



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA RECICLADORA Y EXTRUSORA DE PLÁSTICO PLA PARA EL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE QUITO DE LA EPN”

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

MORALES ILES ROSA XIMENA
rosa.morales@epn.edu.ec

DIRECTOR: López Izurieta Ericsson Daniel Ph.D.
ericsson.lopez@epn.edu.ec

CODIRECTOR: Ing. Sotomayor Gálvez Oscar Efraín M.Sc.
oscar.sotomayor@epn.edu.ec

COLABORADOR: Ing. Benalcázar Rojas David Eduardo
david.benalcazarr@epn.edu.ec

OCTUBRE 2018

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **ROSA XIMENA MORALES ILES**, bajo mi supervisión.

Ericsson López Ph.D.
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Oscar Sotomayor M.Sc.
CODIRECTOR DE PROYECTO

Ing. David Benalcázar
COLABORADOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **Rosa Ximena Morales Iles**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Rosa Ximena Morales Iles

DEDICATORIA

A Dios, forjador de mi destino, quien me acompaña y me levanta de mi continuo tropiezo.

A mi hermano Luis Humberto, porque sin él esto no sería posible, por su ayuda y apoyo incondicional en la parte moral y económica para poder ser una profesional de la patria.

A María Manuela y María Margarita por todo el tiempo compartido con nosotros, por todo el amor que me han brindado.

A mis padres José Morales y Rosa Iles, que han estado conmigo en el camino de la vida, que con su amor y trabajo me educaron y apoyaron en mi formación profesional.

A mis hermanos que han estado ahí, en las buenas, en las malas y aún en las peores: Nancy, Arturo, Pablo, Milton, Gustavo.

A mis enanos: Sebas, Ismael, Arely, por sus locuras, inocencia, y todas las risas.

A los amigos que han estado conmigo en el transcurso de la vida universitaria: Pame, Aracely, Robin, David, Chrismen, Henry, Luis, Noemí, Diego, Edi, José, Javi, Xavi, Edison (†), por su valiosa amistad, muchos momentos, risas y sobre todo las aventuras compartidas.

To Lara, Amanda, Leon, Cassi, Lucy, Baja, Nicky, Devin, Yorvi, John, Petr, and Ariana for every moment shared, thanks for teach me that "We will never be completely at home again, because part of our heart will always be elsewhere. That is the price we pay for the richness of loving and knowing people in more than one place".

AGRADECIMIENTO

Este trabajo no habría sido posible sin la ayuda y el apoyo de mucha gente.

A mi tutor PhD Ericsson López, Director del Observatorio Astronómico de la Escuela Politécnica Nacional, por toda la colaboración, paciencia y confianza brindada en la realización de este trabajo.

Al Ing. Oscar Sotomayor Msc. por la ayuda y confianza brindada mediante la elaboración de este trabajo.

Al Ing. David Benalcázar, por todo el apoyo incondicional, amistad, en fin gracias por todo.

Al Ph.D. Iván Chango e Ing. Pamela Molina, colaboradores del “Centro de Investigaciones Aplicadas a Polímeros” de la Escuela Politécnica Nacional, por las recomendaciones para la realización de las pruebas del trabajo presente.

A Luis Humberto, por haber sido mucho más que un hermano; un padre; un amigo y sin él, nada de esto hubiera sido posible.

A mis padres José y Rosa; por su amor y apoyo incondicional.

A mis hermanos: Pablo Andrés y Nancy Piedad, por su ejemplo de constancia, por ayudarme cuando lo he necesitado, por todo el apoyo incondicional y por siempre estar ahí para mí.

¡GRACIAS!

ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1 JUSTIFICACIÓN	3
1.2 ESTADO DEL ARTE.....	4
1.2.1 EXTRUSIÓN	4
1.2.1.1 Definición.....	4
1.2.1.2 Tipos de extrusión	5
1.2.1.2.1 Extrusión Directa	5
1.2.1.2.2 Extrusión Indirecta.....	5
1.2.1.2.3 Extrusión en Frío	6
1.2.1.2.4 Extrusión en Caliente	6
1.2.1.2.5 Proceso Continuo.....	6
1.2.1.2.6 Proceso Discreto	7
1.2.1.3 Extrusión en la industria	7
1.2.1.4 Partes principales de una extrusora	7
1.2.1.4.1 Sistema de alimentación o tolva.....	7
1.2.1.4.2 Husillo o tornillo	8
1.2.1.4.3 Camisa	10
1.2.1.4.4 Sistema de atemplado.....	10
1.2.1.4.5 Cabezal	10
1.2.2 PLA	11
1.2.2.1 Definición.....	11
1.2.2.2 Historia del PLA.....	11
1.2.2.3 Características y Propiedades.....	12
1.2.2.3.1 Resistencia a la humedad	13

1.2.2.3.2	Densidad	13
1.2.2.3.3	Resistencia a las radiaciones UV	13
1.2.2.3.4	Solubilidad	13
1.2.2.3.5	Inflamabilidad	13
1.2.2.3.6	Propiedades Térmicas.....	14
1.2.2.3.7	Estado vítreo	14
1.2.2.4	Aplicaciones	15
2.	METODOLOGÍA.....	16
2.1.	Determinación de las especificaciones de la máquina	18
2.2	Casa de la calidad.....	18
2.2.1	Voz del usuario	18
2.2.2	Voz del ingeniero	18
2.2.3	Conclusiones de la Casa de la Calidad	19
2.2.3.1	Filamento extruido de diámetro $\approx 1,75$ [mm]	19
2.2.3.2	Mecanismos de seguridad.....	19
2.2.3.3	Velocidad de Extrusión.....	19
2.2.3.4	Superficie.....	19
2.2.3.5	Sistema no ruidoso.....	19
2.2.3.6	Materiales resistentes al calor	19
2.2.3.7	Dimensiones de la máquina extrusora	20
2.3	Especificaciones técnicas	20
2.4	DEFINICIÓN Y DISEÑO CONCEPTUAL.....	20
2.4.1	Determinación de los módulos.....	21
2.4.2	SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS	22
2.4.2.1	Selección del tipo de extrusora directa o inversa	22
2.4.2.1.1	Extrusora Directa.....	22
2.4.2.1.2	Extrusora Inversa	22
2.4.2.1.3	Selección de alternativas para el tipo de extrusora.....	23
2.4.2.2	Selección del tipo de extrusora vertical u horizontal	26
2.4.2.2.1	Extrusora vertical.....	26
2.4.2.2.2	Extrusora Horizontal	26
2.4.2.2.3	Selección de alternativas para el tipo de extrusora.....	27
2.4.2.3	MÓDULO 1: Selección del tipo de sistema de potencia.....	30
2.4.2.3.1	Motor + reductor	30
2.4.2.3.2	Servomotor	30
2.4.2.3.3	Motorreductor	31
2.4.2.3.4	Selección de alternativas para el sistema de potencia.....	31

2.4.2.1	Selección del tipo de sistema de alimentación.....	34
2.4.2.1.1	Tolva Redonda	34
2.4.2.1.2	Tolva cuadrada.....	34
2.4.2.1.3	Selección de alternativas para el sistema de alimentación	35
2.4.2.2	MÓDULO 2: Resistencias	37
2.4.2.2.1	Resistencias flexibles o cintas calefactoras.	37
2.4.2.2.2	Resistencias minitubulares.....	38
2.4.2.2.3	Resistencias tipo abrazaderas	38
2.4.2.2.4	Selección de alternativas para las resistencias eléctricas de calentamiento	39
2.4.2.3	MÓDULO 3: Selección del tipo de sistema de enfriamiento	41
2.4.2.3.1	Ventilador	41
2.4.2.3.2	Agua	42
2.4.2.3.3	Selección de alternativas para el sistema de enfriamiento	43
2.4.2.4	MÓDULO 4: Selección del tipo de sistema de Bobinado	45
2.4.2.4.1	Motor paso a paso.....	45
2.4.2.4.2	Servomotor	45
2.4.2.4.3	Selección de alternativas para el sistema de bobinado	46
2.4.2.5	MÓDULOS QUE CONFORMAN LA MÁQUINA.....	49
2.4.3	Solución final de los módulos.....	50
2.5	CÁLCULOS	50
2.5.1	Cálculo de la capacidad de la máquina extrusora	50
2.5.2	HUSILLO.....	50
2.5.2.1	Cálculo de la Relación L/D	51
2.5.2.2	Parámetros del Husillo	51
2.5.2.3	Cálculo de fuerzas en el husillo.....	53
2.5.2.4	Cálculo del factor de seguridad	60
2.5.2.5	Cálculo de la carcasa del Husillo.....	60
2.5.3	TOLVA DE ALIMENTACIÓN	61
2.5.4	TRANSFERENCIA DE CALOR	63
2.5.4.1	Potencia de las resistencias eléctricas.....	63
2.5.4.2	Balance energético.....	63
2.5.4.2.1	Sistema 1: Carcasa	64
2.5.4.2.2	Sistema 2: Husillo.....	64
2.5.4.3	Sistema Global	65
2.5.4.4	Cálculo del coeficiente de Transferencia de calor (h)	67
2.5.4.1	Cálculo del coeficiente de Convección.....	67
2.5.4.2	Cálculo del coeficiente de Radiación.....	69

2.5.4.3	Pérdidas de calor.....	70
2.5.4.3.1	Pérdidas por conducción.....	70
2.5.4.3.2	Pérdidas por convección.....	70
2.5.4.3.3	Pérdidas por radiación.....	71
2.5.4.4	Incremento de la energía interna del polímero.....	71
2.5.4.5	Cálculo de la potencia requerida para bandas calefactoras.....	72
2.5.4.6	Aislamiento.....	73
2.5.5	ENFRIAMIENTO.....	76
2.5.6	BOQUILLA.....	81
2.5.7	TERMOCUPLAS.....	82
2.5.8	CONTROL DE TEMPERATURA.....	83
2.5.8.1	Tarjeta acondicionadora Max6675.....	83
2.5.8.2	Arduino Mega.....	83
2.5.8.3	LCD Shield Keypad.....	84
2.6	Fotografías del sistema de control terminado.....	84
3.	RESULTADOS.....	86
3.1.	Resultados.....	86
3.1.1.	Pruebas realizadas.....	86
3.1.2.	Puesta a prueba en impresión.....	89
3.1.3.	Manual de operación de la máquina extrusora.....	91
3.1.4.	Mantenimiento y limpieza de la máquina extrusora.....	94
3.1.5.	Limitaciones de la máquina.....	94
3.2.	Costos.....	94
3.2.1.	Costos de la parte extrusora de la máquina.....	95
3.2.1.1.	Costos de la mano de obra de la parte extrusora de la máquina.....	95
3.2.1.2.	Costos del material de la parte extrusora de la máquina.....	96
3.2.1.3.	Costos de los elementos normalizados de la parte extrusora de la máquina.....	97
3.2.1.4.	Costo total de la parte extrusora de la máquina.....	98
3.2.2.	Costos de la estructura de la máquina extrusora.....	98
3.2.2.1.	Costos de la mano de obra empleada en la construcción de la estructura base para la máquina extrusora.....	98
3.2.2.2.	Costos del material empleado en la construcción de la estructura base.....	99
3.2.2.3.	Costo total de la construcción de la estructura base.....	99
3.2.3.	Costos del sistema de control.....	100
3.2.3.1.	Costos de los elementos normalizados del sistema de control.....	100
3.2.3.2.	Costo total del sistema de control de la máquina extrusora.....	101
3.3.	Costo Total de la máquina extrusora de plástico PLA.....	101

4. CONCLUSIONES.....	102
Referencias Bibliográficas	104
Anexos.....	105
Anexo I. Casa de la Calidad	106
Anexo II. Diagrama funcional.....	107
Anexo III. Propiedades PLA.....	108
Anexo IV. Transferencia de Calor.....	109
Anexo V. Simulación de la carcasa del cilindro	110
Anexo VI. Sistema de Control de Temperatura	111
Anexo VII. Programación del control de temperatura en el Arduino Mega y programación del motor a pasos en el Arduino NANO.....	112
Anexo VIII. Fotografías del proceso de construcción	113
Anexo IX. Planos	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Impresora Makerbot	3
Figura 1.2. Modelos impresos.	3
Figura 1.3. Máquina extrusora.....	4
Figura 1.4. Extrusión directa.....	5
Figura 1.5. Extrusión inversa.....	6
Figura 1.6. Máquina extrusora.....	7
Figura 1.7. Tipos de tolvas	8
Figura 1.8. Tornillo de una extrusora.....	8
Figura 1.9. Zonas de una extrusora y evolución de la presión a lo largo de las mismas.	9
Figura 1.10. Disposición posible de los husillos en las extrusoras de doble husillo; giro contrario y giro en paralelo; diferentes grados de interpenetración de los tornillos.....	9
Figura 1.11. Sistema de atemplado.....	10
Figura 1.12. Cabezal	10
Figura 1.13. Obtención del PLA.....	11
Figura 1.14. Relación entre densidad y temperatura del polímero mostrando temperaturas de fusión (T_m) y de transición vítrea (T_g).....	14
Figura 1.15. Modelos impresos en PLA.....	15
Figura 1.16. Botella elaborada con PLA.....	15
Figura 1.17. Empaque de tomates	15
Figura 2.1. Diagrama de flujo para la metodología aplicada	16
Figura 2.2. División Modular: Nivel 0.....	21
Figura 2.3. División modular: Nivel 1	21
Figura 2.4. Extrusora directa	22
Figura 2.5. Extrusora Inversa	22
Figura 2.6. Extrusora vertical.....	26
Figura 2.7. Extrusora horizontal.....	26
Figura 2.8. Motor + Reductor.....	30
Figura 2.9. Servomotor	30
Figura 2.10. Motorreductor	31
Figura 2.11. Tolva redonda.....	34
Figura 2.12. Tolva cuadrada.....	34
Figura 2.13. Cinta calefactora.....	37
Figura 2.14. Resistencias tipo banda	38
Figura 2.15. Resistencias tipo abrazadera	39
Figura 2.16. Ventilador	42
Figura 2.17. Enfriamiento mediante agua.....	42
Figura 2.18. Motor paso a paso.....	45
Figura 2.19. Servomotor.....	45
Figura 2.20. Diseño final de la máquina extrusora.....	50
Figura 2.21. Sección de un cilindro con husillo	51
Figura 2.22. Husillo.....	53
Figura 2.23. Diagrama de fuerzas de un husillo	53
Figura 2.24. Carcasa del husillo	61
Figura 2.25. Volumen de la Tolva.....	62
Figura 2.26. Tolva diseñada	62
Figura 2.27. Abertura de la garganta del cilindro.....	63
Figura 2.28. Balance energético en la carcasa del husillo.....	64
Figura 2.29. Balance energético del husillo.....	64

Figura 2.30. Número de Nusselt.....	68
Figura 2.31. Variación de la temperatura en función del tiempo	73
Figura 2.32. Calculo de aislamiento térmico.....	74
Figura 2.33. Variación de la Temperatura en el tiempo.....	75
Figura 2.34. Diagrama del cordón extruido	76
Figura 2.35. Número de Nusselt.....	78
Figura 2.36. Diagrama del enfriamiento mediante ventiladores	79
Figura 2.37. Ecuaciones para el cálculo del número de Nusselt.....	80
Figura 2.38. Dado de forma tronco-cónico	81
Figura 2.39. Boquilla.....	82
Figura 2.40. Tipos de Termocuplas.	82
Figura 2.41. Termocupla tipo K	82
Figura 2.42. Módulo Max6675	83
Figura 2.43. Tarjeta Arduino Mega	84
Figura 2.44. LCD Shiel Keypad	84
Figura 2.45. Cableado interno del sistema de control.	84
Figura 2.46. Caja de elementos electrónicos.	85
Figura 2.47. Puesta a pruebas del sistema de control de temperatura.	85
Figura 3.1. Máquina Extrusora	86
Figura 3.2. Fuente de poder	91
Figura 3.3. Panel de temperatura	92
Figura 3.4. Servomotor	92
Figura 3.5. Alimentación del material.	92
Figura 3.6. Panel de control de temperatura.	92
Figura 3.7. Rodete con filamento.....	93
Figura 3.8. Control de velocidad del rodete.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Comparación entre el proceso de producción de fibras de poliláctico y poliéster	12
Tabla 1.2. Comparación de las propiedades de inflamabilidad entre PLA y PET	13
Tabla 1.3. Propiedades térmicas PLA	14
Tabla 2.1. Especificaciones técnicas de la máquina	20
Tabla 2.2. Ventajas y desventajas de la extrusora directa	22
Tabla 2.3. Ventajas y desventajas de la extrusión inversa	23
Tabla 2.4. Ponderación de criterios de tipos de extrusora directa o inversa.	23
Tabla 2.5. Evaluación de las soluciones con respecto a la longitud a extruir.....	24
Tabla 2.6. Evaluación de las soluciones con respecto a la forma del cordón a extruir.	24
Tabla 2.7. Evaluación de las soluciones con respecto a la presión.	24
Tabla 2.8. Evaluación de las soluciones con respecto al rozamiento del pistón.	25
Tabla 2.9. Evaluación de las soluciones con respecto a la sujeción del material extruido.	25
Tabla 2.10. Tabla de conclusiones del tipo de extrusora directa o indirecta.	25
Tabla 2.11. Ventajas y desventajas de la extrusora vertical.....	26
Tabla 2.12. Ventajas y desventajas de la extrusora horizontal	27
Tabla 2.13. Ponderación de criterios de tipos de extrusora vertical u horizontal.	27
Tabla 2.14. Evaluación de las soluciones con respecto al costo.....	28
Tabla 2.15. Evaluación de las soluciones con respecto al mantenimiento.....	28
Tabla 2.16. Evaluación de las soluciones con respecto a la movilidad de la máquina.	28
Tabla 2.17. Evaluación de las soluciones con respecto a la fácil accesibilidad a la máquina.	29
Tabla 2.18. Evaluación de las soluciones con respecto al espacio determinado.	29
Tabla 2.19. Tabla de conclusiones de extrusora horizontal o vertical.	29
Tabla 2.20. Ventajas y desventajas del acople motor + reductor	30
Tabla 2.21. Ventajas y desventajas del Servomotor	31
Tabla 2.22. Ventajas y desventajas del Motorreductor.....	31
Tabla 2.23. Ponderación de criterios del sistema de Potencia.....	32
Tabla 2.24. Evaluación de las soluciones con respecto al Costo	32
Tabla 2.25. Evaluación de las soluciones con respecto al Nivel de ruido.	32
Tabla 2.26. Evaluación de las soluciones con respecto al mantenimiento.....	33
Tabla 2.27. Evaluación de las soluciones con respecto a la Velocidad de funcionamiento.	33
Tabla 2.28. Tabla de conclusiones del sistema de Potencia.....	33
Tabla 2.29. Ventajas y desventajas de la tolva redonda.	34
Tabla 2.30. Ventajas y desventajas de la tolva cuadrada.	34
Tabla 2.31. Ponderación de criterios de tipos de tolva redonda o cuadrada.....	35
Tabla 2.32. Evaluación de las soluciones con respecto a la cantidad del producto.	36
Tabla 2.33. Evaluación de las soluciones con respecto a la facilidad de alimentación.	36
Tabla 2.34. Evaluación de las soluciones con respecto a que no se trabe el material.	36
Tabla 2.35. Evaluación de las soluciones con respecto a la facilidad de dosificación.	36
Tabla 2.36. Evaluación de las soluciones con respecto al derrame de materia prima.	37
Tabla 2.37. Conclusiones de las ponderaciones del Sistema de Alimentación.....	37
Tabla 2.38. Ventajas y desventajas de la cinta calefactora	38
Tabla 2.39. Ventajas y desventajas de las resistencias tipo banda	38
Tabla 2.40. Ventajas y desventajas de la resistencia tipo abrazadera.	39
Tabla 2.41. Ponderación de criterios de tipos de resistencias.	39
Tabla 2.42. Evaluación de las soluciones con respecto a la facilidad de montaje	40
Tabla 2.43. Evaluación de las soluciones con respecto a la flexibilidad del material... ..	40

Tabla 2.44. Evaluación de las soluciones con respecto al costo.....	40
Tabla 2.45. Evaluación de las soluciones con respecto al diámetro ajustable.....	41
Tabla 2.46. Evaluación de las soluciones con respecto a la temperatura.....	41
Tabla 2.47. Conclusiones de las ponderaciones de las resistencias eléctricas.	41
Tabla 2.48. Ventajas y Desventajas del Ventilador.	42
Tabla 2.49. Ventajas y Desventajas del enfriamiento mediante agua.....	42
Tabla 2.50. Criterios de Ponderación del sistema de enfriamiento	43
Tabla 2.51. Evaluación de las soluciones con respecto a la capacidad de enfriamiento	43
Tabla 2.52. Evaluación de las soluciones con respecto al espacio.....	44
Tabla 2.53. Evaluación de las soluciones con respecto al Costo.....	44
Tabla 2.54. Evaluación de las soluciones con respecto a la facilidad de montaje	44
Tabla 2.55. Conclusiones de las ponderaciones del Sistema de Enfriamiento	44
Tabla 2.56. Ventajas y Desventajas del Motor paso a paso.....	45
Tabla 2.57. Ventajas y Desventajas del Servomotor.....	46
Tabla 2.58. Criterios de Ponderación del sistema de bobinado.	46
Tabla 2.59. Evaluación de las soluciones con respecto al torque.....	47
Tabla 2.60. Evaluación de las soluciones con respecto al espacio.....	47
Tabla 2.61. Evaluación de las soluciones con respecto al bajo costo.....	47
Tabla 2.62. Evaluación de las soluciones con respecto a la facilidad de montaje.	48
Tabla 2.63. Evaluación de las soluciones con respecto al mantenimiento.....	48
Tabla 2.64. Conclusiones de las ponderaciones del Sistema de Bobinado.	48
Tabla 2.65. Módulos y alternativas que conforman la máquina	49
Tabla 2.66. Características principales del Husillo	53
Tabla 2.67. Resumen de datos obtenidos	72
Tabla 3.1. Resultados de pruebas realizadas en la máquina extrusora	86
Tabla 3.2. Fotografías de puesta de impresión del filamento	89
Tabla 3.3. Orden de apagado del prototipo.	93
Tabla 3.4. Costo de mano de obra empleado en la construcción de la parte extrusora de la máquina.	95
Tabla 3.5. Costo del material empleado en la construcción de la parte extrusora de la máquina.....	96
Tabla 3.6. Costo de los elementos normalizados empleados en la construcción de la parte extrusora de la máquina.	97
Tabla 3.7. Costo total de la parte extrusora de la máquina.	98
Tabla 3.8. Costos de la mano de obra empleada en la construcción de la estructura base.....	98
Tabla 3.9. Costos del material empleado en la construcción de la estructura base.....	99
Tabla 3.10. Costo total de la construcción de la estructura base.	99
Tabla 3.11. Costos de los elementos normalizados del sistema de control.	100
Tabla 3.12. Costo total del sistema de control de la máquina extrusora.	101
Tabla 3.13. Costo total de la máquina extrusora.....	101

RESUMEN

En el presente documento, se detalla el proceso de diseño y construcción de una máquina recicladora y extrusora de plástico PLA para el Observatorio Astronómico de Quito de la Escuela Politécnica Nacional. Inicia con la descripción de los diferentes tipos de extrusión existente, se investiga las propiedades físicas, así como térmicas del plástico PLA para el procesamiento en la extrusora. Además, se analizan los requerimientos de la Unidad de Ingeniería Mecánica del Observatorio Astronómico para luego plantear una serie de alternativas para elegir un modelo que sea de bajo costo de fabricación, de fácil operación, funcional y de buena calidad. La opción que más se ajusta es la de una extrusora horizontal con un servomotor, con calentadores eléctricos tipo abrazaderas. Se procede a realizar el diseño de las partes mecánicas y de la estructura, tomando en cuenta las fuerzas que intervienen. Se definen los planos de detalle y los planos de taller, se realiza la compra de elementos normalizados, así como también la fabricación de partes teniendo en cuenta el material más adecuado. En los anexos se presenta un análisis mediante Solidworks de la carcasa. Finalmente, se realiza el ensamblaje del sistema y puesta a prueba del equipo. Para la realización de las pruebas se toma en cuenta varios aspectos, tales como: degradación del material, temperaturas de fusión, velocidad del husillo, se realizó ensayos con PLA, ABS, PET, PVA, y PLA SOFT, las pruebas realizadas con PLA reciclado da como resultado un cordón extruido uniforme pero muy frágil, que se rompe al contacto. EL ABS debe ser reciclado en una extrusora totalmente cerrada por su alto grado de toxicidad. La mezcla con PET 90% y PLA 10% da un buen resultado en cuanto a flexibilidad pero el cordón extruido sale con grumos. Los resultados finales con PLA SOFT reciclado son los tomados en cuenta para la impresión.

Palabras clave:

Extrusora, Husillo, Resistencias eléctricas.

ABSTRACT

This document details the process of design and construction of a plastic recycling and extruder machine for the Astronomical Observatory of Quito of the National Polytechnic School. It begins with the description of the different types of extrusion, investigated the physical properties, as well as the thermal ones of the PLA plastic for the processing in the extruder, as well as the requirements of the Astronomical Observatory Mechanical Workshop and then proposes a series of alternatives to choose, it should be a low cost manufacturing model, easy to operate, functional and it should has high quality. The option that adapts most is that of a horizontal extruder with an electric motor reduced by pulleys, with clamp-type electric heaters, the design of the mechanical parts and the structure is made taking into consideration the forces involved. The construction drawing and shop drawing are provided. Normalized components were considered for construction. Attached is a finite element analysis of the spindle. Finally, the assembly of the system was carried out. For the realization of the tests several aspects are taken into account, such as: material degradation, melting temperatures, spindle speed, testing with PLA, ABS, PET, PVA, and PLA SOFT, the test with recycled PLA as resulting in a uniform but very fragile extruded cord, which breaks on contact. ABS must be recycled in a fully closed extruder due to its high degree of toxicity. The mixture with 90% PET and 10% PLA gives a good result in terms of flexibility but the extruded cord leaves with lumps. The final results with PLA SOFT are taking into consideration for printing.

Keywords:

Extruder, Spindle, Electrical Resistors.

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA RECICLADORA Y EXTRUSORA DE PLÁSTICO PLA PARA EL OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE QUITO DE LA EPN”

INTRODUCCIÓN

El Observatorio Astronómico de Quito es un centro de investigación, que desarrolla el conocimiento científico en las áreas relacionadas a las ciencias astronómicas. Una de sus tareas fundamentales es difundir los avances técnicos y científicos en la comunidad.

La difusión de la ciencia y la tecnología es uno de los derechos fundamentales que contempla la Constitución de la República del Ecuador, es por eso que instituciones como el Observatorio Astronómico de Quito de la Escuela Politécnica Nacional, tiene anexo como parte de sus labores la interacción con la comunidad, para lo cual el uso de la impresora 3D Makerbot de 5ta generación, a través de la cual, se generan, varios modelos de investigación, prototipos y repuestos que son de uso exclusivo de la institución.

La impresora 3D Makerbot de 5ta generación genera gran cantidad de desperdicios, así como también existen modelos descartados, obsoletos o simplemente mal impresos por varios factores; tales como fallas en la alimentación del material de aporte, mala calibración del equipo, entre otras, lo cual genera gastos innecesarios y modelos defectuosos.

Debido a este problema se plantea el diseño y construcción de una máquina recicladora y extrusora de la materia prima como es el plástico PLA, y de esta manera reducir en un alto porcentaje la eliminación de desperdicios y ayudar a conservar el Medio Ambiente.

Objetivo general

Diseñar y construir una máquina recicladora y extrusora de plástico PLA para el Observatorio Astronómico de Quito de la Escuela Politécnica Nacional.

Objetivos específicos

Diseñar la máquina recicladora y extrusora de plástico PLA, utilizando la metodología del diseño concurrente.

Construir la máquina recicladora y extrusora de PLA, basado en el diseño desarrollado.

Realizar el protocolo de pruebas, ajustes y optimización de la máquina.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 JUSTIFICACIÓN

Las impresoras 3D son capaces de construir físicamente los objetos proyectados por la computadora a través de cualquier programa CAD, usando los materiales seleccionados por el usuario.



Figura 1.1 Impresora Makerbot
(Fuente: <https://www.makerbot.com/replicator/>)

En la actualidad las impresoras 3D tienen algunas aplicaciones entre las cuales se destaca el campo educativo, la medicina, la gastronomía, la industria aeroespacial, etc. En este aspecto el Observatorio Astronómico de la ciudad de Quito, utiliza esta tecnología mediante la impresora Makerbot de 5ta generación para proveerse de modelos y/o prototipos para sus exposiciones, conferencias y mantenimientos de equipos de esta entidad; y de esta manera, el aprendizaje pasa la barrera de lo teórico a lo práctico, mejorando la relación con el visitante .

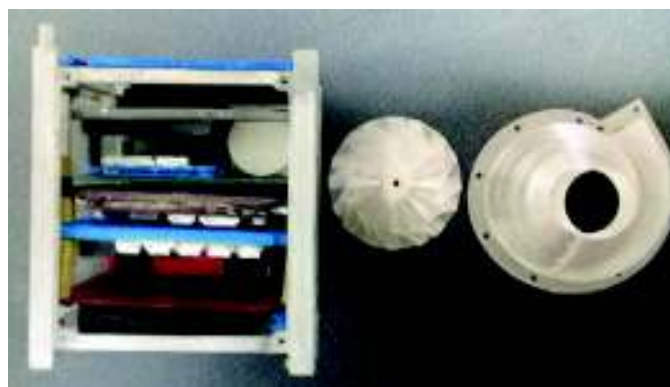


Figura 1.2. Modelos impresos.
(Fuente: Propia)

El mayor problema que se genera es la cantidad excesiva de desperdicios de material, estos desperdicios se han debido a que en este tipo de impresoras se imprime primero una cama base para el material y luego de esto el modelo a obtener; por mala calibración del equipo antes de empezar a operar, o simplemente por modelos que no cumplen con las especificaciones requeridas.

Actualmente en el Ecuador no existe una empresa que recolecte este tipo de desperdicios, o empresas que produzcan extrusoras, si bien es cierto las encontramos en el mercado internacional pero son de gran tamaño y de alto costo.¹



Figura 1.3. Máquina extrusora

(Fuente: <https://spanish.alibaba.com/product-detail-img/m-quinas-de-la-m-quina-extrusora-de-pl-stico-pvc-pl-stico-extrusi-n-m-quina-extrusora-60146849581.html>)

En base a esto se propone la construcción de una máquina recicladora extrusora de PLA, y de esta forma ayudar al planeta y también de forma indirecta a la difusión de la ciencia en el Museo del Observatorio con los modelos impresos a partir del material reciclado.

1.2 ESTADO DEL ARTE

1.2.1 EXTRUSIÓN

1.2.1.1 Definición

Se trata de un proceso de conformado por compresión en el que el material de la pieza es forzada a fluir a través de la abertura de una matriz con la forma de su sección transversal. (Torre F., Ginjaume A., 2005)

¹ Costo referencial aproximado de 100000 USD. (Fuente: <https://spanish.alibaba.com/product-detail-img/m-quinas-de-la-m-quina-extrusora-de-pl-stico-pvc-pl-stico-extrusi-n-m-quina-extrusora-60146849581.html>)

1.2.1.2 Tipos de extrusión

La extrusión se puede desarrollar de varias maneras:

- Según su configuración física.
 - Extrusión directa
 - Extrusión inversa (indirecta)
- Según la temperatura de trabajo.
 - En frío
 - En caliente.
- Según el trabajo
 - Continuo
 - Discreto

1.2.1.2.1 Extrusión Directa

También conocida como extrusión hacia delante se desarrolla tal como se representa en la figura.

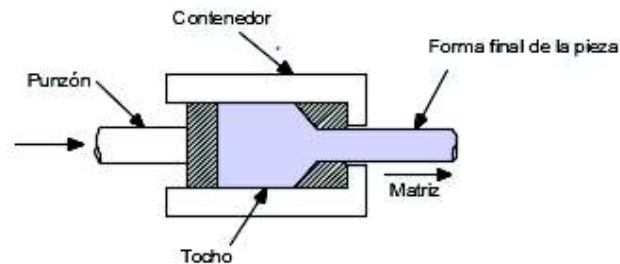


Figura 1.4. Extrusión directa
(Fuente: <https://es.slideshare.net/JoseGomez246/94095547-mecejecucion-yprocesosdemecanizadoconformadoymontaje>)

Un problema en la extrusión directa, es la gran fricción que existe entre la superficie de trabajo y la pared del recipiente al forzar el deslizamiento del tocho hacia la abertura de la matriz.

El extrusionado directo también permite la elaboración de secciones huecas, como por ejemplo tubos, y abiertas o semi-huecas.

1.2.1.2.2 Extrusión Indirecta

En este tipo de extrusión la matriz está montada sobre el punzón, en lugar de estar en el extremo opuesto del recipiente como en la extrusión directa. Al penetrar el punzón en

el material de la pieza, lo fuerza a pasar a través del claro en dirección opuesta a la del punzón.

Las limitaciones de la extrusión inversa vienen impuestas por la menor rigidez del punzón hueco y la dificultad de sostener la pieza extruida tal como sale de la matriz. También en esta extrusión se puede producir secciones huecas.

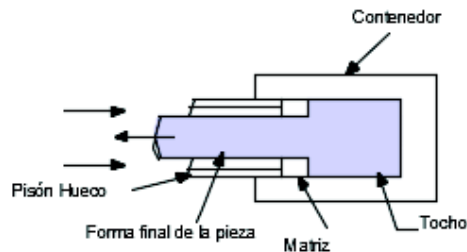


Figura 1.5. Extrusión inversa

(Fuente: <https://es.slideshare.net/JoseGomez246/94095547-mecejecucionyprocesosdemecanizadoconformadoymontaje>)

1.2.1.2.3 Extrusión en Frío

Este tipo de extrusión se lo realiza dependiendo del tipo de material y de la magnitud de la deformación a que se somete durante el proceso, La extrusión se realiza en frío o en caliente.

Los metales típicos de extrusión en caliente son: aluminio, cobre, magnesio, estaño y sus aleaciones. Estos mismos materiales también se extruyen algunas veces en frío.

El termino extrusión por impacto se usa para indicar una extrusión fría de alta velocidad.

1.2.1.2.4 Extrusión en Caliente

La extrusión en caliente comporta el calentamiento previo del tocho a una temperatura superior a la suya de cristalización, lo que reduce la resistencia y aumenta la ductilidad del metal, permitiendo mayores reducciones de tamaño y la obtención de formas más complejas.

Este procedimiento permite reducir la necesidad de fuerza en el punzón, mayor velocidad del mismo y mejora de las características de la fibra interna en el producto final.

1.2.1.2.5 Proceso Continuo

Un verdadero proceso continuo permite una producción estable durante un periodo indefinido de tiempo. Algunas operaciones de extrusión se acercan a este ideal,

produciendo secciones muy largas en un solo ciclo, pero finalmente quedan limitadas por el tamaño del tocho que se puede cargar en el contenedor. Así que realmente se puede contemplar como procesos semi-continuos.

Prácticamente todas las secciones largas se cortan posteriormente en tramos más pequeños.

1.2.1.2.6 Proceso Discreto

En un proceso discreto, la producción se limita a una sola pieza en cada ciclo. La extrusión por impulso es un claro ejemplo de este tipo de proceso.

1.2.1.3 Extrusión en la industria

Las instalaciones industriales de extrusión constan de las siguientes partes:

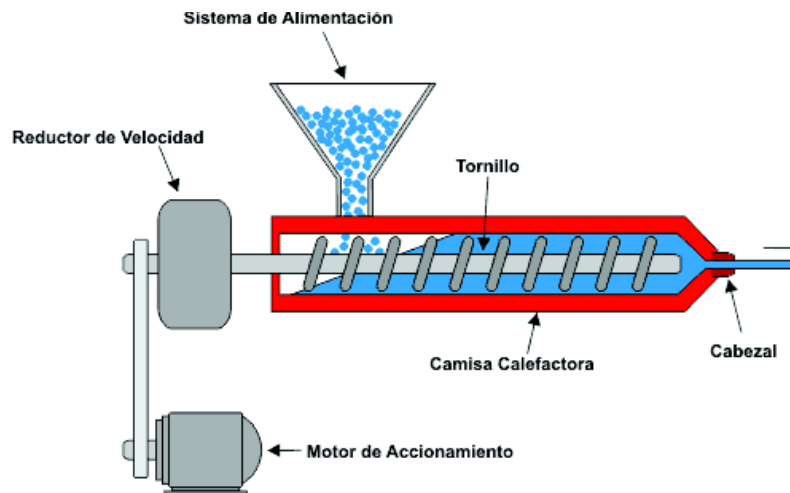


Figura 1.6. Máquina extrusora

(Fuente: <http://aliso.pntic.mec.es/cma10029/PLASTICOS/fabricacion.html>)

La sección de calibración y refrigeración trabaja en conjunto con el tren de estiraje; al refrigerar y controlar el enfriado de la pieza en conjunto al estirado adecuado, se logra la geometría final deseada y se aumenta la velocidad de producción.

1.2.1.4 Partes principales de una extrusora

1.2.1.4.1 Sistema de alimentación o tolva

La tolva es una caja con forma de cono invertido, la cual almacena temporalmente la materia prima que será procesada en la máquina. La tolva es la encargada de alimentar a la máquina de forma gradual el material a ser procesado.

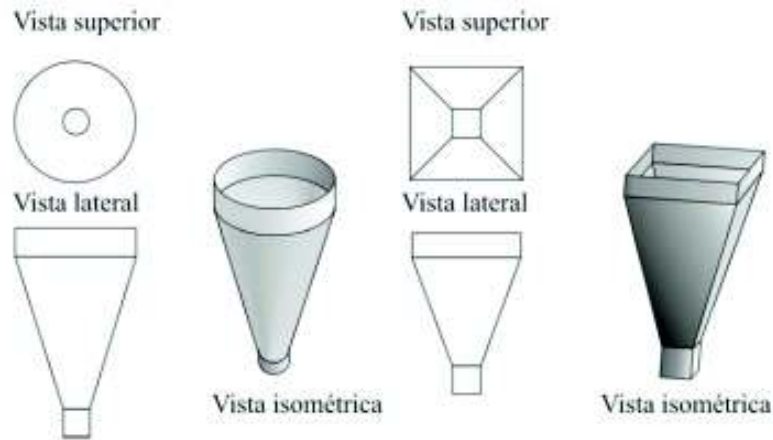


Figura 1.7. Tipos de tolvas
(Fuente: Beltran M., Marcilla A., 2012)

1.2.1.4.2 Husillo o tornillo

El husillo o tornillo se encuentra en la parte interna de la extrusora, cumple varios roles importantes dentro del proceso tales como; cargar, transportar, fundir y homogenizar el material a ser tratado.

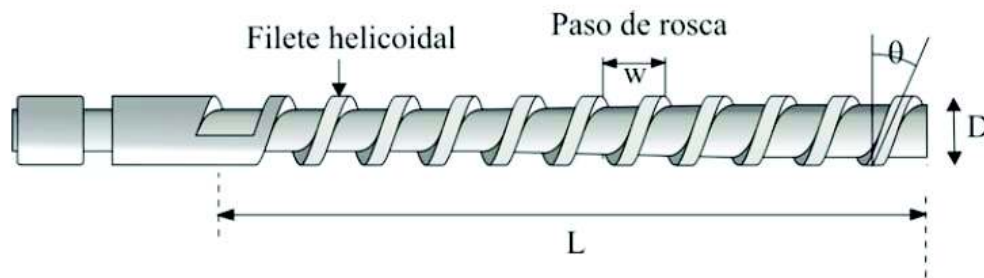


Figura 1.8. Tornillo de una extrusora
(Fuente: Beltran M., Marcilla A., 2012)

Las extrusoras en general dependiendo del tipo de husillo, se agrupan en las dos categorías que a continuación se describen:

- Extrusora Mono-Husillo

Este tipo de extrusora posee un cilindro liso en su interior. La presión para superar la resistencia opuesta por el molde se alcanza solo en la zona de dosificación.

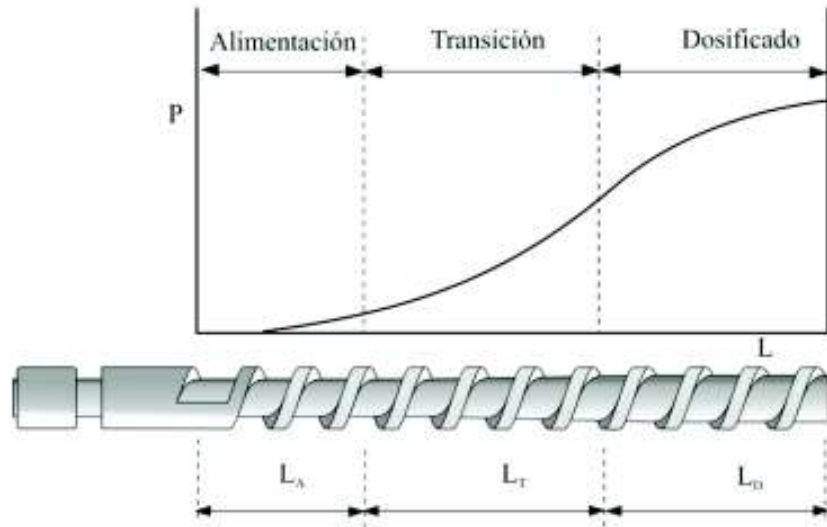


Figura 1.9. Zonas de una extrusora y evolución de la presión a lo largo de las mismas.
 (Fuente: Beltran M., Marcilla A., 2012)

- Extrusora de doble husillo

Este tipo de extrusoras tienen dos husillos en su interior en sentidos de rotación contrarios, son utilizadas generalmente para materiales pulverulentos.

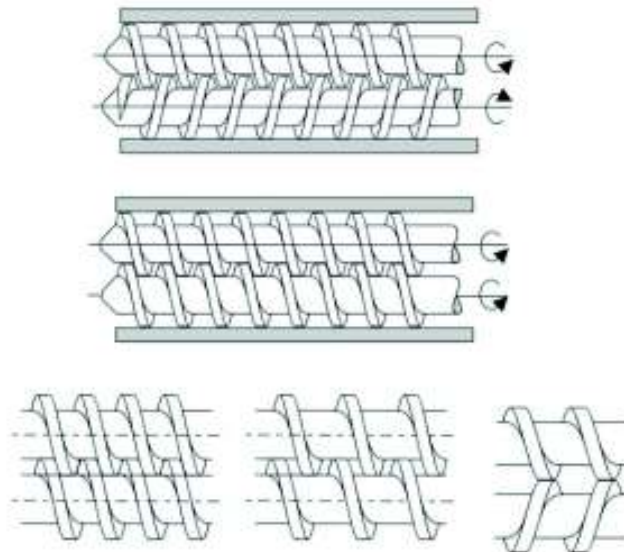


Figura 1.10. Disposición posible de los husillos en las extrusoras de doble husillo; giro contrario y giro en paralelo; diferentes grados de interpenetración de los tornillos.
 (Fuente: Beltran M., Marcilla A., 2012)

1.2.1.4.3 Camisa

Envuelve al husillo, conteniendo la materia prima, la camisa debe estar diseñada de tal manera que se adapte a la configuración del tornillo sinfín, cuando son extrusoras de doble husillo, el cilindro posee ranuras para favorecer el transporte del material.

1.2.1.4.4 Sistema de atemperado

Es el sistema para generar calor al husillo de tal manera que el material base pueda llegar a su temperatura de fusión sin ningún problema. Este tipo de sistemas puede ser generado en una o en varias etapas, para así controlar de mejor manera la temperatura del material.

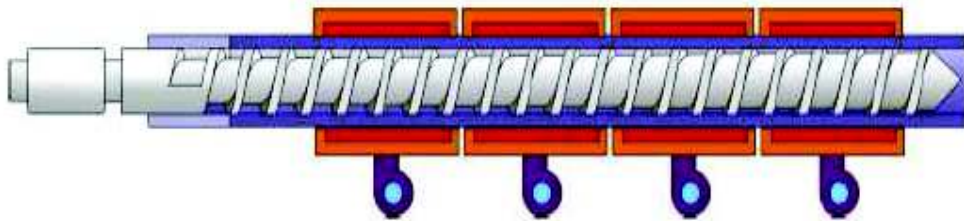


Figura 1.11. Sistema de atemperado
(Fuente: Beltran M., Marcilla A., 2012)

1.2.1.4.5 Cabezal

También llamado dado o matriz, es el encargado de dar la forma deseada a la extrusión. Generalmente el cabezal posee la forma y dimensión del producto final, pero se debe proveer la deformación que sufre el material con el cambio de temperatura.

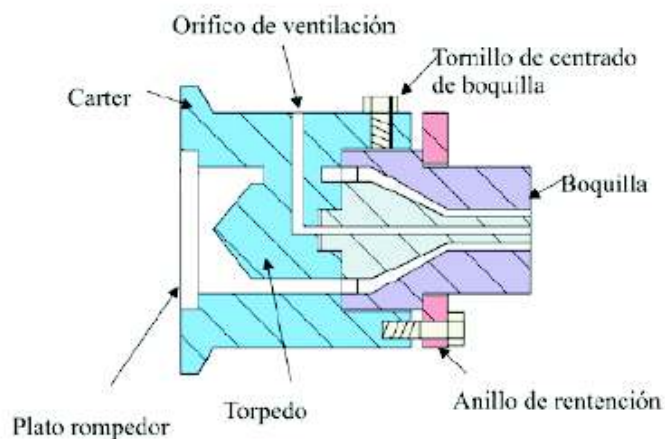


Figura 1.12. Cabezal
(Fuente: Beltran M., Marcilla A., 2012)

1.2.2 PLA

El crecimiento de las aplicaciones de los polímeros sintéticos es realmente importante y ha crecido de forma relevante en los últimos años.

El PLA es uno de los termoplásticos más empleados en el mundo de la impresión 3D, por su disponibilidad y por ser más económico en comparación del ABS, el cual es su mayor competidor.

Actualmente la producción mundial de PLA se encuentra en 180.000 toneladas y se provee un crecimiento a 800.000 toneladas en el año 2020 según un reciente estudio del Nova-Institut de Hürth (Alemania).

1.2.2.1 Definición

El ácido poliláctico o poliácido láctico, PLA, es un biopolímero que puede ser moldeado, termoformado como cualquier termoplástico. Es derivado del ácido láctico natural a partir del maíz o el trigo. Se asemeja a un poliestireno claro y proporciona una buena estética, es duro y quebradizo por lo cual se debe utilizar aditivos para ampliar el rango de uso.

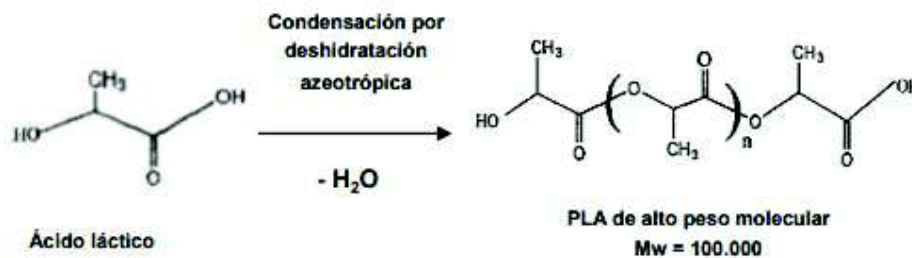


Figura 1.13. Obtención del PLA

(Fuente: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/08/poliacido-lactico-pla.html>)

1.2.2.2 Historia del PLA

El plástico PLA no es un material nuevo, en 1932 Wallace Carothers, científico investigador de Dupont, obtuvo un producto de poco peso molecular calentando ácido láctico al vacío. Después de realizar más estudios Dupont patentó el proceso de Carothers. (Mariano, 2017)

Otra empresa en ser de las primeras empresas en producir PLA es Cargill, esta empresa empezó con la producción en 1987. (Cargill, 2017)

El estudio de nova-Institut señala que en la actualidad, 25 empresas tienen plantas de producción de PLA en todo el mundo, con una capacidad total de 180 000 t/año, siendo NatureWorks, que opera en EEUU y Tailandia, la de mayor producción con una capacidad de 140 000 t/año, el resto de empresas tiene una capacidad de entre 1 000/ 1 500 t/año. (Nova-Institut de Hürth , 2017).

1.2.2.3 Características y Propiedades

- El PLA es un polímero permanente e inodoro.
- Un aspecto es claro y brillante como el poliestireno.
- Tiene alta resistencia a la humedad y a la grasa.
- El módulo de elasticidad es comparable al polietileno.
- La inflamabilidad es demasiado baja.
- Tiene barrera del sabor y del olor similar al plástico de polietileno tereftalato.
- El PLA se puede formular para ser rígido o flexible.
- Temperatura de extrusión ~200°C.
- Buena adherencia en gran variedad de superficies.
- Se puede unir piezas usando adhesivos específicos.
- Densidad baja
- Acabados suaves, resistentes al rayado y al desgaste.

Tabla 1.1. Comparación entre el proceso de producción de fibras de poliácido láctico y poliéster

	Fibras de Poliácido láctico	Fibras de poliéster
Materia Prima	Recurso Renovable	Recurso no renovable
Producción de polímero	Temperatura de 200 -220 °C	Temperatura de 280 - 300 °C
Producción de fibras	Hilatura por fusión a 220 -230°C con posterior estirado y tratamiento térmico	Hilatura por fusión a 280 -290°C con posterior estirado y tratamiento térmico
Reciclado del polímero y de las fibras	Posibilidad de reciclar totalmente	Posibilidad de reciclar totalmente
Biodegradación del polímero y de las fibras	Total	No se degrada

(Fuente: Montero, 2012)

Entre las principales propiedades se resaltan las principales a continuación:

1.2.2.3.1 Resistencia a la humedad

El PLA tiene una humedad considerablemente baja (0,4-0,6%), el secado de esta fibra es bastante rápida y tiene una alta capacidad de drenaje. (Farrington D., Lunt J., 2005)

1.2.2.3.2 Densidad

El PLA tiene una densidad de 1,21 gr/cm³. (EDUPACK, 2015)

1.2.2.3.3 Resistencia a las radiaciones UV

El PLA no absorbe la luz en la región visible del espectro, esto produce una baja pérdida de resistencia cuando se expone a la luz ultravioleta.

1.2.2.3.4 Solubilidad

El políácido láctico tiene una solubilidad limitada y se ve afectada por los disolventes de limpieza en seco. El PLA es insoluble en agua. (Montero, 2012)

1.2.2.3.5 Inflamabilidad

El políácido láctico es un polímero inflamable pero tiene altas características de auto-extinción, al ser iniciado una llama solamente se quema por 2 minutos luego de ser retirada la llama.

Tabla 1.2. Comparación de las propiedades de inflamabilidad entre PLA y PET

PROPIEDADES	PLA	PET
Inflamabilidad	Continúa quemando durante 2 minutos después de retirar la llama.	Continúa quemando 6 minutos más después de retirar la llama.
Generación de Humo	163 m ² kg ⁻¹	394 m ² kg ⁻¹
LOI (Índice Límite de Oxígeno)	26%	22%

(Fuente: Farrington D., Lunt J., 2005, pág. 191)

1.2.2.3.6 Propiedades Térmicas

Tabla 1.3. Propiedades térmicas PLA

Propiedades térmicas PLA	
Punto de fusión	160 -177 °C
Temperatura de vitrificación	56 – 58 °C
Máxima temperatura de servicio	70 – 80 °C
Mínima temperatura en servicio	-12 – -10 °C
Coefficiente de expansión térmica	126 – 145 μ strain/°C
Calor específico	1.18 e3 – 1.21e3 J/kg°C
Conductividad térmica	0.12 – 0.13 W/m °C

(Fuente: Software CES)

1.2.2.3.7 Estado vítreo

La temperatura de fusión y temperatura de transición vítrea son temperaturas muy importantes cuando de reciclar polímeros se trata. En la siguiente figura se presenta la relación entre densidad y temperaturas de los polímeros en general.

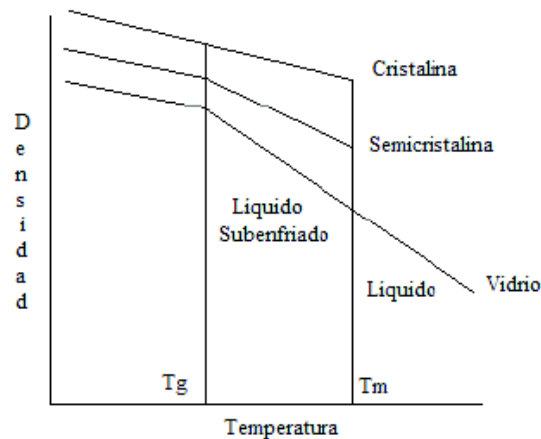


Figura 1.14. Relación entre densidad y temperatura del polímero mostrando temperaturas de fusión (T_m) y de transición vítrea (T_g).
(Fuente: (Díaz del Castillo, 2012))

A pesar de que los materiales vítreos poseen una mala ductilidad y formabilidad, tienen buena tenacidad y resistencia a la termo fluencia. La mayoría de estos polímeros tienen una temperatura de transición vítrea que es 0,5 a 0,75 veces la temperatura de fusión, hay muchos materiales termoplásticos que se vuelven rígidos a temperaturas más bajas.

1.2.2.4 Aplicaciones

El políácido láctico tiene muchas aplicaciones variadas entre las cuales destacan:

- **Modelos impresos en 3D.**- Estos modelos son utilizados en la enseñanza y aprendizaje en escuelas, colegios, museos.



Figura 1.15. Modelos impresos en PLA

(Fuente: <https://impresoras3d.com/blogs/noticias/102837127-abs-y-pla-diferencias-ventajas-y-desventajas>)

- **Aplicaciones Biomédicas.**- Actualmente se utiliza el PLA para suturas, medios de diálisis y dispositivos de administración de fármacos. Se encuentra en estudios la posibilidad de utilizar este material para la ingeniería de tejidos y huesos.
- **Botellas de agua.**- En Gran Bretaña, la empresa Belu Water utiliza este material en las botellas de agua desde Julio del 2005.



Figura 1.16. Botella elaborada con PLA

Fuente: http://www.packagingdesignarchive.org/archive/pack_details/208-belu-water

- **Artículos Varios.**- El PLA se utiliza para vasos desechables, bolsas, envases para alimentos, bolsas de té, platos y cubiertos desechables, etc.



Figura 1.17. Empaque de tomates

(Fuente: Software CES)

2. METODOLOGÍA

La metodología comprende la organización y desarrollo de los métodos y los procedimientos aplicados para cumplir los objetivos del presente trabajo.

En el siguiente diagrama de flujo se indica la metodología indicando los procesos y la información respectiva:

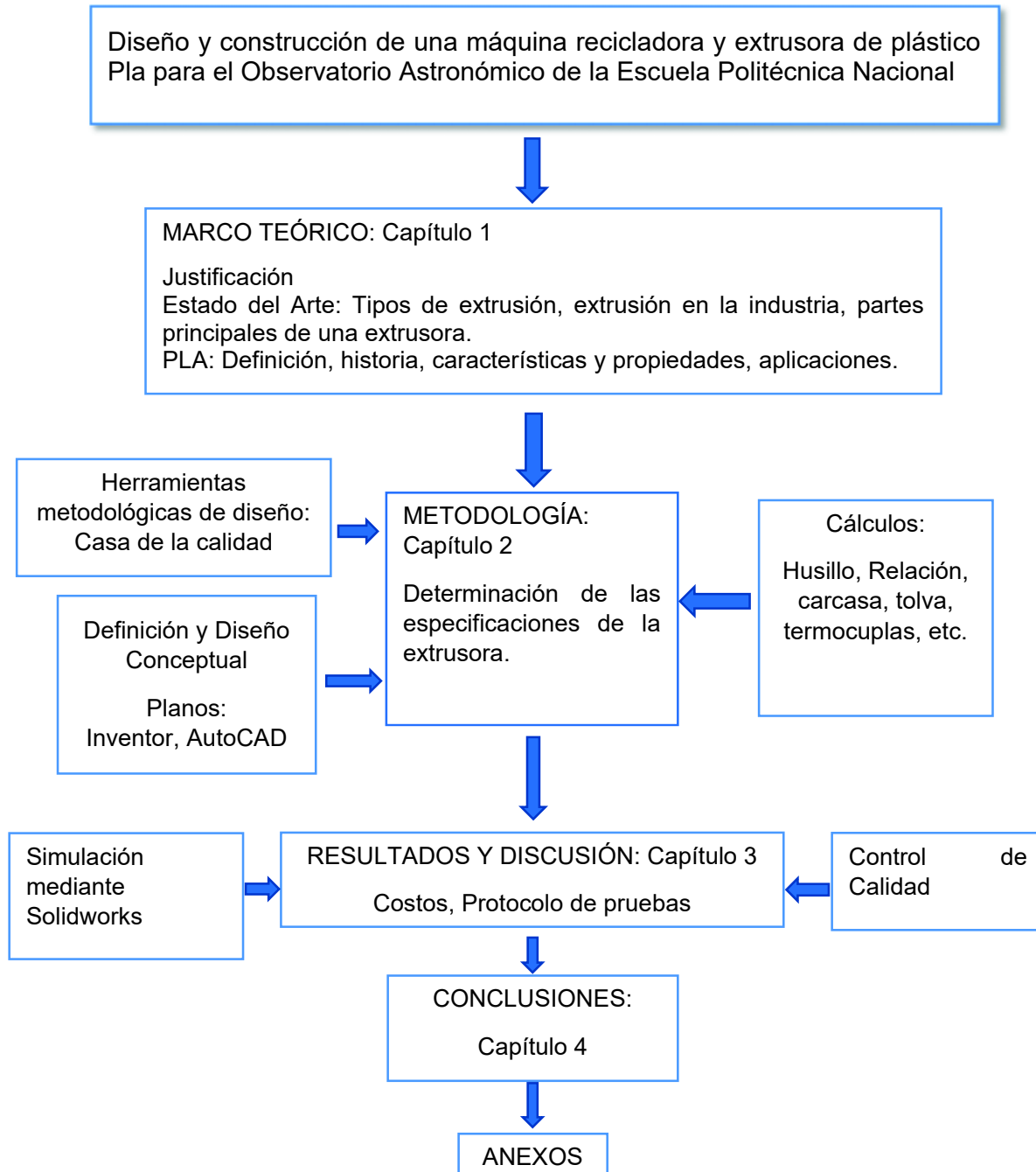


Figura 2.1. Diagrama de flujo para la metodología aplicada
(Fuente: Propia)

En el Capítulo 1, se presenta el estado del arte a través de la recopilación de información sobre los diferentes tipos de extrusión, las partes principales de una máquina extrusora, la extrusión en la industria.

Se presenta también la información principal del Políácido láctico PLA; definición, historia, características físicas y sobre todo térmicas, y las principales aplicaciones.

En el capítulo 2, se detalla la metodología utilizada, así como también las especificaciones requeridas para la máquina, para lo cual se utiliza herramientas como el Diseño robusto de Riba. Para los niveles de ruido aceptados se ha estudiado las recomendaciones de “La Ley Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental”, Anexo V. “Límites permisibles de niveles de ruido ambiente para fuentes fijas y fuentes móviles, y para vibraciones”.

Se realiza la definición y diseño conceptual de la máquina, se detalla los módulos y se realiza el análisis de alternativas que genera los resultados que permite un modelo óptimo.

Se detallan los cálculos, y dimensionamiento de cada una de las partes de la extrusora, velocidades de giro, coeficientes de seguridad, y se procede a la elaboración de planos tanto de diseño, así también como los planos de taller. Y se procede con la construcción de la máquina y compra de elementos normalizados.

En el capítulo 3 se detalla los resultados obtenidos, y también se realiza un análisis térmico de la carcasa del husillo, con el Software de Solidworks. Se detalla los costos de fabricación, costos directos e indirectos.

En el capítulo 4 se encuentran las conclusiones, a través de las cuales se realiza la argumentación de los aspectos más relevantes de este proyecto.

En las referencias bibliográficas: se incorpora las principales fuentes bibliográficas en las cuales se basa el presente proyecto.

En los anexos: se detalla la casa de la calidad, realizada en el capítulo 2, diagrama funcional, planos; de diseño, de montaje y de taller, especificaciones técnicas de diferentes elementos normalizados

2.1. DETERMINACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES DE LA MÁQUINA

Para determinar las especificaciones de la máquina se la realiza mediante la metodología de Riba, con el uso de la herramienta de análisis de la Casa de la Calidad.

2.2 CASA DE LA CALIDAD

La información acerca de los requerimientos de la Unidad de Ingeniería Mecánica del Observatorio Astronómico marca las bases para la matriz llamada casa de la calidad. Para la construcción de esta matriz se entrevistó a las personas a cargo de la unidad para obtener información relevante que nos permita tomar decisiones de ingeniería y diseño. (Anexo I)

2.2.1 Voz del usuario

De acuerdo a la información proporcionada por el personal de la Unidad de Ingeniería Mecánica del Observatorio Astronómico, el equipo debe cumplir las siguientes características.

- Que el filamento respete las dimensiones necesarias.
- Que el producto final sea resistente
- Que el filamento cumpla con las especificaciones para la impresora Makerbot.
- Que sea de fácil uso.
- Que sea económico.
- Que no sea ruidoso.
- Que no sobrepase el espacio designado.
- Que no se demore mucho al extruir.
- Fácil limpieza.

2.2.2 Voz del ingeniero

Los requerimientos anteriores son traducidos a lenguaje técnico con lo cual se tienen las siguientes características:

- Filamento extruido de diámetro 1,0 – 1,75 [mm].
- Capacidad de producción de 2 Kg/h.
- Superficie de emplazamiento de la máquina no debe ser mayor a los 2 m².
- Materiales resistentes a temperaturas hasta los 400 [°C].
- El ruido emitido por el equipo no debe sobrepasar los 70 dB(A).

2.2.3 Conclusiones de la Casa de la Calidad

De las características más importantes se puede obtener:

2.2.3.1 Filamento extruido de diámetro $\approx 1,75$ [mm]

El filamento debe ser de diámetro de ≈ 1.75 mm debido a las especificaciones de la impresora Makerbot.

2.2.3.2 Mecanismos de seguridad

La máquina extrusora debe ser diseñada con las normas de seguridad de manera que el operario no tenga problemas al utilizarlo, se debe cuidar que no existan superficies demasiado calientes al contacto.

2.2.3.3 Velocidad de Extrusión

La velocidad de extrusión debe ser óptima, no muy lenta que haga que el proceso sea largo y tampoco tan rápida que haga que cambie las propiedades del plástico PLA. Para el presente trabajo se ha tomado un valor aproximado entre 15 - 30 [RPM].

2.2.3.4 Superficie

La superficie en donde se asentara la extrusora no debe sobrepasar los 2 [m²], debido al poco espacio que se tiene en el taller.

2.2.3.5 Sistema no ruidoso

El ruido emitido por el equipo no debe sobrepasar los 70 dB(A) según la “Ley de Gestión Ambiental y del Reglamento a la Ley de Gestión Ambiental para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental”, Anexo V. “Límites permisibles de niveles de ruido ambiente para fuentes fijas y fuentes móviles, y para vibraciones”.

2.2.3.6 Materiales resistentes al calor

El material de la carcasa de la extrusora debe ser resistente a temperaturas de hasta 300 [°C], debido a la temperatura que se utilizara para fundir la materia prima.

2.2.3.7 Dimensiones de la máquina extrusora

Las dimensiones de la máquina extrusora serán: 150x70x60 [cm].

2.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Analizando los requerimientos se plantea las siguientes especificaciones técnicas:

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas de la máquina

Empresa: Ximena Morales Iles	Cliente: Observatorio Astronómico de Quito	Producto: Diseño y construcción de una máquina recicladora y extrusora de plástico PLA para el observatorio astronómico de Quito de la EPN.	Fecha inicial: 06-2017 Última revisión: octubre 2017	
Especificaciones				
C: Cliente		E: Empresa	R: Requerimiento	D: Disposición
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Función	18/9/2017	C	R	La máquina debe ser capaz de extruir los plásticos PLA con un diámetro de 1,0 -1,75 [mm].
Dimensiones	18/9/2017	C+E	D	La máquina debe ser de dimensiones de 150x70x60 [cm].
Movimiento	18/9/2017	E	R	Movimiento Horizontal
Material	18/9/2017	E	R	Materiales resistentes a temperaturas aproximadamente de 400 [°C].
Señales y control	18/9/2017	C+E	R	Panel de control - Control Automático
Seguridad y Ergonomía	18/9/2017	C+E	R+D	Las superficies que estén al contacto con el operador deben estar recubiertas para mayor seguridad
Energía	18/9/2017	C+E	R	Energía eléctrica (110 [V])
Mantenimiento	18/9/2017	C	R	Mantenimiento periódico cada 6 meses
Impacto Ambiental	18/9/2017	E	D	Reutilización de PLA

(Fuente: Propia)

2.4 DEFINICIÓN Y DISEÑO CONCEPTUAL

El análisis funcional es una técnica que propone separar en módulos las diferentes acciones que realiza la máquina. Con el objetivo de identificar las funciones primarias y

secundarias de la máquina extrusora a diseñar se han establecido las siguientes funciones:

Funciones primarias: Cumplir con la demanda del cliente

Funciones secundarias: Ayuda en el desarrollo de las funciones primarias.

2.4.1 Determinación de los módulos

Las funciones secundarias se las realizan mediante diagramas de flujo en los que se representa una función en cada bloque. Estos diagramas se representan en diferentes niveles, los cuales se detallan a continuación.

NIVEL 0

En este nivel se presenta la función global:

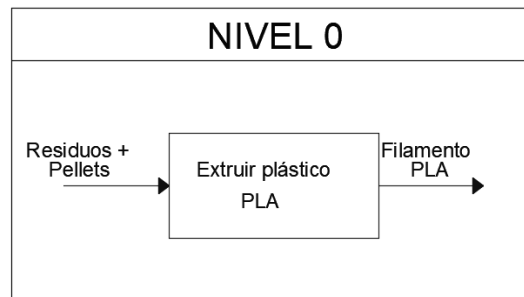


Figura 2.2. División Modular: Nivel 0
(Fuente: Propia)

NIVEL 1

En este nivel se especifica las diversas funciones que realizará la máquina.

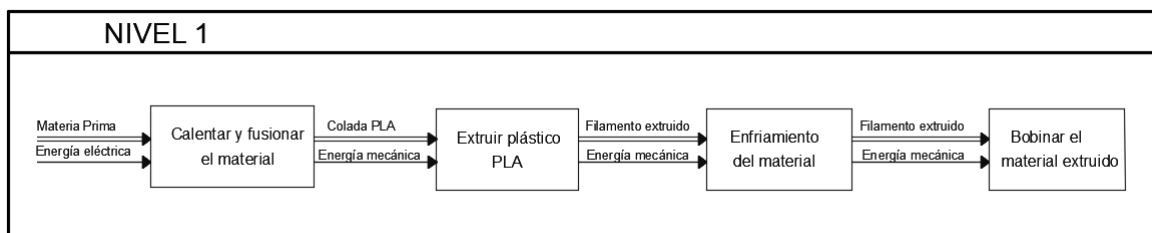


Figura 2.3. División modular: Nivel 1
(Fuente: Propia)

NIVEL 2

En este nivel se muestran desglosadas las acciones del nivel 1, las cuales son fundamentales para el correcto funcionamiento de la máquina. (Anexo II)

2.4.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

2.4.2.1 Selección del tipo de extrusora directa o inversa

2.4.2.1.1 Extrusora Directa

Este tipo de extrusión, el material es comprimido por un pistón forzándolo a fluir a través de una o más aberturas que hay en un dado situado al extremo opuesto.

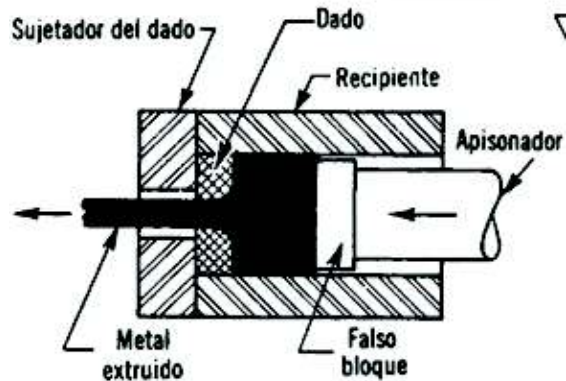


Figura 2.4. Extrusora directa

(Fuente: https://www.censaindustrial.com/blog_post.php?id=298)

Tabla 2.2. Ventajas y desventajas de la extrusora directa

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Mayor capacidad de presión.	Gran rozamiento dado-contenedor
Se pueden hacer secciones huecas por ejemplo tubos o perfiles.	Requiere una mayor potencia.

(Fuente: Propia)

2.4.2.1.2 Extrusora Inversa

En este tipo de extrusoras el dado se encuentra montado sobre el pistón, al penetrar el pistón en el material fuerza al metal a fluir en dirección contraria a la del dado.

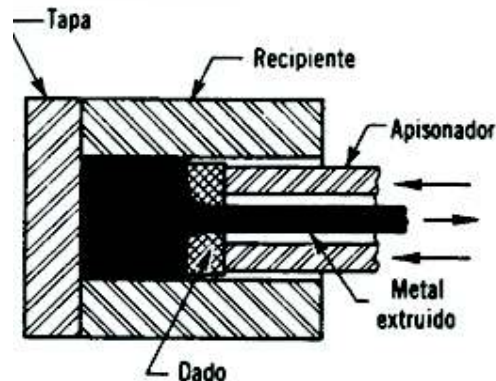


Figura 2.5. Extrusora Inversa

(Fuente: https://www.censaindustrial.com/blog_post.php?id=298)

Tabla 2.3. Ventajas y desventajas de la extrusión inversa

VENTAJAS	DESVENTAJAS
25- 30 % menor resquebrajamiento	Menor rigidez del pistón hueco.
Se pueden hacer secciones huecas por ejemplo: tubos.	Menor capacidad de presión
	Mala sujeción del producto extruido al salir del dado.

(Fuente: Propia)

2.4.2.1.3 Selección de alternativas para el tipo de extrusora

Los criterios de selección se analizan bajo una ponderación adecuada según la relevancia de cada uno de ellos con el fin de determinar su orden jerárquico.

- Longitud a extrudir.
- Forma del cordón a extruir.
- Presión.
- Rozamiento.
- Sujeción del material extruido.

Tabla 2.4. Ponderación de criterios de tipos de extrusora directa o inversa.

CRITERIO	Longitud a extruir	Forma del cordón a extruir	Presión	Rozamiento	Sujeción del material extruido	$\Sigma+1$	Ponderación
Longitud a extruir	X	0,5	1	1	1	4,5	0,300
Forma del cordón a extruir	0,5	X	1	1	0	3,5	0,233
Presión	0	0	X	1	0	2	0,133
Rozamiento	0	0	0	X	0	1	0,067
Sujeción del material extruido	0,5	0,5	1	1	X	4	0,267
					SUMA	15	1

(Fuente: Propia)

Longitud a extruir > Sujeción del material extruido > Forma del cordón a extruir > Presión > Rozamiento

Los valores asignados a cada solución son:

- 1 si el criterio de filas es superior (>) que el de las columnas.
- 0,5 si los dos criterios que se comparan son equivalentes.
- 0 si el criterio de las filas es inferior (<) que el de las columnas.

En las tablas siguientes se evalúa cada uno de los parámetros para la selección del tipo de extrusora: extrusora directa (solución 1), extrusora inversa (solución 2)

Tabla 2.5. Evaluación de las soluciones con respecto a la longitud a extruir.

LONGITUD EXTRUIR	A	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		X	1	2	0,667
Solución 2		0	X	1	0,333
SUMA				3	1

(Fuente: Propia)

Solución 1 > Solución 2

Tabla 2.6. Evaluación de las soluciones con respecto a la forma del cordón a extruir.

FORMA DEL CORDÓN EXTRUIR	A	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		X	0,5	1,5	0,5
Solución 2		0,5	X	1,5	0,5
SUMA				3	1

(Fuente: Propia)

Solución 1 = Solución 2

Tabla 2.7. Evaluación de las soluciones con respecto a la presión.

PRESIÓN	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	1	2	0,667
Solución 2	0	X	1	0,333
SUMA			3	1

(Fuente: Propia)

Solución 1 > Solución 2

Tabla 2.8. Evaluación de las soluciones con respecto al rozamiento del pistón.

ROZAMIENTO	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0	1	0,333
Solución 2	1	X	2	0,667
			3	1

(Fuente: Propia)

Solución 2 > Solución 1

Tabla 2.9. Evaluación de las soluciones con respecto a la sujeción del material extruido.

SUJECIÓN DEL MATERIAL EXTRUIDO	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	1	2	0,667
Solución 2	0	X	1	0,333
			3	1

(Fuente: Propia)

Solución 1 > Solución 2

Tabla 2.10. Tabla de conclusiones del tipo de extrusora directa o indirecta.

SOLUCIÓN	Longitud a extruir	Forma del cordón a extruir	Presión	Rozamiento	Sujeción del material extruido	$\Sigma+1$	Prioridad
Solución 1	0,200	0,117	0,089	0,022	0,178	1,606	1
Solución 2	0,100	0,117	0,089	0,044	0,089	1,439	2

(Fuente: Propia)

Solución 1 > Solución 2

Se concluye el análisis de criterios ponderados en la tabla 2.10, extrusión directa es la mejor solución para el tipo de extrusora.

2.4.2.2 Selección del tipo de extrusora vertical u horizontal

2.4.2.2.1 Extrusora vertical

Este tipo de extrusora tiene el eje del cilindro, situado en posición vertical. Su principal aplicación es la extrusión de películas sopladas.



Figura 2.6. Extrusora vertical

(Fuente: http://www.e-plast.com.tw/es/products_i_Vertical_Co-Extruder.html)

Tabla 2.11. Ventajas y desventajas de la extrusora vertical

VENTAJAS	DESVENTAJAS
La superficie horizontal utilizada en la máquina es menor comparado a la extrusora horizontal.	Se requiere de un sistema de refrigeración para que el cordón extruido no se quiebre.
La altura de la máquina se puede ajustar dependiendo de las necesidades del operador.	Se debe tener suficiente altura para la instalación de la máquina.

(Fuente: Propia)

2.4.2.2.2 Extrusora Horizontal

Este tipo de extrusoras tienen el núcleo del cilindro acomodado de forma horizontal por lo tanto su trayectoria de trabajo es lineal y horizontal.



Figura 2.7. Extrusora horizontal

(Fuente: http://www.e-plast.com.tw/es/products_img_Horizontal_Co-Extruder.html)

Tabla 2.12. Ventajas y desventajas de la extrusora horizontal

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Fácil acceso a todos los componentes de la máquina	Ocupa bastante superficie horizontal
Mayor movilidad del equipo ya que no necesita estar empotrada en pared como en el caso de la extrusora vertical.	

(Fuente: Propia)

2.4.2.2.3 Selección de alternativas para el tipo de extrusora

Los criterios de selección se analizan bajo una ponderación adecuada según la relevancia de cada uno de ellos con el fin de determinar su orden jerárquico.

- Espacio determinado
- Mantenimiento
- Fácil accesibilidad a la máquina.
- Costo
- Movilidad

Tabla 2.13. Ponderación de criterios de tipos de extrusora vertical u horizontal.

CRITERIO	Espacio determinado	Mantenimiento	Fácil accesibilidad de la máquina	Costo	Movilidad	$\Sigma+$	Ponderación
Espacio determinado	X	0	0	1	0	2	0,1334
Mantenimiento	1	X	0,5	0	0,5	3	0,2
Fácil accesibilidad de la máquina	1	0,5	X	0	0	2,5	0,167
Costo	1	1	1	X	1	5	0,333
Movilidad	1	0	0,5	0	X	2,5	0,167
					SUMA	15	1

(Fuente: Propia)

Costo > Mantenimiento > Movilidad > Fácil accesibilidad de la máquina > Espacio determinado

Los valores asignados a cada solución son:

1 si el criterio de filas es superior (>) que el de las columnas.

0,5 si los dos criterios que se comparan son equivalentes.

0 si el criterio de las filas es inferior (<) que el de las columnas.

En las tablas siguientes se evalúa cada uno de los parámetros para la selección del tipo de extrusora: extrusora vertical (solución 1), extrusora horizontal (solución 2)

Tabla 2.14. Evaluación de las soluciones con respecto al costo.

COSTO	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	1	2	0,5
Solución 2	1	X	2	0,5
		SUMA	4	1

(Fuente: Propia)

Solucion1 = Solución 2

Tabla 2.15. Evaluación de las soluciones con respecto al mantenimiento

MANTENIMIENTO	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0	1	0,333
Solución 2	1	X	2	0,6667
		SUMA	3	1

(Fuente: Propia)

Solución 2 > Solución 1

Tabla 2.16. Evaluación de las soluciones con respecto a la movilidad de la máquina.

MOVILIDAD	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0	1	0,333
Solución 2	1	X	2	0,666
		SUMA	3	1

(Fuente: Propia)

Solución 2 > Solución 1

Tabla 2.17. Evaluación de las soluciones con respecto a la fácil accesibilidad a la máquina.

FÁCIL ACCESIBILIDAD A LA MÁQUINA	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0	1	0,333
Solución 2	1	X	2	0,666
			3	1

(Fuente: Propia)

Solución 2 > Solución 1

Tabla 2.18. Evaluación de las soluciones con respecto al espacio determinado.

ESPACIO DETERMINADO	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	1	2	0,666
Solución 2	0	X	1	0,333
			3	1

(Fuente: Propia)

Solución 1 > Solución 2

Tabla 2.19. Tabla de conclusiones de extrusora horizontal o vertical.

CONCLUSIÓN	Costo	Mantenimiento	Movilidad	Fácil accesibilidad a la máquina	Espacio determinado	$\Sigma+1$	Prioridad
Solución 1	0,167	0,067	0,056	0,056	0,089	1,433	2
Solución 2	0,167	0,133	0,111	0,111	0,044	1,567	1

(Fuente: Propia)

Solución 2 > Solución 1

Se concluye el análisis del método ordinal corregido de criterios ponderados tabla 2.19, que la máquina extrusora horizontal es la más idónea para el diseño de la extrusora.

2.4.2.3 MÓDULO 1: Selección del tipo de sistema de potencia

2.4.2.3.1 Motor + reductor

En esta alternativa se propone un motor al cual se le añade un reductor, para de esta forma poder tener una reducción de velocidad de forma eficiente.



Figura 2.8. Motor + Reductor

(Fuente: <http://www.accesoriosaltapresionagm.com/hawk-leuco/787-reductor-rpm-b18-8-13kw-1-r12176-sae-j609b.html>)

Tabla 2.20. Ventajas y desventajas del acople motor + reductor

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Se puede elegir el reductor dependiendo de las necesidades del usuario, sin tener que por ello cambiar el motor.	Si el acople no se realiza de forma correcta puede existir irregularidades en la reducción de velocidad.
	Alto costo

(Fuente: Propia)

2.4.2.3.2 Servomotor

En esta alternativa se propone un servomotor que puede ser controlado tanto en velocidad como en posición.



Figura 2.9. Servomotor

(Fuente: <https://www.clasf.co/q/máquina-jontex-motor/>)

Tabla 2.21. Ventajas y desventajas del Servomotor

VENTAJAS	DESVENTAJAS
En el servomotor viene incorporado el reductor de velocidades.	Baja potencia
El servomotor es más económico comparado con el motorreductor y el acople de un motor y de un reductor	
Sistema robusto	

(Fuente: Propia)

2.4.2.3.3 Motorreductor

Un motorreductor es un motor con reductor incorporado y son apropiados para accionamiento de toda clase máquinas y aparatos de uso industrial, que necesitan reducir su velocidad en una forma segura y eficiente.



Figura 2.10. Motorreductor

(Fuente: <https://www.energiacontrolada.com/faq/Que-es-un-motorreductor>)

Tabla 2.22. Ventajas y desventajas del Motorreductor

VENTAJAS	DESVENTAJAS
El sistema viene acoplado con el sistema reductor de tal forma que se garantice la reducción de velocidad de forma eficiente.	Son muy ruidosos.
El motorreductor es más económico comparado con el acople de un motor y de un reductor.	Alto costo comparado con el servomotor.
Sistema Robusto	

(Fuente: Propia)

2.4.2.3.4 Selección de alternativas para el sistema de potencia

Los criterios de selección se analizan bajo una ponderación adecuada según la relevancia de cada uno de ellos con el fin de determinar su orden jerárquico.

- Costo del equipo
- Nivel de Ruido
- Mantenimiento
- Velocidad de Funcionamiento

Tabla 2.23. Ponderación de criterios del sistema de Potencia

CRITERIO	Costo del equipo	Nivel de Ruido	Mantenimiento	Velocidad de Funcionamiento	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo del equipo	X	0,5	1	0,5	3	0,300
Nivel de Ruido	1	X	1	0,5	3,5	0,350
Mantenimiento	0	0	X	0,5	1,5	0,150
Velocidad de funcionamiento	0	0	1	X	2	0,200
SUMA					10	1

(Fuente: Propia)

Nivel de Ruido > Costo del Equipo > Velocidad de Funcionamiento > Mantenimiento

Los valores asignados a cada solución son:

- 1 si el criterio de filas es superior (>) que el de las columnas.
- 0,5 si los dos criterios que se comparan son equivalentes.
- 0 si el criterio de las filas es inferior (<) que el de las columnas.

En las tablas siguientes se evalúa cada uno de los parámetros para la selección del tipo de potencia: Motor+ Reductor [acople] (solución 1), Motorreductor (solución 2)

Tabla 2.24. Evaluación de las soluciones con respecto al Costo

COSTO	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0	1	2	0,333
Solución 2	1	X	1	3	0,5
Solución 3	0	0	X	1	0,167
				6	1

(Fuente: Propia)

Solución 2 > Solución 1 > Solución 3

Tabla 2.25. Evaluación de las soluciones con respecto al Nivel de ruido.

NIVEL DE RUIDO	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0	0,5	1,5	0,25
Solución 2	1	X	1	3	0,50
Solución 3	0,5	0	X	1,5	0,25
				6	1

(Fuente: Propia)

Solución 2 > Solución 1 = Solución 3

Tabla 2.26. Evaluación de las soluciones con respecto al mantenimiento.

MANTENIMIENTO	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0	0,5	1,5	0,250
Solución 2	1	X	0,5	2,5	0,417
Solución 3	1	0	X	2	0,333
				6	1

(Fuente: Propia)

Solución 2 > Solución 3 > Solución 1

Tabla 2.27. Evaluación de las soluciones con respecto a la Velocidad de funcionamiento.

VELOCIDAD DE FUNCIONAMIENTO	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0	0	1	0,2
Solución 2	1	X	0,5	2,5	0,5
Solución 3	0	0,5	X	1,5	0,3
				5	1

(Fuente: Propia)

Solución 2 > Solución 3 > Solución 1

Tabla 2.28. Tabla de conclusiones del sistema de Potencia.

SOLUCIÓN	Costo	Nivel de Ruido	Mantenimiento	Velocidad de Funcionamiento	$\Sigma+1$	Prioridad
Solución 1	0,100	0,088	0,038	0,040	1,265	2
Solución 2	0,150	0,175	0,063	0,100	1,488	1
Solución 3	0,050	0,088	0,050	0,060	1,248	3

(Fuente: Propia)

Se concluye el análisis del método ordinal corregido de criterios ponderados tabla 2.28, que el servomotor es la alternativa más idónea para el sistema de Potencia.

2.4.2.1 Selección del tipo de sistema de alimentación

El sistema de alimentación se lo realiza mediante una tolva.

2.4.2.1.1 Tolva Redonda



Figura 2.11. Tolva redonda

(Fuente: <http://www.caldereriajgimenez.com/productos-tolvas.html>)

Tabla 2.29. Ventajas y desventajas de la tolva redonda.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
No tiene ángulos internos.	Difícil de manufacturar
Se puede regular la entrada de material.	
No se quedan residuos de pellets en la tolva.	

(Fuente: Propia)

2.4.2.1.2 Tolva cuadrada

Este tipo de tolvas se utilizan en los grandes molinos de granos.



Figura 2.12. Tolva cuadrada

(Fuente: <http://www.caldereriajgimenez.com/productos-tolvas.html>)

Tabla 2.30. Ventajas y desventajas de la tolva cuadrada.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Grandes depósitos de material	Tiene ángulos internos
Se puede acoplar fácilmente por la base cuadrada.	

(Fuente: Propia)

2.4.2.1.3 Selección de alternativas para el sistema de alimentación

Los criterios de selección se analizan bajo una ponderación adecuada según la relevancia de cada uno de ellos con el fin de determinar su orden jerárquico.

- Cantidad de producto
- Facilidad de alimentación
- No se trabe el material
- Facilidad de dosificación
- Sin derrames de materia prima

Tabla 2.31. Ponderación de criterios de tipos de tolva redonda o cuadrada

CRITERIO	Cantidad del producto	Facilidad de alimentación	No se trabe el material	Facilidad de dosificación	Sin derrames de materia prima	$\Sigma+1$	Ponderación
Cantidad del producto	X	0	0,5	0,0	0,5	2	0,121
Facilidad de alimentación	1	X	0,5	0,0	0,5	3	0,182
No se trabe el material	1	0,5	X	1,0	0,5	4	0,242
Facilidad de dosificación	1	1	0	X	0,5	3,5	0,212
Sin derrames de materia prima	0,5	1	0,5	1,0	X	4	0,242
					SUMA	16,5	1

(Fuente: Propia)

Sin derrames de materia prima>No se trabe el material>Facilidad de dosificación>Facilidad de alimentación>Cantidad del producto.

Los valores asignados a cada solución son:

- 1 si el criterio de filas es superior (>) que el de las columnas.
- 0,5 si los dos criterios que se comparan son equivalentes.
- 0 si el criterio de las filas es inferior (<) que el de las columnas.

En las tablas siguientes se evalúa cada uno de los parámetros para la selección del tipo de alimentación: Tolva redonda (solución 1), Tolva cuadrada (solución 2).

Tabla 2.32. Evaluación de las soluciones con respecto a la cantidad del producto.

CANTIDAD DEL PRODUCTO	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0,5	1,5	0,429
Solución 2	1	X	2	0,571
			3,5	1,000

(Fuente: Propia)

Solución 2 > Solución 1

Tabla 2.33. Evaluación de las soluciones con respecto a la facilidad de alimentación.

FACILIDAD DE ALIMENTACIÓN	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0,5	1,5	0,5
Solución 2	0,5	X	1,5	0,5
			3	1

(Fuente: Propia)

Solución 2 = Solución 1

Tabla 2.34. Evaluación de las soluciones con respecto a que no se trabe el material.

NO SE TRABE EL MATERIAL	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	1	2	0,667
Solución 2	0	X	1	0,333
			3	1

(Fuente: Propia)

Solución 1 > Solución 2

Tabla 2.35. Evaluación de las soluciones con respecto a la facilidad de dosificación.

FACILIDAD DE DOSIFICACIÓN	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0	1	0,333
Solución 2	1	X	2	0,667
			3	1

(Fuente: Propia)

Solución 2 > Solución 1

Tabla 2.36. Evaluación de las soluciones con respecto al derrame de materia prima.

SIN DERRAMES DE MATERIA PRIMA	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	1	2	0,5
Solución 2	1	X	2	0,5
			4	1

(Fuente: Propia)

Solución 2 = Solución 1

Tabla 2.37. Conclusiones de las ponderaciones del Sistema de Alimentación.

SOLUCIÓN	Cantidad del producto	Facilidad de alimentación	No se trabe el material	Facilidad de dosificación	Sin derrames de materia prima	$\Sigma+1$	Prioridad
Solución 1	0,052	0,091	0,162	0,071	0,121	1,496	2
Solución 2	0,069	0,091	0,081	0,141	0,121	1,504	1

(Fuente: Propia)

Solución 2 > Solución 1

Se concluye el análisis del método ordinal corregido de criterios ponderados tabla 2.37, que el sistema de alimentación con tolva cuadrada es el más idóneo para el diseño de la extrusora.

2.4.2.2 MÓDULO 2: Resistencias

Las resistencias son elementos que son fabricados a base de níquel, en las cuales la energía eléctrica se transforma en calor. Mediante la Ley de Joule se puede determinar la cantidad de calor que es capaz de entregar una resistencia.

2.4.2.2.1 Resistencias flexibles o cintas calefactoras.

Cintas calefactoras para alta temperatura.



Figura 2.13. Cinta calefactora

(Fuente: <http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/cinta-calefactora-88713.html>)

Tabla 2.38. Ventajas y desventajas de la cinta calefactora

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Alta flexibilidad	Alto costo comercial
Fácil instalación	Misma temperatura a lo largo de la superficie.
Mínimo radio de curvatura	
Alimentación por un único extremo	

(Fuente: Propia)

2.4.2.2 Resistencias minitubulares

Este tipo de tubos recocidos de alto rendimiento están especialmente diseñados para el calentamiento de boquillas y colectores de los inyectores de la colada en la industria de plástico.



Figura 2.14. Resistencias tipo banda

(Fuente: <http://www.termokew.mx/resistencias-calentamiento.php>)

Tabla 2.39. Ventajas y desventajas de las resistencias tipo banda

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Se puede ajustar al diámetro y longitud deseada.	Su mayor aplicación se lo realiza mediante inmersión y no recubrimiento.
Es la más común de las resistencias y se pueden encontrar fácilmente en el mercado.	
Son sumamente flexibles y se doblar de la forma que sea requerida.	

(Fuente: Propia)

2.4.2.2.3 Resistencias tipo abrazaderas

Son resistencias que se fabrican a medida, en acero inoxidable o una aleación de acero con zinc.



Figura 2.15. Resistencias tipo abrazadera
(Fuente: <http://www.resistenciasomega.com/>)

Tabla 2.40. Ventajas y desventajas de la resistencia tipo abrazadera.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Son mayormente usadas en calentamiento de tuberías.	El área de calentamiento depende del área de contacto.
Livianas.	
Se puede acoplar mediante pernos.	

(Fuente: Propia)

2.4.2.2.4 Selección de alternativas para las resistencias eléctricas de calentamiento

Los criterios de selección se analizan bajo una ponderación adecuada según la relevancia de cada uno de ellos con el fin de determinar su orden jerárquico.

- Facilidad de montaje.
- Material flexible.
- Bajo costo
- Diámetro ajustable
- Altas Temperaturas

Tabla 2.41. Ponderación de criterios de tipos de resistencias.

CRITERIO	Facilidad de montaje	Material flexible	Bajo costo	Diámetro ajustable	Altas temperaturas	$\Sigma+1$	Ponderación
Facilidad de montaje	X	1	1	1	0	4	0,258
Material flexible	0	X	1	1	0	3	0,194
Bajo costo	0	0	X	0	0,5	1,5	0,097
Diámetro ajustable	1	0,5	1	X	1	4,5	0,290
Altas temperaturas	0,5	0	1	0,0	X	2,5	0,161
					SUMA	15,5	1

(Fuente: Propia)

Diámetro ajustable > Facilidad de Montaje > Material Flexible > Soporte altas temperaturas > Bajo Costo

Los valores asignados a cada solución son:

- 1 Si el criterio de filas es superior (>) que el de las columnas.
- 0,5 Si los 2 criterios que se comparan son equivalentes.
- 0 Si el Criterio de las filas es inferior (<) que el de las columnas.

En las tablas siguientes se evalúa cada uno de los parámetros para la selección del tipo de resistencia: Cinta Calefactora (solución 1), Resistencia Mini tubular (solución 2), Resistencia Tipo Abrazaderas (Solución 3).

Tabla 2.42. Evaluación de las soluciones con respecto a la facilidad de montaje

FACILIDAD DE MONTAJE	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0,5	1	2,5	0,5
Solución 2	0	X	0	1	0,2
Solución 3	0	0,5	X	1,5	0,3
				5	1

(Fuente: Propia)

Solución 1 > Solución 3 > Solución 2

Tabla 2.43. Evaluación de las soluciones con respecto a la flexibilidad del material

MATERIAL FLEXIBLE	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0,5	1	2,5	0,417
Solución 2	0,5	X	1	2,5	0,417
Solución 3	0	0	X	1	0,167
				6	1

(Fuente: Propia)

Solución 1 = Solución 2 > Solución 3

Tabla 2.44. Evaluación de las soluciones con respecto al costo.

BAJO COSTO	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0	0	1	0,182
Solución 2	0	X	0,5	1,5	0,273
Solución 3	1	1	X	3	0,545
				5,5	1

(Fuente: Propia)

Solución 3 > Solución 2 > Solución 1

Tabla 2.45. Evaluación de las soluciones con respecto al diámetro ajustable

DIAMETRO AJUSTABLE	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0,5	1	2,5	0,313
Solución 2	1	X	0,5	2,5	0,313
Solución 3	1	1	X	3	0,375
				8	1

(Fuente: Propia)

Solución 3 > Solución 1 = Solución 2

Tabla 2.46. Evaluación de las soluciones con respecto a la temperatura.

ALTAS TEMPERATURAS	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0	0	1	0,182
Solución 2	0	X	0,5	1,5	0,273
Solución 3	1	1	X	3	0,545
				5,5	1

(Fuente: Propia)

Solución 3 > Solución 2 > Solución 1

Tabla 2.47. Conclusiones de las ponderaciones de las resistencias eléctricas.

SOLUCIÓN	Facilidad de Montaje	Material Flexible	Bajo Costo	Diámetro ajustable	Altas temperaturas	$\Sigma+1$	Prioridad
Solución 1	0,129	0,081	0,018	0,091	0,029	1,347	3
Solución 2	0,052	0,081	0,026	0,091	0,044	1,293	2
Solución 3	0,077	0,032	0,053	0,109	0,088	1,359	1

(Fuente: Propia)

Se concluye el análisis del método ordinal corregido de criterios ponderados tabla 2.47, que la resistencia tipo abrazadera es la alternativa más idónea para el diseño de la extrusora.

2.4.2.3 MÓDULO 3: Selección del tipo de sistema de enfriamiento

2.4.2.3.1 Ventilador

El ventilador envía aire al material recién extruido para ayudar en su enfriamiento y a la vez tener mayor eficiencia en las propiedades del PLA requeridas.



Figura 2.16. Ventilador

(Fuente: <https://www.titan-cd.com/es/product/Disipadores-de-calor-del-refrigerador-del-chipset-de-12V-DC/TTC-CSC03-Series.html>)

Tabla 2.48. Ventajas y Desventajas del Ventilador.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Son livianos y pequeños.	Necesita energía eléctrica para operar.
Fácil de acoplar e instalar.	
No necesita demasiado espacio.	

(Fuente: Propia)

2.4.2.3.2 Agua

El enfriamiento mediante agua se lo realiza principalmente en extrusoras de tubería PVC de forma industrial.



Figura 2.17. Enfriamiento mediante agua

(Fuente: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2012/04/extrusion-de-pelicula-soplada.html>)

Tabla 2.49. Ventajas y Desventajas del enfriamiento mediante agua

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Se obtiene un enfriamiento rápido.	Ocupa demasiado espacio.
	Se necesita del diseño de un tanque para mantener el agua para el enfriamiento.
	Se necesita de una toma de manguera cercana para la instalación del equipo.

(Fuente: Propia)

2.4.2.3.3 Selección de alternativas para el sistema de enfriamiento

Los criterios de selección se analizan bajo una ponderación adecuada según la relevancia de cada uno de ellos con el fin de determinar su orden jerárquico.

- Capacidad de Enfriamiento
- Espacio
- Bajo costo
- Facilidad de montaje

Tabla 2.50. Criterios de Ponderación del sistema de enfriamiento

CRITERIO	Capacidad de Enfriamiento	Espacio	Bajo Costo	Facilidad de Montaje	$\Sigma+1$	Ponderación
Capacidad de Enfriamiento	X	0,5	1	1	3,5	0,292
Espacio	0,5	X	1	0,5	3	0,250
Bajo Costo	0,5	1	X	1	3,5	0,292
Facilidad de Montaje	0	0,5	0,5	X	2	0,167
				SUMA	12	1

(Fuente: Propia)

Capacidad de Enfriamiento > Bajo Costo > Espacio > Facilidad de Montaje

Los valores asignados a cada solución son:

- 1 Si el criterio de filas es superior (>) que el de las columnas.
- 0,5 Si los 2 criterios que se comparan son equivalentes.
- 0 Si el Criterio de las filas es inferior (<) que el de las columnas.

En las tablas siguientes se evalúa cada uno de los parámetros para la selección del tipo de enfriamiento: Ventiladores (solución 1), Enfriamiento con agua (solución 2).

Tabla 2.51. Evaluación de las soluciones con respecto a la capacidad de enfriamiento

CAPACIDAD DE ENFRIAMIENTO	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0	1	0,333
Solución 2	1	X	2	0,667
			3	1

(Fuente: Propia)

Solución 2 > Solución 1

Tabla 2.52. Evaluación de las soluciones con respecto al espacio.

ESPACIO	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	1	2	0,667
Solución 2	0	X	1	0,333
			3	1

(Fuente: Propia)

Solución 1 > Solución 2

Tabla 2.53. Evaluación de las soluciones con respecto al Costo.

BAJO COSTO	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	1	2	0,67
Solución 2	0	X	1	0,33
			3	1

(Fuente: Propia)

Solución 1 > Solución 2

Tabla 2.54. Evaluación de las soluciones con respecto a la facilidad de montaje

FACILIDAD DE MONTAJE	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	1	2	0,667
Solución 2	0	X	1	0,333
			3	1

(Fuente: Propia)

Solución 1 > Solución 2

Tabla 2.55. Conclusiones de las ponderaciones del Sistema de Enfriamiento

SOLUCIÓN	Capacidad de Enfriamiento	Espacio	Bajo Costo	Facilidad de Montaje	$\Sigma+1$	Prioridad
Solución 1	0,097	0,167	0,194	0,111	1,569	1
Solución 2	0,194	0,083	0,097	0,056	1,431	2

(Fuente: Propia)

Se concluye el análisis del método ordinal corregido de criterios ponderados tabla 2.55, que el enfriamiento mediante ventiladores es la es la alternativa más idónea para el diseño de la extrusora.

2.4.2.4 MÓDULO 4: Selección del tipo de sistema de Bobinado

El sistema de bobinado para la extrusora se lo realizarán mediante un motor, por lo tanto, a continuación se detallan las alternativas para el mismo.

2.4.2.4.1 Motor paso a paso

Estos motores giran libremente y a una velocidad alta. Con un controlador adecuado, se los puede hacer arrancar y detenerse en un instante en posiciones controladas.



Figura 2.18. Motor paso a paso

(Fuente: <http://tienda.bricogeek.com/motores-paso-a-paso/546-motor-paso-a-paso-nema-17-32kg-cm.html>)

Tabla 2.56. Ventajas y Desventajas del Motor paso a paso

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Mayor exactitud en la posición y repetición de los movimientos.	Su aplicación es para cargas pequeñas.
Gran rango de velocidades de Rotación.	
Error de paso inferior al 5%.	

(Fuente: Propia)

2.4.2.4.2 Servomotor

Un servomotor puede ser controlado tanto en velocidad como en posición.



Figura 2.19. Servomotor.

(Fuente: <http://tienda.bricogeek.com/motores/118-servomotor-de-rotacion-continua-sm-s4303r.html>)

Tabla 2.57. Ventajas y Desventajas del Servomotor

VENTAJAS	DESVENTAJAS
Máxima precisión.	Su aplicación es solo para cargas ligeras.
Elevada Torsión.	
Tamaño y costo reducidos.	

(Fuente: Propia)

2.4.2.4.3 Selección de alternativas para el sistema de bobinado

Los criterios de selección se analizan bajo una ponderación adecuada según la relevancia de cada uno de ellos con el fin de determinar su orden jerárquico.

- Torque
- Espacio
- Bajo costo
- Facilidad de montaje
- Mantenimiento

Tabla 2.58. Criterios de Ponderación del sistema de bobinado.

CRITERIO	Torque	Espacio	Bajo Costo	Facilidad de Montaje	Mantenimiento	$\Sigma+1$	Ponderación
Torque	X	1	1	1	0,5	4,5	0,281
Espacio	0	X	1	0,5	1	3,5	0,219
Bajo Costo	0,5	0,5	X	0,5	0	2,5	0,156
Facilidad de Montaje	0	0,5	1	X	0,5	3	0,188
Mantenimiento	0	0,5	0,5	0,5	X	2,5	0,156
					SUMA	16	1

(Fuente: Propia)

Torque > Espacio > Facilidad de Montaje > Mantenimiento = Bajo Costo

Los valores asignados a cada solución son:

- 1 Si el criterio de filas es superior (>) que el de las columnas.
- 0,5 Si los 2 criterios que se comparan son equivalentes.
- 0 Si el Criterio de las filas es inferior (<) que el de las columnas.

En las tablas siguientes se evalúa cada uno de los parámetros para la selección del tipo de motor para el bobinado: Motor paso a paso (solución 1), Servomotor (solución 2).

Tabla 2.59. Evaluación de las soluciones con respecto al torque.

TORQUE	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0,5	1,5	0,5
Solución 2	0,5	X	1,5	0,5
			3	1

(Fuente: Propia)

Solución 1 = Solución 2

Tabla 2.60. Evaluación de las soluciones con respecto al espacio.

ESPACIO	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0,5	1,5	0,5
Solución 2	0,5	X	1,5	0,5
			3	1

(Fuente: Propia)

Solución 1 = Solución 2

Tabla 2.61. Evaluación de las soluciones con respecto al bajo costo.

BAJO COSTO	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	1	2	0,667
Solución 2	0	X	1	0,333
			3	1

(Fuente: Propia)

Solución 1 > Solución 2

Tabla 2.62. Evaluación de las soluciones con respecto a la facilidad de montaje.

FACILIDAD DE MONTAJE	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	0,5	1,5	0,5
Solución 2	0,5	X	1,5	0,5
			3	1

(Fuente: Propia)

Solución 1 = Solución 2

Tabla 2.63. Evaluación de las soluciones con respecto al mantenimiento.

MANTENIMIENTO	Solución 1	Solución 2	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1	X	1	2	0,667
Solución 2	0	X	1	0,333
			3	1

(Fuente: Propia)

Solución 1 > Solución 2

Tabla 2.64. Conclusiones de las ponderaciones del Sistema de Bobinado.

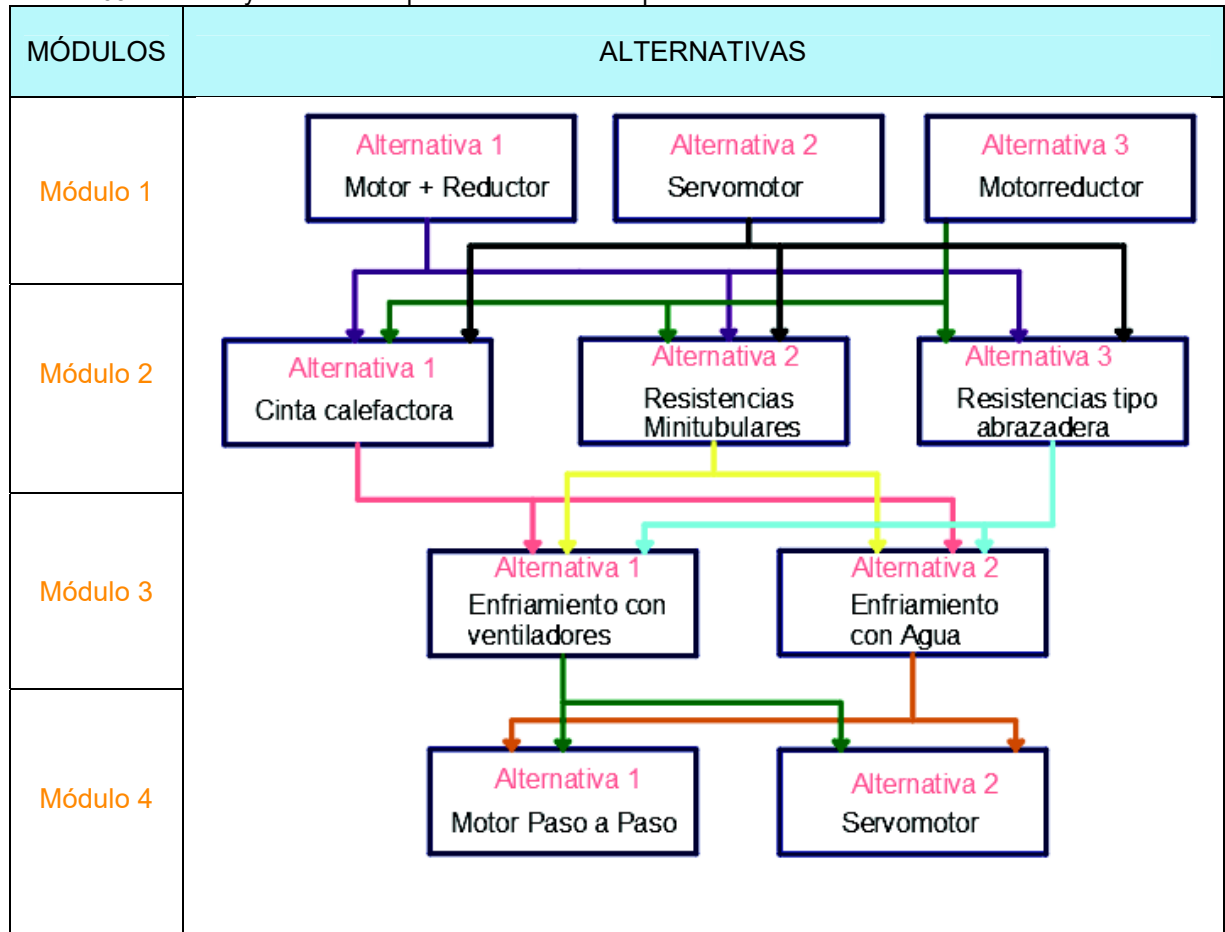
SOLUCIÓN	Torque	Espacio	Bajo Costo	Facilidad de Montaje	Mantenimiento	$\Sigma+1$	Prioridad
Solución 1	0,141	0,109	0,104	0,094	0,104	1,552	1
Solución 2	0,141	0,109	0,052	0,094	0,052	1,448	2

(Fuente: Propia)

Se concluye el análisis del método ordinal corregido de criterios ponderados tabla 2.64, que el motor a pasos es la alternativa más idónea para el sistema de bobinado.

2.4.2.5 MÓDULOS QUE CONFORMAN LA MÁQUINA

Tabla 2.65. Módulos y alternativas que conforman la máquina



(Fuente: Propia)

Del análisis y evaluación realizada, las alternativas seleccionadas en cada módulo son las siguientes:

- MÓDULO 1
Alternativa 2: Servomotor

- MÓDULO 2
Alternativa 3: Resistencia tipo abrazadera

- MÓDULO 3
Alternativa 1: Enfriamiento con ventiladores

- MÓDULO 4
Alternativa 1: Motor paso a paso

2.4.3 Solución final de los módulos

Como resultado final de los módulos se obtiene el modelo presentado a continuación:

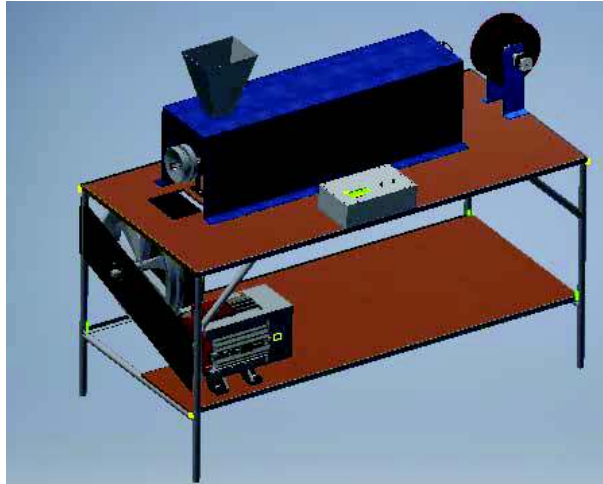


Figura 2.20. Diseño final de la máquina extrusora.
(Fuente: Propia)

2.5 CÁLCULOS

2.5.1 Cálculo de la capacidad de la máquina extrusora

Para calcular la capacidad de producción de la máquina recicladora y extrusora de PLA, se tomará un valor estimado, el cual servirá como base para el resto de los cálculos de la máquina.

La capacidad estimada de la extrusora será de 2 Kg/h.

$$Producción = 2 \frac{Kg}{h}$$

2.5.2 HUSILLO

El husillo es el componente principal de trabajo en la máquina extrusora. Generalmente para la transformación de plásticos se utilizan husillos que su diámetro oscile entre 9 y 580 mm y una relación L/D entre 6 y 40, los valores dependerán de la producción y aplicación para el cual están diseñados. (Savgorodny, 1973)

2.5.2.1 Cálculo de la Relación L/D

Para el cálculo de esta relación se tomaron en cuenta las consideraciones de "Blow Molding Handbook", en el cual se recomienda que esta relación sea entre 20 a 30.

$$R = \frac{L}{D} \quad (1)$$

Donde:

L = Longitud del husillo

D = Diámetro del husillo

$$R = \frac{760 \text{ mm}}{35 \text{ mm}}$$

$$R = 21,71$$

Por lo tanto se encuentra dentro del rango establecido.

2.5.2.2 Parámetros del Husillo

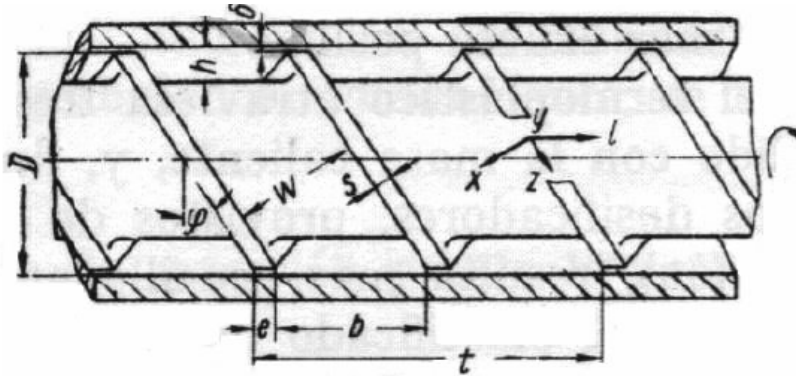


Figura 2.21. Sección de un cilindro con husillo
(Fuente: Savgorodny, V.K.)

Para el cálculo de un husillo se recomienda emplear las ecuaciones empíricas detalladas a continuación:

$$t = 0,8 * D \quad (2)$$

Donde:

t = paso

D = Diámetro

$$t = 0,8 * 35$$
$$t = 28 [mm]$$

Para la profundidad del canal se utiliza la siguiente ecuación:

$$h = 0,16 * D \quad (3)$$

Donde:

h = profundidad del canal

D = Diámetro

$$h = 0,16 * 35$$
$$h = 5,6 [mm]$$

Para el cálculo de la anchura de la cresta del filete se lo realiza utilizando la siguiente ecuación:

$$e = 0,06 * D \quad (4)$$

Donde:

e = anchura de la cresta del filete

D = Diámetro

$$e = 0,06 * 35$$
$$e = 2,1 [mm]$$

Para el cálculo del huelgo radial entre la cresta del filete del husillo y el cilindro:

$$\delta = 0,003 * D \quad (5)$$

Donde:

δ = huelgo radial entre la cresta del filete del husillo y el cilindro.

D = Diámetro

$$\delta = 0,003 * 35$$
$$\delta = 0,10 [mm]$$

Tabla 2.66. Características principales del Husillo

Característica	Magnitud
Longitud total (L_T)	860 [mm]
Longitud Ranurada (L)	760 [mm]
Diámetro (D)	35 [mm]
Espacio entre husillo y canal (δ)	0.10 [mm]
Paso (t)	28 [mm]
Anchura de la cresta del filete (e)	2 [mm]
Profundidad del canal (h)	5.6 [mm]

(Fuente: Propia.)



Figura 2.22. Husillo
(Fuente: Propia)

2.5.2.3 Cálculo de fuerzas en el husillo

El análisis de las Fuerzas y momentos en un husillo son fundamentales para comprobar las dimensiones previamente determinadas en el husillo y determinar los esfuerzos máximos admisibles.

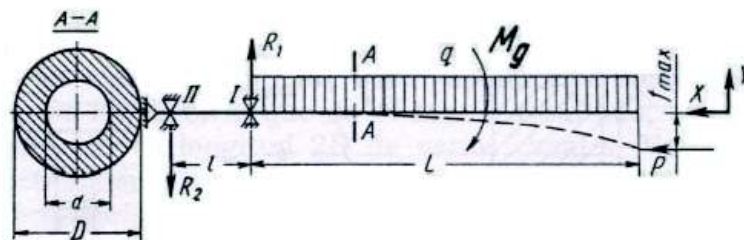


Figura 2.23. Diagrama de fuerzas de un husillo
(Fuente: (Savgorodny, 1973))

Donde:

P= Fuerza axial

M_g= Momento de giro

q= Carga uniformemente repartida originada por el peso del husillo.

Los cálculos iniciales del husillo se determinan fácilmente mediante las siguientes formulas:

$$M_g = 9550 * \frac{N}{n} [N * m] \quad (6)$$

Donde:

N = es la potencia del motor en kW.

n= el número de rpm del husillo.

Calculamos el número de rpm del husillo

$$n = \frac{R}{2,3 * D^2 * h * G} \quad (7)$$

Donde:

n= número de rpm del husillo

R= Cantidad de material en libras por hora = 4.40 lb/h.

D= Diámetro del husillo en pulgadas = 1.38 pulg.

h= profundidad de sección de dosificación en pulgadas

G= gravedad especifica = 1.24 gr/cm³

En la ecuación 7 reemplazamos los datos:

$$n = \frac{R}{2,3 * D^2 * h * G}$$
$$n = \frac{4.4}{2,3 * 1,38^2 * 0,220 * 1,24}$$

$$n = 3,7 \frac{rev}{min}$$

Calculamos la potencia requerida:

$$n = \frac{K^2 * N}{\pi * D^3} \quad (8)$$

Donde:

n= número de rpm del husillo

K = constante de proporcionalidad = 66,7

N= potencia [W].

D= Diámetro del husillo

De la fórmula 8 despejamos la potencia y reemplazamos los valores

$$N = \frac{n * \pi * D^3}{K^2}$$

$$N = \frac{3,6 * \pi * 35^3}{66,7^2}$$

$$N = 108,99 [W]$$

$$N = 0,14 [HP]$$

Con estos datos calculamos el torque con la formula (6)

$$M_g = 9550 * \frac{0,109}{3,6} [N * m]$$

$$M_g = 289,15 [N * m]$$

Para el cálculo de fuerzas en el husillo, se debe comprobar la esbeltez mediante la siguiente formula:

$$\lambda = \frac{\alpha * L}{R_i} \quad (9)$$

Donde:

λ = Esbeltez del husillo

α = 2.

L= longitud del husillo en m.

R_i = Radio de inercia de la sección [m].

$$R_i = \sqrt{\frac{J}{F}} \quad (10)$$

Donde:

J= momento de inercia de la sección transversal [m⁴].

F= superficie transversal del husillo en el corte A-A' de la figura 2.22 [m²].

$$J = \frac{\pi * D^2}{64} * (1 - u^4) [m^4] \quad (11)$$

Donde :

J= momento de inercia de la sección transversal.

D= Diámetro del husillo

u= relación existente entre los diámetros del husillo.

$$u = \frac{d}{D} \quad (12)$$

$$u = \frac{20}{35}$$

$$u = 0.571$$

$$F = \frac{\pi * D^2}{4} * (1 - u^2) [m^2] \quad (13)$$

$$F = \frac{\pi * 0.035^2}{4} * (1 - 0.571^2) [m^2]$$

$$F = 6.49E^{-4} [m^2]$$

Para calcular el momento de inercia, sustituimos valores en la ecuación (11)

$$J = \frac{\pi * 0.035^4}{64} * (1 - 0.571^4) [m^4]$$

$$J = 6.49E^{-8} [m^4]$$

Calculamos el radio de inercia con la ecuación (10)

$$R_i = \sqrt{\frac{6.49E^{-8} [m^4]}{6.49E^{-4} [m^2]}}$$

$$R_i = \sqrt{1.015E^{-4} [m^2]}$$

$$R_i = 0.01 [m]$$

Con los valores obtenidos ya podemos calcular la esbeltez del husillo con la fórmula (9)

$$\lambda = \frac{2 * 0,76}{0,01}$$

$$\lambda = 150,8$$

Los valores iniciales para el cálculo en el husillo se los realiza de la siguiente manera:

$$P = F * p [N] \quad (14)$$

Donde:

F= Superficie de la sección transversal del husillo, sobre la que ejerce su presión el material. [m^2]

p= Presión específica del material en la parte delantera del cilindro. [$\frac{MN}{m^2}$]

Para calcular la presión específica se la realiza mediante la siguiente formula:

$$p = \frac{6 * \pi * D * L * n * \mu}{h^2 * \tan \varphi} \left[\frac{MN}{m^2} \right] \quad (15)$$

Donde:

D_x = diámetro variable de canal del husillo [m]

L= longitud del husillo [m]

n= # revoluciones por segundo

μ = Viscosidad efectiva

h= profundidad del canal [m]

φ = Ángulo de hélice del husillo

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{t}{\pi * D_x} \quad (16)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{28}{\pi * 27}$$

$$\varphi = 18,26^\circ$$

Sustituimos los datos en la ecuación (15):

$$p = \frac{6 * \pi * 0,02 * 0,760 * 0,6 * 700}{0,0056^2 * \tan 18,26} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

$$p = 11624480,5 \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

$$p = 11,62 \left[\frac{MN}{m^2} \right]$$

Sustituyendo los valores en la ecuación (14):

$$P = 6,49E^{-4} [m^2] * 11624480,5 \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

$$P = 7544,2 [N]$$

La tensión tangencial máxima sobre la superficie del husillo está dada por:

$$\tau = \frac{16 * M_g}{\pi * D^3 * (1 - u^4)} \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad (17)$$

$$\tau = \frac{16 * 289,15}{\pi * 0,035^3 * (1 - 0,571^4)} \left[\frac{MN}{m^2} \right]$$

$$\tau = 38,4 \left[\frac{MN}{m^2} \right]$$

Para calcular la carga repartida q, utilizamos la siguiente ecuación:

$$q = \frac{\text{Peso del husillo}}{\text{Longitud del husillo}} \left[\frac{N}{m} \right] \quad (18)$$

$$q = \frac{44,39}{0,85} \left[\frac{N}{m} \right]$$

$$q = 52,22 \left[\frac{N}{m} \right]$$

La Tensión Normal σ está dada por la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{P}{F} + \frac{M_f}{W_o} \quad (19)$$

Donde:

M_f = Momento de flexión máximo

W_o = Momento con respecto al eje neutro W_o .

$$M_f = \frac{q * L^2}{2} \quad (20)$$

$$M_f = \frac{69,17 * 0,76^2}{2}$$

$$M_f = 15,08 \text{ [Nm]}$$

$$W_o = \frac{\pi * D^3}{32} * (1 - u^4) \quad (21)$$

$$W_o = \frac{\pi * 0,035^3}{32} * (1 - 0,571^4)$$

$$W_o = 3,762E^{-6} \text{ [m}^3\text{]}$$

Sustituimos los valores en la ecuación (19)

$$\sigma = \frac{7544,2 \text{ [N]}}{6,49E^{-4} \text{ [m}^2\text{]}} + \frac{15,08 \text{ [Nm]}}{3,762E^{-6} \text{ [m}^3\text{]}}$$

$$\sigma = 15,63 \left[\frac{MN}{m^2} \right]$$

Para la solidez del husillo se aplica la siguiente ecuación:

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma^2 + 4 * \tau^2} \quad (22)$$

$$\sigma_T = \sqrt{15,63^2 + 4 * 38,4^2}$$

$$\sigma_T = 78,37 \left[\frac{MN}{m^2} \right]$$

La fuerza máxima al aplicar la carga repartida se determina a partir de:

$$f_{Max} = \frac{q * L^4}{8 * E * J} \quad (23)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad del Material = 200 GPa

$$f_{Max} = \frac{52,22 \left[\frac{N}{m} \right] * 0,76^4}{8 * 200e^9 * 6,49E^{-8} \text{ [m}^4\text{]}}$$

$$f_{Max} = 1,67e^{-4}[m]$$

A partir del valor obtenido se puede deducir que el husillo tendrá una mínima deflexión como producto de los esfuerzos implicados.

2.5.2.4 Cálculo del factor de seguridad

El material utilizado es el acero A-36. $S_y = 250$ [MPa].

$$\eta_s = \frac{S_y}{\sigma_T} \quad (24)$$

Debido a que en el proyecto se utiliza Acero sin certificación se toma el 80 % del valor del S_y , por lo tanto la ecuación (24) quedaría

$$\eta_s = \frac{0,8 * 250}{78,35}$$

$$\eta_s = 2,55$$

2.5.2.5 Cálculo de la carcasa del Husillo

La carcasa del husillo es considerada como un cilindro de pared gruesa, para el diseño de éste, se ha tomado las fórmulas empíricas de Savgorodny,

$$D_i = D + 2 * \delta \quad (25)$$

$$D_i = 35 + 2 * 0,10$$

$$D_i = 35,2 \text{ mm}$$

Donde:

δ = Holgura (Ecuación 5)

D_i = Diámetro interno de la carcasa del husillo

D = Diámetro del husillo

El espesor de la carcasa del husillo se calcula con la formula a continuación descrita:

$$e = ri \left\{ 1 - \sqrt{\frac{2 * pi}{\sigma_T - 2 * pi}} \right\} \quad (26)$$

Donde:

e = Espesor de la pared del cilindro (m)

r_i = Radio interno del cilindro (m)

p_i = Presión interna del cilindro (MPa)

σ_T = Esfuerzo máximo de fluencia del material (cilindro) (MPa)

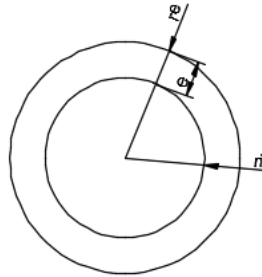


Figura 2.24. Carcasa del husillo
(Fuente: Propia)

$$e = 0,01 [m] \left\{ 1 - \sqrt{\frac{2 * 11,62 \left[\frac{MN}{m^2} \right]}{78,37 \left[\frac{MN}{m^2} \right] - 2 * 11,62 \left[\frac{MN}{m^2} \right]}} \right\}$$

$$e = 0,004 [m]$$

2.5.3 TOLVA DE ALIMENTACIÓN

La Tolva de alimentación debe soportar el material a ser extruido al menos durante una hora.

Tomando en cuenta los datos anteriores:

- Capacidad de extrusión 1 hora de operación: 2 kg.
- Densidad del PLA: 1,21 gr/cm³

$$V_{TOLVA} = \frac{m}{densidad} \quad (27)$$

Donde:

V_{TOLVA} = Volumen de la tolva

m = masa en kg del material a extruir durante una hora

$$V_{TOLVA} = \frac{2 \text{ kg}}{1210 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,0016 \text{ m}^3$$

La Tolva de alimentación debe soportar por lo menos 0,0016 m³.

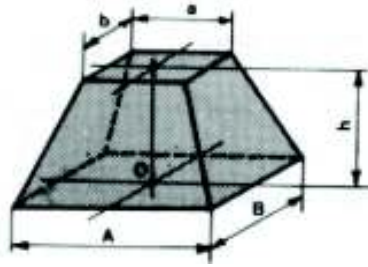


Figura 2.25. Volumen de la Tolva
(Fuente: (Larburu, 1990))

$$V = \frac{h}{6} [(2A + a) * B + (2a + A) * b] \quad (28)$$

$$V = 0,0016 \text{ m}^3$$

$$0,0016 \text{ m}^3 = \frac{h}{6} [(2A + a) * B + (2a + A) * b]$$

$$V = \frac{0,212}{6} [(2 * 0,263 + 0,090) * 0,263 + (2 * 0,090 + 0,263) * 0,032]$$

$$V = \frac{0,212}{6} [(0,616) * 0,263 + (0,443) * 0,032]$$

$$V = \frac{h}{6} [0,162 + 0,014]$$

$$V = \frac{0,212}{6} [0,176]$$

$$V = 0,006 \text{ m}^3$$

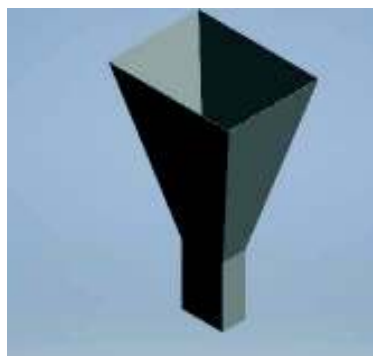


Figura 2.26. Tolva diseñada
(Fuente: Propia)

Para la garganta de alimentación se toma a consideración las siguientes formulas:

$$\text{Longitud de abertura} = 1,5 * D \quad (29)$$

$$\text{Ancho de apertura} = 0,7 * D$$

(30)

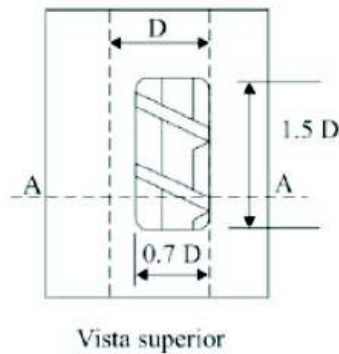


Figura 2.27. Abertura de la garganta del cilindro.
(Fuente: (Rosato, 2003))

De esta forma se logra un llenado suficiente del paso del tornillo.

$$\text{Longitud de abertura} = 1,5 * 50 = 75 \text{ mm}$$

$$\text{Ancho de apertura} = 0,7 * 50 = 35 \text{ mm}$$

2.5.4 TRANSFERENCIA DE CALOR

Se debe transmitir energía calórica al arrancar la extrusora. Los tipos de calentadores eléctricos seleccionados son: resistencias eléctricas tipo abrazadera diseñadas en las medidas del cilindro, estas resistencias se sitúan por zonas, las cuales están conectadas a termocuplas para el control de temperatura.

2.5.4.1 Potencia de las resistencias eléctricas

La potencia que deben suministrar las resistencias para elevar las temperaturas tanto del cilindro como del husillo, están en función del calor que se produce en estado transitorio.

2.5.4.2 Balance energético

Se considera el cilindro y el husillo como 2 sistemas, el husillo no gira y es despreciable el aire que se encuentra en el interior de los mismos.

2.5.4.2.1 Sistema 1: Carcasa

A continuación se presenta el balance de energía de la carcasa del husillo.

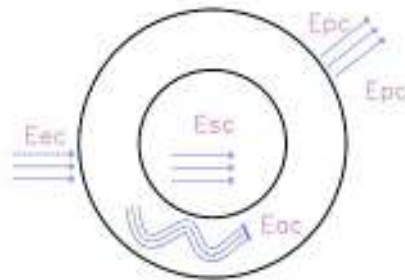


Figura 2.28. Balance energético en la carcasa del husillo.
(Fuente: Propia)

$$E_{ec} = E_{ac} + E_{sc} + E_{pc}$$

(31)

Donde:

E_{ec} = Energía que entra a la carcasa proveniente de las resistencias (W).

E_{ac} =Energía que almacena el cilindro (W).

E_{sc} = Energía que sale del cilindro hacia el husillo (W).

E_{pc} = Energía que sale del cilindro por pérdidas (W).

2.5.4.2.2 Sistema 2: Husillo

A continuación se presenta el balance de energía del husillo.

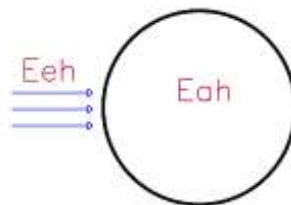


Figura 2.29. Balance energético del husillo.
(Fuente: Propia)

$$E_{eh} = E_{ah}$$

(32)

Donde:

E_{eh} = Energía que entra al husillo.

E_{ah} = Energía que almacena el husillo

2.5.4.3 Sistema Global

Se considera despreciable el aire interno del sistema, así como también que existe un contacto térmico ideal entre el cilindro y el husillo, es decir que la energía que sale del cilindro es la misma que la que ingresa en el husillo.

A continuación se detallan las ecuaciones a utilizarse que son tomadas del libro de Incropera.

$$E_{ac} = m_c * cp_c * \left(\frac{dT_c}{dt} \right) \quad (33)$$

Donde:

E_{ac} = Energía que almacena el cilindro.

m_c = Masa del cilindro = 4,47 [kg].

cp_c = Calor específico del material del cilindro. (0,081 Kcal/Kg K, acero)

$\frac{dT_c}{dt}$ = Variación de la temperatura de la carcasa respecto al tiempo.

$$E_{pc} = h * Ac * [T_{c(t)} - T_a] \quad (34)$$

Donde:

E_{pc} = Energía que sale hacia el exterior del cilindro.

h = Coeficiente de transferencia de calor ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$).

A = Área de transferencia de calor (m^2).

$T_{c(t)}$ = Temperatura del cilindro, variable con el tiempo ($^\circ C$).

T_a = Temperatura del ambiente ($^\circ C$).

$$E_{ah} = m_h * Cp_h * \left(\frac{dT_h}{dt} \right) \quad (35)$$

Donde:

E_{ah} = Energía que almacena el husillo.

m_h = Masa del husillo = 4,53 [kg].

Cp_h = Calor específico del material del husillo. (0,081 Kcal/Kg K, acero)

$\frac{dT_h}{dt}$ = Variación de la temperatura del husillo con respecto al tiempo.

Se considera que el cilindro y el husillo tienen la misma temperatura conforme varía el tiempo. En la ecuación 31 se sustituye los valores y las ecuaciones 32, 33, 34 y 35 se obtiene la siguiente ecuación:

$$E_{ec} = m_c * cp_c * \left(\frac{dT_c}{dt}\right) + m_h * Cp_h * \left(\frac{dT_h}{dt}\right) + h * Ac * [T_{c(t)} - T_a] \quad (36)$$

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{dT_h}{dt} = \frac{dT}{dt}$$

$$E_{ec} = [m_c * cp_c + m_h * Cp_h] * \left(\frac{dT}{dt}\right) + h * Ac * [T_{c(t)} - T_a]$$

La energía que ingresa es igual al Q entonces:

$$Q_{(t)} = [m_c * cp_c + m_h * Cp_h] * \left(\frac{dT}{dt}\right) + h * Ac * [T_{c(t)} - T_a]$$

$$\frac{Q_{(t)}}{[m_c * cp_c + m_h * Cp_h]} = \left(\frac{dT}{dt}\right) + \frac{h * Ac}{[m_c * cp_c + m_h * Cp_h]} * [T_{c(t)} - T_a]$$

Esta ecuación se resuelve con las siguientes sustituciones:

$$Q_{(t)} = T_{(t)} - T_a$$

$$dQ_{(t)} = dT_{(t)}$$

$$P = \frac{Q_{(t)}}{[m_c * cp_c + m_h * Cp_h]}$$

$$M = \frac{h * Ac}{[m_c * cp_c + m_h * Cp_h]}$$

Al sustituir estos valores la ecuación se reduce a:

$$\left(\frac{dQ_{(t)}}{dt}\right) + M * [Q_{(t)}] = P$$

Resolviendo la ecuación diferencial se obtiene:

$$Q_{(t)} = Q_o * e^{-Mt} + [1 - e^{-Mt}] \left(\frac{P}{M}\right)$$

Sustituyendo los valores anteriores y considerando que $T_{c(0)} = T_{\text{ambiente}}$, se obtiene la siguiente ecuación:

$$T_{(t)} = \left[1 - e^{-\frac{h \cdot AC}{m_c \cdot cp_c + m_h \cdot cp_h} \cdot t} \right] \cdot \left(\frac{Q}{h \cdot AC} \right) + T_a \quad (37)$$

En la ecuación 37 interviene el coeficiente de transferencia de calor por convección, el cual se obtiene más adelante.

2.5.4.4 Cálculo del coeficiente de Transferencia de calor (h)

La suma del coeficiente de convección y del coeficiente de radiación es igual al coeficiente de Transferencia de calor:

$$h = h_c + h_r \quad (38)$$

Donde:

h_c = Coeficiente de convección [W/m²°C]

h_r = Coeficiente de radiación [W/m²°C]

2.5.4.1 Cálculo del coeficiente de Convección

Transferencia de calor por convección es la transferencia de energía que ocurre dentro de un fluido debido a los efectos combinados de conducción y movimiento global de fluido. Para el cálculo de su coeficiente se utiliza la ecuación de temperatura media de película.

$$T_f = \frac{T_s + T_a}{2} \quad (39)$$

Donde:

T_s = Temperatura de la superficie del cilindro = 180[°C] = 453,15 [K].

T_a = Temperatura ambiente = 20[°C] = 293,15 [K].

$$T_f = \frac{453,15 + 293,15}{2}$$

$$T_f = 373,15 \text{ [K]}$$

Numero de Prandtl = $P_r = 0,695$

Viscosidad Cinemática = $\gamma = 23,46 \cdot E^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right]$

Conductividad Térmica = $k = 0,033 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$

Las propiedades están evaluadas en $T=@T_f$. (Anexo IV)

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (40)$$

$$\beta = \frac{1}{373,15}$$

$$\beta = 2,68 * 10^{-3} [K^{-1}]$$

Se calcula el número de Grashof:

$$Gr = \frac{\beta * g * \Delta t * D^3}{\gamma^2} \quad (41)$$

Donde:

g = gravedad = 9,8 [m/s²]

D = Diámetro de la carcasa = 0,05 [m]

Δt = Variación de la temperatura

$$\Delta T = T_s - T_a \quad (42)$$

$$\Delta T = 453,15 - 293,15$$

$$\Delta T = 160 [K]$$

Se sustituyen los datos en la ecuación 41:

$$Gr = \frac{2.68 * 10^{-3} [K^{-1}] * 9.8 * 160 * 0.05^3}{(23,46 * E^{-6})^2}$$

$$Gr = \frac{\beta * g * \Delta t * D^3}{\gamma^2}$$

$$Gr = 95,44 * 10^4$$

El número de Rayleigh es el producto del número de Prandtl y el número de Grashof.

$$Ra = Pr * Gr \quad (43)$$

$$Ra = 0,695 * 95,44 * 10^4$$

$$Ra = 6,63 * 10^5$$

Con estos valores se puede calcular el número de Nusselt, con la ecuación descrita a continuación.

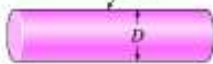
<p>Cilindro horizontal</p> 	<p>D</p>	<p>$Ra_D \leq 10^{12}$</p>	<p>$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.559/Pr)^{3/4}]^{1/4}} \right\}^2 \quad (9-25)$</p>
--	-----------------------	---------------------------------------	--

Figura 2.30. Número de Nusselt
(Fuente: (Cengel, 2007))

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 * Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (44)$$

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 * (6,63 * 10^5)^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{0,695} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{3,614}{\left[1 + (0,804)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{3,614}{1,207} \right\}^2$$

$$Nu = 12,92$$

A continuación se presenta la ecuación del número de Nusselt para convección libre.

$$Nu = \frac{h_c * D}{k} \quad (45)$$

Despejando h_c y sustituyendo valores se obtiene:

$$h_c = \frac{Nu * k}{D}$$

$$h_c = \frac{12,92 * 0,033 \left[\frac{W}{mK} \right]}{0,05 [m]}$$

$$h_c = 8,52 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

2.5.4.2 Cálculo del coeficiente de Radiación

Este coeficiente depende de la emisividad del material (ϵ), que es la efectividad del cuerpo como un radiador térmico a una temperatura.

$$q = A * \epsilon_1 * \sigma * (T_s^4 - T_a^4) \quad (46)$$

Donde:

q = Perdidas por radiación

A = Área de transferencia de calor [m^2]

ϵ_1 = Emisividad de la superficie = 0,61

σ = Constante de Stefan- Boltzmann = $5,67 * 10^{-8}$ [$W/m^2 * K^4$]

T_s = Temperatura absoluta de la superficie [K].

T_a = Temperatura del ambiente [K].

(47)

$$q = A * h_r * (T_s - T_a)$$

De las ecuaciones 48 y 49 se obtiene la siguiente relación:

$$h_r = \frac{\epsilon_1 * \sigma * (T_s^4 - T_a^4)}{(T_s - T_a)}$$

$$h_r = \frac{0,61 * 5,67 * 10^{-8} * (453,15^4 - 293,15^4)}{(453,15 - 293,15)}$$

$$h_r = 7,51 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

Con los datos ya obtenidos podemos calcular el coeficiente de transferencia de calor total:

$$h = h_c + h_r$$

$$h = 8,52 + 7,51$$

$$h = 16,03 \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

2.5.4.3 Pérdidas de calor

2.5.4.3.1 Pérdidas por conducción

Estas pérdidas se desprecian debido a que existe un contacto mínimo entre la carcasa y los soportes a los que se encuentra fijo.

2.5.4.3.2 Pérdidas por convección

Estas pérdidas de calor son directamente proporcional a la superficie expuesta, y estas se deben al aire que entra en contacto con la superficie, el cual se calienta y tiende a elevarse por su baja densidad.

$$Q_c = h_c * \Delta T * S \quad (48)$$

Donde:

S=superficie en m²

$$S = \pi * D * L \quad (49)$$

Donde:

D= diámetro de la carcasa =0,05 [m]

L= Longitud de la carcasa =0,76 [m]

$$S = \pi * 0,05 * 0,75$$

$$S = 0,118 [m^2]$$

Resolviendo:

$$Q_c = 8,52 * (453,15 - 293,15) * 0,118$$

$$Q_c = 160,85 [W]$$

2.5.4.3.3 Pérdidas por radiación

Las pérdidas de radiación se las determina de la siguiente forma:

$$Q_r = S * \epsilon_1 * \sigma * (T_s^4 - T_a^4) \quad (50)$$

$$Q_r = 0,118 * 0,61 * 5,67 * 10^{-8} * (453,15^4 - 293,15^4)$$

$$Q_r = 141,95 [W]$$

2.5.4.4 Incremento de la energía interna del polímero

La siguiente relación permite determinar la cantidad teórica de calor necesario para elevar una masa de material a determinada temperatura.

$$Esp = \frac{dm}{dt} * Cp * (T_s - T_a) \quad (51)$$

Donde:

Esp = Cantidad de calor agregada al polímero [kcal/h].

$\frac{dm}{dt}$ = Flujo másico del polímero en la zona = 2 [kg/h].

Cp = Calor específico del polímero=0,2820 [kcal/kg°C]

T_s = Temperatura del polímero a la salida [°C].

T_a = Temperatura del polímero a la entrada [°C].

$$Esp = 2 * 0,2820 * (160)$$

$$Esp = 90,24 \left[\frac{kcal}{h} \right]$$

$$Esp = 104,95 [W] = Qn$$

Tomando en cuenta los datos calculados anteriormente, ahora se procede a calcular la energía que sale del sistema:

$$Es = Qr + Qc + Qn \quad (52)$$

$$Es = 141,95 [W] + 160,85 [W] + 104,95[W]$$

$$Es = 407,75 [W]$$

2.5.4.5 Cálculo de la potencia requerida para bandas calefactoras

De la ecuación 37:

$$T(t) = \left[1 - e^{-\frac{h_c * Ac}{m_c * Cp_c + m_h * Cp_h} * t} \right] * \left(\frac{Q}{h_c * Ac} \right) + T_a$$

Tabla 2.67. Resumen de datos obtenidos

Coefficiente de Transferencia	h_c	8,52	$\left[\frac{W}{m^2 K} \right]$
Área de la carcasa	Ac	0,118	$[m^2]$
Masa de la carcasa	mc	4,74	$[kg]$
Masa del husillo	mh	4,53	$[kg]$
Calor específico de la carcasa	Cp_c	0,081	$\left[\frac{kcal}{kgK} \right]$
Calor específico del husillo	Cp_h	0,081	$\left[\frac{kcal}{kgK} \right]$
Calor entregado por las resistencias (4 resistencias)	Q	800	$[W]$
Temperatura ambiente	T_a	20	$[^{\circ}C]$

(Fuente: Propia)

$$Q_{real} = Q - Q_r - Q_c \quad (53)$$

$$Q_{real} = 800 - 141,95 - 160,85[W]$$

$$Q_{real} = 497,2[W]$$

Es la potencia neta considerando pérdidas.

$$T(t) = \left[1 - e^{-\frac{h \cdot Ac}{m_c \cdot c_{pc} + m_h \cdot c_{ph}} \cdot t} \right] \cdot \left(\frac{Q_{real}}{h \cdot Ac} \right) + T_a$$

$$T(t) = [1 - e^{-1,339 \cdot t}] \cdot \left(\frac{497,2}{8,52 \cdot 0,118} \right) + 293,15$$

$$T(t) = [1 - e^{-1,339 \cdot t}] \cdot 494,5 + 293,15$$

Graficando la Ecuación se obtiene la variación de la temperatura en función del tiempo.

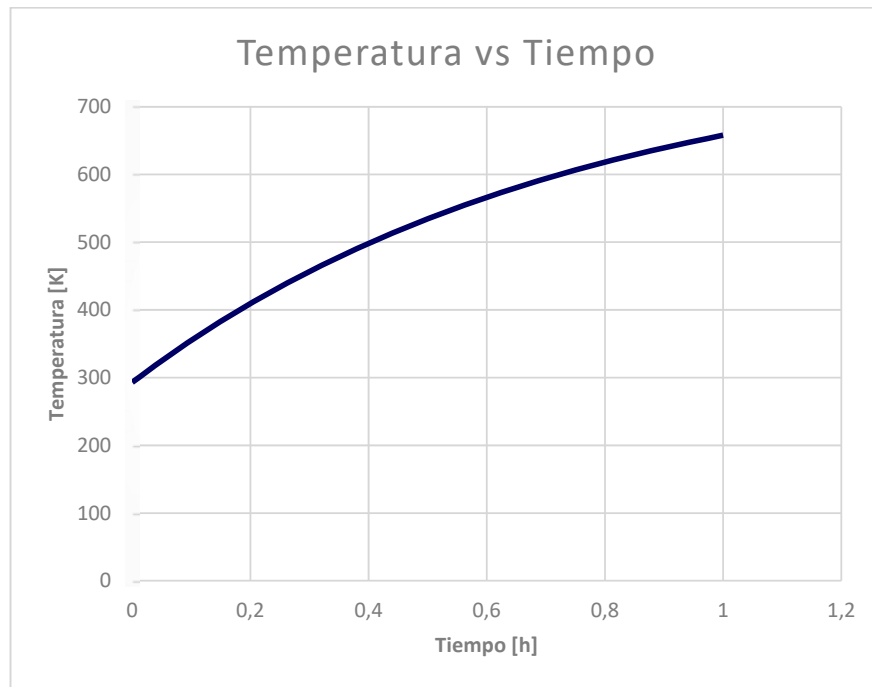


Figura 2.31. Variación de la temperatura en función del tiempo
(Fuente: Propia)

El tiempo estimado para alcanzar la temperatura deseada es de 0,35 [h] es decir aproximadamente 21 [min.]. Por lo cual es necesario la utilización de un material aislante y así reducir las pérdidas de calor y disminuir el tiempo de calentamiento a la temperatura deseada.

2.5.4.6 Aislamiento

Para el aislamiento térmico de la extrusora se utiliza fibra de vidrio debido a su costo, y su fácil comercialización. A continuación se presentan algunas características de esta fibra.

- La fibra de vidrio no se pudre ni se deteriora.

- Peso ligero.
- No necesita mantenimiento.
- Conductividad térmica, $k = 0,038 \text{ [W/m}^*\text{K]}$
- Calor específico, $C_p = 835 \text{ [J/kg}^*\text{K]} = 0,199 \text{ [kcal/kg}^*\text{K]}$

Para el cálculo analizamos lo siguiente:

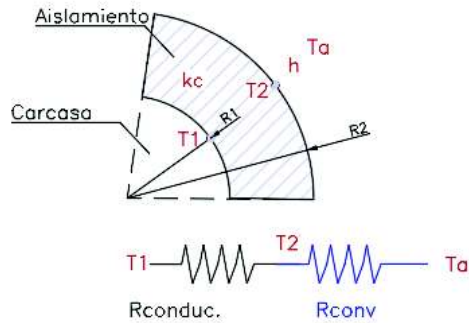


Figura 2.32. Cálculo de aislamiento térmico
(Fuente: Propia)

$$Q_{sa} = \frac{\Delta T}{R_{Total}} \quad (54)$$

$$R_{Total} = R_{cond} + R_{conv} \quad (55)$$

Para calcular las resistencias se los realiza mediante las siguientes formulas:

$$R_{cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * L * k_{material}} \quad (56)$$

$$R_{conv} = \frac{1}{h_1 * (\pi * r_2 * L)} \quad (57)$$

Para calcular el radio crítico de aislamiento se sigue la ecuación propuesta por (Cengel, 2007):

$$R_{cr} = \frac{k}{h} \quad (58)$$

$$R_{cr} = \frac{0,038}{8,52}$$

$$R_{cr} = 0,004 \text{ [m]}$$

Se debe tomar en cuenta que el radio crítico de aislamiento es igual a 4 milímetros pero para mayor facilidad se instala 1cm de aislamiento y con ese valor se procede a los siguientes cálculos:

Donde:

$$r_2 = 0,06 \text{ [m]}$$

$$r_1 = 0,05 \text{ [m]}$$

$$L = 0,75 \text{ [m]}$$

$$k_{material} = 0,038 \text{ [W/m}^{\circ}\text{K]}$$

$$h_1 = 8,52 \text{ [W/m}^2\text{K]}$$

Resolvemos la ecuación (54) y obtenemos el calor que sale del sistema al ambiente

$$Q_{sa} = \frac{160}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 * \pi * L * k_{material}} + \frac{1}{h_1 * (\pi * r_2 * L)}}$$

$$Q_{sa} = \frac{160}{\frac{\ln\left(\frac{0,06}{0,05}\right)}{2 * \pi * 0,75 * 0,038} + \frac{1}{8,52 * (\pi * 0,06 * 0,75)}}$$

$$Q_{sa} = 86,56 \text{ [W]}$$

Con estos valores se grafica y se obtiene lo siguiente:

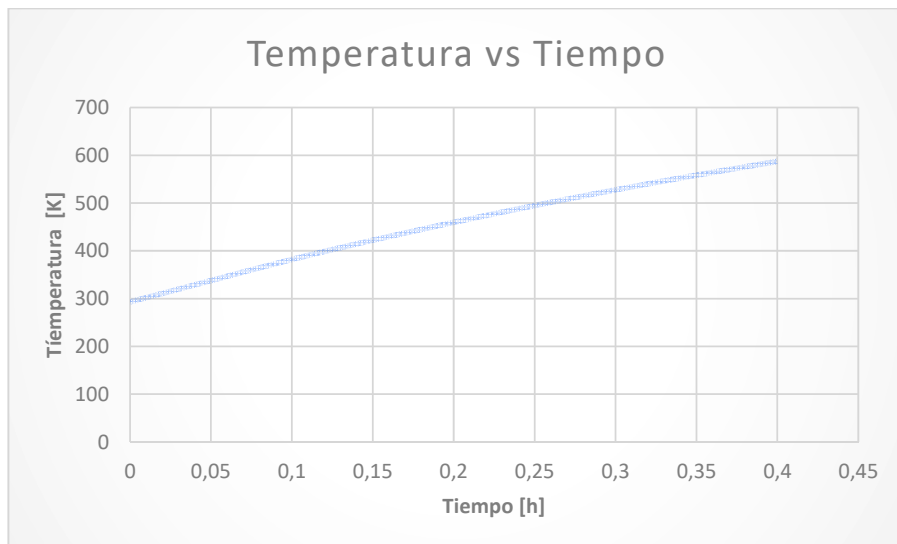


Figura 2.33. Variación de la Temperatura en el tiempo.
(Fuente: Propia)

Se puede observar que el aislamiento reduce el tiempo de calentamiento de 21 min a 11 minutos.

2.5.5 ENFRIAMIENTO

El enfriamiento de un cordón de extrusión está determinado por la transferencia de calor a través del polímero, tomando en cuenta el medio de refrigeración, y el espesor del cordón extruido, en el presente trabajo el medio es flujo de aire, entregado por ventiladores.

Un buen cálculo para determinar el enfriamiento del polímero en su proceso puede obtenerse con el uso de la ecuación de transferencia de calor.

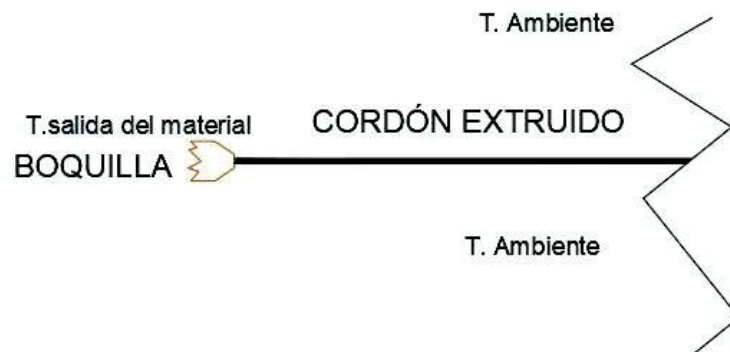


Figura 2.34. Diagrama del cordón extruido
(Fuente: Propia)

A continuación se determina la razón de pérdida de temperatura en el filamento por convección natural, sin ningún flujo adicional de aire:

Se considera las características descritas a continuación:

T_s = Temperatura de salida del material = 190°C.

T_∞ = Temperatura ambiente = 20°C.

Se calcula la temperatura de película:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (59)$$

$$T_f = \frac{190 + 20}{2} = 105 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

De la tabla A4 de Incropera se obtiene los siguientes valores:

$$k = 32,12 * 10^{-3} \left[\frac{w}{m \cdot K} \right]$$

$$Pr = 0,694$$

$$\gamma = 23,99 * 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (60)$$

$$\beta = \frac{1}{378}$$

$$\beta = 2,6 * 10^{-3} [K^{-1}]$$

Se calcula el número de Grashof:

$$Gr = \frac{\beta * g * \Delta T * D^3}{\gamma^2} \quad (61)$$

Donde:

$$g = \text{gravedad} = 9,8 [m/s^2]$$

$$D = \text{Diámetro de la carcasa} = 0,05 [m]$$

$$\Delta T = \text{Variación de la temperatura}$$

$$\Delta T = T_s - T_a \quad (62)$$

$$\Delta T = 190 - 20$$

$$\Delta T = 170$$

Se sustituyen los datos en la ecuación 61:

$$Gr = \frac{\beta * g * \Delta t * D^3 * Pr}{\gamma^2}$$

$$R_{aD} = \frac{2.6 * 10^{-3} [^\circ K^{-1}] * 9.8 \left[\frac{m}{s^2} \right] * 170 [K] * 0.00175^3 [m^3] * 0,694}{(23,99 * E^{-6})^2 \left[\frac{m^2}{s} \right]}$$

$$R_{aD} = 28,48$$

Con estos valores se puede calcular el número de Nusselt, con la ecuación descrita a continuación.

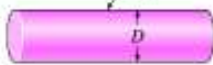
<p>Cilindro horizontal</p> 	<p>D</p>	<p>$Ra_D \leq 10^{12}$</p>	<p>$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.559/Pr)^{4/5}]^{1/4}} \right\}^2$ (9-25)</p>
--	-----------------------	---------------------------------------	--

Figura 2.35. Número de Nusselt
(Fuente: (Cengel, 2007))

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0,387 * Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (63)$$

$$Nu = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 * (28,48)^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{0,694} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = 1,34$$

A continuación se presenta la ecuación del número de Nusselt para convección libre.

$$Nu = \frac{h_c * D}{k} \quad (64)$$

Despejando h_c y sustituyendo valores se obtiene:

$$h_c = \frac{Nu * k}{D}$$

$$h_c = \frac{1,322 * 0,03212 \left[\frac{W}{mK} \right]}{0,00175 [m]}$$

$$h_c = 24,71 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

$$Q = h_c * As * \Delta T \quad (65)$$

$$As = \pi * D * L \quad (66)$$

Si el cálculo se lo realiza para una longitud de 25 cm:

$$As = \pi * D * L$$

$$As = \pi * 0,00175 * 0,25$$

$$As = 0,00137 [m^2]$$

Sustituyendo valores:

$$Q = 24,71 \left[\frac{W}{m^2K} \right] * 0,00137 [m^2] * 170[K]$$

$$Q = 5,65 [W]$$

Donde Q será la potencia calorífica que perderá por conveccion natural.

Por lo tanto se plantea añadir flujo de aire mediante ventiladores como se muestra en la siguiente figura:

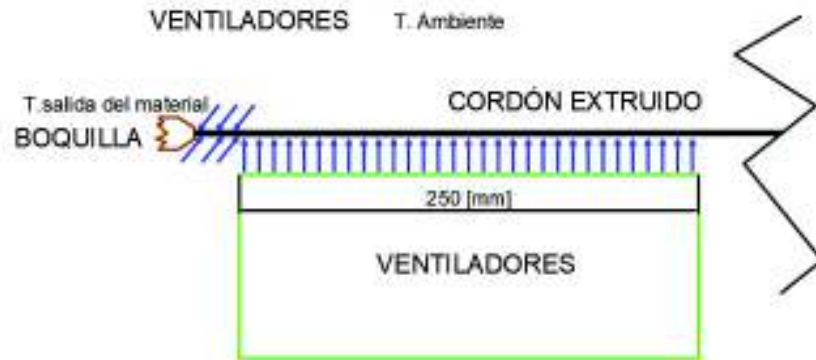


Figura 2.36. Diagrama del enfriamiento mediante ventiladores
(Fuente: Propia)

Tomamos los datos calculados anteriores:

Se considera las características descritas a continuacion:

T_s = Temperatura de salida del material = 190°C.

T_∞ = Temperatura ambiente = 20°C.

Velocidad del aire en los ventiladores = 0,7 [m/s].

Flujo masico en los ventiladores = 12 CFM

T_f = 105 [°C]

De la tabla A4 de Incropera se obtiene los siguientes valores:

$$k = 32,12 * 10^{-3} \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$$

$$Pr = 0,694$$

$$\gamma = 23,99 * 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

$$Re = \frac{VD}{\gamma} \quad (67)$$

$$Re = \frac{0,7 * 0,00175[m]}{23,99 * 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s} \right]}$$

$$Re = 51,06$$

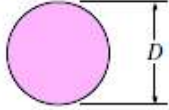
Sección transversal del cilindro	Fluido	Rango de Re	Número de Nusselt
Círculo 	Gas o líquido	0.4-4	$Nu = 0.989Re^{0.330} Pr^{1/3}$
		4-40	$Nu = 0.911Re^{0.385} Pr^{1/3}$
		40-4 000	$Nu = 0.683Re^{0.466} Pr^{1/3}$
		4 000-40 000	$Nu = 0.193Re^{0.618} Pr^{1/3}$
		40 000-400 000	$Nu = 0.027Re^{0.805} Pr^{1/3}$

Figura 2.37. Ecuaciones para el cálculo del número de Nusselt
(Fuente: Cengel)

$$Nu = 0,683 * Re^{0,466} Pr^{\frac{1}{3}} \quad (68)$$

$$Nu = 0,683 * 51,06^{0,466} * 0,694^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu = 3,78$$

Retomando la ecuacion 64:

$$h = \frac{k * Nu}{D}$$

$$h = \frac{32,12 * 10^{-3} \left[\frac{W}{m * K} \right] * 3,78}{0,00175 [m]}$$

$$h = 69,37 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$$

$$Q = h * As * \Delta T$$

$$Q = 69,37 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right] * 0,00137 [m^2] * 170[K]$$

$$Q = 16,15 [W]$$

Para determinar el calor total transferido desde el filamento:

$$m = \rho * \frac{1}{6} * \pi * D^3 \quad (69)$$

$$m = 1,24 \left[\frac{kg}{m^3} \right] * \frac{1}{6} * \pi * 0,00175^3 [m^3]$$

$$m = 3,47 * E^{-9} [kg]$$

$$Q_{total} = m * C_p * \Delta T$$

$$Q_{total} = 3,47 * E^{-9} [kg] * 1,18E^3 \left[\frac{J}{kg * ^\circ C} \right] * 170 [^\circ C]$$

$$Q_{total} = 0,000698 [J]$$

$$\Delta t = \frac{Q_{total}}{Q}$$

$$\Delta t = \frac{0,000698 [J]}{16,15 [W]} = \frac{220660 [J]}{16,15 \left[\frac{J}{s} \right]}$$

$$\Delta t = 0,00004 [s]$$

Con el valor de $t = 0,00004 [s]$, se puede comprobar que el flujo de aire enviado es suficiente para enfriar el filamento.

2.5.6 BOQUILLA

La boquilla de la máquina tiene como función obtener la forma del filamento. La geometría y las dimensiones de sus partes influyen en las dimensiones finales del filamento extruído, para esto, se debe prever la deformación que sufre el material debido al cambio de temperatura. La figura 2.38 se muestra un ejemplo de boquilla o dado típico.

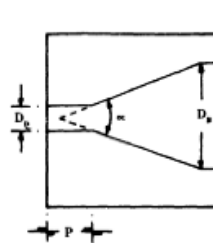


Figura 2.38. Dado de forma tronco-cónico
(Fuente: <https://es.slideshare.net/betorossa/proceso-de-extrusin-de-plsticos>)

La boquilla utilizada para el proyecto es la mostrada en la figura 2.39, es un elemento normalizado y se encuentra disponible en las tiendas electrónicas. El diámetro final del agujero depende del espesor del filamento. Para el presente proyecto se utiliza varias boquillas con diámetros diferentes; 1.2, 1.4, 1.5, 1.7, 1.8, [mm], siendo la de 1,8 [mm], que mejores resultados aporta.



Figura 2.39. Boquilla

(Fuente: <https://www.mastoner.com/impresoras-3d/extrusor/boquillas/1.75mm/boquilla-extrusor-mk8-0-4mm-1-75mm>)

2.5.7 TERMOCUPLAS

Las termocuplas son sensores de temperatura más común utilizado en la industria, normalmente estas termocuplas vienen encapsuladas dentro de un tubo de acero inoxidable, en un extremo está el cabezal protegido dentro de una caja redonda de aluminio y en el otro está el extremo de la unión.

A continuación se detalla las termocuplas más comercialmente conocidas:

Termocuplas metálicas				
Tipo ANSI-ISA	Combinación de metales	Sensibilidad	Composición química	Rangos de temperatura
J	Hierro/ constantan	5,6 mV/ 100 ° C	Fe 44 Ni:55 Cu	-40 a + 750
K	Cromel/ Alumel	3,6 mV/ 100 ° C	90 Ni:9 Cr 94 Ni:Al:Mn:Fe	-40 a +1200
T	Cobre/ constantan	4,5 mV/ 100 ° C	Cu 44 Ni:55 Cu	-50 a + 400
E	Cromel/ constantan	7,9 mV/ 100 ° C	90 Ni:9 Cr 44 Ni:55 Cu	-40 a +900

Figura 2.40. Tipos de Termocuplas.

(Fuente: (ARIAN CONTROL & INSTRUMENTACIÓN, 2010))

Para la selección de la termocupla se recomienda utilizar la tipo K, ya que resultan satisfactorias para uso continuo en vacío, en atmosferas oxidantes, reductoras e inertes. Además de ser preciso, económico, confiable y tiene un amplio rango de temperatura como se detalla en la figura 2.40.



Figura 2.41. Termocupla tipo K

(Fuente: https://electropro.pe/index.php?route=product/product&product_id=637)

2.5.8 CONTROL DE TEMPERATURA

El controlador de temperatura es un dispositivo o conjunto de elementos con los cuales se establece la temperatura a la cual se desea trabajar, este dispositivo monitorea y envía el orden de cambio de ser necesario. Para el control de temperatura de la máquina extrusora, por comodidad, economía y facilidad de uso se lo realiza mediante una tarjeta acondicionadora Max6675 conectado a un Arduino Mega.

A continuación se detalla los principales componentes utilizados, las programaciones, datasheet, y características principales de los mismos se encuentran en el Anexo IV del presente documento

2.5.8.1 Tarjeta acondicionadora Max6675

La tarjeta acondicionadora Max6675 es un convertidor analógico al digital especializado en termopares tipo K. Dentro de este controlador se encuentran los dispositivos electrónicos necesarios para amplificar, compensar y convertir a digital el voltaje generado por la termocupla, lo que hace más sencillo el conectar a un microcontrolador. Las características técnicas se encuentran en el Anexo VI.



Figura 2.42. Módulo Max6675
(Fuente: Propia)

2.5.8.2 Arduino Mega

El Arduino Mega es una tarjeta con un microcontrolador que tiene pines de entrada así como de salida, analógicas y digitales. Esta tarjeta Arduino Mega es programada en un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje Processing/ Wiring.

Esta tarjeta puede comunicarse con una laptop mediante un conector USB, utilizando lenguajes como Flash, Processing, MaxMSP, etc. Las características técnicas se encuentran en el Anexo IV.



Figura 2.43. Tarjeta Arduino Mega
(Fuente: <http://arduino.cl/arduino-mega-2560/>)

2.5.8.3 LCD Shield Keypad

Esta tarjeta permite adaptar prototipos con rapidez en los arduinos, viene provisto de un teclado, es de fácil adaptación y de un bajo costo.



Figura 2.44. LCD Shiel Keypad
(Fuente: <https://www.prometec.net/producto/lcd-keypad/#>)

2.6 Fotografías del sistema de control terminado

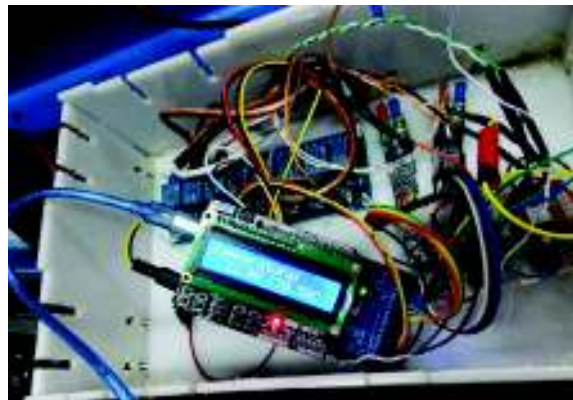


Figura 2.45. Cableado interno del sistema de control.
(Fuente: Propia)

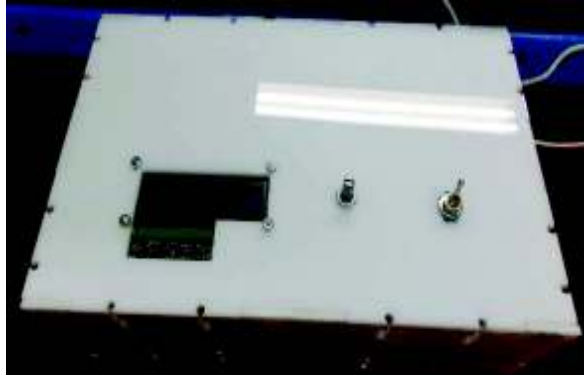


Figura 2.46. Caja de elementos electrónicos.
(Fuente: Propia)



Figura 2.47. Puesta a pruebas del sistema de control de temperatura.
(Fuente: Propia)

3. RESULTADOS

3.1. Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el diseño y construcción de la máquina recicladora y extrusora de plástico PLA. Los planos de conjunto, así también como los de taller se encuentran en el Anexo IX.


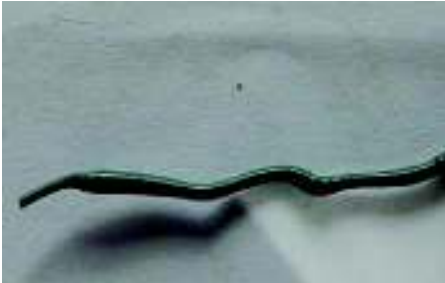






Figura 3.1. Máquina Extrusora
(Fuente: Propia)

3.1.1. Pruebas realizadas



En la siguiente tabla se detallan los resultados obtenidos en el filamento, en las diferentes pruebas y diferentes configuraciones.

Tabla 3.1. Resultados de pruebas realizadas en la máquina extrusora.

N°	IMAGEN	OBSERVACIONES
1		PLA RECICLADO: <ul style="list-style-type: none">- Temperatura de extrusión: 210 [°C].- Material sobrecalentado, no es apto para enrollar, y por lo tanto se desecha.
2		PLA RECICLADO: <ul style="list-style-type: none">- Temperatura de extrusión: 200 [°C].- Material no es apto para enrollar.- Filamento semi-uniforme.- Frágil al tacto.

3		<p>PLA RECICLADO:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Temperatura de extrusión: 190 [°C]. - Material apto para enrollar. - Filamento uniforme. - Frágil. - Diámetro 1,6 [mm]
4		<p>PET RECICLADO:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Temperatura de extrusión: 250 [°C]. - Material apto para enrollar. - Filamento semi-uniforme. - Semi-flexible - Diámetro ≈1,4 [mm].
5		<p>PET RECICLADO 90% + PLA RECICLADO 10%:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Temperatura de extrusión: 240 [°C]. - Material apto para enrollar. - Filamento no uniforme con grumos. - No existe fusión completa entre la mezcla, se presentan grumos los cuales son de PLA - Semi-flexible
6		<p>PLA RECICLADO:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Temperatura de extrusión: 195 [°C]. - Material apto para enrollar. - Filamento uniforme. - Diámetro ≈ 1 [mm].

7		<p>PLA RECICLADO 92% + PVA 8%:</p> <ul style="list-style-type: none"> - En esta prueba no se pudo obtener resultados favorables, no hubo fusión completa, y el PVA se sobrecalentó, cristalizándose y con una apariencia similar a la sal de mar.
8		<p>PLA RECICLADO:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Temperatura de extrusión: 190 [°C]. - Material apto para enrollar. - Diámetro ≈ 1,5 [mm]. - Material frágil.
9		<p>PLA SOFT RECICLADO:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Temperatura de extrusión: 200 [°C]. - Material no uniforme, presenta grumos. - Material flexible.
10		<p>PLA SOFT RECICLADO:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Temperatura de extrusión: 190 [°C]. - Material apto para enrollar. - Diámetro ≈ 1,5 [mm]. - Material flexible.

11		<p>PLA SOFT RECICLADO:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Temperatura de extrusión: $\approx 190 - 195$ [°C]. - Material apto para enrollar. - Diámetro $\approx 1,75$ [mm]. - Material flexible. - Buen acabado superficial
12		<p>PLA SOFT RECICLADO:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Temperatura de extrusión: $\approx 190 - 195$ [°C]. - Diámetro $\approx 1,75$ [mm]. - Material flexible. - Material resistente. -

(Fuente: Propia)

Además de las pruebas descritas anteriormente, se tomó como materia prima para la máquina extrusora ABS, el cual resultó tóxico y no se pudo completar la prueba.

3.1.2. Puesta a prueba en impresión

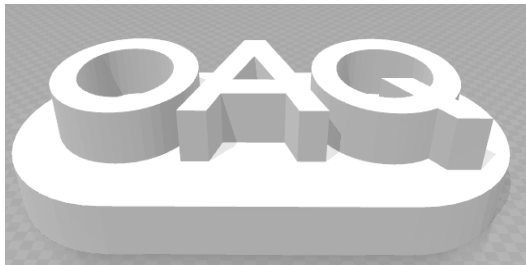
En las fotografías siguientes se muestra la impresión realizada con el filamento obtenido de la máquina, así como también una comparación con una impresión con material sin reciclar.

Tabla 3.2. Fotografías de puesta de impresión del filamento

 <p>Filamento reciclado extraído de la máquina extrusora.</p>	 <p>Impresora 3D para las pruebas.</p>
--	--



Alimentación del filamento



Modelo a imprimir



Alimentación del filamento al extrusor.



Impresión



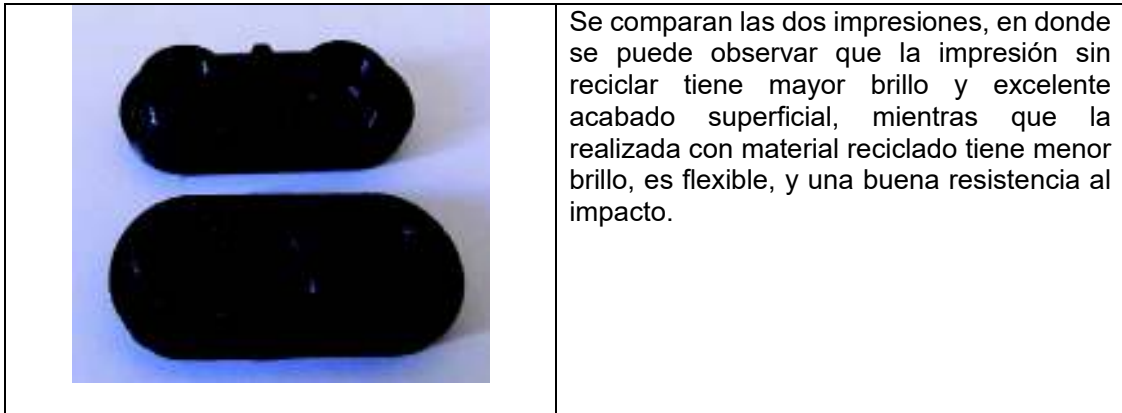
Impresión



Modelo impreso con material sin reciclar.



Modelo impreso con material reciclado.



(Fuente: Propia)

3.1.3. Manual de operación de la máquina extrusora

Se debe tener en cuenta varios parámetros previos a iniciar la operación en la extrusora, tales como: materia prima suficiente para la extrusión, revisar las conexiones eléctricas, y realizar un precalentamiento de la máquina.

Procedimiento de operación:

1.- Encender el interruptor tanto de las resistencias como el de control de temperatura.



Figura 3.2. Fuente de poder
(Fuente: Propia)

2.- Cuando el sistema alcanza la temperatura requerida (figura 3.3), aproximadamente después de 12 minutos; encender el interruptor del servomotor conectado al husillo (figura 3.4) y esperar entre 5 a 10 minutos para que la temperatura se estabilice.

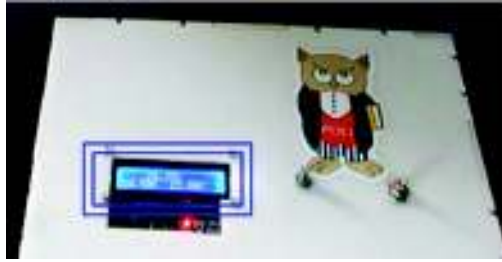


Figura 3.3. Panel de temperatura
(Fuente: Propia)



Figura 3.4. Servomotor
(Fuente: Propia)

3.- Introducir el material en la tolva de alimentación.



Figura 3.5. Alimentación del material.
(Fuente: Propia)

4.- Encender el interruptor del motor a pasos acoplado al rodete.

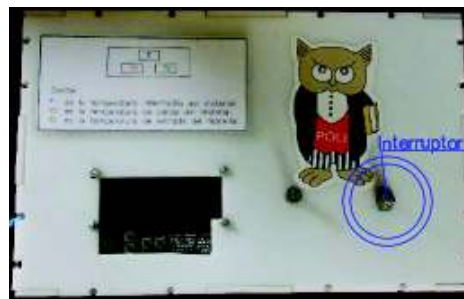


Figura 3.6. Panel de control de temperatura.
(Fuente: Propia)

5.- Al iniciar, el cordón de extrusión se debe acoplar al rodete de tal forma que empiece a enrollar el material.



Figura 3.7. Rodete con filamento
(Fuente: Propia)

6.- Monitorear constantemente la velocidad del motor a pasos, para que no exista rotura del cordón.



Figura 3.8. Control de velocidad del rodete
(Fuente: Propia)

7.- Apagar los equipos en el siguiente orden: 1.- resistencias eléctricas, 2.- servomotor, 3.- motor a pasos.

Tabla 3.3. Orden de apagado del prototipo.

1	2	3
<p>A photograph showing a black electrical control panel with the brand name "FORZA" visible. A red switch is highlighted with a green box. A blue tool is visible on the left side of the panel.</p>	<p>A photograph of a white servo motor. A red switch on the front panel is highlighted with a green box.</p>	<p>A photograph of the control panel shown in Figure 3.8, featuring a speedometer and a cartoon cat illustration. A blue circle highlights the speedometer area.</p>

(Fuente: Propia)

8.- Al final se debe retirar el material aun sobrante en la tolva, y limpiar la máquina extrusora.

3.1.4. Mantenimiento y limpieza de la máquina extrusora

El mantenimiento de la máquina depende de los componentes y de las recomendaciones dadas por los fabricantes de los mismos.

Para realizar el mantenimiento se prevé un desmontaje total de la máquina, limpieza y engrasado de varios elementos de ser necesario.

- Servomotor, el fabricante recomienda realizar un mantenimiento cada 500 horas de operación. El cual consiste en; eliminación de polvo, aceite y suciedad; inspección de los pernos de fijación; y engrasado de rodamientos.
- Alineación de las poleas, para evitar el desgaste excesivo de las correas.
- El husillo debe ser tratado con pasta pulidora después de las 100 horas de operación.
- Se recomienda después de 200 horas de operación, pulir las superficies tanto del husillo como de la carcasa con esponja metálica.

3.1.5. Limitaciones de la máquina

A continuación se describen las limitaciones de la máquina extrusora:

- No se puede extruir ABS, debido a que la máquina no es cerrada, y el material emana compuestos tóxicos.
- No se puede extruir materiales metálicos, podría causar daños a los elementos.
- La máquina solo trabaja con energía eléctrica 110 [V].
- La máquina puede extruir PET y PLA SOFT, PLA, estos han sido los materiales puestos a prueba, pero se debe tomar en cuenta las temperaturas de extrusión y cambiar las mismas en la programación, para obtener resultados óptimos.
- La máquina no debe trabajar más de 8 horas continuas para evitar el recalentamiento del motor.
- La máquina extrusora no soporta agentes corrosivos debido a los materiales utilizados en su construcción.
- Las temperaturas de trabajo no deben exceder los 500 [°C], debido a que ciertos elementos pueden sobrecalentarse.

3.2. Costos

A continuación se describen los costos invertidos en el prototipo de la máquina extrusora, la estructura base del sistema de control.

3.2.1. Costos de la parte extrusora de la máquina

3.2.1.1. Costos de la mano de obra de la parte extrusora de la máquina

Tabla 3.4. Costo de mano de obra empleado en la construcción de la parte extrusora de la máquina.

Maquinaria	Cantidad	Torno		Soldadura		Tronzadora		Dobladora		Taladro		Operario General		Subtotal	TOTAL
		Cant.	[\$]	Cant.	[\$]	Cant.	[\$]	Cant.	[\$]	Cant.	[\$]	Cant.	[\$]		
Costo HHM		15		15		3		4		4		2,5			
Pieza															
Tornillo sin fin	1	4	60,00	0	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0	0,00	4	10,00	70,00	70,00
Carcasa	1	0	0,00	0	0,00	0,25	0,75	0,5	2,00	0,1	0,40	0,25	0,63	3,78	3,78
Polea Aluminio 15"	1	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,25	1,00	0,25	0,63	1,63	1,63
Polea 3 "	1	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,25	1,00	0,75	1,88	2,88	2,88
Polea 2"	1	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,25	1,00	0	0,00	1,00	1,00
Soportes	4	0	0,00	0,1	1,50	0,10	0,30	0,1	0,40	0,25	1,00	1	2,50	5,70	22,80
Tolva	1	0	0,00	0,5	7,50	0,25	0,75	0	0,00	0	0,00	0,75	1,88	10,13	10,13
Eje	2	0,25	3,75	0	0,00	0,25	0,75	0	0,00	0	0,00	1	2,50	7,00	14,00
Total		4,25	63,75	0,6	9	0,85	2,55	0,6	2,4	1,1	4,4	8	20,00	102,10	126,20

(Fuente: Propia)

3.2.1.2. Costos del material de la parte extrusora de la máquina

Tabla 3.5. Costo del material empleado en la construcción de la parte extrusora de la máquina.

Pieza	Angulo A-36		Platina A-36		Plancha A-36		Plancha Latón		Acero de transmisión		TOTAL
	Cant.	1,1 [\$/m]	Cant.	0,8 [\$/m]	Cant.	30 [\$/m]	Cant.	1 [\$/m]	Cant.	22 [\$/M]	
[mm]	20 x 20 x 3 x 6000		19,05 x 2		2600 x 1200 x 2		2000 x 1200 x 1		Diám. 26,67		
Costo unitario											
		0,66	0,24		15		0		0		
Tolva	0,6	0,66	0,3	0,24	0,5	15	0	0	0	0	15,9
Carcasa	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	2
Soportes	0	0	3	2,4	0	0	0	0	0	0	2,4
Husillo	0	0	0	0	0	0	0	0	1	22	22
TOTAL	0,6	0,66	3,3	2,64	0,5	15	2	2	1	22	42,3

(Fuente: Propia)

3.2.1.3. Costos de los elementos normalizados de la parte extrusora de la máquina

Tabla 3.6. Costo de los elementos normalizados empleados en la construcción de la parte extrusora de la máquina.

Material	Dimensión/ Capacidad	Cantidad	Valor unitario [\$]	Valor Total [\$]
Servomotor	500 [W]	1	200	200
Motor paso a paso	1.8 deg/step	1	25	25
Polea de aluminio	15 "	1	21,5	21,5
Polea de aluminio	3 1/2"	1	3,21	3,21
Polea de aluminio	2 "	1	2,05	2,05
Chumaceras	3/4"	2	5	10
Tubo fundido	2"	1	23	23
Resistencias tipo abrazadera	2"	4	24,5	98
Fibra de vidrio	1 "	1	5	5
Cinta de embalaje aluminio altas temperaturas	AFT - 250	1	7	7
Pernos Carrocería	3 x 1/4 "	10	0,1	1
Tuercas	1/8"	38	0,05	1,9
Pernos cabeza hexagonal	1 1/2 x 1/4 "	28	0,05	1,4
Tornillos para madera	3/4 x 1/8 "	14	0,04	0,56
Arandelas	1/8"	32	0,03	0,96
Arandelas de presión	1/8"	18	0,05	0,9
Rodete	Plástico	1	4	4
TOTAL				405,48

(Fuente: Propia)

3.2.1.4. Costo total de la parte extrusora de la máquina

Tabla 3.7. Costo total de la parte extrusora de la máquina.

Rubro	Valor
Mano de Obra	126,20
Material	42,3
Elementos Normalizados	405,48
Subtotal	573,98
Imprevistos (10%)	57,398
Total	631,38

(Fuente: Propia)

3.2.2. Costos de la estructura de la máquina extrusora

3.2.2.1. Costos de la mano de obra empleada en la construcción de la estructura base para la máquina extrusora

Tabla 3.8. Costos de la mano de obra empleada en la construcción de la estructura base

Maquinaria Costo HHM	Cantidad	Soldadura		Tronzadora		Taladro		Operario General		Subtotal	TOTAL
		Cant.	[\$]	Cant.	[\$]	Cant.	[\$]	Cant.	[\$]		
Pieza	1	1	15,00	1,00	3,00	0	0,00	1	2,50	20,50	20,50
Estructura metálica mesa	1	0	0,00	0,25	0,75	0,25	1,00	1	2,50	4,25	4,25
Placa soporte para chumaceras	1	1	15	1,25	3,75	0,25	1,00	2	5,00	24,75	24,75

(Fuente: Propia)

3.2.2.2. Costos del material empleado en la construcción de la estructura base

Tabla 3.9. Costos del material empleado en la construcción de la estructura base.

Pieza	Angulo A-36		Tubo estructural		Plancha A-36		Madera Triplex		TOTAL
	20 x 20 x 3 x 6000	1,1 [\$]/m	Diám. 25,4	3,55 [\$]/m	2600 x 1200 x 2	30 [\$]/m	1500 x 80 x 8		
Costo unitario	Cant.	[\$]	Cant.	[\$]	Cant.	[\$]	Cant.	[\$]	[\$]
Estructura Mesa	7	7,7	3	10,65	0	0	5	10	28,35
Placa soporte para chumaceras	0	0	0	0	0,2	6	0	0	6
TOTAL	7	7,7	3	10,65	0,2	6	5	10	34,35

(Fuente: Propia)

3.2.2.3. Costo total de la construcción de la estructura base

Tabla 3.10. Costo total de la construcción de la estructura base.

Rubro	Valor
Mano de Obra	24,75
Materiales	34,35
Subtotal	59,10
Imprevistos (10%)	5,91
Total	65,01

(Fuente: Propia)

3.2.3. Costos del sistema de control

3.2.3.1. Costos de los elementos normalizados del sistema de control

Tabla 3.11. Costos de los elementos normalizados del sistema de control.

Material	Dimensión/ Capacidad	Cantidad	Valor unitario [\$]	Valor Total [\$]
Arduino	MEGA	1	25,5	25,5
Arduino	NANO	1	6	6
Protoboard		1	4,04	4,04
Modulo LCD	2 x 16	1	12	12
Módulo Relay	8 x 5 V	1	18	18
2 kit termocupla K y módulo Max6675		2	13,5	27
Caja acrílico	Acrílico blanco	1	30	30
Tornillo Galvanizado	2"	40	0,003	0,12
Tuerca	1"	40	0,004	0,16
Cables para conexiones		50	0,08	4
Pulsadores		2	0,25	0,5
Tuercas	1/8"	38	0,05	1,9
TOTAL				129,22

(Fuente: Propia)

3.2.3.2. Costo total del sistema de control de la máquina extrusora

Tabla 3.12. Costo total del sistema de control de la máquina extrusora.

Rubro	Valor
Elementos Normalizados	129,22
Subtotal	129,22
Imprevistos (10%)	12,922
Total	142,14

(Fuente: Propia)

3.3. Costo Total de la máquina extrusora de plástico PLA

Tabla 3.13. Costo total de la máquina extrusora.

Máquina extrusora	631,38
Estructura	65,01
sistema de control	142,14
Subtotal	838,53
Costo Montaje (10%)	83,85
Costo Diseño (15%)	125,78
Utilidad (15%)	125,78
TOTAL	1173,94

(Fuente: Propia)

Se ha considerado un costo de imprevistos del 10% en todos los sistemas, también se considera el costo del diseño con un 15% y la utilidad a obtener es de 15 % con todo esto el costo total de la máquina es 1173,94 dólares americanos.

4. CONCLUSIONES

Finalizados el diseño, construcción y puesta a prueba de la máquina se presentan las conclusiones obtenidas durante la realización de todo el proyecto.

- Los cálculos pertinentes al husillo han sido consultados en el libro de (Savgorodny, 1973), en el cual se encuentran detallados claramente, éste elemento es de suma importancia, debido a que es el responsable del transporte, compresión y dosificación de la materia prima y por lo tanto de este elemento mecánico depende la calidad de filamento final.
- El husillo ha sido elaborado en un torno de precisión debido a la importancia del mismo en la máquina.
- La relación L/D del husillo es más de 21, por lo tanto cumple con lo recomendado por Savgorodny, para la extrusión, lo cual garantiza una mejor fusión de la materia prima, proporcionando un calentamiento uniforme y de esta forma mejorando el rendimiento de la extrusora.
- La flecha máxima del husillo es de 0.16 [mm] lo cual se traduce en que el husillo tendrá una mínima deflexión y por lo tanto no generara desgaste interno del husillo por rozamiento entre la carcasa y este elemento.
- En los cálculos de transferencia de Calor se puede verificar cuanto varía el tiempo de calentamiento con y sin aislamiento térmico, se puede observar que al momento de colocar el aislamiento, el tiempo de calentamiento se reduce de 21 a 11 minutos aproximadamente, lo cual mejora el rendimiento de la máquina.
- En la extrusión; la velocidad de extrusión, la temperatura a la que se encuentra el material y el flujo de materia prima son parámetros fundamentales, estos deben estar equilibrados de tal manera que el filamento resultante sea óptimo para el uso en la impresora 3D, en este modelo los parámetros son: Velocidad de extrusión de 15- 30 rpm, Temperatura de extrusión de 190°C, y el flujo de 2 kg/h.
- La fragilidad de la materia prima aumenta si se tiene un enfriamiento brusco, si se expone demasiado tiempo el PLA al calor tiende a perder propiedades químicas como físicas, esto se evidencia debido al cambio de color que se produce en el material pasando a un color oscuro. (ANEXO VIII).
- Para las pruebas realizadas en la máquina extrusora, se tomó en cuenta varias consideraciones; diferentes materiales para las pruebas, diferentes aditivos o mezclas entre los materiales, diferentes temperaturas de extrusión dependiendo del material o de la mezcla.

- Los materiales probados en la máquina fueron: PLA, PLA reciclado, PLA SOFT, ABS, PVA, PET, dando los mejores resultados la mezcla de PLA SOFT reciclado.
- El ABS se debe reciclar en ambientes abiertos o bien en una máquina cerrada debido a los fuertes, desagradables y tóxicos olores que emana. La extrusora construida en el presente proyecto tiene como limitación el reciclaje del ABS.
- El diámetro obtenido es 1,7 [mm], aunque no es el diámetro óptimo (1,75 [MM]), está dentro del rango en los requerimientos de la impresora Makerbot Replicator de 5^{ta} generación.
- Se realiza un manual de operación de la máquina a fin de alargar la vida útil de la misma, por seguridad y ergonomía se realizó el diseño y construcción de una carcasa para así evitar, quemadura y atrapamientos, así como también simbología de precaución para alertar sobre altas temperaturas y atrapamientos.
- Para los costos de la máquina extrusora se toma en cuenta factores como: mano de obra, materiales, elementos normalizados así como también imprevistos con un porcentaje de un 10% del subtotal, diseño con 15%, montaje con 10% y una utilidad de 15%, tomando en cuenta todos estos valores, el costo de comercialización de la extrusora es de 1173,94 dólares americanos.
- El enfriamiento y enrollamiento del material, es una de las partes críticas del diseño y construcción del prototipo de la máquina extrusora, se debe tener cuidado de no tensionar demasiado el filamento porque puede romperse o puede existir cambios en su diámetro. Se recomienda una velocidad de extrusión constante e igual que la velocidad del rodete para no tener inconvenientes.
- Se recomienda el volumen de la materia prima a extruir no sea mayor de 500 [mm³], para poder evitar posibles atascamientos, en caso de que la materia prima tenga mayor volumen, se recomienda cortarlos con una cizalla o triturarlos en una licuadora.
- Se recomienda un precalentamiento previo no menor a 20 minutos, para que tanto la carcasa, como el husillo estén con la temperatura necesaria para el proceso de extrusión.
- Se recomienda tener en cuenta la temperatura de extrusión del material a reciclar, para cambiar dichos datos en la programación del Arduino, y de esta forma obtener óptimos resultados.

Referencias Bibliográficas

- ARIAN CONTROL & INSTRUMENTACIÓN. (2010). *Nota Técnica*. Obtenido de <http://www.arian.cl/>: <http://www.arian.cl/espanol/support.htm>
- Beltran M., Marcilla A. (2012). *Tecnología de los polímeros. Procesado y Propiedades*. España : Diazotec. S.A.
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (Octava Edición ed.). México: McGraw Hill.
- Cargill . (2017). *Cargill. Helping the world thrive*. Obtenido de <https://www.cargill.com/about/thrive-stories>
- Cengel, Y. (2007). *Transferencia de Calor y Masa*. Mexico: McGraw Hill.
- Díaz del Castillo, F. (2012). *Conformado de Materiales Plásticos*. Cuautitlán, Mexico: UNAM.
- EDUPACK, C. (2015). PLA.
- Farrington D., Lunt J. (2005). *Biodegradable and sustainable fibres*. Reino Unido: R. S. Blackburn.
- Incropera, F. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor* (4ta Edición ed.). Mexico: PRENTICE HALL.
- Larburu, N. (1990). *Prontuario Máquinas*.
- Mariano. (01 de Septiembre de 2017). *Blogspot*. Obtenido de <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/08/poliacido-lactico-pla.html>
- Montero, L. (2012). *Métodos Físico- Químico de la caracterización de fibras de Polilactida*. Terrasa.
- Nova-Institut de Hürth . (Enero de 2017). Obtenido de Nova-Institut de Hürth : <http://nova-institut.de/>
- Palacios O. y Ramirez, J. (1992). *Diseño y construcción de una máquina extrusora por tornillo para material plástico*.
- Rosato, D. V. (2003). *Blow Molding Handbook*. Munich: HANSER.
- Savgorodny, V. K. (1973). *Transformación de plásticos*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Slideshare. (14 de Agosto de 2017). Obtenido de <https://es.slideshare.net/JoseGomez246/94095547-mecejecucionyprocesosdemecanizadoconformadoym>
- Suárez Romero, J. (2015). *Proyecto de máquina extrusora para creación de hilos de Poli Etilén Tereftalato*. Instituto Politécnico Nacional.
- Torre F., Ginjaume A. (2005). *Ejecución de procesos de Mecanizado, Conformado y Montaje*. España: Cengage Learning Paraninfo.

Anexos

Anexo I. Casa de la Calidad

Anexo II. Diagrama funcional

Anexo III. Propiedades PLA

Anexo IV. Transferencia de Calor

Anexo V. Simulación de la carcasa del cilindro

Anexo VI. Sistema de Control de Temperatura

**Anexo VII. Programación del control de temperatura en el
Arduino Mega y programación del motor a pasos en el
Arduino NANO**

Anexo VIII. Fotografías del proceso de construcción

Anexo IX. Planos