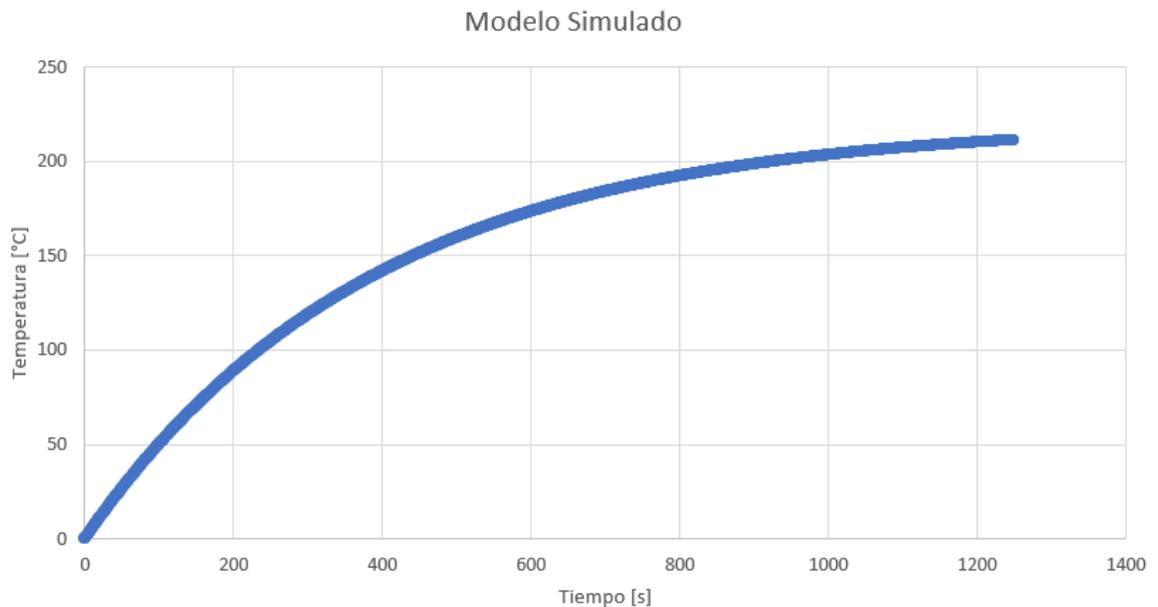


Figura 54. Comportamiento del modelo simulado y obtenido por el sistema de primer orden

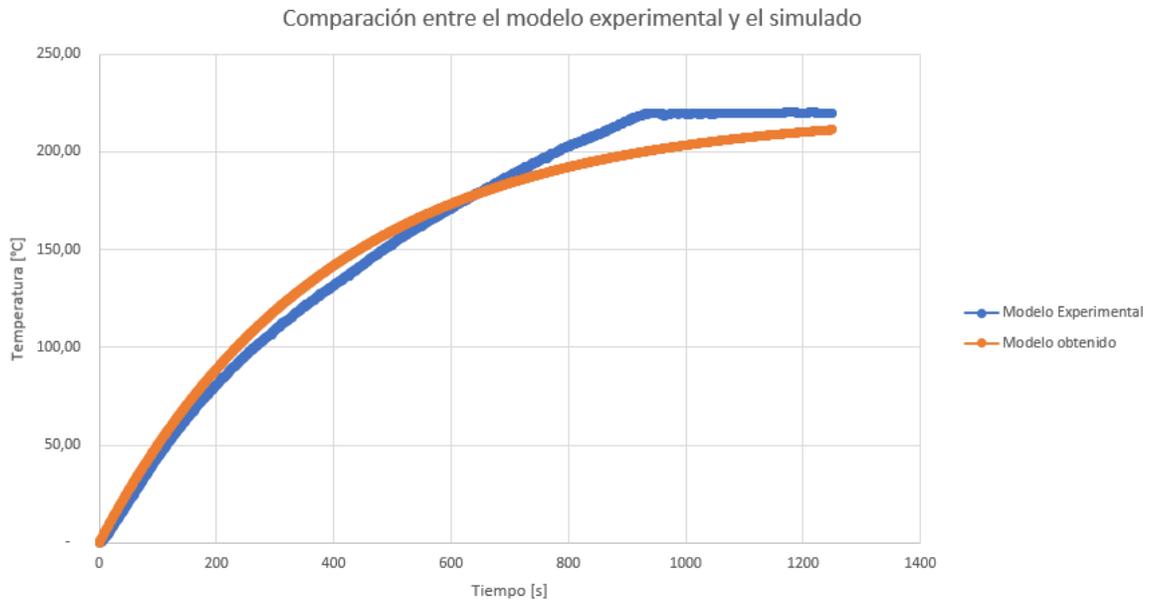


Figura 55. Comparación entre los modelos

Se observa en el comportamiento del modelo obtenido que sigue al modelo experimental, por lo tanto, la identificación y caracterización de la planta fue exitosa. Ambas con un tiempo de estabilización en una temperatura aproximada de 220 °C en un tiempo de 1200s ante una entrada de PWM del 20%, que equivale aproximadamente a 24V AC conectados a la red eléctrica y regulados por el control de temperatura diseñado en lazo abierto.

13. CONSTRUCCIÓN FINAL DEL PROTOTIPO DE MAQUINA RECICLADORA

A continuación, se presenta el modelo final del prototipo de maquina recicladora con las etapas de triturado, extrusión y bobinado.



Figura 56. Prototipo construido.

Las señales de mando se dan a través de la de interfaz diseñada y construida con la cual se pueden accionar las diferentes etapas del prototipo. Deben ser independientes ya que la máquina necesita un precalentamiento de 45 minutos para establecer la temperatura deseada a lo largo del barril y se pueda extruir bajo las condiciones de operación. En ella también se encuentra la señal del sensor de temperatura para verificar que las condiciones óptimas de extrusión se están cumpliendo.



Figura 57. Interfaz de mando para el accionamiento de las etapas.

En esta interfaz se tienen pulsadores que activan los sistemas de bobinado, motor de la etapa extrusora, alimentación de la etapa de control y potencia para el sistema calefactor y se incluyeron potenciómetros para la variación de la velocidad de la etapa de bobinado en caso de que se requiera.

14. RESULTADOS

Se extruyó 250g de material que se ven reflejados en el carrete a continuación.



Figura 58. Filamento extruido y bobinado en un carrete.

Con el filamento ya extruido se procedió a introducirlo en una impresora 3D con el objetivo de probar si es apto para ser usado como filamento de impresión, ya que este debe cumplir estándares de calidad en cuanto al diámetro para que la impresión no se vea afectada. El resultado de la pieza impresa es el siguiente.



Figura 59. Resultado de impresión usando el filamento extruido.

La impresora 3D aceptó el filamento e imprimió esta pieza en un tiempo estimado de 15 minutos. La temperatura es un factor que afecta la integridad del filamento de

manera abrupta ya que no es extruido con PET virgen, por lo tanto, su temperatura de fusión es menor que la estipulada. Se estimaba que sería entre 255°C y 265°C, pero en realidad para extruir el filamento se encontró que la temperatura óptima para extruirlo fue entre 230°C y 240°C. Gracias al controlador de temperatura instalado se pudo llegar a la temperatura deseada sin problemas durante las pruebas, obteniendo así los resultados anteriormente mostrados.

15. CONCLUSIONES

Este trabajo dio como resultado la construcción de una máquina recicladora de material plástico tipo PET desde su trituración y fundición hasta la extrusión de un filamento de 1.75mm que posteriormente fue embobinado y probado en la impresión de una pieza funcional.

La fase de triturado no se construyó con base al diseño original debido a que en la etapa de construcción se determinó que el costo era demasiado alto, se incluyó en este proyecto como una oportunidad de mejora ya que el diseño original ofrecía una mayor autonomía y eficiencia a la hora de triturar el material. Se realizó la construcción de otro diseño de máquina de triturado más casero y simple, con el fin de poder triturar el plástico que posteriormente fue extruido como un filamento.

La máquina necesita una etapa de precalentamiento de al menos 45 minutos para llegar a la temperatura de extrusión, esto debido a que la energía calórica es transmitida al barril por medio de una resistencia tubular y ese es el tiempo que toma en establecerse como temperatura constante a lo largo del barril para que la maquina funcione en condiciones óptimas.

El tiempo que tomó la extrusión del carrete de 250g fue de 120min, extruyendo y bobinando de manera constante el filamento sin interrupciones. Es importante considerar la alimentación de la tolva con el plástico triturado durante el proceso ya que de esto depende la continuidad del proceso. Si se queda sin material el filamento puede cambiar su diámetro, se puede ver interrumpido y su integridad se ve comprometida ya que no cumple los criterios de continuidad a la entrada para mantener los estados de operación en condiciones óptimas.

La fase de enfriamiento antes de la etapa de bobinado no fue necesaria debido a que el filamento debe enfriarse de manera transitoria sino alcanza su punto de transición vítrea entre 60°C - 80°C y esto lo hace quebradizo, se optó por retirar esta fase y dejar que el filamento baje su temperatura progresivamente con el ambiente y se obtuvo el resultado deseado, un filamento con la elasticidad necesaria para ser bobinado y posteriormente ser usado en modelos de impresión 3D.

16. BIBLIOGRAFÍA

Arteaga, L. (2015). *Fabricación y caracterización de filamentos para impresora 3D a partir de materiales reciclados*. San Cristobal: en línea.

Clevel, J. (2020). *Diseño de una trituradora de PET como herramienta de apoyo para las asignaturas de ingeniería de uncatólica*. Cali: En línea.

Estrada, R. (23 de enero de 2020). *¿Por qué el plástico tarda tanto tiempo en degradarse?* Obtenido de El financiero: <https://www.elfinanciero.com.mx/el-preguntario/por-que-el-plastico-tarda-tanto-tiempo-en-degradarse/>

Granta, L. (2018). General purpose, molding & extrusion. *EDUPACK*, 17.

Groover, M. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna (tercera edición)*. Mxico DF: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.

GUAJARDO, A. B., NAJAR, L. E., PRÓSPERI, S. B., & MOLINA, M. G. (1 de enero de 2000). *estrucplan*. Obtenido de <https://estrucplan.com.ar/propiedades-de-los-plasticos-reciclados/>

Incropera, F. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Mexico: Pearson Educacion.

Lyman, H. (2012). *Lyman Filament Extruder*. Seattle: En línea .

Medina, J. (2011). *Diseño de una trituradora para plástico Polietileno de*. Mexico: en línea.

Mexpolimeros. (2012). *Extensores de cadena*. Obtenido de <https://www.mexpolimeros.com/extensores%20de%20cadena.html>

Noguera, I. (11 de diciembre de 2020). *Botellas de PET: Definiciones y proceso de fabricación*. Obtenido de <https://www.ingenieriaquimicareviews.com/2020/12/botellas-pet-proceso-fabricacion-definiciones.html>

Ogata, k. (2010). *Ingeniería de control moderno*. Madrid: Pearson educación s.a.

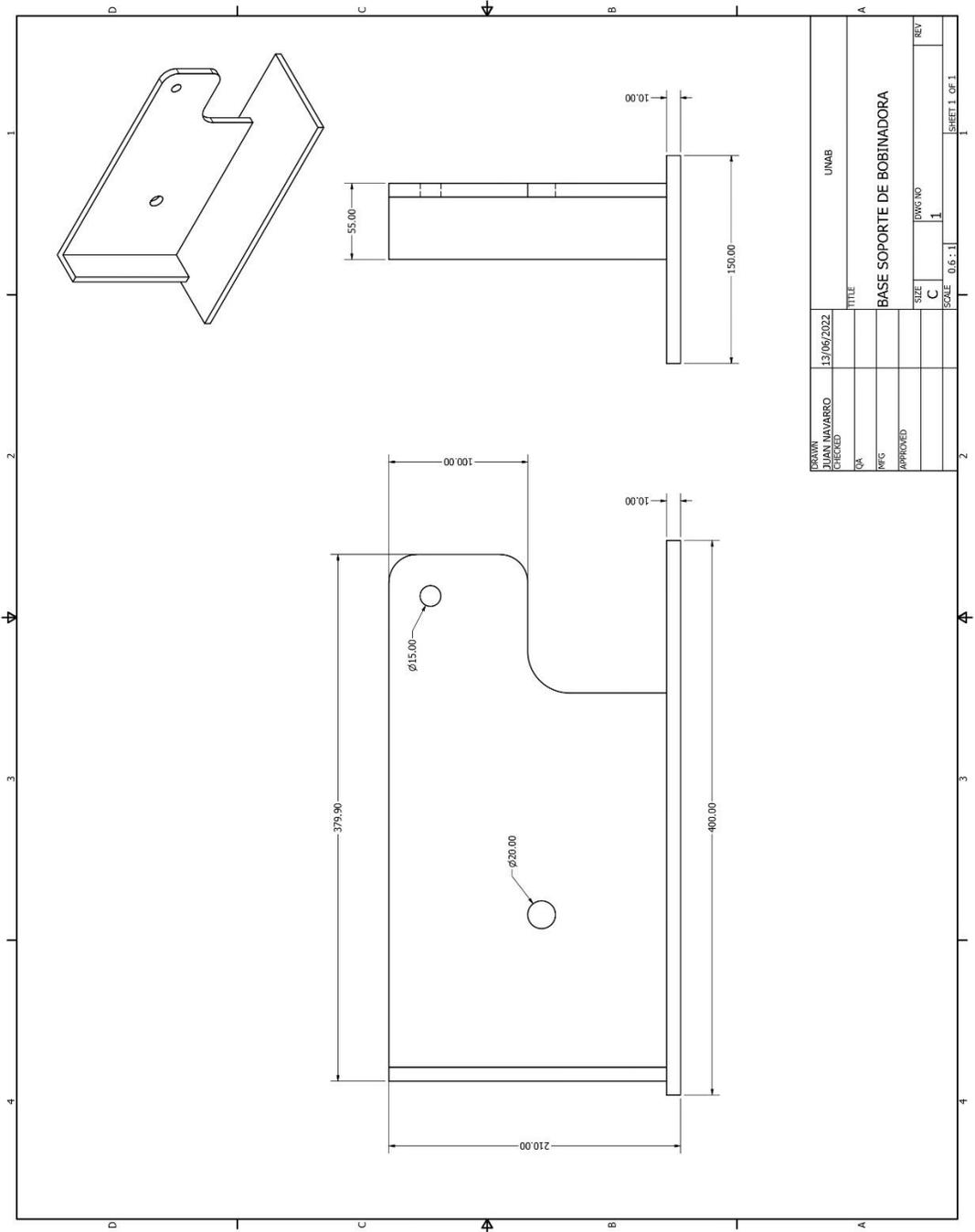
ONU. (17 de noviembre de 2015). *Objetivos de desarrollo sostenible*. Obtenido de <https://onu.org.gt/objetivos-de-desarrollo/>

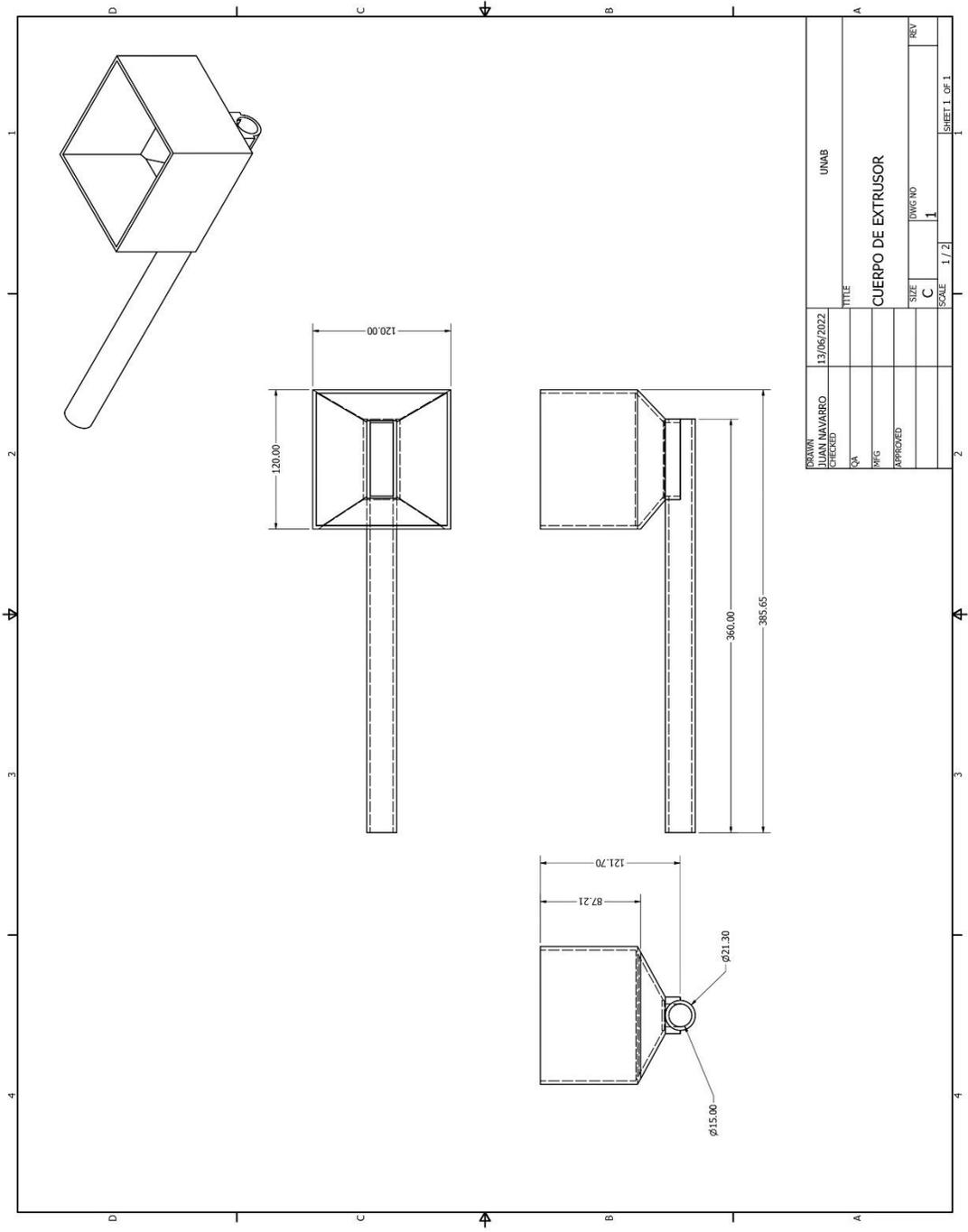
Paz, J. (12 de mayo de 2018). *3D works*. Obtenido de Comparatia materiales para impresión 3D: <https://www.3dworks.cl/post/comparativa-materiales-para-impresi%C3%B3n-3d>

Ramos, G. y. (2019). *Diseño e implementación de un sistema de extrusión de filamento para impresión 3D a partir de botellas recicladas*. . Cali: En línea.

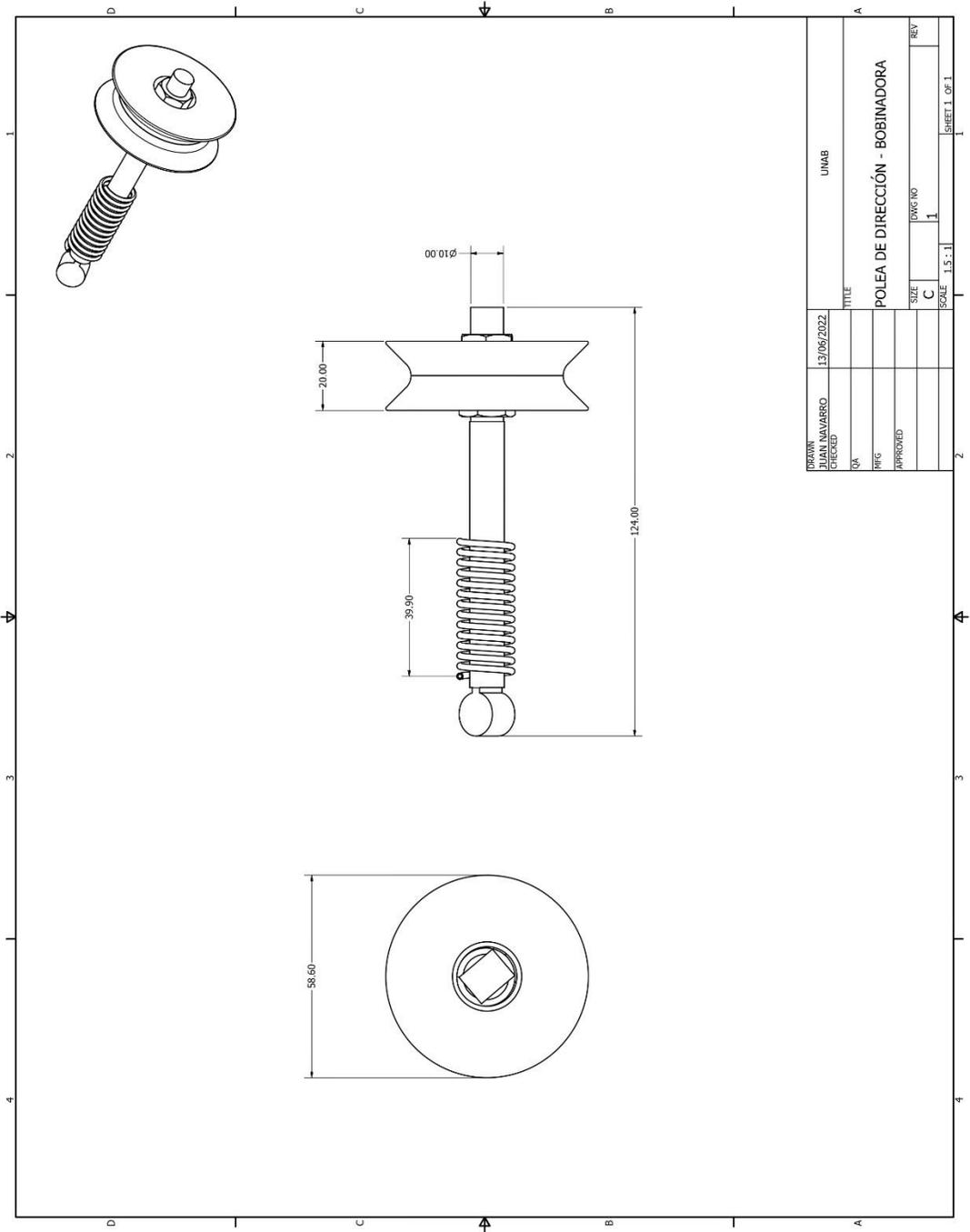
Tritotutto, t. d. (19 de Marzo de 2019). *Tritotutto*. Obtenido de <http://www.tritotutto.com/es/trituradoras-de-4-arboles/trituradoras-de-4-arboles-modelo-2566>

17. ANEXOS



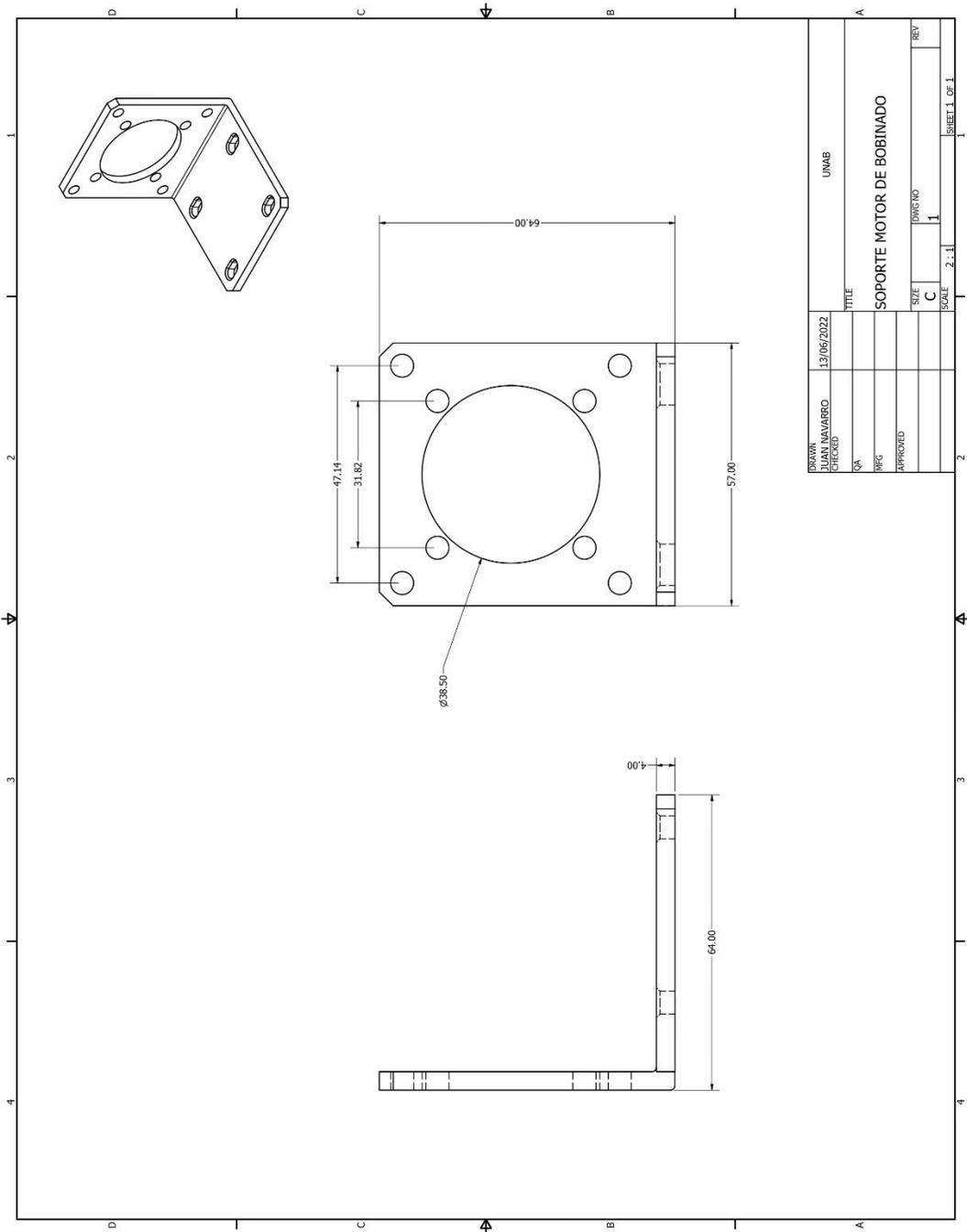


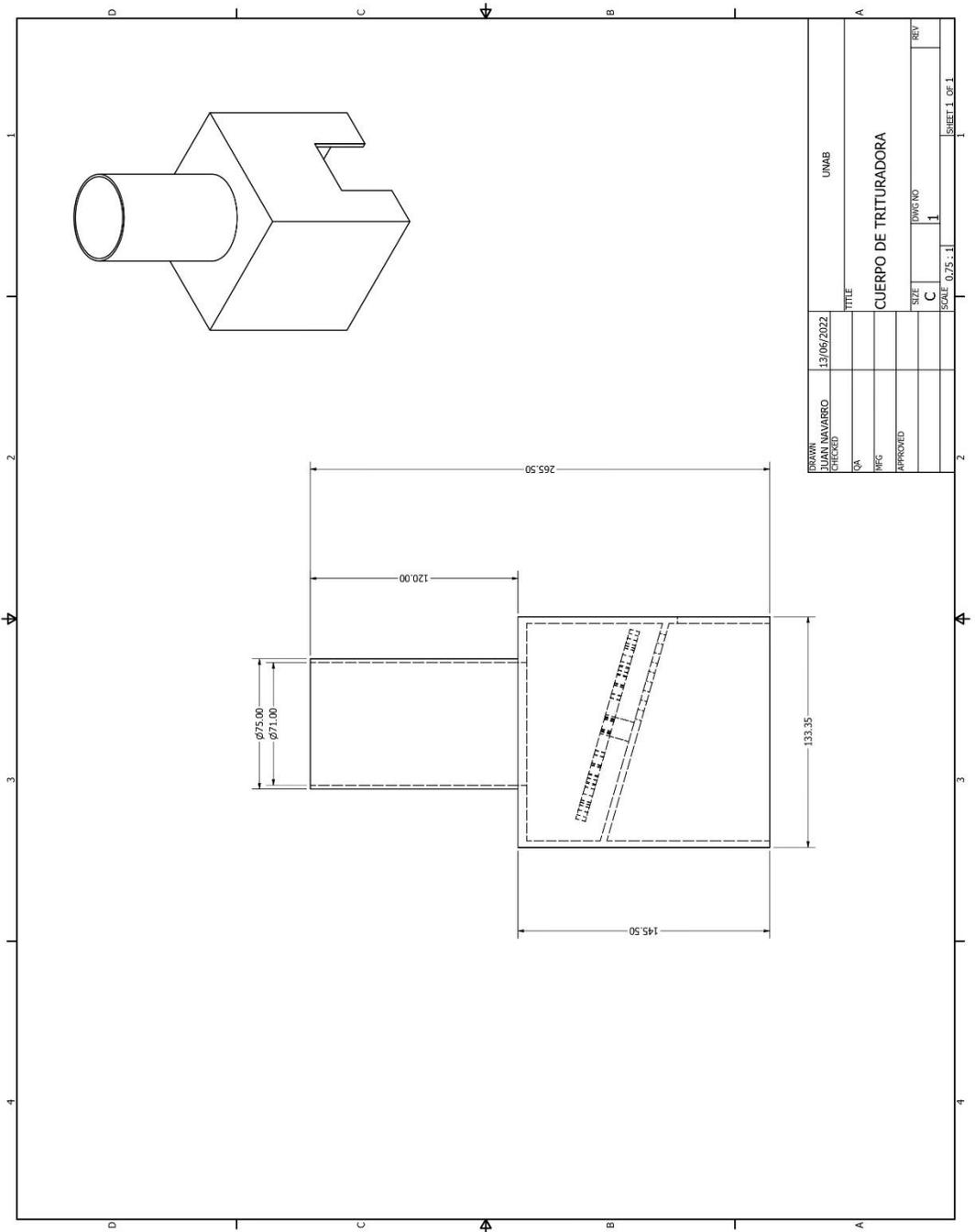
| | | | |
|----------|------|------------|--------------------|
| DRAWN | UNAB | 13/05/2022 | UNAB |
| CHECKED | | | |
| QA | | | TITLE |
| RF6 | | | CUERPO DE EXTRUSOR |
| APPROVED | | | SIZE |
| | | | C |
| | | | DWG NO |
| | | | 1 |
| | | | SCALE |
| | | | 1/2 |
| | | | SHEET 1 OF 1 |



| | |
|--------------|------------|
| DRAWN | UNAB |
| DESIGNED | UNAB |
| DATE | 13/06/2022 |
| PROJ | |
| APPROVED | |
| SIZE | C |
| SCALE | 1.5 : 1 |
| REV | 1 |
| SHEET 1 OF 1 | |

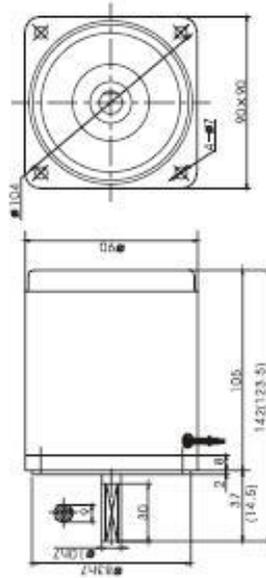
| | |
|---------------------------------|--|
| UNAB | |
| TITLE | |
| POLEA DE DIRECCIÓN - BOBINADORA | |





| | | | |
|----------|--------------|-------|--------------|
| DESIGN | 13/06/2022 | TITLE | UNAB |
| CHECKED | JUAN NAVARRO | | |
| QA | | | |
| WFG | | | |
| APPROVED | | | |
| | | SIZE | DWGNO |
| | | C | 1 |
| | | SCALE | 0.75:1 |
| | | | SHEET 1 OF 1 |

Overall Dimension of Motor



The value in the () is the value of small gearshaft motor

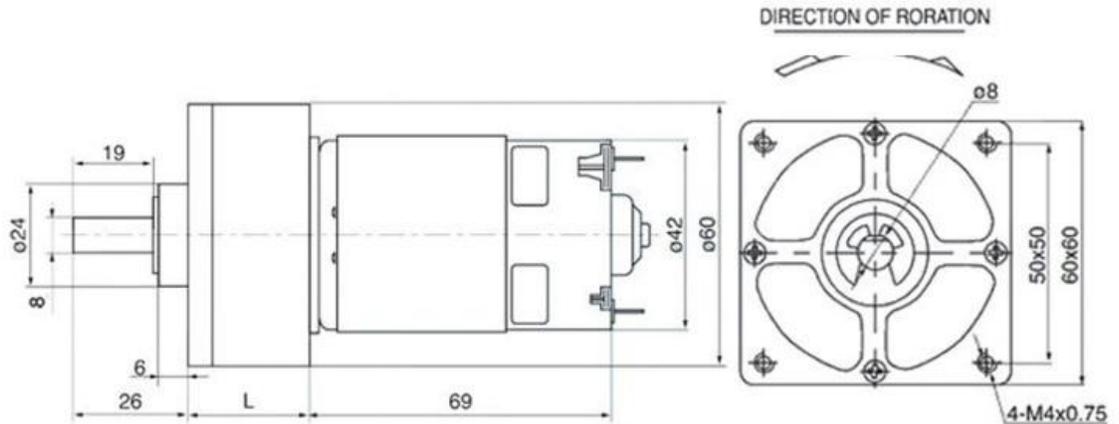


Induction Motor Reversible Motor

List of Motor Characteristics

| Model of Motor | | Output | Voltage | Frequency | Poles | | Duty | Rated | | | Starting Torque | | Capacitor/μe |
|----------------|-----------------------|--------|---------|-----------|-------|-------|------|---------|--------|--------|-----------------|----------|--------------|
| Motor | Motor with gear shaft | W | V | Hz | P | Speed | | Current | Torque | | N.m | Kgf.cm | F/μAC |
| | | | | | | r/min | | A | N.m | Kgf.cm | | | |
| 5IK90A-AF | 5IK90GU-AF | 90 | 1ph110 | 50 | 4 | 1350 | 1.40 | 0.64 | 6.40 | 0.50 | 5.00 | 20.0/250 | |
| 5IK90A-CF | 5IK90GU-CF | 90 | 1ph220 | 50 | 4 | 1350 | 0.70 | 0.64 | 6.40 | 0.48 | 4.80 | 5.0/450 | |
| 5IK90A-SF | 5IK90GU-SF | 90 | 3ph220 | 50 | 4 | 1300 | 0.66 | 0.66 | 6.60 | 2.40 | 24.0 | / | |
| 5IK90A-S,F | 5IK90GU-S,F | 90 | 3ph380 | 50 | 4 | 1300 | 0.38 | 0.66 | 6.60 | 2.40 | 24.0 | / | |
| 5IK90A-DF | | 90 | 1ph220 | 50 | 2 | 2800 | 0.79 | 0.30 | 3.00 | 0.34 | 3.40 | 6.0/450 | |
| 5RK90A-AF | 5RK90GU-AF | 90 | 1ph110 | 50 | 4 | 1350 | 1.55 | 0.64 | 6.40 | 0.48 | 4.80 | 25.0/250 | |
| 5RK90A-CF | 5RK90GU-CF | 90 | 1ph220 | 50 | 4 | 1350 | 0.76 | 0.64 | 6.40 | 0.61 | 6.10 | 6.0/450 | |

Motor drawing



Parameter

60GA775

| | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| Volatge (V) | 12V | 12V | 12V | 12V | 12V | 12V | 12V | 12V | 12V | 12V |
| Current (A) | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| Speed (RPM) | 10 | 15 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 | 500 |
| Torque (kg. fcm) | 76.40 | 50.93 | 25.47 | 15.28 | 7.64 | 5.09 | 3.82 | 2.55 | 1.91 | 1.53 |
| Volatge (V) | 24V | 24V | 24V | 24V | 24V | 24V | 24V | 24V | 24V | 24V |
| Current (A) | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 3.8 |
| Speed (RPM) | 5 | 10 | 30 | 50 | 100 | 150 | 200 | 300 | 400 | 500 |
| Torque (kg. fcm) | 82 | 80 | 31.83 | 19.10 | 9.55 | 6.37 | 4.78 | 3.18 | 2.39 | 1.91 |



CONTROLADOR DIGITAL DE TEMPERATURA Y PROCESOS TTM - 004

DESCRIPCIÓN

La gama de controladores digitales TTM-000 disponen de todas las funciones PID, funciones de temporizador, entradas de evento, son muy sencillos de usar. Se pueden suministrar con varias opciones de entrada/salida.

CARACTERÍSTICAS

• Self Tuning PID.

El controlador calcula los valores de PID mas apropiados para el proceso. Estos valores se recalculan para cualquier cambio del valor del SV.

• Función Temporizador

El controlador dispone de función temporizador de Serie. Esta función se puede usar para accionar la Salida de evento o para habilitar /deshabilitar la salida de control según se requiera.

• Multientrada.

Puede ser tanto, Pt100, como termopares: J, K, T, R, N, S & B ó analógicas 4.20mA, 0-5V & 1-5V, el tipo de entrada es programable.

• Normativas

Cumple con:UL, CUL, CE & IP 66.

• Tamaño Compacto

Profundidad de tan solo77mm.

• Control Manual

Disponible de serie la función de control manual es aplicable a una gran cantidad de procesos.



• Comunicación (RS485).

La comunicación RS485 nos permite conectar hasta 31 equipos entre si permitiéndonos una supervisión central desde un punto remoto (PC)

• Filtro digital de PV

Previene repentinos cambios de la señal de entrada que pueden afectar al proceso.

• Protección PID frente a Overshoot

• Funciones de la DI (Entrada Digital)

Se pueden seleccionar las siguientes opciones:

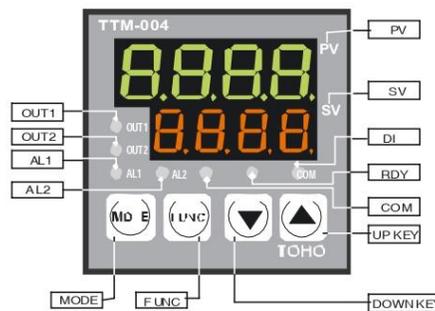
1. SV/SV2.
2. RUN/READY.
3. Automático (RUN)/Manual.
4. Control de Calor/ Control frio.
5. Control de Calor (SV2)/ Control frio (SV).
6. Inicio del AT (Auto-Tuning).
- . Marcha / Paro función Timer.

FRONT PANEL

| | |
|------|--|
| AL1 | Indicación de la salida de evento 1 |
| AL2 | Indicación de la salida de evento 2 |
| OUT1 | Indicación de la salida 1 |
| OUT2 | Indicación de la salida 2 |
| RDY | Luce cuando esta en modo "ready" |
| COM | Luce cuando opera la comunicación (opción) |
| MODE | Tecla MODE para desplazamiento entre menús. |
| D1 | Luce cuando opera DI (Entrada Digital), Opción |
| FUNC | Tecla programable Función. Selecciona Auto-tuning ó RUN / READY ó Comienzo/paro de la función Timer |
| PV | Indicación de la variable de proceso & caracter de los parámetros |
| SV | Indicación de la consigna & tiempo residual de la función Timer |
| ▲ | Subir / Bajar valores |
| ▼ | Presionando 1 ~ 10 secs : 1 digit /100 ms 10 ~ 20 secs : 10 digits /100 ms + de 20 sec : 100 digit /100 ms |

• Control Calor/Frio

Control PID control tanto en la salida de Calor como la de frio.





BOSCH

Amoladora Angular 9" GWS 26-230

**HEAVY
DUTY**



| | |
|-------------------------------|-------------------------|
| Potencia | 2.600 W |
| Nº de revoluciones (s/ carga) | 5.500 min ⁻¹ |
| Ø del disco | 9" (230 mm) |
| Eje | M14 |
| Peso | 5,9 kg |
| Nº de tipo | |

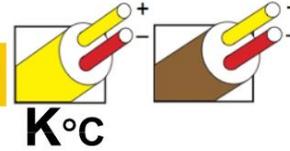
Incluye

Empuñadura auxiliar con control de vibración, llave de pernos, brida, tuerca de apriete, guarda de protección



Tipo K

Especificación Técnica
Tablas de Referencia N.I.S.T.



Termopar tipo K - Voltaje termoelectrico como función de la temperatura

| °C | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | °C |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
| Voltaje termoelectrico en Milivolts | | | | | | | | | | | | |
| 200 | 8.138 | 8.178 | 8.218 | 8.258 | 8.298 | 8.338 | 8.378 | 8.418 | 8.458 | 8.499 | 8.539 | 200 |
| 210 | 8.539 | 8.579 | 8.619 | 8.659 | 8.699 | 8.739 | 8.779 | 8.819 | 8.860 | 8.900 | 8.940 | 210 |
| 220 | 8.940 | 8.980 | 9.020 | 9.061 | 9.101 | 9.141 | 9.181 | 9.222 | 9.262 | 9.302 | 9.343 | 220 |
| 230 | 9.343 | 9.383 | 9.423 | 9.464 | 9.504 | 9.545 | 9.585 | 9.626 | 9.666 | 9.707 | 9.747 | 230 |
| 240 | 9.747 | 9.788 | 9.828 | 9.869 | 9.909 | 9.950 | 9.991 | 10.031 | 10.072 | 10.113 | 10.153 | 240 |
| 250 | 10.153 | 10.194 | 10.235 | 10.276 | 10.316 | 10.357 | 10.398 | 10.439 | 10.480 | 10.520 | 10.561 | 250 |
| 260 | 10.561 | 10.602 | 10.643 | 10.684 | 10.725 | 10.766 | 10.807 | 10.848 | 10.889 | 10.930 | 10.971 | 260 |
| 270 | 10.971 | 11.012 | 11.053 | 11.094 | 11.135 | 11.176 | 11.217 | 11.259 | 11.300 | 11.341 | 11.382 | 270 |
| 280 | 11.382 | 11.423 | 11.465 | 11.506 | 11.547 | 11.588 | 11.630 | 11.671 | 11.712 | 11.753 | 11.795 | 280 |
| 290 | 11.795 | 11.836 | 11.877 | 11.919 | 11.960 | 12.001 | 12.043 | 12.084 | 12.126 | 12.167 | 12.209 | 290 |
| 300 | 12.209 | 12.250 | 12.291 | 12.333 | 12.374 | 12.416 | 12.457 | 12.499 | 12.540 | 12.582 | 12.624 | 300 |
| 310 | 12.624 | 12.665 | 12.707 | 12.748 | 12.790 | 12.831 | 12.873 | 12.915 | 12.956 | 12.998 | 13.040 | 310 |
| 320 | 13.040 | 13.081 | 13.123 | 13.165 | 13.206 | 13.248 | 13.290 | 13.331 | 13.373 | 13.415 | 13.457 | 320 |
| 330 | 13.457 | 13.498 | 13.540 | 13.582 | 13.624 | 13.665 | 13.707 | 13.749 | 13.791 | 13.833 | 13.874 | 330 |
| 340 | 13.874 | 13.916 | 13.958 | 14.000 | 14.042 | 14.084 | 14.126 | 14.167 | 14.209 | 14.251 | 14.293 | 340 |
| 350 | 14.293 | 14.335 | 14.377 | 14.419 | 14.461 | 14.503 | 14.545 | 14.587 | 14.629 | 14.671 | 14.713 | 350 |
| 360 | 14.713 | 14.755 | 14.797 | 14.839 | 14.881 | 14.923 | 14.965 | 15.007 | 15.049 | 15.091 | 15.133 | 360 |
| 370 | 15.133 | 15.175 | 15.217 | 15.259 | 15.301 | 15.343 | 15.385 | 15.427 | 15.469 | 15.511 | 15.554 | 370 |
| 380 | 15.554 | 15.596 | 15.638 | 15.680 | 15.722 | 15.764 | 15.806 | 15.849 | 15.891 | 15.933 | 15.975 | 380 |
| 390 | 15.975 | 16.017 | 16.059 | 16.102 | 16.144 | 16.186 | 16.228 | 16.270 | 16.313 | 16.355 | 16.397 | 390 |
| 400 | 16.397 | 16.439 | 16.482 | 16.524 | 16.566 | 16.608 | 16.651 | 16.693 | 16.735 | 16.778 | 16.820 | 400 |
| 410 | 16.820 | 16.862 | 16.904 | 16.947 | 16.989 | 17.031 | 17.074 | 17.116 | 17.158 | 17.201 | 17.243 | 410 |
| 420 | 17.243 | 17.285 | 17.328 | 17.370 | 17.413 | 17.455 | 17.497 | 17.540 | 17.582 | 17.624 | 17.667 | 420 |
| 430 | 17.667 | 17.709 | 17.752 | 17.794 | 17.837 | 17.879 | 17.921 | 17.964 | 18.006 | 18.049 | 18.091 | 430 |
| 440 | 18.091 | 18.134 | 18.176 | 18.218 | 18.261 | 18.303 | 18.346 | 18.388 | 18.431 | 18.473 | 18.516 | 440 |
| 450 | 18.516 | 18.558 | 18.601 | 18.643 | 18.686 | 18.728 | 18.771 | 18.813 | 18.856 | 18.898 | 18.941 | 450 |
| 460 | 18.941 | 18.983 | 19.026 | 19.068 | 19.111 | 19.154 | 19.196 | 19.239 | 19.281 | 19.324 | 19.366 | 460 |
| 470 | 19.366 | 19.409 | 19.451 | 19.494 | 19.537 | 19.579 | 19.622 | 19.664 | 19.707 | 19.750 | 19.792 | 470 |
| 480 | 19.792 | 19.835 | 19.877 | 19.920 | 19.962 | 20.005 | 20.048 | 20.090 | 20.133 | 20.175 | 20.218 | 480 |
| 490 | 20.218 | 20.261 | 20.303 | 20.346 | 20.389 | 20.431 | 20.474 | 20.516 | 20.559 | 20.602 | 20.644 | 490 |
| 500 | 20.644 | 20.687 | 20.730 | 20.772 | 20.815 | 20.857 | 20.900 | 20.943 | 20.985 | 21.028 | 21.071 | 500 |
| 510 | 21.071 | 21.113 | 21.156 | 21.199 | 21.241 | 21.284 | 21.326 | 21.369 | 21.412 | 21.454 | 21.497 | 510 |
| 520 | 21.497 | 21.540 | 21.582 | 21.625 | 21.668 | 21.710 | 21.753 | 21.796 | 21.838 | 21.881 | 21.924 | 520 |
| 530 | 21.924 | 21.966 | 22.009 | 22.052 | 22.094 | 22.137 | 22.179 | 22.222 | 22.265 | 22.307 | 22.350 | 530 |
| 540 | 22.350 | 22.393 | 22.435 | 22.478 | 22.521 | 22.563 | 22.606 | 22.649 | 22.691 | 22.734 | 22.776 | 540 |
| 550 | 22.776 | 22.819 | 22.862 | 22.904 | 22.947 | 22.990 | 23.032 | 23.075 | 23.117 | 23.160 | 23.203 | 550 |
| 560 | 23.203 | 23.245 | 23.288 | 23.331 | 23.373 | 23.416 | 23.458 | 23.501 | 23.544 | 23.586 | 23.629 | 560 |
| 570 | 23.629 | 23.671 | 23.714 | 23.757 | 23.799 | 23.842 | 23.884 | 23.927 | 23.970 | 24.012 | 24.055 | 570 |
| 580 | 24.055 | 24.097 | 24.140 | 24.182 | 24.225 | 24.267 | 24.310 | 24.353 | 24.395 | 24.438 | 24.480 | 580 |
| 590 | 24.480 | 24.523 | 24.565 | 24.608 | 24.650 | 24.693 | 24.735 | 24.778 | 24.820 | 24.863 | 24.905 | 590 |
| 600 | 24.905 | 24.948 | 24.990 | 25.033 | 25.075 | 25.118 | 25.160 | 25.203 | 25.245 | 25.288 | 25.330 | 600 |
| 610 | 25.330 | 25.373 | 25.415 | 25.458 | 25.500 | 25.543 | 25.585 | 25.627 | 25.670 | 25.712 | 25.755 | 610 |
| 620 | 25.755 | 25.797 | 25.840 | 25.882 | 25.924 | 25.967 | 26.009 | 26.052 | 26.094 | 26.136 | 26.179 | 620 |
| 630 | 26.179 | 26.221 | 26.263 | 26.306 | 26.348 | 26.390 | 26.433 | 26.475 | 26.517 | 26.560 | 26.602 | 630 |
| 640 | 26.602 | 26.644 | 26.687 | 26.729 | 26.771 | 26.814 | 26.856 | 26.898 | 26.940 | 26.983 | 27.025 | 640 |
| 650 | 27.025 | 27.067 | 27.109 | 27.152 | 27.194 | 27.236 | 27.278 | 27.320 | 27.363 | 27.405 | 27.447 | 650 |
| 660 | 27.447 | 27.489 | 27.531 | 27.574 | 27.616 | 27.658 | 27.700 | 27.742 | 27.784 | 27.826 | 27.869 | 660 |
| 670 | 27.869 | 27.911 | 27.953 | 27.995 | 28.037 | 28.079 | 28.121 | 28.163 | 28.205 | 28.247 | 28.289 | 670 |
| 680 | 28.289 | 28.332 | 28.374 | 28.416 | 28.458 | 28.500 | 28.542 | 28.584 | 28.626 | 28.668 | 28.710 | 680 |
| 690 | 28.710 | 28.752 | 28.794 | 28.835 | 28.877 | 28.919 | 28.961 | 29.003 | 29.045 | 29.087 | 29.129 | 690 |