



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA
DE FILAMENTOS DE 1.75 MM Y 3 MM PARA IMPRESORAS 3D, A
PARTIR DE POLÍMERO RECICLADO.**

AUTOR: ORTIZ ABATA, CRISTIAN FABIÁN

DIRECTOR: ING. ACUÑA COELLO, FAUSTO VINICIO

LATACUNGA

2018



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “***DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA DE FILAMENTOS DE 1.75 MM Y 3 MM PARA IMPRESORAS 3D, A PARTIR DE POLÍMERO RECICLADO***” fue realizado por el señor ***Ortiz Abata Cristian Fabián***, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, Agosto del 2018.



.....
ING. FAUSTO VINICIO ACUÑA COELLO

C.C.:0501510267
DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, ***Ortiz Abata Cristian Fabián***, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: “***DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA DE FILAMENTOS DE 1.75 MM Y 3 MM PARA IMPRESORAS 3D, A PARTIR DE POLÍMERO RECICLADO***”, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, Agosto del 2018.



.....
CRISTIAN FABIÁN ORTIZ ABATA

C.C.:0503283178



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

AUTORIZACIÓN

Yo, ***Ortiz Abata Cristian Fabián*** autorizo a la UNIVERSIDAD DE LA FUERZAS ARMADAS ESPE publicar el trabajo de titulación: “***DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA DE FILAMENTOS DE 1.75 MM Y 3 MM PARA IMPRESORAS 3D, A PARTIR DE POLÍMERO RECICLADO***”, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, Agosto del 2018.

.....
CRISTIAN FABIÁN ORTIZ ABATA

C.C.:0503283178

DEDICATORIA

“Es difícil crecer sin padre, pero es fácil cuando se tiene una madre fantástica que hace el papel de los dos, cuando se tiene a una mujer capaz de enfrentarse al mundo sola, pero sin miedo, por eso eres y serás un ejemplo de valentía” Anónimo

A mi madre, la persona que me enseñó a dar mis primeros pasos, pronunciar mis primeras palabras y escribir mis primeras letras; simplemente ha sido mi todo durante el transcurso de mi vida, su amor y cariño incondicionales, paciencia infinita y apoyo ante cualquier problema y adversidad, han sido clave para que pueda culminar el presente trabajo, es la persona que más admiro y amo. Nada es suficiente para agradecerle todo lo bueno que me ha dado, enseñado y el sacrificio que ha hecho por mí.

Cristian Fabián Ortiz Abata

AGRADECIMIENTO

A Dios por las bendiciones recibidas a lo largo de mi carrera universitaria, por haberme permitido alcanzar una meta más en la vida y por muchas otras que vendrán.

A mis familiares, amigos, profesores y seres queridos que ya no están aquí con nosotros y nos cuidan desde el cielo.

A mi tío Marco Abata, sus conocimientos aeronáuticos fueron de vital importancia durante el desarrollo del trabajo de titulación.

A todos y cada uno de mis amigos, ya que la vida no tendría sentido sin ese gran regalo de la vida llamado amistad, definitivamente han sido un apoyo esencial.

A los docentes de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, los cuales fueron mentores en mi formación profesional y de muchos otros estudiantes y profesionales del país, su noble labor hace del mundo un lugar mejor.

Como agradecimiento especial, al Ingeniero Fausto Acuña, por su guía académica y apoyo incondicional para con el presente trabajo, sus conocimientos y ayuda fueron fundamentales para poder culminar con éxito este proyecto de titulación profesional.

GRACIAS

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARÁTULA

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
RESÚMEN.....	xx
ABSTRACT.....	xxi

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE

1.1	Introducción	1
1.2	Antecedentes.....	1
1.3	Planteamiento del problema	2
1.4	Justificación e importancia.....	2
1.5	Objetivos.....	3
1.5.1	General.....	3

1.5.2	Específicos	3
1.6	Hipótesis.....	4
1.7	Variables de la investigación	4
1.7.1	Variable dependiente.....	4
1.7.2	Variable independiente.....	4
1.8	Metodología de desarrollo del proyecto.....	5
1.9	Estudio de extrusoras de filamento	6
1.10	Extrusoras compactas existentes en el mercado	9
A)	Filabot EX2	10
B)	Extrusora Lyman.....	11
C)	Noztek Touch HT.....	11
D)	Filafab Pro 350	12
1.11	Diferencias extrusora compacta vs extrusora industrial.....	13
1.12	Máquinas extrusoras de termoplásticos	13
1.12.1	Extrusoras de husillo simple	15
1.12.2	Extrusoras de doble husillo.....	15
1.13	Aceros para fabricación de husillos y barriles.....	16
1.14	Descripción del proceso de extrusión de termoplásticos.....	18
1.15	Alternativa de solución.....	20
1.16	Polímeros	21
1.16.1	Copolímeros y terpolímeros.....	22
1.16.2	Propiedades	22

1.16.3	Temperatura de transición vítrea	23
1.17	Termoplásticos	25
1.17.1	Propiedades de los termoplásticos	26
1.18	Principales polímeros utilizados en impresión 3d	26
A)	ABS (Acronitrilo Butadieno Estireno)	27
B)	PLA (Ácido Poliláctico).....	27
C)	Pellets	28
1.19	Reciclaje de materiales plásticos.....	28
1.20	Ensayo de tracción de materiales plásticos.....	29

CAPÍTULO II

DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

2.1	Parámetros de diseño.....	31
2.2	Diseño mecánico	32
2.3	Diseño del husillo de extrusión	32
2.3.1	Profundidad del canal, paso y ángulo de hélice	34
2.3.2	Longitudes de las secciones del husillo.....	36
2.3.3	Cálculo holgura barril-husillo	38
2.3.4	Longitud de trabajo y número de filetes del husillo	39
2.3.5	Cálculo del número de revoluciones del husillo	39
2.4	Cálculo de flujos en la extrusora.....	40
2.4.1	Presión máxima dentro de la extrusora	41

2.4.2	Flujo total dentro de la extrusora	42
2.4.3	Cálculo de la potencia en base al flujo	42
2.5	Cálculo de potencias y sus pérdidas	43
2.5.1	Cálculo de pérdidas por instalaciones eléctricas	43
2.5.2	Cálculo de pérdidas en motores y generadores	44
2.5.3	Cálculo de potencia real	44
2.5.4	Cálculo del torque en base a la potencia real.....	45
2.5.5	Cálculo de potencia del motor	45
2.6	Consideraciones de diseño para husillos de extrusión.....	46
2.7	Selección del material del husillo de extrusión	47
2.8	Análisis de fuerzas y reacciones en el husillo.....	48
2.8.1	Fuerza de compresión (fx) del husillo	50
2.8.2	Cálculo de reacciones ejes x,y	51
2.8.3	Cálculo de momento de giro y momento de inercia.....	52
2.8.4	Cálculo del radio de inercia y esbeltez	54
2.8.5	Cálculo fuerza axial y tensión tangencial.....	55
2.8.6	Cálculo de la tensión normal	55
2.8.7	Cálculo de la flecha de flexión del husillo	58
2.8.8	Criterio de la deflexión permisible del husillo.....	59
2.8.9	Cálculo del esfuerzo equivalente y factor de diseño.....	61
2.8.10	Diseño del muñon.....	63
2.9	Diseño del barril.....	64
2.9.1	Selección del material del barril	65

2.9.2	Cálculo del espesor del barril	66
2.10	Selección y diseño de la tolva	67
2.10.1	Selección del material de la tolva	70
2.10.2	Diseño de la garganta de alimentación.....	71
2.11	Diseño del cabezal	72
2.11.1	Selección del material del cabezal	72
2.11.2	Dimensiones del cabezal.....	73
2.12	Diseño eléctrico	74
2.13	Selección del motor	74
2.13.1	Características del motor.....	75
2.14	Sistema de control de temperatura.....	77
2.14.1	Selección del controlador de temperatura	77
2.14.2	Selección del termopar	78
2.14.3	Selección de la resistencia calefactora.....	79
2.14.4	Cálculo de potencia de la resistencia	81
A)	Volumen del barril	81
B)	Superficie externa del barril	82
C)	Tiempo de residencia de la mezcla.....	82
D)	Diferencial de temperaturas en el barril	83
E)	Flujo de calor	83
F)	Potencia aparente	84
G)	Potencia real.....	84

CAPÍTULO III

CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

3.1	Construcción.....	86
3.1.1	Construcción del barril.....	86
3.1.2	Construcción de la base	87
3.1.3	Construcción de la brida	87
3.1.4	Construcción de los cabezales	87
3.1.5	Construcción de la placa I.....	88
3.1.6	Construcción del soporte superior e inferior	89
3.1.7	Construcción del soporte reductor.....	89
3.1.8	Construcción del soporte tolva	90
3.1.9	Construcción de la estructura.....	91
3.1.10	Construcción de la tolva	92
3.2	Implementación de elementos y dispositivos.....	92
3.2.1	Implementación del husillo	92
3.2.2	Implementación del motor y reductor.....	93
3.2.3	Implementación de resistencias y termopares.....	94
3.2.4	Montaje variador de frecuencia	95
3.2.5	Montaje de los controladores pid.....	95
3.2.6	Montaje de los ventiladores	96
3.2.7	Montaje de los interruptores y luces piloto.....	96
3.3	Conexiones de dispositivos eléctricos y electrónicos	97

3.3.1	Conexiones internas del motor	97
3.3.2	Conexión del motor al variador de frecuencia	98
3.3.3	Conexión elementos de protección eléctrica	98
3.3.4	Conexiones de los controladores pid.....	99
3.4	Configuración de los dispositivos electrónicos	100
3.4.1	Diagrama de flujo	100
3.4.2	Configuración de parámetros variador de frecuencia	101
3.4.3	Configuración de parámetros controladores pid	102
3.5	Implementación del sistema total	103

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1	Pruebas de funcionamiento general	104
4.2	Pruebas de funcionamiento con diversos polímeros	105
4.2.1	Pruebas de funcionamiento con abs reciclado	105
4.2.2	Pruebas de funcionamiento con abs virgen.....	106
4.2.3	Pruebas de funcionamiento con pla	108
4.3	Masterbatch al filamento abs.....	110
4.4	Pruebas para el diámetro de filamentos extruidos.....	111
4.5	Ensayo de tracción de plásticos	112
4.6	Validación de la hipótesis	115
4.7	Análisis de costos.....	118

4.7 Análisis costo-beneficio	119
------------------------------------	-----

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES	122
---------------------------	-----

RECOMENDACIONES	123
------------------------------	-----

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	124
---	-----

ANEXOS	130
---------------------	-----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Extrusora Compacta vs Extrusora Industrial</i>	13
Tabla 2 <i>Características de algunas extrusoras de filamento</i>	20
Tabla 3 <i>Parámetros de la extrusora</i>	21
Tabla 4 <i>Tabla comparativa de propiedades de diferentes materiales</i>	23
Tabla 5 <i>Temperaturas de transición vítrea y de fusión de algunos polímeros</i>	25
Tabla 6 <i>Propiedades mecánicas y térmicas del ABS</i>	31
Tabla 7 <i>Ventajas que presenta una Relación L/D corta VS Relación L/D larga</i>	33
Tabla 8 <i>Diseño para reducir el coeficiente de fricción entre el material y el husillo</i>	46
Tabla 9 <i>Análisis Aceros comerciales para la fabricación del husillo de extrusión</i> ...	47
Tabla 10 <i>Análisis de Aceros comerciales para la fabricación del barril</i>	65
Tabla 11 <i>Tolvas según su forma y aplicaciones</i>	68
Tabla 12 <i>Aceros comerciales para la fabricación de la tolva</i>	70
Tabla 13 <i>Características Motores CA vs. Motores CD</i>	75
Tabla 14 <i>Características del Motor CA</i>	76
Tabla 15 <i>Ventajas de algunos controladores de temperatura</i>	77
Tabla 16 <i>Termopares comerciales</i>	78
Tabla 17 <i>Ventajas de algunos tipos de resistencias calefactoras</i>	81
Tabla 18 <i>Check list funcionamiento extrusora</i>	104
Tabla 19 <i>Comparación diámetros de filamento 1.75mm</i>	112
Tabla 20 <i>Resultado N°1-Ensayo de Tracción</i>	113
Tabla 21 <i>Resultado N°2-Ensayo de Tracción</i>	113

Tabla 22 <i>Cuestionamientos Variable A vs. Variable B</i>	117
Tabla 23 <i>Cuestionamientos Variable B vs. Variable A</i>	117
Tabla 24 <i>Costos de elementos y dispositivos</i>	118
Tabla 25 <i>Análisis cuantitativo</i>	120

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Extrusora industrial de filamentos plásticos.....	9
Figura 2. Extrusora Filabot EX2.....	10
Figura 3. Extrusora Lyman II.....	11
Figura 4. Extrusora Noztek Touch HT.....	12
Figura 5. Extrusora FilaFab Pro350.....	12
Figura 6. Elementos de una extrusora.....	15
Figura 7. Geometría husillo de extrusión.....	15
Figura 8. Disposición de husillos.....	16
Figura 9. Secciones del husillo de extrusión.....	18
Figura 10. Tipos de husillos de extrusión.....	19
Figura 11. Clasificación de los polímeros.....	22
Figura 12. Volumen específico Vs Temperatura.....	24
Figura 13. Estructuras moleculares de los polímeros.....	26
Figura 14. Bloques Lego en ABS.....	27
Figura 15. Utensilios fabricados en PLA.....	28
Figura 16. Pellets de ABS.....	28
Figura 17. Simbología de reciclado de polímeros.....	29
Figura 18. Probetas para Ensayo de Tracción.....	30
Figura 19. Ensayo de tensión a filamento ABS.....	30
Figura 20. Parámetros del husillo de extrusión.....	32
Figura 21. Características de los plásticos vs. Materiales de husillos.....	47

Figura 22. Cargas que actúan en el husillo.....	49
Figura 23. Fuerza Cortante y Momento Flexor máximo.....	50
Figura 24. Superficie transversal A-A del husillo.....	53
Figura 25. Análisis de máximo esfuerzo del husillo	57
Figura 26. Deformación del husillo.....	59
Figura 27. Deformaciones admisibles en vigas	60
Figura 28. Factores de diseño para materiales dúctiles.....	62
Figura 29. Muñón y parte inicial del husillo	63
Figura 30. Modelado del husillo	64
Figura 31. Parámetros del barril.....	64
Figura 32. Modelado del barril	67
Figura 33. Tipos de tolva	67
Figura 34. Dimensiones de la tolva.....	70
Figura 35. Diseño de la tolva y corte longitudinal	71
Figura 36. Garganta de alimentación.....	72
Figura 37. Modelado del cabezal y corte transversal.....	74
Figura 38. Termopar con malla de protección	79
Figura 39. Resistencia tubular	79
Figura 40. Resistencia tipo banda.....	80
Figura 41. Resistencia tipo cartucho.....	80
Figura 42. Tubo redondo AISI 1018.....	86
Figura 43. Barril enroscado a la brida	87
Figura 44. Cabezal mecanizado	88

Figura 45. Montaje Variador en Placa L.....	88
Figura 46. Soporte superior e inferior	89
Figura 47. Soportes para el motorreductor	90
Figura 48. Soportes para la tolva	90
Figura 49. Modelado de la estructura	91
Figura 50. Construcción de la tolva.....	92
Figura 51. Husillo de uso general	93
Figura 52. Disposición de motor y reductor	93
Figura 53. Disposición de resistencias y termopares.....	94
Figura 54. Cables con aislamiento térmico	94
Figura 55. Montaje Variador de Frecuencia.....	95
Figura 56. Montaje controladores PID	95
Figura 57. Posicionamiento de los ventiladores.....	96
Figura 58. Interruptores y luces piloto de la extrusora	96
Figura 59. Conexión en triangulo	97
Figura 60. Diagrama de conexiones del Motor de CA	97
Figura 61. Conexión Motor-Variador.....	98
Figura 62. Conexión breaker al variador.....	99
Figura 63. Conexión alimentación y termopar al PID.....	99
Figura 64. Conexiones al controlador PID	100
Figura 65. Diagrama de flujo proceso de extrusión.....	101
Figura 66. Máquina extrusora	103
Figura 67. ABS reciclado extruido.....	105

Figura 68. ABS extruido a 180°C	106
Figura 69. ABS extruido a 210°C	107
Figura 70. ABS extruido a 240°C	107
Figura 71. Plástico PLA	108
Figura 72. Trozos de plástico PLA.....	108
Figura 73. Filamento con mezcla de ABS y PLA	109
Figura 74. Extrusión material PLA	109
Figura 75. Filamento PLA	110
Figura 76. PS azul para Masterbatch.....	110
Figura 77. Resultado del Masterbatch	111
Figura 78. Gráfica Fuerza vs Desplazamiento- Ensayo1	114
Figura 79. Gráfica Fuerza vs Desplazamiento- Ensayo2.....	115

RESÚMEN

El presente trabajo de titulación está basado en el diseño e implementación de una extrusora de filamentos plásticos de 1,75mm y 3mm de diámetro. Al inicio se diseñó y fabricó un husillo con resultados regulares al extruir, la mejor alternativa fue adquirir un husillo prefabricado; se utilizó software CAE para analizar el diseño del husillo. Se empleó un motor AC de 0.5Hp con un variador de frecuencia Siemens Sinamics V20, motorreductor 40:1, tres controladores PID de temperatura, termopares tipo K y ventiladores, la extrusora funciona a 220VAC/60Hz. Para las pruebas del sistema mecatrónico se emplearon como materia prima: ABS virgen con resultados favorables, ABS reciclado que al estar mezclado con fibra de vidrio y otros residuos presentó dificultades al extruir; PLA el cual no se pudo encontrar en forma de pellets por lo que se trituró filamento comercial para volverlo a termoformar, se realizó Masterbatch utilizando poliestireno obteniendo diversas tonalidades de material extruido. El filamento ABS producido se comparó con marcas de distinto coste y calidad mediante Ensayo de Tracción de Materiales Plásticos bajo normas y estándares internacionales. Finalmente se realizó un análisis de costos determinando al proyecto viable, conclusiones y recomendaciones que establecen que el proyecto se puede mejorar y complementar con un sistema de control de diámetro del filamento extruido.

PALABRAS CLAVE:

- **MÁQUINA EXTRUSORA DE FILAMENTOS**
- **ACRILONITRILO BUTADIENO ESTIRENO**
- **POLÍMEROS-ENSAYO DE TRACCIÓN**

ABSTRACT

The present titulation work was based on the design and implementation of a 1.75mm and 3mm diameter plastic filament extruder. At the beginning a screw was designed and manufactured with regular results when extruding, the best alternative was to acquire a prefabricated screw, CAE software was used to analyze the screw design. A 0.5Hp AC motor was used with a Siemens Sinamics V20 frequency inverter, 40:1 gearmotor, three PID temperature controllers, K-type thermocouples and fans, the extruder operates at 220VAC/60Hz. For tests of the mechatronic system, the next plastic types were used as raw material: virgin ABS with favorable results, recycled ABS that when mixed with fiberglass and other residues presented difficulties when extruding, PLA which could not be found in pellets so PLA commercial filament was crushed to thermoform again, Masterbatch was also made using polystyrene obtaining different color tones of extruded material. The produced ABS filament was compared with brands of different cost and quality by Tensile Test of Plastic Materials under international norms and standards. Finally, a cost analysis was performed determining the feasible project, conclusions and recommendations that establish that the project can be improved and complemented with an extruded filament diameter control system.

KEYWORDS:

- **FILAMENT EXTRUDER MACHINE**
- **ACRYLONITRILE BUTADIENE STYRENE**
- **POLYMER-TENSILE TEST**

PRESENTACIÓN

En el presente trabajo de tesis se ha desarrollado una máquina extrusora de filamentos de 1.75 mm y 3 mm de diámetro para impresoras 3D.

En el Capítulo I se tiene la información más importante y relevante, relacionada con las extrusoras de termoplásticos, trabajos de tesis e investigación referente al tema, los materiales para extrusión, así como los elementos y herramientas necesarias para el desarrollo y ejecución del proyecto de investigación planteado.

El Capítulo II contiene el diseño y la selección de los distintos elementos y componentes, correspondientes a la parte mecánica, eléctrica y electrónica de la máquina extrusora, adicionalmente se toma en cuenta las características y parámetros necesarios para poder extruir termoplásticos que posteriormente se podrán utilizar en la Impresión 3D.

En el Capítulo III se presenta la construcción e implementación tanto de la parte mecánica, como de la parte eléctrica y electrónica correspondiente a la extrusora.

El Capítulo IV corresponde a las pruebas ejecutadas y sus correspondientes resultados al funcionamiento en general de la extrusora; se ha comparado tolerancias de diámetro y se ha sometido al filamento a ensayos de tensión para comparar la calidad frente a otras marcas comerciales, finalmente se ha realizado un análisis de costos para comprobar si el proyecto cumple con los objetivos planteados.

En el Capítulo V se detallan las conclusiones a las que se ha llegado una vez desarrollada la extrusora, así como las recomendaciones a ser tomadas en cuenta para futuros trabajos de investigación que se desarrollen entorno a este proyecto de titulación.

CAPÍTULO I

ESTADO DEL ARTE

1.1 INTRODUCCIÓN

La extrusión de plásticos es un proceso termoplástico en el cual se pueden emplear algunas clases de polímeros y obtener distintas formas tales como filamentos. Las máquinas extrusoras han ido evolucionando gracias a la incorporación de técnicas y conocimientos referentes a Tecnología de Materiales, Electrónica, Mecánica y Programación, que en conjunto han logrado dar mayor velocidad de extrusión, trabajar con distintos termoplásticos y sobretodo lograr reducir en dimensiones a las extrusoras. Al momento, con la difusión de tecnologías de prototipado rápido, como la Impresión 3D FDM (Modelado por deposición fundida) y el compromiso de cuidar el medio ambiente a través del reciclaje de plásticos, sumado a los altos costes de filamentos para imprimir en 3D, han dado como resultado la aparición de máquinas extrusoras rápidas y compactas, capaces de trabajar con material reciclado y pellets de termoplástico, para la producción de filamentos de las dimensiones y la calidad requerida para ser utilizados en procesos tales como la Impresión 3D.

1.2 ANTECEDENTES

“Joseph Bramah en 1797, fue quien patentó y desarrolló el primer proceso de extrusión, en el cual trabajaba con metal con la finalidad de conformar un tubo de plomo, pero no fue sino hasta 1935 donde se realizó por primera vez una extrusión termoplástica, realizada por Paul Troester y su esposa Ashley Gershoff en Hamburgo, Alemania.” (Rauwendaal, 2001)

En la actualidad, existen diversas extrusoras, de uno o más husillos, de distinta capacidad y tamaño, que además trabajan con varios materiales, ya sean estos termoplásticos o metales.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El proceso de producción de filamentos utilizados en impresión 3D se realiza mediante extrusión de materiales poliméricos derivados del petróleo y de residuos orgánicos, su adquisición resulta costosa ya que se producen en países con mayor desarrollo tecnológico, a veces este material debe ser de la misma marca que la impresora donde se va a utilizar, lo que a la larga genera una dependencia y consumismo tal y como sucedía con las impresoras de tinta y su sistema de cartuchos.

Los elevados costos de filamentos termoplásticos hacen que esta tecnología sea accesible a pocas personas, la finalidad es producir filamento a partir de plástico reciclado y virgen, el cual se puede adquirir de varias empresas que se dedican a procesar y comercializar termoplásticos en nuestro país, este material está disponible en forma de pellets (pequeñas porciones de plástico aglomerado o comprimido) y el precio del kilo oscila entre 5 a 7 dólares dependiendo el tipo de plástico, en comparación a un carrete de filamento de un kilo que se comercializa entre 40 y 70 dólares dependiendo su calidad.

1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

En vista que cada vez existe mayor demanda para la utilización de las impresoras 3D existentes en los laboratorios de la institución y que la adquisición de filamento resulta

costosa; se justifica este proyecto porque ayudará a quien lo requiera a realizar con mayor facilidad sus impresiones 3D, ahorrando dinero que es el principal limitante, por lo cual se requiere diseñar y construir una máquina extrusora de filamentos de 1.75 mm y 3mm de diámetro para impresoras 3D a partir de material reciclado, para dotar a los laboratorios de la institución de este filamento.

Es importante que las Instituciones de Educación Superior busquen soluciones a los problemas tecnológicos, como en este caso el acceso a tecnologías nuevas de prototipado rápido, porque se cuenta con los conocimientos para desarrollar tecnología que pueda mejorar la disponibilidad, producción y el reciclaje de termoplásticos con el uso de sistemas mecatrónicos.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 GENERAL

- Diseñar y construir una máquina extrusora de filamentos de 1.75 mm y 3mm de diámetro para impresoras 3D, a partir de polímero reciclado.

1.5.2 ESPECÍFICOS

- Investigar acerca de los nuevos materiales termoplásticos utilizados en impresión 3D, sus soluciones para su reciclaje y producción, así como las extrusoras que surgen en el mercado.

- Establecer comparaciones entre ventajas y desventajas que presentan las alternativas de extrusoras de filamento para impresoras 3D que se comercializan y desarrollan.
- Reciclar objetos termoplásticos y piezas impresas en 3D para la obtención de filamentos ABS, PLA, etc.
- Diseñar el sistema de control y la transmisión del motor para las secuencias donde implique la extrusión misma del material.
- Implementar un diseño que permita la obtención de filamentos de 1.75mm y 3mm de diámetro.
- Realizar ensayos mecánicos al filamento obtenido para garantizar su utilización en impresoras 3D.

1.6 HIPÓTESIS

Mediante el diseño y construcción de una máquina extrusora, se producirá filamento de 1.75 mm y 3mm de diámetro para impresoras 3D a partir de polímero reciclado.

1.7 VARIABLES DE LA INVESTIGACIÓN

1.7.1 VARIABLE DEPENDIENTE

Polímero reciclado.

1.7.2 VARIABLE INDEPENDIENTE

Máquina extrusora de filamentos de 1.75mm y 3mm de diámetro para impresoras 3D.

1.8 METODOLOGÍA DE DESARROLLO DEL PROYECTO

A través del Método Documental Bibliográfico se obtendrá información acerca de los antecedentes, situación actual de las extrusoras existentes y sus alternativas, con que material operan, ventajas y desventajas, precios y otras características presentes; para luego establecer un análisis entre las opciones disponibles y tomar aquellas características que se consideren mejores, luego se establecen las alternativas de diseño para su funcionamiento (diseño mecánico, electrónico) con la finalidad de cumplir el objetivo final que es obtener filamento para impresoras 3D.

Mediante el Método Inductivo se observarán y controlaran algunas variables dentro del proyecto (materiales, temperatura, velocidades, cantidades de polímero, etc.), para de esta forma, medir la variación o alteración en otras variables, esto garantizará el correcto funcionamiento del proyecto cuando se haya finalizado. Además permitirá mejorar el proceso de extrusión para que sea capaz de producir filamento a bajo costo, de material barato y reciclable, con una velocidad de producción acorde a lo requerido.

Finalmente con el Método Experimental se busca poner en marcha el proyecto, una vez comprobado que el filamento cumple con los requisitos necesarios para operar en impresoras 3D (diámetros, tolerancias, elasticidad, dureza, etc.), caso contrario se podrán corregir fallas y errores que se vayan presentando.

1.9 ESTUDIO DE EXTRUSORAS DE FILAMENTO

Las extrusoras de filamento se encuentran en pleno desarrollo, con el fin de que cada vez sea más fácil y económico obtener filamento para realizar impresiones en 3D, así como de acortar sus dimensiones. Los trabajos que se mencionan a continuación han sido referentes importantes para el desarrollo del presente proyecto:

- **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TRITURADORA Y EXTRUSORA PARA LA PRODUCCIÓN DE HILO PLÁSTICO EMPLEADO EN IMPRESORAS 3D”, Freddy M. Gualoto, Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador, 2015.**

Este trabajo contempla el diseño mecánico de una trituradora para obtener pellets de termoplástico y posteriormente alimentar una extrusora para la producción de filamento.

El diseño de los elementos de la extrusora se los realiza mediante varios cálculos, donde están involucradas variables y parámetros tales como la potencia, calor, esfuerzos, momentos, torque, cargas, inercias, deflexiones, entre muchas otras. Se diseña y emplea un husillo sencillo para la extrusión del termoplástico en vez de uno de tres secciones, el cual es óptimo para procesar ABS.

- **“DISEÑO DE UNA EXTRUSORA PARA PLÁSTICOS”, Gómez J. & Gutiérrez J, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira-Colombia, 2007.**

Este proyecto está destinado a la extrusión del polipropileno (PP), utilizando elementos ya existentes y adecuando los faltantes al diseño; de esa forma este trabajo contribuye con futuros proyectos que requieran fundamentación técnica en la realización

de extrusoras, así como dar a conocer a empresarios dedicados a la industria de la extrusión a considerar máquinas más compactas y eficientes en este tipo de tareas.

Se diseña un husillo para acoplarlo a la extrusora y para el Sistema Eléctrico utiliza un motorreductor en conjunto con un variador de frecuencia, resistencias tipo abrazadera para la fundición del polímero, dispone de un controlador PID de temperatura, también se detalla el diseño de la tolva (dimensiones, material, geometría).

- **“DISEÑO DE UNA MÁQUINA EXTRUSORA PARA LA EMPRESA PLASTIK DE OCCIDENTE”, Roosevelt Cifuentes, Universidad del Valle, Cali-Colombia, 2011.**

Tiene la finalidad de extruir polipropileno, poliestireno y PVC para emplearlos en la fabricación de diversos insumos, según las necesidades de la empresa se diseña y eligen los componentes que constituirán la máquina, tomando en cuenta la capacidad de producción, consumo de energía, calidad del producto, etc.

Incorpora un plato rompedor dentro del barril, el cual impide el paso de impurezas al filamento extruido, emplea un motor AC con un reductor de velocidad que transmite movimiento al husillo mediante una cadena y piñón, utiliza resistencias calefactoras de alta temperatura a lo largo del barril debido a que el PVC es un polímero que necesita mayores temperaturas para ser extruido.

- **“DISEÑO DE UN SISTEMA DE EXTRUSIÓN-PELETIZADO PARA EL PROCESAMIENTO DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS PARA LA EMPRESA MUNICIPAL DE LA CIUDAD DE CUENCA EMAC”, Christian M. Cobos, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca-Ecuador, 2011.**

Este proyecto da solución a la problemática de los residuos plásticos que llegan a los depósitos municipales, reciclando así diversos desechos y procesarlos hasta convertirlos en materias primas que sean adecuadas para la producción de nuevos productos.

Se utiliza un husillo de extrusión especial que sea capaz de extruir PET, un plato rompedor que modifica la presión y el flujo del material fundido, además el husillo es modelado en un software CAD (Autodesk Inventor) y sometido al “Análisis de esfuerzos mediante el método de elementos finitos” para determinar esfuerzos, deflexiones, cargas, peso, volumen, masa, factor de servicio, etc.

- **“HOW TO MAKE PORTABLE HOMEMADE FILAMENT EXTRUDER”, Bijaya Poudel, Arcada, Helsinki-Finlandia, 2015.**

Este trabajo presenta el desarrollo de una extrusora de reducidas dimensiones y bajo costo capaz de producir filamento de 1.75 mm de diámetro.

Utiliza una broca especial (auger drill) que hace la función de husillo de extrusión, un controlador PID de temperatura, un relé de estado sólido (SSR), el motor de la extrusora funciona a 5 RPM, la temperatura de extrusión llega hasta 217°C, se optimizan recursos

económicos dando un gasto total de 200 euros (\$230), como beneficio adicional el mantenimiento de la extrusora resulta bastante asequible debido a su pequeño tamaño.

1.10 EXTRUSORAS COMPACTAS EXISTENTES EN EL MERCADO

“El precio del material de impresión 3D, aunque es relativamente bajo, es uno de los aspectos más costosos de operar con una impresora 3D.” (Aledo, 2013)

Existen impresoras 3D FDM (Modelado por Deposición Fundida) que solamente operan con filamento propio de la marca, así como impresoras que admiten filamentos sin ningún tipo de restricción. Como se puede observar en la Figura 1 las dimensiones de las extrusoras industriales, son demasiado grandes como para operar en sitios pequeños.

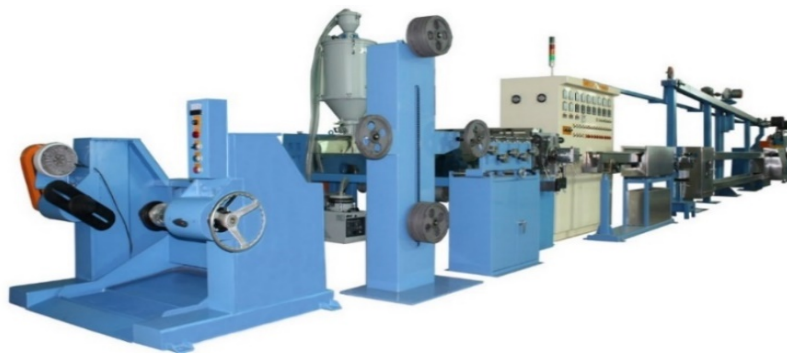


Figura 1. Extrusora industrial de filamentos plásticos
Fuente:(Fiordtrimmerline, 2014)

Como en los últimos años se ha incrementado el desarrollo y la comercialización de impresoras 3D FDM, se ha popularizado esta técnica de prototipado rápido, sin embargo, el alto coste de los consumibles ha limitado el uso de tal tecnología; se hace necesario

producir filamento a bajos costes sin comprometer su calidad. Las extrusoras portátiles plantean una solución eficaz, ya que pueden operar con pellets y termoplásticos reciclados. A continuación se detallan varias extrusoras portátiles que actualmente se comercializan:

a) Filabot EX2

Posee un husillo de extrusión de alto desempeño, extruye 2 libras de filamento por hora, Figura 2.

- Temperatura máxima: 450°C
- Controlador PID: 1
- Velocidad de extrusión: 6m/min
- Materiales de trabajo: ABS, PLA, PC, PS, HIPS.
- Potencia: 500 Watts
- Dimensiones: 43x18x20 cm
- Precio: \$2150



Figura 2. Extrusora Filabot EX2
Fuente: (Filabot, 2016)

b) Extrusora Lyman

Es de código abierto, emplea materiales y componentes sencillos, en su mayoría reutilizados y de bajo coste, Figura 3.

- Materiales de trabajo: ABS, PLA.
- Controlador PID: 1
- Precio: \$250

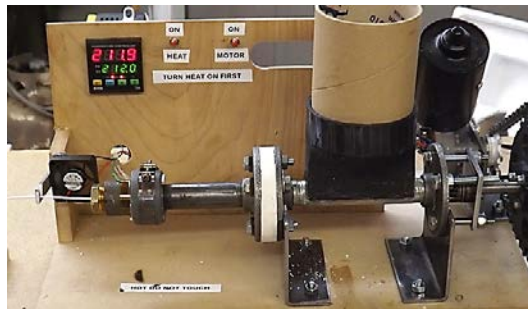


Figura 3. Extrusora Lyman II
Fuente: (Thingiverse, 2013)

c) Noztek Touch HT

Extruye 1 Kg de filamento en 2 horas a 600 °C, incorpora una pantalla táctil y una interfaz intuitiva, funciona con la tarjeta controladora Arduino, opera de forma horizontal u oblicua, Figura 4.

- Velocidad de extrusión: 1m/min
- Tolerancia filamento extruido: ± 0.04 mm
- Materiales de trabajo: ABS, PLA, entre otros.
- Dimensiones: 30x30x80 cm
- Precio: \$2400

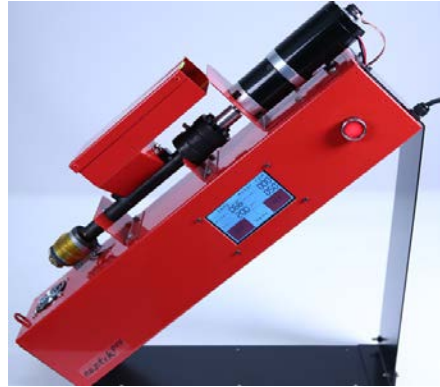


Figura 4. Extrusora Noztek Touch HT
Fuente: (Noztek, 2014)

d) FilaFab Pro 350

Produce 800 gramos de filamento por hora, posee un control PID digital de temperatura, un motor DC de alto torque, boquillas intercambiables, entre otras características, Figura 5.

- Temperatura máxima: 250°C
- Materiales de trabajo: ABS, PLA, entre otros.
- Dimensiones: 64x16x24 cm
- Potencia: 600 Watts
- Precio: \$1950



Figura 5. Extrusora FilaFab Pro350
Fuente: (Filafab, 2014)

1.11 DIFERENCIAS EXTRUSORA COMPACTA VS EXTRUSORA INDUSTRIAL

En la Tabla 1 se presentan algunas diferencias entre extrusoras industriales y compactas, con el fin de establecer ventajas y desventajas en el desarrollo del proyecto.

Tabla 1

Extrusora Compacta vs Extrusora Industrial

Características	E. Compacta	E. Industrial
Consumo eléctrico	Bajo	Alto
Espacio requerido	Poco	Mucho
Operadores	1	>1
Costo mantenimiento	Bajo	Alto
Transporte	Fácil	Difícil (Requiere desmontaje)
Calidad filamento	Medio	Medio-Alto
Manejo	Sin experiencia	Requiere capacitación y experiencia

1.12 MÁQUINAS EXTRUSORAS DE TERMOPLÁSTICOS

(Giles Harold et al., 2005) describen a las extrusoras como máquinas que procesan la materia prima (polímeros) en filamentos de diversas formas, los principales elementos que constituyen una extrusora son:

- **Tolva.-** Depósito por donde la materia prima (termoplástico), ingresa a la extrusora. Se diseña acorde a las dimensiones, capacidades y material con el que trabajará la máquina, de tal forma que el polímero baje a una velocidad adecuada, evitando grumos y material mal fundido.

- **Barril.-** Cilindro en donde el material se funde, es de un tipo de acero capaz de trabajar con el polímero a ser utilizado para reducir el coeficiente de fricción entre el material y el barril, permite una mejor fluencia del termoplástico fundido, posee una dureza adecuada que evite el desgaste a altas temperaturas.
- **Husillo de extrusión.-** Es en esencia un tornillo de Arquímedes, garantiza que la extrusión se realice con a las especificaciones establecidas, permite mezclar, transportar y compactar el termoplástico que fluye en estado líquido. Su diseño y material, depende del polímero a procesar.
- **Motor y Sistema de Reducción.-** Proveen energía motriz al husillo, permitiendo el flujo del polímero. Dependiendo del tipo de extrusora, puede incorporar o no un Sistema de Reducción, el cual modifica el torque y la velocidad que va del motor al husillo.
- **Cabezal.-** (Dado, boquilla), da la forma final al termoplástico fundido. En su diseño se toma en cuenta las presiones a las que el termoplástico es sometido dentro del barril, antes del cabezal el polímero experimenta una presión alta, y una vez que el material sale del mismo la presión es igual a la atmosférica, el perfil del cabezal suele ser distinto al del perfil final que toma el material, debido a propiedades elásticas de los polímeros.

En la Figura 6 se puede observar una extrusora con los elementos mencionados.

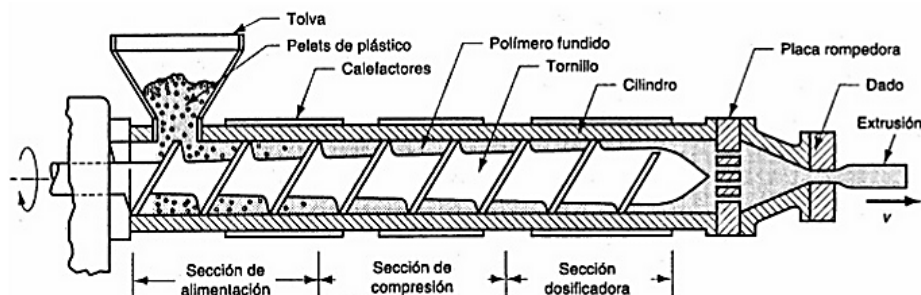


Figura 6. Elementos de una extrusora
Fuente: (Rossa, 2011)

1.12.1 EXTRUSORAS DE HUSILLO SIMPLE

Son las más comunes y utilizadas. En la Figura 7 se muestran algunos de sus parámetros, donde (H) viene a ser el espesor del termoplástico y (W) su ancho, ángulo de trayectoria (θ), ancho del filete (w). El paso y la forma del tornillo, afectan directamente a la fluencia del polímero fundido a través del proceso de extrusión.

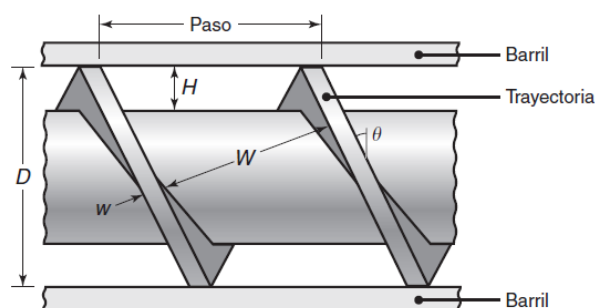


Figura 7. Geometría husillo de extrusión
Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

1.12.2 EXTRUSORAS DE DOBLE HUSILLO

Según (Beltrán & Marcilla, 2012), presentan posibilidades que superan a las de un solo husillo. Tienen buena capacidad de mezclado y desgasificación, buen control del

tiempo de residencia y distribución. Su desventaja es su elevado precio con prestaciones difíciles de predecir. En la Figura 8 se muestran algunas configuraciones de los husillos en extrusoras de doble husillo.

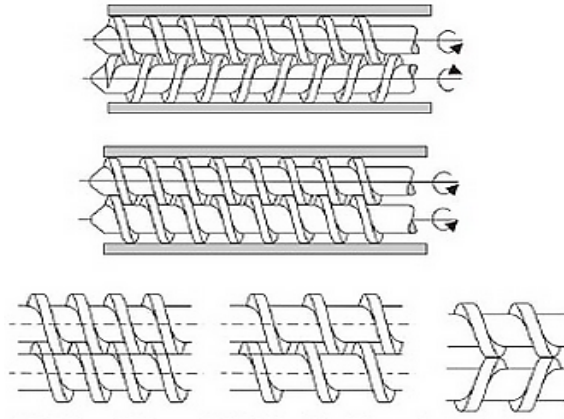


Figura 8. Disposición de husillos

Fuente: (Beltrán & Marcilla, 2012)

1.13 ACEROS PARA FABRICACIÓN DE HUSILLOS Y BARRILES

Para la fabricación de husillos de extrusión de termoplásticos usualmente se utilizan 4 tipos de acero (Tecnología de los Plásticos, 2011):

- **Nitralloy 135.-** Acero grado herramienta que una vez mecanizado se le realiza un nitrurado por 72 horas. Excelente opción de bajo costo cuando el desgaste por abrasión pasa a segundo término.
- **AISI 4140.-** Acero para herramientas con excelente resistencia mecánica cuando se le aplica un tratamiento térmico o un recubrimiento superficial.

- **AISI D2.-** Tiene alto contenido de carbono y cromo, excelente resistencia al desgaste pero bajo desempeño en la transmisión de torque.
- **AISI 1018.-** Acero de bajo-medio carbono, buena maquinabilidad, alta tenacidad y excelente resistencia mecánica, utilizado en procesos de deformación plástica.

Mientras que para los barriles se emplean los siguientes aceros:

- **AISI-D2.-** Alto contenido de carbono y cromo, térmicamente tratable, ofrece alta resistencia a la abrasión y buena resistencia a la corrosión. Su dureza típica es de 58-60 HRc.
- **AISI-M2.-** Acero de alta velocidad al tungsteno–molibdeno, también usado en la manufactura de cortadores, rimas y machuelos. Ofrece excelente resistencia al desgaste y buena dureza.
- **CPM-10V.-** Acero grado herramienta, ofrece excepcional resistencia al desgaste.
- **AISI 1018.-** Ofrece buena soldabilidad y maquinabilidad, alta tenacidad y excelente resistencia mecánica, utilizado en la fabricación de piezas para la extrusión como tornillos y camisas.

1.14 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN DE TERMOPLÁSTICOS

Según (Kalpakjian & Schmid, 2008) las materias primas en forma de pellets, gránulos o polvo termoplástico se colocan en una tolva y alimentan el barril de un extrusor de tornillo. Dicho barril se equipa con un tornillo helicoidal que mezcla los pellets y los transporta hacia el dado. La acción del tornillo también aumenta la presión dentro del barril. Los husillos tienen tres secciones distintas, tal y como se muestra en la Figura 9:

- a) **Sección de alimentación.-** Recibe el material de la tolva, lo transporta a la parte central del barril. Es la sección con mayor profundidad, ya que necesita llevar una cantidad adecuada de materia prima.
- b) **Sección de fusión.-** En esta sección el material se funde debido a la fricción interna y al calor producido por las resistencias eléctricas de la extrusora. La profundidad va aumentando progresivamente, lo cual da un aumento de presión a la que está sometido el material.
- c) **Sección de bombeo.-** En esta sección se ejercen altas presiones sobre el material fundido, debido a la profundidad que es la menos en comparación al resto de secciones, lo cual garantiza la salida del material por la boquilla.

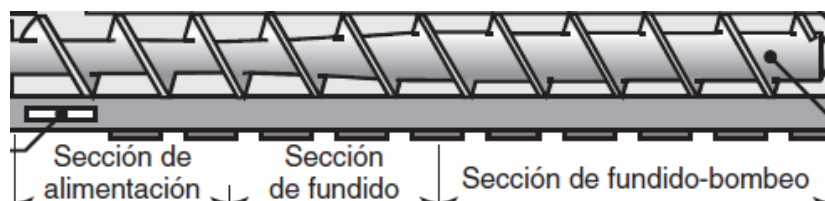


Figura 9. Secciones del husillo de extrusión

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

El material fundido y a presión alta pasa por una boquilla, la cual da la forma final al polímero, luego se enfría al entrar en contacto con el ambiente.

- **Relación L/D.-** Se tienen extrusoras con diámetros de husillo que van desde los 9 mm a los 580 mm, para un diámetro establecido, la fundición, mezcla y homogenización del polímero a una velocidad de giro determinada, varia al aumentar o disminuir la longitud del tornillo, por esta razón se debe determinar la Relación longitud/diámetro (L/D), en extrusión de termoplásticos la relación L/D por lo general varía entre 20:1 y 30:1.
- **Tipos de husillo.-** Existen husillos prefabricados para extruir diversos termoplásticos; se los denomina husillos tipo Nylon, tipo PVC, tipo Polietileno, etc. Tienen marcadas diferencias entre ellos, algunos tienen un paso constante y profundidad de canal variable, o viceversa, algunos tienen distintas formas en su punta, en la Figura 10 se puede diferenciar algunos de estos tipos de husillos:

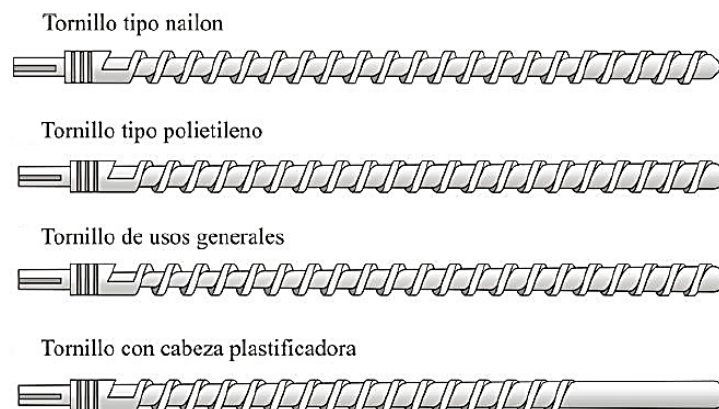


Figura 10. Tipos de husillos de extrusión

Fuente: (Elblogdelplastico, 2011)

1.15 ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN

Para el adecuado desarrollo de la extrusora, se deben establecer ciertos parámetros de diseño y tomar en cuenta algunas alternativas ya existentes, de tal forma de que el diseño final cumpla con las características que se requieren en los filamentos termoplásticos, en la Tabla 2 se detallan algunas características obtenidas de las extrusoras ya analizadas.

Tabla 2
Características de algunas extrusoras de filamento

Características	FilaBot	Lyman	Noztek	FilaFab
Voltaje (Vac)	110-220	110-220	110-220	110-220
Frecuencia (Hz)	50-60	50-60	50-60	50-60
Husillo	Simple	Simple	Simple	Simple
Tarjeta controladora	Desconocido	Pic16f877a	Arduino Uno	Desconocido
Producción (gr/H)	900	-	500	800
Diámetro filamento extruido	1.75mm y 3mm	1.75mm	1.75mm y 3mm	1.75mm y 3mm
Controlador temperatura	PID	PID	PID	PID
Motor	DC	DC	DC	DC
Caja reductora	Si	Si	No	No
Ventilación	No	Si	Si	Si

La extrusora a diseñar va a utilizar un controlador de temperatura PID, ya que no es muy costoso y se adecúa bien al proyecto; husillo simple ya que un husillo doble se utiliza en extrusoras industriales e inyectoras, el mismo será de diámetro interno variable con la finalidad de ejercer una correcta presión a la boquilla, operará con un voltaje de 220 Vac a 60 Hz, se utilizará ventilación para enfriar rápidamente el filamento y que fluya mejor.

La Tabla 3 muestra algunas características tentativas para este proyecto:

Tabla 3

Parámetros de la extrusora

PARÁMETROS	VALORES
Alimentación	220 VAC
Frecuencia	60Hz
Potencia máxima	1000 Watts
Velocidad de extrusión (Longitud)	100 cm/min
Velocidad de extrusión	1000 gr/H (2.2 lb/h)
Temperatura máxima	400°C
Diámetro del filamento extruido	1.75mm y 3mm
Tolerancia del filamento extruido	(+0.1/ – 0.1) mm
Dimensiones aprox. (Largo, ancho, alto)	80cmx50cmx50cm
Masa (aprox.)	50 Kg

En cuanto al motor, conforme se realice el diseño se elegirá el más adecuado al proyecto, debido a que también se deben analizar las ventajas que ofrecen los motores AC juntos con los variadores de frecuencia, frente a los motores DC y los motorreductores.

1.16 POLÍMEROS

Son macromoléculas formadas por la unión de moléculas de menor tamaño (monómeros). Las unidades que componen a los polímeros derivan de moléculas de baja masa molecular relativa. El término polímero designa una combinación de un número no especificado de unidades. La reacción por la cual se sintetiza un polímero a partir de sus monómeros se denomina polimerización, (Tecnología de los Plásticos, 2013). La Figura 11 muestra la clasificación de los polímeros:

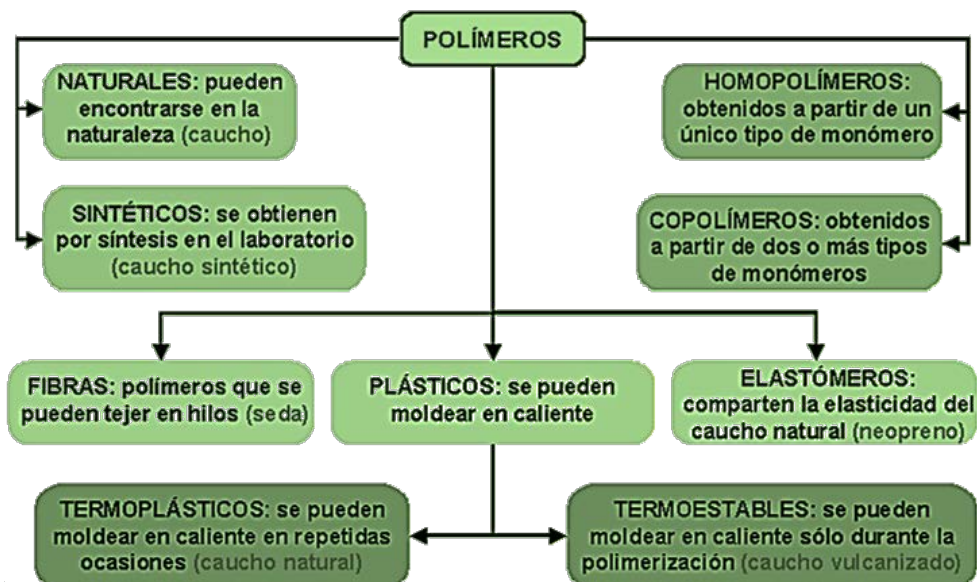


Figura 11. Clasificación de los polímeros

Fuente: (Estrada, 2011)

1.16.1 COPOLÍMEROS Y TERPOLÍMEROS

Los copolímeros están constituidos por dos tipos de polímeros, por ejemplo en la industria automovilística se utiliza el estireno-butadieno, empleado en la fabricación de neumáticos. Los terpolímeros contienen tres tipos de polímeros, como por ejemplo el ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno), muy utilizado en impresión 3D.

1.16.2 PROPIEDADES

A pesar de que los distintos polímeros presentan grandes diferencias en su composición y estructura, hay una serie de propiedades comunes a todos ellos y que los distinguen de otros materiales (Tecnología de los Plásticos, 2013), tales propiedades se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4

Tabla comparativa de propiedades de diferentes materiales

Material	Densidad (g/cm ³)	Conductividad térmica (W/mK)	Conductividad eléctrica (S)
Plásticos	0.9-2.3	0.15-0.5	-
PE	0.9-1.0	0.32-0.4	-
PC	1.0-1.2	-	-
PVC	1.2-1.4	-	10 ⁻¹⁵
Acero	7.8	17.50	5.6
Aluminio	2.7	211	38.5
Aire	-	0.05	-

Fuente: (Tecnología de los Plásticos, 2013)

- **Densidad.-** Los polímeros poseen densidades relativamente bajas y van desde 0.9 hasta 2.3 g/cm³. Lo que los hacen fáciles de manejar y ligeros.
- **Conductividad térmica.-** La baja conductividad térmica es un inconveniente durante la transformación de los plásticos. El calor necesario para transformar los plásticos se absorbe de manera muy lenta y la eliminación del calor durante la etapa de enfriamiento resulta igualmente lenta. (Tecnología de los Plásticos, 2013)

1.16.3 TEMPERATURA DE TRANSICIÓN VÍTREA

Gran parte de los polímeros a temperaturas bajas son duros, vítreos, rígidos y frágiles; a altas temperaturas adquieren consistencia gomosa. Este fenómeno se da en reducidos intervalos de temperatura, denominada temperatura de transición vítrea (T_g).

En la Figura 12 se observa cómo se determina la T_g , el volumen específico del polímero se grafica contra la temperatura, dando lugar a un cambio repentino en la pendiente de la curva. Los polímeros amorfos tienen una temperatura de transición vítrea (T_g) pero no un punto específico de fusión (T_m). Mientras que los polímeros parcialmente cristalinos, se contraen abruptamente al pasar por sus temperaturas de fusión durante el enfriamiento.

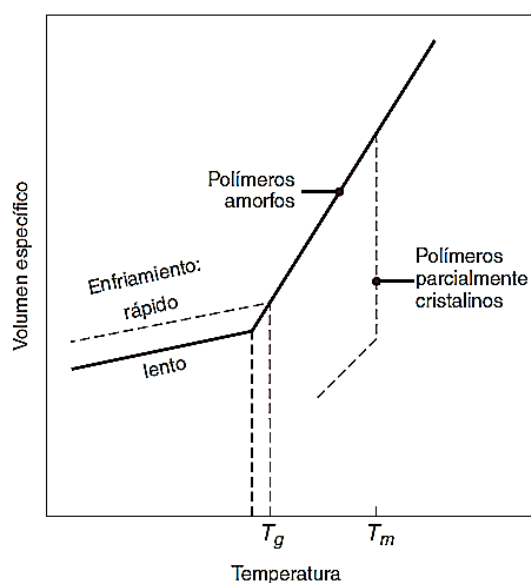


Figura 12. Volumen específico Vs Temperatura
Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

En la Tabla 5 se observa como varía la temperatura de transición vítrea de polímero a polímero. En algunos polímeros la temperatura ambiente es superior a T_g , en otros es menor. A diferencia de los polímeros amorfos, los polímeros parcialmente cristalinos tienen un punto de fusión definido (T_m).

Tabla 5

Temperaturas de transición vítrea y de fusión de algunos polímeros

Material	T _g (°C)	T _m (°C)
Nailon 6,6	57	265
Policarbonato	150	265
Poliéster	73	265
Polietileno Alta densidad	-90	137
Polietileno Baja densidad	-110	115
Polimetilmetacrilato	105	—
Polipropileno	-14	176
Poliestireno	100	239
Cloruro de polivinilo	87	212
Hule	-73	—

Fuente: (Kalpakjian & Schmid, 2008)

1.17 TERMOPLÁSTICOS

Son duros en frío y al calentarlos se reblandecen y fluyen. El proceso de calentamiento para darles forma y el posterior enfriamiento para que endurezcan con la forma deseada, puede repetirse prácticamente de forma ilimitada. (Cano, 2014)

Conforme se eleva la temperatura por encima de la temperatura de transición vítrea (T_g) o del punto de fusión (T_m), los termoplásticos se vuelven fáciles de formar o moldear. El incremento de temperatura debilita los enlaces secundarios (mediante vibración térmica de las moléculas largas), y las cadenas adyacentes pueden moverse entonces con más facilidad cuando se someten a fuerzas externas de formado. Por ejemplo acrílicos, celulósicos, nailons, polietileno y cloruro de polivinilo. (Kalpakjian & Schmid, 2008, p.202)

En la Figura 13 se puede comparar las diferentes estructuras moleculares que poseen distintos tipos de polímeros.



Figura 13. Estructuras moleculares de los polímeros
Fuente: (Los Adhesivos, 2010)

1.17.1 PROPIEDADES DE LOS TERMOPLÁSTICOS

- Se hinchan ante el contacto de ciertos solventes.
- Poseen buena resistencia al fenómeno de fluencia.
- Tienen la capacidad de derretirse antes de pasar a un estado gaseoso.
- Presentan deformación plástica al ser calentados.
- Solubilidad en ciertos solventes.
- Son procesables varias veces sin perder sus propiedades físicas y químicas (reciclables).

1.18 PRINCIPALES POLÍMEROS UTILIZADOS EN IMPRESIÓN 3D

“El 95% del mercado de impresoras personales utiliza dos materiales: ABS y PLA”
(Parra, 2015).

a) ABS (Acronitrilo Butadieno Estireno)

Es el más barato entre los termoplásticos para impresión 3D. Resistente a golpes, posee buena dureza y rigidez, resistente a la abrasión y elementos químicos. Soluble en acetona, no biodegradable, le afecta la exposición a los rayos UV, (Gordillo, 2014). Fácil de mecanizar, pulir, lijar, limar, agujerear, pintar, pegar etc., Figura 14:

- Temperatura fusión: 215-250° C.
- No biodegradable.
- Reciclable.



Figura 14. Bloques Lego en ABS
Fuente: (Lego, 2011)

b) PLA (Ácido Poliláctico)

Derivado de recursos naturales renovables (almidón de maíz, caña de azúcar, etc.). Biodegradable bajo ciertas condiciones. (Tecnología de los Plásticos, 2013).

Al cumplir su vida útil, pierde las propiedades iniciales hasta su descomposición (puede tardar más de cien años) en elementos químicos simples. Utilizado para fabricar envases para alimentos, utensilios, implantes en huesos y tejidos, Figura 15.

- Temperatura fusión: 160-230° C.
- Biodegradable y difícilmente reciclable.



Figura 15. Utensilios fabricados en PLA
Fuente: (Printedparts, 2014)

c) Pellets

Son pequeñas porciones de plástico aglomerado o comprimido, adecuadas para alimentar extrusoras de filamento, Figura 16.



Figura 16. Pellets de ABS
Fuente: (Filabot, 2013)

1.19 RECICLAJE DE MATERIALES PLÁSTICOS

Según (Kalpakjian & Schmid, 2008), los termoplásticos se reciclan refundiéndolos y reformándolos como otros productos; portan símbolos de reciclado en la forma de un triángulo delimitado por tres flechas en el sentido de las manecillas del reloj y con un

número en la parte media, Figura 17. Estos números corresponden a los siguientes plásticos:

- 1—PET (polietileno)
- 2—HDPE (polietileno de alta densidad)
- 3—V (vinil)
- 4—LDPE (polietileno de baja densidad)
- 5—PP (polipropileno)
- 6—PS (poliestireno)
- 7—Otros.

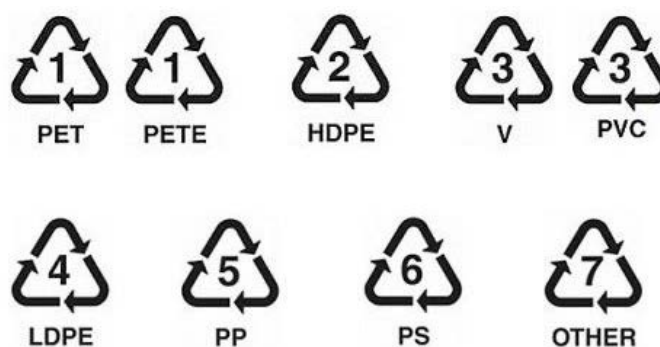


Figura 17. Simbología de reciclado de polímeros
Fuente: (Sustentus, 2010)

1.20 ENSAYO DE TRACCIÓN DE MATERIALES PLÁSTICOS

Es el más común para determinar propiedades mecánicas de los materiales, como resistencia, ductilidad, tenacidad, módulos elásticos y capacidad de endurecimiento por deformación. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Su realización requiere un espécimen de prueba (probeta) normalizado, según las normas ISO 527-1, ISO 527-2 y ASTM D638 (normas para Ensayo de Tracción en Plásticos) las probetas pueden ser cilíndricas o planas, Figura 18:



Figura 18. Probetas para Ensayo de Tracción
Fuente: (Ibertest, 2015)

La probeta se coloca entre las mordazas de una máquina de ensayo de tensión que la somete a un esfuerzo axial de tracción hasta producir rotura, Figura 19:

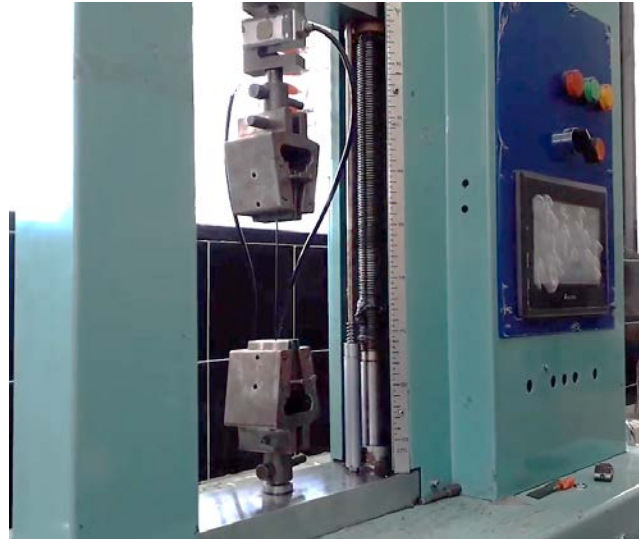


Figura 19. Ensayo de tensión a filamento ABS

CAPÍTULO II

DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES

2.1 PARÁMETROS DE DISEÑO

Se empieza por el diseño mecánico, en el cual el husillo de extrusión es uno de los elementos que más importancia tienen en una extrusora, ya que se deben tomar muy en cuenta características como su material de construcción, dimensiones, entre otras.

Debido a que la máquina va a trabajar principalmente con plástico ABS, se detallan algunas de sus propiedades en la Tabla 6 para utilizarlas en los cálculos:

Tabla 6

Propiedades mecánicas y térmicas del ABS

Propiedades	Unidad	Grados de impacto ABS		
		Alto	Medio	Bajo
Mecánicas a 23°C				
Resist. al impacto	J/m	375-640	215-375	105-215
Resist. a la tensión	Kg/mm ²	3.3-4.2	4.2-4.9	4.2-5.3
Elongación	%	15-70	10-50	5-30
Módulo de tensión		173-214	214-255	214-265
Dureza	HRC	88-90	95-105	105-110
Peso específico		1.02-1.04	1.04-1.05	1.05-1.07
Térmicas				
Coef. expansión térmica	x 10 ⁵ cm/ cm*°C	9.5-11.0	7.0-8.8	7.0-8.2
Distorsión por calor	°C a 18,4 Kg/cm ²	93-99	96-102	96-104
Viscosidad efectiva	N*s/ m ²	750	700	600

2.2 DISEÑO MECÁNICO

Se establece el diseño mecánico, tomando en cuenta los elementos mencionados en el Capítulo 1 que van a constituir la extrusora, tales como el husillo de extrusión, motor y sistema de reducción, tolva, etc.

2.3 DISEÑO DEL HUSILLO DE EXTRUSIÓN

Debido a que contribuye a la ejecución del transporte, calentamiento, fundición, compresión y mezcla homogénea del polímero, es uno de los componentes principales de la extrusora.

“Uno de los parámetros fundamentales del husillo es la relación de longitud, su magnitud influirá directamente en el dimensionamiento de otros elementos que conforman la extrusora.” (Savgorodny, 1973)

Para el diseño del mismo se determinan los parámetros más importantes tales como: diámetro (D), longitud (L), paso de la rosca (w) y el ángulo del filete (θ).

Estos parámetros se pueden visualizar en la Figura 20:

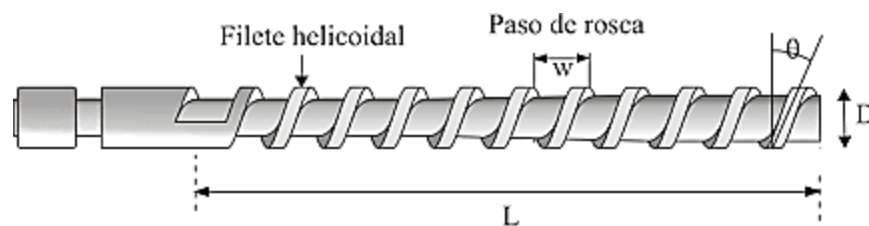


Figura 20. Parámetros del husillo de extrusión

Fuente: (Beltrán & Marcilla, 2012)

Otro parámetro importante es la relación L/D, para una adecuada toma de decisiones en el diseño del husillo, se analiza la Tabla 7 que compara las ventajas de una relación L/D corta y larga.

Tabla 7

Ventajas que presenta una Relación L/D corta VS Relación L/D larga

VENTAJAS	
RELACIÓN L/D CORTA	RELACIÓN L/D LARGA
Requiere menos torque por la resistencia del husillo, la cantidad de HP no es tan importante.	Mejor salida o recuperación de material, siempre y cuando se aplique el torque suficiente.
Ocupa menos espacio. Reduce posible degradación.	Flujo de material más uniforme y mejor mezclado.
Mantiene el material en el barril a temperatura de fusión por menor tiempo.	Mejor fusión con menor esfuerzo cortante y una mayor cantidad de temperatura conducida por el barril.
Menor costo de inversión inicial y para el reemplazo de partes.	Posibilidad de bombear a elevadas presiones.

“Relaciones L/D típicas oscilan entre 24:1 a 32:1. Mientras que en aplicaciones especiales como extrusión, son adecuadas relaciones L/D de 10:1 hasta 50:1, la relación adecuada se define por el proceso y aplicación que deba satisfacerse.” (Womer, 2005)

De acuerdo con Giles Harold et al., (2005) valores altos de L/D tienen mayor capacidad de mezclado y fundición de material, mientras que valores pequeños de L/D tienen las siguientes ventajas:

- Menos espacio requerido.

- Menor coste de inversión inicial.
- Menor costo de reemplazo de partes para husillo y barriles.
- Menor tiempo de residencia de material dentro de la extrusora.
- Menor torque requerido.
- Menor potencia y tamaño de motor.

Considerando la Tabla 7 y los estudios de Giles Harold et al., (2005), se ha decidido utilizar una relación L/D de 14:1, correspondiente a una longitud de 400 mm con un diámetro de 28 mm, debido a que la producción de la extrusora no será del tipo industrial, se necesitan dimensiones relativamente pequeñas y similares a las propuestas mencionadas en el Capítulo 1, finalmente si se decide por una relación L/D larga significaría construir o adquirir un husillo grande y por ende el resto de elementos serán de gran tamaño (barril, resistencias, tolva, etc.) sin mencionar los costes que conlleva.

2.3.1 PROFUNDIDAD DEL CANAL, PASO Y ÁNGULO DE HÉLICE

“Los pellets de ABS y PLA tienen un volumen aproximado de 125mm^3 y un largo de 4mm.” (MatWeb, 2015)

En el estudio realizado por Savgorodny (1973), establece que para el cálculo de la profundidad del canal se deben tomar valores de 0,12 a 0,18 veces el diámetro externo del husillo.

Mientras que Giles Harold et al., (2005) considera valores de 0,10 a 0,30 veces el diámetro exterior.

Tomando como referencia las dimensiones de los pellets y considerando un valor de 0,18 veces el diámetro exterior del husillo, se establece una profundidad de 5mm (1mm más que el largo del pellet) que será suficiente para el adecuado transporte de los pellets,

Ec. 1:

$$H = 0,18(28mm) \quad \text{Ec. 1}$$

$$H = 5.04 \text{ mm} \approx 5mm$$

$$H = 0.005 \text{ m}$$

Donde:

H: Profundidad del canal

Para el ancho del canal Savgorodny (1973) recomienda valores de 0,8 a 1,2 veces el diámetro exterior, se ha tomado el valor de 1 diámetro exterior, el cual permite transportar 7 pellets en cada paso, el resultado se muestra en la Ec. 2:

$$W = 28mm \quad \text{Ec. 2}$$

$$W = 0.028 \text{ m}$$

Donde:

W: Paso

Se procede al cálculo del ángulo de la hélice en la Ec. 3 (Savgorodny, 1973), con un diámetro menor (D_m) establecido de 18 mm:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{W}{\pi D_m}\right) \quad \text{Ec. 3}$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{0.028}{\pi 0.018}\right)$$

$$\theta = 26.3^\circ$$

Donde:

θ : Ángulo de la hélice

2.3.2 LONGITUDES DE LAS SECCIONES DEL HUSILLO

Womer (2005) recomienda que “la longitud total de la sección de alimentación sea entre 4 o 5 diámetros, de tal forma que la presión sea la suficiente para empujar el material”.

Así mismo Savgorodny (1973) establece la longitud de la sección de alimentación de 0,4 a 0,6 veces la longitud del husillo.

Se determinó que la longitud sea de 4.5 veces el diámetro total debido a que se necesita un husillo con secciones similares en longitud, Ec. 4:

$$L_{SA} = 4.5 * D_T \quad \text{Ec. 4}$$

$$L_{SA} = 4.5 * 28 \text{ mm}$$

$$L_{SA} = 126 \text{ mm} \approx 125 \text{ mm}$$

Donde:

L_{SA} : Longitud sección de alimentación

D_T : Diámetro total

“La sección de fusión tendrá una medida entre 4 a 10 diámetros totales de longitud” (Womer, 2005).

“Típicamente un tornillo de extrusión tiene tres secciones, de alimentación, de transición y de fundido, la cuales por lo general son similares en longitud” (Giles Harold et al., 2005).

Se determinó tomar 4,5 diámetros totales, no se puede tomar un valor mayor debido a que la relación L/D es igual a 14:1, es decir el husillo solo tiene 14 veces el diámetro,

Ec. 5:

$$L_{SF} = 4.5 * D_T \quad \textbf{Ec. 5}$$

$$L_{SF} = 4.5 * 28 \text{ mm}$$

$$L_{SF} = 126 \text{ mm} \approx 125 \text{ mm}$$

Donde:

L_{SF} : Longitud sección de fusión

Como al principio se definió una longitud total del husillo de 400 mm, la longitud de la sección de bombeo viene dada por la Ec. 6:

$$L_{SB} = L_T - L_{SA} - L_{SF} \quad \text{Ec. 6}$$

$$L_{SB} = 400\text{mm} - 125\text{mm} - 125\text{mm}$$

$$L_{SB} = 150 \text{ mm}$$

Donde:

L_{SB} : Longitud sección de bombeo

L_T : Longitud total del husillo

2.3.3 CÁLCULO HOLGURA BARRIL-HUSILLO

Debe existir una holgura entre el barril y el diámetro total del husillo, Savgorodny (1973), recomienda multiplicar una constante de (0,002-0,003) por el diámetro total, se calcula mediante la Ec. 7, para el cálculo de esta medida se ha tomado un valor de 0,003, es decir la mayor holgura posible para que de ser necesario, se realice un nitruado a las piezas sin que exista rozamiento:

$$\lambda = (0,003)D_T \quad \text{Ec. 7}$$

$$\lambda = (0,003)(28 \text{ mm})$$

$$\lambda = 0,084 \text{ mm}$$

Donde:

λ : Holgura barril – husillo

D_T : Diámetro total del husillo

2.3.4 LONGITUD DE TRABAJO Y NÚMERO DE FILETES DEL HUSILLO

Se necesita calcular la longitud de trabajo del husillo (l), la cual viene dada por la Ec.8, Savgorodny (1973), establece un valor que va de 0,6 a 0,9 por la longitud total del husillo, recomienda un valor de 0,6 para husillos de diámetro grande y 0,9 para husillos de diámetro pequeño, se toma el valor de 0,9 en vista de que el husillo es relativamente pequeño y se necesita la mayor longitud de trabajo posible:

$$l = (0,9) * L_T \quad \text{Ec. 8}$$

$$l = (0,9) * 400mm$$

$$l = 360mm$$

$$l = 360mm$$

$$l = 0,36m$$

El número de filetes (#) del husillo se calcula con la Ec. 9:

$$\# = \frac{l}{D_T} \quad \text{Ec. 9}$$

$$\# = \frac{360mm}{28mm}$$

$$\# = 13$$

2.3.5 CÁLCULO DEL NÚMERO DE REVOLUCIONES DEL HUSILLO

Utilizando la fórmula definida por Savgorodny (1973), se reemplazan algunos parámetros transformados a pulgadas en la Ec. 10:

$$N = \frac{R}{2.3 * D_T^2 * H * G}$$

Ec.10

$$N = \frac{2,2 \frac{lb}{h}}{2.3 * (1.1 plg)^2 * 0,19plg * 1,02}$$

$$N = 4 rpm$$

Donde:

R: Cantidad de material procesado (lb/h)

G: Gravedad específica o peso específico ABS

2.4 CÁLCULO DE FLUJOS EN LA EXTRUSORA

Existen dos tipos de flujos presentes en la extrusión, un flujo de arrastre (α) responsable de mover el fluido a través del husillo, y el flujo de presión (β) que va en sentido opuesto y es debido a la diferencia de presión, ambos parámetros se definirán mediante ecuaciones tomadas de Savgorodny (1973). El flujo de arrastre se determina mediante la Ec. 11:

$$\alpha = \frac{\pi * m * D_T * H * \left(\frac{W}{m} - e\right) * \cos^2 \theta}{2}$$

Ec. 11

$$\alpha = \frac{\pi * 1 * 28mm * 5mm * \left(\frac{28mm}{1} - 3.8mm\right) * \cos^2 26.3^\circ}{2}$$

$$\alpha = 4277.11 mm^3$$

$$\alpha = 4.277 \times 10^{-6} m^3$$

Donde:

m: Número de canales del husillo

e : Ancho de la cresta del filete

El flujo de presión viene dado por la Ec. 12:

$$\beta = \frac{m \cdot H^3 \cdot \left(\frac{W}{m} - e\right) \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta}{12 \cdot l} \quad \text{Ec. 12}$$

$$\beta = \frac{1 \cdot (5\text{mm})^3 \cdot \left(\frac{28\text{mm}}{1} - 3.8\text{mm}\right) \cdot \sin 26.3^\circ \cdot \cos 26.3^\circ}{12 \cdot 360\text{mm}}$$

$$\beta = 0,2781 \text{ mm}^3$$

$$\beta = 2.781 \times 10^{-10} \text{ m}^3$$

Donde:

l : Longitud de trabajo del husillo (m)

2.4.1 PRESIÓN MÁXIMA DENTRO DE LA EXTRUSORA

Se calcula mediante la fórmula de Savgorodny (1973) Ec. 13, para el valor de la viscosidad efectiva (μ) se ha tomado la del plástico ABS de alto impacto:

$$P_{Max} = \frac{6\pi \cdot D_T \cdot l \cdot N \cdot \mu}{H^2 \cdot \tan \theta} \quad \text{Ec. 13}$$

$$P_{Max} = \frac{6\pi \cdot 0,028 \cdot 0,36 \cdot 4 \cdot 750}{0,005^2 \cdot \tan 26.3^\circ}$$

$$P_{Max} = 46133149,95 \text{ Pa}$$

$$P_{Max} = 46,133 \text{ MPa}$$

Donde:

N : Revoluciones por minuto del husillo

μ : Viscosidad efectiva

La variación de presión (ΔP) dentro de la extrusora, es el promedio de la presión máxima, Ec. 14:

$$\Delta P = 23,07 \text{ MPa} \quad \text{Ec. 14}$$

2.4.2 FLUJO TOTAL DENTRO DE LA EXTRUSORA

Para el flujo total presente en la extrusora se emplea la fórmula de Savgorodny (1973), Ec. 15:

$$Q_T = \alpha(N) - \beta \left(\frac{\Delta P}{\mu} \right) \quad \text{Ec. 15}$$

$$Q_T = 4.277 \times 10^{-6} (4) - 2.781 \times 10^{-10} \left(\frac{23070000}{750} \right)$$

$$Q_T = 8.5536 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}$$

Donde:

N : Revoluciones por minuto del husillo (Rpm)

μ : Viscosidad efectiva (Pa)

ΔP : Variación de presión (Pa)

2.4.3 CÁLCULO DE LA POTENCIA EN BASE AL FLUJO

Se determina mediante la Ec. 16 definida por Savgorodny (1973):

$$P_F = Q_T * \Delta P$$

Ec. 16

$$P_F = 8.5536 \times 10^{-6} * 23070000$$

$$P_F = 197.33 \text{ W}$$

Donde:

P_F : Potencia en base al flujo (W)

Q_T : Flujo total ($\frac{m^3}{s}$)

ΔP : Variación de presión (Pa)

2.5 CÁLCULO DE POTENCIAS Y SUS PÉRDIDAS

“En el caso de los motores, las pérdidas son la diferencia de la potencia entregada al final y la que recibe un sistema al inicio” (Enríquez, 2000).

2.5.1 CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR INSTALACIONES ELÉCTRICAS

Se determina mediante la Ec. 17 definida en el texto de Enríquez (2000):

$$Z_e = 0,015 (P_F)$$

Ec. 17

$$Z_e = 0,015 * (197.33)$$

$$Z_e = 2.96 \text{ W}$$

Donde:

Z_e : Pérdida por instalaciones eléctricas (W)

P_F : Potencia en base al flujo (W)

2.5.2 CÁLCULO DE PÉRDIDAS EN MOTORES Y GENERADORES

Se originan al momento de arrancar motores o generadores, se calculan mediante la Ec. 18, considerando un deslizamiento del 3%, Enríquez (2000):

$$Z_m = s_{\%} * P_F \quad \text{Ec. 18}$$

$$Z_m = 0.03 * (197.33)$$

$$Z_m = 5.92W$$

Donde:

Z_m : Pérdidas por motores o generadores (W)

$s_{\%}$: Porcentaje de deslizamiento (0.03)

P_F : Potencia en base al flujo (W)

2.5.3 CÁLCULO DE POTENCIA REAL

Se reemplazan parámetros en la Ec. 19, Enríquez (2000):

$$P_R = P_F + Z_m + Z_e \quad \text{Ec. 19}$$

$$P_R = 197.33 + 5.92 + 2.96$$

$$P_R = 206.21 W$$

$$P_R = 0,28 HP$$

Donde:

P_R : Potencia real (HP)

2.5.4 CÁLCULO DEL TORQUE EN BASE A LA POTENCIA REAL

Torque es el momento de fuerza que ejerce un motor sobre el husillo. La potencia desarrollada por el torque es proporcional a la velocidad angular del husillo: $P = T * \omega$. Dentro del proyecto la velocidad angular (ω) viene a ser el número de revoluciones del husillo medida en revoluciones por segundo. El torque necesario que el motor debe aplicar al husillo se calcula mediante la Ec. 20, Enríquez (2000):

$$T = \frac{P_R}{N} \quad \text{Ec. 20}$$

$$T = \frac{206.21}{0.067}$$

$$T = 3077.76 \text{ N.m}$$

Donde:

N : *Revoluciones del husillo (RPS)*

P_R : *Potencia real (W)*

2.5.5 CÁLCULO DE POTENCIA DEL MOTOR

Debido a que se está tomando en cuenta la extrusión únicamente del plástico ABS y no de otros polímeros mucho más difíciles de procesar, se considera utilizar una velocidad máxima de 15 RPM, con la finalidad de obtener potencias acorde a los motores que se comercializan, Ec. 21, Enríquez (2000):

$$P_{mot} = \frac{N * \pi * D_I^3}{f p^2} \quad \text{Ec. 21}$$

$$P_{mot} = \frac{15 * \pi * (28)^3}{66,7^2}$$

$$P_{mot} = 232,5 W$$

$$P_{mot} = 0,31 HP$$

$$P_{mot} \approx 0,5 HP$$

Donde:







fp: Factor de proporcionalidad

2.6 CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA HUSILLOS DE EXTRUSIÓN

Para un adecuado transporte de la materia prima a través del cilindro, se requiere que el coeficiente de fricción entre el tornillo y el material sea relativamente bajo, el husillo de extrusión debe cumplir las características mostradas en la Tabla 8 para llevarlo a cabo:

Tabla 8

Diseño para reducir el coeficiente de fricción entre el material y el husillo

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

Fuente: (Beltrán & Marcilla, 2012)

2.7 SELECCIÓN DEL MATERIAL DEL HUSILLO DE EXTRUSIÓN

La Tabla 9 compara las características, ventajas y desventajas de los aceros para husillos de extrusión del Capítulo 1, tomando un rango del 1 al 5 en la tabla, siendo el valor más alto lo más adecuado para el diseño de la extrusora:

Tabla 9

Análisis de Aceros comerciales para la fabricación del husillo de extrusión

PROPIEDADES	Nitralloy 135	AISI-4140	AISI-D2	AISI-1018
Bajo costo	2	4	1	5
Resistencia al desgaste	4	2	3	1
Transmisión de torque	2	5	1	3
Dureza	5	1	2	3
Resistencia a corrosión	4	3	5	2
Coefficiente de fricción	1	3	5	2
Maquinabilidad	2	4	3	5
Total	20	22	20	21

Para una mejor toma de decisiones se analizará la Figura 21 la cual recomienda para la mayoría de plásticos el acero AISI 4140:

Polymer	Abrasiveness	Corrosiveness	Base Material	Flight Hardening Material
Nylon 6, LDPE	Soft	Not Corrosive	AISI 4140	Stellite 12, Flame Hardened to 50 RC
Flexible PVC	Soft	Medium	AISI 4140	Stellite 12
FEP	Soft	High	Inconel 718; Hastelloy C-276; AISI 4140	Stellite 12, Age Hardened to 39–42 RC
HDPE, PP, GP PS	Medium	Not Corrosive	AISI 4140	Colomony 56
Rigid PVC	Medium	Medium	AISI 4140; Nitralloy 135M	Colomony 56
High Loadings FR	Medium	High	Inconel 718; Hastelloy C-276	Colomony 56, Age Hardened to 39–43 RC
Glass Filled	High	Not Corrosive	CPM 9V/10V; AISI D2	Heat Treated to 39–43 RC
Clay Filled PVC	High	Medium	Nitralloy 135M	Coltung 1
PTFE/TFE Filled	High	High	AISI 4140	Coltung 1

Figura 21. Características de los plásticos vs. Materiales de husillos
Fuente: (Giles, H., et al., 2005)

Debido a que no se van a emplear polímeros relativamente difíciles de extruir o que se funden lenta o abruptamente, el desgaste por abrasión es mínimo, por lo tanto se elige al acero AISI-4140 como el adecuado para el husillo de extrusión, posee baja dureza y para ello se efectuará un nitrurado para compensar esta desventaja, su buena maquinabilidad son ventajas para este proyecto.

2.8 ANÁLISIS DE FUERZAS Y REACCIONES EN EL HUSILLO

Es necesario determinar el volumen, masa y peso aproximado del husillo, se utilizarán las formulas descritas por (Laburu, 2000). El volumen del husillo viene dado por la Ec. 22, debido a que la densidad del polímero es menor a la de los aceros, el peso del polímero no va a tener relevancia; por esta razón se va a excluir al polímero y en vez de ello, se toma al husillo como un solo cilindro sólido:

$$V_h = \frac{\pi}{4} * (D_T)^2 * L_T \quad \text{Ec. 22}$$

$$V_h = \frac{\pi}{4} (28 \text{ mm})^2 * 400 \text{ mm}$$

$$V_h = 246300,864 \text{ mm}^3$$

$$V_h = 2,463 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

Donde:

V_h : *Volúmen del husillo*

Por lo tanto la masa del husillo se calcula mediante la Ec. 23, tomando en cuenta la densidad del acero AISI-4140 que es de $7845 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$:

$$m_h = \delta * V_h$$

Ec. 23

$$m_h = \left(7845 \frac{Kg}{m^3}\right) * 2,463 \times 10^{-4} m^3$$

$$m_h = 1,93 Kg$$

Donde:

δ : Densidad del material (Kg/m^3)

V_h : Volúmen del husillo (m^3)

Finalmente para hallar el peso se lo determina con la Ec. 24:

$$W_h = m_h * g$$

Ec. 24

$$W_h = 1,93 Kg * 9,81 \frac{m}{s^2}$$

$$W_h = 18,9 N$$

Donde:

g : Aceleración de la gravedad

La Figura 22 muestra las cargas que actúan sobre el husillo de extrusión mediante el software MDSolids:

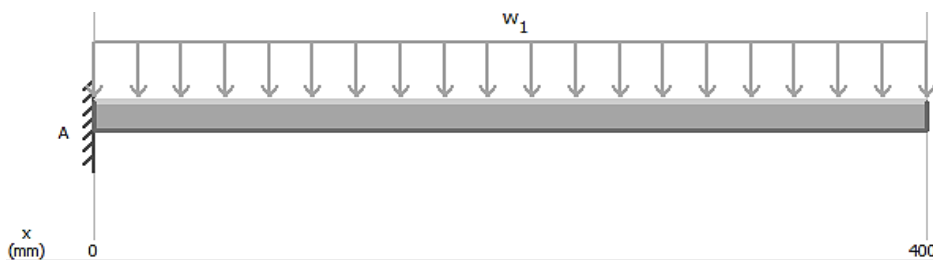


Figura 22. Cargas que actúan en el husillo

Se muestran los diagramas de fuerza cortante y momento flexor máximo con el software MDSolids, Figura 23:

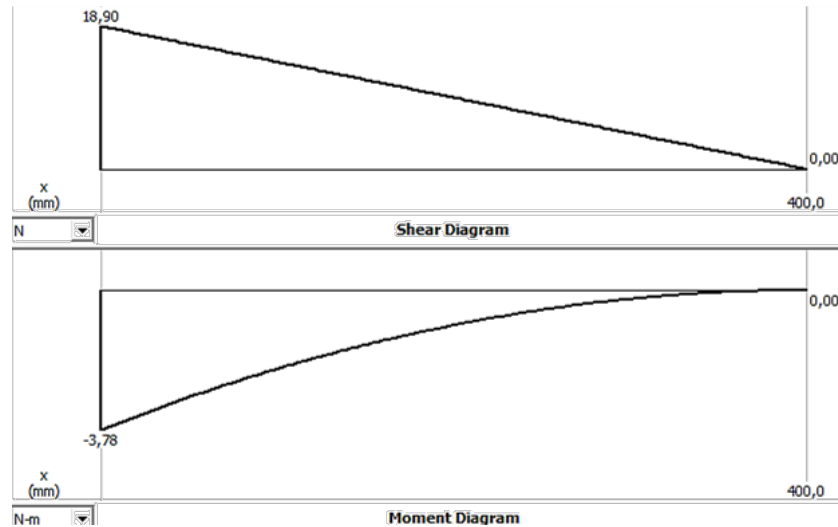


Figura 23. Fuerza Cortante y Momento Flexor máximo

2.8.1 FUERZA DE COMPRESIÓN (F_x) DEL HUSILLO

Para determinar la fuerza de compresión es necesario determinar varios parámetros como el área de la sección transversal del husillo y la variación de presión dentro del barril.

El área transversal del husillo se calcula mediante la Ec. 25, definida en el texto de Savgorodny (1973):

$$A_h = \frac{1}{4} * \pi * D_T^2 \quad \text{Ec. 25}$$

$$A_h = \frac{1}{4} * \pi * (0.028m)^2$$

$$A_h = 6.16 \times 10^{-4} m^2$$

La fuerza de compresión se calcula mediante la fórmula de Savgorodny (1973), Ec.26:

$$F_x = \Delta P * A_h \quad \text{Ec. 26}$$

$$F_x = 23070000 * 6.16 \times 10^{-4}$$

$$F_x = 14211.12 \text{ N}$$

Donde:

ΔP : Variación de presión (Pa)

2.8.2 CÁLCULO DE REACCIONES EJES X,Y

Para determinar cada reacción se realiza una sumatoria de fuerzas en cada eje, Ec.27 y Ec.28, Savgorodny (1973).

Eje X:

$$\sum F_x = 0 \quad \text{Ec. 27}$$

$$R_x - F_x = 0$$

$$R_x = 14211.12 \text{ N}$$

Eje Y:

$$\sum F_y = 0 \quad \text{Ec. 28}$$

$$R_y - W_h = 0$$

$$R_y = 18,9 \text{ N}$$

Donde:

W_h : Peso del husillo (N)

2.8.3 CÁLCULO DE MOMENTO DE GIRO Y MOMENTO DE INERCIA

El momento de giro del husillo (M_g) se calcula con la Ec. 29 definida en el texto de Savgorodny (1973) y se emplea un factor de conversión (K) de la siguiente manera:

$$M_g = K * \frac{P_{mot}}{N} \quad \text{Ec. 29}$$

$$M_g = 9550Nm * \frac{0,232 KW}{15 rpm}$$

$$M_g = 147.7 Nm$$

Donde:

K : Factor numérico de conversión (Nm)

P_{mot} : Potencia del motor (KW)

Se necesita la relación existente entre los diámetros del husillo (u), que se calcula con la Ec. 30, Savgorodny (1973):

$$u = \frac{d_i}{D_T} \quad \text{Ec. 30}$$

$$u = \frac{18 mm}{28 mm}$$

$$u = 0,64$$

Donde:

d_i : Diámetro interior del husillo (mm)

El área sombreada de la Figura 24 muestra la superficie transversal del husillo (S_T).

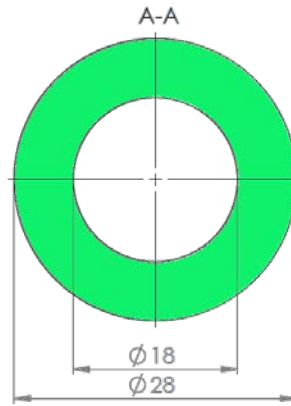


Figura 24. Superficie transversal A-A del husillo

El área transversal del husillo se calcula mediante la Ec. 31, Savgorodny (1973):

$$S_T = \frac{\pi * D_T^2}{4} * (1 - u^2) \quad \text{Ec. 31}$$

$$S_T = \frac{\pi * (0,028)^2}{4} * (1 - 0,64^2)$$

$$S_T = 3,64 * 10^{-4} m^2$$

Donde:

u: Relación de los diámetros del husillo

Finalmente se halla el momento de inercia (J) de la sección transversal A-A mediante la Ec. 32, Savgorodny (1973):

$$J = \frac{\pi * D_T^4}{64} * (1 - u^4) \quad \text{Ec. 32}$$

$$J = \frac{\pi * (0,028)^4}{64} * (1 - 0,64^4)$$

$$J = 2,51 * 10^{-8} m^4$$

Donde:

u: Relación de los diámetros del husillo

2.8.4 CÁLCULO DEL RADIO DE INERCIA Y ESBELTEZ

Radio de inercia de la sección A-A del husillo se determina con la Ec. 33, determinada por Savgorodny (1973):

$$R_{in} = \sqrt{\frac{J}{S_T}} \quad \text{Ec. 33}$$

$$R_{in} = \sqrt{\frac{2,51 * 10^{-8} m^4}{3,64 * 10^{-4} m^2}}$$

$$R_{in} = 8,3 * 10^{-3} m$$

Donde:

R_{in} : Radio de inercia de la sección A – A

La esbeltez se obtiene con la fórmula de Savgorodny (1973), Ec. 34:

$$\lambda = \frac{a * L_T}{R_{in}} \quad \text{Ec. 34}$$

$$\lambda = \frac{2 * 0,4 m}{8,3 * 10^{-3} m}$$

$$\lambda = 96.39$$

Donde:

a: Constante para vigas en voladizo

2.8.5 CÁLCULO FUERZA AXIAL Y TENSIÓN TANGENCIAL

La fuerza axial se la determina con la Ec. 35, Savgorodny (1973):

$$F_a = S_T * P_{Max} \quad \text{Ec. 35}$$

$$F_a = 3,64 * 10^{-4} m^2 * 46133149,95 Pa$$

$$F_a = 16792,47 N$$

Mientras que la tensión tangencial viene dada por la Ec. 36, Savgorodny (1973):

$$\tau = \frac{16 * M_g}{\pi * D_f^3 * (1 - u^4)} \quad \text{Ec. 36}$$

$$\tau = \frac{16 * 147.7 Nm}{\pi * (0,028m)^3 * (1 - 0,64^4)}$$

$$\tau = 41,175 MPa$$

Donde:

M_g : Momento de giro del husillo (Nm)

u : Relación de los diámetros del husillo

2.8.6 CÁLCULO DE LA TENSIÓN NORMAL

La tensión normal es resultado de la fuerza axial y la carga repartida, por lo tanto se calcula primero la carga repartida con la Ec. 37, se utilizarán formulas del texto de Savgorodny (1973):

$$q = \frac{W_h}{L_T}$$

Ec. 37

$$q = \frac{18,9 \text{ N}}{0,4 \text{ m}}$$

$$q = 47,25 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Donde:

W_h : *Peso del husillo (N)*

Adicionalmente se necesita el momento flector máximo, determinado por la Ec. 38:

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

Ec. 38

$$M_f = \frac{47,25 \frac{\text{N}}{\text{m}} * (0,4\text{m})^2}{2}$$

$$M_f = 3,78 \text{ N} * \text{m}$$

Donde:

q : *Carga repartida*

Momento resistente del husillo con respecto al eje neutro (W_o) Ec. 39:

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

Ec. 39

$$W_o = \frac{\pi * (0,028\text{m})^3}{32} * (1 - 0,64^4)$$

$$W_o = 1,79 * 10^{-6} \text{ m}^3$$

Por último se halla la tensión normal (σ) con la Ec. 40:

$$\sigma = \frac{F_a}{S_T} + \frac{M_f}{W_o} \quad \text{Ec. 40}$$

$$\sigma = \frac{16792,47 \text{ N}}{3,64 * 10^{-4} \text{ m}^2} + \frac{3,78 \text{ N * m}}{1,79 * 10^{-6} \text{ m}^3}$$

$$\sigma = 48,24 \text{ MPa}$$

Donde:

F_a : Fuerza axial (N)

S_T : Área transversal del husillo

Para corroborar los resultados obtenidos, se utiliza el análisis del máximo esfuerzo mediante el software SolidWorks, la Figura 25 muestra el resultado aplicado al husillo:

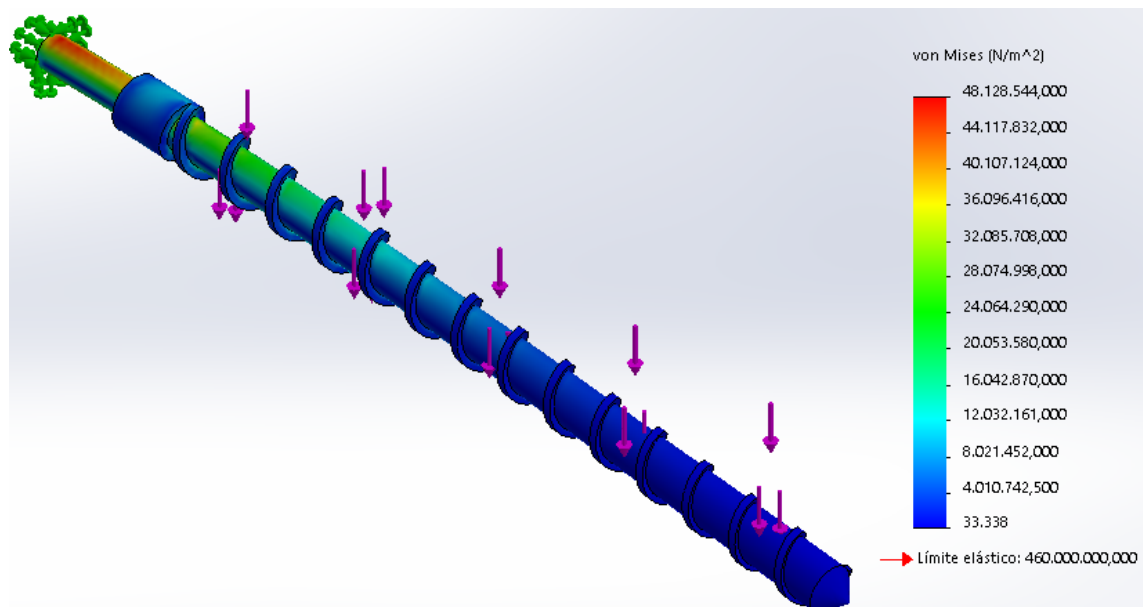


Figura 25. Análisis de máximo esfuerzo del husillo

Según la Figura 25 se tiene una tensión máxima de 48,12 MPa, mientras que la tensión calculada es de 48,24 MPa, cumpliendo así la Ec. 41:

$$\sigma' < \sigma \quad \text{Ec. 41}$$

$$48,12 \text{ MPa} \approx 48,24 \text{ MPa}$$

Donde:

σ' : Tensión obtenida mediante SolidWorks

2.8.7 CÁLCULO DE LA FLECHA DE FLEXIÓN DEL HUSILLO

Viene dada por la Ec. 42, Savgorodny (1973):

$$f_h = \frac{q * L_T^4}{8 * E * J} \quad \text{Ec. 42}$$

$$f_h = \frac{47,25 \frac{N}{m} * (0,4m)^4}{8 * (210 * 10^9 Pa) * (2,51 * 10^{-8} m^4)}$$

$$f_h = 2,87 * 10^{-5} m$$

Donde:

E : Módulo de elasticidad AISI – 4140 (Pa)

J : Momento de inercia

L_T : Longitud total del husillo

La Figura 26 muestra la deflexión máxima obtenida mediante simulación con SolidWorks:

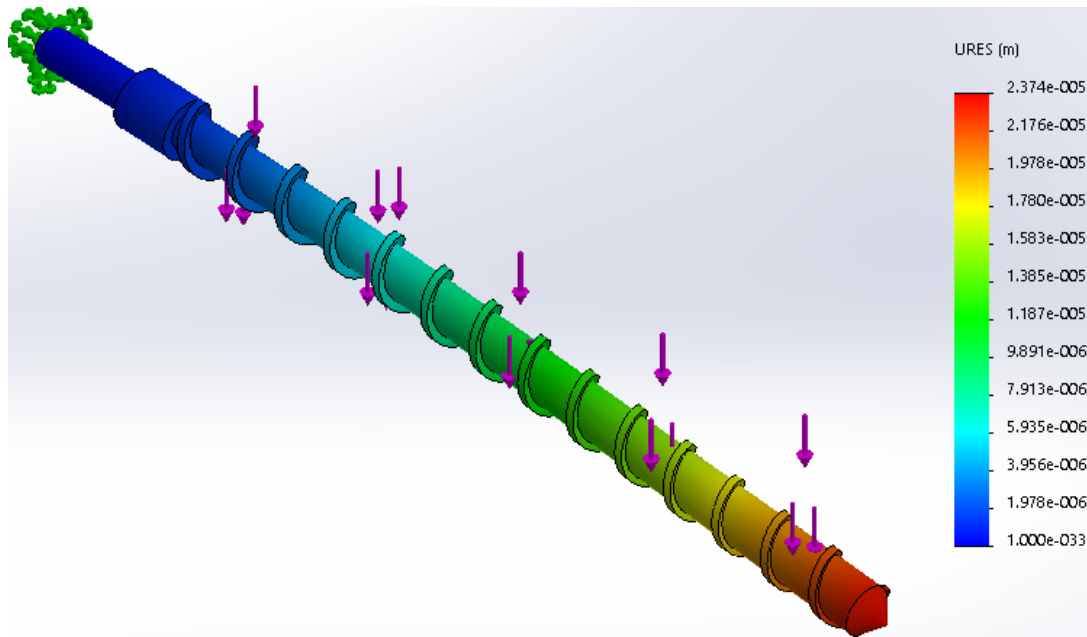


Figura 26. Deformación del husillo

La deformación máxima observada en la Figura 26 es de $2,37 \times 10^{-5} m$, mientras que la deformación calculada es de $2,87 * 10^{-5} m$, cumpliéndose así la Ec. 43:

$$f' < f_h \quad \text{Ec. 43}$$

$$2,37 \times 10^{-5} m < 2,87 * 10^{-5} m$$

Donde:

f' : Deformación obtenida mediante SolidWorks

2.8.8 CRITERIO DE LA DEFLEXIÓN PERMISIBLE DEL HUSILLO

McCormac (2013), establece la deflexión admisible de varios elementos mostrados en la Figura 27:

Tipos de Vigas	Deformaciones máximas admisibles
Vigas que soportan cubiertas de techo flexibles	L/180
Vigas que soportan cubiertas de techo rígidas	L/240
Techos o pisos ligados a elementos no estructurales que pueden ser dañados por deflexiones excesivas	L/480
Construcción en general	L/360
Puentes carreteros	L/360
Elementos de máquinas en general	L/800
Elementos de máquinas sometidos a choques o impactos	L/1000

Figura 27. Deformaciones admisibles en vigas
Fuente: (McCormac, 2013)

Para el caso del husillo se determina que es un elemento de acero utilizado en maquinaria no sometida a choques o impactos, la deflexión admisible se determina con la Ec. 44:

$$[y] \leq \frac{L_T}{800} \quad \text{Ec. 44}$$

$$[y] \leq \frac{0,4 \text{ m}}{800}$$

$$[y] \leq 5 * 10^{-4} \text{ m}$$

Donde:

$[y]$: Deflexión permisible en maquinaria (m)

L_T : Longitud total del husillo(m)

Se determina que el husillo no debe presentar una deflexión mayor a $5 * 10^{-4} \text{ m}$.

Como ya se calculó la flecha de flexión máxima del husillo, entonces tenemos la siguiente expresión, Ec. 45:

$$[y] \leq 5 * 10^{-4}m$$

Ec. 45

$$2,87 * 10^{-5}m \leq 5 * 10^{-4}mm$$

Al analizar la inecuación, se concluye que la deflexión máxima a la que se somete el husillo, no supera el parámetro permisible para maquinaria, por lo tanto se cumple el criterio de diseño.

2.8.9 CÁLCULO DEL ESFUERZO EQUIVALENTE Y FACTOR DE DISEÑO

Para hallar el factor de diseño, primero se determina el esfuerzo equivalente con la Ec. 46, Shigley (2008):

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

Ec. 46

$$\sigma_e = \sqrt{(48,24 \text{ MPa})^2 + 3(41,175 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_e = 86,1 \text{ MPa}$$

Donde:

σ : Tensión normal (MPa)

τ : Tensión tangencial (MPa)

(Mott, 2006), establece rangos para el factor de diseño de materiales frágiles y dúctiles, en diferentes condiciones de carga, en la Figura 28 se muestran distintos valores para el factor de diseño de materiales dúctiles:

Materiales dúctiles	
1.	$N = 1.25$ a 2.0 . El diseño de estructuras bajo cargas estáticas, para las que haya un alto grado de confianza en todos los datos del diseño.
2.	$N = 2.0$ a 2.5 . Diseño de elementos de máquina bajo cargas dinámicas con una confianza promedio en todos los datos de diseño. Es la que se suele emplear en la solución de los problemas de este libro.
3.	$N = 2.5$ a 4.0 . Diseño de estructuras estáticas o elementos de máquina bajo cargas dinámicas con incertidumbre acerca de las cargas, propiedades de los materiales, análisis de esfuerzos o el ambiente.
4.	$N = 4.0$ o más. Diseño de estructuras estáticas o elementos de máquinas bajo cargas dinámicas, con incertidumbre en cuanto a alguna combinación de cargas, propiedades del material, análisis de esfuerzos o el ambiente. El deseo de dar una seguridad adicional a componentes críticos puede justificar también el empleo de estos valores.

Figura 28. Factores de diseño para materiales dúctiles

Fuente: (Mott, 2006)

Se toma como rango los valores de factor de diseño $\eta_s = 2$ a 2.5 , debido a que el husillo estará sometido a la acción de giro del motor que va a variar dependiendo del material a extruir. El factor de diseño se calcula con la Ec. 47, Shigley (2008):

$$\eta_s = \frac{S_y}{\sigma_e} \quad \text{Ec. 47}$$

$$\eta_s = \frac{205 \text{ MPa}}{86,1 \text{ MPa}}$$

$$\eta_s = 2,38$$

Donde:

S_y : Esfuerzo de fluencia AISI – 4140 (MPa)

σ_e : Esfuerzo equivalente (Mpa)

El factor de diseño está dentro de los valores indicados para cargas dinámicas.

2.8.10 DISEÑO DEL MUÑÓN

El muñón es la parte del husillo donde se acopla el motor, la hélice del husillo ocupa los 400 mm establecidos al principio, el muñón va por fuera del barril, Figura 29.

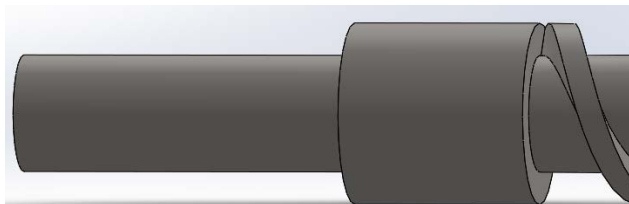


Figura 29. Muñón y parte inicial del husillo

Para que no existan fugas de material al inicio del barril, se establece un largo y un diámetro al inicio del husillo (donde no irá mecanizada la hélice), Ec. 48 y Ec. 49:

$$L_{ih} = 28 \text{ mm} \quad \text{Ec. 48}$$

$$D_{ih} = 28 \text{ mm} \quad \text{Ec. 49}$$

Donde:

L_{ih} : Largo al inicio del husillo

D_{ih} : Diámetro al inicio del husillo

Se ha tomado valores empíricos mencionados en Savgorodny (1973), para el largo se ha tomado 1 vez el diámetro del husillo y para el diámetro el mismo de donde va mecanizada la hélice. Mientras que el muñón tendrá las siguientes dimensiones, Ec. 50 y Ec. 51:

$$L_m = 50 \text{ mm} \quad \text{Ec. 50}$$

$$D_m = 18 \text{ mm} \quad \text{Ec. 51}$$

El largo corresponde a la medida de un motorreductor 40:1, se consideró el diámetro menor del husillo para el muñón, la Figura 30 muestra un modelado del husillo con sus dimensiones y características:

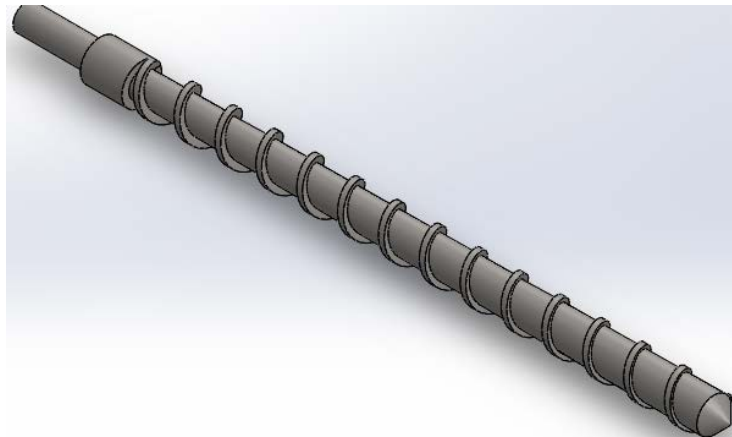


Figura 30. Modelado del husillo

2.9 DISEÑO DEL BARRIL

Los parámetros que conforman el barril, tales como diámetro exterior (D_e), diámetro interior (D_i) y espesor (ϵ) se muestran a continuación en la Figura 31:

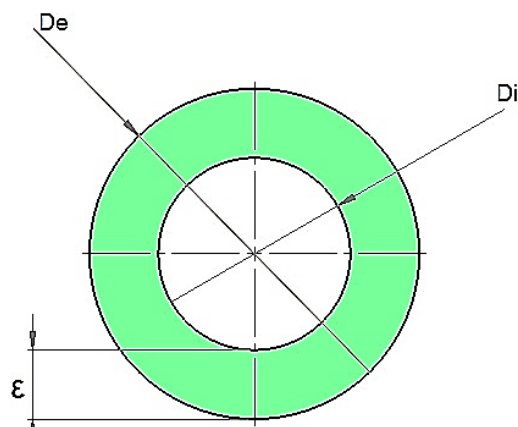


Figura 31. Parámetros del barril

Para su diseño se parte calculando su diámetro interior, el cual viene dado por la suma del diámetro total del husillo, más el valor de la holgura (λ), el cálculo se representa en la Ec. 52, Savgorodny (1973):

$$D_i = D_T + \lambda \quad \text{Ec. 52}$$

$$D_i = 28 \text{ mm} + 0,084 \text{ mm}$$

$$D_i = 28,084 \text{ mm}$$

Donde:

λ : Holgura barril – husillo

D_T : Diámetro total del husillo

2.9.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL DEL BARRIL

Los distintos aceros para barriles de extrusión se revisaron en el Capítulo 1, en la Tabla 10 se realiza comparativa tomando un rango de valores ponderativos del 1 al 5, siendo 5 el valor más adecuado y 1 el valor menos adecuado al proyecto:

Tabla 10

Análisis de Aceros comerciales para la fabricación del barril

Propiedades	AISI-D2	AISI-M2	CPM-10V	AISI-1018
Bajo costo	3	2	1	5
Resistencia al desgaste	3	4	5	2
Dureza	3	5	1	2
Resistencia a la corrosión	4	2	3	1
Tenacidad	2	1	4	3
Maquinabilidad	2	1	3	5
Total	17	15	17	18

El acero que mejor se adapta a los requerimientos del proyecto es el AISI-1018, es una alternativa de bajo costo y muestra resultados equilibrados en casi todos los aspectos, excepto en la Resistencia al Desgaste y a la Corrosión, para compensar esta deficiencia se realizará un nitrurado, sin embargo, al ser el barril un elemento que no ejecuta movimiento, la resistencia al desgaste pasa a segundo plano.

2.9.2 CÁLCULO DEL ESPESOR DEL BARRIL

Para el cálculo del espesor, es necesario determinar que presiones existirán dentro del barril, la fórmula para determinar el espesor del barril se muestra en la Ec. 53 definida por Savgorodny (1973):

$$\varepsilon_B = r_i * \left(1 - \sqrt{\frac{2P_{Max}}{\sigma_t - 2P_{Max}}} \right) \quad \text{Ec. 53}$$

$$\varepsilon_B = 0,014042 \text{ m} * \left(1 - \sqrt{\frac{2 * (46\text{MPa})}{565\text{MPa} - (2 * 46\text{MPa})}} \right)$$

$$\varepsilon_B = 0,011 \text{ m}$$

$$\varepsilon_B = 11 \text{ mm}$$

Donde:

ε_B : Espesor del barril (m)

r_i : Radio interno del barril (m)

P_{Max} : Presión interna del barril (MPa)

σ_t : Esfuerzo máximo de fluencia del material (cilindro)(MPa)

En la Figura 32 se muestra el modelado del barril:



Figura 32. Modelado del barril

2.10 SELECCIÓN Y DISEÑO DE LA TOLVA

Debe poseer paredes inclinadas y de forma casi siempre cónica. Existen de forma circular, rectangular y una que incorpora un tornillo de alimentación (Tornillo Crammer), mostradas en la Figura 33.

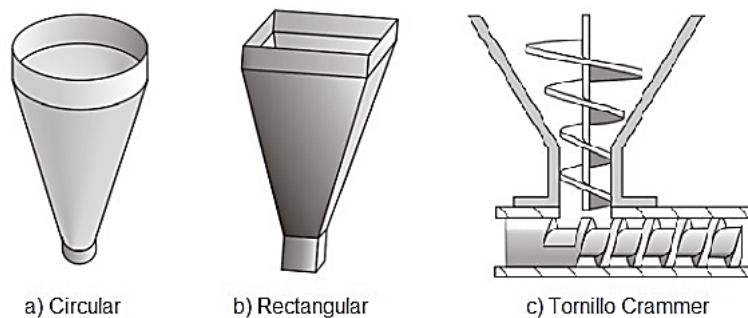


Figura 33. Tipos de tolva
Fuente: (Beltrán & Marcilla, 2012)

En la Tabla 11 se realiza una comparación ponderativa entre las tolvas según su forma:

Tabla 11
Tolvas según su forma y aplicaciones

Parámetros	Circular	Rectangular	Tornillo Crammer
Construcción	5	3	1
Bajo costo	5	3	2
Coeficiente de fricción	4	3	5
Flujo	3	2	5
Volumen	4	5	3
Vibraciones	5	5	1
Precisión de dosificación	3	2	5
Total	29	23	22

“La tolva al trabajar con la zona de alimentación, debe proveer material al husillo de forma constante, el diseño más común es el de forma de cono circular” (Giles Harold et al., 2005)

“Se diseñan con un volumen que permita albergar material para, al menos, dos horas de trabajo.” (Beltrán & Marcilla, 2012).

En base a la producción de 1000 gramos de filamento en una hora, se calcula el volumen de la tolva considerando que el polímero que más se va a emplear es el ABS, mediante la Ec. 54, (Laburu, 2000), donde se divide la masa del material a producir en tres horas sobre la densidad del ABS (se ignoran los espacios vacíos entre los pellets, considerando una sola masa compacta):

$$Vt = \frac{m_3H}{\delta_{ABS}}$$

Ec. 54

$$Vt = \frac{3000 \text{ gr}}{1,05 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3}}$$

$$Vt = 2857 \text{ cm}^3$$

Donde:

δ_{ABS} : Densidad ABS

m_{3h} : Masa del filamento producido en tres horas

El volumen aproximado de la tolva será de 2857 cm³; para facilitar su construcción se establece su radio mayor y radio menor de 10 y 2 cm respectivamente, el volumen de la tolva se establece mediante la Ec. 55, (Laburu, 2000):

$$V_{Tronco \text{ de cono}} = \frac{h_{cono} * \pi}{3} * (r_1^2 + r_2^2 + r_1 * r_2) \quad \text{Ec. 55}$$

$$2857 \text{ cm}^3 = \frac{h_{cono} * \pi}{3} * (10\text{cm}^2 + 2\text{cm}^2 + 10\text{cm} * 2\text{cm})$$

$$23\text{cm} = \frac{h_{cono} * \pi}{3}$$

$$h_{cono} = 21 \text{ cm}$$

Por lo tanto, la altura de la tolva será de 21cm, diámetro inferior de 4cm y diámetro superior de 20cm, con un espesor de 2mm, asegurando así que la tolva pueda almacenar material para tres horas de trabajo aproximadamente, Figura 34.

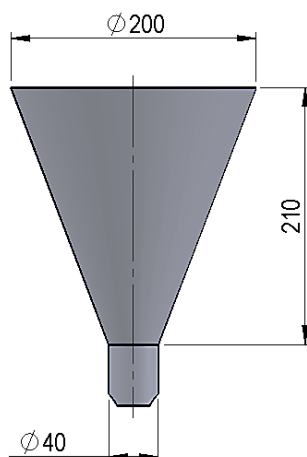


Figura 34. Dimensiones de la tolva

Los valores tomados para el cálculo de la tolva han sido elegidos de tal forma que la construcción sea más fácil y la soldadura se realice en dos cordones.

2.10.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL DE LA TOLVA

En la Tabla 12 se realiza una comparación ponderativa de varios aceros, con el fin de elegir el mejor acero para fabricar la tolva.

Tabla 12

Aceros comerciales para la fabricación de la tolva

Propiedades	AISI-1010	AISI-201	AISI-1038	ASTM A36
Bajo costo	2	1	3	5
Resistencia al desgaste	3	5	4	2
Dureza	3	5	1	2
Resistencia a la corrosión	4	5	3	1
Tenacidad	2	1	4	3
Maquinabilidad	2	1	3	5
Total	16	18	18	18

Al ser un elemento que no se someterá a altas temperaturas, esfuerzos, ni a elementos corrosivos, se selecciona al acero ASTM A36, el cual ofrece buena soldabilidad y maquinabilidad, necesarias para la fabricación de este elemento, en la Figura 35 se observa el modelado de la tolva.

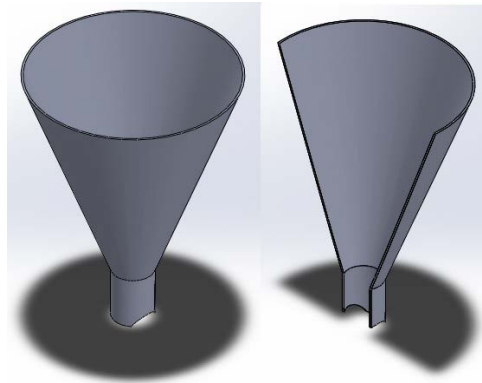


Figura 35. Diseño de la tolva y corte longitudinal

2.10.2 DISEÑO DE LA GARGANTA DE ALIMENTACIÓN

Está ubicada entre la tolva y el barril, es la parte por donde entra material al barril para ser extruido por el husillo,

“Suele tener una longitud de 0.9-1.5 veces el diámetro interior del cilindro, suele estar desplazada del eje del tornillo para facilitar la caída del material a la máquina.” (Beltrán & Marcilla, 2012).

De esta forma se garantiza que la entrada de material no se obstaculice y que la garganta de alimentación sea acorde a las dimensiones del barril, Figura 36:

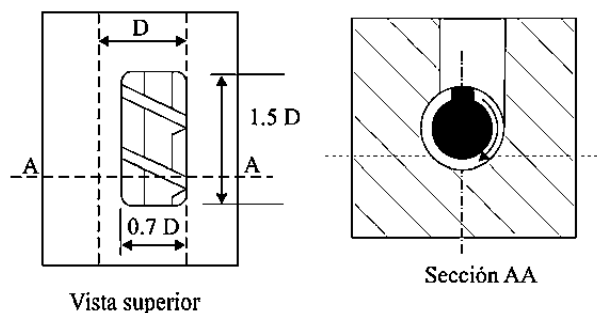


Figura 36. Garganta de alimentación

Fuente: (Beltrán & Marcilla, 2012)

El diámetro interior del barril es de 28,084 mm, por lo tanto, tomando un valor de 0.9 veces la medida del diámetro del cilindro (debido a que la extrusora es de tamaño reducido), se tiene una garganta de 25,2 mm de diámetro.

2.11 DISEÑO DEL CABEZAL

Debido a que se planteó extruir filamentos de 1.75 mm y 3 mm de diámetro, es necesario que el cabezal sea una pieza aparte y de fácil intercambio.

2.11.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL DEL CABEZAL

El cabezal va acoplado al barril, por lo tanto se lo puede considerar como una extensión del mismo, no requiere condiciones especiales que difieran del barril. El material para la conformación del cabezal será el acero AISI-1018.

2.11.2 DIMENSIONES DEL CABEZAL

El espesor que se definirá para el cabezal será el mismo que el del barril, Ec. 56:

$$\varepsilon_B = \varepsilon_C = 8 \text{ mm} \quad \text{Ec. 56}$$

Mientras que el largo del cabezal es un valor dado por la Ec. 57:

$$L_C = 52 \text{ mm} \quad \text{Ec. 57}$$

Debido a que el cabezal irá enroscado al barril, esto va a facilitar el intercambio de piezas, evitar fugas de material y pérdidas de presión.

Finalmente la punta del cabezal, la cual debe ser de dimensiones relativamente cortas para evitar obstrucciones de material, tendrá las siguientes dimensiones Ec. 58 y Ec. 59:

$$L_{PC} = 22 \text{ mm} \quad \text{Ec. 58}$$

$$D_{PC} = 10 \text{ mm} \quad \text{Ec. 59}$$

Donde:

L_{PC} : Largo de la punta del cabezal

D_{PC} : Diámetro de la punta del cabezal

Además tendrá en la parte superior un taladro para la ubicación del sensor de temperatura, así como dos cortes para extraer el cabezal en caliente mediante herramientas. La Figura 37 muestra un modelado del cabezal:

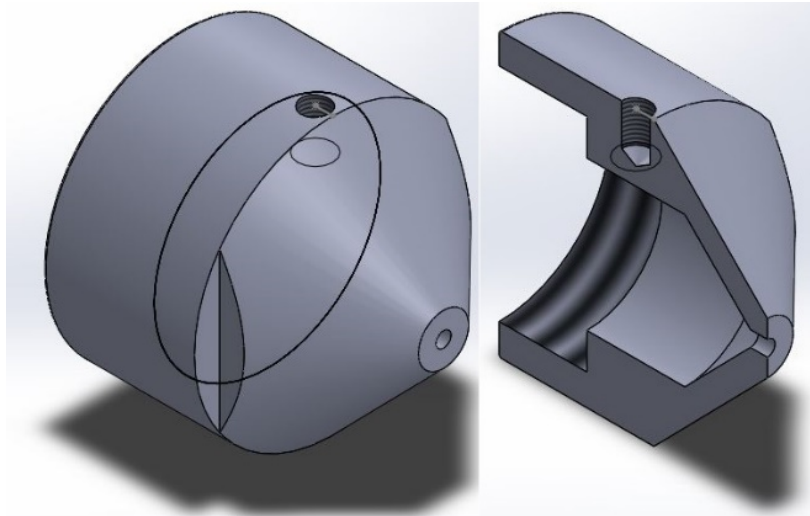


Figura 37. Modelado del cabezal y corte transversal

2.12 DISEÑO ELÉCTRICO

Se va a seleccionar elementos eléctricos como el motor, variador de frecuencia, controlador de temperatura, sensores, etc.

2.13 SELECCIÓN DEL MOTOR

Se tienen dos alternativas, motores CA y CD; para determinar que motor se ajusta al proyecto, es necesario realizar una tabla que compare sus características, con la finalidad de elegir la alternativa más conveniente. La Tabla 13 muestra tal comparación:

Tabla 13
Características Motores CA vs. Motores CD

Características	Motor CA	Motor CD
Control de velocidad	Variadores de frecuencia.	Variación de tensión o de corriente directa.
Coste	Fabricación media.	Fabricación costosa.
Arranque	No necesario	Necesario
Fases	Monofásicos o trifásicos.	Monofásicos.
Mantenimiento	Bajo	Costoso
RPM	No operan a bajas RPM	Operan a distintas RPM.
Fuente	Red eléctrica.	Necesita fuente de CD.
Par de arranque	Bajo	Alto
Aplicaciones	Media y alta potencia	Baja y alta potencia

Al analizar la Tabla 13, se determina que la mejor opción para la extrusora es el motor CA en conjunto con un variador de frecuencia.

“En algunas aplicaciones, los motores eléctricos de CD se sustituyen mediante la combinación de un motor eléctrico de corriente alterna con un controlador electrónico de velocidad, conocidos como unidades de frecuencia variable, ya que es una solución más económica.” (Sanabria, 2015)

2.13.1 CARACTERÍSTICAS DEL MOTOR

En la etapa de diseño del husillo se determinó la potencia en la Ec. 22:

$$P_{mot} = 0,3 \text{ HP} \quad \text{Ec. 22}$$

Debido a que no existen motores con tal potencia se aproxima al inmediato superior quedando de la siguiente forma:

$$P_{mot} \approx 0,5 \text{ HP} \approx \frac{1}{2} \text{ HP}$$

Existe una relación entre el número de polos y la velocidad de rotación en motores síncronos, mostrada en la Ec. 60, Enríquez (2000):

$$Vel = \frac{120 * frecuencia}{\#polos} \quad \text{Ec. 60}$$

$$Vel = \frac{120 * 60 \text{ Hz}}{4}$$

$$Vel = 1800 \text{ RPM}$$

Se ha realizado el cálculo con 4 polos, debido a que son los más vendidos junto con los de 2 polos. Como se va a utilizar el motor en conjunto con el variador de frecuencia, el acople viene a ser directo, mientras que el grado de protección IP 55 es común en motores CA y ofrece protección media a salpicaduras y acumulación de polvo. La Tabla 14 muestra las características que debe poseer el motor para el proyecto.

Tabla 14
Características del Motor CA

CARACTERÍSTICAS	VALORES
POTENCIA NOMINAL	0,37 kW – ½ HP
VOLTAJE	Trifásico 220-240 Vac
FRECUENCIA	60 Hz
NÚMERO DE POLOS	4
VELOCIDAD DE ROTACIÓN	1800 RPM
ACOPLE	Directo
ÍNDICE DE PROTECCIÓN	IP 55

Se concluye que el motor seleccionado es de ½ HP trifásico de 4 polos a 1800 RPM.

2.14 SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA

Para regular y controlar la temperatura dentro del proceso, es necesario implementar un sistema de control de temperatura, deberá estar conformado por un controlador, actuador y sensor. A continuación se realiza la selección de estos tres componentes.

2.14.1 SELECCIÓN DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA

Existen controladores On/Off, proporcional y PID, que se diferencian uno de otro por la tecnología y ventajas que ofrecen, en la Tabla 15 se realiza una comparación ponderativa entre estos tres controladores, tomando valores del 1 al 5, donde 1 es el valor menos adecuado y 5 el más adecuado al proyecto:

Tabla 15
Ventajas de algunos controladores de temperatura

Ventajas	On/Off	Proporcional	PID
Evita cambios rápidos de conmutación	-	2	5
Controla potencia media suministrada al calentador	-	1	5
Diferencial de encendido o apagado (histéresis)	-	3	5
Termopares J, K, T, R, S, E, B,C	5	5	5
Rango de voltajes 110-220 VAC	5	5	5
Salida con relé de estado sólido (SSR)	-	-	5
Precisión y estabilidad	1	3	5
Total	11	19	35

Se determina que el controlador adecuado al proyecto es el PID, ya que se puede utilizar una gran cantidad de termopares sin necesidad de circuito de acondicionamiento, posee histéresis y salida a relé de estado sólido que es lo que requiere el proyecto. El controlador PID tiene la ventaja de adaptarse a procesos cambiantes tales como la extrusión, para el desarrollo del proyecto se requiere una termocupla que sense la temperatura del proceso y una resistencia calefactora como actuador.

2.14.2 SELECCIÓN DEL TERMOPAR

Existen diversos tipos que se diferencian por sus materiales de construcción y los rangos de temperatura que pueden sensar. Para una correcta selección de este componente se muestra en la Tabla 16 una comparación de algunos tipos de termopares:

Tabla 16
Termopares comerciales

Termopar	T. Mínima °C	T. Máxima °C	Aleación
Tipo J	-200	750	Hierro/Constantán
Tipo K	-200	1370	Chromel/Alumel
Tipo T	-250	400	Cobre/Constantán
Tipo R	0	1767	Platino/Rodio
Tipo S	0	1767	Platino/Rodio
Tipo B	0	1820	Platino/Rodio
Tipo E	-200	800	Chromel/Constantán

La Tabla 16 determina que el termopar adecuado es el tipo K, debido al rango de temperaturas que sensa y su bajo coste, el cual depende del material de fabricación, por ejemplo, elementos como el rodio y el platino son escasos y costosos.

Debido a que se va a medir temperatura en superficies de metal, se recomienda utilizar una termocupla con bayoneta y resorte, con malla de acero para protegerla del ambiente, Figura 38:



Figura 38. Termopar con malla de protección
Fuente: (Promelsa, 2014)

2.14.3 SELECCIÓN DE LA RESISTENCIA CALEFACTORA

Suministra calor a una parte del barril para que el material se funda, existen diversos tipos de resistencias detalladas brevemente a continuación:

- **Resistencias tubulares.-** Calientan superficies cilíndricas, transferencia de calor uniforme, muy utilizadas en procesos de extrusión, forma espiral, Figura 39.



Figura 39. Resistencia tubular
Fuente: (Smsresistencias, 2012)

- **Resistencias tipo banda.-** Utilizada en la industria del plástico, forman una abrazadera para calentar áreas cilíndricas, ofrecen altas temperaturas, la Figura 40 muestra una resistencia tipo banda cerámica.



Figura 40. Resistencia tipo banda
Fuente: (Blasterperu, 2015)

- **Resistencias tipo cartucho.-** Compactas, dan alta concentración de temperatura, requieren elementos especiales para ser acopladas a piezas como cilindros, Figura 41:



Figura 41. Resistencia tipo cartucho

Para una adecuada selección de resistencia, se realiza una tabla ponderativa entre las ventajas que aportan cada tipo de resistencia, dicha comparación se muestra en la Tabla 17, tomando valores del 1 al 5, siendo 1 al valor menos adecuado y 5 el más adecuado al proyecto:

Tabla 17
Ventajas de algunos tipos de resistencias calefactoras

VENTAJAS	TUBULAR	BANDA	CARTUCHO
Alta temperatura	5	4	3
Transferencia de calor uniforme	4	5	2
Termopar incluido	5	5	-
Eficiencia en superficies cilíndricas	4	5	2
Compacta	4	4	5
Uso en la industria del plástico	4	5	3
No requiere accesorios especiales	4	5	2
Bajo coste	5	3	4
Durabilidad	4	4	5
Total	39	40	26

Según la Tabla 17 la resistencia que mejor resultados da es la tipo banda, debido a su coste y altas temperaturas, además es muy utilizada para aplicaciones similares a las del proyecto ya que su área de temperatura es cilíndrica y por ende proporciona calor por igual al barril.

2.14.4 CÁLCULO DE POTENCIA DE LA RESISTENCIA

La resistencia que vaya acoplada al barril, debe tener la potencia necesaria para fundir el material a procesar, para ello se utilizan fórmulas del manual de Gieck, 2012. Primero se determinan parámetros tales como el volumen del barril, flujo de calor y el tiempo de residencia de la mezcla:

a) Volumen del barril

Viene dado por la Ec. 61:

$$V_B = L * \pi * (R_e^2 - R_i^2) \quad \text{Ec. 61}$$

$$V_B = 0,4 * \pi * (0,028^2 - 0,0140375^2)$$

$$V_B = 5,377 * 10^{-4} m^3$$

Donde:

L : Longitud del barril (m)

R_e : Radio externo del barril (m)

R_i : Radio interno del barril (m)

b) Superficie externa del barril

Se determina con la Ec. 62:

$$A_e = 2\pi * R_e * L \quad \text{Ec. 62}$$

$$A_e = 2\pi * 0,028 * 0,4$$

$$A_e = 0,062 m^2$$

c) Tiempo de residencia de la mezcla

Es el tiempo que el termoplástico va a residir dentro de la extrusora mientras ocurre el cambio de sólido a líquido, Ec. 63:

$$\mathcal{T} = \frac{\pi * l * R_n^2}{Q_T} \quad \text{Ec. 63}$$

$$\mathcal{T} = \frac{\pi * 0,36 * 0,014^2}{8.64512 \times 10^{-6}}$$

$$\mathcal{T} = 25,64 s$$

Donde:

R_h : Radio externo del husillo (m)

l : longitud de trabajo del husillo (m)

d) Diferencial de temperaturas en el barril

Las temperaturas presentes en el barril son la ambiental y la temperatura máxima que posteriormente se fijó para la extrusora, el diferencial de temperatura se muestra en la

Ec. 64:

$$\Delta T_b = T_M - T_A \quad \text{Ec. 64}$$

$$\Delta T_b = 773,15^\circ K - 298,15^\circ K$$

$$\Delta T_b = 475^\circ K$$

Donde:

T_M : Temperatura máxima ($^\circ K$)

T_A : Temperatura ambiente ($^\circ K$)

e) Flujo de calor

Se refiere al calor que la resistencia debe suministrar al barril, para que el termoplástico alcance la temperatura de transición vítrea, para determinarlo se emplean valores del coeficiente de transferencia de calor y calor específico correspondientes al acero en general tomados de Coronel, 2014, Ec. 65:

$$Q_r = \delta * V_B * c_a * \Delta T_b \left[1 - e^{\left(-\frac{T * U_B * A_e}{\delta * V_B * c_a} \right)} \right] \quad \text{Ec. 65}$$

$$Q_r = 7870 * 5,377 * 10^{-4} * 434 * 475 \left[1 - e^{\left(\frac{25,64 * 36 * 0,062}{7870 * 5,377 * 10^{-4} * 434} \right)} \right]$$

$$Q_r = 26764,36 J$$

Donde:

δ : Densidad AISI – 1018 $\left(\frac{Kg}{m^3} \right)$

V_B : Volumen del barril (m^3)

c_a : Calor específico acero $\left(\frac{J}{Kg * ^\circ K} \right)$

U_B : Coeficiente de transferencia de calor acero $\left(\frac{W}{m^2 * ^\circ K} \right)$

A_e : Superficie externa del barril (m^2)

f) Potencia aparente

Se determina mediante la Ec. 66:

$$P_A = \frac{Q_r}{T}$$

Ec. 66

$$P_A = \frac{26764,36 J}{25,64 s}$$

$$P_A = 963.85 W$$

g) Potencia real

Debido a que las resistencias calefactoras tienden a deteriorarse (por corrosión u otros factores), es necesario multiplicar la potencia aparente por un factor de envejecimiento; otro inconveniente es que las resistencias tardan en alcanzar su

temperatura máxima, para corregir esto se multiplica por un factor de sobredimensionamiento, se tomarán valores citados en Castellanos, 2013, Ec. 67:

$$P_{total} = P_A * f_{en} * f_{sd} \quad \text{Ec. 67}$$

$$P_{total} = 963.85 * 1,1 * 1,2$$

$$P_{total} = 1027 \text{ W} \approx 1 \text{ KW}$$

Donde:

f_{en} : Factor de envejecimiento

f_{sd} : Factor de sobredimensionamiento

Esta potencia total se repartirá en 4 resistencias tipo banda, debido a que se encuentran en el mercado en potencias proporcionales a su diámetro, además de que para que el material se funda mejor, se proveerá de calor a todo el barril, evitando atascos, pérdidas de potencia y sobretodo que el motor realice sobreesfuerzos y se quemara a futuro.

CAPÍTULO III

CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

3.1 CONSTRUCCIÓN

A continuación se detallarán los elementos que se han construido, tales como el barril, la tolva, cabezales, base, estructura, soportes, etc. Así como los procesos de mecanizado, dimensiones y planos.

3.1.1 CONSTRUCCIÓN DEL BARRIL

Para su construcción se ha adquirido un tubo redondo de acero AISI-1018 mostrado en la Figura 42:



Figura 42. Tubo redondo AISI 1018

El cual ha sido mecanizado mediante varios procesos (torneado, taladrado) mostrados en las hojas de mecanizado de los Anexos E1, E2 y E3, con las dimensiones establecidas en la etapa de diseño y mostradas en el plano del Anexo C4, para finalmente someterlo a un proceso de nitrurado por 40 horas con la finalidad de mejorar la dureza superficial del elemento y su resistencia al desgaste.

3.1.2 CONSTRUCCIÓN DE LA BASE

Se parte de una plancha de acero ASTM A36 con las dimensiones especificadas en las hojas de mecanizado de los Anexos E4 y E5, la cual se ha sometido al doblado y taladrado según el plano del Anexo C5.

3.1.3 CONSTRUCCIÓN DE LA BRIDA

Para alinear el barril con el motorreductor, se ha construido una brida de tal forma que en ella se pueda enroscar el barril y ajustarla al motorreductor mediante pernos, Figura 43, las dimensiones de la brida se han determinado con las características del motorreductor y se muestran en el Anexo C6, mientras que su construcción viene dada por las hojas de mecanizado en los Anexos E6 y E7.



Figura 43. Barril enroscado a la brida

3.1.4 CONSTRUCCIÓN DE LOS CABEZALES

En el proceso de diseño se determinó que los cabezales irán enroscados al barril y serán del mismo material que este, por lo tanto se empieza con barras redondas AISI-

1018 que serán sometidos a varios procesos de manufactura definidos en las hojas de mecanizado de los Anexos E8 y E9. Las dimensiones de los cabezales están mostradas en los Anexos C7 y C8, Figura 44:



Figura 44. Cabezal mecanizado

3.1.5 CONSTRUCCIÓN DE LA PLACA L

Tomando en cuenta las recomendaciones para el montaje del variador de frecuencia Siemens Sinamics V20 del Anexo A1, es necesario la construcción de una placa que vaya sujeta a la base, Figura 45; las dimensiones de esta placa están detalladas en el Anexo C9 y su construcción se ha realizado siguiendo la hoja de mecanizado de doblado y taladrado del Anexo E10 y E11.



Figura 45. Montaje Variador en Placa L

3.1.6 CONSTRUCCIÓN DEL SOPORTE SUPERIOR E INFERIOR

Tienen como función sostener al barril, de tal forma que éste vaya paralelo a la base y no se desalinee, Figura 46, son dos piezas distintas con dimensiones mostradas en los Anexos C11 y C13, este elemento se ha mecanizado siguiendo los parámetros de las hojas de mecanizado de los Anexos E12, E13 y E15.

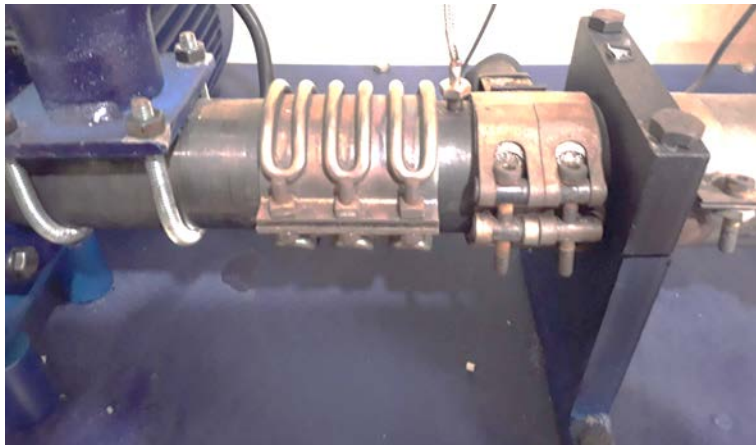


Figura 46. Soporte superior e inferior

3.1.7 CONSTRUCCIÓN DEL SOPORTE REDUCTOR

Las dimensiones de motorreductor no permiten que éste vaya sujeto directamente a la base, por lo que es necesario colocar un soporte que permita al motorreductor estar paralelo a la base, se han construido cuatro soportes sencillos y de poco peso que se ajustan al motorreductor mediante pernos, Figura 47. Las dimensiones de los soportes están definidas en el Anexo C12 y para su fabricación se ha considerado la hoja de mecanizado del Anexo E14.

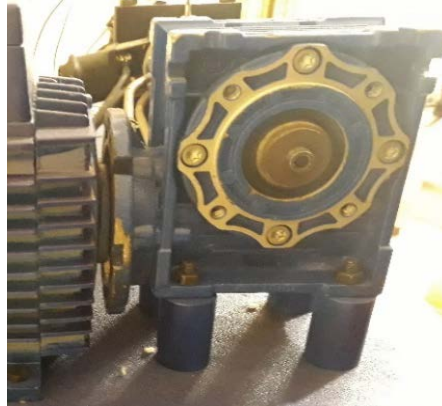


Figura 47. Soportes para el motorreductor

3.1.8 CONSTRUCCIÓN DEL SOPORTE TOLVA

Es necesario un soporte que permita a la tolva estar vertical y sujeta al barril para evitar fuga de materia prima y obstrucciones, su construcción se detalla en la hoja de mecanizado del Anexo E16 y sus dimensiones se muestran en el Anexo C14, la Figura 48 muestra el soporte unido a la tolva con dos tornillos en forma de U.



Figura 48. Soportes para la tolva

3.1.9 CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Se ha tomado en cuenta el diseño de las extrusoras comerciales Noztek Touch HT, FilaFab Pro350, mostradas en las Figuras 4 y 5 del Capítulo I respectivamente, las cuales tienen una estructura en forma de caja que en su interior alberga los componentes eléctricos, circuitos, cableado, elementos de control, etc., mientras que en la parte superior de la estructura va el motor, husillo, barril, resistencias, etc., de tal forma que haya una correcta ventilación del sistema, Figura 49. La estructura consta de tres partes: Tapa Lateral, Tapa Frontal y Tapa Superior, sus dimensiones se muestran en los Anexos C15, C16 y C17, los procesos para la fabricación de estas partes están en las hojas de mecanizado de los Anexos E17, E18, E19, E20, E21 y E22.

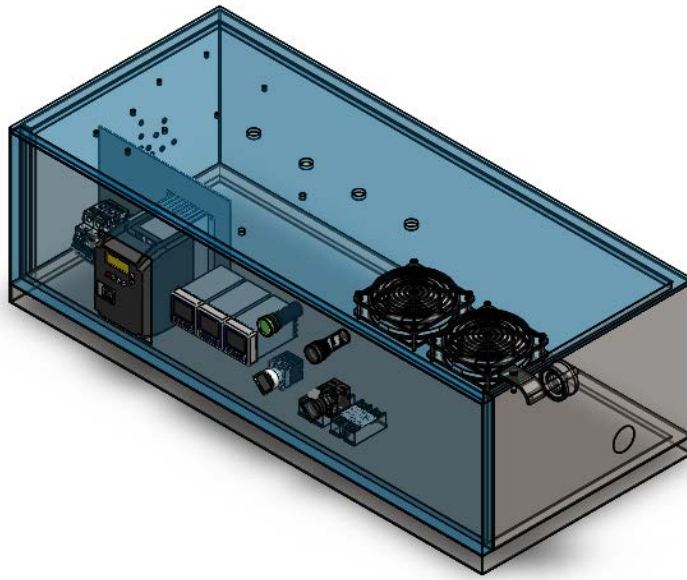


Figura 49. Modelado de la estructura

3.1.10 CONSTRUCCIÓN DE LA TOLVA

Su elaboración será en una lámina de acero AISI-1018 de 3mm, que posteriormente será barolada para darle la forma cónica, Figura 50:



Figura 50. Construcción de la tolva

El proceso de construcción se basa en los planos del Anexo C18 y las hojas de mecanizado de los Anexos E23 y E24.

3.2 IMPLEMENTACIÓN DE ELEMENTOS Y DISPOSITIVOS

Se detalla a continuación los elementos prefabricados así como el montaje y disposición de los elementos.

3.2.1 IMPLEMENTACIÓN DEL HUSILLO

Por motivos de tiempo, coste y dificultad de mecanizado, se ha optado por adquirir un husillo prefabricado, en la Figura 10 del Capítulo I se han mostrado los diversos tipos de husillos prefabricados, para este proyecto se ha adquirido un husillo de Tipo Uso

General, con mismos diámetro y largo establecidos en la etapa de diseño. La Figura 51 muestra el husillo adquirido:



Figura 51. Husillo de uso general

3.2.2 IMPLEMENTACIÓN DEL MOTOR Y REDUCTOR

Se empieza con los elementos que dan movimiento a la extrusora, como son el motor el cual se fija sobre la base metálica, de allí se lo acopla con el motorreductor previamente alineado con el husillo, Figura 51, para después fijarlo a la base de tal forma que todos los elementos mencionados estén alineados y no vayan a producir vibraciones u oscilaciones que puedan comprometer el funcionamiento de la extrusora, Figura 52:

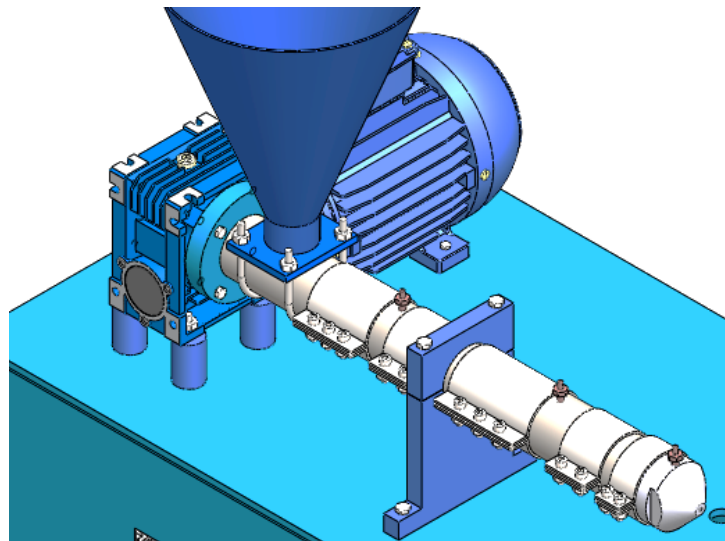


Figura 52. Disposición de motor y reductor

3.2.3 IMPLEMENTACIÓN DE RESISTENCIAS Y TERMOPARES

Se utilizarán tres termopares tipo K para ejercer control de temperatura en tres zonas a lo largo del husillo, para un mejor sensado dos termopares irán atornillados directamente al barril, mientras que el restante irá enroscado al cabezal, Figura 53:



Figura 53. Disposición de resistencias y termopares

Para el cableado y conexión eléctrica de dichas resistencias, se ha empleado cable flexible con aislamiento resistente a altas temperaturas, Figura 54.



Figura 54. Cables con aislamiento térmico

3.2.4 MONTAJE VARIADOR DE FRECUENCIA

Se toman en cuenta las recomendaciones sugeridas por el fabricante del Anexo A1, para la ubicación del dispositivo dentro de la caja de la extrusora, para operar el variador es necesario que su parte frontal este fuera de la estructura, Figura 55:



Figura 55. Montaje Variador de Frecuencia

3.2.5 MONTAJE DE LOS CONTROLADORES PID

Al tener tres zonas de extrusión son necesarios tres controladores PID, los cuales van sujetos a la parte frontal de la caja mediante dos mordazas, conforme lo determina el fabricante en el Anexo B1, de tal forma que sea fácil su remoción y ubicación sin la necesidad de taladros y tornillos, Figura 56:



Figura 56. Montaje controladores PID

3.2.6 MONTAJE DE LOS VENTILADORES

Se han adquirido dos ventiladores a 220 VAC los mismos que se ubicarán en la base de tal forma que el flujo de aire vaya de abajo hacia arriba y se pueda enfriar eficazmente el filamento extruido, como lo muestra la Figura 57:



Figura 57. Posicionamiento de los ventiladores

3.2.7 MONTAJE DE LOS INTERRUPTORES Y LUCES PILOTO

Se colocan los respectivos interruptores que activarán o desactivarán las respectivas funciones de la extrusora y luces piloto que indicarán el estado de la extrusora tomando en cuenta el Anexo C15, Figura 58:



Figura 58. Interruptores y luces piloto de la extrusora

3.3 CONEXIONES DE DISPOSITIVOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS

Para tener una referencia clara de lo que se va a implementar, se utilizarán los diagramas eléctricos, tanto de control como el de potencia, incluidos en el Anexo D1 y D2 respectivamente.

3.3.1 CONEXIONES INTERNAS DEL MOTOR

Se procede a realizar la conexión en triángulo para un voltaje de 220-230 Vac en la caja de bornes del motor, Figura 59:

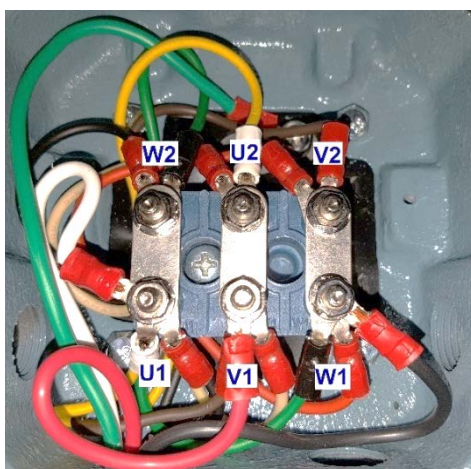


Figura 59. Conexión en triángulo

Se toma en cuenta el diagrama establecido por el fabricante de la Figura 60:

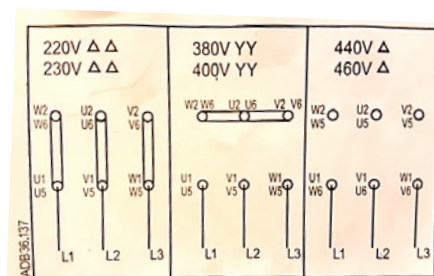


Figura 60. Diagrama de conexiones del Motor de CA

Se considera que los cables U1, V1, W1, que salen del motor, son de color blanco, rojo y negro, respectivamente.

3.3.2 CONEXIÓN DEL MOTOR AL VARIADOR DE FRECUENCIA

Se toman los respectivos cables U1, V1 y W1 y se conectan a los correspondientes terminales del variador del Anexo A2, Figura 61:

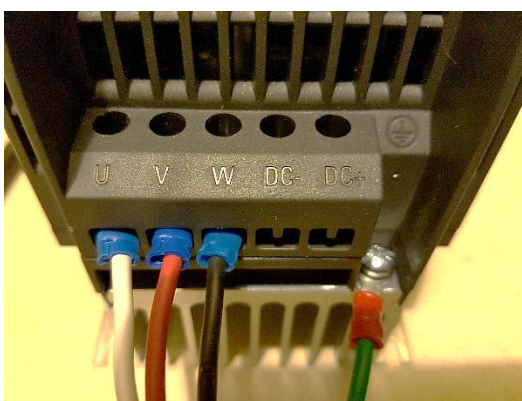


Figura 61. Conexión Motor-Variador

3.3.3 CONEXIÓN ELEMENTOS DE PROTECCIÓN ELÉCTRICA

El fabricante del variador de frecuencia recomienda la utilización de un interruptor automático magnetotérmico (breaker) de 16A conectado mediante un cable AWG 2x12, Anexo A3, Figura 62:

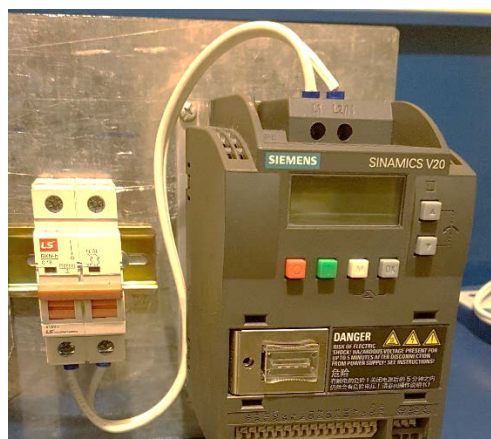


Figura 62. Conexión breaker al variador

3.3.4 CONEXIONES DE LOS CONTROLADORES PID

Se realiza la conexión de los termopares tipo K a cada uno de los controladores PID, para ello se verifican el diagrama y los terminales del controlador en el Anexo B2. El termopar va conectado a los terminales 9 y 10, positivo y negativo respectivamente, mientras que la alimentación de 220 Vac va conectada a los terminales 1 y 6, la conexión se muestra en la Figura 63:

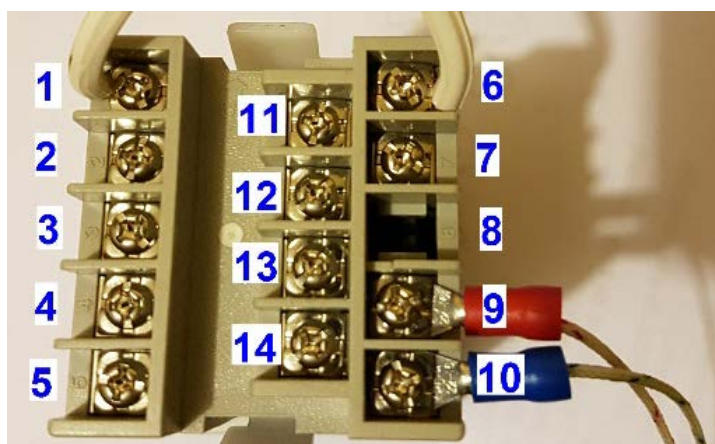


Figura 63. Conexión alimentación y termopar al PID

Mientras que la resistencia calefactora se conecta a la salida 1 (Out 1) correspondiente a los terminales 4 y 5, Figura 64:

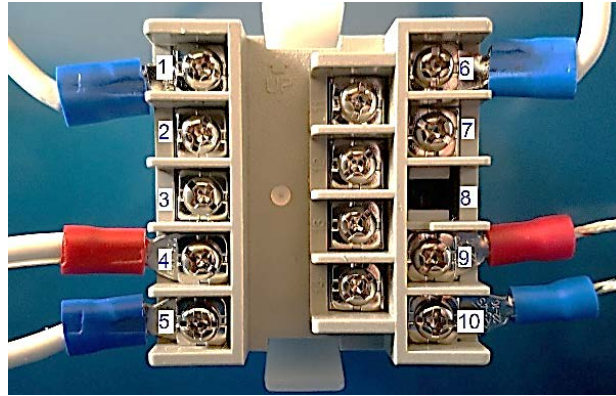


Figura 64. Conexiones al controlador PID

3.4 CONFIGURACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS ELECTRÓNICOS

Para el control general de la extrusora, hay que configurar diversos parámetros al variador de frecuencia y los controladores PID.

3.4.1 DIAGRAMA DE FLUJO

Para representar y comprender mejor el proceso de extrusión que se va a ejecutar, se realiza un diagrama de flujo mostrado en la Figura 65, que posteriormente servirá para configurar parámetros en los dispositivos de la extrusora.

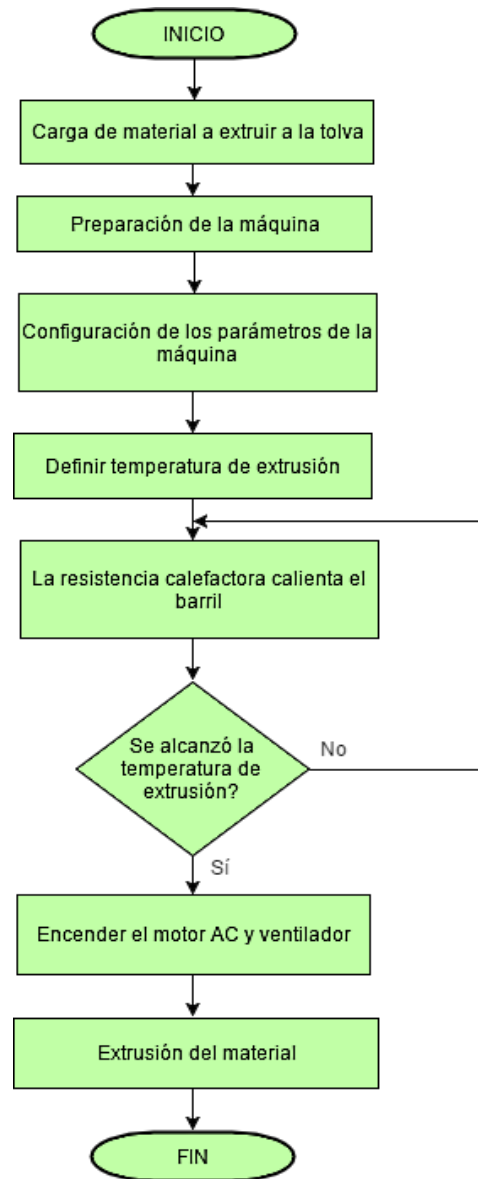


Figura 65. Diagrama de flujo proceso de extrusión

3.4.2 CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS VARIADOR DE FRECUENCIA

Antes de su puesta en marcha, el variador debe configurarse con los siguientes parámetros:

- Velocidad máxima del motor

- Frecuencia de funcionamiento (50/60 Hz)
- Tensión de salida
- Corriente de salida
- Factor de potencia del motor
- Macro de conexión
- Macro de aplicación

La configuración de parámetros se realizará de acuerdo al diagrama mostrado en el Anexo A6.

3.4.3 CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS CONTROLADORES PID

Deben configurarse con los siguientes parámetros:

- Tipo de termopar
- Histéresis
- Rango de temperaturas
- Salida a relé interno o SSR externo
- Frecuencia de funcionamiento (50/60Hz)
- Set point

Para introducir dichos parámetros al controlador se utiliza el Anexo B3. Después se recurre a la función Autotuning de cada controlador, este proceso es fundamental ya que con él se fijan los valores proporcional, integral y derivativo del algoritmo de control de temperatura, Anexo B4.

3.5 IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA TOTAL

Una vez ubicados todos los elementos que conforman la extrusora e implementadas las respectivas conexiones así como configuraciones de los dispositivos electrónicos, se tiene como resultado final la máquina mostrada en la Figura 66:



Figura 66. Máquina extrusora

Se procede a someterla a las respectivas pruebas para comprobar el correcto funcionamiento de la máquina extrusora.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO GENERAL

Para verificar el funcionamiento de la máquina se realiza una prueba sin materia prima y después con LDPE que consiste en un plástico blando con baja temperatura de fusión, la Tabla 18 muestra los resultados de las pruebas a las que la máquina fue sometida:

Tabla 18
Check list funcionamiento extrusora

PROCESO/DISPOSITIVO	FUNCIONAMIENTO		
	SI	NO	N/A
Switches (Apertura y cierre de contactos)	X		
Breakers			X
Encendido Siemens V20	X		
Variación velocidad a voluntad Siemens V20	X		
Encendido Luces piloto	X		
SSR (Apertura y cierre de contactos)	X		
Encendido PID	X		
Salida voltaje DC de PID	X		
Control de temperatura PID	X		
Giro motor	X		
Resistencias a 400°C	X		
Señal termopares	X		
Encendido Ventiladores	X		
Giro husillo	X		
Extrusión LDPE		X	
Fusión LDPE	X		
Atascamiento LDPE		X	
Cortocircuitos		X	
Consumo excesivo de corriente		X	

Los resultados obtenidos en la Tabla 18 muestran que todos los dispositivos funcionan adecuadamente y cumplen con su función asignada, mientras que no se pudo extruir LDPE debido a las altas temperaturas que alcanzó la máquina extrusora, sin embargo este material se pudo fundir con facilidad sin existir atascamientos, no se produjeron cortocircuitos ni saltos de la protección de sobre corriente (breaker).

4.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO CON DIVERSOS POLÍMEROS

Se detallan a continuación pruebas realizadas con ABS reciclado, ABS virgen y PLA.

4.2.1 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO CON ABS RECICLADO

Al no poder determinar la procedencia del ABS reciclado, no se puede definir su calidad como materia prima, muchas veces este polímero está mezclado con fibra de vidrio (utilizado en tableros automotrices) para aumentar su resistencia a altas temperaturas. Se extruyó ABS reciclado dando como resultado el material mostrado en la Figura 67:



Figura 67. ABS reciclado extruido

Al extruir ABS reciclado se obtuvo un filamento no homogéneo lleno de grumos, el proceso de extrusión se realizó con dificultad ya que partes del material no se fundieron y mezclaron, mientras que otras partes se quemaron, este material no se puede considerar filamento apto para su utilización en impresión 3D.

4.2.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO CON ABS VIRGEN

Se emplearon pellets de ABS marca Chimei, extruyendo este material a diversas temperaturas. Al extruir a 180°C se obtuvo un filamento que se enfría relativamente rápido por lo que toma una forma no definida mostrada en la Figura 68:



Figura 68. ABS extruido a 180°C

Mientras que con la temperatura que recomienda el fabricante en la hoja de datos del plástico ABS Chimei (Anexo H) que es 210°C se obtuvo un filamento homogéneo fácil de enrollar mostrado en la Figura 69:



Figura 69. ABS extruido a 210°C

Finalmente se realizó una prueba extruyendo material a 240°C, el resultado fue un filamento con humo en su interior en forma de burbujas y emitido a través del cabezal, tal y como se muestra en la Figura 70.



Figura 70. ABS extruido a 240°C

4.2.3 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO CON PLA

En Ecuador hasta la fecha no existe empresa dedicada a la comercialización de pellets de PLA y su importación resulta costosa por aranceles e impuestos. Para dar solución a este inconveniente, se ha adquirido un carrete de filamento PLA de 1.75mm de diámetro, además de que se han conseguido restos de impresiones 3D en este mismo material, Figura 71:



Figura 71. Plástico PLA

Se han cortado trozos de PLA a un tamaño similar al de los pellets de ABS, obteniendo materia prima para extruir, Figura 72:



Figura 72. Trozos de plástico PLA

Debido a que la máquina estuvo trabajando con ABS, éste se mezcló con PLA al momento de extruir por lo que al principio se produjo un material con un excesivo diámetro y forma no homogénea, Figura 73, además debido a la excesiva presión se detuvo el variador de frecuencia como forma de proteger al motor. Sin embargo se pudo poner en marcha el motor y variador continuando con el proceso.

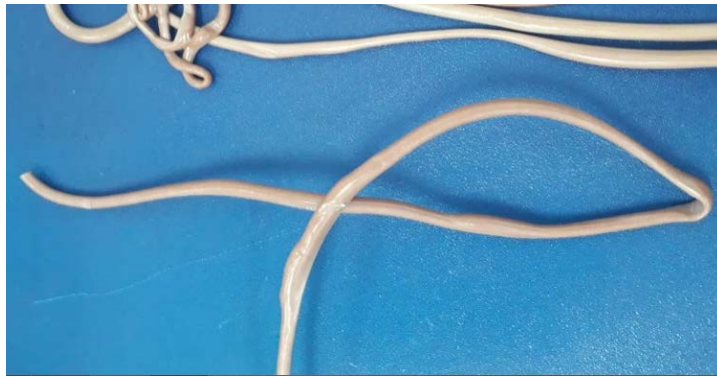


Figura 73. Filamento con mezcla de ABS y PLA

Una vez que todo el material ABS fue evacuado del barril, el PLA pudo ser extruido normalmente, Figura 74:



Figura 74. Extrusión material PLA

Sin embargo el filamento obtenido tuvo un diámetro menor al del ABS utilizando los mismos parámetros de extrusión, se recomienda modificar valores de temperatura y velocidad del variador para obtener filamento con tolerancias adecuadas, Figura 75.

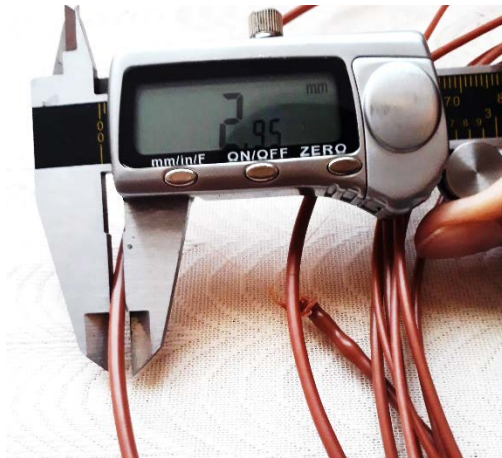


Figura 75. Filamento PLA

4.3 MASTERBATCH AL FILAMENTO ABS

Masterbatch es el proceso mediante el cual se le da color a ciertos termoplásticos al ser extruidos, se utilizó pellets de poliestireno azul mostrados en la Figura 76:



Figura 76. PS azul para Masterbatch

“Para dar color al ABS se debe mezclar del 0,5% al 3% de su contenido en pellets de poliestireno pigmentados” (PF Group, 2017).

Se mezclaron pellets de ABS con el 1% de su volumen total en pellets de PS azul (es decir por cada 100 gr debe haber 1 gr de PS) dando como resultado un filamento de color homogéneo mostrado en la Figura 77:



Figura 77. Resultado del Masterbatch

4.4 PRUEBAS PARA EL DIÁMETRO DE FILAMENTOS EXTRUIDOS

El diámetro de filamento más utilizado en Impresión 3D es 1.75mm, el polímero extruido debe tener baja tolerancia, de tal forma que sea adecuado para su utilización en cualquier impresora 3D. La Tabla 19 muestra las mediciones obtenidas del filamento ABS extruido comparado con otras marcas comerciales (Sunlu, Stratasys, HIPS), se han tomado 5 mediciones con sus correspondientes tolerancias y al final se ha obtenido un promedio.

Tabla 19
Comparación diámetros de filamento 1.75mm

	Sunlu		Stratasys		HIPS		ABS Proyecto	
	Dim.	Tol.	Dim.	Tol.	Dim.	Tol.	Dim.	Tol.
Medición 1	1.77	+0.02	1.75	0	1.76	+0.01	1.8	+0.05
Medición 2	1.78	+0.03	1.75	0	1.75	0	1.95	+0.2
Medición 3	1.77	+0.02	1.75	0	1.76	+0.01	2	+0.25
Medición 4	1.77	+0.02	1.75	0	1.76	+0.01	1.8	+0.5
Medición 5	1.74	-0.01	1.75	0	1.76	+0.01	1.9	+0.15
Promedio	1.766	±0.02	1.75	0	1.758	+0.0016	1.89	+0.23

Al análisis muestra que el filamento Stratasys es el de mejor calidad, además de ser el más costoso dentro de las marcas comparadas, tiene una medida igual en cada sección de filamento. El filamento Sunlu al realizar las mediciones mostraba un geometría ovalada mas no circular de filamento. Mientras que el poliestireno de alto impacto (HIPS) tiene buena tolerancia y dimensiones relativamente homogéneas. Finalmente el filamento ABS producido en este proyecto muestra diámetros que varían bastante de tramo a tramo con una tolerancia que no puede permitirse en Impresión 3D.

4.5 ENSAYO DE TRACCIÓN DE PLÁSTICOS

Para efectuar este ensayo se han tomado probetas de 100mm de longitud y 1.75mm de diámetro, siguiendo las indicaciones y parámetros de las normas mencionadas en el Capítulo I. En esta prueba se ha comparado el filamento ABS producido en este proyecto frente a marcas como Sunlu, Stratasys y HIPS. Se han efectuado dos pruebas a cada filamento, los resultados de las dos pruebas se muestran en la Tabla 20 y Tabla 21

respectivamente, los parámetros a comparar son la longitud final del filamento y el porcentaje de elongación:

Tabla 20
Resultado N°1-Ensayo de Tracción

Filamento (marca)	Long. inicial	Long. Final	%Elongación
Sunlu	100mm	104.9mm	4.9%
Stratasys	100mm	184.9mm	84.9%
HIPS	100mm	164.8mm	64.8%
ABS Proyecto	100mm	139.3mm	39.3%

Tabla 21
Resultado N°2-Ensayo de Tracción

Filamento (marca)	Long. inicial	Long. Final	%Elongación
Sunlu	100mm	109.4mm	9.4%
Stratasys	100mm	172.8mm	72.8%
HIPS	100mm	167.7mm	67.7%
ABS Proyecto	100mm	136.6mm	36.6%

Los resultados muestran que el filamento Stratasys es capaz de soportar una elongación máxima de 84% de su longitud inicial. Seguido de HIPS con elongación máxima de 87%. El filamento de este proyecto es capaz de soportar hasta 39% de elongación. El filamento que más rápido llegó a la rotura y por ende con el menos porcentaje de elongación es el filamento Sunlu con 9.4%.

La Figura 78 muestra las gráficas Fuerza vs Desplazamiento de los cuatro filamentos sometidos al Ensayo N°1 la cual muestra que el filamento Stratasys es el que más

elongación tiene y soportando una fuerza máxima de 75 N, el filamento HIPS soporta hasta 80 N, el filamento del proyecto es el que más fuerza soporta (160N) con una elongación intermedia, el filamento Sunlu es que tiene los resultados más bajos con una fuerza máxima de 35 N y escasa elongación.

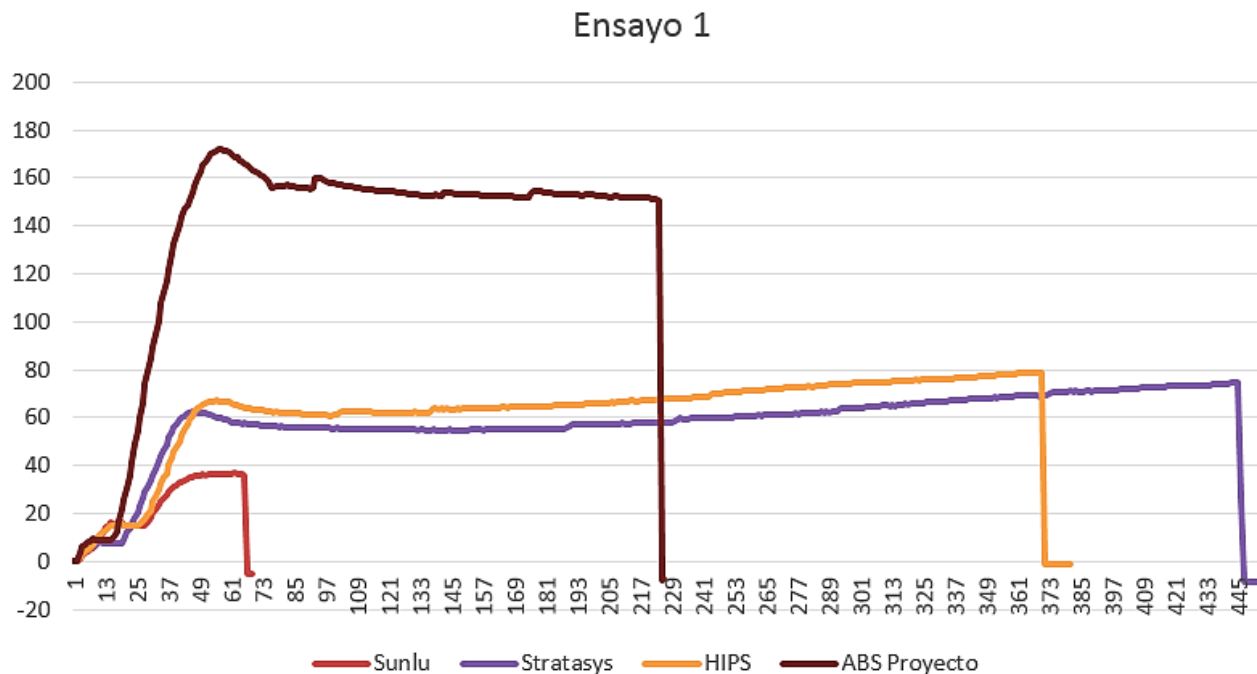


Figura 78. Gráfica Fuerza vs Desplazamiento- Ensayo1

La Figura 79 correspondiente al Ensayo N°2 muestra resultados similares al Ensayo N°1, el filamento Stratasys es el que más elongación tiene y soportando una fuerza máxima de 80 N, el filamento HIPS soporta hasta 75 N, el filamento del proyecto es el que más fuerza soporta (160N), el filamento Sunlu ha sido sometido a una fuerza máxima de 35 N y escasa elongación.

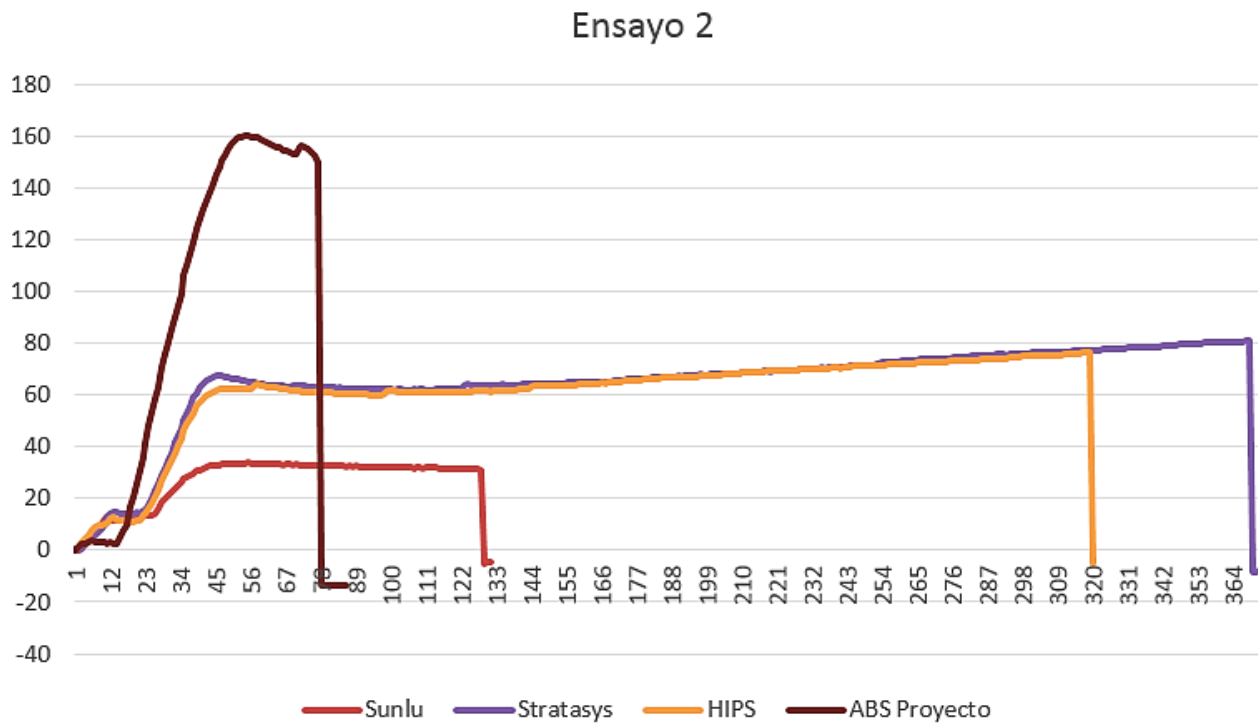


Figura 79. Gráfica Fuerza vs Desplazamiento- Ensayo2

4.6 VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS

La hipótesis está definida como:

“Mediante el diseño y construcción de una máquina extrusora, se producirá filamento de 1.75 mm y 3mm de diámetro para impresoras 3D a partir de polímero reciclado.”

Para su validación se utilizará la prueba de Causalidad de Granger. Donde se requiere la variable dependiente y la variable independiente:

- V. Dependiente: Polímero reciclado.

- V. Independiente: Máquina extrusora de filamentos de 1.75 mm y 3mm de diámetro para impresoras 3D.

“La prueba de Causalidad de Granger consiste en deducir si los resultados de una variable sirven para predecir a otra variable, si tiene carácter unidireccional o bidireccional, Para ello se tiene que comparar y deducir si el comportamiento actual y pasado de una variable A predice la conducta de variable B. Si ocurre el hecho, se dice que “el resultado A” causa en el sentido de Granger “el resultado B”; el comportamiento es unidireccional. Si sucede lo explicado e igualmente “el resultado B” predice “el resultado A”, el comportamiento es bidireccional, entonces “el resultado A” causa “el resultado B”, y “el resultado B” causa “el resultado A” (Novy, 2012)

Según (González, 2010) este método de validación de hipótesis consiste en comparar mediante cuestionamientos la variable dependiente (variable A) con la variable independiente (variable B) y verificar si la hipótesis se cumple en su totalidad (comportamiento bidireccional) o parcialmente (comportamiento unidireccional).

La Tabla 22 muestra la conducta entre la variable A hacia la variable B, considerando como variable A al Polímero reciclado y variable B a la Máquina extrusora de filamentos de 1.75 mm y 3mm de diámetro para impresoras 3D. Se ha establecido la conducta como “Afecta/Afectó el funcionamiento de” y se comparó en tiempo actual y pasado tal y como se define este método.

Tabla 22*Cuestionamientos Variable A vs. Variable B*

TIEMPO	CONDUCTA V.A vs V.B	RESULTADO	RAZÓN
ACTUAL	¿Polímero reciclado afecta el funcionamiento de Máquina extrusora?	Afirmativo	La extrusora trabaja en óptimas condiciones con ABS virgen
PASADO	¿Polímero reciclado afectó el funcionamiento de Máquina extrusora?	Afirmativo	ABS reciclado aumenta la presión dentro de la extrusora.

La Tabla 23 muestra los cuestionamientos entre la variable B con la variable A, tomando las mismas consideraciones antes mencionadas, excepto la conducta que se define como “Puede/Pudo extruir” y se comparó en tiempo actual y pasado.

Tabla 23*Cuestionamientos Variable B vs. Variable A*

TIEMPO	CONDUCTA V.B VS V.A	RESULTADO	RAZÓN
ACTUAL	¿La máquina extrusora puede extruir polímero reciclado?	Negativo	No se han hecho modificaciones en la máquina que permitan extruir polímero reciclado
PASADO	¿La máquina extrusora pudo extruir polímero reciclado?	Negativo	ABS reciclado tiene alto punto de fusión.

Contrastando los resultados de la Tabla 22 se puede observar que la conducta de la variable A hacia la variable B tanto en pasado como en la actualidad son afirmativos. Mientras que en los resultados de la Tabla 23 ambas conductas fueron negativas. Por lo tanto el comportamiento es unidireccional y la hipótesis si se cumple pero de forma

parcial. Es decir, la extrusora puede procesar polímero siempre y cuando éste no sea reciclado.

4.7 ANÁLISIS DE COSTOS

La Tabla 24 muestra los costos de fabricación y adquisición de los diferentes materiales empleados en el desarrollo del presente proyecto:

Tabla 24
Costos de elementos y dispositivos

Elemento	Cantidad	P. Unitario	P. Total
Barril	1	100	100
Estructura	1	180	180
Motorreductor 40:1	1	100	100
Controlador PID	3	90	270
Variador de frecuencia	1	220	220
Motor AC	1	110	110
Plástico ABS (25 Kg)	1	125	125
Husillo	1	150	150
Tolva	1	50	50
Resistencia calefactora	5	25	125
Breakers	2	10	20
SSR	2	20	40
Ventiladores	2	25	50
Material Eléctrico	1	100	100
Material Mecánico	1	500	500
TOTAL			2140

Con un costo total de USD 2140 a comparación de extrusoras comerciales detalladas en el Capítulo I con costos a partir de USD 2000 hasta un máximo de USD 2400, con

máximo 1 controlador PID frente a 3 controladores del presente proyecto (mejor control de temperatura) y con tolerancias similares a las del proyecto, además considerando el costo de importación que constituye una máquina de estas características se concluye que la máquina tiene un costo relativamente módico que facilita su adquisición.

4.7 ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO

Se establece una directriz para calcular el costo frente al beneficio dentro del presente proyecto. Según (Blank & Tarquin, 2006) determinan a BC como el valor costo beneficio:

- Si $BC \geq 1.0$ se determina que el proyecto si es económicamente aceptable.
- Si $BC < 1.0$ se determina que el proyecto no es económicamente aceptable.
- Si $BC = 1.0$ el proyecto está muy cerca de ser económicamente aceptable

“Un kilogramo de materia prima ABS cuesta alrededor de 3,5 a 4 euros, más el proceso de masterbatch cercano a 1,2 a 3,5 euros, el proceso de extruir un kilogramo de filamento llega a costar entre 15 a 20 euros con una extrusora compacta” (Mich, 2014)

La Tabla 25 muestra un análisis cuantitativo con los beneficios de producir filamento en la extrusora del proyecto (considerando implementar a futuro un sistema de control de diámetro) frente a la adquisición una vez al mes en el período de un año de filamento marca Stratasys (USD 300) y filamento de precio intermedio en el mercado ecuatoriano (USD 50), así como los costos de utilización de la extrusora (mantenimiento, consumo energético aproximado, etc.). Se han tomado los 20 euros mencionados como costo

referencial del kilogramo de filamento ABS producido en este proyecto, que transformados a la moneda utilizada en la actualidad dan un valor de USD 25.

Tabla 25
Análisis cuantitativo

PARÁMETROS	EXTRUSORA	FILAMENTO STRATASYS	FILAMENTO CALIDAD MEDIA
Adquisición/producción 1Kg filamento mensual por 1 año	300	3600	600
Consumo energético	100	-	-
Desarrollo extrusora	2140	-	-
Mantenimiento	50	-	-
Total USD	2590	3600	600

Como resultado se tienen aspectos positivos con la utilización a futuro de la máquina extrusora frente a comprar filamento de marca, el objetivo es hacer más accesible la tecnología de Impresión 3D y con costos bajos, para establecer el valor de beneficio costo (BC) se toma de la Tabla 25 como valor actual neto (VAN) al costo total durante un año de adquirir filamento Stratasys y valor actual de la inversión (VAP) al costo total de desarrollo de la extrusora, mantenimiento, producción de filamento y consumo energético, el resultado se muestra en la Ec. 71 definida por (Blank & Tarquin, 2006).

$$BC = \frac{VAN}{VAP} \quad \text{Ec. 71}$$

$$BC = \frac{3600}{2590}$$

$$BC = 1.4$$

El valor calculado muestra que el proyecto si es económicamente aceptable, existe un beneficio positivo al construir e implementar la extrusora de filamentos frente a adquirir filamento de un costo elevado.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES

- Se diseñó e implementó una Máquina Extrusora de Filamentos de 1.75 mm y 3 mm para Impresoras 3D, con velocidad de extrusión de 10cm/min capaz de trabajar con ABS virgen y ser empleado en ciertas impresoras 3D que permitan mayores tolerancias de filamento.
- Al realizar la extrusión se ha obtenido un filamento de mayores tolerancias comparado con filamentos de mayor precio y calidad, para obtener tolerancias dentro del rango de filamentos comerciales y normados es necesario un sistema de control para el diámetro de filamento.
- La máquina fue capaz de extruir ABS reciclado, el mismo que no garantiza la calidad necesaria para Impresión 3D debido a que contiene residuos no plásticos y en la mayoría de veces está mezclado con fibra de vidrio.
- Se pudo realizar Masterbatch al filamento de ABS extruído obteniendo tonalidades en diversos colores, con un mezclado de material uniforme sin presentar atascamientos en el cabezal, mezclando del 1 al 3% de resina pigmentada al volumen total de materia prima.
- Se verificó el funcionamiento de la máquina extrusora con PLA utilizando trozos de impresiones y filamento cortado, dando como resultado un material de diámetro menor al esperado, se debe principalmente a que la temperatura fijada extrusora fue demasiado alta.

RECOMENDACIONES

- Al momento de la extrusión, hay que verificar que el material a ser procesado (pellets), esté libre de cualquier residuo ajeno al termoplástico, de lo contrario se corre el riesgo de que el filamento incorpore estos elementos que pueden obstruir el cabezal.
- Antes de realizar la extrusión se debe esperar un lapso de 15 minutos para que el barril se caliente de manera uniforme, de lo contrario se corre el riesgo de que se tape el barril debido a la diferencia de temperaturas.
- Para evitar contacto con zonas calientes se recomienda el uso de un pirómetro infrarrojo y equipo de protección personal (guantes resistentes al calor, gafas).
- Al intercambiar cabezales, realizar dicha acción con el sistema a 200°C y una vez desconectado el sistema de la red eléctrica utilizando EPP.
- No poner en marcha el variador de frecuencia mientras el sistema no haya alcanzado la temperatura adecuada de extrusión, de lo contrario se produciría daños serios a este dispositivo.
- Jamás apagar o desconectar de la red eléctrica el variador de frecuencia mientras está en marcha, a menos que sea estrictamente necesario, este dispositivo es sensible y esta acción puede causar daño irreparable.
- Para proyectos complementarios al desarrollo de la extrusora, se recomienda el diseño e implementación de un sistema de control para el diámetro de filamento extruido, con la finalidad de garantizar su utilización en impresoras 3D.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Beltrán, M., & Marcilla, A. (2012). *Tecnología de Polímeros*. Alicante: Universidad de Alicante.

Cifuentes, R. (2011). *Diseño de una Máquina Extrusora para la empresa Plastik de Occidente*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.

Cobos, C. (2011). *Diseño de un sistema de extrusión-peletizado para el procesamiento de los residuos plásticos para la Empresa Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC)*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana-Sede Cuenca.

Coronel, F. (Septiembre de 2014). Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor. Sevilla, España.

Enríquez, G. (2000). *El libro práctico de los generadores, transformadores y motores eléctricos*. México, D.F.: Limusa.

Gieck, K., & Gieck, R. (2003). *Manual de Fórmulas Técnicas*. México, D.F.: Alfaomega.

Giles, H., Mount, E., & Wagner, J. (2005). *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*. Norwich: William Andrew, Inc.

Gómez, J., & Gutiérrez, J. (2007). *Diseño de una Extrusora para plásticos*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

Gualoto, F. (2015). *Diseño y construcción de una trituradora y extrusora para la producción de hilo plástico empleado en impresoras 3D*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.

Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta Edición*. México, D.F.: Pearson Educación.

McCormac, J., & Csernak, S. (2013). *Diseño de Estructuras de Acero*. México, D.F.: Alfaomega.

Mott, R. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas*. México, D.F.: Pearson.

Mott, R. (2009). *Resistencia de Materiales*. México, D.F.: Prentice Hall.

Poudel, B. (2015). *How to make Portable Homemade Filament Extruder*. Helsinki: Arcada.

Rauwendaal, C. (2001). *Polymer Extrusion*. Munich: Hanser.

Savgorodny, V. K. (1973). *Transformación De Plásticos*. Barcelona: Gustavo Gili.

- Alasdair, A. (15 de Abril de 2013). *Make*. Recuperado el 23 de Mayo de 2016, de <http://makezine.com/2013/04/15/arduino-uno-vs-beaglebone-vs-raspberry-pi/>
- Aledo, C. (25 de Abril de 2013). *Print 3D World*. Recuperado el 15 de Abril de 2016, de <http://www.print3dworld.es/2013/04/filastruder-otra-extrusora-de-filamento.html>
- Beltrán, M., & Marcilla, A. (2012). *Tecnología de Polímeros*. Alicante: Universidad de Alicante.
- Blank, L., & Tarquin, A. (2006). *Ingeniería Económica*. México, D.F.: McGrawHill.
- Castellanos, D. (5 de Julio de 2013). *Universidad de Antioquia*. Recuperado el 4 de Junio de 2017, de <http://ingenieria.udea.edu.co/public-dcastellanos/Instrumentacion/>
- Cifuentes, R. (2011). *Diseño de una Máquina Extrusora para la empresa Plastik de Occidente*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Clifford, E. (20 de 12 de 2015). *FilaFab*. Recuperado el 28 de Enero de 2018, de <http://d3dinnovations.com/filafab/product/filafab-pro-350/>
- Cobos, C. (2011). *Diseño de un sistema de extrusión-peletizado para el procesamiento de los residuos plásticos para la Empresa Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC)*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana-Sede Cuenca.
- Coronel, F. (Septiembre de 2014). Colección de Tablas, Gráficas y Ecuaciones de Transmisión de Calor. Sevilla, España.
- Enríquez, G. (2000). *El libro práctico de los generadores, transformadores y motores eléctricos*. México, D.F.: Limusa.

- Estrada, D. (3 de Mayo de 2012). *Blogger*. Recuperado el 5 de Febrero de 2018, de <http://equipoequipo2.blogspot.com/2012/05/polimeros-dennise-estrada.html>
- Fernández, M. (8 de Enero de 2014). *WorldPress*. Recuperado el 14 de Diciembre de 2017, de <https://mafercan94.wordpress.com/materiales-sinteticos/>
- Ferrándiz, S. (22 de Octubre de 2006). *El Blog del Plástico*. Recuperado el 12 de Mayo de 2018, de <http://elblogdelplastico.blogs.upv.es/2011/10/09/tecnologias-de-procesado-de-polimeros-2/>
- Forster, S. (29 de Abril de 2016). *Noztek*. Recuperado el 9 de Julio de 2018, de <http://www.noztek.com/product/noztek-touch/>
- Gieck, K., & Gieck, R. (2003). *Manual de Fórmulas Técnicas*. México, D.F.: Alfaomega.
- Giles, H., Mount, E., & Wagner, J. (2005). *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*. Norwich: William Andrew, Inc.
- Gómez, J., & Gutiérrez, J. (2007). *Diseño de una Extrusora para plásticos*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Gordillo, F. (28 de Noviembre de 2014). *Teknlife*. Recuperado el 15 de Mayo de 2017, de <http://www.teknlife.com/reportaje/asi-son-los-distintos-y-nuevos-filamentos-termoplasticos-para-impresoras-3d/>
- Gualoto, F. (2015). *Diseño y construcción de una trituradora y extrusora para la producción de hilo plástico empleado en impresoras 3D*. Quito: Universidad Politécnica Salesiana.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología. Quinta Edición*. México, D.F.: Pearson Educación.

Los adhesivos. (9 de Mayo de 2011). Recuperado el 14 de Julio de 2018, de <http://www.losadhesivos.com/termoplastico.html>

Lyman, H. (16 de Noviembre de 2012). *Thingiverse*. Recuperado el 12 de Junio de 2016, de <http://www.thingiverse.com/thing:34653>

MatWeb. (11 de Mayo de 2015). Recuperado el 11 de Febrero de 2017, de <http://www.matweb.com/reference/abspolymer.aspx>

McCormac, J., & Csernak, S. (2013). *Diseño de Estructuras de Acero*. México, D.F.: Alfaomega.

McNaney, T. (21 de 3 de 2015). *Filabot*. Recuperado el 3 de Agosto de 2017, de <https://www.filabot.com/collections/filabot-core/filabot-ex2>

Medina, A. (12 de Mayo de 2014). *BlogSpot*. Recuperado el 27 de Abril de 2018, de <http://printedparts.blogspot.com/2014/05/plastico-pla-acido-polilactico.html>

Mott, R. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas*. México, D.F.: Pearson.

Mott, R. (2009). *Resistencia de Materiales*. México, D.F.: Prentice Hall.

Ojeda, M. (15 de Marzo de 2011). *Tecnología de los Plásticos*. Recuperado el 18 de Marzo de 2018, de <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html>

Parra, S. (7 de Julio de 2015). *Xataka Ciencia*. Recuperado el 23 de Junio de 2018, de <https://www.xatakaciencia.com/eventos/asistimos-al-3d-hubs-colorfabb-workshop-barcelona>

Poudel, B. (2015). *How to make Portable Homemade Filament Extruder*. Helsinki: Arcada.

Rauwendaal, C. (2001). *Polymer Extrusion*. Munich: Hanser.

Rosa, A. (11 de Abril de 2011). *SlideShare*. Recuperado el 16 de Abril de 2018, de <http://es.slideshare.net/betorossa/proceso-de-extrusion-de-plasticos>

Sanabria, H. (16 de Noviembre de 2015). *BlogSpot*. Recuperado el 17 de Noviembre de 2017, de http://motorshasa.blogspot.com/2015_11_01_archive.html

Savgorodny, V. K. (1973). *Transformación De Plásticos*. Barcelona: Gustavo Gili.

Womer, T. (7 de Abril de 2005). *Tecnología del Plástico*. Recuperado el 22 de Junio de 2017, de <http://www.plastico.com/temas/Lo-que-usted-debe-saber-sobre-diseno-de-tornillos+3038729>

ANEXOS



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por el señor:

CRISTIAN FABIÁN ORTIZ ABATA

En la ciudad de Latacunga, a los **31 días del mes de Agosto del 2018.**

Ing. Fausto Acuña

DIRECTOR DEL PROYECTO

Aprobado por:

Ing. Vicente Hallo

DIRECTOR DE CARRERA

Dr. Rodrigo Vaca

SECRETARIO ACADÉMICO

