

DISEÑO DE UNA MICRO PLANTA PARA LA ELABORACIÓN DE FILAMENTOS
UTILIZADOS EN MÁQUINAS DE IMPRESIÓN 3D CON PLÁSTICO RECICLADO

JAVIER ALEXIS GARCÍA LUNA
KEVIN DAYAN CALDERÓN JAIMES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2022

DISEÑO DE UNA MICRO PLANTA PARA LA ELABORACIÓN DE FILAMENTOS
UTILIZADOS EN MÁQUINAS DE IMPRESIÓN 3D CON PLÁSTICO RECICLADO

JAVIER ALEXIS GARCÍA LUNA
KEVIN DAYAN CALDERÓN JAIMES

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director
RICARDO ALFONSO JAIMES ROLÓN
Magister en Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2022

CONTENIDO

	pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	16
2. JUSTIFICACIÓN.	17
3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO.	19
3.1. OBJETIVOS GENERALES.	19
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	19
4. PRELIMINARES.	21
4.1. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN	21
4.2. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS.	21
4.2.1. Alternativa trituradora 1.....	21
4.2.2. Alternativa trituradora 2.....	22
4.2.3. Alternativa trituradora 3.....	23
4.2.4. Alternativa de extrusora 1.	24
4.2.5. Alternativa extrusora 2.	25
4.3. ESPECIFICACIÓN DE ALTERNATIVA GANADORA.	27
4.3.1. Trituradora de bajas revoluciones de un solo eje.....	27
4.3.2. Extrusora mono husillo.....	27
4.4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO COMPLETO.....	27
5. METODOLOGÍA DEL DISEÑO.	29
5.1. DIVISIÓN DE SISTEMAS Y SUB- SISTEMAS.....	29
5.1.1. Trituradora	29
5.1.1.1. Corte móvil	29
5.1.1.2. Corte fijo.....	30

5.1.1.4. Bastidor	31
5.1.1.5. Cribado.....	31
5.1.1.6. Soporte.....	32
5.1.1.7. Potencia y reductor triturador.	33
5.1.2. Extrusora.....	33
5.1.2.1. Sistema de potencia y reductor extrusor.	34
5.1.2.2. Estructura	35
5.1.2.3. Sistema de extrusión.....	36
5.1.2.4. Embobinadora	37
5.1.2.5. Sistema de potencia.....	38
5.1.2.6. Soporte.....	38
5.1.3. Sistema de embobinado	39
5.2. SELECCIÓN SISTEMAS DE POTENCIA	40
5.3. DISEÑO DEL EJE	43
5.4. ANÁLISIS AMEF PARTES DE LA TRITURADORA.....	44
5.4.1. Eje.....	44
5.4.2. Cuchillas	46
5.4.2. Soporte	49
5.5. DIMENSIONAMIENTO TORNILLO EXTRUSOR	52
5.6. ANÁLISIS AMEF PARTES DE LA EXTRUSORA	54
5.7. MODELO DE CALOR EXTRUSORA	56
5.8. ANÁLISIS DE RODAMIENTOS.....	58
5.9. CAMBIO DE GIRO MOTOR	59
5.10. CONTROL DE TEMPERATURA Y SU CONEXIÓN	62

5.11. CONTROL MOTOR PASO A PASO	65
6. CONSTRUCCIÓN.....	67
7. PRUEBAS	81
8. ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO	84
9. RECOMENDACIONES.....	88
10. CONCLUSIONES	89
BIBLIOGRAFÍA.....	90
ANEXOS.....	92

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Vista frontal trituradora de bajas revoluciones de un eje.	22
Figura 2. Vista isométrica trituradora de bajas revoluciones de un eje.	22
Figura 3. Trituradora de dos ejes.	23
Figura 4. Molino con cuchillas de un eje.	24
Figura 5. Extrusora mono husillo.	24
Figura 6. Extrusora mono husillo corte.	25
Figura 7. Extrusora de doble husillo.	26
Figura 8. Extrusora de doble husillo corte.	26
Figura 9. Descripción del proceso.	28
Figura 10. Trituradora renderizada.	29
Figura 11. Corte móvil renderizado.	30
Figura 12. Corte fijo renderizado.	30
Figura 13. Bastidor renderizado	31
Figura 14. Cribado renderizado.	32
Figura 15. Soporte trituradora renderizado.	32
Figura 16. Extrusora renderizada.	34
Figura 17. Motor renderizado.	35
Figura 18. Soporte extrusora renderizado.	36
Figura 19. Sistema de extrusión renderizado	37
Figura 20. Embobinadora renderizada.	37
Figura 21. Transmisión renderizado.	38
Figura 22. Soporte embobinado renderizado.	39
Figura 23. Sistema de embobinado renderizado.	40

Figura 24. Prueba torque manivela.....	42
Figura 25. Secciones del eje de trituración	43
Figura 26. Esfuerzo eje trituración.....	45
Figura 27. Desplazamiento eje trituración.....	46
Figura 28. Factor de seguridad eje trituración.....	46
Figura 29. Esfuerzos cuchilla.....	47
Figura 30. Desplazamientos cuchilla.....	48
Figura 31. Factor de seguridad cuchilla.....	49
Figura 32. Esfuerzos soporte trituradora.....	50
Figura 33. Desplazamiento soporte trituradora.....	51
Figura 34. Factor de seguridad soporte trituradora.....	52
Figura 35. Esfuerzos soporte extrusora.....	54
Figura 36. Desplazamiento soporte extrusora.....	55
Figura 37. Factor de seguridad soporte extrusora.....	55
Figura 38. Sistema de control para modelo de calor.....	56
Figura 39. Resistencias térmicas modelo de calor.....	56
Figura 40. Diámetro tornillo extrusor.....	57
Figura 41. Conexión cambio de giro apagado.....	60
Figura 42. Conexión cambio de giro horario.....	61
Figura 43. Conexión cambio de giro anti horario.....	62
Figura 44. Control XMTG-808.....	63
Figura 45. Conexión resistencias.....	64
Figura 46. Motor paso a paso nema 23.....	65
Figura 47. Diagrama control motor paso a paso.....	66

Figura 48. Eje y cuchillas trituradora.	67
Figura 49. Ensamble de cuchillas con el eje.	68
Figura 50. Materia prima bastidor trituradora.	69
Figura 51. Corte de lamina.	70
Figura 52. Ensamble trituradora sin tolva.	71
Figura 53. Criba en manufactura.	72
Figura 54. Materia prima tolva ...	73
Figura 55. Trituradora ensamblada.	73
Figura 56. Pruebas de triturado	74
Figura 57. Tornillo extrusor con camisa.	75
Figura 58. Broca como tornillo extrusor.	75
Figura 59. Resistencias en camisa	76
Figura 60. Ensamble soporte extrusora.	77
Figura 61. Extrusora ensamblada.	78
Figura 62. Embobinadora	78
Figura 63. Micro planta completa.	79
Figura 64. Autore con la micro planta.	79
Figura 65. Producto final.	80
Figura 66. Nomenclatura motor SEW Eurodrive.	92
Figura 67. Tamaño y tamaño del motor según sus polos trituradora.	92
Figura 68. Numero y tipo de rosca sujeción motor trituradora.	93
Figura 69. Índice de reducción de reductores cilíndricos trituradora.	93
Figura 70. Reductor y ángulo de posición trituradora.	94
Figura 71. Tamaño y tamaño del motor según sus polos extrusora.	94

Figura 72. Numero y tipo de rosca sujeción motor extrusora.....	95
Figura 73. Índice de reducción de reductores cilíndricos extrusora.	95
Figura 74. Reductor y ángulo de posición extrusora.....	96
Figura 75. Diagrama cortante flector.....	97
Figura 76. Diagrama torque eje	98
Figura 77. Propiedades físicas eje.....	99
Figura 78. Dimensiones requeridas del eje.....	99
Figura 79. Datos de cilindros estándares comerciales.....	102
Figura 80. Materiales comunes en extrusoras	110
Figura 81. Ecuaciones en programa EES modelo de calor parte 1.	112
Figura 82. Modelo de calor parte 2.	113
Figura 83. Modelo de calor parte 3.	114
Figura 84. Resultados modelo de calor.	115
Figura 85. Catalogo rodamiento.	116
Figura 86. Vida especificada rodamientos.	116
Figura 87. Viscosidad del aceite vs diametro.....	117
Figura 88. viscosidad aceite vs temperatura.....	118
Figura 89. Selección lubricación.	119
Figura 90. Factor de contaminación.....	120
Figura 91. Vida nominal skf.....	121
Figura 92. Selección catalogo de rodamiento skf.	122
Figura 93. Viscosidad nominal vs diámetro.	124
Figura 94. viscosidad vs temperatura.	125
Figura 95. Condiciones de lubricación	126

Figura 96. viscosidad nominal y r.p.m.....	128
Figura 97. Manual trituradora.....	129
Figura 98. Conexión motor cambio de giro.....	132
Figura 99. Giro motor horario.....	133
Figura 100. Giro motor anti horario.....	133
Figura 101. Manual extrusora.	134
Figura 102. Conexión resistencias y control.	139
Figura 103. Programa EES valor actual a valor futuro.....	141
Figura 104. Resultado años de recuperación inversión.....	141
Figura 105. Ganancias o ahorro después de un año de la amortización.....	142
Figura 106. Catálogo Kalflex Acoplamiento tipo estrella.....	143
Figura 107. Desalineaciones máximas acople.....	144
Figura 108. Catálogo Kalflex Acoplamiento tipo estrella.....	145
Figura 109. Desalineaciones maximas para la extrusora.	146
Figura 110. Características técnicas extrusora.....	147
Figura 111. Especificación correa.....	147

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Parámetros de entrada motor trituradora.....	41
Tabla 2. Especificaciones motor trituradora.....	41
Tabla 3. Parámetros de entrada motor extrusora.	41
Tabla 4. Especificaciones motor extrusora.	42
Tabla 5. Parámetros de entrada diseño eje trituradora.....	43
Tabla 6. Factor de seguridad secciones eje.	44
Tabla 7. Parámetros de entrada diseño tornillo.	53
Tabla 8. Dimensiones tornillo extrusor.....	53
Tabla 9. Datos parámetros críticos.	53
Tabla 10. Parámetros de entrada rodamiento trituradora.	58
Tabla 11. Parámetros de entrada rodamiento extrusora.....	59
Tabla 12. Datos pruebas trituradora con plástico PP Y HDPE.	82
Tabla 13. Datos pruebas extrusión con plástico PP y HDPE.....	83
Tabla 14. Insumos trituradora.	84
Tabla 15. Insumos extrusora.....	85
Tabla 16. Insumos bobinadora.....	86
Tabla 17. Costo energía de producción 4kg de filamento.....	87
Tabla 18. Datos de entrada calculo eje.....	96
Tabla 19. Datos calculados en cada sección de esfuerzos	101
Tabla 20. Factor de seguridad cada sección del eje trituración.	102
Tabla 21. Datos entrada rodamiento trituradora.	115
Tabla 22. Datos entrada rodamiento extrusor.....	122

Tabla 23. Datos entrada acople triturador.....	143
Tabla 24. Datos entrada acople extrusor.	144

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. MOTOR TRITURADORA.....	92
ANEXO B. MOTOR EXTRUSORA.	94
ANEXO C. CÁLCULO DEL EJE	96
ANEXO D. CÁLCULO EXTRUSOR	102
ANEXO E. CALCULO RESISTENCIAS.....	112
ANEXO F. SELECCIÓN DE RODAMIENTOS.....	115
ANEXO G. MANUAL TRITURADOR	128
ANEXO H. MANUAL EXTRUSOR.....	134
ANEXO I. TÉCNICO ECONOMICO.....	141
ANEXO J. SELECCIÓN DE ACOPLER	142
ANEXO K. SELECCIÓN DE CORREA.....	146

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO DE UNA MICRO PLANTA PARA LA ELABORACION DE FILAMENTOS UTILIZADOS EN MAQUINAS DE IMPRESIÓN 3D CON PLASTICO RECICLADO

AUTOR: JAVIER ALEXIS GARCIA LUNA, KEVIN DAYAN CALDERÓN JAIMES.

PALABRAS CLAVE: Transferencia de calor, impresión 3D, reciclaje de plásticos, extrusora, trituradora, bobinadora.

DESCRIPCIÓN: En el mundo el incremento de uso de plásticos es exponencial, acarreando con esto contaminación en el medio ambiente, afectando la fauna y la flora de forma directa, debido a su uso irresponsable y mal almacenamiento de basuras. Por este motivo se realiza la construcción de una micro planta con sus respectivos cálculos como alternativa económica, donde su principal objetivo es la reutilización de plástico reciclado como lo son el polipropileno y el polietileno de alta densidad, hasta un producto final que es un filamento, el cual es aprovechado para la fabricación de piezas por medio de una impresora 3D. Esta micro planta está compuesta principalmente por 3 máquinas. La primera es una trituradora donde las cuchillas móviles chocan con las cuchillas fijas cortando el plástico hasta llevarlo a un tamaño deseado para poder extruirlo. La segunda es la extrusora que, por medio de un tornillo extrusor en rotación y calor generado por unas resistencias, transforman este material en filamento que pasa a través de una boquilla con un diámetro específico. Por último, este filamento es llevado de manera sincrónica a través de un carrete que es girado por un motor paso a paso para su almacenamiento. Finalmente se obtuvieron los resultados esperados de producción de la planta en kg/h tanto de material triturado como de filamento extruido y se analizó la viabilidad técnico-económica al producir 4kg/h de filamento, el cual se recupera su inversión en 23 meses.

SUMMARY

TITLE: DESIGN OF A MICRO PLANT FOR THE MANUFACTURE OF FILAMENTS USED IN 3D PRINTING MACHINES WITH RECYCLED PLASTIC.

AUTHOR: JAVIER ALEXIS GARCIA LUNA, KEVIN DAYAN CALDERÓN JAIMES.

KEY WORDS: Heat transfer, 3D printing, plastic recycling, extruder, shredder, winder.

DESCRIPTION: In the world the increase in the use of plastics is exponential, causing pollution in the environment, affecting the fauna and flora in a direct way, due to its irresponsible use and bad waste storage. For this reason, the construction of a micro plant with its respective calculations is carried out as an economic alternative, where its main objective is the reuse of recycled plastic such as polypropylene and high density polyethylene, to a final product which is a filament, which is used for the manufacture of parts by means of a 3D printer. This micro plant is mainly composed of 3 machines. The first one is a shredder where the moving blades collide with the fixed blades cutting the plastic until it reaches the desired size to be extruded. The second is the extruder which, by means of a rotating extruder screw and heat generated by resistors, transforms this material into filament that passes through a nozzle with a specific diameter. Finally, this filament is carried synchronously through a spool that is rotated by a stepper motor for storage. Finally, the expected production results of the plant were obtained in kg/h of both shredded material and extruded filament and the technical-economic feasibility was analyzed by producing 4kg/h of filament, which recovers its investment in 23 months.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En la sociedad actual debemos tomar hábitos de reciclaje, ya que con el aumento de la población han crecido significativamente los índices de contaminación y el plástico es uno de los focos de contaminación más grandes que existen, principalmente en los mares. Esto trae fuertes afectaciones a la salud de las personas y en general a los seres vivos.

En los océanos se encuentran gran cantidad de plástico, para el 2050 se calcula que habrá 32 millones de toneladas lo cual se traduce que habrá más plástico que peces en términos de peso.

Existen plásticos clasificados como termoplásticos, los cuales son los que se usan en botellas de agua, envases para líquidos de aseo, tapas de las botellas, etc. (PET, HDPE, ABS, PP entre otros).

Por esta razón se plantea el diseño de una micro planta para la elaboración de filamentos utilizados en máquinas de impresión 3D y así reducir la contaminación dándole un nuevo uso a los plásticos.

2. JUSTIFICACIÓN.

La producción de plástico es de 360 millones de toneladas en el mundo y 1.2 millones de toneladas en Colombia. Según EL TIEMPO el Mediterráneo recibe cada año casi 230.000 toneladas de desechos plásticos, esta cifra podría duplicarse para el 2040 si no se toman medidas adecuadas. El tiempo de degradación del plástico está entre los 150 a 1000 años generando contaminación y afectaciones en el medio ambiente. Por lo tanto, se debe buscar la manera de reutilizar los plásticos.

Los filamentos para las impresoras 3D pueden ser elaborados de diversos materiales, esto hace que tenga distintos comportamientos y características según sea su material, algunos de sus materiales son los plásticos como PET, HDPE, PLA, PETG y ABS. La mayoría de los productos que se encuentran en el mercado están fabricados de PET y HDPE, entonces, para generar filamentos usados en impresoras 3D estos plásticos se pueden triturar para formar pellets y posteriormente extruirlos, gracias a lo anterior se contribuye a la reutilización de los plásticos y evitar que estos contaminan aún más el ecosistema donde acaparan los residuos de plástico.

Las impresiones 3D tienen muchas aplicaciones tanto en la vida cotidiana como en el campo de la ingeniería. Estas aplicaciones abarcan prototipos, estructuras, piezas, objetos decorativos, entre otros. Por lo tanto, es necesario una micro planta para la fabricación de los filamentos utilizados en las impresoras 3D. Esta es una alternativa económica y ecológica para contribuir a la reutilización de los plásticos, además de participar en la formación académica de los estudiantes de ingeniería mecánica al dar una perspectiva real de cómo funciona un proceso de transformación de materia prima y analizar el mecanismo de cada máquina de la micro planta.

El proyecto se centra en el reciclado de los plásticos más comunes como lo son el PET, ABS Y HDPE, por lo tanto, la micro planta estará optimizada en la extrusión de cada plástico, ya que los plásticos tienen que operarse bajo diferente temperatura según sea su tipo y así poder realizar el proceso de fabricación de filamentos de una manera adecuada y eficiente.

3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO.

3.1. OBJETIVOS GENERALES.

Contribuir a la misión de la escuela ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander aportando conocimiento de investigación y desarrollo en el diseño de una micro planta para la elaboración de filamento usado en impresoras 3D a base de plástico reciclado.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Diseñar en detalle una micro planta que cuenta con los siguientes sistemas:

- Sistema de trituración por cuchillas de un solo eje con una capacidad de 4-7kg/hora de plástico.
- Sistema de extrusión cilindro-tornillo con control de temperatura en el cilindro calefactor y una capacidad de extruir filamento de 1.75 mm de diámetro con una capacidad de 0.1-3 kg/hora de plástico.
- Sistema de embobinado en carretes para almacenar la capacidad de 0.1-3 kg/h de plástico.

Validar el diseño mediante la construcción de un prototipo a escala real y verificar la producción continua de los procesos de trituración, extrusión y embobinado.

Elaborar un manual para el uso adecuado y la capacidad de carga de cada sistema de la micro planta.

Establecer la viabilidad técnico-económica de la producción del filamento en la micro planta.

4. PRELIMINARES

4.1. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

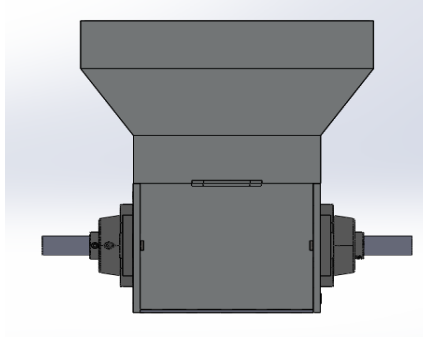
El reciclado en el mundo necesita tener un impulso para que varias personas quieran hacerlo, para esto se debe implementar una manera llamativa para atraer la atención de las personas. Por esto se dispone a realizar una micro planta de filamentos de plástico reciclado para usarlo en una máquina 3D, ya que con esto se pueden realizar tanto piezas funcionales como manualidades para entretenimiento y así la micro planta pueda ayudar a que el plástico que termina en los océanos y la naturaleza sea aprovechado de una manera útil.

4.2. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS.

4.2.1. Alternativa trituradora 1.

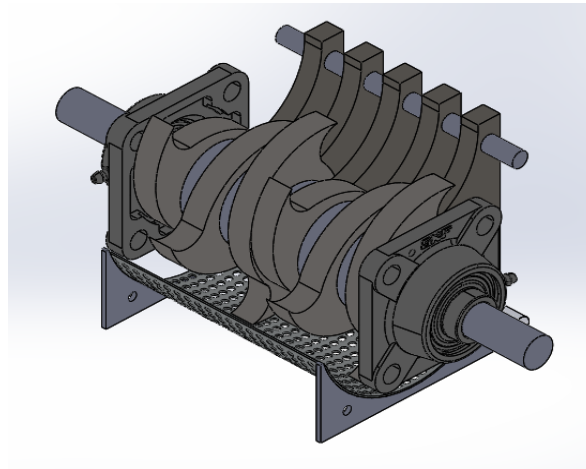
Trituradora de bajas revoluciones de un eje (figura 7 y 8), es una máquina que ofrece unas dimensiones reducidas, bajo ruido de trabajo y menos consumo de energía. Estos molinos de bajas revoluciones permiten triturar materiales termoplásticos sin que estos se lleguen a degradar o convertirse en polvo, la criba determina su tamaño. Este molino posee la herramienta de molienda dado por su geometría como se muestra en la figura 8.

Figura 1. Vista frontal trituradora de bajas revoluciones de un eje.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Vista isométrica trituradora de bajas revoluciones de un eje.



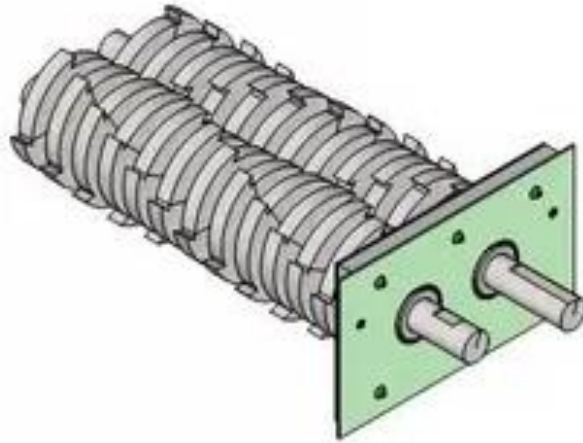
Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Alternativa trituradora 2.

Trituradora de bajas revoluciones de dos ejes (figura 9), esta máquina ofrece un bajo ruido de trabajo, pero ocupa más espacio que la alternativa 1. también debe tener una buena disipación de calor para que el material no se funda y genere inconvenientes en el proceso, la criba determina su tamaño. Este molino posee el

mismo principio de molienda que la alternativa 1 pero con dos ejes móviles como se puede observar en la figura 9.

Figura 3. Trituradora de dos ejes.

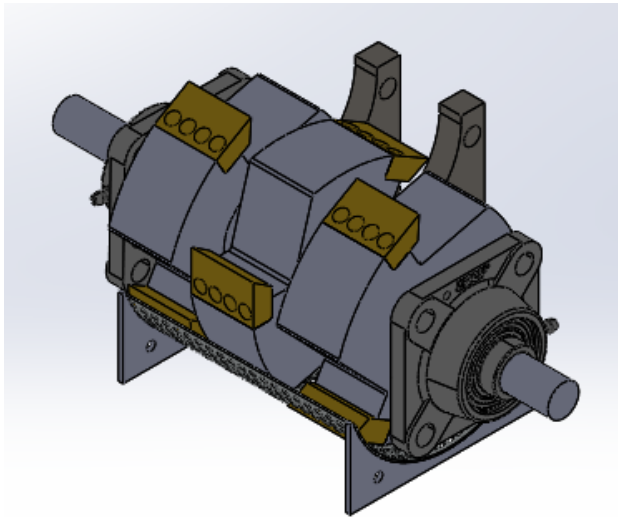


Fuente: Pinterest. Argentina. Consulta: 7 de noviembre 2021. Disponible en:
<https://ar.pinterest.com/pin/741545894880510775/>

4.2.3. Alternativa trituradora 3.

Trituradora de cuchillas, este tipo de trituradora se puede usar para triturar materiales sensibles a la temperatura como son los termoplásticos, este proceso se hace por cizallamiento y la criba determina su tamaño. Este tipo consume más energía y más ruido que la alternativa 1 y 2. Como podemos observar en la figura 10 la herramienta porta unas cuchillas que realizan la molienda.

Figura 4. Molino con cuchillas de un eje.

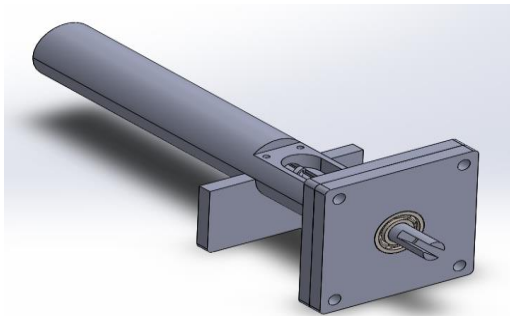


Fuente: Elaboración propia.

4.2.4. Alternativa de extrusora 1.

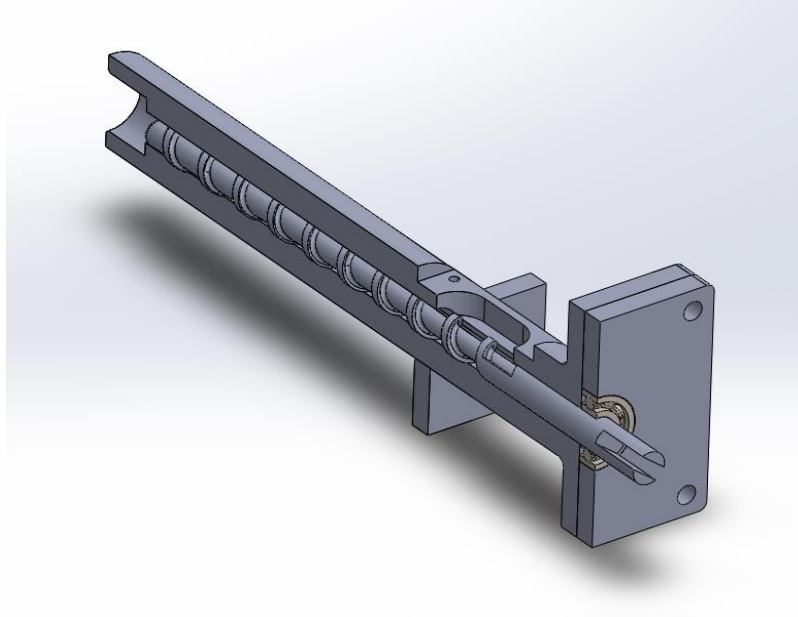
Mono husillo, como su nombre lo indica tiene únicamente un solo tornillo de extrusión, es la más común en el mercado teniendo buenos resultados al compactar y transportar el plástico hacia la boquilla.

Figura 5. Extrusora mono husillo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Extrusora mono husillo corte.

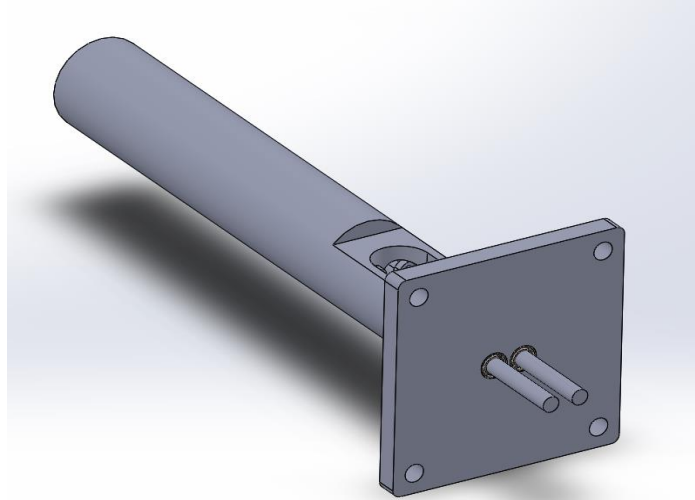


Fuente: Elaboración propia.

4.2.5. Alternativa extrusora 2.

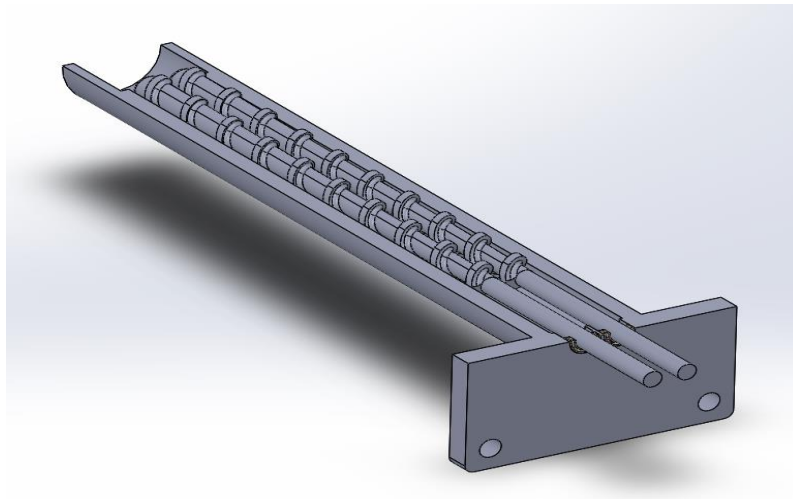
Multihusillo, poseen más de un tornillo. Estos pueden ser de giro paralelo o contrario y también se pueden clasificar según su grado de penetración. Este tipo de extrusora tiene mejor capacidad de mezclado y distribución del material, así como buen control de residencia y distribución. Como desventaja está su alto costo en comparación al mono husillo y es difícil predecir sus prestaciones.

Figura 7. Extrusora de doble husillo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8. Extrusora de doble husillo corte.



Fuente: Elaboración propia.

4.3. ESPECIFICACIÓN DE ALTERNATIVA GANADORA.

4.3.1. Trituradora de bajas revoluciones de un solo eje.

La trituradora de bajas revoluciones de un solo eje tiene como característica baja velocidad y alto par. Los beneficios son menos desgaste, menos ruido, mínimo polvo, menos consumo de energía. Estas trituradoras se alimentan por motores con una potencia desde 2 HP y con velocidades de 20 a 130 RPM, además de tener la capacidad de girar en sentido contrario.

4.3.2. Extrusora mono husillo.

Esta máquina de un solo tornillo de extrusión es la más común en el mercado, con un rendimiento bastante bueno. Se caracteriza por el un costo menor en comparación a la de múltiples husillos, menor consumo energético y mayor facilidad de instalación y mantenimiento.

4.4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO COMPLETO.

Con el fin de extraer filamento para impresoras 3D, se implementa una micro planta la cual consta de tres sistemas, sistema para triturar 4-7kg/hora de plástico reciclado PET, HDPE, ABS, PP entre otros, el motor de la trituradora cuenta con cambio de giro para evitar atascos y causar daños. Luego obtenido el triturado de plástico reciclado lo ingresamos a la extrusora que calienta el plástico para convertirlo en filamento, está extrusora tiene una capacidad de extrusión de 0.1-3 kg/hora y necesita un control de temperatura para poder setear la temperatura de los diferentes plásticos a utilizar, al mismo tiempo que se extrae el filamento una

máquina embobina el material en carretes a una velocidad de 0.1-3 kg/hora para así culminar el proceso de la micro planta. Este proceso no es continuo entre la trituradora y la extrusora, ya que existe un bache al recoger el plástico triturado para ingresarlo a la extrusora, luego entre la extrusora y embobinadora hay sincronía ya que entre estos dos si hay continuidad.

Figura 9. Descripción del proceso.



Fuente: Elaboración propia.

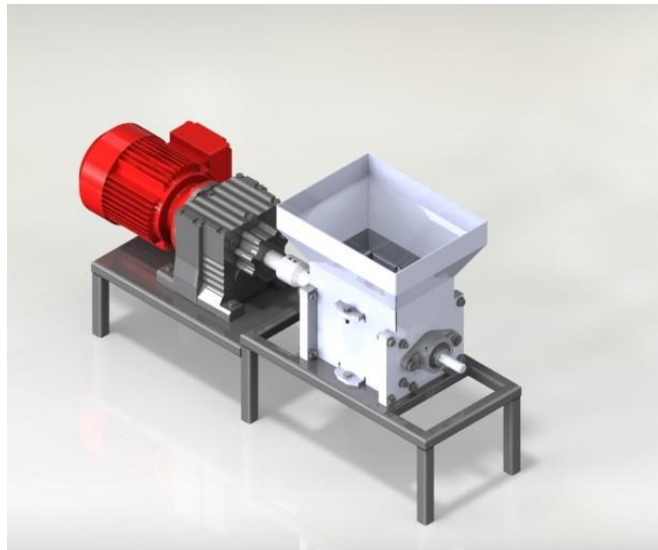
5. METODOLOGÍA DEL DISEÑO.

5.1. DIVISIÓN DE SISTEMAS Y SUB- SISTEMAS

5.1.1. Trituradora

Este sistema se encarga de transformar el plástico de un tamaño mayor a un tamaño más compacto. Este tamaño es el requerido para poder ingresarlo a la extrusora.

Figura 10. Trituradora renderizada.



Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.1. Corte móvil

El subsistema corte móvil es muy importante, es aquel al que se le transmite la potencia del motor para poder generar corte necesario para triturar el plástico, consta de elementos tales como son: el eje, chumaceras, separadores de cuchillas y bujes para su adecuada rotación.

Figura 11. Corte móvil renderizado.

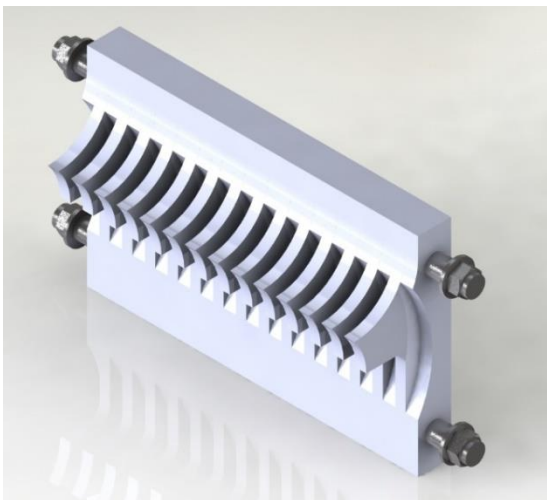


Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.2. Corte fijo

El subsistema de corte fijo complementa al corte móvil, ya que es parte fundamental para el proceso de triturado, ya que el plástico choco entre las cuchillas móviles y las cuchillas fijas.

Figura 12. Corte fijo renderizado.

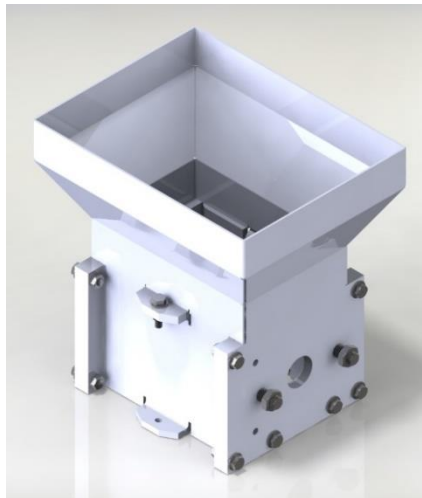


Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.4. Bastidor

El subsistema de bastidor cumple la función de mantener fija las piezas, este bastidor va sujeto a una mesa mediante pernos para evitar que se gire. Este subsistema debe estar correctamente apretado ya que se debe evitar cualquier movimiento del eje móvil de forma axial y pueda chocar con las cuchillas fijas generando fallas perjudiciales para todo el sistema.

Figura 13. Bastidor renderizado.

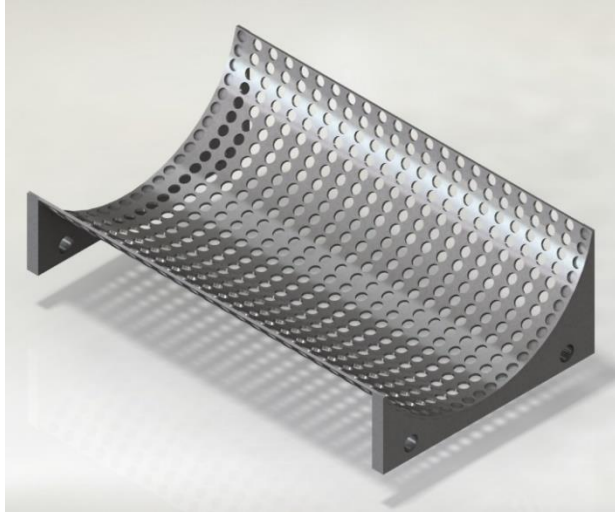


Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.5. Cribado

El subsistema de cribado nos dimensiona el producto de la trituración, entre más pequeño se necesite más tiempo de trituración va a tomar, ya que debe seguir triturando hasta el tamaño deseado.

Figura 14. Cribado renderizado.



Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.6. Soporte

El subsistema de soporte nos sostiene todos los subsistemas anteriores, este debe ser lo más rígido posible para evitar los movimientos que generen ruidos no deseados por la vibración que se genera al triturar.

Figura 15. Soporte trituradora renderizado.

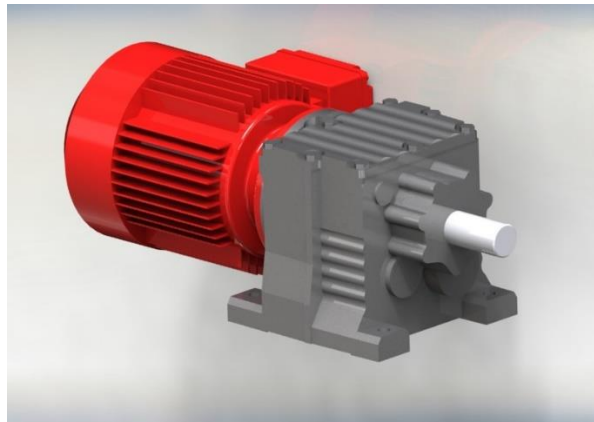


Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.7. Potencia y reductor triturador.

Este subsistema es el encargado de convertir la energía eléctrica a energía mecánica, nos proporciona la potencia para poder transmitirlo a las cuchillas, debido a que estos motores giran a gran velocidad es necesario implementar un sistema para reducir sus rpm por lo cual se opta por un reductor quedando así un motorreductor a una velocidad baja para poder triturar.

Figura 16. Motorreductor renderizado.

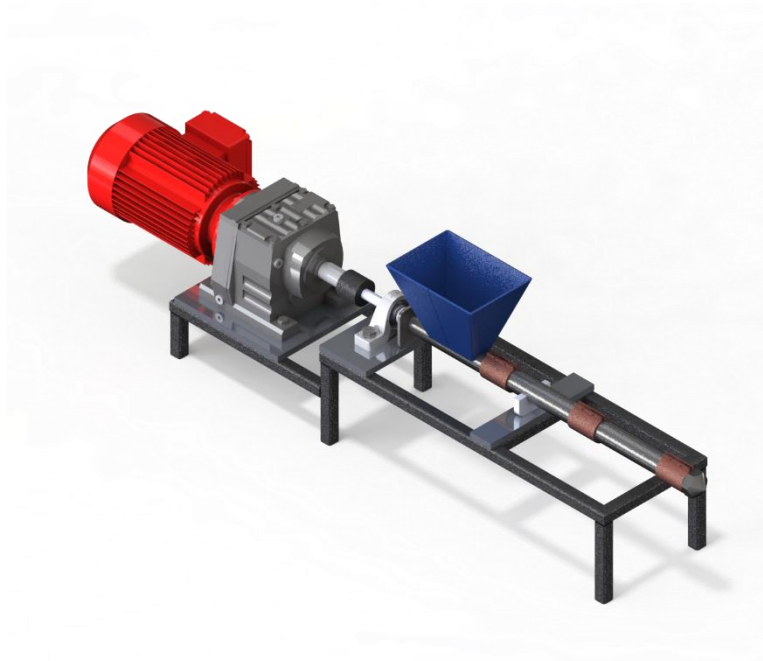


Fuente: Elaboración propia.

5.1.2. Extrusora

Es la maquina encargada de transformar el plástico previamente triturado por medio de calor, en filamento con un diámetro específico.

Figura 17. Extrusora renderizada.

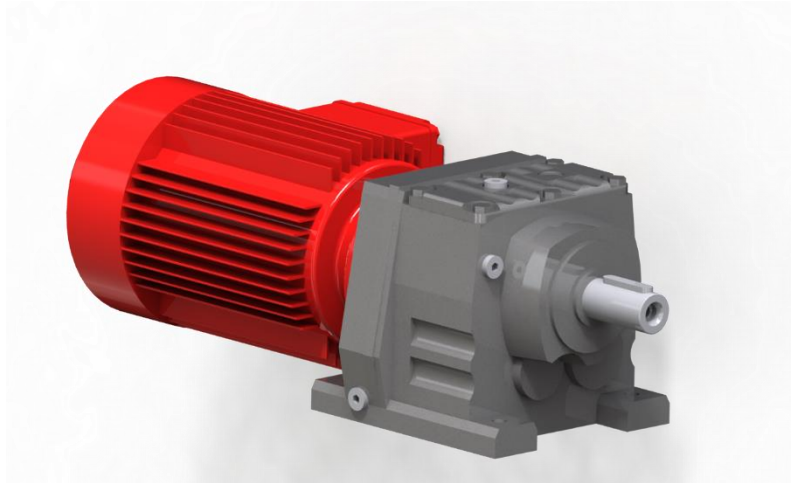


Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.1. Sistema de potencia y reductor extrusor.

Es el encargo de transmitir el torque necesario para desplazar el plástico caliente y la velocidad angular para tener un flujo específico de filamento.

Figura 18. Motor renderizado.



Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.2. Estructura

La función de la estructura o soporte es mantener de manera rígida y unida todos los componentes de la máquina, como lo son el motor y la extrusora.

Figura 19. Soporte extrusora renderizado..



Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.3. Sistema de extrusión

Este subsistema calienta el plástico triturado por medio de unas resistencias tipo abrazadera que están fijadas al cañón. Al alimentarse la tolva, el tornillo extrusor desplaza el material a lo largo de la camisa, saliendo con una sección constante debido a la boquilla.

Figura 20. Sistema de extrusión renderizado

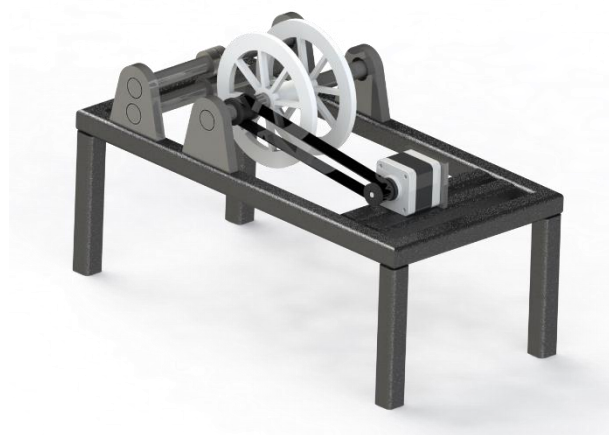


Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.4. Embobinadora

Su principal función es tomar el filamento de plástico caliente y embobinarlo en un carrete para su almacenamiento

Figura 21. Embobinadora renderizada.



Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.5. Sistema de potencia

Este sistema es el encargado de transmitir la potencia del motor al eje donde se encuentra el carrete de embobinado, por medio de poleas y correa.

Figura 22. Transmisión renderizado.



Fuente: Elaboración propia.

5.1.2.6. Soporte

Se encarga de mantener todas las piezas firmes para su correcto funcionamiento

Figura 23. Soporte embobinado renderizado.



Fuente: Elaboración propia.

5.1.3. Sistema de embobinado

El filamento sale de la extrusora y pasa por el sistema de embobinado para llevarlo a un diámetro específico por medio de rodillos, a la vez que se envuelve alrededor de un carrete. La velocidad a la que se embobina debe estar sincronizada con la velocidad de extrusión.

Figura 24. Sistema de embobinado renderizado.



Fuente: Elaboración propia.

5.2. SELECCIÓN SISTEMAS DE POTENCIA

POTENCIA DE DISEÑO

$$Pot_m = \frac{E_{cizalla} * N}{\eta_T * T}$$

Para la energía de cizallamiento se utiliza la resistencia al corte y el área

$$E_{cizalla} = 15000 \frac{J}{m^2} * 0.0182 m^2$$

$$E_{cizalla} = 273 J$$

$$Pot_m = \frac{273 J * 1.3}{0.30 * 1 s} = 1183 \text{ watts} = 1.59Hp \approx 2 Hp$$

Comparando con trituradoras de baja capacidad de triturado esta potencia concuerda con las especificaciones que están en el mercado.

En la tabla 1 se tiene los parámetros de entrada para la selección del motor.

Tabla 1. Parámetros de entrada motor trituradora.

Potencia motor	RPM sistema	RPM motor	Torque
2 Hp	272 RPM	1800 RPM	54 N*m

Fuente: Elaboración propia.

Luego de obtener los parámetros de entrada se busca un motor con su respectivo reductor del catálogo SEW EURODRIVE como se puede apreciar en el anexo A.

El motor tiene las siguientes especificaciones:

Tabla 2. Especificaciones motor trituradora

Especificación reductor	Especificación motor	Índice de reducción	RPM reductor	N° de polos
R27	DT90L4	6,59	272 RPM	4

Fuente: Elaboración propia.

Para la extrusora es necesario un motor con los siguientes datos de entrada.

Tabla 3. Parámetros de entrada motor extrusora.

Potencia motor	RPM sistema	RPM motor	Torque
1/2 Hp	15-90 RPM	1800 RPM	30 N*m

Fuente: Elaboración propia.

Luego de obtener los parámetros de entrada se busca un motor con su respectivo reductor del catálogo SEW EURODRIVE como se puede apreciar en el anexo B.

El motor tiene las siguientes especificaciones:

Tabla 4. Especificaciones motor extrusora.

Especificación reductor	Especificación motor	Índice de reducción	RPM reductor	N° de polos
R37	DT80K4	20	90 RPM	4

Fuente: Elaboración propia.

Este motor podría ser reemplazado por una manivela, si se requiere bajar costos, se hizo prueba de cuanta fuerza se puede hacer y cuantas revoluciones por minuto se puede generar. En la figura 26 se tomó dato de cuantos kgf puede se puede hacer con un brazo que es de un aproximado 20 kgf.

Figura 25. Prueba torque manivela.



Fuente: Elaboración propia.

Haciendo un cálculo sencillo,

$$30 Nm = 20kgf * 9,81 \frac{m}{s^2} * x$$

Donde x es la longitud de la manivela.

Despejando se tiene que la longitud de la manivela debe ser de 0.15. Se optó por realizar una manivela de 20 cm para que el proceso sea más sencillo y menos

agotador. También se estableció que se puede dar un aproximado de 30 rpm que está en el rango requerido para la producción especificada.

5.3. DISEÑO DEL EJE

Tabla 5. Parámetros de entrada diseño eje trituradora.

Potencia motor	RPM sistema	Fuerza de corte	Torque
2 Hp	272 RPM	360 N	18 N*m

Fuente: Elaboración propia.

Siendo la fuerza de corte 1080 N se asume que esta se reparte en 3 cuchillas con una carga de 360 N que están actuando al mismo tiempo con el plástico y las cuchillas fija.

Con las dimensiones del eje, las cargas y los torques debido a la excentricidad de la fuerza en las cuchillas, se realizó la estática, el diagrama de esfuerzo cortante y momento resultantes. Con los esfuerzos en cada una de las secciones se halló el factor de seguridad de cada una de ella por el criterio de falla de Soderberg Mohr.

Figura 26. Secciones del eje de trituración .



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6. Factor de seguridad secciones eje.

SECCION	N
B	16,05
C	20,49
D	10,84
E	12,43
F	2,64
G	2,74

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo como resultado un factor de seguridad mínimo de 2.64 con un acero AISI/SAE 1020 Laminado en caliente.

Para más detalles de cálculo revisar anexo C.

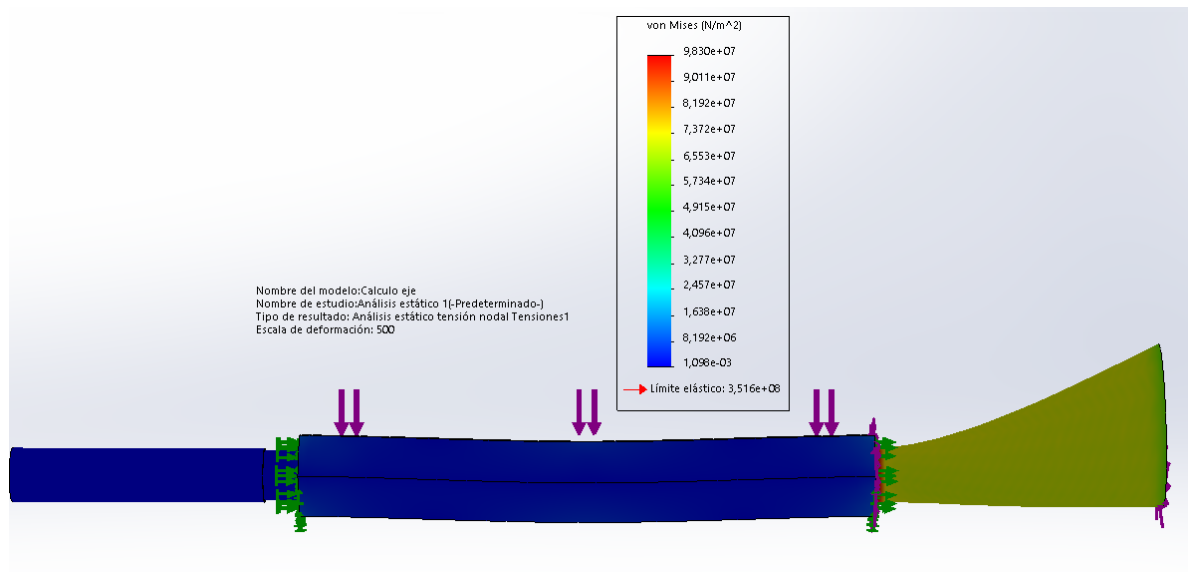
5.4. ANÁLISIS AMEF PARTES DE LA TRITURADORA

5.4.1. Eje

Se analizó por medio de software el eje de la trituradora suponiendo que están actuando 3 cuchillas, esto se traduce a 3 fuerzas puntuales con su respectivo torque, también se tiene en cuenta el torque que genera el acople que lo transmite desde el motor. Como se pudo apreciar el material seleccionado es un acero AISI/SAE 1020.

En la figura 28 se puede apreciar el esfuerzo al que es sometido el eje. El cual su parte con mayor esfuerzo está ubicado donde se genera el torque transmitido por el motor.

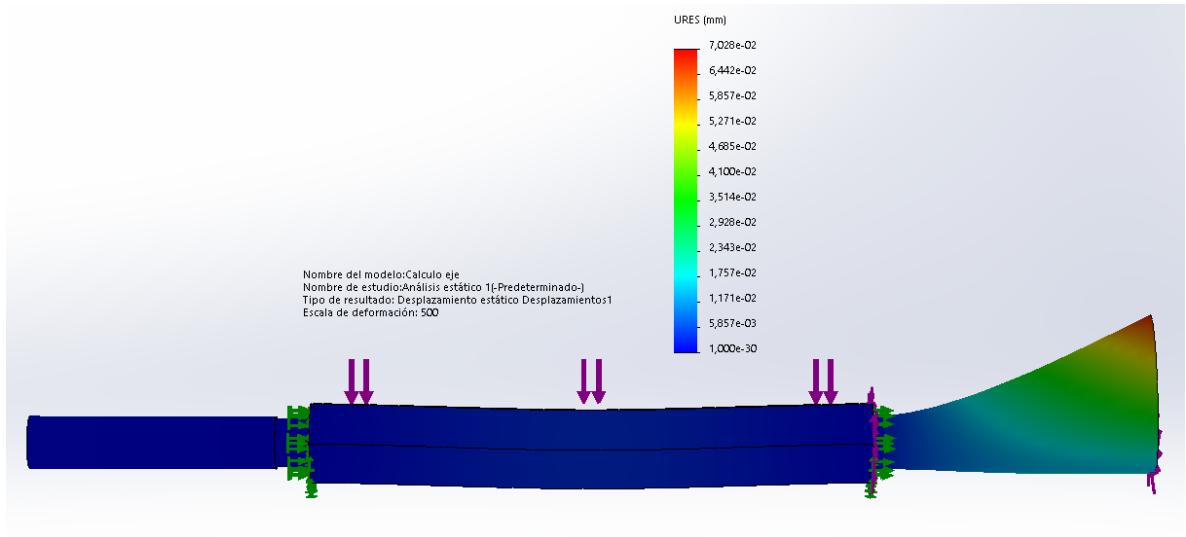
Figura 27. Esfuerzo eje trituración.



Fuente: Elaboración propia.

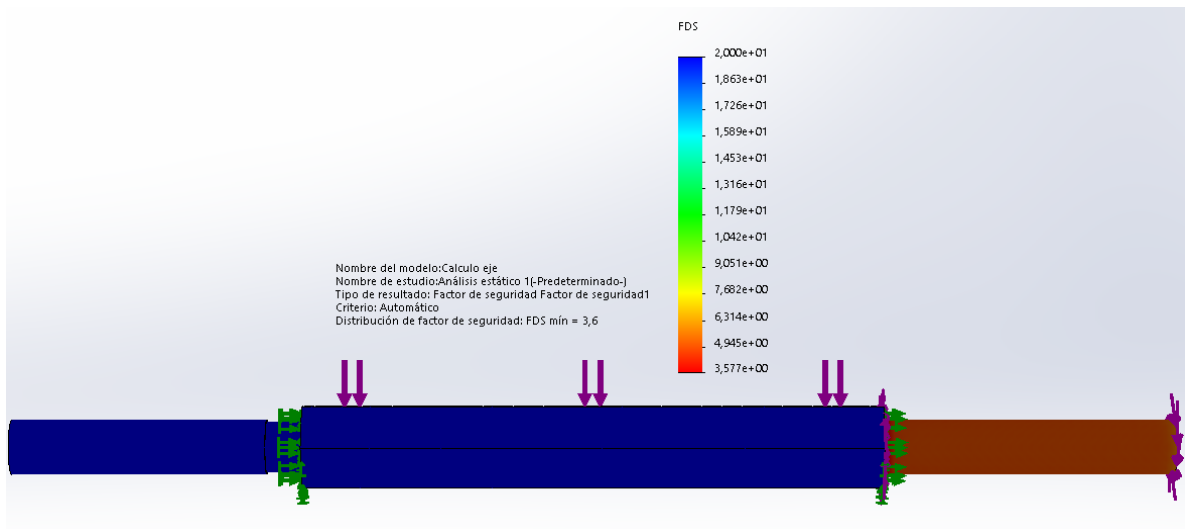
Se analizó el desplazamiento y se encuentra su zona crítica en la aplicación del torque con un valor de 0.07 mm, así como en su cambio de sección como se muestra en la figura 29 la parte donde están ubicadas las cuchillas se genera un desplazamiento menor. Concluyendo que el eje no va a sufrir en el funcionamiento de trituración.

Figura 28. Desplazamiento eje trituración.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 29. Factor de seguridad eje trituración.



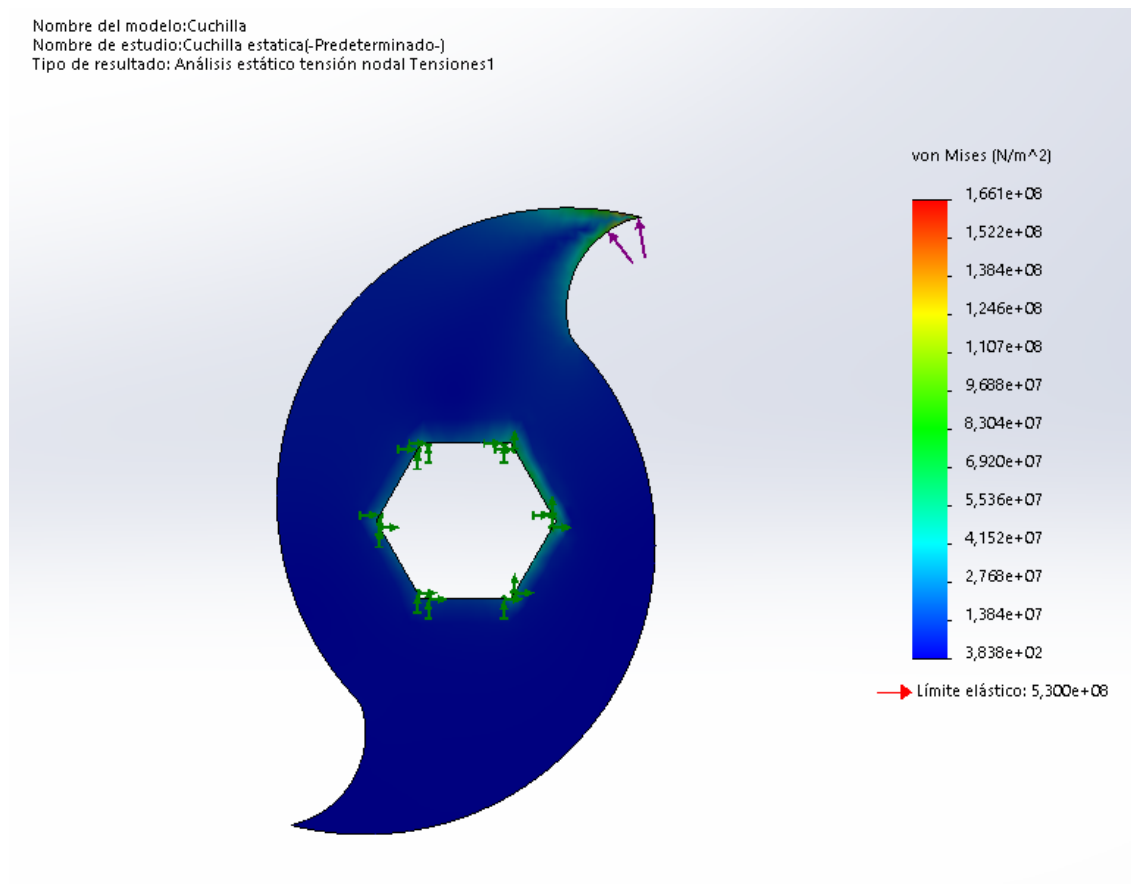
Fuente: Elaboración propia.

5.4.2. Cuchillas

Para el análisis por método de elementos finitos para la cuchilla para la cual tiene un apoyo fijo en su corte hexagonal y la fuerza de corte que se genera al contacto con el plástico a triturar. El material de la cuchilla se utilizó un AISI 1045 y también es recomendable usar un AISI 304 para evitar corrosión o acero anti-desgaste MAXDUR 450-500.

Como podemos ver en la figura 31 Su esfuerzo máximo se encuentra en el extremo de la cuchilla donde se produce el proceso de corte con el plástico.

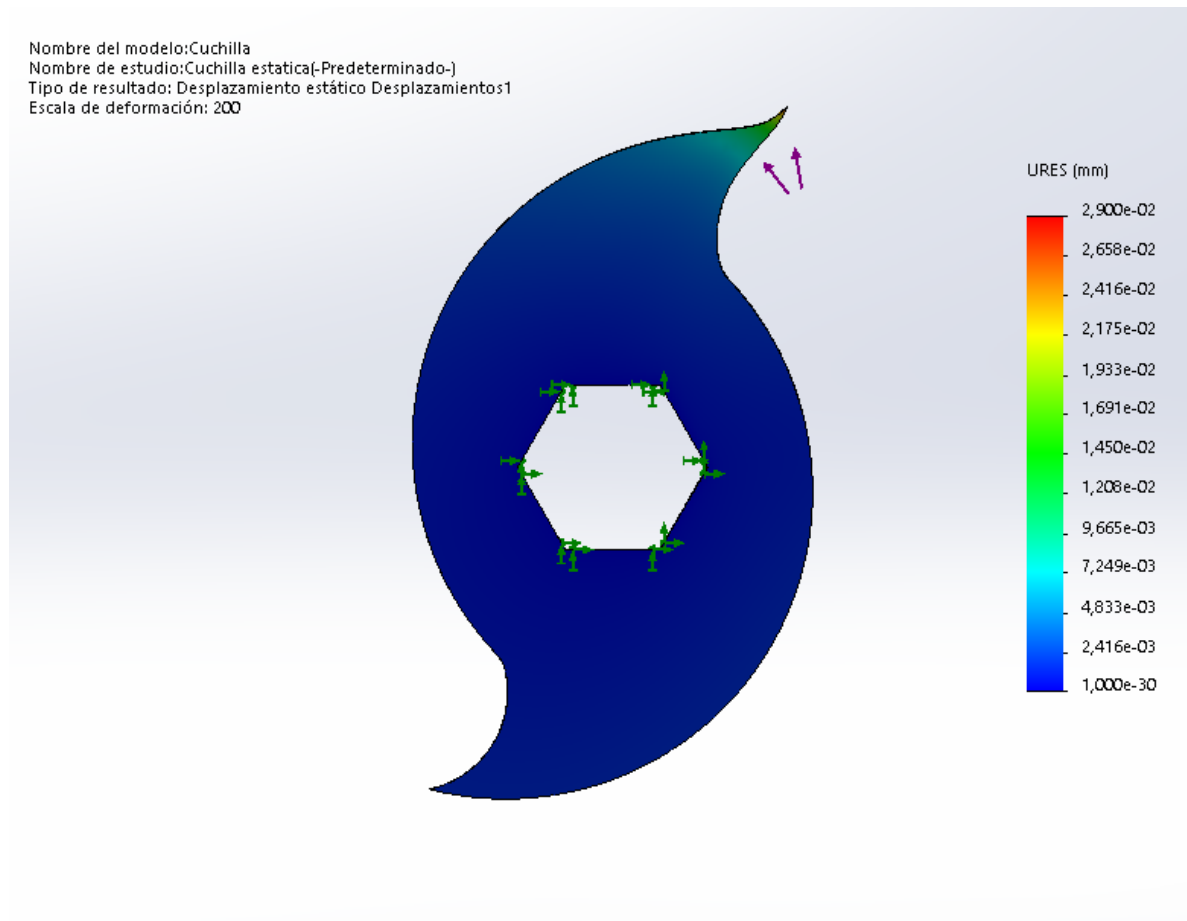
Figura 30. Esfuerzos cuchilla.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 32 podemos corroborar que su desplazamiento máximo sucede en el extremo de la cuchilla y es de 0.02 mm. Este desplazamiento es más que aceptable para su funcionamiento.

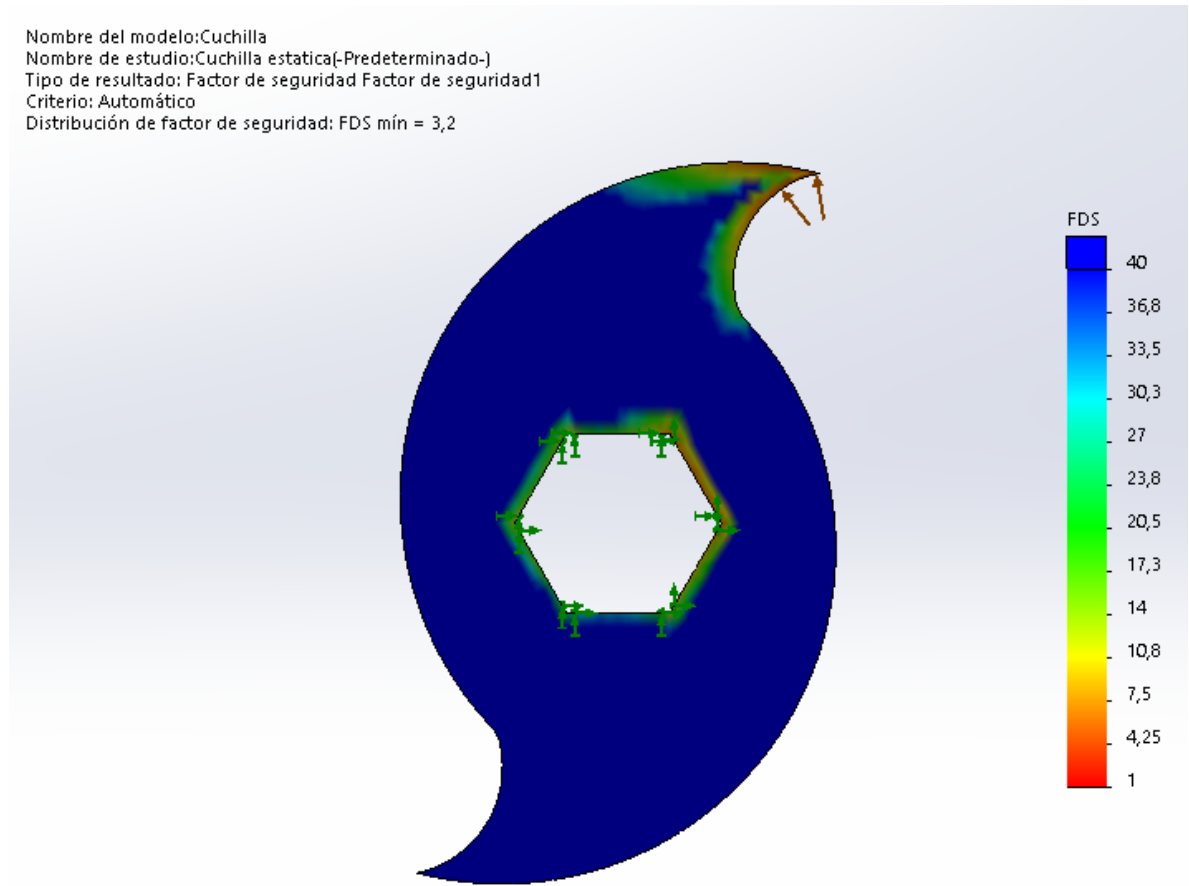
Figura 31. Desplazamientos cuchilla.



Fuente: Elaboración propia.

Para el análisis de factor de seguridad se tiene como zonas críticas la punta y su agarre con respecto al eje. Este factor mínimo es de 3.2 el cual se encuentra en el extremo de la cuchilla y luego en el agarre su factor de seguridad es de 14. estos valores son óptimos para su uso el cual es triturar plástico y no genera problema alguno.

Figura 32. Factor de seguridad cuchilla.

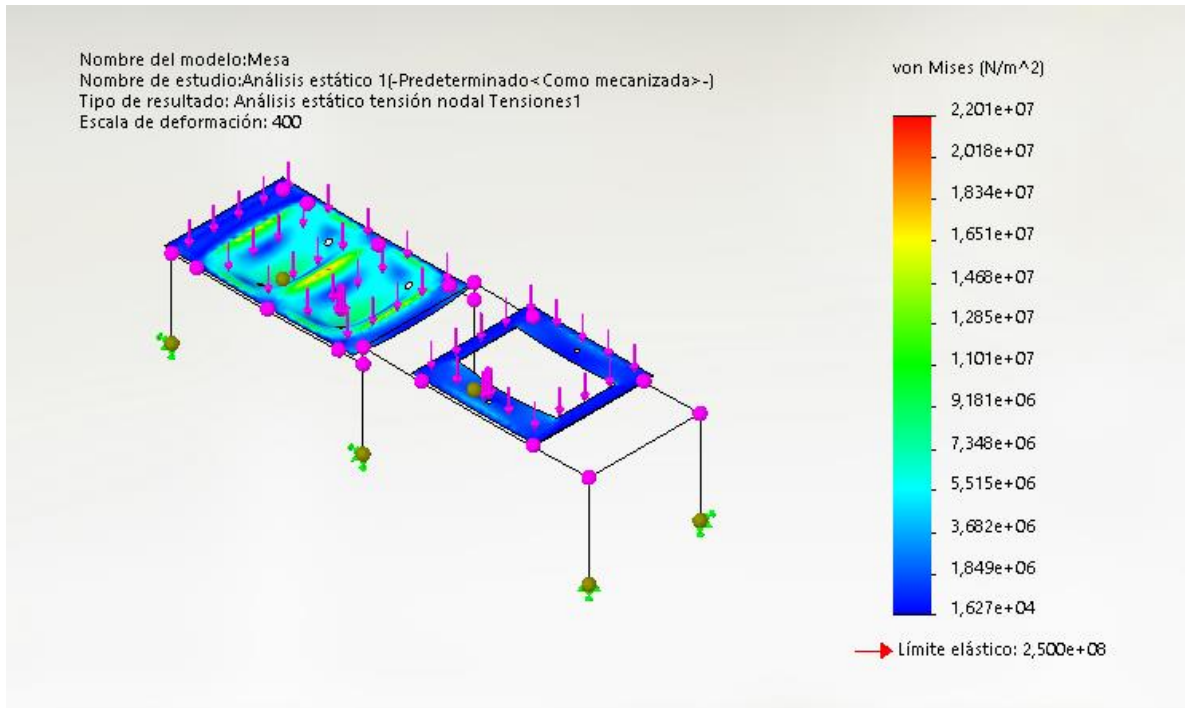


Fuente: Elaboración propia.

5.4.2. Soporte

El análisis para la mesa que soporte tanto el motor como la trituradora se puede observar en la figura 34.

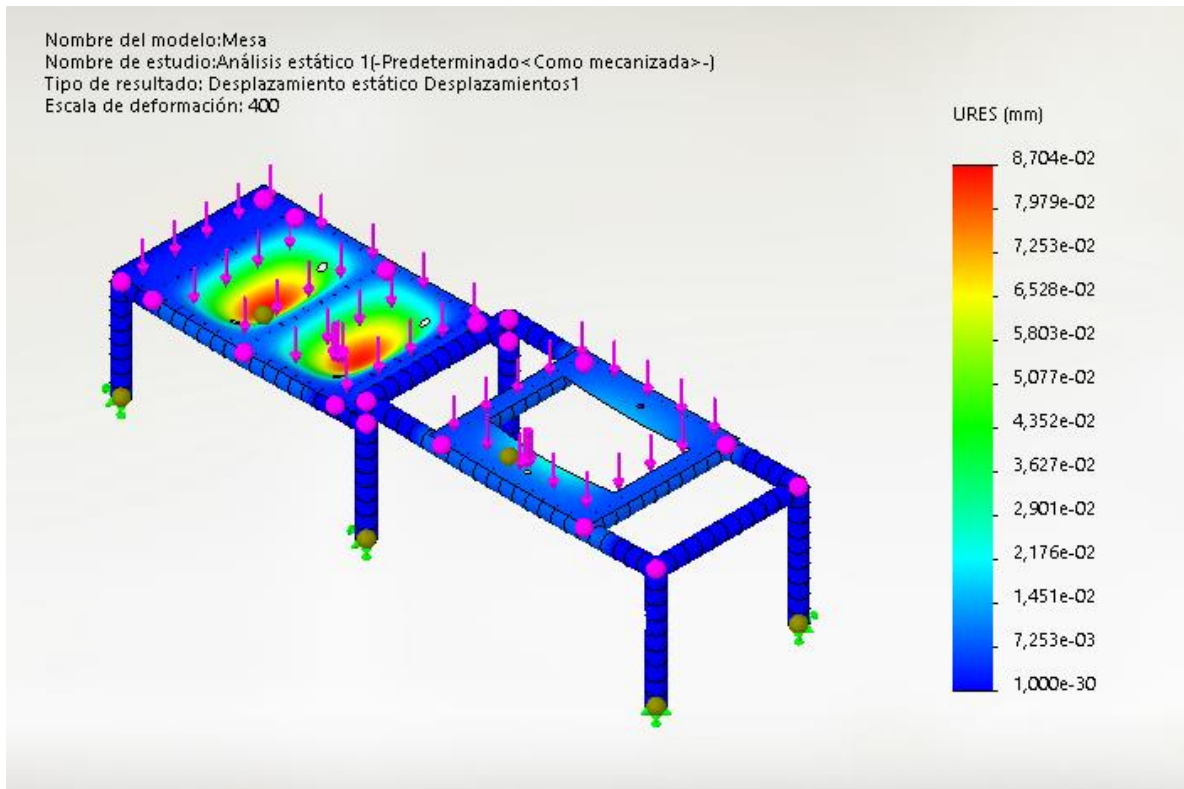
Figura 33. Esfuerzos soporte trituradora.



Fuente: Elaboración propia.

El desplazamiento máximo de nuestro soporte se encuentra en la mitad de la mesa en el espacio entre motor y trituradora y su valor es de 0.087 mm, si este desplazamiento fuera mayor su solución sería agregar un tubo cuadrado como viga en esa sección y evitar mayor flexión.

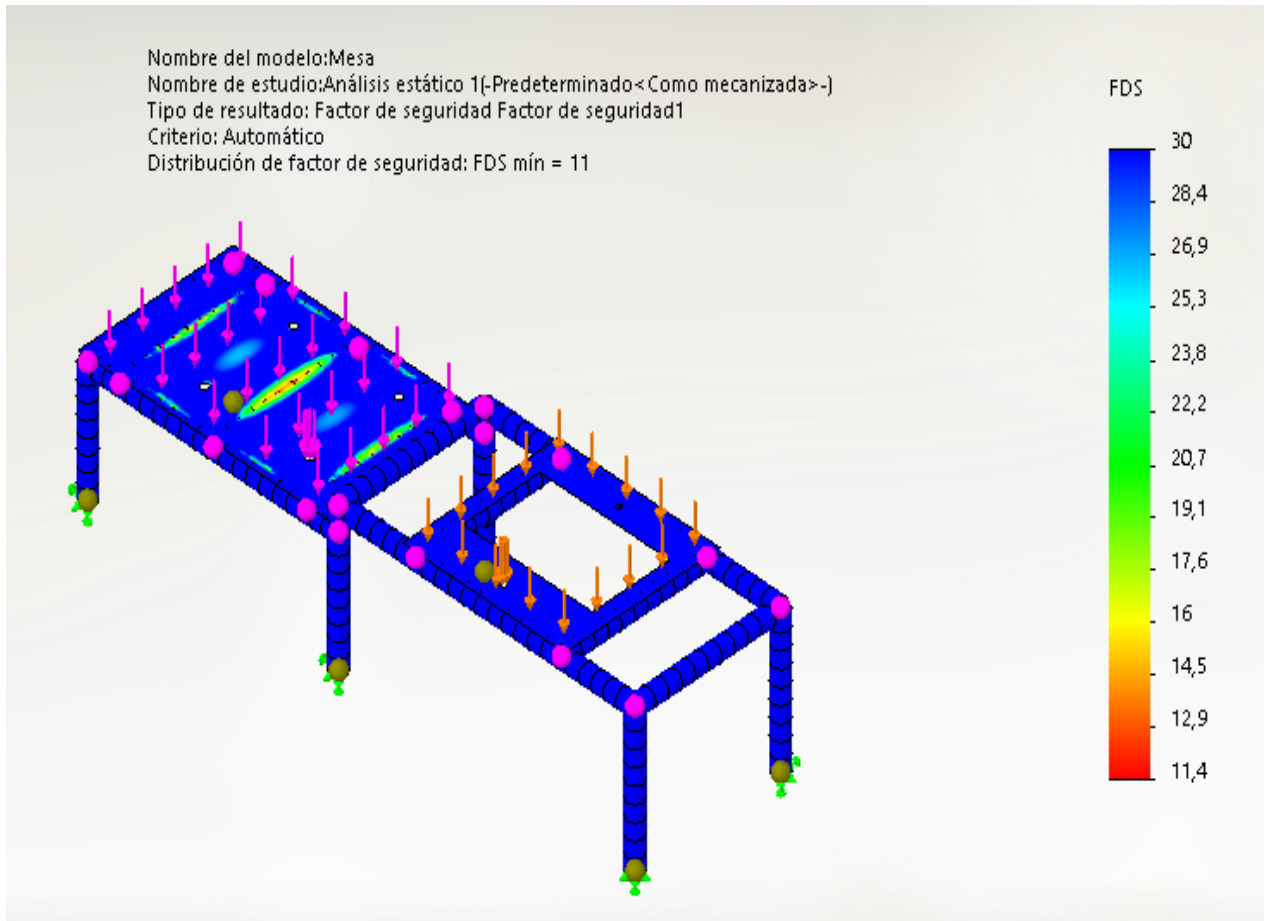
Figura 34. Desplazamiento soporte trituradora.



Fuente: Elaboración propia.

El factor de seguridad es más que apropiado con un factor mínimo de 11 como se aprecia en la figura 36 esto nos indica que podría estar sobre diseñada, pero es lo ideal para este tipo de procesos para evitar posibles accidentes al fallar la pieza.

Figura 35. Factor de seguridad soporte trituradora.



Fuente: Elaboración propia.

5.5. DIMENSIONAMIENTO TORNILLO EXTRUSOR

Para el dimensionamiento del tornillo extrusor se utilizó consideraciones de SAVGORODNY V. K. y Chris Rauwendaal.

Tabla 7. Parámetros de entrada diseño tornillo.

Diámetro	RPM	Longitud	Sy
25 mm	90	9-580 mm	900 MPa

Fuente: Elaboración propia.

El proceso de cálculo para el tornillo extrusor se puede apreciar en el anexo D y da como resultado las siguientes dimensiones en la tabla 8.

Tabla 8. Dimensiones tornillo extrusor.

Dimensiones tornillo extrusor	
L1	20 cm
L2	15 cm
L3	15 cm
h1	0,5 cm
h3	0,1718 cm
δ	0,0125 cm
e	0,25 cm
t	2,5 cm
Q	6,137 kg/h

Fuente: Elaboración propia.

Para el torque transmitido al tornillo y la velocidad de rotación critica serán:

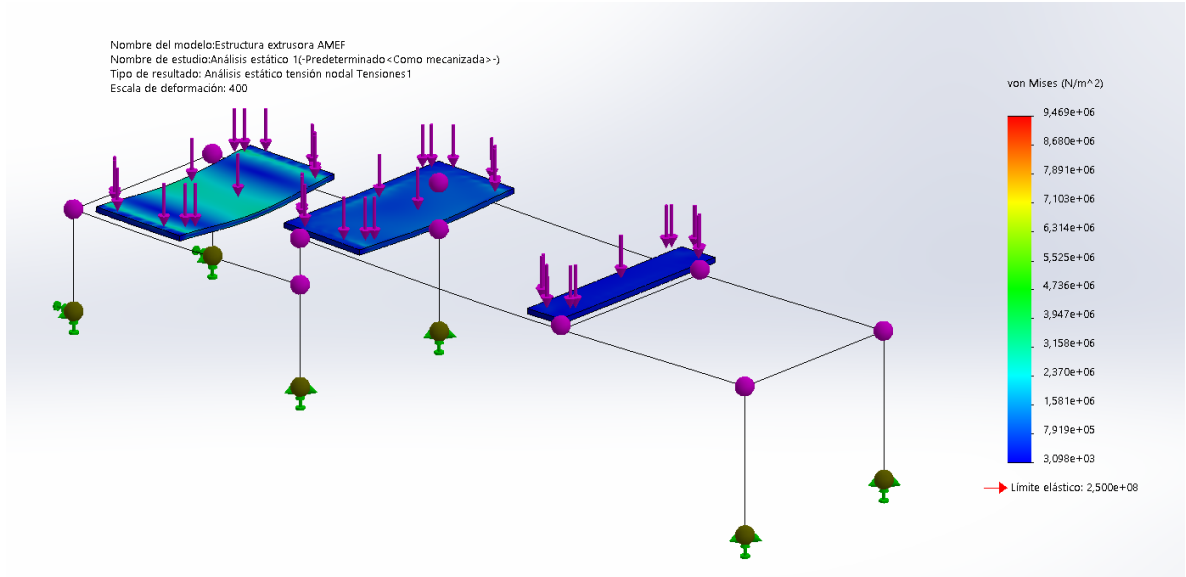
Tabla 9. Datos parámetros críticos.

T	Ncrit
29.67 N*m	27297 RPM

Fuente: Elaboración propia.

5.6. ANÁLISIS AMEF PARTES DE LA EXTRUSORA

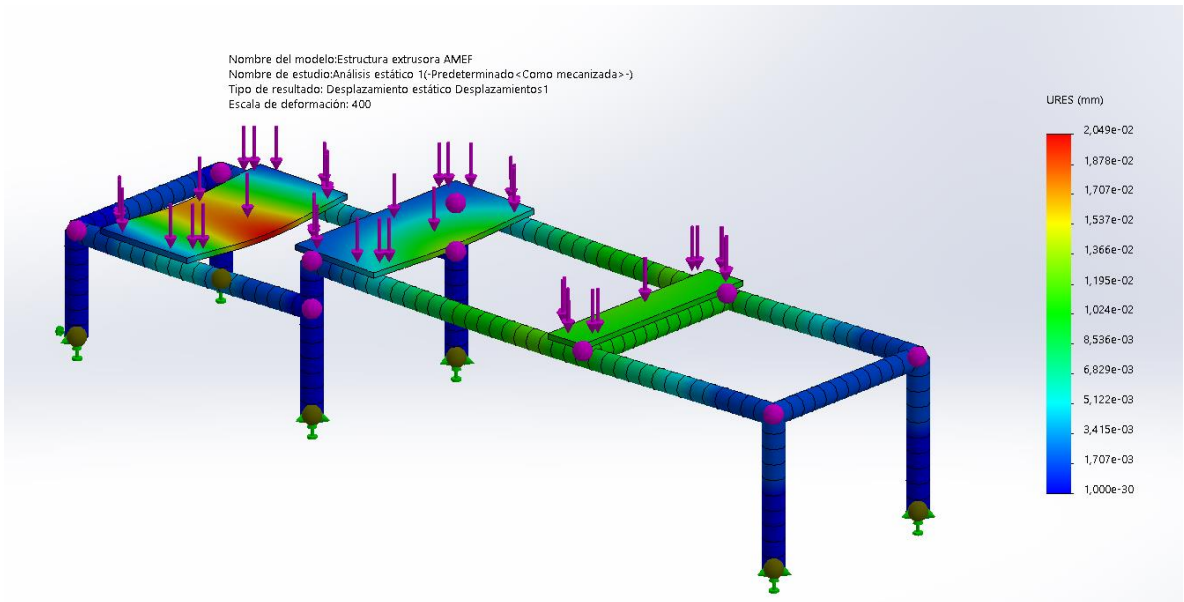
Figura 36. Esfuerzos soporte extrusora.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 38 podemos observar un desplazamiento máximo de 0.02 mm, siendo este un valor aceptable para esta configuración.

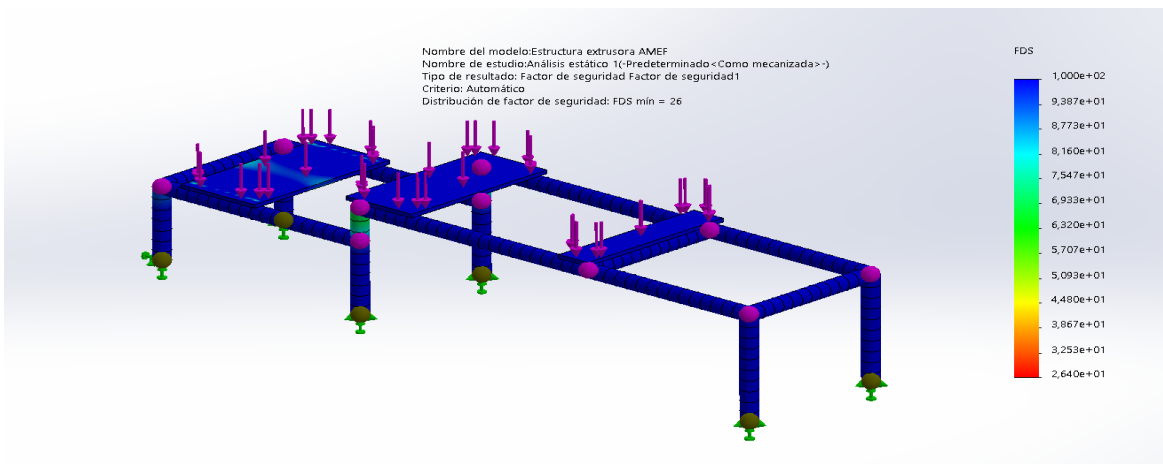
Figura 37. Desplazamiento soporte extrusora.



Fuente: Elaboración propia.

El factor de seguridad mínimo de 26. Se tuvo en cuenta la estética de la maquina al igual que la igualdad de perfiles en todos los soportes de cada una de las maquinas. Este FDS está por encima del recomendado evitando así fallas por cargas estáticas.

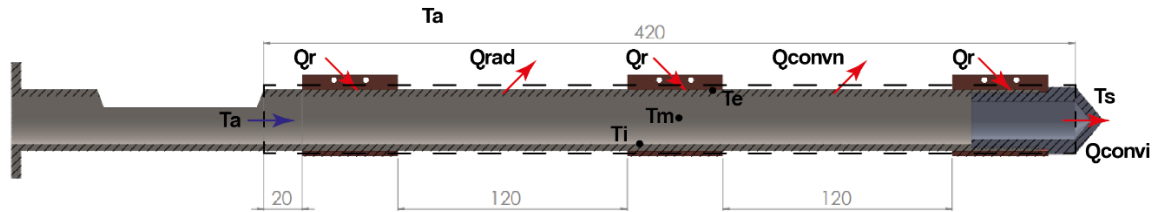
Figura 38. Factor de seguridad soporte extrusora.



Fuente: Elaboración propia.

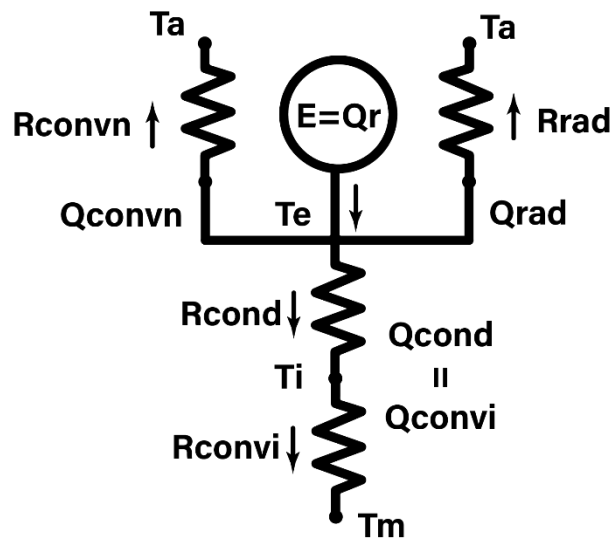
5.7. MODELO DE CALOR EXTRUSORA

Figura 39. Sistema de control para modelo de calor.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 40. Resistencias térmicas modelo de calor.



$$Q_r = Q_{convn} + Q_{rad} + Q_{cond}$$

Fuente: Elaboración propia.

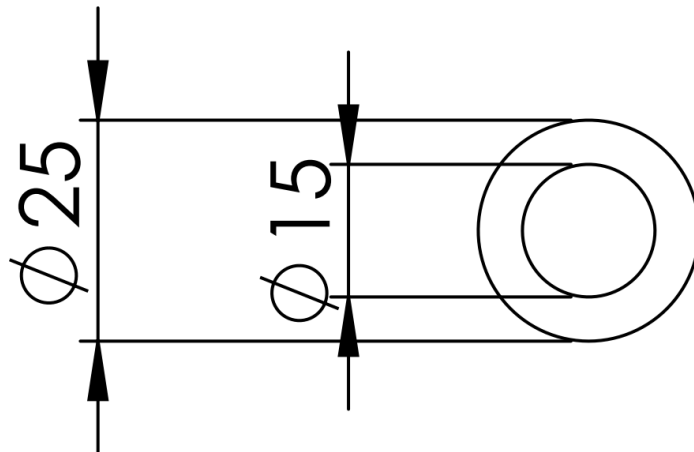
$T_a =$ Temperatura ambiente

$T_e =$ Temperatura externa del tubo

T_i = Temperatura interna del tubo
 T_m = Temperatura media del plastico
 R_{convn} = Resistencia de conveccion natural
 R_{rad} = Resistencia de radiacion
 R_{cond} = Resistencia de conduccion
 R_{convi} = Resistencia de conveccion interna
 $E = Q_r$ = Calor generado por las resistencias
 Q_{convn} = Calor por conveccion natural
 Q_{rad} = Calor por radiación
 Q_{cond} = Calor por conducción
 Q_{convi} = Calor por conveccion interna

Inicialmente se calculó el calor necesario para llevar los 3 kg/h de plástico a la temperatura de fusión cristalina. Se asumió el plástico PET porque es más conservativo para el cálculo.

Figura 41. Diámetro tornillo extrusor.



Fuente: Elaboración propia.

El diámetro hidráulico se asumió como el anillo que va desde el diámetro exterior del tornillo y el eje del tornillo, como se muestra en la figura 42.

Con el diámetro hidráulico y el número Nusselt para convección interna forzada se calculó la temperatura interna forzada. De esta forma se calculó la temperatura exterior del tubo por medio de un análisis de transferencia de calor por conducción que se da de forma radial.

Teniendo la temperatura exterior del tubo se calculó las pérdidas de calor por convección natural y radiación.

Por último, se determinó el calor necesario en cada una de las 3 resistencias para contrarrestar las pérdidas por convección natural, radiación y conducción que es la misma que la de convección interna, dando como resultado 139 Watts. Se aproximó ese valor a 150 Watts.

Estas resistencias se fabricaron a la medida del tubo como se puede apreciar en la figura 42. en el apartado de construcción de la extrusora. Podemos ver el modelo completo en el anexo E.

5.8. ANÁLISIS DE RODAMIENTOS

Se tiene como datos de entrada para la trituradora:

Tabla 10. Parámetros de entrada rodamiento trituradora.

d (mm)	P (kN)	T (°C)	n (rpm)	Contaminación
15	0.54	40	272	Típica

Fuente: Elaboración propia.

Y para la extrusora:

Tabla 11. Parámetros de entrada rodamiento extrusora.

d (mm)	P (kN)	T (°C)	n (rpm)	Contaminación
15	0.015	60	90	Típica

Fuente: Elaboración propia.

Para ambas maquinas se tomaron los rodamientos de la serie SKF 61802-2RS1 que servían según las especificaciones de cada uno con la única diferencia que para la trituradora necesita un lubricante ISO VG 100 y para la extrusora un ISO VG 680.

Esta diferencia de lubricantes se debe a que tienen trabajan a diferentes velocidades de rotación y temperatura.

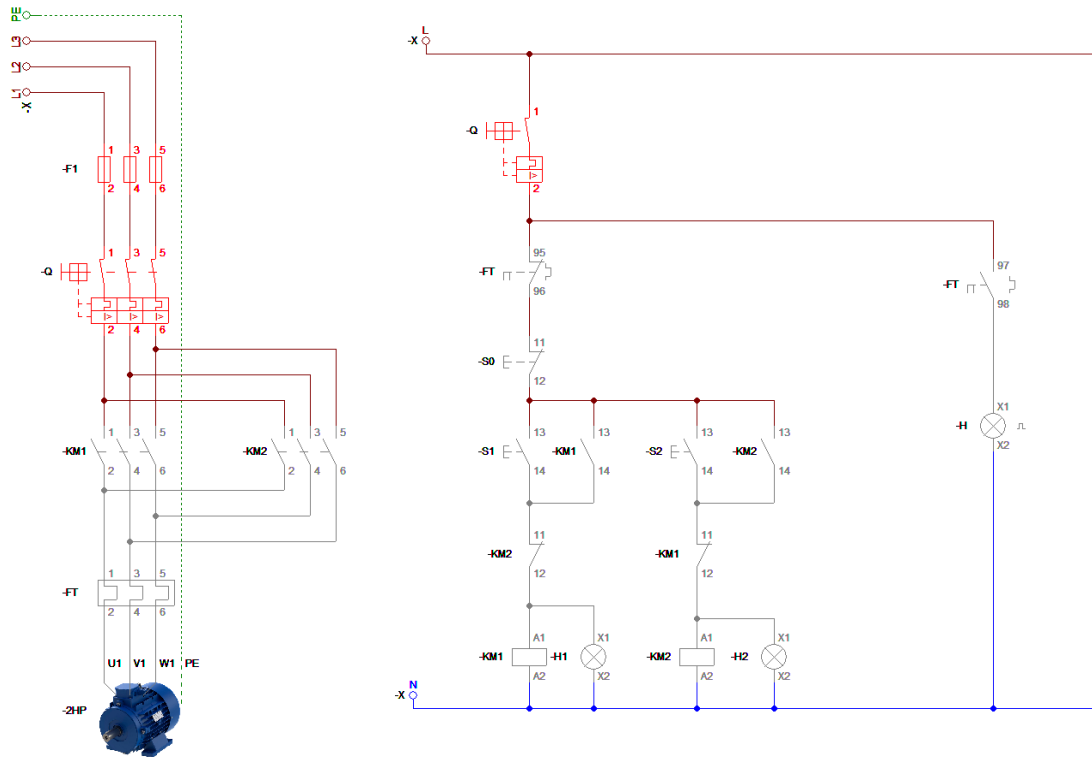
Para mirar la selección completa de los rodamientos ver anexo F.

5.9. CAMBIO DE GIRO MOTOR

La conexión del motor trifásico para la trituradora se necesita acoplar botones para cambiar su sentido de giro, esto se realizó para poder desatascar en casa de que haya un exceso de material el cual pueda ocasionar una parada de motor, y para poder liberarlo se cambia el sentido de giro

En la figura 43 se muestra la conexión para cambiar el sentido de giro. En la conexión existen varios elementos.

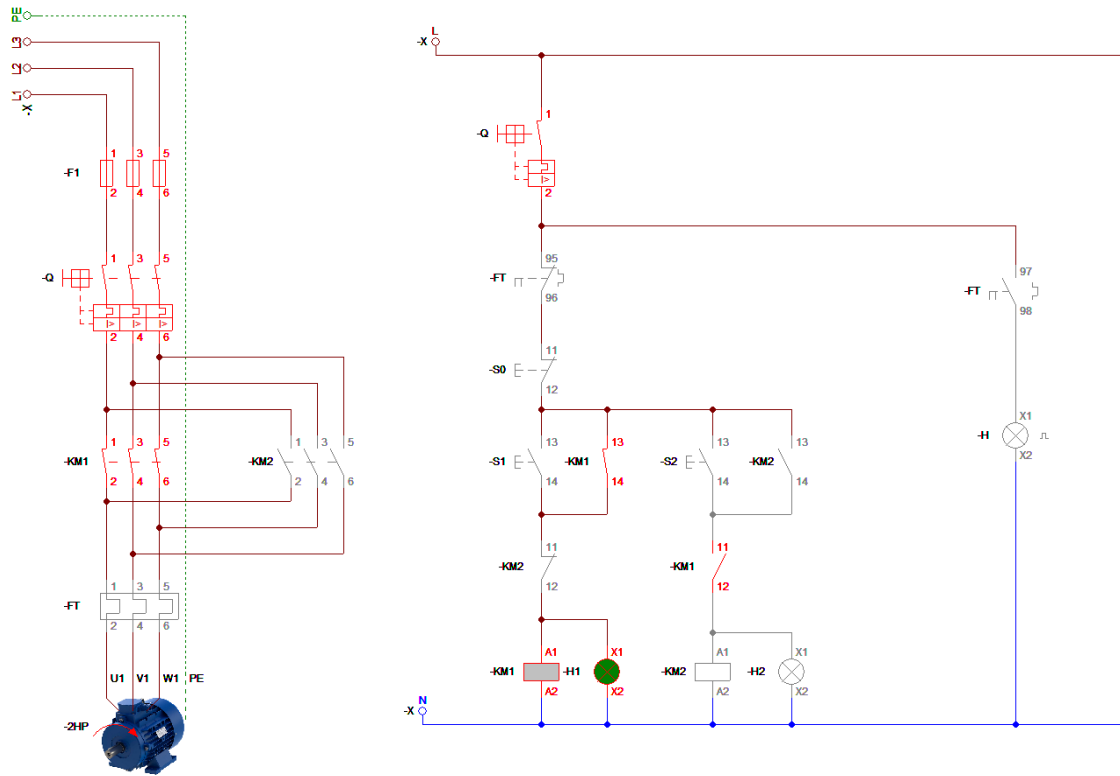
Figura 42. Conexión cambio de giro apagado.



Fuente: Elaboración propia.

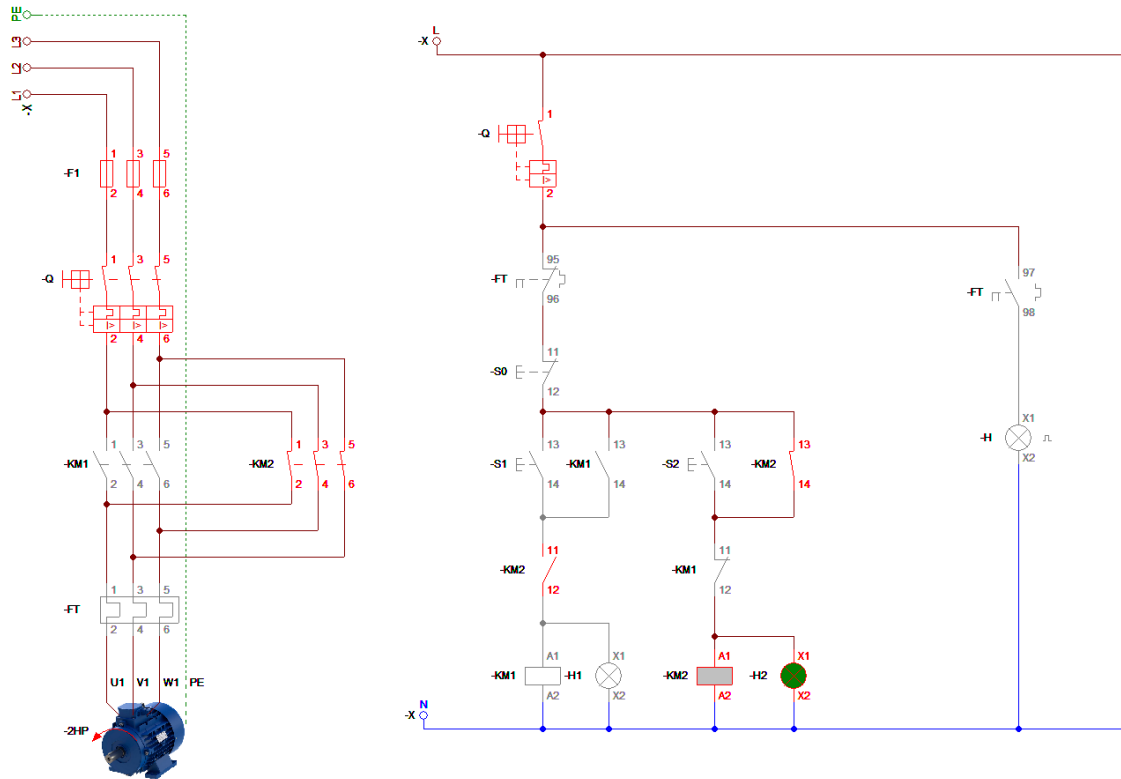
Para el sentido de giro horario se oprime el pulsador S1 El cual energiza el contactor KM1 y a su vez hay un enclavamiento con el contactor KM2 este enclavamiento se realiza para proteger al motor de un cortocircuito trifásico si se presiona el botón para el sentido de giro antihorario. Para poder realizar el cambio de sentido de giro es necesario un pulsador stop, el cual detiene el motor y luego si se puede realizar un cambio de giro como se muestra en la figura 44 encada momento de sentido de giro hay un bombillo el cual nos indica hacia cual sentido está girando.

Figura 43. Conexión cambio de giro horario.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 44. Conexión cambio de giro anti horario.



Fuente: Elaboración propia.

Para protección del motor también se implementó fusibles para sobrecarga tanto térmica como eléctrica. Al fallar cualquiera de estos se detiene el motor y se instaló un led rojo intermitente el cual nos indica que hay una avería en el circuito.

5.10. CONTROL DE TEMPERATURA Y SU CONEXIÓN

Es conveniente que se utilice un sistema de control PID, ya que este se estabiliza de una forma más exacta en la temperatura deseada.

Como podemos observar de la marca XMTG existen varios modelos con este funcionamiento, como el XMTG-2301 O el XMTG-808.

Figura 45. Control XMTG-808.



Fuente: Made-in-China. China. Consulta: 7 de noviembre 2021. Disponible en: https://es.made-in-china.com/co_yuyaogongyi/product_Xmtg-808-Digital-Pid-Temperature-Controller-with-CE-RoHS-and-UL_hruiyyohg.html

Ambos modelos poseen las mismas conexiones y funcionan de la misma manera, a continuación, se muestra su conexión junto a su funcionamiento.

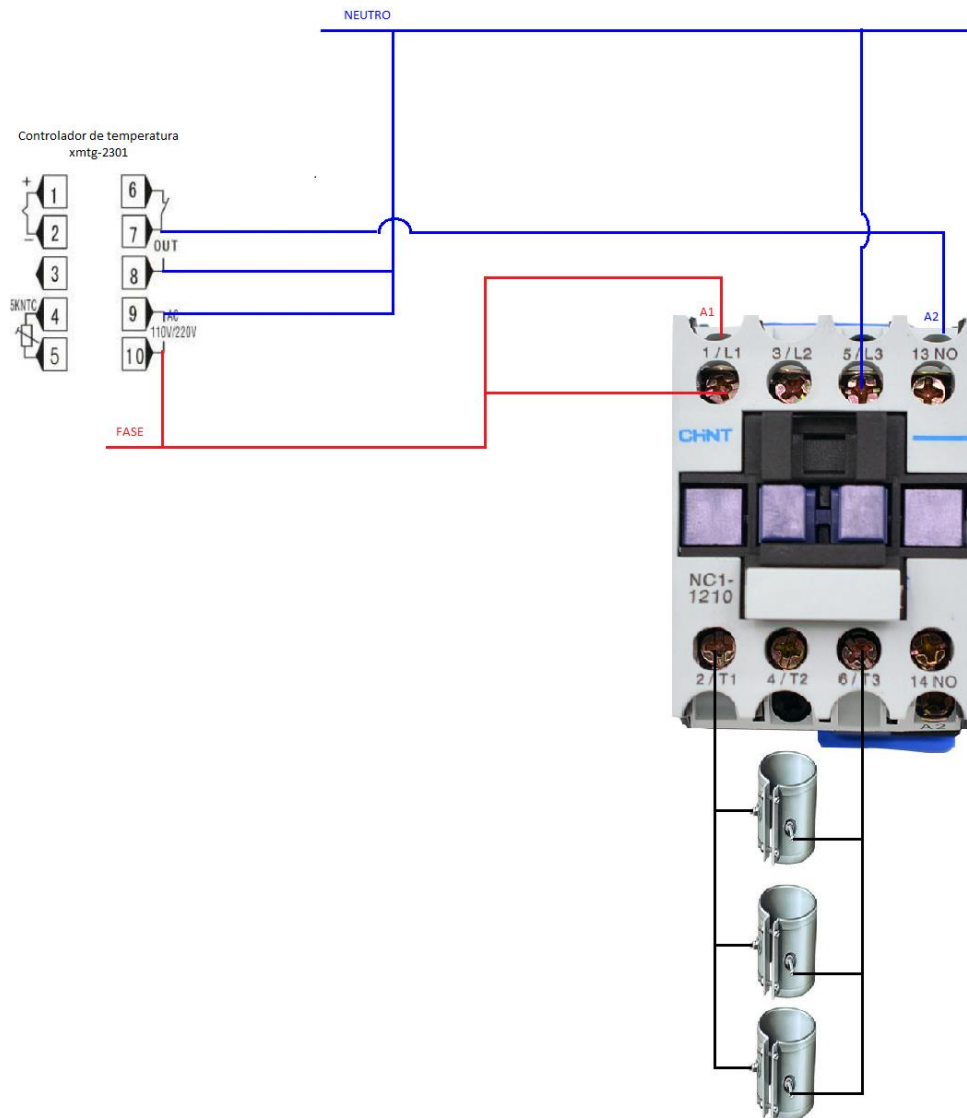
La conexión para poder alimentar las resistencias se puede observar en la figura 47 La fase va conectada a 110V para poder alimentar a los 3 aparatos que necesitan energía, el controlador de temperatura, el contactor y las resistencias.

Los terminales 1 y 2 que se muestran en la figura 47 son para conectar la termocupla tipo J.

Los terminales 6, 7 y 8 son salida de control del relé. Cuando la temperatura del cañón aún no ha llegado a la temperatura seteada, los terminales 7 y 8 están conectados y 6 y 7 están desconectados, esto permite que el neutro pase por A2 y así el contactor se accione dando paso la corriente a las resistencias conectadas en paralelo.

Cuando la temperatura sobrepasa la temperatura los terminales 7 y 8 se desconectan y 6 y 7 se conectan esto para que ya no llegue la línea neutra al contactor y así hay apertura en el contactor, esto para que no hay más corriente a las resistencias y evitar que calienten más.

Figura 46. Conexión resistencias.



Fuente: Elaboración propia.

5.11. CONTROL MOTOR PASO A PASO

Se implementa un motor paso a paso para poner en marcha la embobinadora, se utiliza este motor ya que no necesita demasiado torque y es de fácil control. Se necesitó controlar la velocidad para que el diámetro del filamento tenga el especificado para su uso en las impresoras 3D y no haya interrupción en el proceso de producción.

Para su óptimo funcionamiento se requiere un motor paso a paso de 14 kg.cm

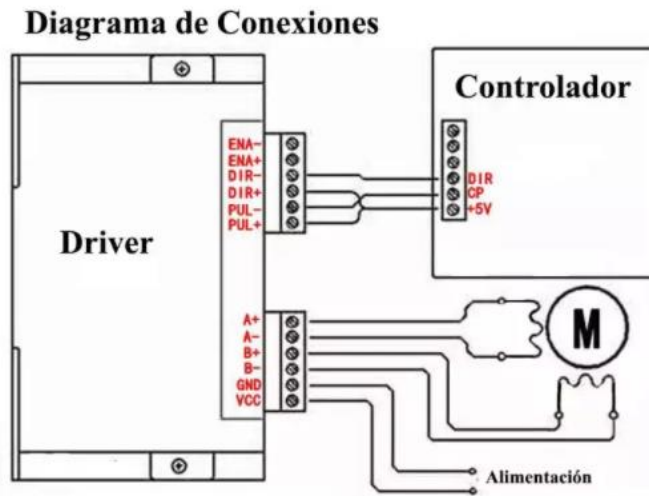
Figura 47. Motor paso a paso nema 23.



Fuente: Pololu. Las Vegas, Nevada. Consulta: 7 de noviembre 2021. Disponible en: <https://www.pololu.com/product/1475>

Para el motor paso a paso se puede controlar mediante Arduino uno o simplemente se puede adquirir un driver con el controlador, estos ya están configurados para cumplir el funcionamiento requerido, su conexión se puede apreciar en la figura 49.

Figura 48. Diagrama control motor paso a paso.



Fuente: Vistronica. Colombia. Consulta: 7 de noviembre 2021. Disponible en:
<https://www.vistronica.com/impresora-3d-y-cnc/driver-microstepper-motor-paso-a-paso-tb6600-4a-9-40dc-detail.html>

6. CONSTRUCCIÓN.

6.1. CONSTRUCCION TRITURADORA

Para empezar la etapa de construcción se realizó las cuchillas tanto móviles como fijas con el método de oxicorte en la empresa Laminas y Cortes Bucaramanga, esto debido a que para el prototipo se reduce costos ya que lo ideal es realizar este corte mediante láser para tener un corte mucho más limpio y preciso.

En cuanto al eje se mecaniza una varilla hexagonal de acero AISI 1045 mediante torneado para darle forma circular a sus lados, se hizo con una varilla hexagonal para que la potencia sea correctamente transmitida a las cuchillas y poder realizar un triturado efectivo. Dicho proceso se realizó con un torno.

El resultado de estos procesos anteriores se puede evidenciar en la figura 50.

Figura 49. Eje y cuchillas trituradora.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 51 se muestra el ensamble de cuchillas con sus respectivos separadores y el eje. debido a que el corte por oxicorte deja un poco de rebaba se tuvo que pulir su agujero para que pudiera ensamblar correctamente y sin dificultades.

Figura 50. Ensamble de cuchillas con el eje.



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede evidenciar en la figura 52 para la parte del bastidor donde se sostiene todas las piezas de la trituración y el soporte de la criba se hizo con lamina reciclada, todo esto debido a que se buscó reducir los costos, sin perder el objetivo de funcionamiento de la micro planta.

La lámina se cortó con una pulidora y posteriormente se doblaron las piezas que requieren este proceso, en Láminas y Cortes Bucaramanga.

Figura 51. Materia prima bastidor trituradora.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 52. Corte de lamina.

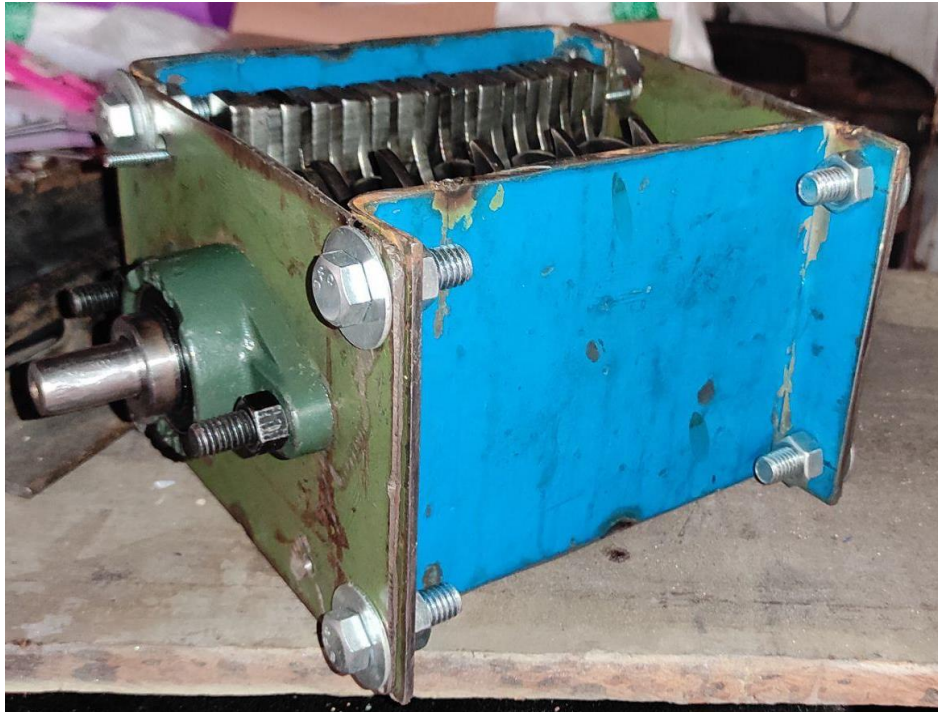


Fuente: Elaboración propia.

Luego se armó la caja con sus respectivas chumaceras, sosteniendo el eje y las barras roscadas de $\frac{1}{4}$ " con tuercas de seguridad en la parte interior para evitar deslizamiento entre las cuchillas fijas y el par de tuercas externas para fijarlas a la caja.

Por medio de pernos de $\frac{1}{2}$ " en cada una de sus 8 esquinas se aseguró la caja como se muestra en la figura 54.

Figura 53. Ensamble trituradora sin tolva.



Fuente: Elaboración propia.

Para la criba se usó lámina de lata de pegamento realizando perforaciones de $\frac{1}{4}$ " con el taladro de árbol, en forma de matriz

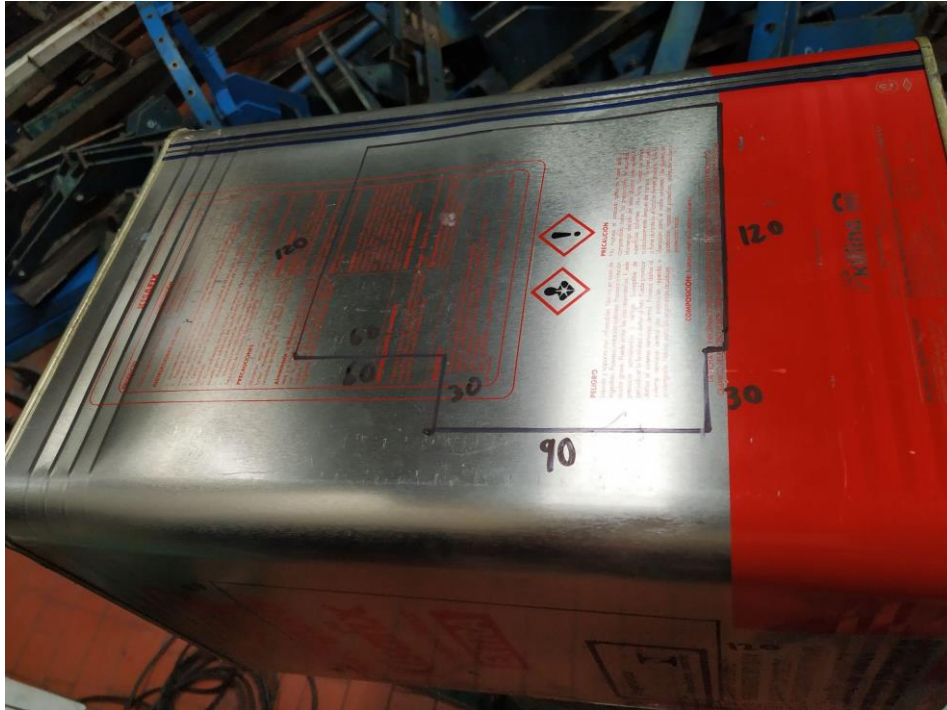
Figura 54. Criba en manufactura.



Fuente: Elaboración propia.

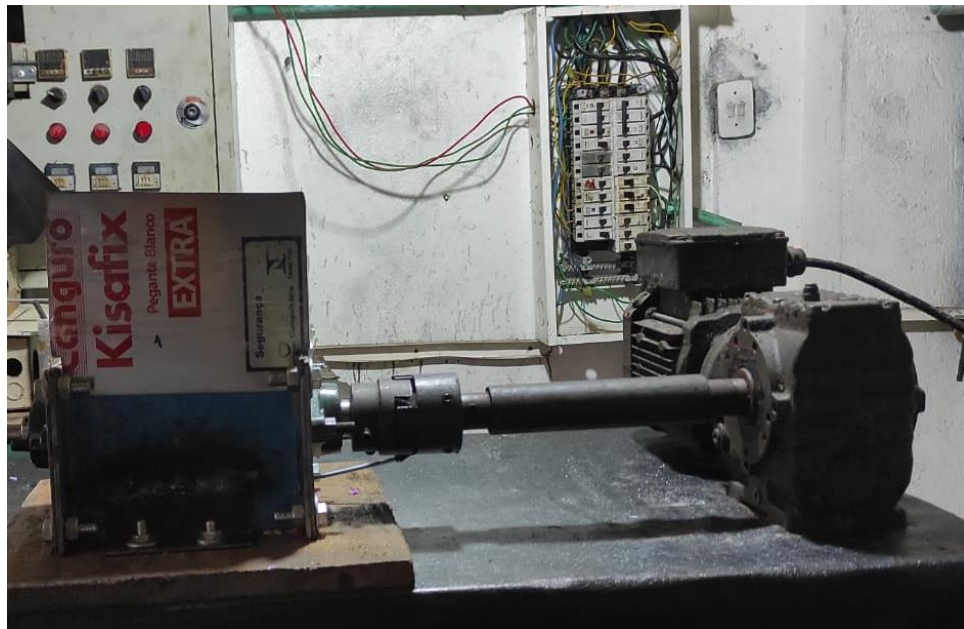
Por último, con ese mismo tipo de lámina se realizó una tolva vertical de tal forma que el plástico que se iba triturando no se saliera de la caja.

Figura 55. Materia prima tolva.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 56. Trituradora ensamblada.



Fuente: Elaboración propia.

Luego de construir por completo el sistema de triturado se realizaron 8 pruebas de triturado con un tiempo de 30 segundos, para dos tipos de plástico PP (polipropileno) y HDPE (Polietileno de alta densidad).

Como se puede observar en la figura 58. Las bolsas de triturado de color morado pertenecen a envases de límpido que son fabricados con plástico HDPE, antes de triturar se hizo el respectivo lavado y secado de este material, y las bolsas de triturado multicolor pertenecen a tapas de plástico las cuales son fabricados con plástico PP.

Figura 57. Pruebas de triturado.



Fuente: Elaboración propia.

6.2. CONSTRUCCION EXTRUSORA

Para realizar el barril de la extrusora se utilizó un tubo de acero de grosor de pared de 5mm, el cual se adecuo mecánicamente, los procesos que se le implementaron fueron roscado interno en el sentido donde el motor no lo desenrosque y un corte rectangular donde es el ingreso del triturado el cual se va a extruir.

Figura 58. Tornillo extrusor con camisa.



Fuente: Elaboración propia.

Para simular el tornillo extrusor se utilizó una broca para madera de 25 mm de diámetro y una longitud de 460 mm, Se importó desde china ya que en Colombia era muy difícil de conseguir con las mismas especificaciones, ya que se conseguían de diámetro y longitud mucho menor a lo requerido.

Figura 59. Broca como tornillo extrusor.

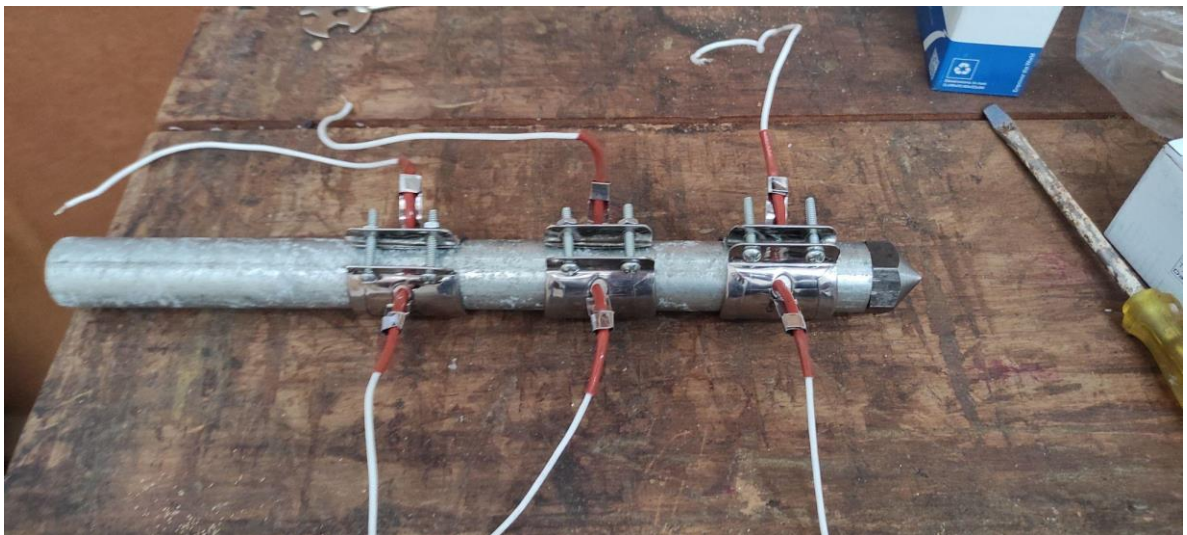


Fuente: Aliexpress. China. Consulta: 7 de noviembre 2021. Disponible en: https://a.aliexpress.com/_mrRnji8

Las resistencias tipo abrazadera que se pueden evidenciar en la figura 61, se fabricaron en la empresa Resistencias Santander con un voltaje de 110 V para poder alimentarlas y una potencia de 150W, con un largo de 5 centímetros cada una.

Para poder prolongar la vida útil y no se quemen las resistencias, se realizó una conexión con un contactor y un controlador de temperatura para así evitar sobrecargas y mantener una temperatura de operación óptima para el filamento.

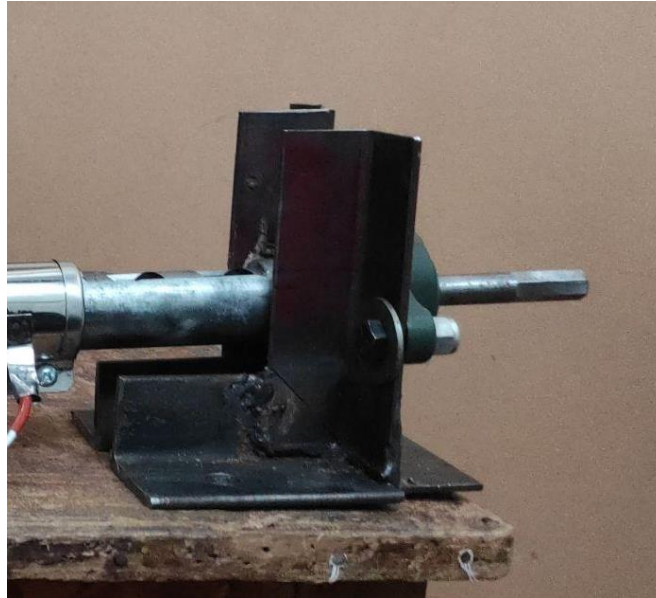
Figura 60. Resistencias en camisa .



Fuente: Elaboración propia.

Para mantener firme la extrusora, se utilizaron ángulos de 1 ½” de tal forma que la extrusora se ubicada de forma horizontal como se observa en la figura 62.

Figura 61. Ensamble soporte extrusora.



Fuente: Elaboración propia.

Se utilizó lámina de 3 mm para fabricar la tolva soldando las partes entre sí y a su vez al cañón para mantener abastecida la extrusora.

También se soldó una manivela improvisada al tornillo extrusor para simular la rotación del motor de manera manual, haciéndolo girar para desplazar el material a lo largo del tubo.

Por último, se realizaron las conexiones de las resistencias con el contactor y el sistema de control.

Ya construido y ensamblado todas las piezas de la extrusora, y realizado la correcta conexión de los circuitos eléctrico se realizó 8 pruebas con cada tipo de triturado (PP y HDPE)

Figura 62. Extrusora ensamblada.



Fuente: Elaboración propia.

Para la embobinadora se utilizó un motor paso a paso con su control como se puede apreciar en la figura 64 se optó por una transmisión por engranajes fabricados por impresora 3D.

Figura 63. Embobinadora .



Fuente: Elaboración propia.

Figura 64. Micro planta completa.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 65. Autore con la micro planta.



Fuente: Elaboración propia.

El producto final de todo este proceso de la micro planta se puede evidenciar la calidad y el proceso continuo de la extrusora en la figura 67.

Figura 66. Producto final.



Fuente: Elaboración propia.

7. PRUEBAS

Las pruebas de triturado se utilizaron con una criba con tamaño de agujero de 4mm.

Se puede observar en la tabla 12 que el tipo de plástico influye bastante a la hora de triturar, debido a que un el plástico PP es menos resistente al corte que el HDPE, por lo que el menos resistente tritura más plástico en el mismo tiempo que el más resistente.

Comparando cada muestra de cada plástico existe una pequeña desviación en el peso. Esto se debe a que el plástico que se usó para cada prueba variaba un poco de tamaño, por lo que cada prueba tiene su producción diferente.

Como era de esperar, en algunas pruebas por la acumulación de exceso de material en la trituradora hubo atascamiento de esta misma, por esto es de suma importancia implementar el sistema de cambio de giro de motor para evitar accidentes y retirar el plástico atascado. Siempre se debe seguir las sugerencias y modo de uso del manual de la trituradora que se puede observar en el anexo G.

Tabla 12. Datos pruebas trituradora con plástico PP Y HDPE.

Triturado 30 segundos			kg/h	
PP	HDPE	Unidades	PP	HDPE
63	36	gramos	7,56	4,32
64	34	gramos	7,68	4,08
62	39	gramos	7,44	4,68
66	41	gramos	7,92	4,92
61	42	gramos	7,32	5,04
65	32	gramos	7,8	3,84
63	38	gramos	7,56	4,56
65	38	gramos	7,8	4,56

Fuente: Elaboración propia.

Para la extrusión es necesario precalentar el cilindro antes de agregar materia prima al extrusor, ya cuando se establezca esta temperatura ya es recomendado empezar el proceso como se sugiere en el manual de la extrusora en el anexo H.

En la tabla 13 podemos observar la extrusión de dos tipos de plástico diferentes se puede observar una pequeña diferencia en su producción debido a la viscosidad de cada plástico hace que sea más resistente a su extrusión.

Los datos podrían ser más exactos con un sistema de control entre embobinador y extrusora que unifique y calcule la velocidad óptima para este proceso.

Tabla 13. Datos pruebas extrusión con plástico PP y HDPE.

Extrusión 30 segundos			kg/h	
PP	HDPE	Unidades	PP	HDPE
3	4	gramos	0,36	0,48
2	3	gramos	0,24	0,36
1	2	gramos	0,12	0,24
2	4	gramos	0,24	0,48
2	3	gramos	0,24	0,36
1	2	gramos	0,12	0,24
2	3	gramos	0,24	0,36
2	4	gramos	0,24	0,48

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que se cumplen los objetivos de producción en la etapa de triturado y extrusión, para valorar la etapa de embobinado se optó por examinar la tolerancia del filamento de cada prueba dando como resultado un diámetro de 1.75mm +0.1 y -0.15

8. ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO

Tabla 14. Insumos trituradora.

INSUMO	CANTIDAD
Tornillos	22
Tuercas	22
Arandelas	22
Cuchillas	15
Separador de Cuchillas	14
Eje	1
Acople	1
Chumaceras	2
Bastidor extrusor	1
Motor	1
Control	1
Cribado	1
Soporte	1
Costo total	\$2.500.000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 15. Insumos extrusora.

INSUMO	CANTIDAD
Bastidor	1
Acoples	2
Chumacera	1
Camisa	1
Resistencias	3
Broca	1
Tolva	1
Boquilla	1
Control	1
Pernos	6
Tornillos	6
Arandelas	10
Tuercas	12
Costo total	\$600.000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Insumos bobinadora.

INSUMO	CANTIDAD
Bastidor	1
Motor	1
Polea conductora	1
Polea conducida	1
Correa	1
Ejes	3
Soporte ejes	4
Rodillos	6
Carrete	1
Placa	1
Tornillos	4
Control	1
Costo total	\$400.000

Fuente: Elaboración propia.

La inversión total del proyecto para la fabricación de filamento es de 3.500.000 de los equipos y el costo de energía de cada equipo. En la tabla 17 se puede apreciar los costos de la energía.

Tabla 17. Costo energía de producción 4kg de filamento

	Potencia (kw)	Tiempo (h)	\$/kw*h	Costo total mensual
Trituradora	1	25	573	\$14.325
Extrusora	0,25	100	573	\$14.325
Resistencias	0,45	100	573	\$25.785
Bobinadora	0,05	100	573	\$2.865
				\$57.300

Fuente: Elaboración propia.

Ya teniendo definido todos estos costos para la producción de 4 kg de filamento al mes lo comparamos llevando el costo de energía a valor futuro más la inversión con el costo del filamento comercial a valor futuro. Se estableció las ecuaciones en el programa EES para saber en cuantos años se recupera la inversión. Con las ecuaciones del anexo I y se puede apreciar que la recuperación de la inversión está definida a 1,91 años lo que quiere decir a 23 meses.

Se estableció un nuevo programa para apreciar el ahorro de fabricar el filamento después de los años en que se recupera la inversión, con las variables de costo energía para fabricar 4 kg de filamento y el costo comercial del filamento, restando estas dos se puede apreciar el ahorro o beneficio que se obtiene con este proyecto.

9. RECOMENDACIONES

Al manufacturar las piezas de corte y bastidor de la trituradora se recomienda realizar el corte por medio de laser, esto porque el láser nos brinda un corte muy preciso evitando cualquier roce entre piezas inesperado.

Ajustar correctamente todas las piezas para evitar movimientos que no estén ligados al funcionamiento de la trituradora.

Utilizar un sistema de control con un sensor de velocidad en la que se extruye para regular el embobinado y así obtener mejor calidad en términos de tolerancia en el diámetro del filamento.

Se recomienda el uso de motor en la extrusora para un trabajo prolongado debido que de forma manual genera fatiga muscular.

El motor debe estar muy bien alineado en la extrusora para evitar fricción innecesaria con acoples y rodamientos.

El tornillo extrusor debe evitar tocar el cañón para evitar rozamientos internos.

Adaptar un aislamiento en la parte de calentamiento de la camisa del extrusor para poder ahorrar energía y optimizar el proceso.

10. CONCLUSIONES

Se construyó un prototipo de la micro planta, este prototipo tuvo una sola modificación con respecto a lo diseñado, que se adaptó una manivela en lugar de un motor en la parte de extruido, para reducir costos en el proyecto. Este cambio se realizó ya que al adaptar esta manivela genera el mismo torque y rpm, hay que tener en cuenta que lo ideal es adaptar el motor con un debido control para que el proceso esté en parámetros mucho más ideales, a pesar de esto se obtuvo resultados deseados con este cambio.

La velocidad de salida del filamento de plástico está relacionada con la velocidad de rotación del tornillo, por lo tanto, con buen abastecimiento de material y buen calentamiento por parte de las resistencias se puede tener una buena cantidad de filamento.

Este proyecto abrirá una ventana para adaptar mejores tecnologías y convertir esta micro planta en una gran planta de producción de filamentos a base de plásticos reciclados y ayudar a frenar la gran contaminación en la que se encuentra hoy el planeta.

BIBLIOGRAFÍA

Alfredo Parada Corrales. Fatiga. Quinta Edición. Bucaramanga, Colombia, 1990
BELTRÁN y MARIBEL. Tema 4. Extrusión. En línea (Fecha de consulta: 9 de diciembre del 2020). Disponible en: <http://hdl.handle.net/10045/16897>

Chris Rauwendaal. Polymer Extrusion. 5th Edition. Germany, 2014
EL TIEMPO. 230.000 toneladas de plástico se vierten cada año en el Mediterráneo 27 de octubre 2020. (Fecha de consulta: 25 de noviembre del 2020). Disponible en: <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente>

Ferdinand P. Beer. Mecánica de materiales. Quinta Edición. México, D.F. Mc Graw Hill, 2009.

Frank P. Incropera y David P. Dewitt. Fundamentos de transferencia de calor. Cuarta Edición. México, D.F. Pearson, 1996.

INTEREMPRESAS. Molinos a bajas revoluciones y alto par. (Fecha de consulta: 30 de noviembre del 2020). Disponible en: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/138007-Molinos-a-bajas-revoluciones-y-alto-par.html>

OMEGA ENGINEERING LIMITED. Controladores de temperatura. En línea (Fecha de consulta: 9 de diciembre del 2020). Disponible en: <https://es.omega.com/>

SALGUERA, Jerónimo. Manual de valoración de los residuos plásticos 5ed. 2011. En línea. (Fecha de consulta: 9 de diciembre del 2020). Disponible en: <http://www.ecoplas.org.ar>

SKF – Industrial Bearing. SKF Rodamientos. Estados Unidos, 2019

TECNOLOGÍA DEL PLÁSTICO. Molinos de bajas revoluciones Moditec. (Fecha de consulta: 26 de noviembre del 2020). Disponible en: <https://www.plastico.com/producto-descripcion/Molinos-de-bajas-revoluciones-Moditec+Showroom3007653107842>

VELA ROJAS, Cristian Camilo; REY ROMERO, Edixon Javier y JAIMES RADA, Angie Natalia. Diseño y construcción de prototipo de trituración para PET. Ingeniería Civil. Villavicencio: Universidad Cooperativa de Colombia. Facultad de ingenierías. 2018. 41 pp.

Ferdinand P. Beer. Mecánica vectorial para ingenieros – Estática. Novena Edición. México, D.F. Mc Graw Hill, 2010

Yunus A. Cengel. Transferencia de calor y masa. Cuarta Edición. México D.F. Mc Graw Hill, 2011