



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

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

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EXTRUSOR
DE POLÍMERO CON CONTROL DE TEMPERATURA E
INYECCIÓN DE COLOR PARA UNA IMPRESORA 3D
BASADA EN UN ROBOT DELTA**

AUTOR: JUAN ESTEBAN ORDÓÑEZ BONILLA

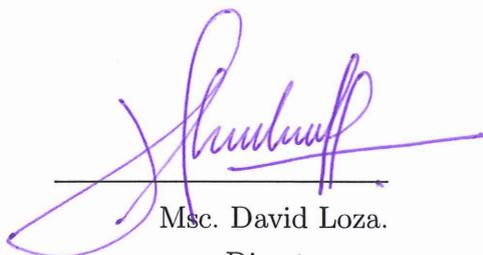
DIRECTOR: MsC. DAVID LOZA
CODIRECTOR: ING. HUGO ORTÍZ

SANGOLQUÍ
2015

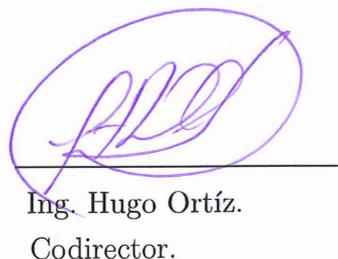
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El presente proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EXTRUSOR DE POLÍMERO CON CONTROL DE TEMPERATURA E INYECCIÓN DE COLOR PARA UNA IMPRESORA 3D BASADA EN UN ROBOT DELTA”, fue realizado en su totalidad por Juan Esteban Ordóñez Bonilla, como requisito parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecatrónico.



Msc. David Loza.
Director.



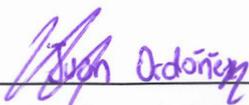
Ing. Hugo Ortíz.
Codirector.

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

El presente proyecto titulado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EXTRUSOR DE POLÍMERO CON CONTROL DE TEMPERATURA E INYECCIÓN DE COLOR PARA UNA IMPRESORA 3D BASADA EN UN ROBOT DELTA” ha sido desarrollado citando fuentes correspondientes y respetando las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes. En virtud de esta declaración, las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo son de virtud exclusiva de los autores.

ELABORADO POR:

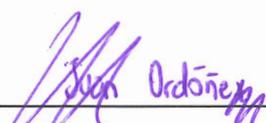


Juan Esteban Ordóñez Bonilla

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

AUTORIZACIÓN

Yo, Juan Esteban Ordóñez Bonilla autorizo a la UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE la publicación en la biblioteca de la institución del proyecto de grado titulado: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EXTRUSOR DE POLÍMERO CON CONTROL DE TEMPERATURA E INYECCIÓN DE COLOR PARA UNA IMPRESORA 3D BASADA EN UN ROBOT DELTA”** cuyo contenido, diseño y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.



Juan Esteban Ordóñez Bonilla

Sangolquí, 2015.

DEDICATORIA

Dedico la investigación y desarrollo del presente proyecto al ser supremo que nos permite abrir los ojos día a día, quien me brindo salud y sabiduría para finalizar el mismo. A mi mamá quien ha sido mi apoyo bajo cualquier circunstancia, brindándome las mejores alternativas para salir adelante. Padre y hermanas que bajo su apoyo siempre incondicional me han permitido formarme para ser algo mucho más importante que ser un gran profesional, convertirme en una persona de bien. A quienes considero amigos, con los que conviví todo tipo de situaciones y aventuras, que supimos siempre brindarnos el mejor apoyo y con el mejor de los ánimos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer al finalizar un proyecto exitosamente, va mas allá de nombrar a todos quienes hicieron de esto posible. De nada sirve enlistar a personas que realmente siempre brindaron de la mejor manera su incondicional apoyo. Y es que muchas veces un "muchas gracias!" queda corto comparando con toda la ayuda que me dieron.

Existen demasiadas personas que permitieron que esto se haga realidad, que simplemente bastaría espacio para nombrarlas. Un simple logro personal como excusa no basta para reconocer todo lo que en realidad ofrecieron, no es justo dejar afuera a todos los que a pesar de sus respectivas ocupaciones supieron dar una mano. Simplemente para quienes están presentes, Muchas Gracias!

RESUMEN

El presente proyecto desarrolla un sistema de extrusión combinando cinco distintos filamentos basandose en principios de inyección de polímero con propiedades térmicas de los termoplásticos con el principio de FDM (por sus siglas en inglés, Fusion Deposition Modeling), Deposición de material fundido. Para realizar dicho desarrollo es necesario determinar temperaturas de fusión como de transición vítrea de los polímeros que serán extruídos. Con dichas temperaturas se requiere determinar principios de transferencia de calor ya sea encerrar las zonas calientes o para disipar el calor en las zonas frías. Las temperaturas de extrusión en la zona caliente, se controla por un controlador PID manejado desde una tarjeta de control. La inclusión de varios filamentos a una misma cámara de mezcla representa la consideración de variables como la fuerza de empuje al filamento, los esfuerzos térmicos requeridos y manejos de diferentes temperaturas para cada filamento. Así, como el mismo hecho de fusionar filamentos que teóricamente comparten propiedades, pero en la práctica demuestran variaciones principalmente en las propiedades térmicas que es el aspecto fundamental del presente proyecto. La alimentación de cada filamento requiere un mecanismo de fricción entre un piñón y rodamiento que generará una fuerza perpendicular, está a su vez permite determinar la fricción necesaria para el manejo de alimentación del filamento a través de un actuador rotacional. Con este mismo principio de alimentación permite regular tanto el volumen de ingreso de distintos filamentos como el volumen de extrusión a través de la boquilla. Para el manejo de las distintas variables del proceso, se diseño una sencilla interfaz de usuario que permite visualizar y controlar tanto temperatura como ingreso de filamentos al sistema.

Palabras claves:

EXTRUSOR

POLÍMERO

IMPRESIÓN 3D

FDM

ABSTRACT

The present project develop extrusion system which combines five different filaments, basing in polymers injection principles with thermal properties of thermoplastics based on FDM (Fused Deposition Modelling). To perform this develop it's necessary determine fusion temperatures and the glass transition of the polymer which will be extruded. With those temperatures is required determine principles of heat transfer either enclosing heat zones or dissipate heat from cold zones. The extrusion temperatures in hot zone is controlled by a PID, managed from a electronic control board. The inclusion of five different to the same extruder represents push forces of filaments and thermal efforts required and the manage of different temperatures depending of which zone. This mean we need a complete extruder system for each filament. Thus, with the same principle of filaments mix, theoretically filaments must share thermal properties, but in practice show variations, principally in thermal properties which is the main aspect for the FDM process. The feed of each filament needs a friction mechanism between a gear and a tread that generates a perpendicular force, it is in turn determines friction needed to control the filament supply through a rotational actuator. With this same principle we could control either the volume and the feed speed throug. To the manage the different variables we design a simple user interface that allows visualize and control either temperatura than the feed of each color.

Keywords:

EXTRUDER

POLYMER

3D PRINTING

FDM

Índice general

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
INDICE DE FIGURAS	xiii
INDICE DE TABLAS	xvii
1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del Problema	1
1.2. Hipótesis	2
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo General	3
1.3.2. Objetivos Específicos	3
1.4. Antecedentes	3
1.5. Justificación	4
1.6. Estructura del Documento	5
2. Marco Teórico	6
2.1. Manufactura aditiva	6
2.1.1. Fotopolimerización	8
2.1.2. Sinterización selectiva de láser	9
2.1.3. Inyección de aglutinante	10
2.1.4. Fabricación por medio de laminación	11
2.1.5. Deposición de filamento fundido	12
2.2. Impresoras 3D basadas en deposición de material fundido - FDM	13

2.2.1.	Movimiento RepRap	15
2.3.	Coloración de polímeros	16
2.3.1.	Materiales colorantes	17
2.3.1.1.	Colorantes	17
2.3.1.2.	Pigmentos	17
2.3.2.	Aditivos.	18
2.3.3.	Concentrados.	18
2.3.3.1.	Concentrados granulados.	19
2.3.3.2.	Concentrados en polvo. (Dry-Blends)	19
2.3.3.3.	Concentrados universales.	20
2.3.4.	Procesos de fabricación de concentrados.	20
2.3.5.	Utilización práctica de los concentrados.	21
2.3.5.1.	Dosificación.	22
2.3.5.2.	Granulometría.	22
2.3.5.3.	Condiciones es de procesamiento.	22
2.3.6.	Propiedades fundamentales de los concentrados.	23
2.3.6.1.	Tonalidad	23
2.3.7.	Homogenización.	26
2.3.7.1.	Grado de carga	26
2.3.7.2.	Comportamiento del flujo.	26
2.3.8.	Concentración.	26
2.3.8.1.	Verificación del concentrado de colorantes/aditivos.	27
2.3.9.	Dispersión.	28
2.3.10.	Poder tintóreo.	28
2.3.11.	Poder de cubrimiento.	28
2.3.12.	Resistencia térmica.	29
2.3.12.1.	Determinación de la resistencia térmica.	29
2.3.13.	Solidez a la luz e interperie.	29
2.3.14.	Solidez a la migración	29
2.4.	Extrusión de polímeros.	30
2.4.1.	Polímeros termoplásticos.	31
2.4.2.	Temperatura en termoplásticos.	31
2.4.2.1.	Esfuerzos térmicos.	34
2.4.2.2.	Deposición filamento fundido.	34
2.5.	Teoría del color.	35
2.6.	Filosofía Hardware Open Source.	37
2.7.	Resumen.	38

3. Diseño	39
3.1. Selección y diseño orientado a principios de calidad	39
3.2. Alternativas de diseño	41
3.2.1. Alternativas del diseño térmico-geométrico.	43
3.2.1.1. Forma del extrusor.	43
3.2.1.2. Alternativas para selección de materiales por propiedades térmicas.	49
3.2.2. Diseño de partes fabricadas.	66
3.2.3. Simulación térmica.	69
3.2.4. Alimentación de filamento y extrusión.	72
3.2.4.1. Cálculo de variables de extrusión.	73
3.3. Diseño electrónico	82
3.3.1. Sistema de alimentación eléctrica	83
3.3.2. Actuadores	83
3.3.2.1. Generador de calor - Resistencia eléctrica	83
3.3.2.2. Actuadores de alimentación de filamento.	84
3.3.2.3. Actuator rotacional.	88
3.3.3. Diseño de circuito de potencia.	90
3.3.3.1. Circuito de disparo actuadores.	91
3.3.4. Controlador de motores.	95
3.3.5. Sensores	96
3.3.5.1. Circuitos de acondicionamiento sensor.	99
3.3.6. Consumo eléctrico.	100
3.4. Sistema de control	101
3.4.1. Selección de tarjeta de control	101
3.4.2. Discretización señal análoga termistor	102
3.4.3. Secuencia de control	103
3.4.4. Control digital de temperatura.	103
3.4.4.1. Especificaciones de diseño del controlador.	103
3.4.4.2. Controlador PID.	107
3.5. Interfaz gráfica	115
3.6. Resumen	116
4. Implementación y construcción.	118
4.1. Colores.	118
4.2. Construcción nuevas piezas para ensamblaje.	119
4.2.1. Cámara de mezcla.	120

4.2.2.	Aislante térmico.	121
4.2.3.	Separador térmico.	122
4.2.4.	Prisionero	123
4.2.5.	Matrimonio mezclador - husillo	123
4.3.	Elementos impresos 3D.	124
4.3.1.	Elementos de cámara de convección forzada	124
4.3.2.	Plataforma sujeción robot Delta	125
4.3.3.	Mecanismo alimentación filamento	126
4.4.	Ensamblaje.	126
4.5.	Calibración motores a pasos para alimentación filamento.	127
4.6.	Interfaz.	129
4.7.	Pruebas funcionamiento prototipo.	129
5.	Conclusiones y Recomendaciones	134
5.1.	Conclusiones	135
5.2.	Recomendaciones	137
	Bibliografía	138
5.3.	Esquema electrónico.	141

Índice de figuras

1.1. Ejemplo modelo 3D impreso por método FDM.	2
1.2. Ejemplo impresión de un modelo con variedad de colores.	5
2.1. Modelado 3D de una tasa y se muestran los efectos de los diferentes tipos de espesor en cada capa.	7
2.2. Principio de funcionamiento de prototipado por fotopolimerización.	9
2.3. Sistema de prototipado por Sinterización selectiva de láser.	10
2.4. Sistema por inyección de aglutinante.	11
2.5. Principio de funcionamiento de manufactura de corte por laminación.	12
2.6. Sistema por deposición de material fundido - FDM	14
2.7. Impresora de escritorio 3D MakerBot Replicator 2	14
2.8. Darwin, primera impresora construida por movimiento RepRap.	15
2.9. Secuencia de fabricación y composición básica de los concentrados 'master-batches'.	17
2.10. Diferentes presentaciones de los diversos concentrados.	19
2.11. Esquema de fabricación de concentrados granulados.	21
2.12. Esquema de fabricación de concentrados polvo.	21
2.13. Esquema de fabricación de concentrados universales.	23
2.14. Representación de incidencia de luz en la tonalidad.	24
2.15. Evaluación de parámetro a través de visión de color "Lab".	25
2.16. Esquema de extrusión tradicional en impresoras 3D	30
2.17. Efecto de la temperatura en la estructura y comportamiento de polímeros termoplásticos.	31
2.18. Efecto de la temperatura sobre el comportamiento tensión-deformación de polímeros termoplásticos.	32
2.19. Efecto variación de temperaturas y separación de zonas calientes y frías en el extrusor	33
2.20. Esquema de variables en boquilla, antes de su extrusión	35
2.21. Esquema de teoría aditiva y sustractiva respectivamente	36

2.22. Gama de colores según teoría aditiva y sustractiva.	37
2.23. Logo Open Source Hardware.	38
3.1. Desarrollo de matriz de calidad para impresoras 3D con variedad de colores.	42
3.2. Alternativas en sistema de coloración de polímero para extrusión.	44
3.3. Alternativa comercial de inclusión de color por diferentes disipadores y extrusión por una misma boquilla	48
3.4. Modelo CAD en 3D de la barilla cortada y perforada, lista para ser ensamblada.	54
3.5. Sistema completo 'hot-end'.	60
3.6. Disipadores comerciales, fabricados de Aluminio.	62
3.7. Modelado 3D del disipador, de material PEEK.	64
3.8. Esquema de contacto entre uno de los disipadores y la zona caliente.	67
3.9. Esquema de contacto entre uno de los disipadores y la zona caliente, esquema realizado por medio de un corte transversal de todo el sistema.	67
3.10. Modelo CAD en 3D del extrusor con sus respectivas partes.	68
3.11. Sistema de convección forzada.	69
3.12. Selección de áreas de roscas para cálculo de aproximación.	69
3.13. Área de contacto entre la boquilla y el cubo de aluminio.	70
3.14. Discretización del extrusor para análisis térmico.	71
3.15. Resultado de simulación térmica.	72
3.16. Resultado de simulación, transición de temperaturas entre zona caliente y fría.	73
3.17. Mecanismo de alimentación para filamentos.	74
3.18. Sistema de alimentación de filamento, incluyendo esquema estático.	74
3.19. Esquema de fuerzas aplicada sobre mecanismo de alimentación.	75
3.20. Esquema de fuerzas con la inclusión de una fuerza externa para desmontar el filamento.	75
3.21. Esquema de cargas sobre rodamiento.	77
3.22. Dirección de fuerza de motor a pasos que realiza alimentación del filamento horizontal, sentido de extrusión.	78
3.23. Sección de la zona de mezcla con husillo de un canal, vista general y su esquema de desarrollo.	80
3.24. Modelado broca utilizada como tornillo sin fin.	80
3.25. Corte transversal, sistema de extrusión y sus elementos.	81
3.26. Dimensiones boquilla de extrusión.	81
3.27. Niquelina generica de 40W, utilizada en extrusores genéricos.	83

3.28. Motor a pasos NEMA 17 seleccionado para ingreso de filamento.	87
3.29. Engranajes de empuje de filamento.	87
3.30. Configuración de circuito conmutación MOSFET.	94
3.31. Esquema de conexión de un motor con el controlador de motores a pasos A4988.	96
3.32. Divisor de tensión para obtener un voltaje análogo a la temperatura. . . .	100
3.33. Esquema de control, sistema de extrusión.	102
3.34. Diagrama flujo del proceso de extrusión de colores por medio de inyección de color.	104
3.35. Alternativas de control para temperatura.	105
3.36. Sistema de control de lazo cerrado.	108
3.37. Esquema que representa señal de ingreso y salida de la planta.	109
3.38. Curva característica del sensor, relación de temperatura vs ADC.	111
3.39. Señal de entrada como de salida de la planta respecto al tiempo.	112
3.40. Ajuste entre modelo de segundo y primer orden para la planta.	112
3.41. Gráfica Temperatura vs tiempo, PID autotuning.	114
3.42. Resultados PID autotuning, software Repetier-Host.	114
3.43. Diagrama de flujo del interfaz con usuario.	116
4.1. Variedad de filamentos de distintos colores.	118
4.2. Modelo prototipo de extrusor, con todos sus elementos.	119
4.3. Perforación roscada M8 x 1.25 de disipador, se muestra un diámetro equi- valente en el modelado para la simulación.	120
4.4. Disipadores, longitud de aislante térmico en el interior del disipador. . . .	121
4.5. Longitudes requeridas para fabricación del aislante.	122
4.6. Prisionero M6 x 1mm x 10mm, perforado.	123
4.7. Esquema de elemento de unión (matrimonio) entre motor y el husillo. . . .	124
4.8. Piezas de cámara de convección forzada.	125
4.9. Extrusor ensamblado vista superior, antes de ser ensamblado en el robot. .	125
4.10. Plataforma para inclusión de actuador giratorio de empuje.	126
4.11. Sistema de extrusión incluido en robot delta.	126
4.12. Calibración de motores, según intervalos de tiempo de energización de bo- binas de motor a pasos.	127
4.13. Interfaz usuario.	129
4.14. Extrusor completamente ensamblado.	130
4.15. Transición amarillo - rojo.	130
4.16. Transición inyección concentrado rojo.	131

4.17. Transición inyección concentrado negro.	131
4.18. Transición inyección concentrado negro.	131
4.19. Transición de colores durante extrusión, con sistema completo de extrusión montado en el robot	132
4.20. Resultados de transiciones de colores en extrusiones, con boquilla de 1mm de diámetro. Transiciones entre azul-transparente y azul-rojo.	132
4.21. Resultados de transiciones de colores en extrusiones, con boquilla de 1mm de diámetro. Transición entre azul-verde.	133
5.1. Esquema completo electrónico.	141

Índice de tablas

2.1. Temperaturas de fusión y transición vítrea de ciertos polímeros.	33
3.1. Comparación entre alternativas de tintoréo.	44
3.2. Peso específico de cada criterio para determinación de colorante.	45
3.3. Evaluación de criterio para facilidad de control.	46
3.4. Evaluación para criterio de compatibilidad entre filamento/polímero y el concentrado.	46
3.5. Evaluación de criterio para disponibilidad en el mercado.	46
3.6. Tabla de conclusiones en la selección de tipo de colorante o concentrado que será utilizado.	47
3.7. Peso específico de cada criterio para selección de forma de cámara de mezcla.	47
3.8. Evaluación para criterio de tamaño para selección de forma de la cámara de mezcla.	48
3.9. Evaluación para criterio de manufactura para selección de forma de la cámara de mezcla.	48
3.10. Tabla de conclusiones en la selección de forma en la cámara de mezcla. . .	49
3.11. Tabla de calores específicos y valores de conductividades térmicas	51
3.12. Peso específico de cada criterio para selección de forma de cámara de mezcla.	51
3.13. Evaluación para criterio de presentación en el mercado y de la facilidad para ser maquinado.	52
3.14. Evaluación para criterio de propiedades térmicas para selección de mate- riales de la cámara de mezcla.	53
3.15. Evaluación para criterio de propiedades térmicas para selección de mate- riales de la cámara de mezcla.	53
3.16. Tabla de conclusiones en la selección de material para la cámara de mezcla.	53
3.17. Peso específico de cada criterio para selección de forma de cámara de mezcla.	55
3.18. Tabla para la evaluación de disponibilidad en el mercado para calentador de extrusor.	56

3.19. Evaluación para criterio de propiedades térmicas para selección de calentadore <i>hot-end</i>	56
3.20. Evaluación para criterio de simplicidad de diseño de calentador.	56
3.21. Tabla de conclusiones en la selección de calentador en extrusor.	57
3.22. Peso específico de cada criterio para selección de boquilla.	58
3.23. Evaluación para criterio de especificaciones técnicas en la selección de boquilla del extrusor.	58
3.24. Evaluación para criterio de propiedades térmicas para selección de boquilla.	59
3.25. Evaluación para criterio de presentación y disponibilidad en el mercado para la selección de la boquilla.	59
3.26. Tabla de conclusiones en la selección de material para la cámara de mezcla.	59
3.27. Coeficientes de calores transferencia de calor por convección.	61
3.28. Peso específico de cada criterio para selección de disipadores.	62
3.29. Evaluación para criterio de propiedades térmicas en la selección de disipadores.	63
3.30. Evaluación para criterio de propiedades térmicas para selección de boquilla.	63
3.31. Evaluación para criterio de forma en alternativas de selección de disipadores.	63
3.32. Tabla de conclusiones en la selección de material para la cámara de mezcla.	64
3.33. Peso específico de cada criterio para selección de disipadores.	65
3.34. Evaluación de criterio de disponibilidad en el mercado nacional para materiales de aislantes.	65
3.35. Evaluación para criterio de propiedades térmicas para selección de materiales aislantes.	66
3.36. Tabla de conclusiones en la selección de material para la cámara de mezcla.	66
3.37. Tabla de equivalencias de áreas de contacto para transferencia de calor por conducción.	70
3.38. Tabla de resultados de variables de extrusión.	82
3.39. Especificaciones técnicas de la niquelina.	83
3.40. Peso específico de cada criterio para selección de motor de alimentación filamentos.	85
3.41. Evaluación para criterio de dificultad para implementación en la selección de alimentador.	85
3.42. Evaluación para criterio de tamaño para selección de alimentador de filamento.	86
3.43. Evaluación para criterio de torque para selección alimentador de filamento.	86
3.44. Tabla de conclusiones en la selección de alimentador de filamento.	86
3.45. Peso específico de cada criterio para selección de sensor de temperatura.	88

3.46. Evaluación para criterio de dificultad para implementación en la selección de motor mezclador.	89
3.47. Evaluación para criterio de tamaño para selección de motor mezclador. . .	89
3.48. Evaluación para criterio de relación torque-velocidad en la selección del motor mezclador.	89
3.49. Tabla de conclusiones en la selección de motor mezclador.	90
3.50. Peso específico de cada criterio para selección de circuito de disparo para actuadores.	91
3.51. Evaluación para criterio de propiedades térmicas en la selección de disipadores.	92
3.52. Evaluación para criterio de capacidad de corriente sobre la carga en la selección del circuito de conmutación.	92
3.53. Evaluación para criterio de facilidad de implementación en la selección del circuito de conmutación.	93
3.54. Tabla de conclusiones en la selección de de circuito de conmutación. . . .	93
3.55. Peso específico de cada criterio para selección de sensor de temperatura. . .	96
3.56. Evaluación para criterio de dimensiones para selección de sensor de temperatura.	97
3.57. Evaluación para criterio de precisión para selección de sensor de temperatura.	98
3.58. Evaluación para criterio de facilidad de implementación en la selección del circuito de conmutación.	98
3.59. Tabla de conclusiones en la selección de de circuito de conmutación. . . .	98
3.60. Comparación tipos de control aplicables a plantas de temperatura.	105
3.61. Peso específico de cada criterio para selección de controlador de temperatura.	106
3.62. Evaluación para criterio de precisión en la selección del controlador. . . .	106
3.63. Evaluación para criterio de implementación para selección de controlador de temperatura.	106
3.64. Evaluación para criterio de robustez para selección de controlador de temperatura.	107
3.65. Tabla de conclusiones en la selección de de circuito de conmutación. . . .	107
4.1. Tabla de calibración de bombas.	128
4.2. Regulación de caudal a través de relación con intervalo de energización. . .	128

Capítulo 1

Introducción

El primer capítulo detalla la variedad y diversidad de técnicas para impresión en 3D. Se centra principalmente en la tecnología por deposición de material plástico (*Fusion Deposition Modeling - FDM*) para prototipado rápido e impresión en 3D. Además se detallan las metas y los objetivos generales así como los objetivos específicos del presente proyecto. Se destacan las ideas principales acompañado del alcance del mismo. Finalmente se detalla la estructura de todo el trabajo escrito.

1.1. Planteamiento del Problema

El crecimiento de la demanda de equipos que permitan fabricar prototipos de tamaño moderado a un costo accesible y en tiempo récord provocó la próspera evolución de los sistemas de impresión en 3D [Lipson & Kurman, 2013]. Tanto arquitectos, ingenieros, diseñadores y animadores en 3D o simplemente hobbistas son los principales beneficiarios de este sistema para la fabricación de prototipos, maquetas o simplemente piezas únicas como se muestra en la Figura 1.1. En un inicio los sistemas de prototipado rápido eran realmente caros y con un costo operativo bastante elevado lo que permitía que únicamente este disponible para institutos de investigación.[Wohlers, 2013]

La técnica por medio de deposición de material fundido hoy en día representa la técnica más usada y una de las más económicas para el prototipado rápido. Las exigencias de los usuarios y consumidores de las impresoras en 3D son cada vez más rigurosos basándose en aspectos como calidad, velocidad de impresión, facilidad de operación, materia prima para la impresión y obviamente el costo [Wolf, 2011]. Con el tiempo nace un nuevo requisito mismo que obedece a conseguir una mezcla de colores y obtenerlos en una sola pieza, con impresiones sin grandes transiciones de color y que no influya en el tiempo de impresión. La mayoría de máquinas de manufactura aditiva son únicamente capaces de producir objetos



Figura 1.1: Ejemplo modelo 3D impreso por método FDM.
Fuente: [Xu, 2012]

de tan solo uno o dos colores basándose en el principio de extrusores independientes para cada color. A pesar del próspero mercado y demanda de impresoras en 3D aún resulta casi inasequible obtener una impresora en 3D que nos permita obtener piezas sin restricción de colores y que ésta sea capaz de alcanzarlo cumpliendo una inmensa variedad de mezclas. [Stucker, 2010].

1.2. Hipótesis

El diseño de un sistema de deposición de polímero a través de un mecanismo de extrusión del mismo. Administrando calor por medio de una resistencia cerámica hasta alcanzar la *temperatura de transición vítrea* en la cual el polímero altera sus propiedades físicas. El manejo del termoplástico y su posterior deposición manejando variaciones de temperatura es lo que permite controlar una deposición estable. [Lokensgard., 2000] Mientras el polímero de determinado color se esta calentando y se encuentra en el estado vítreo, es posible considerar la inclusión de otro polímero en el mismo estado con similares características pero de distinto color. La mezcla de filamentos añadiendo los principios físicos de extrusión permiten lograr preparar y homogenizar el nuevo polímero ya mezclado. Proceso que debe repetirse en cada cambio de color.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

- Diseñar y construir un prototipo de extrusor para una impresora en 3D y que este sea capaz de *permitir la mezcla y deposición de material de distintos colores.*

1.3.2. Objetivos Específicos

- Diseñar un sistema de extrusión de polímero y mezcla de colores por medio del diseño térmico y la selección de materiales según sus propiedades térmicas para permitir la deposición de material fundido.
- Implementar un sistema de control digital a través del diseño del algoritmo de mando y la instalación de los elementos del mismo sobre el extrusor.
- Diseñar un sistema de inyección de color a través de polímeros de distintos colores a través de la alimentación e ingreso homogéneo y controlado de polímeros hacia el extrusor.
- Implementar una interfaz gráfica que permita la visualización gráfica de las diferentes variables del sistema.

1.4. Antecedentes

Si bien las impresoras en 3D tan solo cuentan con poco más de 30 años desde su nacimiento. Realmente no se ve reflejado la amplia evolución y desarrollo que estos sistemas han venido experimentando [Canalys, 2015]. Los primeros ejemplos de impresión 3D se produjeron en la década de los '80s', aunque dichas impresoras eran inmensamente grandes, caras y muy limitadas para piezas de producción, el método empleado fue la *sinterización selectiva por láser - (SLS)* mismo que fue patentado por el Dr. Carl Deckard y el Dr. Joseph Beaman en la Universidad de Austin, Texas. [Bird, 2012].

El término prototipado rápido nació con la primera máquina de estereolitografía que fundamenta su funcionamiento en un haz de luz ultravioleta mismo que se focaliza sobre una superficie llena de resina fotopolimérica, e inclusive este sistema funciona bajo el mismo principio por medio de procesos aditivos. Es decir con aporte de material; contrario a

todos los procesos tradicionales mecanizados a través de técnicas de sustracción que parten principalmente en la eliminación de material [Lipson & Kurman, 2013]. La inclusión del término impresión en 3D fue acuñado por el *Instituto de Tecnología de Massachusetts* (MIT-por sus iniciales en inglés), por medio de los entonces estudiantes de posgrado Jim Bredt y Tim Anderson quienes modificaron una impresora de inyección de tinta para la extrusión de una solución vinculante sobre lecho de polvo, en lugar de tinta sobre papel.[Selcuk & Bellini, 2004]

La inmensa demanda y creciente mercado ha hecho que los precios disminuyan considerablemente convirtiéndose en productos asequibles, es así que arranca la nueva generación de prototipado rápido a través de impresoras en 3D de escritorio por medio de la deposición de polímero fundido capa a capa [Selcuk & Bellini, 2004]. La inclusión de sistemas de impresión con variedad de colores aún es tema pendiente y se encuentra en proceso de perfección [Corbett, 2012]. Es ahí donde radica la necesidad en el desarrollo de este proyecto.

1.5. Justificación

Con las consideraciones anteriormente expuestas y el desarrollo exponencial en el campo de la manufactura aditiva resulta casi necesaria la intervención en mejoras para cualquier tipo de aplicación e implementar cambios dentro de las capacidades de cada impresora.

En la actualidad existe una amplia variedad de marcas y diseños de impresoras en 3D y aún resulta limitado el pensar en que existan impresoras que permitan una impresión de un mismo objeto con variedad de colores. El desarrollo de dicha tecnología aún representa una tarea pendiente para desarrolladores e ingenieros involucrados en el tema. Tanto impresoras fabricadas por compañías privadas o de libre distribución de filosofía *Open Source* aún se encuentran implementando e investigando las mejores alternativas para permitir una impresión con toda la gama de colores [Taubert, 2012]. Obtener una impresión que cuente con transiciones de color moderadas además de una alta gama de mezclas de color con principio de funcionamiento sencillo es a donde apuntan las más grandes productoras de impresoras 3D. Garantizar un sistema de extrusión de polímero y que dentro de sí mismo permita alcanzar una homogenización tinta-polímero y de esta forma permitir una deposición del mismo capa a capa dentro de una misma boquilla significaría el alcance del presente proyecto (Figura 1.2).

El desarrollo del presente proyecto además de significar una investigación sobre el campo de la extrusión de polímero incluye la teoría de mezcla de colores; cantidades, concentraciones y empatía con polímeros aptos para ser impresos [Taubert, 2012]. Incluir un



Figura 1.2: Ejemplo impresión de un modelo con variedad de colores.

Fuente: [Lipson & Kurman, 2013]

módulo representaría la inclusión de un valor agregado adaptable a cualquier impresora que permita la manipulación ya sea en términos físicos, hardware electrónico y software tanto de la interfaz de usuario como de *'firmware'* del controlador. La inclusión de color satisfecería la principal carencia en la tecnología por deposición de polímero fundido. Diversas aplicaciones pueden verse favorecidas en obtener una misma pieza de diversos colores[Corbett, 2012].

1.6. Estructura del Documento

El presente documento consta cinco capítulos divididos según cada etapa de investigación, desarrollo e investigación del proyecto. En el primer capítulo se demuestra una descripción global e introducción del prototipado rápido y la evolución de la impresión en 3D, así; se permite definir los objetivos planteados y alcances del presente proyecto. El segundo capítulo describe una breve reseña del impulso de prototipado rápido además de una explicación de cada uno de los sistemas de impresión en 3D.

El capítulo tercero describe el diseño mecánico orientado a la transferencia de calor para la correcta selección y dimensionamiento de materiales considerando el análisis térmico del termopolímero para ser extruído, además de los sistemas de control así como el desarrollo electrónico de potencia para el sistema de extrusión y la dosificación de nuevos colores en la extrusión. El capítulo cuatro se describe el proceso de implementación del control electrónico y del algoritmo de control dentro del microcontrolador además de la inclusión del sistema de dosificación de color. Se incluye evaluación realizada en el prototipo, pruebas y resultados obtenidos del mismo. Finalmente se redactan y se presentan conclusiones obtenidas así como recomendaciones y futuras tendencias de investigación sobre el proyecto.

Capítulo 2

Marco Teórico

El presente capítulo busca detallar los principios básicos del funcionamiento de la manufactura aditiva y sus diversas técnicas, el principio básico de funcionamiento de impresoras 3D por deposición de material fundido. La coloración de polímeros es el tema principal de este capítulo y se orienta a detallar materiales, concentraciones, procesos de tintóreo de polímeros. Finalmente se explica en brevedad la filosofía de desarrollo ‘Open Hardware Source’ a la cual esta orientada la investigación de este proyecto.

2.1. Manufactura aditiva

El principio de manufactura aditiva (AM) parte de la fusión de materiales para fabricar objetos desde datos de un modelo 3D, generalmente proceso capa sobre capa. Opuesto a los métodos comunes de mecanizado empleados para la remoción de material [Aarrestad, 2013].

El proceso típico de manufactura aditiva envuelve varios pasos según la complejidad del procesos aditivo y de la dificultad de construcción del objeto. El primer paso pretende la creación del modelo en un software CAD (Diseño asistido por computador - Computer aided-design) mismo que permita la conversión en un tipo de formato aceptado por el programa manejado por la maquina de manufactura aditiva. Generalmente formato de mayor uso es el ‘STL’, que permite describir todas las superficies cerradas del objeto original por medio de planos triangulares y que cualquier software CAD permite convertir [Stucker, 2010].

El modelo convertido ya en un archivo que describe todas las superficies es cargado hacia el software de manejo de la máquina, mismo que se encarga de transformar el modelo en códigos y trayectorias que la máquina es capaz de interpretar. El proceso de manufactura es totalmente automatizado y autónomo, el tiempo de fabricación dependerá exclusivamente

de la complejidad del objeto y del principio de funcionamiento del proceso seleccionado. Un aspecto trascendente es considerar una fase post-fabricación opcional si la aplicación lo requiere, caso contrario la pieza fabricada se encuentra lista para ser usada. Como se indica en los pasos descritos el proceso de fabricación por métodos aditivos no necesariamente debe ser planificado, mientras que en los otros procesos de fabricación como el maquinado por remoción de material requiere un profundo análisis de la geometría de la pieza para determinar el orden y los requisitos de cada proceso de maquinado. Una simple comparación frente a la fabricación aditiva que únicamente requiere del modelado en 3D por medio de software, el proceso de fabricación y el material deseado [Kodama., 1981]. Vale la pena señalar que si bien los procesos automatizados de manufactura convencional son capaces de fabricar varias piezas sin importar su complejidad y sobreaen en el mismo principio de un modelado 3D sobre un paquete CAD, diferentes tipos de procesos de manufactura por adición se muestran aún mas flexibles principalmente frente a costos de maquinado-fabricación, costos de mantenimiento y fundamentalmente frente a costos de materia prima.



Figura 2.1: Modelado 3D de una tasa y se muestran los efectos de los diferentes tipos de espesor en cada capa.

Fuente: [Wolf, 2011]

Los procesos de manufactura aditiva se basan generalmente en crear objetos adicionando material por medio de capas, cada capa representa una delgada área de sección transversal del objeto que es derivado desde el modelo CAD. El fino espesor de cada capa impone la calidad y la resolución del producto final que únicamente representa una aproximación al modelo original modelado en el software [Kodama., 1981]. El principal objeto de usar diferente espesor de capa es generar una comparación frente al modelo CAD, un

ejemplo de distintos espesores de capa se muestran en la figura 2.1. La fabricación aditiva por capas usa diferentes tipos de procesos que principalmente difieren en el material usado y el procedimiento que utiliza para generar la geometría capa a capa. El tipo de proceso seleccionado determina la precisión, la materia prima, el material, la velocidad del proceso, el requisito de un post-procesamiento además del costo de la máquina y sus propiedades mecánicas. En general el costo operativo de todo el proceso.

2.1.1. Fotopolimerización

El sistema basa su funcionamiento en el uso de polímero líquidos que cuentan con la propiedad de alterar principalmente sus propiedades físicas y mecánicas cuando son expuestos a determinada radiación de luz '*fotopolimerización*', por lo que este principio de funcionamiento funciona únicamente sobre resinas o fotopolímeros. Estos sistemas utilizan la tecnología llamada estereolitografía que es fundamentada en polímeros líquidos que se convierten en sólidos con la reacción de la radiación de ciertas formas y frecuencias de luz, como la luz ultravioleta que genera reacciones químicas a determinados materiales. El funcionamiento básico es mostrado en la Figura 2.2. El objeto tridimensional es construido encima de una plataforma que se encuentra cubierta de dicho polímero, el rayo de láser empieza a describir la geometría de cada capa, así logra una reacción química controlada y consigue que el polímero se solidifique únicamente en una capa, posteriormente la plataforma es trasladada la altura de cada capa construida, aproximadamente de 0.07 a 0.05 mm de altura de capa; temporalmente hacia la parte inferior para así cubrirla de nueva resina. El proceso se repite capa a capa hasta alcanzar la pieza final. Una vez alcanzada la pieza final es elevada para separarlo del recipiente con resina o polímero líquido. Los excesos de polímero en cada superficie son enjuagados o retirados de la superficie del objeto, generalmente es requerido un proceso de *sanación* para las superficies del prototipo obtenido y se puede obtener dentro de un horno con radiación UV, una vez terminado el proceso de *sanación* se retiran los soportes y las superficies pueden ser pulidas, lijadas o acabadas por cualquier otro método. El objetivo es tratar de ocultar en lo posible el detalle del prototipado por adición de capas y eliminar el detalle de espesor de cada capa sobre la superficie visible. [CustomPartNet, 2011].

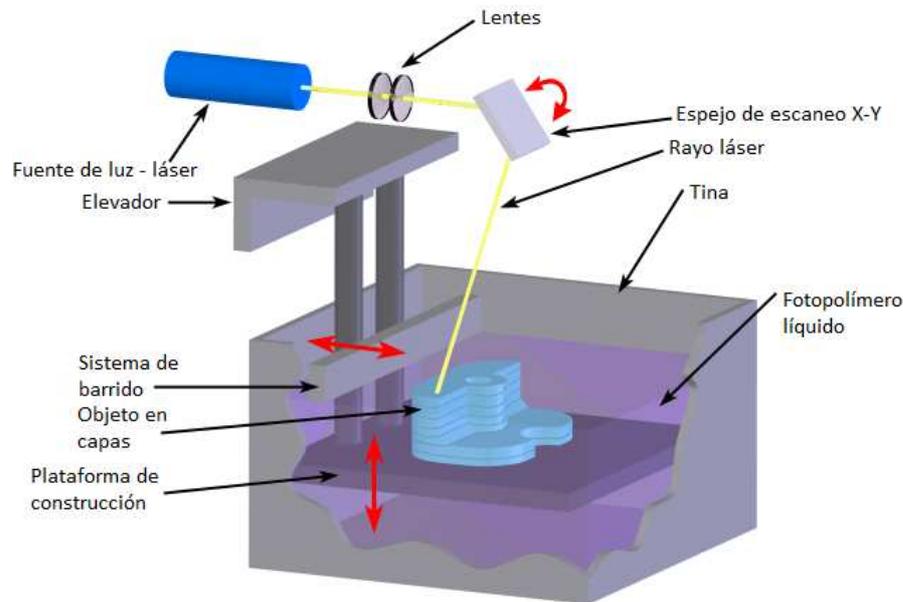


Figura 2.2: Principio de funcionamiento de prototipado por fotopolimerización.
Fuente: [CustomPartNet, 2011]

Diferentes máquinas basadas en este tipo de configuración utilizan diferentes tipos y cantidades de láseres, que permitan generar la reacción en el polímero ya sea en un punto o una capa completa, algunos sistemas funcionan con 2 láseres y no requieren movimiento de la plataforma ni la aplicación de resina sobre cada capa ya que el polímero se solidifica cuando el par de láseres se intersecan y permite la construcción de la parte inferior a la superficie del polímero líquido. En una fabricación por estereolitografía a penas se puede identificar las capas de construcción, por lo que se considera esta técnica de muy buena precisión [CustomPartNet, 2011].

2.1.2. Sinterización selectiva de láser

Su principio de funcionamiento parte de la fusión de material sobre capas de polvo e ir formando el objeto tridimensional por unión discreta de partículas que presentan un comportamiento termoplástico, el proceso descrito generalmente necesita de una cámara de construcción, un mecanismo de alimentación de polvo y actuadores térmicos. Una capa de polvo es aplicada a la cama de impresión dentro de la cámara que es distribuida por un rollo de nivelación sobre toda la superficie. Un actuador es usada para fusionar las partículas de polvo con las capas de polvo de la cama, de esa forma se genera la sección de cada capa del objeto. Cuando el proceso de sinterización ha finalizado para una capa, la

plataforma vertical es ajustada para repetir el proceso para la siguiente capa. El primer equipo de manufactura aditiva por fusión de polvos fue la ‘*Sinterización selectiva de láser* - *SLS*’ y su funcionamiento se muestra en la Figura 2.3

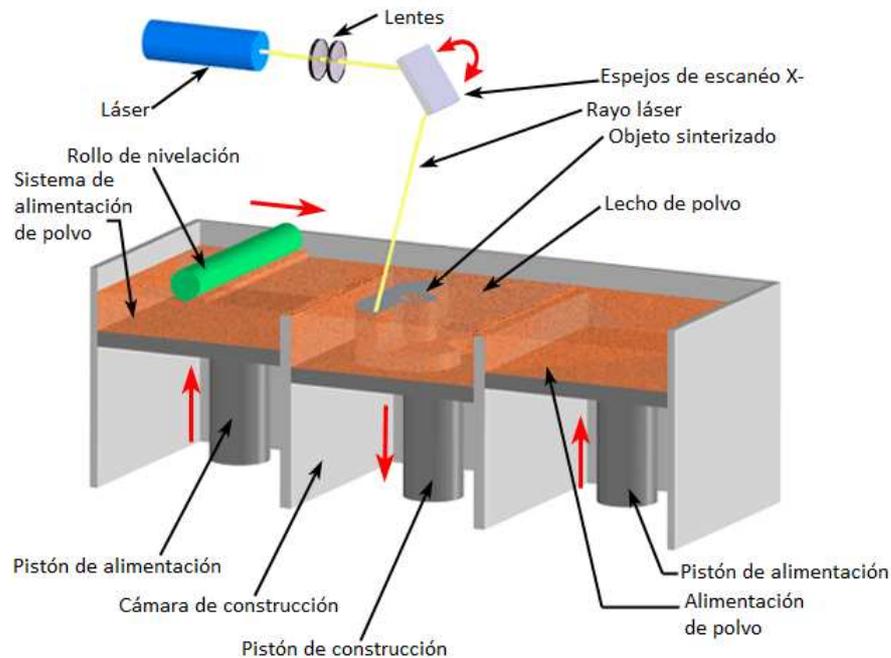


Figura 2.3: Sistema de prototipado por Sinterización selectiva de láser.
Fuente: [CustomPartNet, 2011]

La fusión de polvo no necesita la inclusión de material de soporte, ya que las partículas de polvo de las capas anteriores proporcionan la suficiente estructura de soporte. La gran ventaja del sistema es que este se puede usar con gran variedad de polímeros, metales, cerámicas y compuestos permitiendo que las partes resultantes puedan ser usadas en infinidad de aplicaciones [Stucker, 2010].

2.1.3. Inyección de aglutinante

Un proceso bastante similar es el usado por un sistema de adición 3D por medio de inyección de aglutinantes sobre una cama de fusión de polvos. El material del producto se encuentra en forma de polvo y donde una cabeza de inyección deposita goma de esta forma los polvos se fusionan y se agrupan empezando a formar las capas del objeto. Generalmente este sistema cuenta con dos recipientes, en el primer compartimento es donde el producto se está formando y en un compartimento extra se encuentra polvo fresco. Luego de que el polvo se solidificó usando el aglutinante el compartimento de construcción es descendido mientras que el restante con polvo fresco es elevado; el rollo o paleta nive-

ladora es usada para mover el polvo desde el compartimiento de almacenamiento hacia el de construcción. La principal ventaja de este sistema es que gran cantidad de polvos pueden ser utilizados, aunque solo un tipo de polvo puede ser usado por cada construcción; además resulta muy sencillo añadir color a las impresiones conjuntamente con la solución aglutinante y así obtener objetos multicolores. Según la aplicación no siempre es requerido un post-proceso, aunque el resultado de este sistema no resultan ser demasiado fuertes [Stucker, 2010]. El esquema del funcionamiento se muestra en la Figura 2.4.

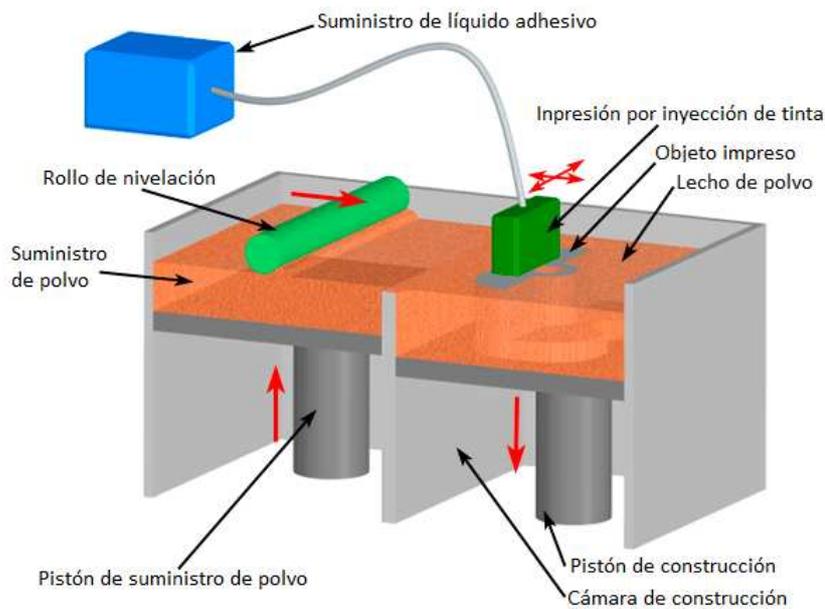


Figura 2.4: Sistema por inyección de aglutinante.
Fuente: [CustomPartNet, 2011]

2.1.4. Fabricación por medio de laminación

El sistema de fabricación por laminación de hojas funciona realizando cortes de contorno por la forma de cada capa. El sistema conocido como “**Laminated Object Manufacturing - LOM**” se fundamenta en la aplicación de polímero en finas capas sobre la superficie. El material para la construcción es administrado en forma de películas adhesivas, los cortes se realizan de forma controlada y por medio de un láser o cuchillas especiales sobre la forma geométrica de cada capa mientras luego de cada corte de sección un rodillo caliente es desplazado para aplicar presión y colocar la nueva lámina que representará la nueva capa. El proceso global es repetido tantas veces hasta que el objeto final se encuentre con todas sus capas [Bird, 2012]. En ejemplo del funcionamiento de este sistema se detalla en la figura 2.5.

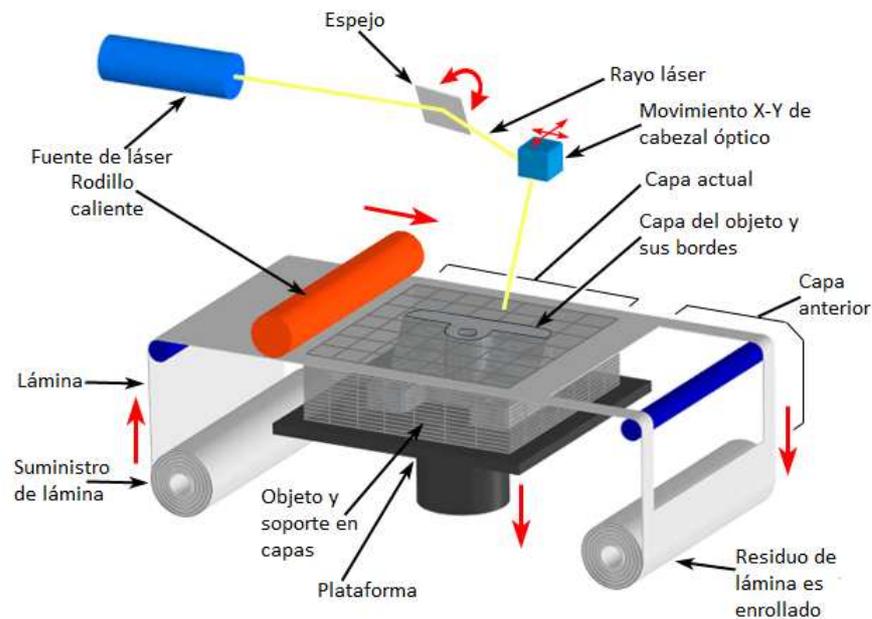


Figura 2.5: Principio de funcionamiento de manufactura de corte por laminación.
Fuente: [CustomPartNet, 2011]

Inicialmente los objetos construidos usando este tipo de técnica utilizaban un material de hojas de papel y se utilizaba una tipo de adhesivo para fijarlos, desde entonces a la actualidad se ha logrado un avance en esta técnica, añadiendo tipos de materiales de construcción como nuevas técnicas de corte y métodos de unión entre capas.

2.1.5. Deposición de filamento fundido

Fabricación por medio de filamento fundido (FFF) o también conocido como Modelado por deposición fundida (FDM) es un proceso aditivo de manufactura que permite crear objetos tridimensionales a través de un extrusor de termoplástico. Los sistemas que funcionan de esta forma necesitan de una plataforma que permita su movimiento normal a la misma y de un extrusor que permitirá la deposición de material que generalmente se encuentra en presentaciones de filamento. Pequeños piñones de sujeción permiten la alimentación del filamento hacia el sistema de extrusión que eleva la temperatura hasta unos grados antes de su temperatura de fusión “*temperatura de transición vítrea*”. El material debe ser expulsado por un pequeño agujero en la boquilla que permite la deposición controlada del material, de esta forma un control de movimiento a través del plano horizontal de la plataforma de construcción permite la deposición de cada capa ya sea del objeto o de los soportes diseñados [Aarrestad, 2013]. El polímero calentado se endurece y

fusiona a la siguiente capa o la plataforma apenas se encuentra depositado a través de la boquilla. Una vez finalizado el proceso para la capa se continua para la siguiente ajustando la altura de la plataforma para permitir la fabricación de la siguiente capa. Este proceso generalmente utiliza termoplásticos como el ‘**ABS-acrylonitrile butadiene styrene**’, ‘**PA-polyamide**’, ‘**polycarbonate-PC**’, ‘**polyethylene-PP**’ y uno de los mas usados el ‘**polylactic acid -PLA**’; el funcionamiento básico del sistema se describe en la Figura 2.6 que representa con dos boquillas de extrusión y permite la deposición de dos materiales. Y ésta es precisamente la técnica que será detallada durante el detalle de este escrito.

2.2. Impresoras 3D basadas en deposición de material fundido - FDM

Comúnmente la impresión en 3D esta relacionada con la técnica por deposición de material generalmente polímero fundido pero que bajo el mismo principio podría ser metal, cera e inclusive chocolate. El desarrollo inminente de la impresoras de escritorio en 3D ha provocado tendencias de desarrollo al igual que en las grandes revoluciones tecnológicas, ubicándonos únicamente en el área de estudio descrito en el presente proyecto podemos encontrar.

La primera es el manejo de la tecnología para simples consumidores, quienes no buscan interesarse en el funcionamiento en sí de los productos o servicios que están utilizando sino mas bien en sacar el máximo provecho del producto o servicio adquirido. La principal ventaja que presenta esta tendencia es la facilidad de manejo, sus amigables y bien detallados pasos ya sea para su instalación o para un mantenimiento rutinario. Con fines únicamente lucrativos y basados en el principio de la propiedad intelectual siempre buscan mantener cada uno de sus diseños y productos libres de cualquier modificación o alteración, a menos que la misma institución permita una actualización o mejora [Lipson & Kurman, 2013].

Ejemplos de impresoras en 3D con esta ideología tenemos una de las más famosas impresoras en el mercado como la *Makerbot Replicator 2* que es distribuida por *Makerbot Industries* (figura 2.7), las impresoras que pertenecen a este grupo principalmente manejan su propia interfaz de manejo y normalmente no permiten ningún tipo de modificación o personalización en ninguno de los aspectos que forman parte de la impresora; es decir en la estructura física, el hardware, la programación de software ya sea del controlador como de la interfaz de manejo del sistema. Cada uno de estos aspectos como en cualquier otro producto de distribución o de venta manejan sus propias políticas y si son modificadas o alteradas automáticamente la garantía es perdida.

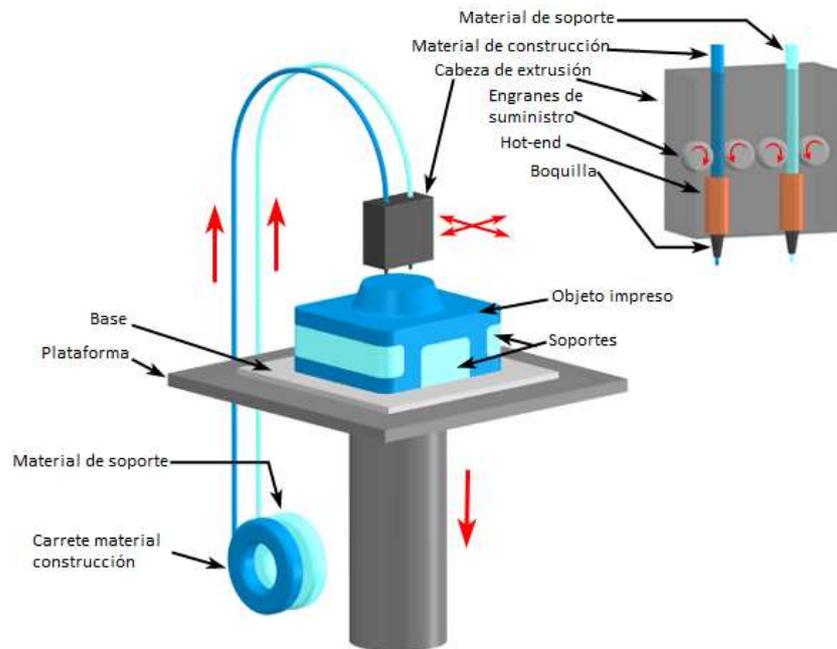


Figura 2.6: Sistema por deposición de material fundido - FDM
Fuente: [CustomPartNet, 2011]



Figura 2.7: Impresora de escritorio 3D MakerBot Replicator 2
Fuente: [industries, 2013]

El segundo grupo parte de una tendencia y una filosofía de desarrollo abierto y de libre distribución, el apego del progreso de las impresoras hacia el *Open-Source* parte inicialmente de *Adrian Bowyer*, catedrático de ingeniería mecánica de la universidad de Bath

en Reino Unido quien propuso la construcción de una impresora que sea capaz de imprimir las partes o componentes para otras impresoras . Posteriormente, Bowder publicó los modelos y diseños de las partes de su impresora alentando a que otros perfeccionen sus diseños y así mejorar la impresora en sí [RepRap, 2013]. A eso se lo conoce como el movimiento de *'código abierto'* y de libre distribución, RepRap (Replicator Rapid Prototyper). Bajo esta filosofía las impresoras que son desarrolladas pueden ser construidas, copiadas y mejoradas sin ningún costo ni ningún tipo de permiso, básicamente se piensa en comunidad y se comparte como tal. Esencialmente entusiastas o desarrolladores orientados a proyectos como *'hazlo tú mismo'* (DIY - Do it yourself) son quienes más impulso dan a esta tendencia, el objetivo es obtener impresiones de la mejor calidad y con máquinas económicas de libre distribución. En la Figura 2.8 se puede observar la primera impresora FDM diseñada y construida por el equipo de Bowyer.

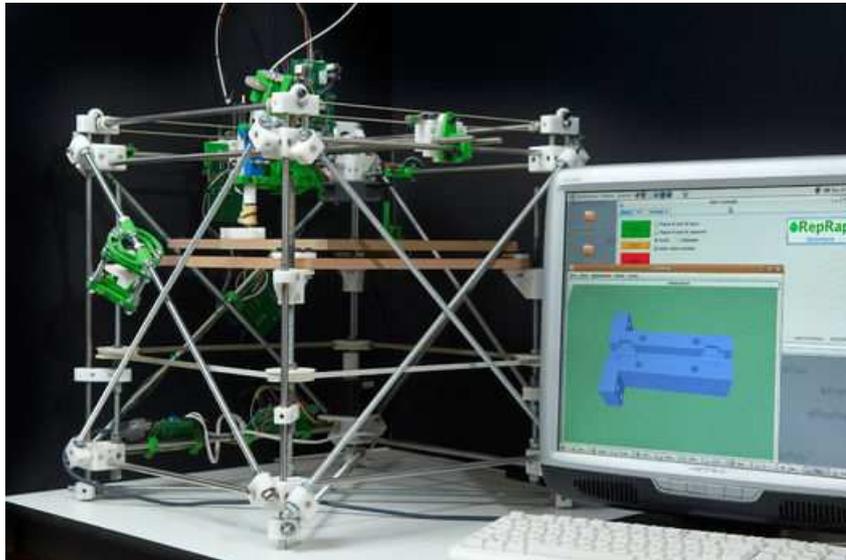


Figura 2.8: Darwin, primera impresora construida por movimiento RepRap.
Fuente: [RepRap, 2013]

2.2.1. Movimiento RepRap

Si bien la filosofía de código abierto nació inicialmente únicamente con la libre distribución de software, con el tiempo nació la idea de distribuir hardware libre. Una de las principales muestras del hardware libre es la plataforma *'Arduino'* muy conocida hoy en día y que muestra un interfaz amigable para su programación. Con el paso del tiempo grandes compañías iniciaron el desarrollo de impresoras en 3D con costos bastante asequibles, comunidades de *'entusiastas'*, programadores, desarrolladores fundaron una comunidad basada en el desarrollo libre, gratuito y condicionado con licencias de software

libre; es así como nació el movimiento ‘RepRap’.

La filosofía (FOSH) ‘Free and Open Source Hardware’ cuyas especificaciones son publicadas bajo licencias ‘GNU’ y que son capaces de replicarse a sí mismas, imprimiendo sus partes para generar más máquinas. Muchos proyectos relacionados han utilizados sus diseños para la inspiración de crear un eco-sistema de impresoras en 3D relacionadas o derivadas una de otras. Muchas de ellas son obviamente de diseños de código abierto. La gran variedad de modificaciones en cada impresora obedece a esta iniciativa de mejora continua y de nuevas innovaciones, cada impresora cuenta con características diferentes según sea su aplicación.

El veloz desarrollo de esta tecnología y con el apoyo de desarrollo libre cada día gana mayor interés , pues permite una ‘Hiper-personalización’ y el uso de diseños de dominio público para la fabricación de tecnología apropiada en código abierto. Esta tecnología obviamente genera una iniciativa de desarrollo sostenible ya que las recursos que se requieren son además de económicos de muy sencilla aplicación y disponibles en cualquier mercado.

Una de las principales armas con las que cuentan las impresoras alineadas a la comunidad RepRap es el costo. El costo de las impresoras en 3D a disminuido drásticamente desde alrededor del años 2010, con máquinas que solían costar \$20,000 y ahora una impresora que cuente con las mismas características cuesta alrededor de \$1,000.

Por ejemplo, en el 2013 muchas compañías y desarrolladores individuales empezaron a vender partes de varios modelos RepRap con precios que variaban entre \$500 y \$800. El proyecto ‘ Fab@Home’ fue desarrollado de tal forma que pueda ser usado con cualquier material que pueda ser extruído por una boquilla desde chocolate, silicona o reactivos químicos. Con este breve ejemplo se muestran los alcances que se pueden lograr con la comunidad ‘RepRap’, cuyo principal objetivo es difundir y compartir cada mejora en cada impresora y que este se encuentre al alcance de todos.

2.3. Coloración de polímeros

El color como se conoce ampliamente, aporta una gran contribución para el suceso de un determinado producto. Dada la importancia que representa el ‘color’, sus estudios han buscado encontrar la especialización en los métodos de coloración. Específicamente en el sector de plásticos, tomando en cuenta el crecimiento en el mercado, la elección y el desarrollo de los colores ideales mismos que involucran aspectos sumamente complejos que los tradicionalmente tomados en cuenta, como la estética visual además de diversos significados que rondan alrededor de cada color su tono y concentración. La inclusión de colores incluye coordinación de diversos elementos, así como: la utilización y aplicación

de las piezas, niveles de tolerancia, resina utilizada, temperatura de procesamiento, toxicidad y entre otros aspectos fundamentales para el desarrollo de colorantes tinturas o concentrados.

Existen diversas técnicas de coloración de resinas termoplásticas, los más conocidos y más utilizados se destacan los concentrados o ‘masterbatches’; ya que ofrecen muchas ventajas y facilidades a los diferentes procesos de extrusión o inyección de plástico. Los concentrados poseen varias composiciones complejas de colorantes y/o aditivos, que obedecen a rígidos criterios en su selección e incorporación. Es así que para empezar a comprender conceptos sobre ‘masterbatches’ es necesario considerar tres conceptos claves:

- Materias colorantes.
- Aditivos.
- Concentrados.

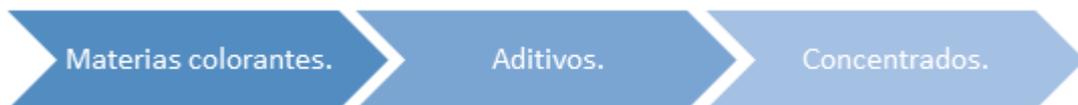


Figura 2.9: Secuencia de fabricación y composición básica de los concentrados ‘masterbatches’.

2.3.1. Materiales colorantes

En esencia los colorantes son sustancias que, una vez incorporadas, confieren color a un sustrato. Los colorantes son generalmente clasificados en dos categorías: los colorantes propiamente dichos y pigmentos generalmente en presentaciones en polvo. Estos últimos a su vez se pueden subdividir en dos clases: los pigmentos orgánicos e inorgánicos.

2.3.1.1. Colorantes

Son materias colorantes orgánicas solubles dentro del medio de aplicación. Un bajo índice de refracción, elevado poder tinturante, alta resistencia a la luz, a la temperatura y un alto resplandor.

2.3.1.2. Pigmentos

Son materias colorantes orgánicas solubles dentro del medio de aplicación. Un bajo índice de refracción, elevado poder tinturante, alta resistencia a la luz, a la temperatura y un alto resplandor.

* *Pigmentos orgánicos.*

- Buena capacidad de coloración.
- Alto brillo.
- Buena transparencia.
- Resistencia variable a la luz y al calor.

* *Pigmentos inorgánicos.*

- Buena capacidad de coloración.
- Alto brillo.
- Buena resistencia a la luz.
- Resistencia variable al calor.

En la formulación o composición exacta de varios elementos dentro de un concentrado de color, la selección de colorantes se efectúa tomando muy en cuenta las propiedades mencionadas anteriormente, así; se permite seleccionar composiciones específicas según las aplicaciones deseadas. Inclusive es posible tomar en cuenta una composición de hasta cinco colorantes diferentes para colorante deseado, siempre y cuando tengan en común la compatibilidad con la resina a colorear y obedezcan las restricciones y requisitos que el proceso de fabricación impone.

2.3.2. Aditivos.

Los aditivos son sustancias químicas generalmente en estado líquido que confieren determinadas propiedades específicas a los polímeros, dentro de ellas por ejemplo tenemos: deslizantes, anti-bloqueos, retardadores de llama, foto-biodegradables, anti-UV y un sinnúmero de propiedades que pueden ser modificados para los polímeros. De la misma manera que los colorantes la selección de aditivos para la elaboración de concentrados o compuestos debidamente formulados se parte del principio de los requisitos y restricciones del proceso de fabricación y aplicación del producto.

2.3.3. Concentrados.

Los concentrados son el resultado de la adición e incorporación de altas cantidades de colorantes y/o aditivos por medio de un vehículo compatible con el polímero de aplicación, destinados a colorear e incluso únicamente proporcionar resinas a las resinas termoplásticas en general. Según el principio de incorporación y adición los concentrados pueden tener las siguientes presentaciones (figura 2.10).

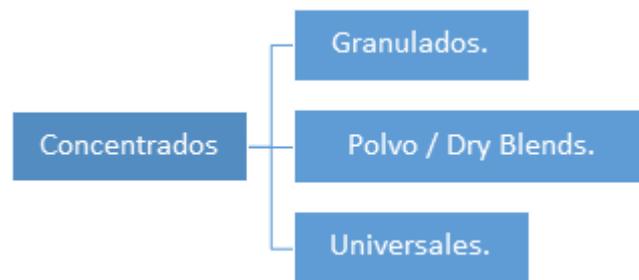


Figura 2.10: Diferentes presentaciones de los diversos concentrados.

2.3.3.1. Concentrados granulados.

Es el resultado de la asociación de los colorantes y aditivos en resina termoplástica en resina termoplástica (vehículo) procesable en equipos de extrusión. Los concentrados en forma de granulados cuentan con las siguientes características:

- Aplicables de 2 a 5 PCR (La reacción en cadena de la polimerasa, conocida como PCR por sus siglas en inglés (polymerase chain reaction) [Stirling, 2003].
- Fácil dosificación y manipulación.
- Excelente dispersión de colorantes.
- No contaminante.
- Uniformidad de color.
- Elevado poder de teñido, es decir; alto rendimiento.
- Permite grandes y rápidos cambios de tonalidades, además de económicos.
- Presentaciones de pequeño tamaño y genera un stock reducido de materia prima.
- Elevado poder de teñido, es decir; alto rendimiento.
- Bajo costo según la relación de masa de material teñido para masa de concentrado.
- No interfiere en las propiedades del producto final.

2.3.3.2. Concentrados en polvo. (Dry-Blends)

Obtenidos por disposición de los colorantes en vehículo no polimérico en forma de polvo. Tienen la propiedad de envolver y adherirse uniformemente al polímero de aplicación. Su fabricación también puede obtenerse de la micronización de los concentrados granulados. Las características de los concentrados en polvo poseen las siguientes características:

- Una aplicación normalmente inferior a 2PCR en peso.
- Indicado para aplicación en resina pero en forma de polvo.
- Permite la adición de alto contenido de colorantes.
- Buena homogenización con resina de aplicación.
- Tiende a causar contaminación.
- Dispone de menor dispersión de colorantes con relación a los concentrados granulados.

2.3.3.3. Concentrados universales.

Son una dispersión de colorantes con aditivos por medio de un vehículo aglomerante, genera un producto de granulometría irregular.

- Aplicable de 1 a 5 PCR en peso.
- No contaminante.
- Compatible con varias resinas, tomando en cuenta que el color natural puede llegar a interferir en el color del producto final.
- Poseen baja viscosidad de fundido, se puede llegar a obtener una buena homogenización en ciertos polímeros y regular en otros.
- El vehículo aglomerante puede llegar a interferir en las propiedades del producto final.

2.3.4. Procesos de fabricación de concentrados.

Los sistemas de producción de los concentrados o 'masterbatches' a simple vista de fabricación sencilla representan un conjunto de procesos y equipos específicos además de la necesidad de una continua supervisión en la producción con el fin de atender las especificaciones deseadas.

Obviamente la consideración de la fabricación de algunos concentrados no cumple con el proceso secuencial presentado, ya que requieren de determinados subprocesos con mas etapas; así como dispersión previa de colorantes y/o aditivos, colocación previa de estufa para la respectiva mezcla, entre otros.



Figura 2.11: Esquema de fabricación de concentrados granulados.

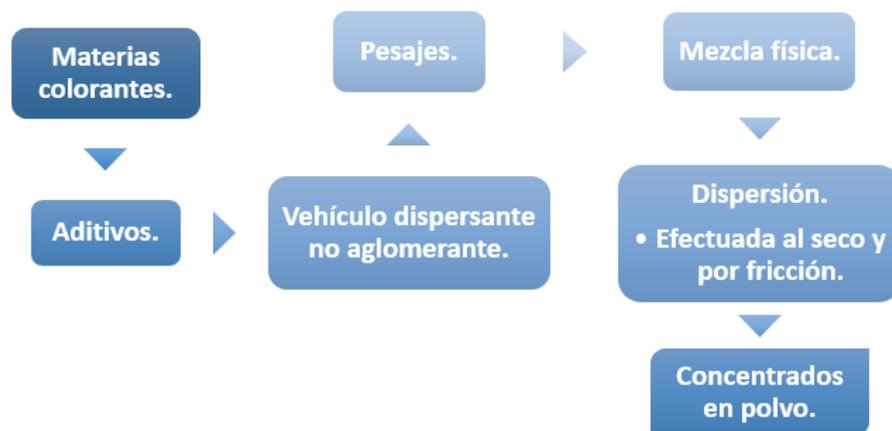


Figura 2.12: Esquema de fabricación de concentrados polvo.

2.3.5. Utilización práctica de los concentrados.

La sencillez de uso es la principal característica de los concentrados. Varios aspectos deben ser tomados en cuenta, mismos que son descritos a continuación:

2.3.5.1. Dosificación.

Es la cantidad en relación de porcentajes de concentrado que será aplicado a la resina para obtener el efecto y tonalidad deseada. La dosificación recomendada es orientada por el fabricante y debe ser obedecida así se permiten evitar problemas de cubrimiento u homogenización. La mezcla con una resina virgen puede ser hecha por simple mixtura en tambores o por medio de dosificadores automáticos. En el caso por medio de tambores de mezcla es recomendable realizar un pesaje simple del concentrado y posteriormente realizar el mezclado en el sistema de tambores, así se garantiza una distribución homogénea de los granos del concentrado en la resina de aplicación. La mezcla puede ejecutarse en tambores rotativos, mezcladores de cemento o incluso manualmente. Generalmente los concentrados son dosificados en PCR (partes por cien partes de resina), permitiendo realizar el procedimiento de pesaje más sencillo que la dosificación porcentual.

Ejemplo aclaración numérico PCR: *Se recomienda un concentrado al 2 PCR.*

2 PCR = 2 partes de concentrado + 100 partes de resina = 102 partes (1.96 % del concentrado).

2 % = 2 partes de concentrado + 98 partes de resina = 100 partes (2 % del concentrado).

2.3.5.2. Granulometría.

El fin de la granulometría se refiere a la uniformidad, regularidad y tamaño de granos del concentrado. Si se utilizan dosificadores volumétricos es imprescindible que la granulometría del concentrado sea uniforme y constante en todos los lotes de producción. Resulta imprescindible considerar especificaciones la granulometría más adecuada según su aplicación.

2.3.5.3. Condiciones es de procesamiento.

Los concentrados de color o aditivos son proyectados para determinadas condiciones de procesamiento. Así, se recomienda según la gráfica onda vs reflectancia algunas consideraciones comunes:

- Resistencia térmica del concentrado, límites de temperatura.
- Evitar tiempos de residencia extendidos en equipos de proceso.
- Ajustar la máquina para obtener buena plastificación y homogenización de la mezcla.
- Usar determinados sistemas de filtrado en los procesos de extrusión.

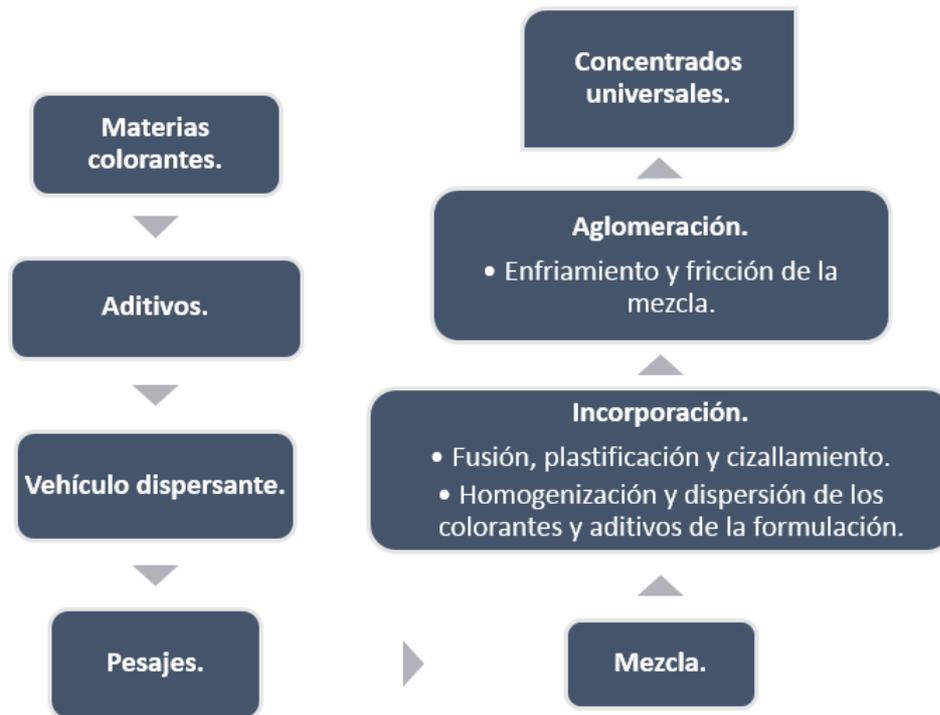


Figura 2.13: Esquema de fabricación de concentrados universales.

2.3.6. Propiedades fundamentales de los concentrados.

2.3.6.1. Tonalidad

Generalmente al hablar de tonalidades es el resultado de interacción entre una fuente de luz, el objeto coloreado y el observador, por ende no se trata de un fenómeno simple (Figura 2.14).

El color es hoy un objeto de muchas atenciones, en función de directa de la estética y apariencia del producto final.

* *Evaluación de tonalidad.* La evaluación de tonalidades se puede realizar ya sea visualmente como a través de una medición instrumental rigurosa.

- Evaluación de visual. La evaluación de tonalidades se puede realizar ya sea visualmente como a través de una medición instrumental rigurosa.

- Evaluación instrumental.

a) Colorímetros triestímulos:

Equipos que operan con tres filtro sobre los espectros de luz visibles. El re-

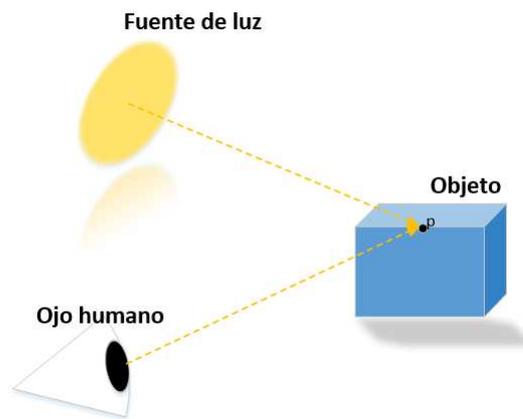


Figura 2.14: Representación de incidencia de luz en la tonalidad.
Fuente: [Moreno, 2004]

sultado son valores numéricos que deben compararse con valores estándar, pero no se permite identificar un valor específico del color medido.

b) Espectrofotómetros computarizados:

Consiste en evaluar y comparar muestras 'estándar' y mezclas preparadas a una fuente de luz gradualmente variable en el rango de 400 a 700 nanómetros (rango de longitud de onda visible), así, para cada longitud de onda incidente en el objeto, refleja un determinado porcentaje de luz (reflectancia). Ocasionalmente que cada mezcla, concentración y tonalidad de cada color obtengan su propia curva característica y exclusiva de longitud de **onda vs reflectancia**.

Cada curva que se obtiene de los espectrofotómetros permite destacar que:

- El blanco permite reflejar todas las longitudes de onda, tiene una curva teórica recta. Se encuentra en la faja de 100 % de reflectancia.
- El negro, al contrario permite absorber todas las longitudes de onda. Tiene una curva teórica del alrededor del 0 %.
- En el resto de curvas se puede observar que presentan picos en el rango de la faja de longitud de onda, correspondiente a la tonalidad predominante.

Así se permite obtener una diferencia entre dos colores. Además de la visualización inmediata de los desvíos de los mismos gráficos.

* *Metamería*. El fenómeno de metamería ocurre si: dos o más colores y estos parecen semejantes al observador, bajo una misma fuente de luz; y cuando estos mismos

colores parecen entre sí, cuando se observan bajo fuentes de luz diferentes. Generalmente ocurre cuando las muestras son formuladas de forma diferente. Además de la evaluación visual, este fenómeno puede detectarse también por medio de la medición instrumental del color y visualización de su curva espectrofotométrica. Con el fin de evitar la metamería se requiere que se empleen los mismos pigmentos y colorantes, asimismo de la misma base de resina y el mismo grado de dispersión.

- * *Diferencia de color.* Como se mencionó anteriormente una diferencia entre un color estándar y un color preparado con la misma tonalidad, normalmente se evalúa con un parámetro denominado espectrofotometría computarizada ‘Delta E (DE)’. Constan varias formas para describir colores, la más común ‘L, a, b’ que basan su principio en la teoría de visión de color. Está afirma que la señal enviada por el ojo al cerebro se envía cargado de información en tonos ‘rojizos’ y ‘verdosos’, ‘amarillentos’ o ‘azulados’ y en luminosidad o brillo de la fuente de luz. La imagen se muestra a continuación (Figura 2.15)

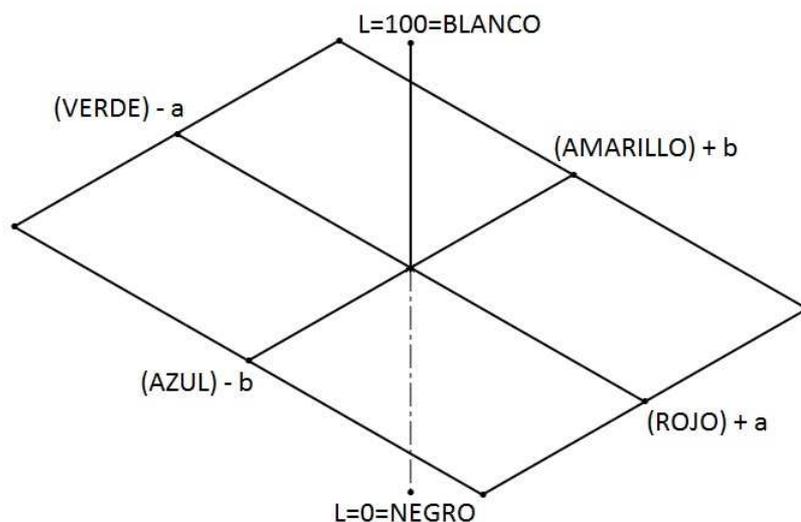


Figura 2.15: Evaluación de parámetro a través de visión de color “Lab”.
Fuente: [Mariano, 2011]

El ‘DE’ es simplemente el efecto de varios cálculos realizados iniciando con las diferencias verificadas por la lectura colorimétrica en cada uno de los tres ejes del sistema. Es decir; si encontramos en valor “cero” para el color estándar, encontrar las diferencias en los ejes ‘L’, ‘a’ y ‘b’ permiten evaluar la relación con el color derivado y obtener la diferencia total con la relación del color ‘estándar’. En la actualidad este tipo de control es bastante utilizado y se lo usa en gran cantidad

para obtener registros numéricos de las muestras, no permite sustituir en su totalidad a las comparaciones visuales y espectrofotométricas.

2.3.7. Homogenización.

La homogenización determina el nivel de dificultad que permite la distribución del concentrado sobre la resina de aplicación, durante todo el proceso de mixtura. Dicho proceso obedece principalmente a dos factores: carga de concentrado (contenido de colorantes y/o aditivos) y de las propiedades y comportamiento del fluido entre la mezcla y el polímero de aplicación.

2.3.7.1. Grado de carga

La aplicación debe ser tal que permita una distribución del concentrado ente 1 y 5 PCR. Generalmente en aplicaciones menores a 1 PCR (concentrados con alto grado de carga) generan una distribución espacial deficiente de los gránulos en sí del concentrado en la resina, lo que dificulta el trabajo del sistema de extrusión para homogenizar la mezcla.

2.3.7.2. Comportamiento del flujo.

Para obtener un óptimo desempeño del concentrado referenciado hacia la homogenización, es necesario que la viscosidad debe ser inferior a la de la resina de prueba. Así, durante la plastificación de mezcla en los iletos de rosca, el concentrado es el primero en sentir los efectos del cambio de temperatura y del cizallamiento (proceso de fricción), y a plastiicarse, homogeneizandose velozmente en dicho polímero de aplicación. Si los concentrados o masterbatch fuera mas viscoso, se corre el riesgo que la pieza contenga ciertas áreas de mayor concentración que otras y como resultado no se permite obtener una coloración uniforme sino mas bien, una tinturación desigual en el polímero.

2.3.8. Concentración.

Concentración de colorantes se determina como el grado de carga de aditivos y/o concentrados líquidos. Dicha concentración se encuentra determinada por materias primas implicadas en la formulación del mismo (*colorantes, aditivos, resinas*) y obviamente por el proceso de elaboración del concentrado.

Generalmente se busca la mayor relación de volumen y poder de tinturación, de forma que el concentrado que se elabore con un nivel de dispersión adecuada para aplicarse dentro del rango ed 1 a 5 PCR. Los pigmentos existen en aquellso que permiten un altísimo nivel de compatibilidad para la incorporación con el polímero y obtener euna buena dispersión,

como los orgánicos, que permiten conseguir niveles de hasta el 80 %. Mientras que algunos concentrados de pigmentos orgánicos o los conocidos colorantes alcanzan niveles máximos de apenas 50 %.

La concentración de los colorantes dentro de los masterbatches depende de factores como:

- Características de esparcimiento deseado, es decir capacidad de cubrimiento o compatibilidad entra la resina y su base disuelta.
- Capacidad de homogenización, si el concentrado tiene un gran poder tinturante en poca cantidad de volumen, es requerido diluir el concentrado, de esta forma se logra aplicar en una dosificación mayor. facilitando su homogenización con la resina o polímero.

2.3.8.1. Verificación del concentrado de colorantes/aditivos.

La verificación es trascendente pues la concentración de colorantes/aditivos en el "masterbatch" interfiere directamente en la edosificación porcentual de su aplicación y en su costo. La verificación se puede realizar midiendo el peso específico del concentrado, u otros procesos analíticos, pero una verificación real se la realiza en la práctica aplicando el concentrado directamente al polímero.

- *Peso específico o densidad.*

El método consiste en la comparación de densidades del concentrado estándar con los concentrados elaborados. Sin embargo, el peso específico no demuestra directamente el poder de tintóreo del concentrado, esta propiedad no proviene exclusivamente de la cantidad sino más bien de la calidad de los colorantes involucrados, de su dispersión y granulometría.

- *Tenor de cenizas.*

Dicho ensayo es empleado para detectar la concentración de pigmentos que no se descomponen a la temperatura del análisis, es decir, algunos pigmentos inorgánicos. El ensayo mencionado es aplicado principalmente a concentrados blancos, así el tenor residual se relaciona con porcentajes de *dióxido de titanio* (TiO_2). El hecho de existencia de cargas como el carbonato de calcio. Otros pigmentos blancos esconde un contenido verdadero de (TiO_2), lo que permite alterar algunas características del concentrado, principalmente como el poder de tontóreo y cubrimiento; considerando que puede perjudicar el desempeño en aplicaciones críticas como la extrusión de películas de espesores mínimos. Un punto extra a considerar es que las cargas en un "masterbatch" influyen directamente en su costo.

A continuación se muestra un breve resumen de la secuencia para realizar el ensayo de cenizas.

Ensayo para verificar el contenido de cenizas (Diagrama simplificado)

1. Calcinación del material a 600°C durante una hora.
2. Obtención de cenizas, donde la composición más frecuente es ($TiO_2 + CaCO_3$).
3. Reacción con ácido clorhídrico (HCl), que elimina el $CaCO_3$, obteniendo di hubiera TiO_2 .
4. Pesaje de cenizas residuales, así se obtiene el valor de TiO_2 en el concentrado.

2.3.9. Dispersión.

La dispersión se puede definir como el grado de desaglomeración de partículas de un colorante en la resina. Obviamente la dispersión depende principalmente de las características del colorante, eficiencia del proceso de fabricación y la formulación de cada producto. La dispersión en un concentrado es aquel que permite que todas las partículas de colorantes se encuentran suficientemente desaglomeradas de su estado original, así el producto final muestra una gran uniformidad. Es decir no se cuenta con la presencia de "puntitos." partículas que cuenten con mayor cantidad de concentrado y no permita alcanzar la uniformidad.

2.3.10. Poder tintóreo.

Se conoce como la propiedad que tiene un colorante para otorgar mayor o menor color a un sustrato. Ésta es una propiedad única de cada tipo de pigmento/colorante. Cuando se habla de concentrados, el poder de tintóreo depende directamente de los tipos de colorantes empleados en fórmula del color y del grado o capacidad de dispersión del mismo. Una breve comparación determina que los colorantes poseen generalmente mayor poder tintóreo que los pigmentos orgánicos, mismos que a su vez son mas intensos" que los pigmentos inorgánicos.

2.3.11. Poder de cubrimiento.

Se conoce como la capacidad que tiene un colorante para no transmitir la luz a través de un de un determinado medio donde se lo aplica. Es decir; mientras mayor es la cantidad de luz que atraviesa una pieza, menor es el poder de cubrimiento de los colorantes que lo tinturaron.

2.3.12. Resistencia térmica.

La resistencia térmica esta determinada por la temperatura mas alta a la logre exponerse un concentrado durante al menos 5 minutos en una extrusora o inyectora sin que represente un cambio representativo de color. Esta alteración de color conlleva a una descomposición térmica del pigmento o por disolución con posterior proceso de recristalización del mismo. En el concentrado, la solidez al calor no siempre puede determinarse por la solidez del pigmento menos resistente, ya que la mezcla de colorantes o simplemente las diferencias de concentraciones entre ellos puede causar efectos contrapuestos, es decir que uno de los ellos puede disminuir las propiedades de los demás. Cada nuevo concentrado desarrollado debe medirse una nueva resistencia térmica.

2.3.12.1. Determinación de la resistencia térmica.

La determinación de la resistencia térmica es una técnica simple que consiste en someter una mezcla de polímero con el concentrado en una inyectora con calor durante un intervalo de tiempo determinado, durante un estimado de 5 minutos. Se repite la prueba con sucesivos incrementos de temperatura, hasta que ocurran alteraciones con relación al color original.

2.3.13. Solidez a la luz e interperie.

La incidencia de luz artificial o natural exige el uso de concentrados con colorantes/aditivos de alta estabilidad a estos factores, tomando en cuenta que se produzcan sensibles variaciones de tonalidad. Un ensayo de solidez a la luz de plásticos coloreados, es un largo proceso que puede llevar un par de años, por ese motivo se permiten usar equipos de envejecimiento acelerado con el fin de anticipar la evaluación.

2.3.14. Solidez a la migración

La migración de colorantes se subdivide en los dos principales fenómenos:

- *Eflorescencia:*

Se conoce como la migración del colorante hacía la superficie del plástico, manifestándose como un "polvo" sobre el material, después de días o semanas de su incorporación. La solubilidad del colorante en el plástico, la que aumenta con el incremento de la temperatura del proceso. Cuando el material se enfría, la parte disuelta de colorante se cristaliza predominantemente en la superficie, esa así como se caracteriza la eflorescencia [Mariano, 2011].

2.4. Extrusión de polímeros.

La teoría de extrusión de polímeros podría resultar ampliamente extensa, específicamente para este tipo de proyectos únicamente requerimos la extrusión por medio de cambios de temperaturas y separación de zonas en el mismo sistema. Bajo el principio básico lo que se requiere diseñar un sistema que caliente un filamento que es introducido con una determinada fuerza, dividir dichas etapas de una forma marcada. El filamento caliente por motivos físicos necesita ser expulsado por la boquilla. Por principios mecánicos y térmicos se generará los cambios bruscos de temperaturas, se generará las presiones requeridas para que el filamento sea expulsado por la boquilla. De no existir estos cambios bruscos de temperaturas, el filamento será devuelto por el mismo canal de alimentación. La figura 2.20 muestra un esquema de funcionamiento de este tipo extrusores.

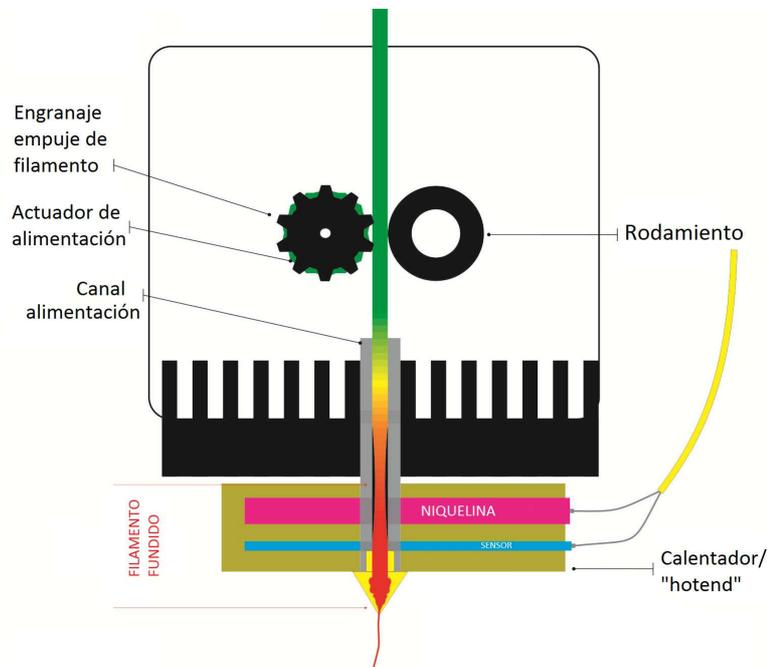


Figura 2.16: Esquema de extrusión tradicional en impresoras 3D
Fuente: [Forum, 2011]

El efecto de generar variaciones de temperaturas se muestra en la figura , el paso en mínimas distancias permite que el polímero se encuentre en estado de transición vítrea en la boquilla, mientras que en el canal de alimentación se encuentra en estado sólido. Añadiendo la presión de alimentación, obligan al filamento a ser extruído y expulsado por la boquilla. Los materiales a ser extruídos necesariamente obedecen a materiales termoplásticos.

2.4.1. Polímeros termoplásticos.

Los polímeros termoplásticos son aquellos que permiten calentarse desde un estado sólido hasta un estado líquido viscoso y que al enfriarse retoman su estado sólido. El ciclo de enfriamiento se puede aplicar varias veces sin llegar a degradar el polímero, razón de dicho comportamiento es que los polímeros termoplásticos consisten en macromoléculas lineales (ramificadas) que no se encadenan transversalmente cuando se calientan, son débiles uniones que se rompen con gran facilidad al aumentar la temperatura. Por el contrario los termofijos y los elastómeros sufren variaciones químicas si se calientan, lo que hace que las cadenas se unan transversalmente y se fragüen permanentemente. La relación funcional se puede analizar desde el punto de una estructura cristalina y amorfa.

2.4.2. Temperatura en termoplásticos.

El principio fundamental para la extrusión de polímeros a través de una boquilla es el efecto de la temperatura sobre los termoplásticos. La temperatura influye en el comportamiento viscoelástico en el sentido de influir sobre enlaces por fuerzas de *Van der Waals* entre las cadenas moleculares. Cuando la temperatura aumenta considerablemente, los enlaces tienden a desenrollarse y tienen lugar a un flujo viscoso con una menor tensión aplicada. a bajas temperaturas, el polímero se vuelve viscoso, sus cadenas no se deslizan; es decir el polímero se comporta como un sólido rígido. La figura 2.17, presenta diversos grupos funcionales según la temperatura.

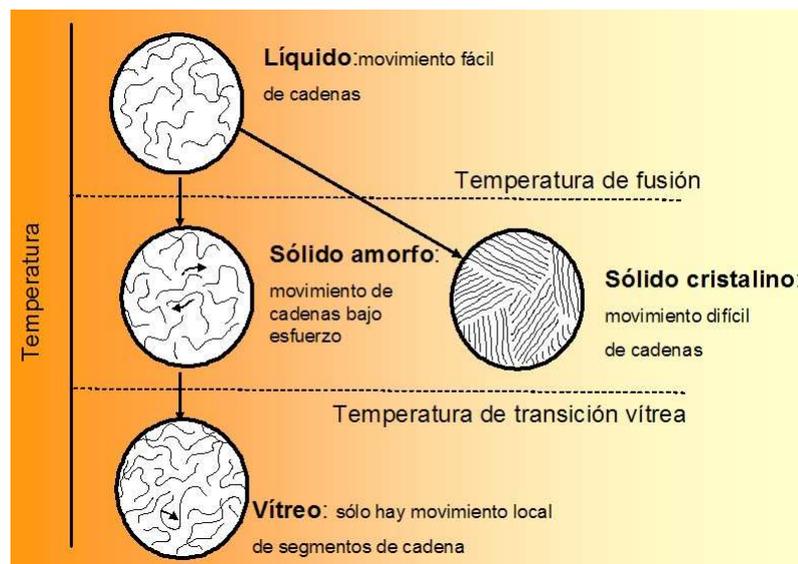


Figura 2.17: Efecto de la temperatura en la estructura y comportamiento de polímeros termoplásticos.

Fuente: [de Valencia, 2011]

A pesar de las variaciones, existe una temperatura que sobrepasa la temperatura de fusión. A una muy alta temperatura los enlaces covalentes de la cadena principal del polímero pueden destruirse, el polímero se quema o carboniza. Esta temperatura, conocida como la *temperatura de degradación*, limita la utilidad del polímero y obviamente restringe sus propiedades útiles. Si la temperatura de los polímeros es elevada, la viscosidad baja. Las cadenas pueden **moverse con facilidad incluso sin fuerzas externas** y si se aplica una tensión al polímero fluye prácticamente sin que exista deformación elástica. El comportamiento expuesto puede explicarse en la figura, la resistencia y el módulo de elasticidad son casi nulos. Si la bajamos la temperatura, se incrementa la viscosidad y no se mueven con facilidad las cadenas de moléculas, llegando a la *temperatura de fusión* en la que el polímero retoma su estado rígido.

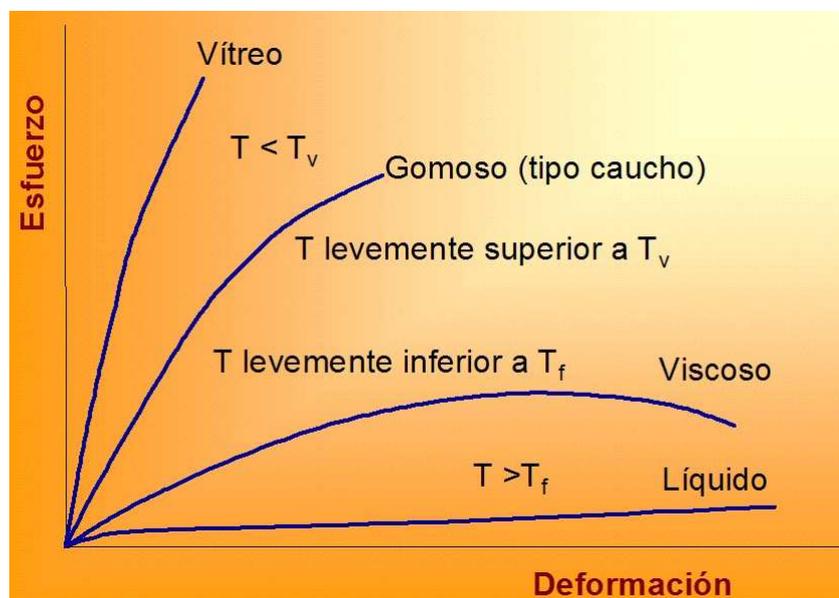


Figura 2.18: Efecto de la temperatura sobre el comportamiento tensión-deformación de polímeros termoplásticos.

Fuente: [de Valencia, 2011]

Con temperaturas inferiores a la de fusión, el polímero es rígido y mantiene su forma sólida, aunque sus cadenas están enroscadas, sin embargo, las cadenas se mueven y causan deformación al aplicar un esfuerzo. Cuando se elimina la tensión, el polímero únicamente recupera su parte elástica de la deformación. Con un bajo módulo de elasticidad y de resistencia, el alargamiento o deformación es considerablemente mayor, simulando el comportamiento de un elastómero. Al ir disminuyendo la temperatura, la deformación elástica crece y el valor de la viscosidad disminuye, el polímero se va solidificando proporcionando mayores valores de resistencia y elasticidad. Conforme disminuye la temperatura, el polímero se encuentra en estado rígido o vítreo. La viscosidad se hace tan baja que solo es

posible el movimiento muy localizada de pequeños grupos de la cadena de moléculas, no existe deslizamiento. Una vez que la temperatura disminuyo por debajo de la temperatura de transición vítrea, el polímero se vuelve frágil y duro, similar a un material cerámico.

La temperatura de transición vítrea generalmente se encuentra entre 0.5 - 0.75 veces la de fusión, dependiendo de la complejidad estructural de la cadena de dicho polímero. La figura 2.19 muestra los diversos estados en el transcurso de alimentación de los filamentos. La tabla 2.1 muestra algunas temperaturas de polímeros comerciales.

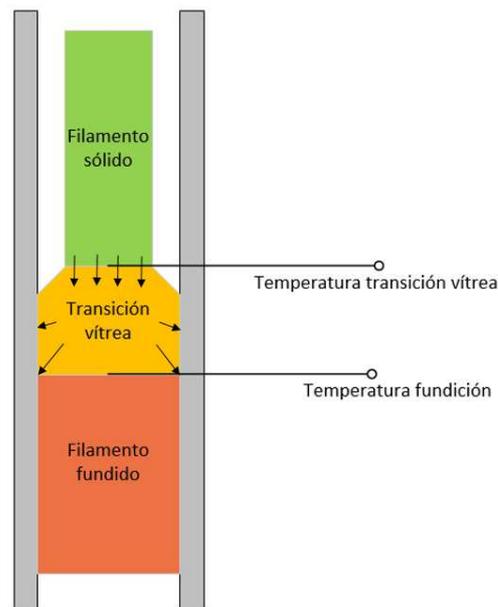


Figura 2.19: Efecto variación de temperaturas y separación de zonas calientes y frías en el extrusor

Fuente: [Forum, 2011]

El grado de cristalinidad es quien decide la deformación de los polímeros. Muchos polímero se cristalizan cuando se enfrían a temperaturas inferiores a la de fusión. En la cristalización influyen valores como: el enfriamiento rápido que evita la cristalización y facilita la estructura vítrea, el grado de deformación del polímero que tiene lugar entre la temperatura de fusión y la vítrea. LA deformación en este dominio proporciona la cristalización enderezando las cadenas y conduciéndolas a una estructura paralela. En los polímero cristalinos la deformación elástica es baja debido a que las cadenas son casi rectas y paralelas entre sí. Las mayores temperaturas permiten un mayor alargamiento por lo que el módulo de elasticidad permanece alto. La estructura cristalina resiste la deformación plástica hasta que la temperatura se acerque al punto de fusión. [de Valencia, 2011]

Tabla 2.1:

Temperaturas de fusión y transición vítrea de ciertos polímeros.

Polímero	$T_f [^{\circ}C]$	$T_v [^{\circ}C]$
Polietileno de baja densidad	115	-120
Polietileno de alta densidad	137	-120
Cloruro de polivinilo	175-212	87
Polipropileno	168-176	-16
Poliestireno	240	85-125
Poliacrilonitrilo	320	107
Teflón PTFE	327	-
Policlorotrifluoroetileno	220	-
ABS	-	88*125

Fuente: [Forum, 2011]

2.4.2.1. Esfuerzos térmicos.

Uno de los responsables directos en la deposición de material fundido es el esfuerzo térmico al que se ve aplicado el polímero para su deposición. Una vez alcanzada la temperatura de fusión es posible determinar la carga necesaria para la deformación a una mínima velocidad con la ecuación

$$\sigma = E\alpha_1(T_0 - T_f) = E\alpha_1\Delta T \quad (2.1)$$

Donde: σ es el esfuerzo que se aplica debido a la variación de temperaturas, α_1 es el coeficiente lineal de dilatación térmica del material. E es la constante de elasticidad del polímero.

2.4.2.2. Deposición filamento fundido.

Las velocidades pequeñas de deformación son mucho mas efectivas que las altas velocidades para provocar cristalizaciones en las impresiones 3D. Tanto temperaturas, presiones, ángulo y volúmenes requieren de un análisis minucioso para una correcta y estable extrusión. Brevemente se detalla que la resolución de impresión se encuentra en función de los parámetros antes mencionados (figura).

$$\text{Calidad de impresión} = f(T, \Delta P, d) \quad (2.2)$$

$$\Delta = f(\alpha, d) \quad (2.3)$$

donde:

Simbología

T = Temperatura en la que el polímero alcanza la transición vítrea

ΔP = Presión que ejerce alimentación

d = Diámetro de extrusión de filamento.

α = Ángulo de conicidad en la boquilla de extrusión.

Se requiere un análisis completo de todos los elementos que influyen en los parámetros de extrusión de polímero se detallan en la referencia [Roxas & Ju, 2008]. La figura demuestra las variables que deben ser consideradas para una correcta y estable extrusión.

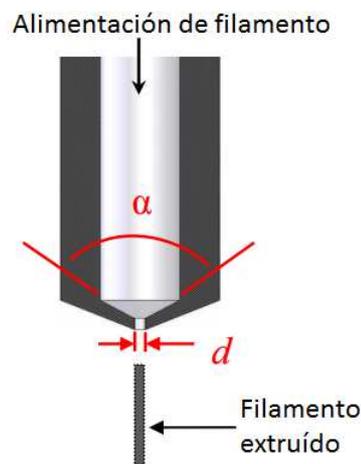


Figura 2.20: Esquema de variables en boquilla, antes de su extrusión

Fuente: [Roxas & Ju, 2008]

Para una impresión 3D, la deposición del material debe atravesar 3 distintas zonas con características independientes entre sí. Generalmente, todas ellas dependen de la geometría de la boquilla.

2.5. Teoría del color.

Con el paso de los siglos, varias teorías han sido establecidas para determinar la teoría del color que ayude a entender su significado, naturaleza e interacción entre ellos. Dos modelos básicos se describen: la teoría de color aditivo y la teoría sustractiva. Ambas teorías refieren a crear una amplia gama de colores. Los colores secundarios resultan de la combinación de dos colores primarios en iguales cantidades; así el resto de colores se crea combinando colores primarios y secundarios.

En algunos de los casos por sus iniciales en inglés, los distintos colores primarios y secundarios que se muestran en la figura 2.21 son:

- R: Rojo.
- G: Verde.
- B: Azul.
- C: Cian.
- M: Magenta.
- Y: Amarillo.
- K: Negro.
- W: Blanco.

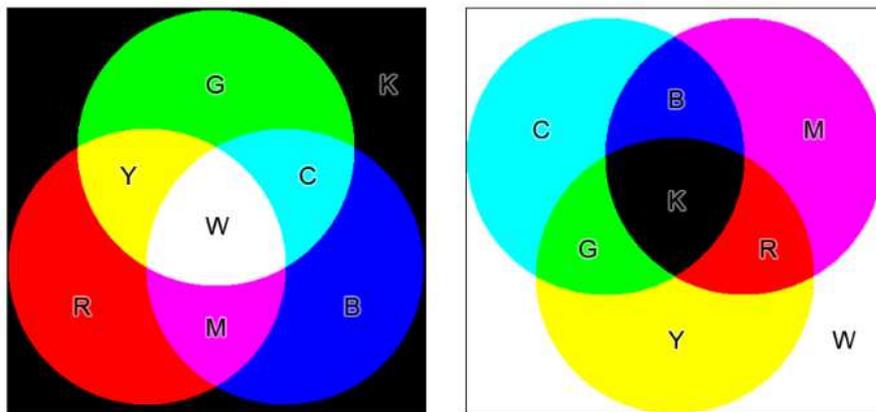


Figura 2.21: Esquema de teoría aditiva y sustractiva respectivamente
Fuente: [Taubert, 2012]

La teoría aditiva, cuyos colores primarios son rojo, verde y azul (RGB), se basa en el principio de añadir luz a ciertas longitudes de ondas a espectros existentes. Este principio es muy utilizado para determinar colores en aparatos electrónicos como monitores o televisiones de pantalla plana. Los colores primarios de la teoría aditiva también pueden ser llamados como los primeros colores de la luz visible, pues si combinamos dichos colores en cantidades similares obtenemos el blanco que representa la ausencia de color. Un modelo muy conocido es el *RGB* por las siglas en inglés de sus colores primarios.

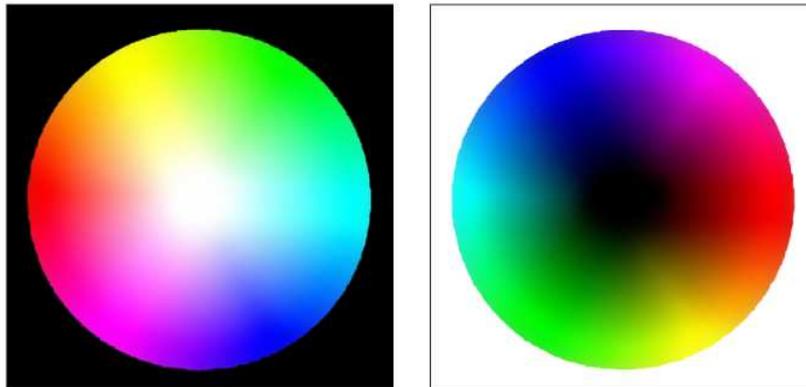


Figura 2.22: Gama de colores según teoría aditiva y sustractiva.
Fuente: [Taubert, 2012]

La teoría sustractiva, cuyos colores primarios son cian, magenta y amarillo describen el efecto de mezclar pigmentos o concentrados, por ejemplo pinturas, tintas o colorantes. Esta teoría se basa en remover ciertas longitudes de onda de un espectro de luz. Así mismo, si combinamos sus colores primarios obtenemos el negro o en términos de luz, la oscuridad. Como su nombre lo indica, se lo conoce como sustractivo pues para determinar el blanco se absorbe la cantidad de luz de los colores primarios. A partir del blanco como base, resulta sencillo añadir colores por lo que es bastante común partir de esta teoría para colorear impresiones o dar color a cualquier extrusión.

La dualidad de las teorías se nota cuando se compara entre colores primarios y secundarios respectivamente. Los primarios de la sustractiva representan los secundarios de la aditiva y viceversa. La imagen 2.22 muestra la dualidad entre ambas teorías.

2.6. Filosofía Hardware Open Source.

El '*Open source hardware - OSH*' consiste en artefactos físicos de tecnología diseñados y ofertados como un diseño libre. Un diseño libre se basa en facilitar toda la información necesaria para que alguien más lo pueda construir. Una vez caemos en una cultura que lo único que busca es difundir el conocimiento impulsando la tendencia de un '*conocimiento libre*'. El diseño de hardware incluye: modelados CAD, diseños mecánicos, esquemas, lista de materiales, diseño PCB, código de programación de hardware. El participante original recibe todo tipo de 'feedbacks' y potenciales mejoras de su diseño por parte de la comunidad 'FOSH'. En la actualidad se demuestra como este sistema que en un inicio no muestra provecho económico, puede representar un grandioso valor intelectual; mucho más valioso a cantidades económicas. El logo que representa el Open Source Hardware se muestra en la Figura 2.23.

La comunidad 'FOSH' nace desde el surgimiento de los dispositivos lógicos programables o memorias digitales. El intercambio de en ese entonces diseños de circuitos de electrónica digital se considera una forma de hardware de código abierto. Con el paso del tiempo, el avance de la electrónica digital por microcontroladores y sistemas embebidos se procedió a reemplazar los esquemas de circuitos por algoritmos, diagramas de flujo o simplemente el desarrollo de todo el código envuelto en la programación del microcontrolador.

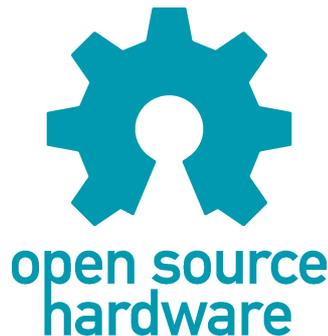


Figura 2.23: Logo Open Source Hardware.
Fuente: [OSHW, 2008]

Cultura 'Maker'

La cultura 'maker' transmite que todos los proyectos desarrollados bajo esta filosofía merece ser compartido y brindar todas las facilidades para que alguien mas sea capaz de reproducir el diseño. Una de las obligaciones del usuario que lo reproduzca es de la misma manera ofrecer mejoras al diseño y ofrecer toda la información de dicha mejora. El movimiento 'maker' lleva una estrecha relación con la cultura 'DIY', que principalmente basan su filosofía en el mismo principio y terminan recayendo en el fundamento básico del 'Open Source'. Mantener todo tipo de inventos o desarrollos tecnológicos en un mundo de libre conocimiento.

2.7. Resumen.

El capítulo presenta diversos criterios principalmente a los diferentes tipos de impresión 3D, así como de forma detallada explica las técnicas y principios básicos de tinturación de polímeros. Las variedades de concentrados, sus propiedades físicas y químicas; así como sus diferentes usos según la aplicación requerida. Asimismo detalla los principios básicos de impresión en 3D por el método de deposición de material fundido, sus tendencias e impresoras mpas representativas según la orientación de usuario.

Capítulo 3

Diseño

Diseño puede entenderse en hallar la forma de transformar información de las condiciones, necesidades y requisitos que el consumidor busca que sean satisfechas. Para iniciar el presente capítulo se partió del diseño orientado a calidad, mismo que permiten encontrar alternativas técnicas que sean capaces de satisfacer la necesidad del consumidor. En el proyecto se desglosan tres aspectos fundamentales para el diseño en sí del extrusor.

El diseño térmico para la selección de materiales que permitirán la transferencia de calor hacia las zonas de alta temperatura del 'hot-end' y a su vez los materiales que generarán una oposición al paso de temperatura hacia zonas frías del 'cold-end'.

El diseño eléctrico y electrónico que permita la selección del sensor de temperatura con su respectivo acondicionamiento y tipo de señal hacia el controlador. Los tipos de actuadores, su tipo de corriente y capacidades de funcionamiento para el dimensionamiento de elementos eléctricos.

Con las variables requeridas en la etapa de extrusión se requiere considerar todos los aspectos físicos para obtener una extrusión estable en una impresión. Finalmente se requiere seleccionar el controlador capaz de procesar los datos requeridos para el funcionamiento del sistema y además enviarlos a una interfaz gráfica que logre demostrar de forma visual los resultados de funcionamiento del sistema.

3.1. Selección y diseño orientado a principios de calidad

Según los principios de diseño, lo más importante es buscar satisfacer los requisitos del consumidor por lo que es necesario plantear la importancia de cada necesidad y su interrelación con el resto de necesidades y sus posibles soluciones. Para una correcta interpretación es requerido desarrollar un estudio QFD, que permite interpretar y traducir las deman-

das y expectativas del cliente en pasos sucesivos, características de diseño y operaciones que satisfacen las demandas y expectativas del mercado.[Enrique Yacuzzi, 2011]. El trabajo realizado fue proceder con el desarrollo de una matriz de calidad para identificar tanto puntos débiles como fortalezas del producto a desarrollar. La matriz desarrollada se muestra en la Figura 3.1. El análisis como tal del producto requiere de comparaciones con potenciales competidores, en el caso específico de impresoras 3D multicolores no existe gran variedad en el mercado. Se escogió a dos que presentan mayor confiabilidad en el mercado, *Spectrom*[®] y *CubePro*[®] fueron escogidas como comparaciones directas en el desarrollo del producto. Como se observa en la matriz de calidad, las principales exigencias que presenta el mercado sobre el desarrollo del presente proyecto son:

- Requisitos principales del consumidor:
 - Homogenización de color.
 - Extrusión estable.
 - Gama de colores.
 - Transición entre colores.
 - Efectividad de extrusión.
 - Facilidad mantenimiento.

Dentro del detalle de los puntos anteriormente expuestos el que lleva un mayor porcentaje es la homogenización de color. Obtener un color de tonalidad estable sin variaciones de tono añadiendo una extrusión estable es así el principal objetivo del desarrollo de este proyecto.

Dentro de las limitaciones y requisitos funcionales esenciales en el diseño del extrusor, sobresalen los siguientes:

- Requisitos funcionales:
 - Estabilidad térmica.
 - Dosificación de color.
 - Cámara de homogenización.
 - Alimentación de filamento.

La ventaja de realizar este tipo de estudio es jerarquizar requisitos funcionales. De aquí parten los principios de diseño, brindar alternativas a los requisitos técnicos es el objetivo del presente proyecto. Como demuestra el análisis en la matriz de calidad, sobresalen cinco aspectos; estos a su vez se ven relacionados en únicamente tres principios

de diseño. La estabilidad térmica y la cámara de homogenización están involucrados con diseño geométrico y el diseño térmico. El análisis y desarrollo de este punto se detallan en el diseño térmico-geométrico del proyecto.

El punto de alimentación del filamento representa el último aspecto de diseño y en el cual se busca identificar las variables involucradas en los diseños anteriores y que determinan en este caso a mas de una extrusión estable que está sea del color deseado.

La complejidad principal desde el punto de vista técnico se basa en hallar la mejor forma de dosificar concentraciones y cantidades de color durante la extrusión. En el caso específico del proyecto la inyección de color se la realizará de la misma forma de alimentación del filamento en los extrusores convencionales. El aspecto de dosificación de color para la cantidad de tintura que debe ser inyectada durante la extrusión representa el limitante principal que busca ser solucionado en este proyecto.

3.2. Alternativas de diseño

Como se menciona en la sección anterior los requisitos funcionales se encuentran involucrados entre sí, de estos sobresalen tres necesidades técnicas que se agrupan según su relación.

- Objetivos técnicos:
 - Diseño térmico geométrico.
 - Alimentación de filamento y extrusión.
 - Inclusión concentrados en forma de filamento.

Basado en estos requisitos, la necesidad es diseñar un sistema de extrusión de polímero con una gama de colores extensa a través del desarrollo de los aspectos arriba mencionados. Las alternativas de cada punto se detallan a continuación.

3.2.1. Alternativas del diseño térmico-geométrico.

El diseño geométrico-mecánico jugó un papel importante principalmente en el diseño de la zona de mezcla '*polímero-colorante*'. Y la meta principal del diseño térmico es alcanzar la temperatura estable y capaz de alcanzar la temperatura llamada 'Glass transition', misma que permite transformar materiales duros y frágiles a cierta temperatura en un estado licuado-disuelto; así permite la extrusión a través de la boquilla. Se persigue seleccionar los materiales y formas correctas que determinen la conducción u oposición de calor. La dosificación de color únicamente requiere una consideración en las capacidades que contará la cámara de mezcla. Los aspectos antes mencionados son requeridos para localizar las condiciones del sistema que permitirán la extrusión. Un manejo de temperaturas, fuerzas y velocidades de alimentación de filamentos son las principales variables que permitirán una extrusión estable y multicolor.

El diseño partió en identificar la forma mas práctica y funcional de incluir varias etapas y zonas calientes en un mismo extrusor. Encontrar la mejor forma de permitir la inclusión de cuatro colores diferentes en forma de filamento y el filamento de color base (blanco) que será extruído fue el principal desafío de esta sección. La forma de generación de calor y el control del mismo se detallan en la siguiente secuencia:

- **Forma del extrusor:** En un inicio se busca determinar una forma funcional y práctica del extrusor, tomando en cuenta la inclusión de una zona de mezcla, zona de calentamiento, zona de extrusión, zona de disipación. Todo esto en conjunto debe ser unificado en un solo sistema, el único limitante es el tamaño.
- **Transferencia de calor:** Con una idea de cual será la forma del extrusor, es requerido determinar los materiales que conformarán el diseño. Mantener el calor en ciertas zonas y permitir la disipación en otras es el objetivo principal del diseño térmico.

3.2.1.1. Forma del extrusor.

La forma del extrusor en un inicio es donde se decide los parámetros iniciales para el diseño del extrusor. Para realizar este análisis se partió en la selección del método de coloración del polímero. pues como punto de partida, es necesario determinar las circunstancias o especificaciones que harán posible la mezcla.

Selección de concentrado.

La coloración de polímeros se puede realizar de diferentes formas como se indica en la sección 2.3. La figura 3.2 muestra las alternativas para dar color a la extrusión.

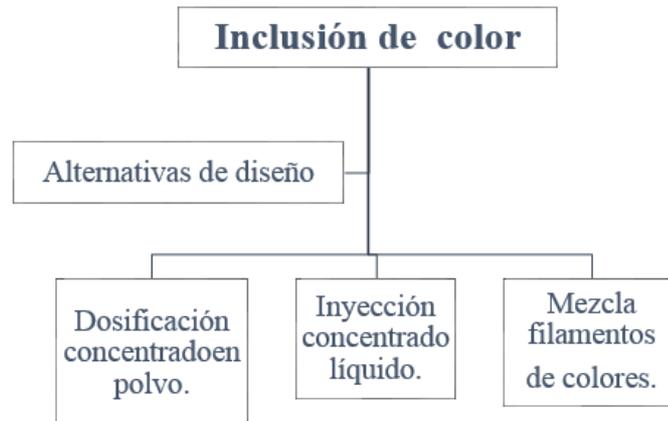


Figura 3.2: Alternativas en sistema de coloración de polímero para extrusión.

Tanto concentrados en polvo como concentrados líquidos brindan grandes propiedades de tintoréo. La mezcla de varios filamentos de colores así como los concentrados antes mencionados son las alternativas que se consideraron más viables. Una breve comparación en los factores más importantes se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1:
Comparación entre alternativas de tintoréo.

	Dosificación concentrado en polvo	Inyección concentrado líquido	Mezcla filamentos de colores
Facilidad de control.	Difícil.	Fácil.	Difícil.
Precisión de control.	Excelente.	Buena.	Poca.
Complejidad mecanismo sistema de dosificación.	Mucha.	Poca.	Poca.
Disponibilidad mercado materia prima.	Poca.	Poca.	Mucha.
Costo.	Alto.	Bajo.	Bajo.

La selección de colorantes se realizó a través de diversos criterios que determinan la selección del tinturante. Los criterios más importantes son:

- *Disponibilidad en el mercado:* El colorante líquido por su poco comercio es de difícil acceso en el mercado, únicamente grandes compañías de extrusión o soplado de

botellas cuentan con colorantes de polímeros. Dentro de este criterio se incluye el costo, gracias a su íntima relación con las disponibilidad en el mercado.

- *Compatibilidad*: Criterio que identifica la compatibilidad que tendrá el polímero con el tipo de concentrado que brinda color a la extrusión. Este criterio engloba la facilidad de mezcla y capacidad de homogenización para determinadas concentraciones
- *Facilidad de control*: Depende de las variables físicas que presente la sustancia, su viscosidad, densidad son algunas variables importantes en este criterio

Tabla 3.2:

Peso específico de cada criterio para determinación de colorante.

Criterio	Control	Compatibilidad	Mercado	$\Sigma + 1$	Ponderación
Control	-	1	1	3	0.5
Compatibilidad	0	-	1	2	0.33
Disponibilidad	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Con lo expuesto en la sección anterior las posibles soluciones para permitir mezcla de colores son:

- Concentrados polvo.
- Concentrados líquidos.
- Variedad filamentos de colores.

Con el valor que representa el peso específico de para cada alternativa en la selección del concentrado, es requerido evaluar cada criterio en cada alternativa para la selección.

La tecnología de coloración de polímeros se puede observar en la sección 2.3 en la que se detallan todas las variaciones y tipos de concentrados que permiten colorear un polímero. La variedad es ampliamente extensa, lo que se busca principalmente en el proyecto es permitir una mezcla rápida, estable y de mínimas transiciones.

Evaluación para criterio de Control en selección de concentrado.

Tabla 3.3:

Evaluación de criterio para facilidad de control.

Control	Filamentos	Líquidos	Polvos	$\Sigma + 1$	Ponderación
Filamentos	-	1	1	3	0.5
Líquidos	0	-	1	2	0.33
Polvos	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Evaluación para criterio de compatibilidad entre filamento o polímero y el concentrado.

Tabla 3.4:

Evaluación para criterio de compatibilidad entre filamento/polímero y el concentrado.

Compatibilidad	Filamento	Polvos	Líquido	$\Sigma + 1$	Ponderación
Filamento	-	1	1	3	0.5
Polvos	0	-	1	2	0.33
Líquidos	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Evaluación para criterio de disponibilidad en el mercado del concentrado.

Tabla 3.5:

Evaluación de criterio para disponibilidad en el mercado.

Disponibilidad	Filamentos	Líquido	Polvo	$\Sigma + 1$	Ponderación
Filamentos	-	1	1	3	0.5
Líquido	0	-	1	2	0.33
Polvos	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Selección de la alternativa con mejor calificación según los requisitos del proyecto.

Tabla 3.6:

Tabla de conclusiones en la selección de tipo de colorante o concentrado que será utilizado.

Conclusión	Control	Compatibilidad	Disponibilidad	Σ	Prioridad
Polvo	0.085	0.1089	0.0289	0.2228	3
Filamentos	0.25	0.165	0.085	0.5	1
Líquido	0.165	0.0561	0.0561	0.2772	2
Suma				1	

En conclusión a la tabla 3.6 obtenemos que la mejor alternativa para tinturar o colorear el polímero antes de ser extruído es **la dosificación de varios filamentos de distintos colores** durante la extrusión.

Selección de forma de cámara de mezcla.

Una vez solucionado el aspecto del color, es necesario determinar la forma como tal del extrusor. Principalmente en la zona que llevara a cabo la mezcla entre concentrado. Los criterios que se toman en cuenta para la selección son:

- *Tamaño*: Un criterio fundamental es la selección del tamaño del sistema, por motivos de practicidad es requerido que el sistema sea lo más pequeño posible.
- *Manufactura*: Criterio que permite calificar la dificultad para la fabricación de la zona de mezcla, mientras represente un diseño de fácil fabricación su ponderación será mayor.

En la figura 3.3 se muestran algunas alternativas comerciales para la inclusión de distintos filamentos sobre un mismo extrusor.

La selección de la forma se demuestra en la tabla 3.7 , que jerarquiza los criterios de evaluación.

Tabla 3.7:

Peso específico de cada criterio para selección de forma de cámara de mezcla.

Criterio	Manufactura	Tamaño	$\Sigma + 1$	Ponderación
Manufactura	-	1	2	0.67
Tamaño	0	-	1	0.33
Suma			3	1



Figura 3.3: Alternativa comercial de inclusión de color por diferentes disipadores y extrusión por una misma boquilla .

Las alternativas que permitan la alimentación de filamentos de distintos colores para ser extruídos son:

- Alimentación vertical/inclinado de color tanto de color como del filamento en el mismo extrusor.
- Alimentación horizontal de color y filamento en el mismo extrusor.
- Zona de mezcla de color exterior al extrusor, alimentación de filamento mezclado.

Las alternativas únicamente son dos ya que de estas dos formas se permite la inclusión de elementos externos al sistema de extrusión común en las impresoras 3D.

Evaluación para criterio de tamaño para selección de forma de la cámara de mezcla, a menor tamaño una mejor ponderación.

Tabla 3.8:

Evaluación para criterio de tamaño para selección de forma de la cámara de mezcla.

Tamaño	Exterior	Horizontal	Vertical	$\Sigma + 1$	Ponderación
Exterior	-	1	1	3	0.5
Horizontal	0	-	1	2	0.33
Vertical	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Evaluación para criterio de dificultad de manufactura.

Tabla 3.9:
Evaluación para criterio de manufactura para selección de forma de la cámara de mezcla.

Manufactura	Horizontal	Exterior	Vertical	$\Sigma + 1$	Ponderación
Horizontal	-	1	1	3	0.5
Exterior	0	-	1	2	0.33
Vertical	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Selección de la alternativa con mejor calificación según los requisitos del proyecto para forma de la cámara de mezcla.

Tabla 3.10:
Tabla de conclusiones en la selección de forma en la cámara de mezcla.

Conclusión	Manufactura	Tamaño	Σ	Prioridad
Horizontal	0.335	0.1089	0.4439	1
Vertical	0.2211	0.0561	0.2772	3
Exterior	0.1139	0.165	0.2789	2
Suma			1	

La mejor alternativa es desarrollar un extrusor que alimente los colores de forma independiente en dirección horizontal y que está se realice directamente a una cámara de mezcla. Uno de los motivos más trascendentales para la selección de este aspecto, es que colocar alimentaciones en dirección transversal al extrusor no limita la altura en el área de impresión de la impresora Delta. Para la implementación del sistema se tomo en un sistema similar a un bloque de aluminio, con la inclusión de determinada cantidad de caras que permita el acople de inyectores de filamentos horizontalmente. Dejando de forma libre las caras superior e inferior para realizar el ensamblaje con los otros elementos del sistema.

3.2.1.2. Alternativas para selección de materiales por propiedades térmicas.

El estudio de la transferencia de energía se basa en la rapidez o razón en la que el extrusor diseñado pasa de un estado de equilibrio térmico a otro. Si bien lo que nosotros no requerimos es la cantidad de energía ó calor que se transferirá, sino más bien la rapidez en q lo hará y bajo que condiciones podrá alcanzar las temperaturas deseadas. El análisis térmico es fundamental para incluir y separar zonas tanto calientes como frías del extrusor. La resistencia o conductividad térmica de cada material nos permitirá realizar

una selección de cada material para cada zona. Tanto la temperatura estable como la velocidad de transferencia de calor se relacionan mas adelante con el respectivo control de temperatura, sus tiempos de reacción, capacidades y estabilidad. Los mecanismos de transferencia utilizados en el proyecto son conducción con áreas de contacto y convección de las partes frías con el aire de circulación libre o forzada.

Si bien muchos de los elementos que forman parte del extrusor existen el mercado, la implementación de una zona de mezcla resulta una innovación total en los sistemas de impresión en 3D. Para la selección de materiales según sus propiedades térmicas es necesario tomar en cuenta las variables y constantes térmicas de cada material. En cada material existen determinadas propiedades que caracterizan la disposición térmica del sistema como tal. Constantes como la conductividad térmica (k), el calor específico (C_p) y la difusividad térmica (ρC_p) serán quienes permitan evaluar de mejor manera el material según nuestras necesidades. Donde la conductividad térmica k representa lo bien que un material conduce el calor y la capacidad calorífica ρC_p representa cuanta energía almacena un material por unidad de volumen. Entre mayor sea la difusividad térmica, más rápida es la propagación del calor hacia el medio. Una breve introducción de estos conceptos pueden ser revisados en [Cengel, 2001] en el primer capítulo.

Con la breve introducción descrita, para el diseño del extrusor y su respectiva selección de materiales se busca principalmente que:

- Los materiales tengan alta conductividad térmica y un alto valor de calor específico para la *zona caliente* del extrusor. Es decir que el calor generado por el actuador únicamente se mantenga entre la zona de mezcla y la zona de extrusión.
- Materiales que tengan una baja conductividad térmica y representen una oposición al paso de calor pero que además tengan un bajo valor de calor específico, pues con el poco calor que sea transferido hacia ellos sean capaces de disiparlo.

Si bien la relación de transferencia de calor luzca sencilla en paredes planas y sentido unidireccional, resulta bastante complejo realizar un cálculo teórico de la cantidad de calor que será transferido a cada elemento del extrusor. En base a comparaciones de extrusores similares en el campo de impresoras 3D y con la disponibilidad de sus piezas más comunes en el mercado se selecciono varias alternativas que ofrecen las mejores propiedades térmicas.

La zona caliente que engloba tanto la etapa de extrusión como la etapa de mezcla debe procurar encerrar la mayor cantidad de calor de todo el sistema.

Selección de material para la cámara de mezcla.

Como se mencionó anteriormente la forma del extrusor depende de varios factores, la idea planteada es fabricar un polígono con determina cantidad de caras y con una perforación pasante en sentido longitudinal para permitir el ensamblaje. Para realizar la correcta selección se determinó un resumen en la tabla 3.27 de los materiales más usados en el ámbito de la fabricación de elementos de extrusores para impresoras en 3D.

Tabla 3.11:

Tabla de calores específicos y valores de conductividades térmicas

Material	$Cp[\frac{J}{Kg \times K}]$	$k[\frac{W}{m \times K}]$
Aluminio	875 – 883	168 – 177
Bronce comercial	420	52
Acero inoxidable	480 – 468	13,4 – 15,1
Acero negro (carbono)	434 – 446	60,5 – 63,9
Teflón (PTFE)	0,25	1050
PEEK	0,24	1170

Fuente:[Cengel, 2001].

Tomando en cuenta las propiedades térmicas antes mencionadas, los criterios fundamentales para la selección de la materia prima antes de ser maquinada para la fabricación de la cámara son:

- *Maquinabilidad*: Propiedad que identifica la facilidad del material para ser maquinado o para realizar un proceso de manufactura posterior. Dentro de este criterio se toma en cuenta la forma de presentación de la materia prima.
- *Disponibilidad en el mercado*: La disponibilidad en el mercado de poder encontrar la materia prima, de igual manera que la misma sea de fácil acceso económico.
- *Propiedades térmicas*: Criterio de las propiedades térmicas que debe cumplir el material, para el caso específico de la cámara de mezcla es requerido que tenga la capacidad de almacenar energía calorífica.

Con los criterios definidos para la selección de la materia prima de la cámara de mezcla se realizó la tabla 3.12, que jerarquiza los criterios de evaluación.

Tabla 3.12:

Peso específico de cada criterio para selección de forma de cámara de mezcla.

Criterio	Maquinabilidad	Propiedades	Mercado	$\Sigma + 1$	Ponderación
Maquinabilidad	-	1	1	3	0.5
Propiedades	0	-	1	2	0.33
Mercado	0	0	-	1	0.17
Suma				3	1

Las alternativas seleccionadas que permitan la fabricación de un material apto para la cámara de mezcla son:

- Barras circulares de aluminio comercial, presentación en diferentes diámetros.
- Barras circulares de acero negro al carbono, presentación en diferentes diámetros.
- Barras hexagonales de bronce fosfórico, varios tamaños.

Si bien se busca materiales con las propiedades térmicas (3.27) necesarias, estos muestran gran similitud en cuanto a sus constante, de esa forma se consideró de mayor prioridad tanto la facilidad para ser maquinado como la presentación como tal del material antes de ingresar al proceso de fabricación.

Evaluación para criterio de maquinabilidad para la selección de material de la cámara de mezcla.

Tabla 3.13:

Evaluación para criterio de presentación en el mercado y de la facilidad para ser maquinado.

Maquinabilidad	Bronce	Aluminio	Acero	$\Sigma + 1$	Ponderación
Bronce	-	1	1	3	0.5
Aluminio	0	-	1	2	0.33
Acero	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Evaluación para criterio de propiedades térmicas, se considerará las constantes de conductividad y calor específico.

Tabla 3.14:

Evaluación para criterio de propiedades térmicas para selección de materiales de la cámara de mezcla.

Propiedades	Aluminio	Bronce	Acero	$\Sigma + 1$	Ponderación
Aluminio	-	1	1	3	0.5
Bronce	0	-	1	2	0.33
Acero	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Evaluación para criterio de propiedades térmicas, se considerará las constantes de conductividad y calor específico.

Tabla 3.15:

Evaluación para criterio de propiedades térmicas para selección de materiales de la cámara de mezcla.

Mercado	Acero	Bronce	Aluminio	$\Sigma + 1$	Ponderación
Acero	-	1	1	3	0.5
Bronce	0	-	1	2	0.33
Aluminio	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Selección de la alternativa con mejor calificación para la fabricación de la cámara de mezcla.

Tabla 3.16:

Tabla de conclusiones en la selección de material para la cámara de mezcla.

Conclusión	Maquinabilidad	Propiedades	Mercado	Σ	Orden
Bronce	0.25	0.1089	0.0561	0.415	1
Aluminio	0.165	0.165	0.0289	0.3589	2
Acero	0.085	0.0561	0.085	0.2261	3
Suma				1	

Para evitar maquinados futuros y evitar la manufactura del prototipo, se determinó que

la forma que mas se adaptó a las necesidad fue el bronce fosfórico de forma hexagonal con caras planas. En el mercado existen varillas hexagonales de bronce, su fabricación es por fundición con la forma deseada, de esa forma evitamos que sea requiera un maquinado complejo según la aplicación deseada. De las seis caras laterales planas serán utilizadas cinco, cuatro para inclusión de color y una para alimentación de polímero base (blanco). En las caras superior e inferior se realizó una perforación pasante que permita el ensamble del resto de elementos del extrusor. La varilla de bronce hexagonal con las perforaciones y roscas necesarias se muestra en la figura 3.4. La medida comercial de la varilla es de 1", si se considera que el modelo debe ser lo mas compacto posible y a su vez que cumpla con los requisitos antes mencionados, la varilla de 1" resulta ideal. Además de sus óptimas propiedades térmicas y su fácil maquinabilidad.

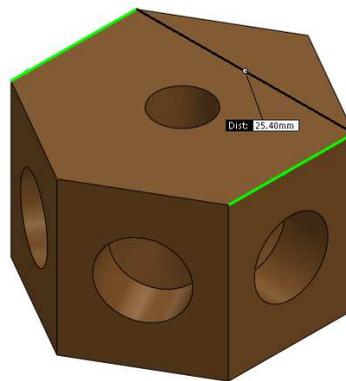


Figura 3.4: Modelo CAD en 3D de la barilla cortada y perforada, lista para ser ensamblada.

Por motivos de simplicidad se buscó disponibilidad en el mercado de los elementos más comunes de un extrusor en un impresora 3D. Tanto el acceso de a diferentes tipos de boquillas así como elementos donde será situado el generador de calor y el sensor.

Selección de elemento calentador en extrusor.

La selección de un elemento donde se encuentre el generador de calor y a partir de ahí, la energía sea transferida al resto de elementos del extrusor representa uno de los aspectos más sencillos del proyecto. En la presente sección no se busca determinar material o precisamente una forma que permita el diseño de este elemento. El elemento *calentador*, pieza fundamental en la zona caliente del extrusor es de amplio acceso en el mercado de impresoras 3D. Se requiere únicamente seleccionar entre las mejores opciones del mercado. Los requisitos para la selección en esa sección son:

- *Disponibilidad en mercado:* Criterio trascendente en la selección, pues representa la facilidad de acceso a estos elementos.
- *Propiedades térmicas:* Las especificaciones térmicas del material de fabricación del calentador.
- *Simplicidad en diseño:* Criterio que califica la sencillez del diseño. Dentro de este punto se incluye que e cumpla con los requisitos de tamaño y facilidad de montaje y desmontaje del extrusor como tal.

La disponibilidad en el mercado nacional de estos elementos es casi nula, por lo que se realiza un proceso de selección del producto como tal evitando la selección de materiales para fabricación de un diseño propio. Resulta de mucho mejor acceso adquirir la pieza comercial ya maquinada y lista para el ensamblaje en el exterior que desarrollar el producto desde cero.

Tabla 3.17:

Peso específico de cada criterio para selección de forma de cámara de mezcla.

Criterio	Disponibilidad	Propiedades	Simplicidad	$\Sigma + 1$	Ponderación
Disponibilidad	-	1	1	3	0.5
Propiedades	0	-	1	2	0.33
Simplicidad	0	0	-	1	0.17
Suma				3	1

La variedad de los llamados *hot-end* en el mercado de las impresoras es amplio según su aplicación, forma y material. La selección para discutir las alternativas arrojó los siguientes productos:

- Cubo de aluminio con agujeros para colocar generador y sensor ajustados por prisioneros M3, utilizado para diversos tipos de extrusores principalmente para *J-head*[®][Forum, 2011].
- Calentador de bronce con boquilla incluido y agujeros para colocar generador de calor y sensor.
- Calentadores con pletina de sujeción para boquilla. su diseño es independiente y separado térmicamente por la pletina de algún material aislante.

Para la selección de la mejor alternativa se desarrollo la tabla 3.17. A continuación se detalla el proceso de selección por medio de evaluación de criterios.

Evaluación para criterio de disponibilidad en el mercado para calentadores de extrusores.

Tabla 3.18:

Tabla para la evaluación de disponibilidad en el mercado para calentador de extrusor.

Disponibilidad	Aluminio	Bronce	Platina	$\Sigma + 1$	Ponderación
Aluminio	-	1	1	3	0.5
Bronce	0	-	1	2	0.33
Platina	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Evaluación para criterio de propiedades térmicas, se considerará las constantes de conductividad y calor específico para calentadores de extrusores.

Tabla 3.19:

Evaluación para criterio de propiedades térmicas para selección de calentadore *hot-end*.

Propiedades	Aluminio	Bronce	Platina	$\Sigma + 1$	Ponderación
Aluminio	-	1	1	3	0.5
Bronce	0	-	1	2	0.33
Platina	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Evaluación para criterio de simplicidad en diseño de calentador *hotend*.

Tabla 3.20:

Evaluación para criterio de simplicidad de diseño de calentador.

Simplicidad	Aluminio	Platina	Bronce	$\Sigma + 1$	Ponderación
Aluminio	-	1	1	3	0.5
Platina	0	-	1	2	0.33
Bronce	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Selección de la alternativa con mejor calificación para la selección de calentador.

Tabla 3.21:

Tabla de conclusiones en la selección de calentador en extrusor.

Conclusión	Disponibilidad	Propiedades	Simplicidad	Σ	Prioridad
Bronce	0.165	0.1089	0.0289	0.3028	2
Aluminio	0.25	0.165	0.085	0.5	1
Platina	0.085	0.0561	0.0561	0.1972	3
Suma				1	

La selección de un cubo de aluminio resulta la mejor opción. Muestra excelentes propiedades térmicas, la disponibilidad en el mercado de la pieza lista es amplia y cuenta con las especificaciones mecánicas para permitir un fácil ensamblaje con el resto de elementos.

Selección de boquilla de extrusión.

Así como en la selección anterior, resulta más fácil determinar un producto comercial y terminado que seleccionar material y tipo de manufactura para su fabricación. La boquilla representa uno de los elementos claves en el extrusor, es está quien de cierto modo genera el tipo de resolución y acabado de la extrusión en impresoras 3D. Debe contar con varias especificaciones técnicas que mas adelante serán explicadas. Por ahora únicamente se procede a seleccionar sin realizar un análisis técnico de los parámetros de la boquilla. Aspectos como:

- *Propiedades térmicas:* Son las propiedades que se mencionaron antes, identifica la facilidad del material para transferir y almacenar calor.
- *Especificaciones técnicas:* Los diversos parámetros que determinan la calidad de impresión según especificaciones técnicas de la boquilla como ángulo o diámetro de extrusión .
- *Disponibilidad en el mercado:* Criterio evalúa la disponibilidad en el mercado. Se incluye la forma de presentación de la boquilla, su simplicidad para permitir ensamblaje del extrusor.

Con los criterios definidos para la selección de la boquilla, la tabla 3.12 jerarquiza los criterios de evaluación.

Tabla 3.22:

Peso específico de cada criterio para selección de boquilla.

Criterio	Técnicas	Propiedades	Mercado	$\Sigma + 1$	Ponderación
Técnicas	-	1	1	3	0.5
Térmicas	0	-	1	2	0.33
Mercado	0	0	-	1	0.17
Suma				3	1

Para la determinación del tipo de boquilla para nuestro sistema se tomo en cuenta dos aspectos adicionales. El tamaño del hexágono para permitir ingreso de llave mecánica y el tipo de rosca que permite el ensamblaje del extrusor. Las alternativas se detallan a continuación:

- Boquilla independiente de bronce, hexágono número 6 y rosca M6.
- Boquilla independiente de aluminio, hexágono número 6 y rosca M6.

Con la selección anterior del calentador, mismo que fue seleccionado independiente a una boquilla fue requerido únicamente seleccionar boquillas independientes al cubo de aluminio o calentado. De esta forma inclusive se garantiza un diseño modular del extrusor.

Evaluación para criterio de especificaciones técnicas para la selección de la boquilla.

Tabla 3.23:

Evaluación para criterio de especificaciones técnicas en la selección de boquilla del extrusor.

Técnicas	Bronce	Aluminio	$\Sigma + 1$	Ponderación
Bronce	-	1	2	0.67
Aluminio	0	-	1	0.33
Suma			3	1

Evaluación para criterio de propiedades térmicas, se considerará las constantes de conductividad y calor específico.

Tabla 3.24:

Evaluación para criterio de propiedades térmicas para selección de boquilla.

Térmicas	Aluminio	Bronce	$\Sigma + 1$	Ponderación
Aluminio	-	1	2	0.67
Bronce	0	-	1	0.33
Suma			3	1

Evaluación para criterio de disponibilidad y presentación en el mercado.

Tabla 3.25:

Evaluación para criterio de presentación y disponibilidad en el mercado para la selección de la boquilla.

Mercado	Bronce	Aluminio	$\Sigma + 1$	Ponderación
Bronce	-	1	2	0.67
Aluminio	0	-	1	0.33
Suma			3	1

Selección de la alternativa con mejor calificación para la fabricación de la cámara de mezcla.

Tabla 3.26:

Tabla de conclusiones en la selección de material para la cámara de mezcla.

Conclusión	Técnicas	Propiedades	Mercado	Σ	Prioridad
Bronce	0.335	0.1089	0.1139	0.5578	1
Aluminio	0.165	0.2211	0.0561	0.4422	2
Suma				1	

La boquilla idónea para nuestro sistema es una **boquilla fabricada de bronce**, principalmente cumple con los requisitos técnicos que como se mencionó, es de suma importancia para determinar la calidad y los diferentes parámetros de impresión.

Con los elementos básicos del extrusor en la zona caliente seleccionados se requiere hallar la forma de ensamblaje entre el sistema de calentador-boquilla con la inclusión de la cámara de mezcla. El ensamblaje por medio de un prisionero perforado longitudinalmente

entre la varilla hexagonal y el cubo de aluminio permitirá el flujo de energía de un cuerpo hacia otro. El nuevo conjunto de piezas es conectado a la boquilla de extrusión a través de su rosca. El esquema completo ya ensamblado se muestra en la figura 3.5. Mezclador o cámara de mezcla, cubo de aluminio y boquilla forman en sí, todo el conjunto que representa el ‘hot-end’. Es justamente ahí donde se requiere mantener la mayor cantidad de calor del sistema pues va a ser donde el polímero fusionado se mezcle con el color y posteriormente se extruya.

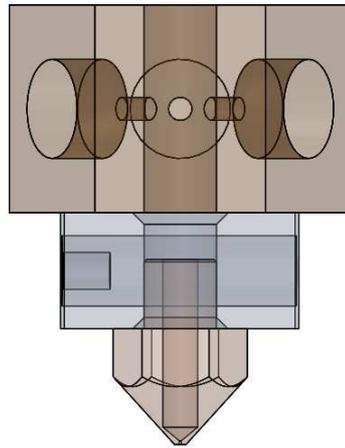


Figura 3.5: Sistema completo ‘hot-end’.

Con la forma de ensamblaje determinada y la imposición del material del mezclador por su forma geométrica el siguiente paso es determinar la forma correcta de sujeción entre el resto de elementos del sistema. Se entiende que lo que se trata es de conservar el calor en tan solo las zona de extrusión y la zona de mezcla. Aislar o impedir que el calor se transfiera al resto del sistema. Por motivos de teoría de extrusión este es un requisito fundamental en el diseño del extrusor. Principalmente para la selección de materiales se requiere entender la forma en la que el calor se transfiere o se disipa. Para la siguiente etapa de la *zona fría* del sistema se debe tomar en cuenta otro tipo de parámetros térmicos que son necesarios para la transferencia de calor a través de la convección.

Selección de disipadores y aislantes térmicos.

Para la selección de los disipadores es necesario considerar la constante de *coeficiente de transferencia de calor por convección* (h), expresado en $\frac{W}{m^2C}$. Variables como el área superficial que tiene contacto directo con el fluido (aire) receptores de calor. La temperatura del fluido en los puntos de contacto es igual a la del sólido. El gran inconveniente en el calculo del calor disipado por convección es el coeficiente h , que no es una propiedad fija

del fluido, es mas bien un parámetro que se determina de forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad de movimiento del mismo.

Tabla 3.27:
Coeficientes de calores transferencia de calor por convección.

Material	$h[\frac{W}{m^2C}]$
Convección libre gases	2 – 25
Convección libre líquidos	10 – 1000
Convección forzada gases	25 – 250
Convección forzada líquidos	50 – 20000
Ebullición y condensación	2500 – 100000

Fuente:[Cengel, 2001].

La tabla detalla valores típicos de coeficientes de transferencia de calor por convección. La constante h es determinada de forma experimental.

Selección disipadores para inclusión de filamentos concentrados.

Una vez mas como en la selección anterior, resulta mucho mas sencillo determinar un producto comercial y terminado que seleccionar material y tipo de manufactura para su fabricación. Considerando un criterio extra de costo y tiempo de manufactura para un elemento desarrollado desde cero. Los criterios principales para considerar los disipadores de calor son:

- *Propiedades térmicas:* Son las propiedades que se mencionaron antes, califica la capacidad que tiene el material para generar resistencia al paso de calor y a su vez permitir una veloz disipación.
- *Forma de disipador:* Criterio que evalúa la forma geométrica del disipador, su tamaño y facilidad para montaje y desmontaje del extrusor.
- *Disponibilidad en el mercado:* Al ser elementos adquiridos directamente en el mercado se requiere evaluar la facilidad de acceso comercialmente.

Con los criterios definidos para la selección de los disipadores, la tabla 3.28 jerarquiza los criterios de evaluación.

Tabla 3.28:
Peso específico de cada criterio para selección de disipadores.

Criterio	Propiedades	Forma	Mercado	$\Sigma + 1$	Ponderación
Propiedades	-	1	1	3	0.5
Forma	0	-	1	2	0.33
Mercado	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Para la identificación de los materiales que formaran parte de los distintos puntos fríos del sistema una vez mas se procedió a realizar un análisis de materiales que conforman extrusores comerciales. Se identifico un elemento formado de 'PEEK' que ofrece grandes propiedades térmicas si precisamente se lo requiere como aislante térmico. Disipadores de aluminio, de PTFE (teflón) forman parte de los disipadores térmicos (tabla 3.27). Las alternativas seleccionadas son:

- Disipador PEEK utilizado en extrusor *J-head*[®][Forum, 2011].
- Disipador de aluminio utilizado también en extrusor *J-head*[®][Forum, 2011] (figura 3.6).
- Disipador de PTFE utilizado también en extrusor *Adrian's Geared Extruder*[®].



Figura 3.6: Disipadores comerciales, fabricados de Aluminio.

Los diferentes extrusores seleccionados muestran formas geométricas complejas, a pesar de contar con los planos de fabricación de los disipadores, resultaría complejo realizar

la manufactura de los mismos en nuestros medios. Simplemente realizando un análisis costo-beneficio, adquirir los disipadores en el exterior resulta mucho mas beneficioso.

Evaluación para criterio de especificaciones térmicas para la selección de los disipadores.

Tabla 3.29:

Evaluación para criterio de propiedades térmicas en la selección de disipadores.

Propiedades	PEEK	PTFE	Aluminio	$\Sigma + 1$	Ponderación
PEEK	-	1	1	3	0.5
PTFE	0	-	1	2	0.33
Aluminio	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Evaluación para criterio de propiedades térmicas, se considerará las constantes de conductividad y calor específico.

Tabla 3.30:

Evaluación para criterio de propiedades térmicas para selección de boquilla.

Mercado	Aluminio	PEEK	PTFE	$\Sigma + 1$	Ponderación
Aluminio	-	1	1	3	0.5
PEEK	0	-	1	2	0.33
PTFE	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Evaluación para criterio de forma y tamaño para selección de disipadores.

Tabla 3.31:

Evaluación para criterio de forma en alternativas de selección de disipadores.

Forma	PEEK	PTFE	Aluminio	$\Sigma + 1$	Ponderación
PEEK	-	1	1	3	0.5
PTFE	0	-	1	2	0.33
Aluminio	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Selección de la alternativa con mejor calificación para la fabricación de la cámara de mezcla.

Tabla 3.32:

Tabla de conclusiones en la selección de material para la cámara de mezcla.

Conclusión	Propiedades	Forma	Mercado	$\Sigma + 1$	Ponderación
PEEK	0.25	0.165	0.0561	0.4711	1
PTFE	0.165	0.1089	0.0289	0.3028	2
Aluminio	0.085	0.0561	0.085	0.2261	3
Suma				1	

El disipador PEEK (figura 3.7) es seleccionado, cumple con todos los requisitos para implementación en el sistema. Cuenta con perforaciones roscada en los extremos que permite la sujeción con los elementos necesarios. En nuestro caso específico la sujeción se realiza con la cámara de mezcla. Existen cinco disipadores en el sistema, cuatro son destinados para la inyección de color y el restante se destina a la alimentación del filamento. Su particular forma añadiendo sus propiedades térmicas resulta ideal para evitar la transferencia de calor de la zona caliente del extrusor.



Figura 3.7: Modelado 3D del disipador, de material PEEK.

Selección de material para aislantes térmicos.

Una vez determinado casi todos los elementos del sistema, es aún necesario determinar el método y el material de sujeción entre la zona de mezcla y los tubillos o disipadores de inyección de color. Justamente identificar el material que estará en contacto directo con la zona caliente. Se buscó un material con propiedades térmicas similares a los tubillos disipadores. Este elemento conjuntamente con la cámara de mezcla serán fabricados para la implementación del extrusor, por esa razón se requiere seleccionar la materia prima para su construcción.

- *Propiedades térmicas:* Son las propiedades que se mencionaron antes, califica la

capacidad que tiene el material para generar resistencia al paso de calor.

- *Disponibilidad en el mercado nacional:* Al ser un elemento que será construido es requerido evaluar su disponibilidad en el mercado.

Con los criterios definidos para la selección de los disipadores, la tabla 3.33 jerarquiza los criterios de evaluación.

Tabla 3.33:
Peso específico de cada criterio para selección de disipadores.

Criterio	Disponibilidad	Propiedades	$\Sigma + 1$	Ponderación
Disponibilidad	-	1	2	0.67
Propiedades	0	-	1	0.33
Suma			3	1

Las alternativas pueden llegar a ser similares con las alternativas para la selección de los disipadores. Sin embargo en este caso se descarta un propiedad térmica, la difusividad térmica en estos casos debe ser mínima y debe tener una resistencia térmica elevada. Eliminando la alternativa de aluminio nos resulta:

- PEEK.
- PTFE.

A continuación se detallan las evaluaciones de cada criterio para la selección del material.

Evaluación de criterio de disponibilidad en el mercado para selección del aislante.

Tabla 3.34:
Evaluación de criterio de disponibilidad en el mercado nacional para materiales de aislantes.

Disponibilidad	PTFE	PEEK	$\Sigma + 1$	Ponderación
PTFE	-	1	2	0.67
PEEK	0	-	1	0.33
Suma			3	1

Evaluación para criterio de propiedades térmicas, se considerará las constantes de conductividad y calor específico.

Tabla 3.35: Evaluación para criterio de propiedades térmicas para selección de materiales aislantes.

Propiedades	PEEK	PTFE	$\Sigma + 1$	Ponderación
PEEK	-	1	2	0.67
PTFE	0	-	1	0.33
Suma			3	1

Selección de la alternativa con mejor calificación para la fabricación del aislante.

Tabla 3.36: Tabla de conclusiones en la selección de material para la cámara de mezcla.

Conclusión	Disponibilidad	Propiedades	$\Sigma + 1$	Ponderación
PEEK	0.4489	0.1089	0.5578	1
PTFE	0.2211	0.2211	0.4422	2
Suma			1	

El teflón (PTFE) es un material de fácil acceso y de gran variedad en el mercado, con propiedades térmicas idóneas para evitar el paso de energía calorífica hacia los puntos fríos del sistema. Además de ser un material que no reacciona con otras sustancias químicas obviando situaciones especiales. Tienen una gran capacidad de mantener las cualidades en ambientes húmedos. Aspectos fundamentales ya que este material además de estar en contacto con la zona caliente, se encuentra en contacto directo con los colorantes que darán color al filamento.

3.2.2. Diseño de partes fabricadas.

Para el diseño mecánico de ensamblaje y su posterior construcción ya sea de la cámara de mezcla como de los aislantes térmicos, es necesario comprender el sistema de ensamblaje que necesita el extrusor. Inicialmente es necesario conocer las características mecánicas de roscas y longitudes tanto de la zona de mezcla como de los tubillos que actuarán como disipadores. Para la fabricación es necesario considerar las especificaciones de sujeción de los disipadores, mismos que muestran en sus dos extremos roscas de distintos diámetros e inclusive de distintos tipos. En el extremo que será sujeto con la cámara de mezcla tiene

una rosca métrica comercial, mientras que el extremo de fijación para las mangueras que trasladan el color tiene una rosca de tubería NPT. Para realizar el ensamble con la zona de mezcla se necesita realizar perforaciones para la misma rosca que muestra el disipador. La figura 3.13 muestra un esquema de como debe finalizar el ensamblaje, de igual forma permite identificar las especificaciones para la construcción de los aislantes.

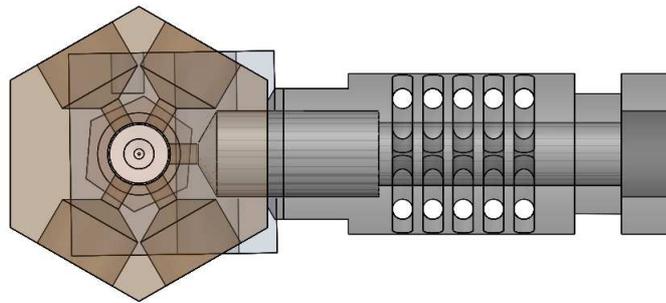


Figura 3.8: Esquema de contacto entre uno de los disipadores y la zona caliente.

Los aislantes deben cumplir con la misión de fijar la zona fría con la caliente del extrusor además de detener el flujo de calor hacia los disipadores, por este motivo el requisito es diseñar en una sola pieza la etapa de ingreso de colores como la sujeción del sistema cámara de mezcla-disipador. En la figura 3.9 se observa un modelado total del sistema, mismo que cuenta con cinco tubillos para los cuatro colores y para el filamento blanco.

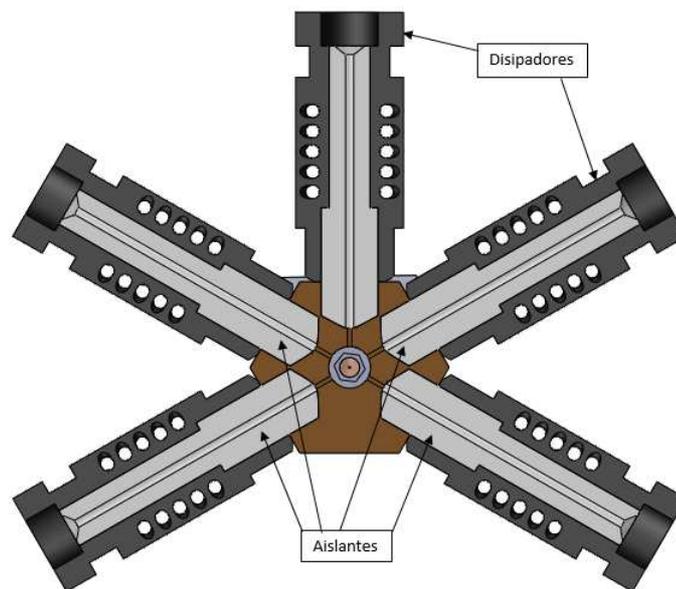


Figura 3.9: Esquema de contacto entre uno de los disipadores y la zona caliente, esquema realizado por medio de un corte transversal de todo el sistema.

Un modelado inicial del sistema de extrusión se muestra en la figura 3.10 ya con práctica-

mente todos sus elementos, listo para realizar los análisis térmicos y su respectiva simulación. La identificación y comprobación de zonas calientes y frías en el extrusor se detalla a continuación.

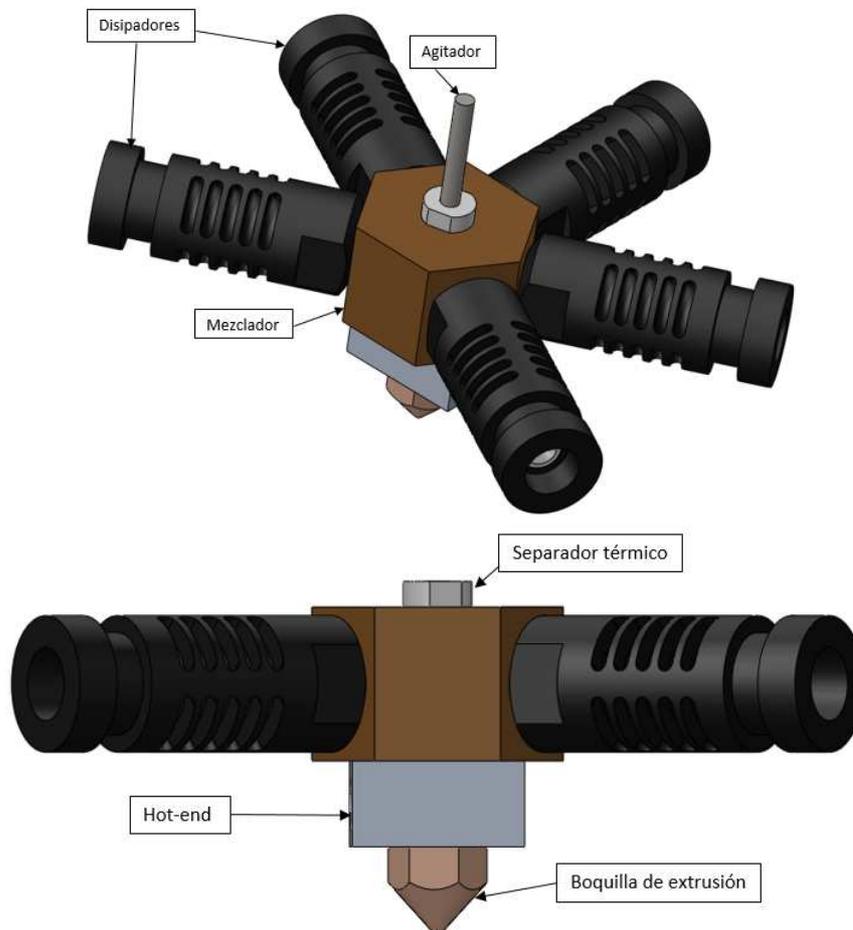


Figura 3.10: Modelo CAD en 3D del extrusor con sus respectivas partes.

A fin de garantizar un correcto aislamiento térmico se diseñó un sistema que permite encerrar las zonas frías del sistema y colocar un ventilador que permita generar una convección forzada y así acelerar la disipación de calor en esa zona. El sistema de aislamiento (figura 3.11) únicamente encierra los tubillos de disipación y por ende los conductos de inyección de colorante. Si bien el únicamente los disipadores son quienes se encuentran en contacto con la cámara de convección, el contacto disipador-aislante permite que el calor que logra pasar de la cámara hacia los tubillos sea en lo posible disipado. Por tamaño y propiedades los disipadores de PEEK son los más apetecidos en el mercado.

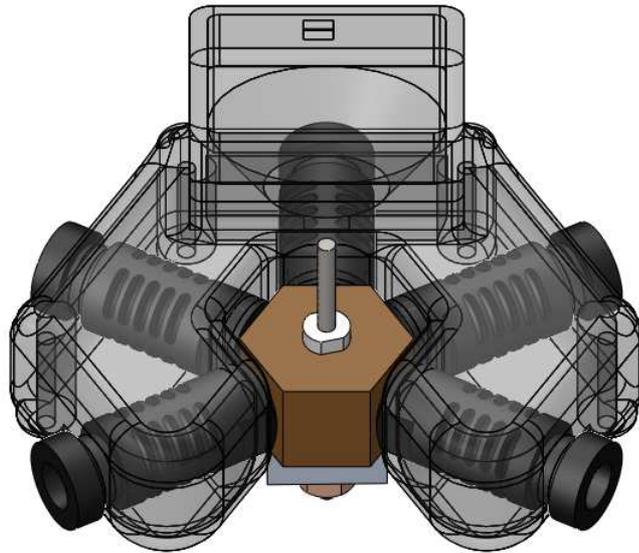


Figura 3.11: Sistema de convección forzada.

3.2.3. Simulación térmica.

El sistema como tal cuenta con varias áreas de contacto que según sea la necesidad permiten el paso u oposición de calor desde su fuente. Muchas de las áreas de contacto son roscas de sujeción entre piezas, por lo que se procedió a calcular áreas equivalentes y re-dimensionar el modelado CAD y facilitar la simulación correspondiente. Se procedió a realizar un nuevo modelado de las partes de sujeción roscadas. Con el área de contacto, se obtiene un diámetro equivalente que determina la nueva área de contacto para la conducción de calor. El área de las roscas se muestran en las Figuras 3.12.

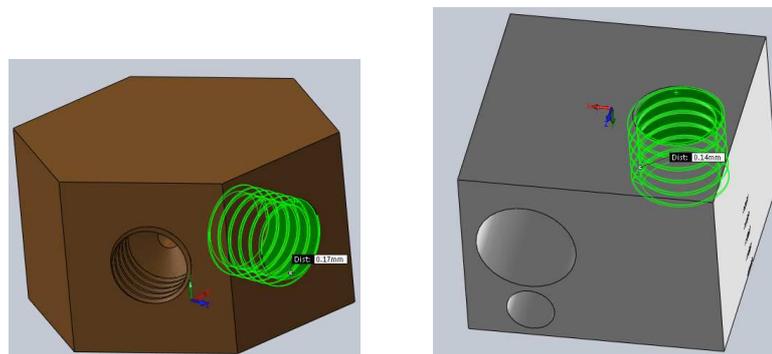


Figura 3.12: Selección de áreas de roscas para cálculo de aproximación.

Con las superficies de contacto en las roscas se procedió a realizar un cálculo para determinar diámetros (ϕ) equivalentes y reemplazar las roscas por cilindros equivalentes de

contacto. El cálculo parte del área longitudinal del cilindro.

$$A = \phi \times \pi \times L$$

El área equivalente se reemplaza con el fin de encontrar un diámetro equivalente.

$$A_{eq} = \pi \times \phi_{cal} \times L$$

$$\phi_{cal} = \frac{A_{eq}}{\pi \times L}$$

Se determinó un diámetro equivalente para cada rosca de sujeción que tenía un contacto directo con otro material y permite el paso de calor. Los diámetros equivalente se muestran en la tabla 3.37 según la dimensión de rosca y longitud de la misma.

Tabla 3.37:

Tabla de equivalencias de áreas de contacto para transferencia de calor por conducción.

Rosca	$A_{rosca}(mm^2)$	$A_{cilindro}(mm^2)$	\emptyset	Calculado(mm)	%Error
M6X1,0X6	117	113,097	6,2		3 %
M8X1,25X6	163	153,78	8,64		7,5 %
M8X1,25X12	324,31	301,6	8,6		7 %

Basado en los fundamentos de la teoría de la transferencia de calor por conducción y con la ayuda del modelado CAD acompañado de la simulación CAE se permitió realizar una aproximación a las temperaturas deseadas. El siguiente paso es identificar las respectivas áreas de contacto entre diferentes materiales. Además identificar las superficies que estarán expuestas al ambiente y permitirán la convección de calor respectivo.

Para la identificación de las áreas en contacto se utilizó el software de modelado, mismo que realiza la identificación de forma autónoma de todo el ensamblaje. Un ejemplo de superficies de contacto se muestra en la figura 3.13.

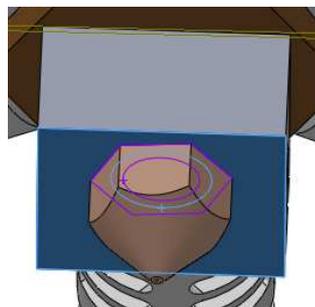


Figura 3.13: Área de contacto entre la boquilla y el cubo de aluminio.

Ya que el software realiza las simulaciones y aproximaciones por medio de los elementos finitos es requerido realizar una *mall*a (figura 3.14) que permita la discretización del modelo.



Figura 3.14: Discretización del extrusor para análisis térmico.

Una vez determinadas las constantes térmicas de todos los materiales que conforman el extrusor y sus respectivas áreas de contacto. El siguiente paso es determinar temperaturas a las cuales funcionará el sistema. En un promedio se consideró una temperatura ambiente promedio de 20°C , mientras que para que un polímero entre en su estado de transición o fusión se requiere una temperatura de al menos 250°C dependiendo de la marca o color del filamento. Adicional a esto, se había mencionado que la zona de mezcla la cual era un hexágono adaptado contenía una perforación pasante. En la zona baja del elemento de mezcla se colocó un prisionero que permita la sujeción con el cubo de aluminio, mientras que en la parte superior por ahora antes de realizar el análisis de extrusión se colocó un separador térmico que cancele que el polímero sea expulsado por la parte superior. Para realizar la simulación se requiere seleccionar la superficie en la cual se encontrará en contacto el generador de calor. El área en contacto es fácil de identificar en el cubo de aluminio, el corte cilíndrico por es donde se ubicará la fuente de calor.

Adicionalmente se necesita seleccionar todas las superficies del ensamblaje que se encuentran expuestas a la temperatura ambiente, en otras palabras la superficies que perderán calor por medio de convección. Con lo antes mencionado se procede a correr la simulación, siendo los resultados los que se muestran en la figura 3.15.

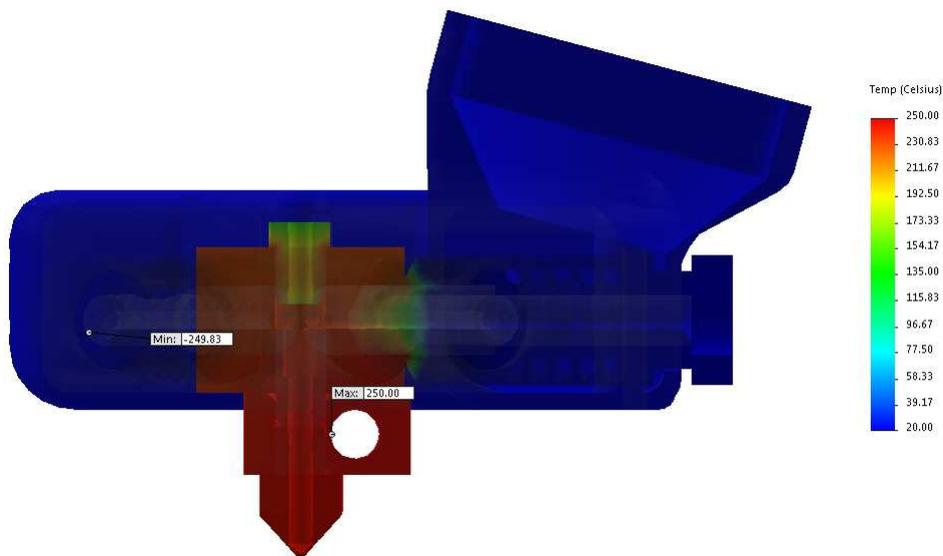


Figura 3.15: Resultado de simulación térmica.

Si bien el análisis permite únicamente realizar una aproximación en estado estacionario de temperaturas. Resulta de gran ayuda tener un esquema en los casos extremos, tomando una temperatura máxima de fuente de 250°C. El sistema completo como tal muestra un excelente comportamiento respecto a la transferencia de calor, su conservación en la zona deseada y su respectiva oposición y posterior disipación en los puntos fríos. Uno de los aspectos fundamentales del diseño fue permitir una **mínima etapa** de transición de temperaturas entre las zonas caliente y frías del sistema. Gracias a la correcta selección del materiales aislante se logró encerrar el calor de la forma deseada. Una muestra de la pequeña transición de temperaturas se muestra en la figura 3.16.

Las distancias entre diferentes temperaturas es realmente corta considerando la gran diferencia de temperaturas en un mismo cuerpo. Pasar de 220°C a 180°C y finalmente a una temperatura de 60°C en menos de una pulgada demuestra la correcta selección de materiales, su disposición dentro del diseño y garantiza encapsular el calor.

3.2.4. Alimentación de filamento y extrusión.

La alimentación del filamento utiliza el mecanismo diseñado en el trabajo de diseño del robot delta [Celi, 2015]. El diseño mencionado a continuación es explicado a continuación. Cabe recalcar que el sistema de alimentación de filamento es el mismo para los diferentes concentrados en forma de polímero que serán incluidos en el extrusor.

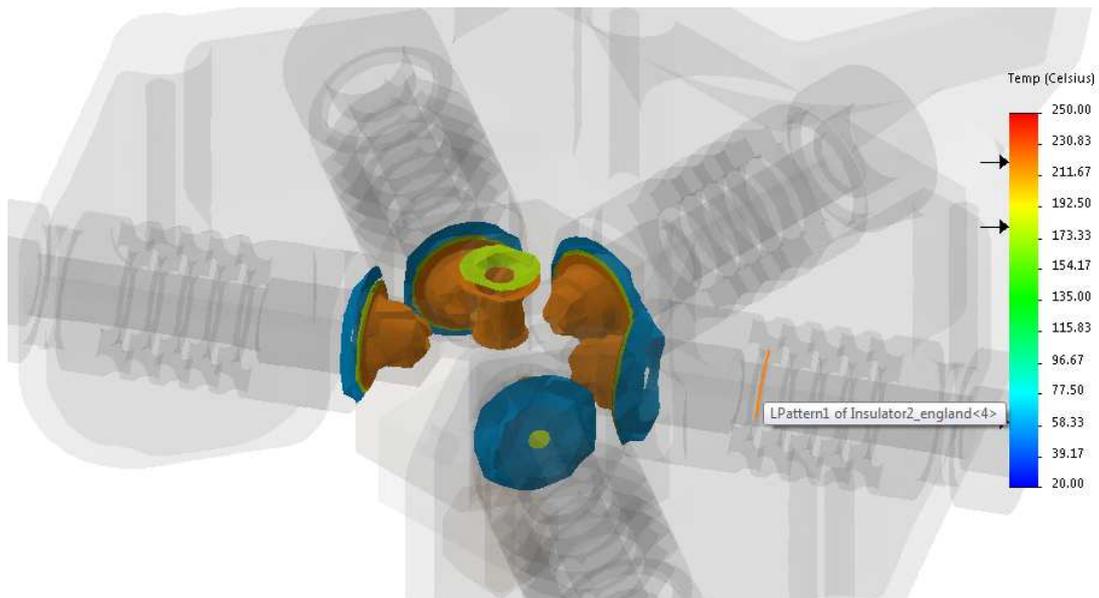


Figura 3.16: Resultado de simulación, transición de temperaturas entre zona caliente y fría.

3.2.4.1. Cálculo de variables de extrusión.

La alimentación de filamento y la correspondiente extrusión del polímero representan la dificultad principal de este proyecto. Al haberse seleccionado un sistema de alimentación horizontal del filamento se debieron considerar algunas analogías. Generalmente en los sistemas de extrusión de impresoras en 3D el filamento ingresa de forma vertical, es decir totalmente perpendicular al área de impresión. Por motivos de manufactura y forma del extrusor la alimentación de nuestro filamento se la desarrolla de forma paralela al área de impresión por uno de los tubillos disipadores.

Sin bien el sistema de variación de temperaturas (ΔT) en el extrusor permite generar determinada presión hacia la boquilla y está a su vez se transforma en el delgado hilo que será depositado. La fuerza que genera la *alimentación del filamento de forma vertical* por algún actuador mas la gravedad como tal generan una especie de pistón natural que es la que crea la fuerza de extrusión necesaria (figura 3.22).

El principio de tensión de filamento entre el sistema de extrusión y su alimentación se basa en un principio de fricción entre un piñón y un rodamiento (figura 3.17). De esta forma el rodamiento ejerce una determina fuerza sobre el piñón, generando que esté sea quien permita o no el ingreso de filamento [Celi, 2015].

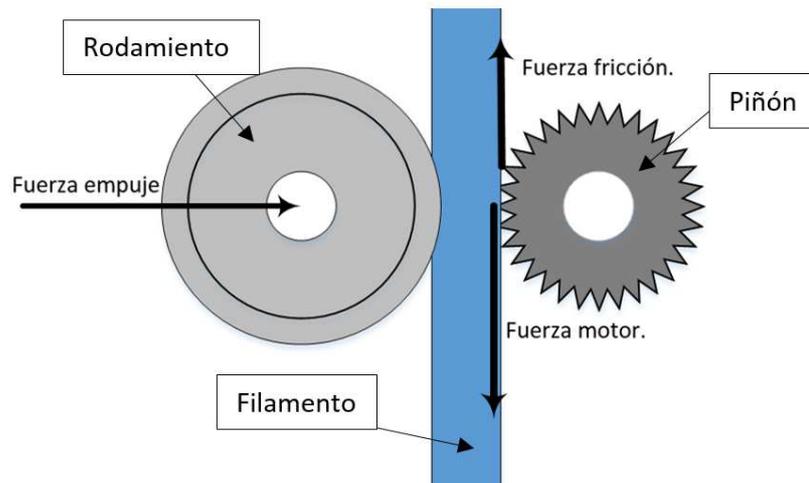


Figura 3.17: Mecanismo de alimentación para filamentos.

Para el análisis estático que se realizó sobre el sistema de alimentación fue requerido evaluar todos los aspectos que se incluyeron en el diseño de alimentación de filamento (figura 3.19)

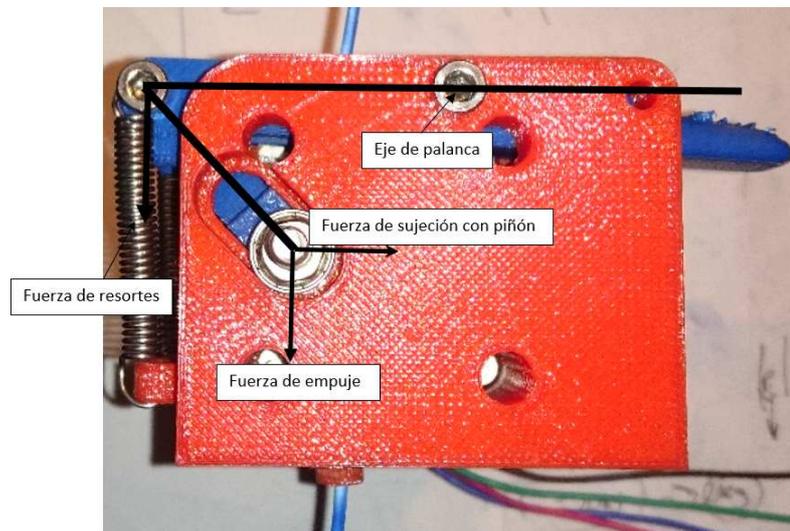


Figura 3.18: Sistema de alimentación de filamento, incluyendo esquema estático.

Con el mecanismo seleccionado, un diagrama de cuerpo libre permite identificar cada fuerza y su respectiva descomposición (3.19).

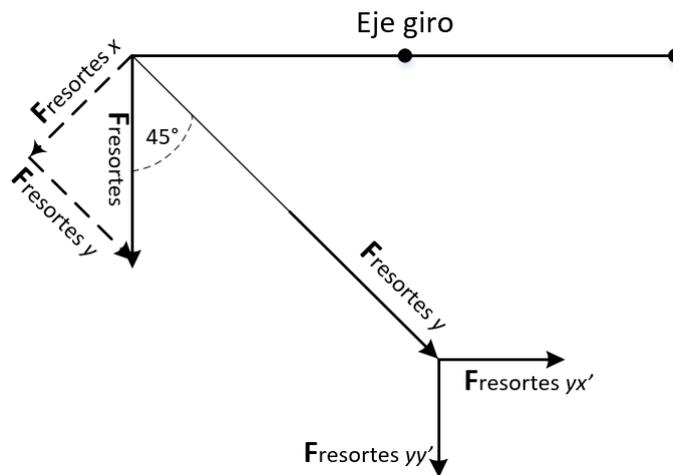


Figura 3.19: Esquema de fuerzas aplicada sobre mecanismo de alimentación.

Con el mecanismo de estrangulación seleccionado, debe existir un mecanismo que permita el alivio de fuerzas sobre el rodamiento. La inclusión de una fuerza externa, en este caso la del usuario para permitir el intercambio de filamento. En este caso se considera el esquema de fuerzas (figura 3.20). Que es únicamente el efecto opuesto de lo mostrado en la figura 3.19.

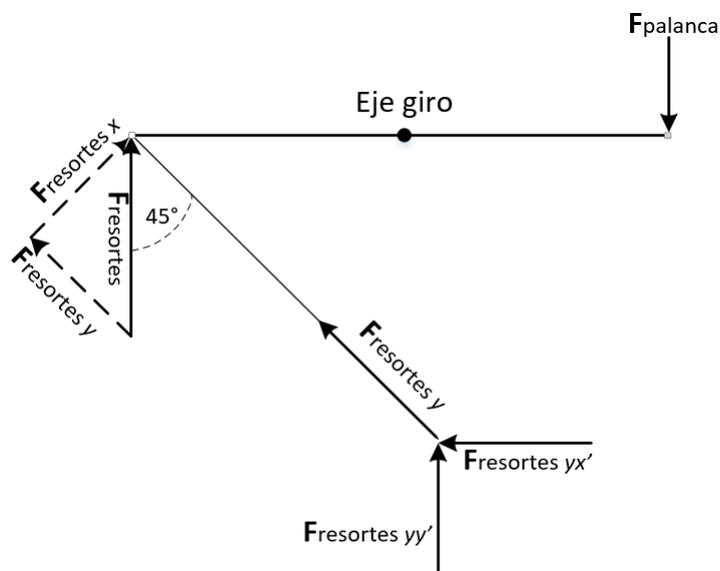


Figura 3.20: Esquema de fuerzas con la inclusión de una fuerza externa para desmontar el filamento.

Los resortes realizan una fuerza que permite ser descompuesta en las variables $\mathbf{Fresortes}_x$ y $\mathbf{Fresortes}_y$. El sistema cuenta con una palanca que forma 45° , la descomposición de dicha fuerza, determina la fuerza específicamente que el rodamiento ejerce sobre el

piñón, para trabar su movimiento. La figura 3.21 muestra el análisis estático en el que el filamento se encuentra trabado, antes de su alimentación.

Las constantes de los resortes son $k = 2,5N/mm$, estos realizan una fuerza doble al encontrarse en paralelo, dichas constantes deben ser añadidas, es decir $k_e = 5N/mm$. La deformación entre cada colocada y retirada del filamento es de 8mm. Con estos datos se pudo calcular la fuerza que resulta del sistema de alimentación de filamentos.

$$F = k_e \times x \quad (3.1)$$

$$F_{resortes} = 40N \quad (3.2)$$

dicha fuerza que necesita ser descompuesta en una coordenada y ,

$$F_{resortesy} = F_{resortes} \times \sin(45^\circ) \quad (3.3)$$

$$F_{resortesy} = 28,28N \quad (3.4)$$

La fuerza obtenida, nuevamente requiere ser separa para su posterior interpretación y comparación, la figura 3.21 permite observar las fuerzas que influyen instantes antes del movimiento del motor para la alimentación. Para determinar las fuerzas de los resortes es necesario dividir las mismos en los componentes es decir:

$$F_{resortesy} = F_{resortesyx} \hat{i} + F_{resortesyy} \hat{j} \quad (3.5)$$

Si, el ángulo es el mismo de 45° , tanto la componente \hat{i} como \hat{j} tienen el valor de:

$$F_{resortesyx} = F_{resortesyy} = F_{resortesy} \times \sin(45^\circ) \quad (3.6)$$

$$F_{resortesyx} = F_{resortesyy} = 19,996N \quad (3.7)$$

En un inicio el análisis se realizo sobre el eje de presión es decir sobre yx' y la fuerza normal N . La fuerza del motor F_{motor} depende del torque del motor seleccionado. La fuerza de fricción entre el piñón y el filamento en definitiva es la encargada de permitir que el piñón conjuntamente con el motor sean quienes dirijan la velocidad de alimentación del filamento.

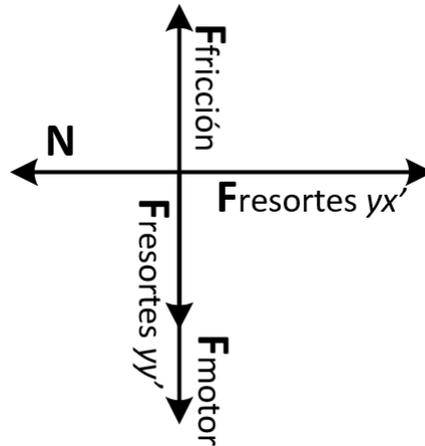


Figura 3.21: Esquema de cargas sobre rodamiento.

Si se considera un equilibrio temporal, ya sea antes de la alimentación, como durante la misma en un intervalo de tiempo podemos entender que:

$$\Sigma F_{x'} = 0 \quad \Sigma F_{y'} = 0 \quad (3.8)$$

$$N = F_{resortesyy'} = 19,996N \quad (3.9)$$

$$F_{resortesyy'} + F_{motor} = F_{friccion} \quad (3.10)$$

Si el motor a pasos que genera la alimentación, tiene un torque de 313.6 Nmm y el radio del piñón es de 5.5mm, la expresión quedaría:

$$19,966N + \frac{313,6Nmm}{5,5mm} = F_{friccion} \quad (3.11)$$

$$76,98N = F_{friccion}$$

Es decir, durante un corto intervalo de tiempo en el que el motor pasa de estar en reposo y empieza a moverse, debe vencer 76.98 N. Cuando la velocidad de alimentación se estabiliza y prácticamente es constante, la fuerza de fricción requerida para la alimentación es de 76.98 N.

Nuestro sistema cuenta con alimentación horizontal y el motor que genera la alimentación realiza una fuerza perpendicular a la boquilla. Para realizar una aproximación en el cálculo se realizó una aproximación al sistema de extrusión y generación de filamento partiendo de alimentación de pelets de determinado polímero. En nuestro caso específico no contamos con pelets sino con el mismo filamento que será extruído en un filamento mucho mas

delgado. Para determinar un modelo matemático de un extrusor se aplicaron las leyes de conservación de masa, energía y número de movimientos. Con las consideraciones antes mencionadas cabe mencionar que un requisito funcional es un sistema giratorio de arrastre (*tornillo sin-fin*). Por motivos después mencionados y efectos prácticos no se diseñó un tornillo sinfin, se realizó una adaptación con un broca que básicamente cumplirá la misma función del tornillo pero con marcadas diferencias.

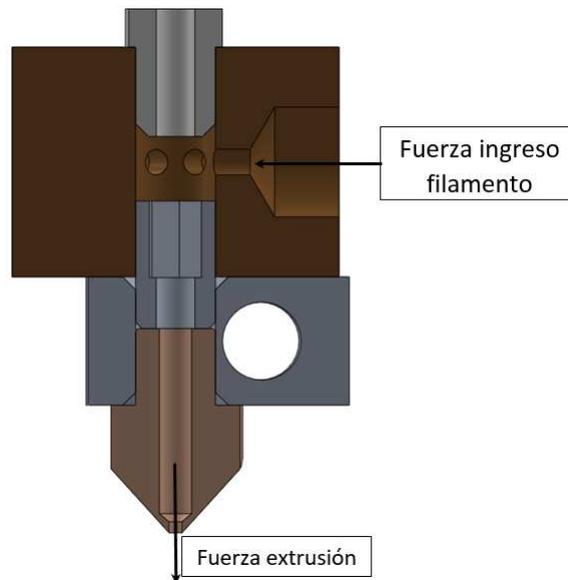


Figura 3.22: Dirección de fuerza de motor a pasos que realiza alimentación del filamento horizontal, sentido de extrusión.

Simbología

D = Diámetro de variable del canal.

t = Paso del husillo.

φ = Ángulo de hélice de canal.

e = Ancho del filete.

L = Longitud del husillo.

h_2 = Profundidad filete.

El número de los filetes rige de la relación:

$$L/D = \frac{15mm}{3mm} = 5 \text{ filetes.}$$

Para determinar las revoluciones de giro (η) se sabe que la velocidad de cortadura $\dot{\gamma}$:

$$\dot{\gamma} = 26,4 \left[\frac{1}{s} \right]$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi D \eta}{h_2 \times 1s} \quad (3.12)$$

$$\dot{\eta} = 2,8[rpm]$$

El ángulo de hélice de canal helicoidal se obtiene a partir de:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{t}{\pi D}\right) \quad (3.13)$$

$$\varphi = 180 - 146,11[mm]$$

Si la broca tiene unas dimensiones de:

$$\varphi = 8mm$$

$$D = 3mm$$

$$t = 6,33[mm]$$

Es decir la broca o adaptación del tornillo sinfin debe tener un ángulo φ . Para la selección de los distintos componentes del sistema se cuenta con la figura 3.23. Donde:

Simbología

h = Profundidad del canal

V = Velocidad de cualquier partícula de la masa del canal X y Y

W = Anchura del canal

V_z = Componente de la velocidad tangencial o circunferencial a lo largo del canal

$$V_c = \pi \times d \times \eta$$

L = Distancia en la dirección del eje en el punto considerado.

α = Flujo de arrastre.

β = Flujo de presión.

γ = Flujo de filtración.

D = Diámetro del tornillo.

h = Profundidad del canal en zona de mezcla.

φ = Ángulo de hélice.

m = Número de canales del sinfin.

$L_s f$ = Longitud del sinfin.

δ = Tolerancia sinfin-cámara de mezcla.

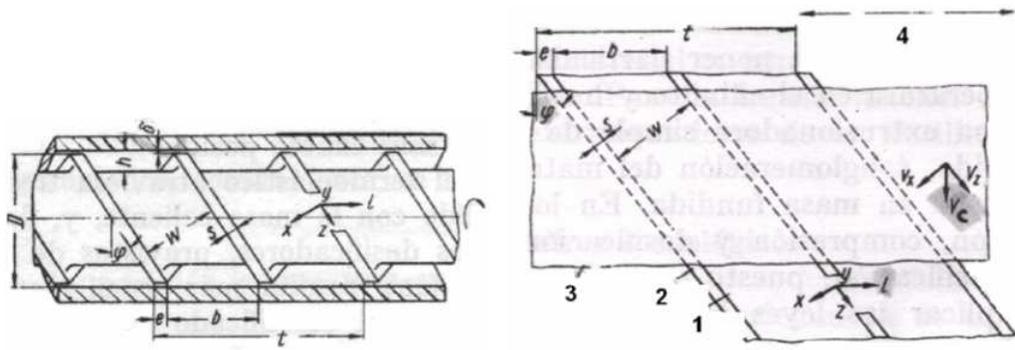


Figura 3.23: Sección de la zona de mezcla con husillo de un canal, vista general y su esquema de desarrollo.

Fuente: [Roxas & Ju, 2008]

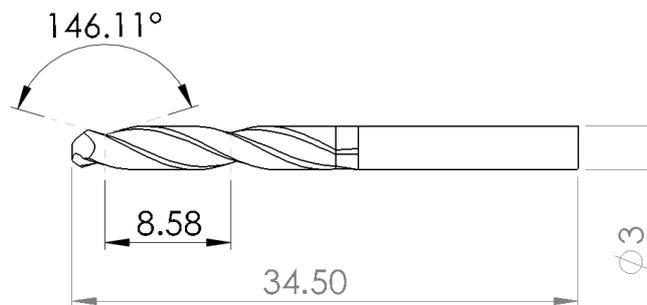


Figura 3.24: Modelado broca utilizada como tornillo sin fin.

En la figura 3.23 se muestra como el análisis se puede realizar mediante un plano. En ese caso el cilindro muestra un plano infinito (3) que se mueve frente a los canales 1 y filetes 2 del sinfin, en dirección perpendicular a 4. La velocidad rotacional del cilindro V_c se puede descompones en dos componentes perpendiculares entre sí V_z y V_x , es decir longitudinal y transversalmente respecto al canal. La velocidad de la masa fusionada o fundida en cualquier punto del canal tiene la característica de contar siempre con las componentes V_x y V_z .

La producción que es expresada como flujo volumétrico (\dot{Q}) es el resultado de los tres diferentes tipos de flujo en la extrusión.. El flujo (α), es el componente mayor provocado por el giro del tornillo. El flujo de presión (β), es el componente que se opone al flujo del sistema. El flujo de filtración (γ) es el encargado de reducir la producción de perdidas del material entre cámara de mezcla y sinfin. En la figura 3.25 se muestra la cámara de mezcla y el sistema de extrusión con los elementos que forman parte en sí del sistema de extrusión.

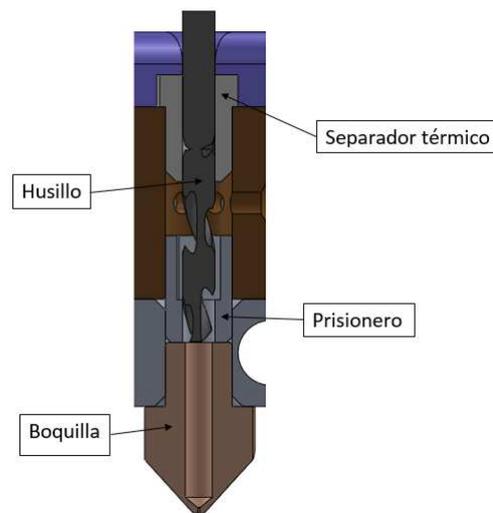


Figura 3.25: Corte transversal, sistema de extrusión y sus elementos.

$$\dot{Q} = \left(\frac{\alpha k}{k + \beta + \gamma} \right) \quad (3.14)$$

El flujo de arrastre:

$$\alpha = \frac{\pi \times m \times D \times \left(\frac{t}{m} - e \right) \cos^2 \varphi}{2} \quad (3.15)$$

El flujo de presión:

$$\beta = \frac{m \times h^3 \left(\frac{t}{m} - e \right) \sin \varphi \cos \varphi}{12L} \quad (3.16)$$

El flujo de filtración:

$$\gamma = \frac{\pi^2 D \delta^3 \tan \varphi}{10eL} \quad (3.17)$$

La configuración geométrica de la boquilla (figura 3.26) de extrusión se divide en zonas, estableciendo para cada zona una K . En nuestro extrusor contamos con una zona cilíndrica pre-extrusión.

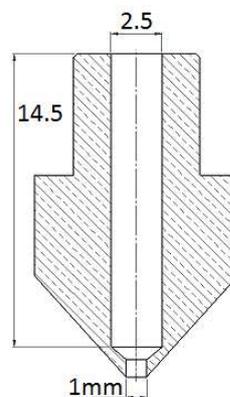


Figura 3.26: Dimensiones boquilla de extrusión.

$$K_1 = \frac{\pi d^4}{128L_c} \quad (3.18)$$

Donde:

d = Diámetro del canal dado.

L_c = Longitud del canal.

Para la etapa final existe el canal cónico, el cálculo de K para esta zona es:

$$K_2 = \frac{3\pi d_o^3 d_1^3}{128L_c(d_o^2 + (d_o \times d_1) + d_o^2)} \quad (3.19)$$

Donde:

d_o = Diámetro entrada zona cónica.

d_1 = Diámetro salida zona cónica. Para el cálculo de la K de forma se realiza la ecuación:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}} \quad (3.20)$$

Los resultados se muestran en la tabla 3.38:

Tabla 3.38:

Tabla de resultados de variables de extrusión.

$\alpha(mm^3)$	$\beta(mm^3)$	$\gamma(mm^3)$	$\dot{Q}(mm^3/min)$	$K_1(mm^3)$	$K_2(mm^3)$	$K(mm^3)$
$0,27 \times 10^{-8}$	$0,12 \times 10^{-7}$	$0,75 \times 10^{-6}$	$2,69 \times 10^{-9}$	0,05615	$8,14 \times 10^{-3}$	$7,1 \times 10^{-3}$

3.3. Diseño electrónico

El diseño electrónico en el proyecto en un inicio parte en determinar el tipo y la cantidad de actuadores que nuestro sistema requiere. Además se necesita considerar los tipos de sensores que serán necesarios para realizar un posterior control del sistema como tal.

Con los datos de la simulación térmica, el primer paso es seleccionar y dimensionar el tipo de actuador que genera el calor necesario en el extrusor. Adicional es necesario realizar la selección del sensor de temperatura para el posterior control del mismo.

La alimentación tanto de los filamentos de colores como del filamento base requiere de actuadores que brinden la fuerza de alimentación necesaria hacia el extrusor.

Como se mencionó en la sección anterior (3.2.4) se requiere un mecanismo que permita el traslado y posterior extrusión de la mezcla, como en los sistemas tradicionales de extrusión se requiere un actuador rotacional.

3.3.1. Sistema de alimentación eléctrica

Como el presente sistema de extrusión se diseñó como un módulo extra para una impresora 3D y está a su vez ya funciona con una fuente de poder independiente. Nuestro sistema necesariamente debe funcionar con la misma fuente de energía. Una fuente de 12V de corriente continua impuesta por el diseño de la impresora será la encargada de alimentar todo el sistema de impresión, más el nuevo módulo de extrusión adicionado. Una vez finalizada la selección de cada actuador se procederá a dimensionar la fuentes, según consumo de corriente.

3.3.2. Actuadores

3.3.2.1. Generador de calor - Resistencia eléctrica

Para la generación de calor se planteó la selección de niquelinas cerámicas. Como se desarrolló en las secciones anteriores para la selección del elemento, es necesario evaluar diversas alternativas para la selección del mismo. En la sección 3.2.1.2 se realizó la selección del calentador comercial que portará la niquelina. Las dimensiones físicas según el alojamiento del calentador. Para evitar alteraciones o procesos de fabricación extras en el cubo de aluminio se requiere que la niquelina seleccionada cumpla con las dimensiones solicitadas. Con este limitante dimensional y debido a la disponibilidad en el mercado resulta imposible plantear diversas alternativas de selección. Comercialmente es posible adquirir tanto el cubo de aluminio con las especificaciones requeridas para su propia niquelina. En la figura 3.27 se muestra las niquelinas comerciales para calentador o hot-end en un extrusor 3D. Las especificaciones técnicas de la niquelina se detallan en la tabla 3.39.

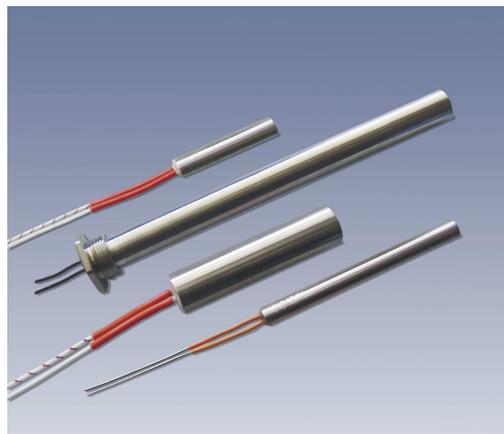


Figura 3.27: Niquelina generica de 40W, utilizada en extrusores genéricos.

Tabla 3.39:
Especificaciones técnicas de la niquelina.

Especificación	Valor
Potencia [W]	40
Voltaje de operación [VDC]	12
Diámetro [mm]	6
Longitud [mm]	21
Longitud cale [m]	1
Tipo	Cerámico

Para tener una breve idea de la cantidad de calor que la niquelina es capaz de generar se realizó el cálculo partiendo de la ley de ohm básica, donde el voltaje V y resistencia R son constantes e invariantes en el tiempo en un estado estacionario. De esta forma determina la cantidad de corriente de funcionamiento de la niquelina si está se conectará directamente a la fuente.

$$I = \frac{V}{R} \quad (3.21)$$

$$I = 3,33A$$

Es decir, que la corriente calculada será la corriente máxima de consumo de la niquelina. Es requerido buscar un circuito de potencia que tenga la capacidad de soportar dicha corriente.

3.3.2.2. Actuadores de alimentación de filamento.

Uno de los grandes inconvenientes del proyecto fue determinar el actuador correcto para permitir una dosificación estable de los concentrados en forma de filamento de cada color. Si bien las impresoras 3D cuentan con un sistema de alimentación de filamento rotacional es necesario seleccionar más actuadores bajo este mismo criterio. Si se considerará que se cuenta con un filamento base (blanco) y además cuatro distintos tipos de filamentos que brindarán color a la impresión. Se requiere de 5 actuadores que proporcionen una fuerza longitudinal a la dirección de alimentación. Los criterios de selección son:

- *Torque/Revoluciones:* El motor debe contar con el torque necesario para generar una fuerza de alimentación hacia el extrusor.
- *Tamaño:* Considerando el tamaño del extrusor y de la impresora, es necesario que el motor no sea ni de grandes dimensiones ni tampoco de gran peso.
- *Precisión* Para una dosificación precisa de volumen de inyección, se requiere que los

actuadores permitan gran precisión de movimientos.

Tabla 3.40:

Peso específico de cada criterio para selección de motor de alimentación filamentos.

Criterio	Precisión	Torque	Tamaño	$\Sigma + 1$	Ponderación
Precisión	-	1	1	3	0.5
Torque	0	-	1	2	0.33
Tamaño	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

El criterio de *control* se incluye en la determinación de precisión, es obligado realizar un sistema de control de posición del actuador que realice la inclusión de filamentos a la cámara de mezcla.

- Motor DC con caja reductora.
- Motor a pasos.
- Servomotor DC.

Evaluación para criterio de dificultad para implementación en la selección de alimentador.

Tabla 3.41:

Evaluación para criterio de dificultad para implementación en la selección de alimentador.

Precisión	Pasos	Servo	DC	$\Sigma + 1$	Ponderación
Pasos	-	1	1	3	0.5
Servo	0	-	1	2	0.33
DC	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Evaluación para criterio de tamaño para selección alimentador de filamento.

Tabla 3.42:

Evaluación para criterio de tamaño para selección de alimentador de filamento.

Tamaño	DC	Pasos	Servo	$\Sigma + 1$	Ponderación
DC	-	1	1	3	0.5
Pasos	0	-	1	2	0.33
Servo	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Evaluación para criterio de torque para selección alimentador de filamento.

Tabla 3.43:

Evaluación para criterio de torque para selección alimentador de filamento.

Torque	Servo	Pasos	DC	$\Sigma + 1$	Ponderación
Servo	-	1	1	3	0.5
Pasos	0	-	1	2	0.33
DC	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

La evaluación correspondiente, responde una analogía de cada actuador según un rango y características semejantes entre sí. De esta forma seleccionamos al actuador que mejor de acople alas necesidades. Los valores mostrados son relativos a la aplicación requerida.
Selección de la alternativa con mejor calificación para la selección de alimentador de filamento.

Tabla 3.44:

Tabla de conclusiones en la selección de alimentador de filamento.

Conclusión	Precisión	Tamaño	Torque	Σ	Orden
Pasos	0.25	0.1089	0.0561	0.415	1
Servo	0.165	0.0561	0.085	0.3061	2
DC	0.085	0.165	0.0289	0.2789	3
Suma				1	

El actuador seleccionado (3.28) es un motor a pasos NEMA17 de 12V de funcionamiento. Las especificaciones técnicas del motor se detallan a continuación:

- *Alimentación de voltaje:* DC 12V.
- *Consumo corriente:* 1.5 - 1.8 A.
- *Inductancia:* 3 - 8 mH.
- *Torque:* ~ 0.3136 Nm (3.2 Kg x cm).
- *Peso:* 350 g.
- *Grados por paso:* 1.8° - 0.9°



Figura 3.28: Motor a pasos NEMA 17 seleccionado para ingreso de filamento.

Cabe recalcar que para la inclusión de filamento es requerido colocar en el eje del motor un sistema de aplastamiento sobre el filamento, la variedad de engranes que dirigen el filamento es amplia según su uso y utilidad. La imagen 3.29 muestra una gran variedad de engranes de sujección y empuje de filamento.



Figura 3.29: Engranes de empuje de filamento.

3.3.2.3. Actuador rotacional.

Como se mostró en la sección 3.2.4 al ser nuestro sistema un método de extrusión paralela y no vertical, se requiere un motor que sea acoplado a un sistema similar a un tornillo sinfin. Los criterios para seleccionar el actuador correcto son:

- *Torque/Revoluciones*: El motor debe tener un gran torque para evitar que el motor se detenga y se funda si existe un pedazo de polímero encerrado en la cámara de mezcla. Adicional se requiere el manejo de bajas revoluciones para una extrusión estable.
- *Tamaño*: Considerando el tamaño del extrusor, es necesario que el motor no sea ni de grandes dimensiones ni tampoco pesado.
- *Implementación* Criterio que determina si el motor necesita algún tipo de circuito para su funcionamiento o en su defecto, realizar algún tipo de modificación en su estructura para que cumpla con los requisitos

Tabla 3.45: Peso específico de cada criterio para selección de sensor de temperatura.

Criterio	Implementación	Tamaño	Torque	$\Sigma + 1$	Ponderación
Implementación	-	1	1	3	0.5
Tamaño	0	-	1	2	0.33
Torque	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

No se incluye el criterio *control* debido a que no se requiere realizar control alguno en el sistema de giro, por ende no existen limitaciones en cuanto a la selección del tipo de motor según sus bondades o deficiencias para ser controlado. Las alternativas de selección son:

- Motor DC con caja reductora.
- Motor a pasos.
- Servomotor DC.

Las tres alternativas antes mencionadas por lo menos deben cumplir con el voltaje de fuerza de alimentación del sistema (12V).

Evaluación para criterio de dificultad para implementación en la selección de motor mezclador.

Tabla 3.46:

Evaluación para criterio de dificultad para implementación en la selección de motor mezclador.

Implementación	DC	Servo	Pasos	$\Sigma + 1$	Ponderación
DC	-	1	1	3	0.5
Servo	0	-	1	2	0.33
Pasos	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Evaluación para criterio de tamaño para selección del controlador.

Tabla 3.47:

Evaluación para criterio de tamaño para selección de motor mezclador.

Tamaño	Servo	DC	Pasos	$\Sigma + 1$	Ponderación
Servo	-	1	1	3	0.5
DC	0	-	1	2	0.33
Pasos	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Evaluación para criterio de torque-velocidad en la selección del motor mezclador.

Tabla 3.48:

Evaluación para criterio de relación torque-velocidad en la selección del motor mezclador.

Torque	Servo	DC	Pasos	$\Sigma + 1$	Ponderación
Servo	-	1	1	3	0.5
DC	0	-	1	2	0.33
Pasos	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Selección de la alternativa con mejor calificación para la selección de motor mezclador.

Tabla 3.49: Tabla de conclusiones en la selección de motor mezclador.

Conclusión	Implementación	Tamaño	Torque	Σ	Orden
DC	0.25	0.1089	0.0561	0.415	1
Servo	0.165	0.165	0.085	0.415	1
Pasos	0.085	0.0561	0.0289	0.17	2
Suma				1	8

En teoría existe un empate técnico entre un micro servomotor y un motor DC con caja reductora. Para la selección se consideran dos criterios que anteriormente no se tomaron en cuenta. El costo y la modificación del hardware. Los servomotores presenta la ventaja de manejar grandes torques en tamaños muy reducidos, pero se encuentra imposibilitados de realizar un giro completo de 360°. Es decir, únicamente se mueven en el rango de una media vuelta. El motor DC con una caja reductora no presenta ninguna modificación necesaria ni un impedimento que no permita una rotación completa con un gran torque. El motor seleccionado en el mercado presenta las siguientes características:

- *Torque:* 2[Kg/cm]
- *RPM:* 3 [rpm]
- *Voltaje:* 12 [VDC]
- *Corriente sin carga:* 50 [mA]
- *Corriente con carga:* 70 [mA]
- *Diámetro motor:* 32 [mm]
- *Diámetro eje:* 5 [mm]
- *Longitud del eje:* 18.5 [mm]
- *Longitud sin eje:* 33 [mm]

3.3.3. Diseño de circuito de potencia.

Para la consideración del circuito de potencia, se plantearon los requisitos técnicos y las capacidades necesarias para su dimensionamiento. Tanto el actuador que generará calor (niquelina), motores a pasos, como actuador rotacional posteriormente deben ser controlados

por el controlador digital. Aunque estos se manejen con distintos circuitos, en el caso de los motores a pasos. Si bien en nuestra aplicación se manejan únicamente voltajes constantes en el tiempo, para controlar la niquelina será requerido una modulación por ancho de pulsos (PWM).

3.3.3.1. Circuito de disparo actuadores.

Se debe diseñar un circuito que además de cumplir los requisitos de corriente y voltaje, tenga rápidas respuestas de conmutación. Como todos los actuadores manejan el mismo voltaje de funcionamiento, se planteó implementar el mismo circuito de disparo para todo ellos. El presente circuito inicialmente controlará la niquelina, ventilador y el actuador rotacional. Los requisitos para selección de circuito de conmutación son:

- *Velocidad conmutación:* Ya que el sistema estará ligado un control por medio de PWM en el caso de la niquelina, se requiere que la conmutación sea lo más veloz posible por efectos de precisión.
- *Capacidad de corriente:* Se requiere un circuito que sea capaz de soportar la corriente necesaria en las diferentes cargas, se evalúa capacidad de corriente en circuitos de conmutación similares.
- *Facilidad de implementación:* Criterio que define el grado de dificultad para implementar el circuito, ya sea por tipo o número de elementos.

Tabla 3.50:

Peso específico de cada criterio para selección de circuito de disparo para actuadores.

Criterio	Velocidad	Corriente	Facilidad	$\Sigma + 1$	Ponderación
Velocidad	-	1	1	3	0.5
Corriente	0	-	1	2	0.33
Facilidad	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Para la selección de los circuitos se plantearon las siguientes alternativas:

- Circuito conmutación por medio de un transistor BJT:
- Circuito conmutación por medio de un transistor MOSFET.
- Circuito conmutación por medio de un relé, ya sea electromecánico(bobina) o de estado sólido.

El criterio de voltaje no es considerado, pues todos los sistemas de conmutación manejan amplios rangos de voltajes operativos. Nuestro proyecto necesita un voltaje de entrada para control de 5V (nivel lógico TTL) y un voltaje de alimentación para el circuito de fuerza de 12V.

Evaluación para criterio de velocidad de conmutación para la selección del circuito de la niquelina.

Tabla 3.51:

Evaluación para criterio de propiedades térmicas en la selección de disipadores.

Velocidad	MOSFET	BJT	Relé	$\Sigma + 1$	Ponderación
MOSFET	-	1	1	3	0.5
BJT	0	-	1	2	0.33
Relé	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Evaluación para criterio de capacidad de corriente para la selección del circuito de conmutación.

Tabla 3.52:

Evaluación para criterio de capacidad de corriente sobre la carga en la selección del circuito de conmutación.

Corriente	Relé	MOSFET	BJT	$\Sigma + 1$	Ponderación
Relé	-	1	1	3	0.5
MOSFET	0	-	1	2	0.33
BJT	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Evaluación para criterio de facilidad de implementación para la selección del circuito de conmutación.

Tabla 3.53:

Evaluación para criterio de facilidad de implementación en la selección del circuito de conmutación.

Facilidad	Relé	MOSFET	BJT	$\Sigma + 1$	Ponderación
Relé	-	1	1	3	0.5
MOSFET	0	-	1	2	0.33
BJT	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Selección de la alternativa con mejor calificación para la selección de circuito de conmutación.

Tabla 3.54:

Tabla de conclusiones en la selección de de circuito de conmutación.

Conclusión	Velocidad	Corriente	Facilidad	Σ	Orden
MOSFET	0.25	0.1089	0.0561	0.415	1
Relé	0.085	0.165	0.085	0.335	2
BJT	0.165	0.0561	0.0289	0.25	3
Suma				1	

El circuito seleccionado es el que forma parte como elemento de conmutación un transistor de potencia MOSFET. Como la corriente máxima de consumo la protagoniza la niquelina, se dimensionará los elementos del circuito para esta carga. En la tabla 3.39 se muestran los requisitos técnicos del circuito. Como manejamos voltajes positivos tanto para control como para potencia se requiere un transistor MOSFET tipo *p*. Se requiere que el transistor funcione en su etapa de corte para abrir el paso de corriente de la carga y en su etapa de saturación para permitir el paso de corriente a través de la carga. Más información se detalla en [Rashid, 1995].

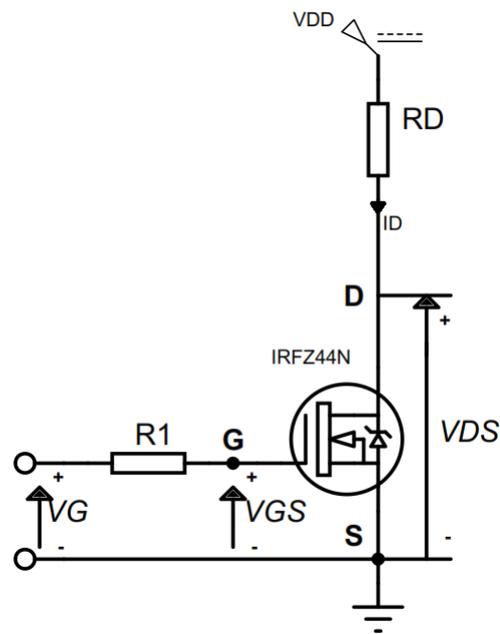


Figura 3.30: Configuración de circuito conmutación MOSFET.
Fuente: [Rashid, 1995].

El circuito con la configuración típica de disparo se muestra en la figura 3.30 donde podemos observar algunos elementos necesarios para la implementación.

Donde:

Simbología

V_{DD} = Voltaje alimentación carga.

V_{GS} = Voltaje para señal de disparo.

R_D = Resistencia de la carga.

R_{DS} = Resistencia interna de.

V_T = Voltaje de umbral.

I_D = Corriente a través de la carga.

T_c = Temperatura funcionamiento.

g_{fs} = Transductancia del transistor.

Según los requisitos planteado y la disponibilidad en el mercado se seleccionó el **MOSFET IRFZ44N** que cuenta con las siguientes especificaciones principales:

- $I_{Dmax} = 49A$ con un valor de $V_{GS} = 10V$
- Disipación de energía de $94W$ a una $T_c = 25^\circ C$
- $R_{DS(on)} = 17,5m\Omega$ con un valor de $V_{GS} = 10V$

- $V_T = 2 - 4V$ con un valor de $V_{DS} = V_{GS}$
- $g_{fs} = 19S$ con un valor de $V_{DS} = 25V$ $I_{DS} = 25A$

Como se cita en [Rashid, 1995] la resistencia R_1 sirve para limitar esta corriente inicial y puede tomar cualquier valor. Debido a que por un instante el MOSFET absorbe una cierta corriente que carga el capacitor interno del terminal *Gate*, es recomendable un valor bajo R_1 pues permite la carga rápida de este capacitor. Útil para efectos de una conmutación más veloz del transistor. Las curvas características se puede obtener del *datasheet* del fabricante del elemento.

3.3.4. Controlador de motores.

Para el control que se debe realizar sobre cada motor o mecanismo de alimentación es necesario determinar que tipo de circuito es el que mas bondades muestran para su selección. Por medio de programación se determina la posición del motor según los pasos realizados. En el mercado existen infinidad de controladores de motores DC, a pasos o servomotores DC. Por su facilidad de uso y comercialización, es seleccionado el controlador A4988 fabricado por varias empresas, pero con distintas capacidades según las necesidades. Para su implementación es requerido únicamente un pequeña resistencia en el pin de \sim ENABLE, para evitar la descarga del pin de accionamiento. Únicamente se requiere de tres pines para el controlador y no requiere de algún tipo de circuito previo para su implementación. La figura 3.31 muestra inclusive un pequeño esquema de conexiones para el control de un motor.

Las características técnicas que muestra el controlador son:

- *Mínimo voltaje de operación: 8VDC*
- *Máximo voltaje de operación: 35VDC*
- *Mínimo voltaje lógico: 3VDC*
- *Máximo voltaje lógico: 5,5VDC*
- *Resolución de micropasos: Paso completo, 1/2, 1/4, 1/8 e inclusive 1/16.*
- *Máximo voltaje lógico: 5,5VDC*
- *Máximo voltaje lógico: 5,5VDC*

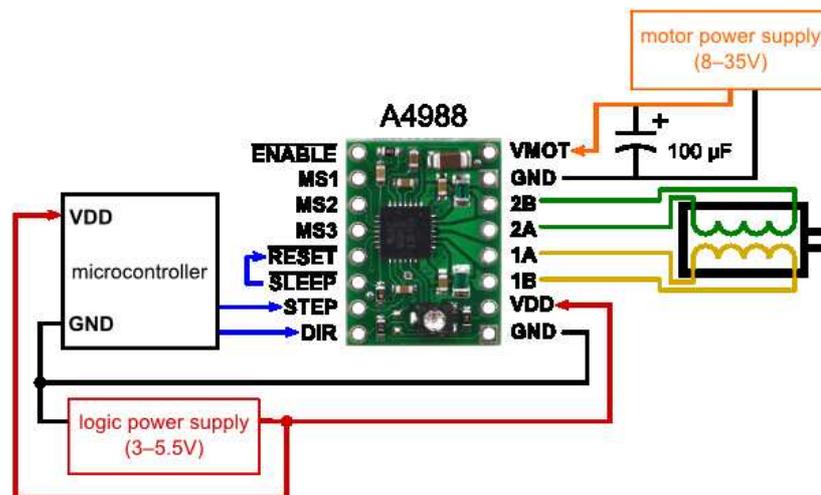


Figura 3.31: Esquema de conexión de un motor con el controlador de motores a pasos A4988.

Para su respectivo funcionamiento, por medio del controlador es necesario indicar la activación del motor (ENABLE), la dirección de giro del motor (DIRECTION) y los pulsos necesarios para el movimiento (STEP). Contiene protecciones para una sobrecorriente y una sobretemperatura, regulación de corriente máxima a través de un potenciómetro. Cinco distintas resoluciones, según combinaciones de los pines MS1, MS2, MS3.

3.3.5. Sensores

Si bien nuestro sistema puede llegar a manejar algunas variables que pueden ser controladas, para el presente proyecto únicamente resultará trascendente seleccionar un sensor para el manejo de la temperatura del extrusor. Las variables de tiempos de alimentación en las bobinas para la alimentación de los filamentos será un sistema que no requiere un sensor o una señal de comparación. Para velocidades de alimentación el control se lo realiza por medio de programación en el controlador. Para la determinación del sensor de temperatura se tomaron en cuenta los siguientes criterios

- *Precisión:* Para poder tener una medida exacta de la temperatura del extrusor es requerido tener una precisión
- *Dimensiones físicas:* Con la selección del calentador, el criterio del tamaño es fundamental en la selección del sensor.
- *Circuito acoplamiento:* Es necesario determinar el grado de complejidad que puede representar obtener la la lectura estable y correcta del sensor.

Tabla 3.55:

Peso específico de cada criterio para selección de sensor de temperatura.

Criterio	Dimensiones	Precisión	Circuito	$\Sigma + 1$	Ponderación
Dimensiones	-	1	1	3	0.5
Precisión	0	-	1	2	0.33
Circuito	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

En el ámbito de los sensores de temperatura existe un gran variedad según el diverso tipo de aplicaciones requeridas un detalle de cada uno se puede encontrar en [Mandado, 1995]. Se selecciono dentro de las categorías de sensores eléctricos y resistivos. Para la selección de los sensores se plantearon las siguientes alternativas:

- Termistor NTC.
- Termocupla tipo T.
- Dallas DS18B20.

Evaluación para criterio de dimensiones para selección de sensor de temperatura.

Tabla 3.56:

Evaluación para criterio de dimensiones para selección de sensor de temperatura.

Dimensiones	Termistor	DS18B20	Termocupla	$\Sigma + 1$	Ponderación
Termistor	-	1	1	3	0.5
DS18B20	0	-	1	2	0.33
Termocupla	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Evaluación para criterio de precisión para selección de sensor de temperatura.

Tabla 3.57:

Evaluación para criterio de precisión para selección de sensor de temperatura.

Precisión	Termistor	Termocupla	DS18B20	$\Sigma + 1$	Ponderación
Termistor	-	1	1	3	0.5
Termocupla	0	-	1	2	0.33
DS18B20	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Evaluación para criterio de facilidad de implementación para la selección del circuito de conmutación.

Tabla 3.58:

Evaluación para criterio de facilidad de implementación en la selección del circuito de conmutación.

Circuito	DS18B20	Termistor	Termocupla	$\Sigma + 1$	Ponderación
DS18B20	-	1	1	3	0.5
Termistor	0	-	1	2	0.33
Termocupla	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Selección de la alternativa con mejor calificación para la selección de circuito de conmutación.

Tabla 3.59:

Tabla de conclusiones en la selección de de circuito de conmutación.

Conclusión	Dimensiones	Precisión	Circuito	Σ	Orden
Termistor	0.25	0.165	0.0561	0.4711	1
DS18B20	0.165	0.0561	0.085	0.3061	2
Termocupla	0.085	0.1089	0.0289	0.2228	3
Suma				1	

El sensor que mejor cumple las necesidades para nuestro proyecto es un termistor. Los termistores son resistencias que varían con el cambio de temperatura. Una ventaja de

este tipo de sensores es que se puede obtener una resistencia predecible, conociendo con precisión la resistencia para cada temperatura. Los rangos de temperaturas dependen del tipo de termistor. Existen dos tipos: los termistores PTC donde los valores de resistencia incrementan a medida que la temperatura sube y los termistores NTC en el que su valor de resistencia decrece a medida que sube la temperatura. La correlación entre resistencia y temperatura no es una expresión lineal, dicha relación o tabla de equivalencias se encuentra en el *datasheet* del sensor. Las variables pueden ser explicadas de manera más detenida en [Mandado, 1995]. Un termistor NTC de marca *MJB*[®] que cuenta con las siguientes características:

- $\beta = 3950 \pm 1 \%$
- $R_c = 100000\Omega \pm 1 \%$

Una tabla de equivalencias entre resistencia y temperaturas fueron obtenidas en el *datasheet*. Dato fundamental para obtener posteriormente los valores de voltaje para cada temperatura.

3.3.5.1. Circuitos de acondicionamiento sensor.

Debido a que el sensor seleccionado muestra variación de resistencia únicamente, el reto es determinar la relación entre temperatura y voltaje. Con un valor de voltaje análogo para cada temperatura. En un margen de valor de temperaturas limitado, la resistencia de un termistor puede expresarse con una expresión (3.22).

Simbología

R_T = Temperatura variable del termistor.

R_o = Resistencia del termistor a 25° C.

β = Constante del termistor.

T = Temperatura variable.

T_o = Temperatura fija de 25° C.

V_{out} = Voltaje análogo enviado a controlador.

R_{fija} = Resistencia seleccionada en divisor de tensión.

V_{cc} = Voltaje alimentación sensor, 5V.

ADC = Discretización de V_{out} .

$$R_t = R_o e^{\beta(\frac{1}{T} + \frac{1}{T_o})} \quad (3.22)$$

despejando T ,

$$T = \frac{\beta}{\ln\left(\frac{R_T}{R_o}\right) + \frac{\beta}{T_o}} \quad (3.23)$$

La ecuación 3.23 muestra la ecuación para determinar la temperatura en función de la resistencia correspondiente del termistor. Como observamos en la ecuación el comportamiento es claramente no lineal, para tratar de realizar un arreglo y obtener valores de resistencias precisas se optó por un divisor de tensión básico, la figura 3.32 muestra el esquema que desarrollaremos para obtener los datos de voltajes necesarios para determinar la temperatura.

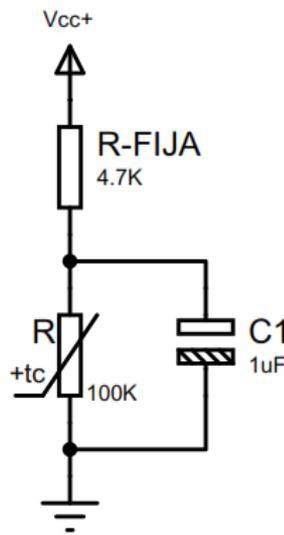


Figura 3.32: Divisor de tensión para obtener un voltaje análogo a la temperatura.

Donde,

$$R_2 = R_{fija} = 4,7K\Omega$$

$$R_1 = 0$$

$$V_{cc} = 5V$$

La relación de divisor de voltaje para el termistor queda:

$$R_t = \frac{V_{out}R_{fija}}{V_{in} - V_{out}} \quad (3.24)$$

3.3.6. Consumo eléctrico.

Una vez seleccionado todos los actuadores respectivos, es necesario dimensionar la fuente. Como se menciona en un inicio el voltaje de alimentación de fuerza es de 12V, mientras que el de control es de 5V. El consumo de cada actuador seleccionado es el siguiente:

- Ventilador, cámara de convección: 0.9A
- Mezclador, cámara de mezcla: 0.5A
- Alimentación de filamento:: 1 A
- Niquelina: 2.73A

Si se considera que el sistema de inclusión de color requiere de un sistema de alimentación independiente por cada color; es decir, cinco motores. El dimensionamiento únicamente para nuestro módulo es de 9.13 amperios. La medida de la niquelina se la realizó con un voltaje máximo de entrada, si se considera que dicho consumo depende de la temperatura deseada, el valor de dicho consumo reduce considerablemente.

3.4. Sistema de control

Una vez determinados los actuadores y seleccionado el sensor de temperatura. Es necesario seleccionar el tipo de control que permita recibir las variables del sensor y procesará las órdenes hacia los actuadores. El sistema como tal no necesita de grandes requisitos, el desarrollo del sistema de control de temperatura se llevará a cabo en la siguiente sección, por el momento únicamente requerimos identificar el método de control que cumpla con la cantidad de salidas digitales con modulación de ancho de pulso y de una entrada análoga para el termistor.

3.4.1. Selección de tarjeta de control

La selección de la tarjeta no representó ninguna dificultad, pues en el mercado existen gran variedad de microcontroladores que cumplen los requisitos mencionados. Por facilidad tanto en el desarrollo de la placa como el método de comunicación hacia el ordenador se selecciono la placa *ArduinoUno*[®]. La placa evita el incluir otro tipo de circuitos integrados para la comunicación, así como facilita el diseño de una placa embebida extra únicamente con los circuitos de potencia de los actuadores como el divisor de tensión del sensor. Los requisitos del sistema para la tarjeta de control son:

- Siete Salidas digitales con la opción de PWM.
- Una entrada análoga.
- Una velocidad de procesamiento de al menos 16MHz.

- Una memoria flash lo suficientemente grande para almacenar el programa.
- Comunicación serial RS232 para la conexión con la interfaz gráfica.

Un esquema de control que realiza la tarjeta se muestra en la figura

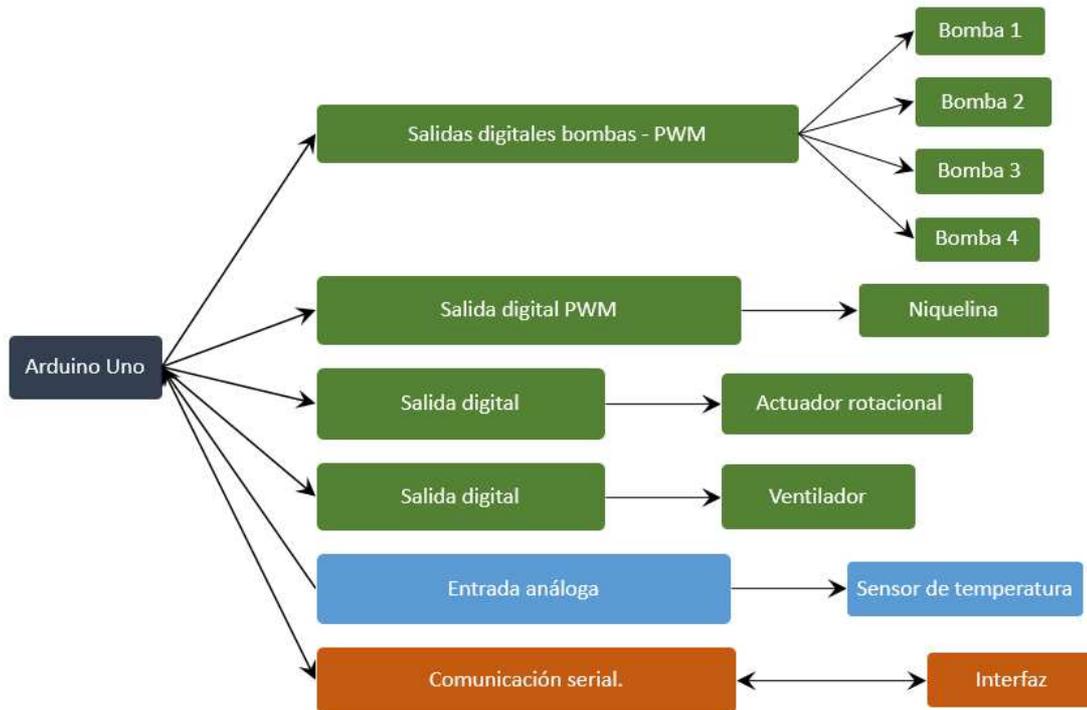


Figura 3.33: Esquema de control, sistema de extrusión.

3.4.2. Discretización señal análoga termistor

La tarjeta *Arduino Uno*, maneja un convertidor análogo digital de 10 bits (1024). Para la lectura del sensor se parte de la recepción del voltaje V_{out} , mismo que se relaciona de la siguiente forma:

$$V_{out} = \frac{V_{cc}ADC}{1024} \quad (3.25)$$

Así, de forma secuencial la recepción discretizada de la señal del sensor se transforma en un voltaje equivalente, con la ecuación 3.23 se calcula la resistencia en la que se encuentra el termistor a esa temperatura. Finalmente con la resistencia obtenida se procede a determinar la temperatura 3.24 correspondiente tanto a la resistencia como al voltaje obtenido.

3.4.3. Secuencia de control

Para un correcto funcionamiento tanto en el sistema de extrusión como para la comunicación con el ordenador es necesario plantear debidamente todas las etapas que requiere el proceso completo. Para realizar un esquema que permita sistematizar ordenadamente cada tarea para nuestro proceso se realizó un diagrama de flujo que se muestra en la figura 3.34.

3.4.4. Control digital de temperatura.

Control clásico puede entenderse como un proceso que consiste en mantener constantes ciertas variables fijas al inicio del proceso. Existen infinidad de variables que pueden ser controladas dentro de las más comunes pueden ser presión, temperatura, nivel, caudal, humedad, etc. Un sistema de control como tal es un conjunto de elementos que hace posible que otro sistema, proceso o planta permanezca estable y fiel al valor fijado. Para permitir que los procesos o plantas funcionen como se desea, se recurre a los diferentes tipos de controladores. El término controlador es un sí un sistema de control que posee retroalimentación, asociado con los elementos de la trayectoria directa entre la señal actuante (error) " e " y la variable de control (señal para el actuador) " u " como se observa en el diagrama de bloques en la figura 3.42[Alexander, 2015]. Con la placa de control seleccionada se puede conocer a través de que plataforma será implementado el controlador.

3.4.4.1. Especificaciones de diseño del controlador.

El control de temperatura requerido por nuestro sistema se lo puede interpretar como un sistema de control lineal, es decir se puede desarrollar sin inconveniente alguno por medio de un controlador PID clásico a través del modelado en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia sin inconveniente alguno. Además del controlador PID clásico existen otro tipo de controladores aplicables a nuestro sistema (temperatura). Las alternativas para nuestro sistema se muestran en la figura 3.35.

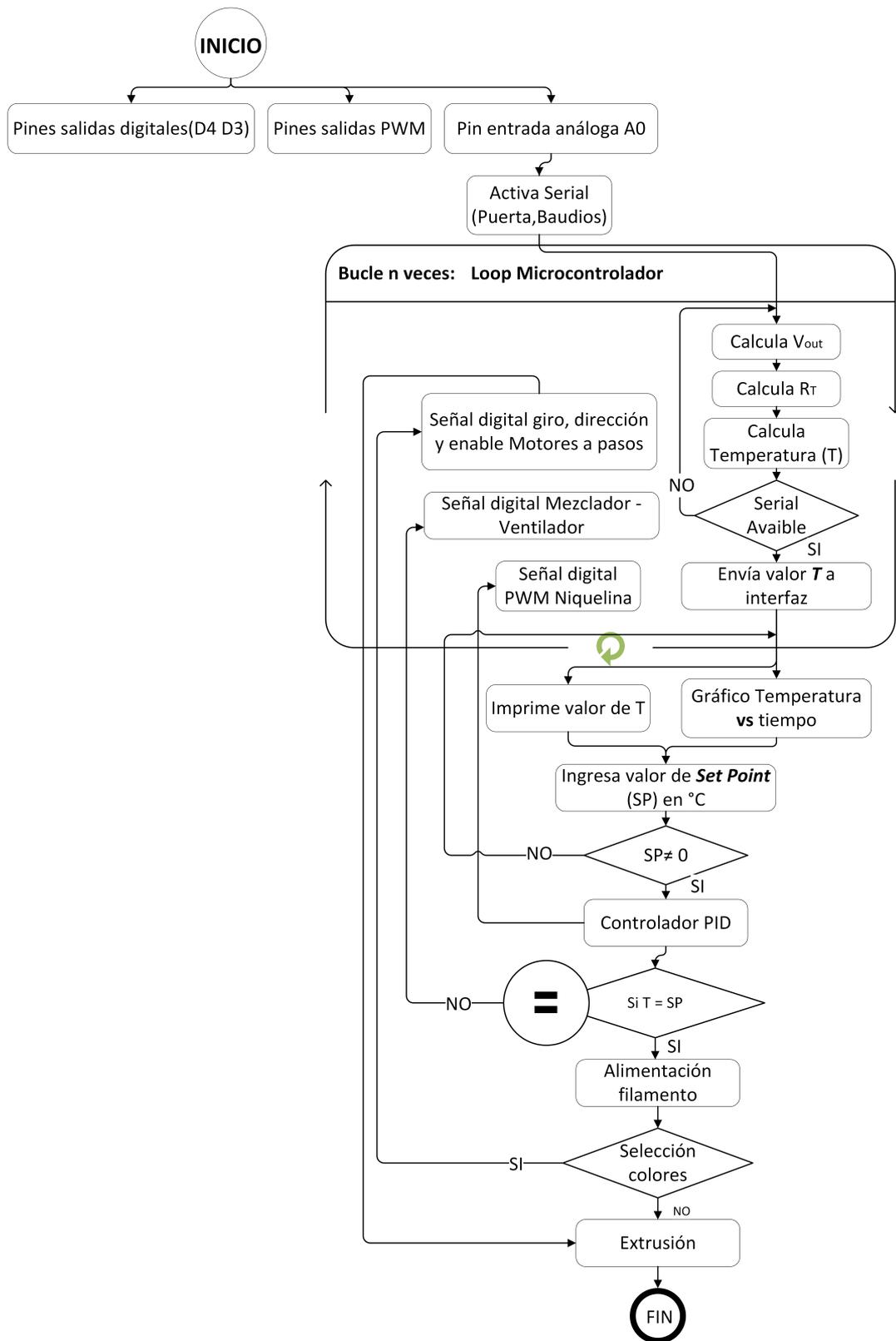


Figura 3.34: Diagrama flujo del proceso de extrusión de colores por medio de inyección de color.

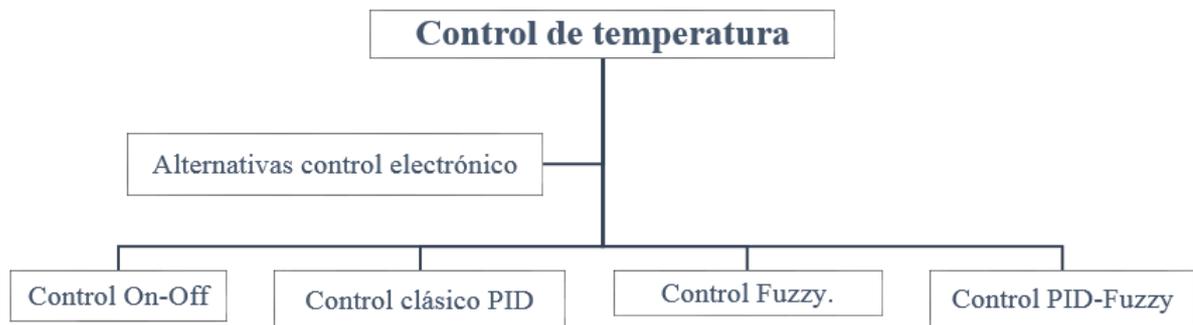


Figura 3.35: Alternativas de control para temperatura.

Las alternativas mostradas muestran diferentes tipos de fortalezas y debilidades si colocamos una comparación entre ellos. En la figura ?? se muestra un breve cuadro comparativo entre varios tipos de controladores aplicables a nuestro sistema.

Tabla 3.60: Comparación tipos de control aplicables a plantas de temperatura.

	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas.</i>
<i>Control On-Off.</i>	Forma más simple de control. Bajo costo instalación. Principio funcionamiento sencillo. Sencilla instalación y mantenimiento.	Mínima precisión. Desgaste elemento final de control. No recomendable para procesos de alto riesgo. Para sistemas o plantas rústicas
<i>Control clásico PID.</i>	Comportamiento robusto. Versátil. Flexible. Precisión. Tolerante a perturbaciones.	Controlador a sistemas lineales. Velocidad de respuesta.
<i>Control Fuzzy.</i>	Intuitivo (Funciones de membresía). Tolerante a perturbaciones. Velocidad de respuesta. Controlador para sistemas lineales y no lineales.	Precisión. Flexibles. Costo.
<i>Control Fuzzy-PID.</i>	Precisión. Robusto. Flexible. Versátil. Velocidad de respuesta.	Alta complejidad. Costo.

Así, para realizar una selección del controlador necesario se plantearon los siguientes criterios:

- *Precisión:* Criterio transcendental pues para la variable temperatura según la aplicación, en nuestro sistema se requiere un precisión aceptable.

- *Facilidad*: La facilidad que necesita el controlador para su implementación. Elementos y recursos necesarios son evaluados en este criterio.
- *Robustez*: Los controladores pueden presentar grandes bondades si reciben perturbaciones externas al sistema. En este criterio se evalúa la capacidad para soportar dichas perturbaciones.

Tabla 3.61:

Peso específico de cada criterio para selección de controlador de temperatura.

Criterio	Precisión	Facilidad	Robustez	$\Sigma + 1$	Ponderación
Precisión	-	1	1	3	0.5
Facilidad	0	-	1	2	0.33
Robustez	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Dentro de las alternativas se planteo aquellas que pueden ser implementadas en el controlador. De las mencionadas en la figura ?? se realizo la selección de las siguientes:

- Control On-Off.
- Control clásico PID,
- Control Fuzzy

Evaluación para criterio de precisión para selección del controlador.

Tabla 3.62:

Evaluación para criterio de precisión en la selección del controlador.

Precisión	PID	Fuzzy	On-Off	$\Sigma + 1$	Ponderación
PID	-	1	1	3	0.5
Fuzzy	0	-	1	2	0.33
On-Off	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Evaluación para criterio de facilidad de implementación para selección del controlador.

Tabla 3.63:

Evaluación para criterio de implementación para selección de controlador de temperatura.

Facilidad	On-Off	PID	Fuzzy	$\Sigma + 1$	Ponderación
On-Off	-	1	1	3	0.5
PID	0	-	1	2	0.33
Fuzzy	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Evaluación para criterio de robustez para selección de controlador de temperatura.

Tabla 3.64:

Evaluación para criterio de robustez para selección de controlador de temperatura.

Robustez	PID	Fuzzy	On-Off	$\Sigma + 1$	Ponderación
PID	-	1	1	3	0.5
Fuzzy	0	-	1	2	0.33
On-Off	0	0	-	1	0.17
Suma				6	1

Selección de la alternativa con mejor calificación para la selección de circuito de conmutación.

Tabla 3.65:

Tabla de conclusiones en la selección de de circuito de conmutación.

Conclusión	Precision	Facilidad	Robustez	Σ	Orden
PID	0.25	0.1089	0.085	0.4439	1
Fuzzy	0.165	0.0561	0.0561	0.2772	2
On-Off	0.085	0.165	0.0289	0.2789	3
Suma				1	

El controlador seleccionado es el PID clásico, resulta idóneo para implementar en el proyecto. Su gran precisión en plantas de temperatura adicionado a su facilidad de implementación en la programación de la tarjeta de control demuestran sus ventajas.

3.4.4.2. Controlador PID.

El sistema de control de temperatura puede representarse por un esquema de bloques como la figura 3.42. El alcance del diseño es que las variables controladas (temperatura),

representada por la señal de salida o “variable de control”, se comporte y alcance el valor deseado. En sí la problemática nace en determinar la señal de control o “señal de error” dentro de un intervalo prescrito para que todos los objetivos del diseño del controlador sean satisfechos.

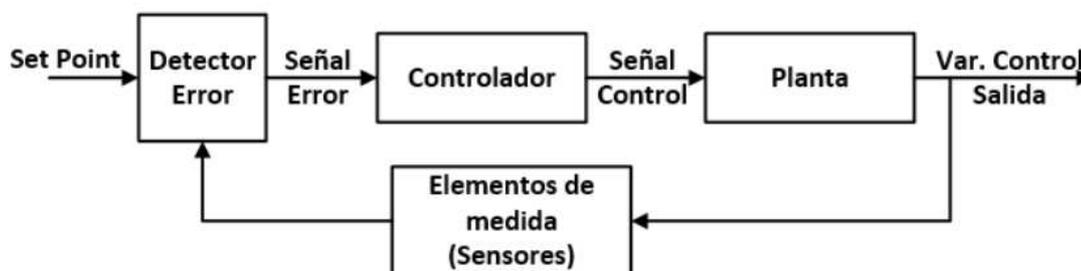


Figura 3.36: Sistema de control de lazo cerrado.

Fuente: [Ogata, 1995]

La identificación de los elementos que formarán parte del control son: el termistor como el sensor del sistema, el actuador será la niquelina y la planta como tal es todo lo que forma parte del extrusor. A breves rasgos la forma de control será medir la temperatura periódicamente, introducir un valor de *set-point* y comparar constantemente si el valor actual de la temperatura resulta igual al *set-point*. El actuador que permita calentar el sistema de extrusión es la niquelina que maneja el sistema de PWM para la activación del mismo.

Elementos control PID.

Un sistema de control de temperatura cumple con la función de controlar la potencia calorífica que genera el actuador. Para controlar la cantidad calor que absorbe, disipa o transfiere el sistema. Lo más factible es controlar la variable que se puede establecer en este caso *la temperatura* representa la medida que permite generar la señal de control. En base a lo antes mencionado en la sección

- *Set point*: Valor(temperatura) deseado que debe alcanzar la planta [°C].
- *Señal de error*: Diferencia de temperatura entre SP y temperatura de la planta [°C].
- *Señal de control*: En nuestro sistema es la señal encargada de enviar determinado valor de voltaje para permitir que la planta suba de temperatura. Ya que los controladores digitales no permiten enviar valores análogos se lo realiza a través de PWM. La modulación de ancho de pulso permite seleccionar intervalos de encendido y apagado del actuador, la relación del tiempo de encendido del intervalo se lo

realiza a través de una resolución en *bits* característica de cada controlador según su velocidad de procesamiento. Para más información recurra a [Mendoza, 2011].

- *Variable de control/Señal de salida*: Temperatura de la planta [°C].
- *Comparador*: Es el encargado de calcular y conocer la diferencia entre el valor sentido y el setpoint requerido por el sistema.
- *Controlador*: Bloque encargado de realizar el efecto de control, recibir la señal de error y transformarla en señal de control hacia la planta.
- *Planta*: Representa el proceso que se está llevando a cabo y sobre el cual se desarrolla la variable a ser controlada.

Identificación del sistema.

Una vez seleccionado el tipo de controlador idóneo para la aplicación, el siguiente paso es determinar el comportamiento de la planta. Encontrar el modelo matemático que reproduzca con la exactitud necesaria el comportamiento como tal del proceso. Para la identificación de la planta se conocen dos procesos: la identificación analítica (modelado convencional) y la identificación experimental (identificación clásica). En el modelado matemático es necesario conocer con exactitud todos los fenómenos que ocurren dentro del proceso, mientras que para la identificación clásica se requiere conocer las señales de ingreso y salida del proceso. Almacenar dichos datos y encontrar la relación respecto al tiempo. Generalmente según el tipo de planta o proceso las señales de ingreso varían entre escalones, rampas, impulsos, sinusoides o señales pseudoaleatorias. Para el tipo de planta que se requiere controlar basta con la identificación clásica, nuestro proceso (extrusor) *es un sistema lineal* que necesita una señal de ingreso y entrega una señal de salida (figura 3.37).

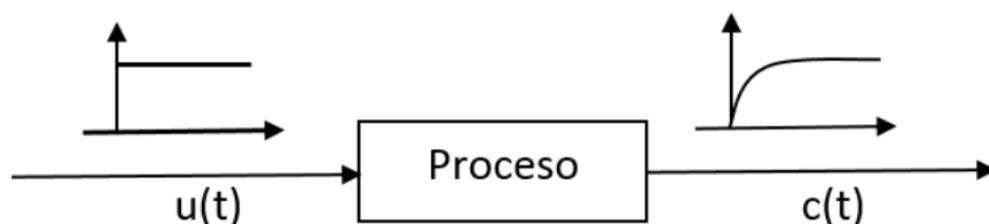


Figura 3.37: Esquema que representa señal de ingreso y salida de la planta.

Fuente: [Ogata, 1995]

En los sistemas de temperatura y específicamente en nuestro sistema la señal de entrada es el voltaje de alimentación que generará calor, mientras que la señal de salida es una

señal sensada de la temperatura del sistema. Las plantas de temperatura requieren por lo general para su identificación señales de ingreso escalón, con la función mencionada es fácil determinar modelos sencillos y exactos para plantas de temperatura. La respuesta esperada con una entrada escalón pueden ser un *modelo de primer orden* con o sin retraso, un modelo de segundo orden aperiódico con o sin retraso, un modelo de segundo orden subamortiguado con o sin retardo. Para nuestra planta térmica con una entrada escalón será suficiente, los sistemas térmicos tienden a ofrecer respuesta monótona creciente sin oscilaciones. La expresión para nuestra planta se expresa con la ecuación general 3.26:

$$G(s) = \frac{Kpe^{-t_d s}}{(1 + \tau s)} \quad (3.26)$$

Donde:

K : Ganancia del sistema.

t_d : Tiempo de retraso.

τ : Constante de tiempo.

Para la identificación de nuestra planta, lo realizamos con la ayuda del software *Matlab*[®] del desarrollador *Matworks*[®] con su herramienta *ident*. La salida escalón se conecta con circuito de disparo MOSFET explicado anteriormente sobre la niquelina, como dicha señal se encuentra conectado a un módulo PWM del controlador se procede a enviar 255 bits según la máxima resolución del mismo. La señal de salida es la calculada anteriormente por el controlador, requiere una relación entre la temperatura y el valor ADC en bits obtenido. Según la curva característica (figura 3.38) y el β del sensor. De esta forma se obtiene el vector de entrada respecto al tiempo (escalón de 255 o 12VDC) y el vector de salida del sistema (lectura de temperatura.)

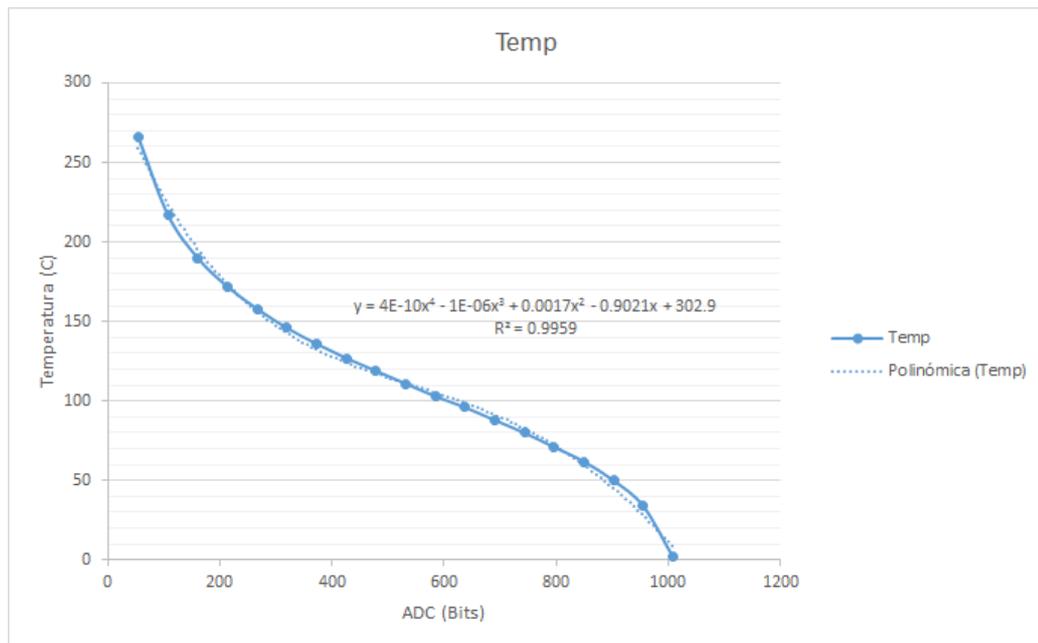


Figura 3.38: Curva característica del sensor, relación de temperatura vs ADC.

Para una mayor exactitud en la obtención del modelo de la planta se realizaron iteraciones del escalón, con una analogía a una señal de especie de *pulsos* (figura 3.39).

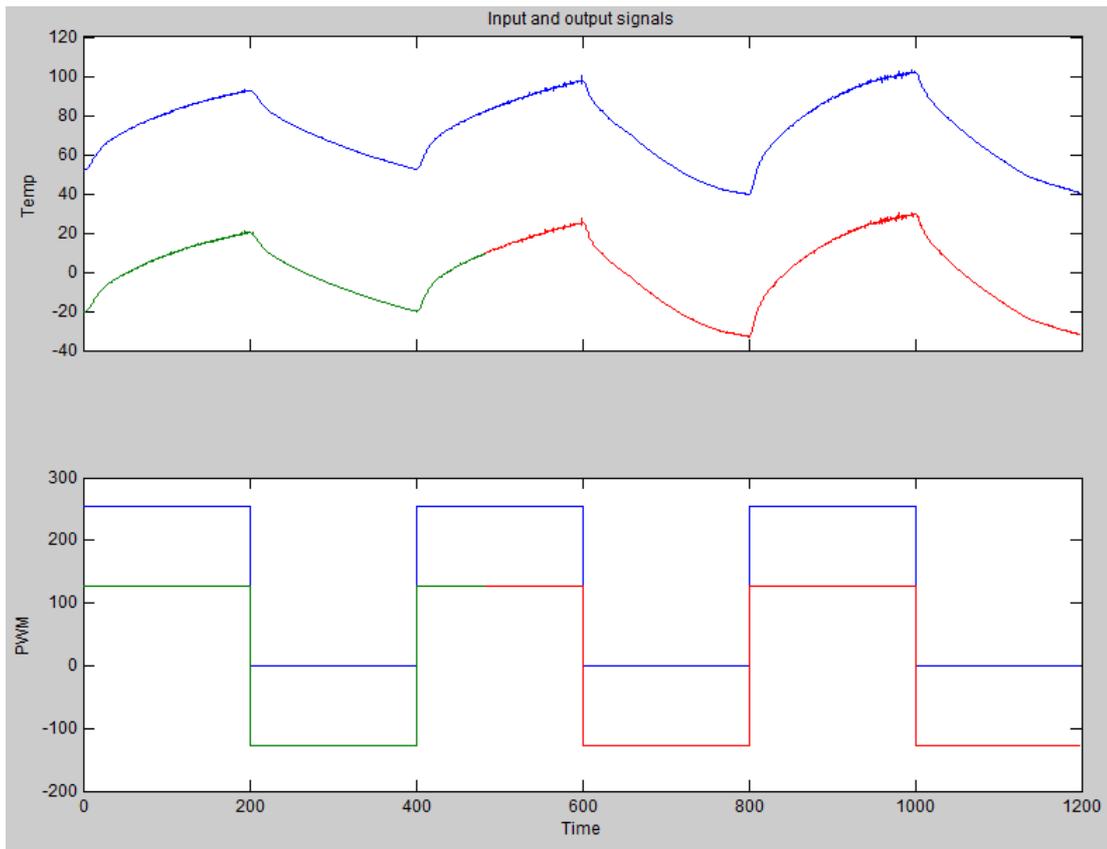


Figura 3.39: Señal de entrada como de salida de la planta respecto al tiempo.

Para la afinación y selección entre el orden del sistema se realizó una comparación entre un modelo de segundo orden (rojo) y un modelo de primer orden (verde), la figura 3.40 permite observar que modelo es la que más se aproxima. De esta forma la planta queda expresada en la ecuación 3.27.

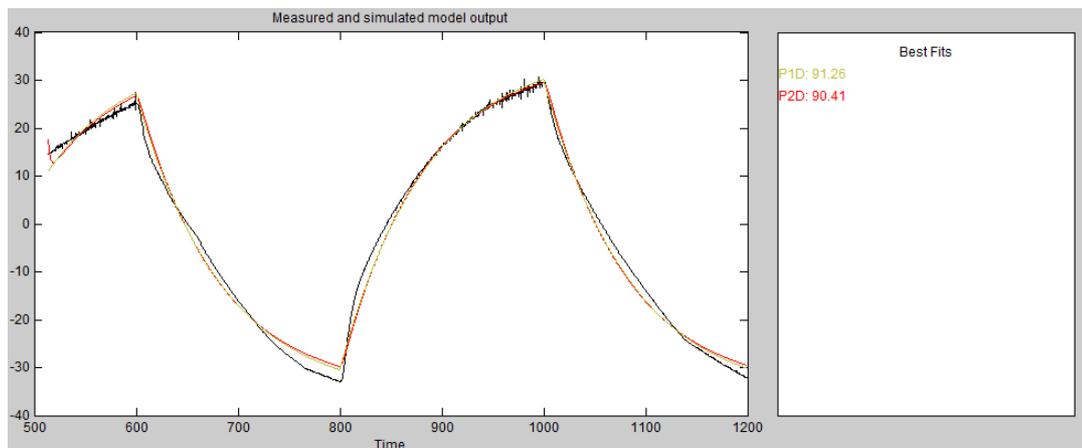


Figura 3.40: Ajuste entre modelo de segundo y primer orden para la planta.

$$G(s) = \frac{Kp}{(1 + Tp1 \times s)} \quad (3.27)$$

donde:

$$Kp = 0,28599$$

$$Tp1 = \tau = 84,791$$

Cabe señalar que nuestra planta no presenta factor de retardo. El modelo presentado en la ecuación 3.27 se encuentra en el dominio de la frecuencia, pero permite analizar algunas variables de forma directa en el dominio del tiempo por sus relaciones con algunas constantes.

Controlador.

Para el controlador es necesario identificar las constantes fundamentales que forman parte del controlador, determinar los valores de Kp , Ti y Td para realizar la identificación posterior de las constantes Kd y Ki necesario para el controlador [Kuo, 2004]. Por motivos de facilidad, los valores de las constantes Kp , Ki y Kd se realizó a través del mismo software que controla la impresora (Repetier-Host v1.5.3). Antes de introducir el comando es necesario conocer el comportamiento como tal de la planta, por eso se llevó a cabo la identificación y modelamiento de la planta.

La impresora cuenta con un *firmware* que permite la interpretación del código G y realiza una sintonización automática. Quienes desarrollaron el firmware de libre distribución para la impresora incluyeron un código que permite generar las constantes proporcional integral y derivativo. El software Repetier-Host realiza una sintonización por medio del método de Ziegler-Nichols que realiza oscilaciones hasta determinar de la mejor manera los valores (figura). El comando de código G para todo tipo de impresoras que rigen bajo la filosofía *RepRap* es conocido como *‘tuning PID’*.

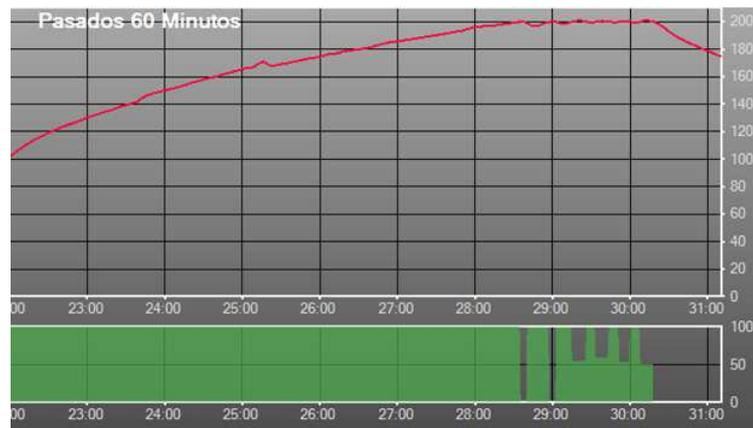


Figura 3.41: Gráfica Temperatura vs tiempo, PID autotuning.

$$M303 \ E0 \ S200 \ C8 \quad (3.28)$$

El significado del comando es el siguiente:

- *M303*:Código G para impresoras 3D.
- *E0*:Selección del extrusor, en ciertas impresoras existen múltiples extrusores.
- *S200*:Set-point de temperatura para el escalón.
- *C8*:Número de iteraciones que se desactiva el generador de calor por un tiempo determinado y así generar oscilaciones para la sintonización.

Finalizada la sintonización el software arrojará los valores correspondientes de la planta (figura), así como temperaturas mínimas y máximas de las variaciones. Pero lo de mayor utilidad del sistema es que este nos muestra los valores de las constantes (K_p , K_i y K_d) para el controlador.

```
bias: 92 d: 92 min: 196.56 max: 203.75
Ku: 32.59 Tu: 54.92
Classic PID
Kp: 19.56
Ki: 0.71
Kd: 134.26
PID Autotune finished ! Place the Kp, Ki and Kd constants in the configuration.h
```

Figura 3.42: Resultados PID autotuning, software Repetier-Host.

Con el modelado de la planta y la identificación de las constantes del controlador, únicamente resta realizar la implementación del algoritmo de control, dentro de la tarjeta o sistema de control seleccionado.

3.5. Interfaz gráfica

La interfaz gráfica como tal permite realizar un control completo sobre todo el módulo desarrollado en el presente proyecto. Como se menciona en la sección 3.4 por facilidad de comunicación se selecciono el protocolo RS232 de envío de datos seriales. El interfaz debe permitir visualizar las siguientes variables del sistema:

- Temperatura del sistema.
- *Setpoint* de temperatura.
- Señal de inicio inyección colores.
- Gráfico en tiempo real, *Temperatura vs tiempo*.

Para desarrollar la aplicación se consideró una plataforma de desarrollo que requiera pocos recursos para su ejecución, que cuente con la configuración para envío/recepción de datos externos y que tenga la facilidad de ser programado en un lenguaje de alto nivel además de fácil implementación. La plataforma *Processing*[®] fue seleccionada pues permite un desarrollo rápido y amigable de aplicaciones corta y que necesiten interactuar con microcontroladores externos. El flujo de datos y ordenes para el desarrollo de la aplicación se muestra en la figura 3.43.

La idea principal fue demostrar de forma visual los valores de temperatura en cada instante de uso del módulo. Inicialmente el microcontrolador determina según la variación de resistencias la temperatura del sistema. En segunda instancia dicho valor de temperatura es enviado al ordenador, que lo recibe y lo gráfica. En el mismo interfaz debe existir la posibilidad del ingreso manual del *setpoint* de temperatura, si este valor no fue ingresado el intercambio de temperaturas se repite sin que ingrese a la instrucción del control de temperatura en el microcontrolador. Así mismo si el usuario ingresa un valor de *setpoint* este será enviado al controlador, ingresará a la instrucción del controlador y arrojará la señal de control correspondiente, en la interfaz no interesa mostrar el valor de la señal de control, interesa visualizar la variación de temperatura con respecto al tiempo. La interacción de envío de *setpoint* y recepción de temperatura seguirá mientras exista un valor de *setpoint* ingresado. La interfaz además deberán contar un pulsadores que permitan el manejo de inyección o pausa de los concentrados líquidos. Es requerido que dichas señales sean enviadas al microcontrolador para que este sea quien accione los actuadores de bombeo.

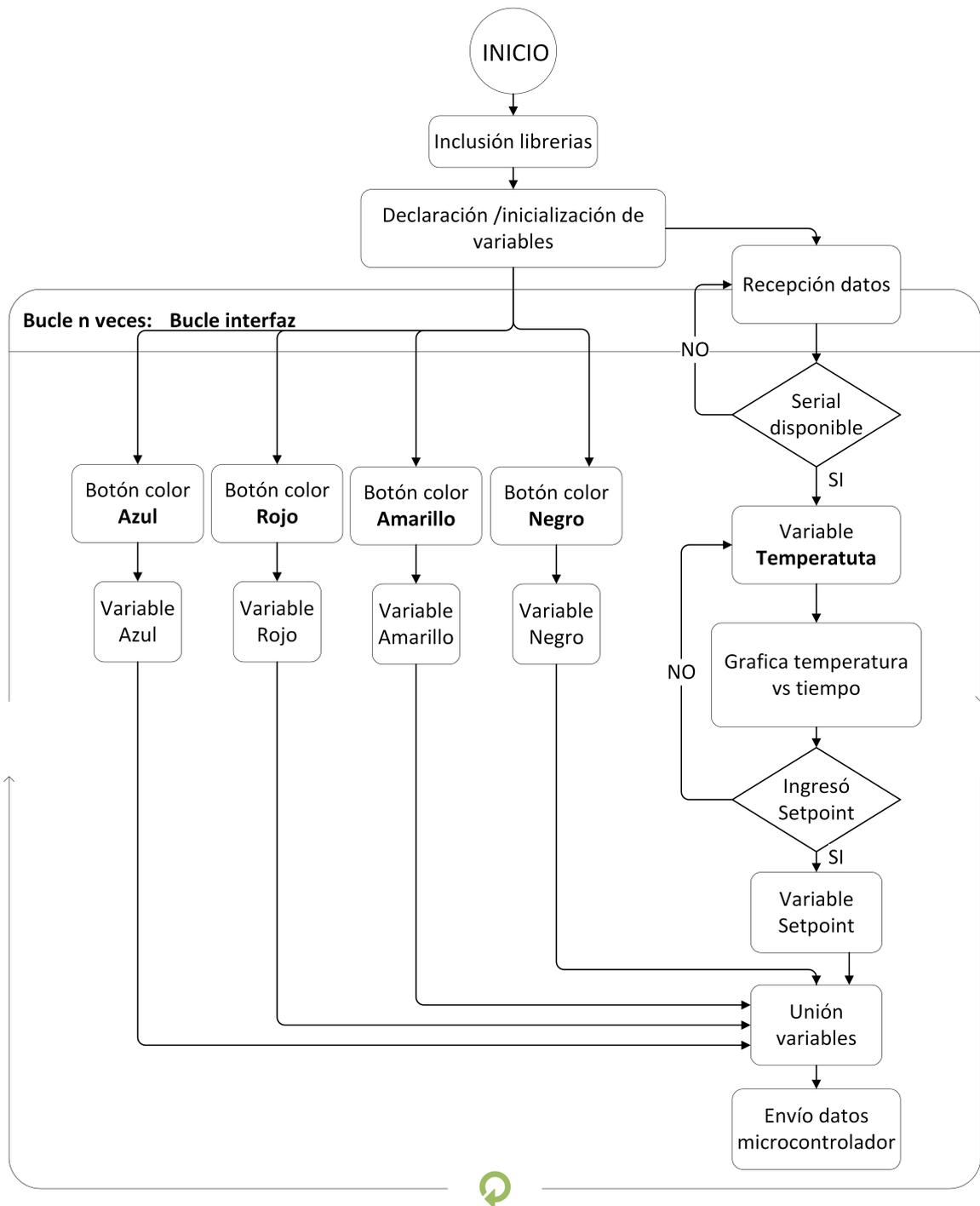


Figura 3.43: Diagrama de flujo del interfaz con usuario.

3.6. Resumen

El presente capítulo basó su desarrollo principalmente en la selección de los distintos elementos que conformarán el extrusor incluyendo la inyección de color. Además del diseño

de nuevas piezas que serán añadidas al sistema convencional de extrusión para impresoras en 3D. En los aspectos físicos como tal del proyecto, el inconveniente principal nace de la correcta determinación de materiales según las propiedades térmicas. Identificar de forma precisa las zonas tanto calientes como frías del extrusor es imprescindible para continuar con el proceso de diseño e identificación de variables para la extrusión de polímero. El método de inyección de color requiere de mínimos caudales y una dosificación precisa del concentrado.

Capítulo 4

Implementación y construcción.

El presente capítulo busca detallar los pasos y procesos que se necesitaron para la construcción del extrusor. Más allá del detalle de construcción se busca detallar la forma y el tipo de ensamblaje utilizado.

Para buscar realizar un control preciso, se trató de regular y calibrar el giro de los motores alimentadores. Realizar una calibración por medio de control de pasos del motor permite calcular la velocidad de empuje de filamento sobre la cámara de mezcla.

4.1. Colores.

El diseño permite la inclusión de 5 diferentes colores y permitir una combinación amplia en una extrusión. Según la teoría de colores detalla en la sección 2.5, para permitir una mezcla se requiere de la teoría aditiva, seleccionado el blanco como color base. El extrusor permitirá el ingreso de blanco, cian, magenta, amarillo y negro. La variedad de colores de filamentos es amplia (figura 4.1



Figura 4.1: Variedad de filamentos de distintos colores.

Cada filamento requiere de un alimentador, es decir de un motor que permita la generación de una fuerza y así el ingreso de los filamentos a la cámara. Para esta parte del extrusor, así como en la sección del compartimiento de convección diseñados, fue requerida

la impresión de varios objetos

4.2. Construcción nuevas piezas para ensamblaje.

Como se menciona en la sección 3.2.2 para la construcción del extrusor fue necesario fabricar determinados elementos. Además de dichos elementos es necesario determinar la forma de ensamblaje tanto de las nuevas piezas, como de los elementos adquiridos en el mercado.

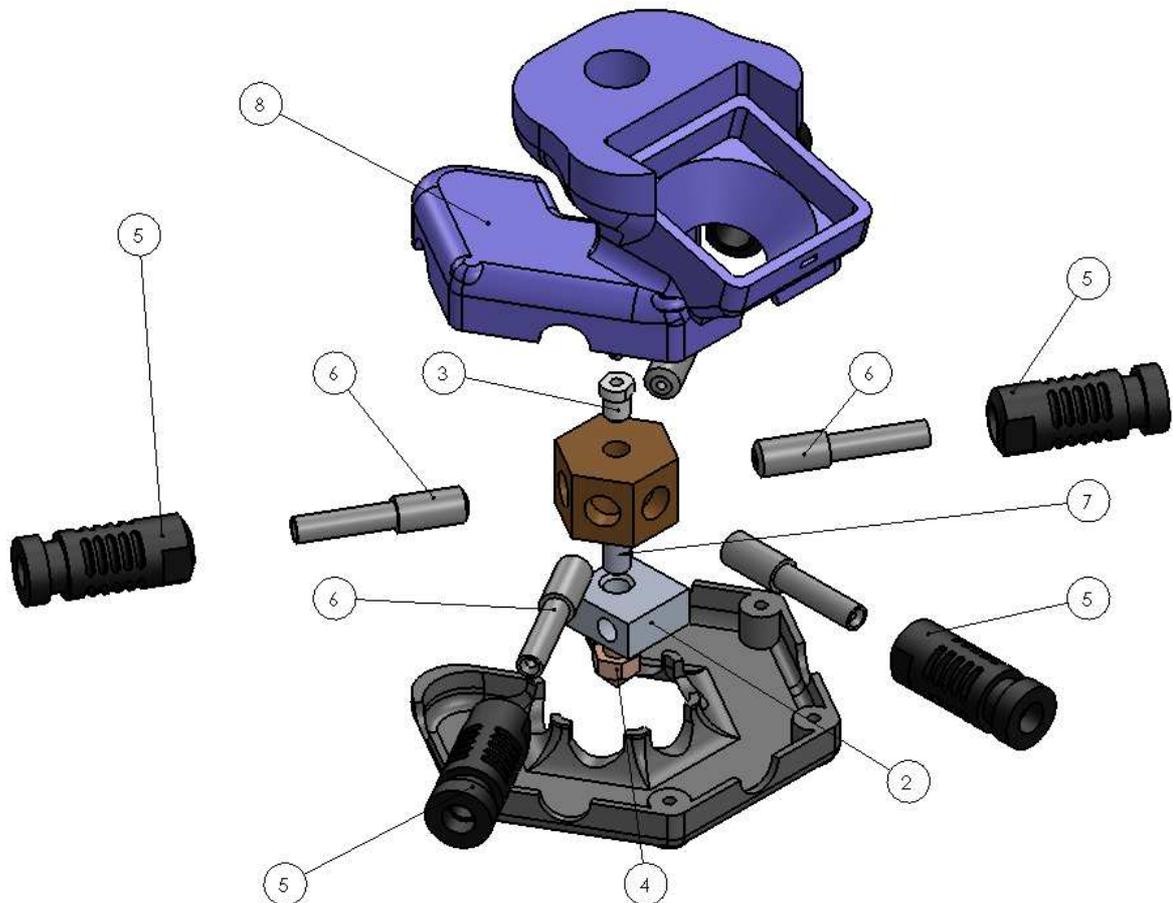


Figura 4.2: Modelo prototipo de extrusor, con todos sus elementos.

Nota: El número de cada elemento no representa algún tipo de orden de ensamblaje.

La figura muestra a cada elemento que conforma el extrusor, el detalle completo de los elementos se puede visualizar en los planos mecánicos. Una breve descripción de los elementos se detalla a continuación:

- Cámara de mezcla (1)
- Cubo de aluminio (2)

- Separador térmico (3)
- Boquilla (4)
- Disipadores (5)
- Aislante térmicos (6)
- Prisionero M6 (7)
- Cámara de mezcla (8)

El diseño como tal no requiere de la construcción de todos sus elementos, como se determinó en la selección de materiales y elementos del sistema varios de las partes se adquirieron comercialmente. La cámara de mezcla, el prisionero de conexión, el separador térmico y los aislante térmicos fueron los únicos elementos que requirieron ser construidos. Antes de iniciar con la construcción de dichos elementos cabe recordar que ya se adquirió en un inicio tanto los disipadores, la boquilla y el cubo de aluminio.

4.2.1. Cámara de mezcla.

La cámara de mezcla (figura 3.4, se fabricó a partir de un barra hexagonal de bronce fosfórico, éste es un elemento comercial y de fácil acceso. Por la forma geométrica como tal no requiere de otro tipo de manufactura además de las perforaciones para los aislantes térmicos y el prisionero. Los disipadores vienen de fábrica con agujeros roscados M8 x 1.25mm (figura 4.3) Los requisitos mecánicos de la cámara de mezcla fueron:

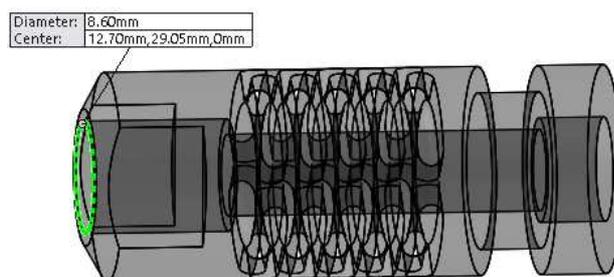


Figura 4.3: Perforación roscada M8 x 1.25 de disipador, se muestra un diámetro equivalente en el modelado para la simulación.

- 5 Agujeros roscados (M8 x 1.25mm) de 5mm de profundidad, uno en cada cara.
- 5 Agujeros pasantes de ϕ 2mm sobre cada agujero roscado roscado, detallado anteriormente. Por medio de estos agujeros se permitirá la inclusión de los distintos filamentos.

- Un agujero roscado (M6 x 1mm) pasante, desde la cara superior hasta la inferior.
- La longitud de la cámara debe ser por lo menos $\geq 16\text{mm}$, que es el diámetro de los disipadores. Cabe recalcar que no es prudente sobre dimensionar la longitud de la cámara, pues ocasionaría tener una mayor masa que alberga mayor cantidad de calor y un tamaño mayor en sí del extrusor

El detalle completo, se puede visualizar en los anexos (planos mecánicos), la construcción de la cámara se la realizó en un taladro de pedestal vertical. Tanto las perforaciones horizontales del hexágono, como la perforación longitudinal del mismo.

4.2.2. Aislante térmico.

La forma básica de los disipadores se muestra en la figura 4.4, por efectos térmicos es necesario que tanto la parte de sujeción con la cámara como el aislante como tal, sean conformados de una sola pieza. La longitud requerida dentro del disipador que debe tener el aislante es de 35mm, añadiendo la longitud roscada requerida para la sujeción con la cámara de mezcla. El material seleccionado en la sección 3.2.1.2 es el teflón PTFE, de fácil acceso en el mercado en presentación de barras circulares de varios diámetros.

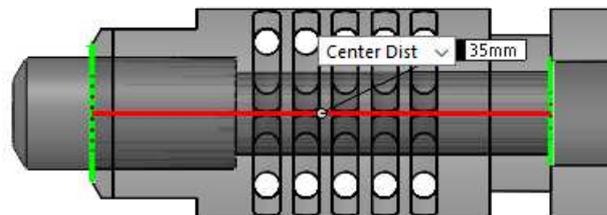


Figura 4.4: Disipadores, longitud de aislante térmico en el interior del disipador.

En el interior del disipador se manejan dos diámetros diferentes, uno que cumple la función de aislante y el otro que cumple la función de sujeción. Asimismo existen dos longitudes diferentes (figura 4.5)

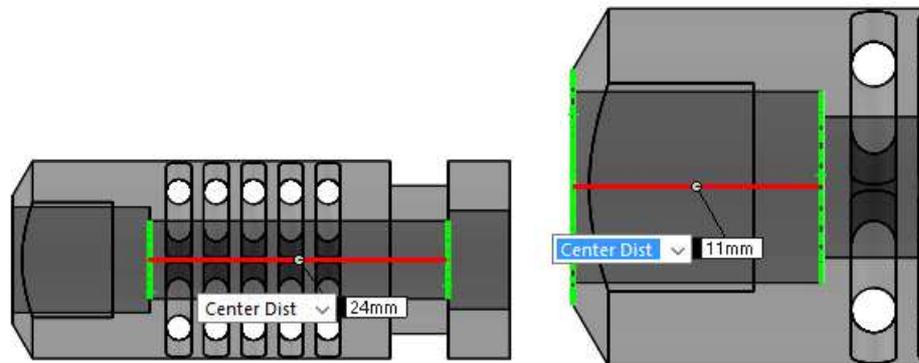


Figura 4.5: Longitudes requeridas para fabricación del aislante.

Con las condiciones geométricas de los disipadores, los aislantes deben tener las siguientes características:

- Una longitud total de 40mm.
- 16mm de sección roscada (M8 x 1.25mm).
- 24mm de sección aislante de ϕ 6mm, según el interior del disipador.
- Una perforación pasante, longitudinalmente por medio del aislante de ϕ 3mm, canal en el cual el filamento es alimentado.

4.2.3. Separador térmico.

La función del disipador térmico es añadir una pieza que permita que a través de ella ingrese el mezclador o husillo a la cámara de mezcla, por motivos de facilidad de construcción se maneja un solo diámetro roscado pasante en la cámara de mezcla. El separador térmico es un pequeño elemento que cumpla con aislar el calor únicamente en la cámara de mezcla y permita que ingrese el husillo. Para su ensamblaje y facilidad de construcción se busco asemejar un perno, con únicamente dos lados paralelos para el ingreso de la herramienta. Por motivos de transferencia de calor no se busca que el separador se encuentre en contacto directo con la cámara. Los requisitos del separador son:

- Rosca M6 x 1.00mm.
- Cabeza con dos lados paralelos de 8mm.
- Longitud mayor a 6mm.

Fabricar este elemento de algún material conductor, complicaría la extrusión del filamento por efectos térmicos. El material ideal es PEEK, por efectos de disponibilidad comercial y análisis de la sección 3.2.1.2 el material que mejor se adapta es el teflón PTFE. La fabricación de este elemento se lo realizó en un torno, tanto perforaciones como cilindrados requeridos para su posterior roscado.

4.2.4. Prisionero

Para permitir ensamblar la cámara de mezcla con el cubo de aluminio se modificó a un prisionero comercial (figura 4.6), una longitud de 10mm es suficiente para permitir la sujeción tanto del cubo como la cámara. Este elemento permitiría el paso de la broca o husillo a través de él y obviamente la circulación de filamento fusionado, se requiere una perforación apasante de 2mm a través de todo el elemento.



Figura 4.6: Prisionero M6 x 1mm x 10mm, perforado.

Tanto el cubo de aluminio como la cámara de mezcla tienen una rosca de ϕ 6mm y 1mm de paso. Evitar manejar cambios de secciones el prisionero seleccionado es ideal. La modificación del prisionero, únicamente requiere de la perforación antes mencionada, modificación que se puede realizar en un torno convencional.

4.2.5. Matrimonio mezclador - husillo

Como se mencionó anteriormente se requiere de un elemento que cumpla la función de un tornillo sin fin de empuje. El husillo es una broca comercial de 3mm. Es necesario fabricar una pieza que permita la transmisión del movimiento del motor a la broca o husillo de empuje. El diseño y fabricación del matrimonio es bastante sencillo. Requiere de un cilindro con 2 perforaciones longitudinales y agujeros transversales que permitan incluir prisioneros de ajuste y sujeción. La figura 4.7 muestra el esquema

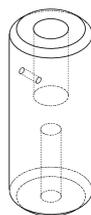


Figura 4.7: Esquema de elemento de unión (matrimonio) entre motor y el husillo.

El matrimonio debe incluir dos diámetros diferentes para el eje del motor y para la broca, incluir un agujero para el eje del motor (debido a su forma) y de agujeros para prisioneros de ajuste para la broca. El procedimiento se lo realizó en un torno, tanto proceso de cilindrado como perforaciones.

Para información de medidas o detalle de cada elemento, recurrir a los planos de construcción de los elementos fabricados.

4.3. Elementos impresos 3D.

Para finalizar el acople y la adecuación con el robot delta, se modificó y diseñó determinadas piezas principalmente para permitir que el extrusor sea añadido a la impresora. Dichos elementos no requieren propiedades especiales algunas, por lo que no existe inconveniente en imprimir dichas piezas ya sea en PLA o ABS. Para una impresión convencional no es requerido realizar planos de construcción, únicamente con el modelado CAD y guardar dicho fichero en formato “.*stl*”.

4.3.1. Elementos de cámara de convección forzada

Como se menciona en la sección 3.2.2 por motivos térmicos, fue necesario diseñar un elemento que sea capaz de generar una etapa de disipación forzada, encerrar la zona fría del extrusor y generar un flujo de aire continuo. El diseño incluye un compartimiento para el ventilador y una pieza para la sujeción con el robot delta. Para su respectivo ensamblaje el diseño debe contener de dos piezas separadas con agujeros en las esquinas y permitir incluir algún tipo de elemento mecánico que genere la sujeción entre sí. La figura 4.8 muestra la forma de los elementos antes de ser impresos.

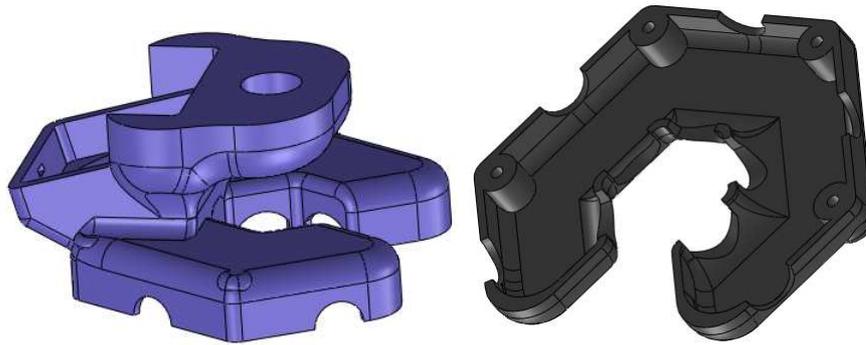


Figura 4.8: Piezas de cámara de convección forzada.

La figura 4.9 permite observar un esquema real del extrusor, ensamblado y con la parte inferior de la cámara de convección.



Figura 4.9: Extrusor ensamblado vista superior, antes de ser ensamblado en el robot.

4.3.2. Plataforma sujeción robot Delta

Para permitir que el extrusor sea añadido al robot, se modifico su plataforma, se incluye una pieza que permita incluir el motor giratorio y de esta forma sujetar todo el sistema de extrusión. La forma como tal de la plataforma no se vio modificada, únicamente permitir incluir el motor y sus medidas. La figura 4.10 permite observar la plataforma modificada.



Figura 4.10: Plataforma para inclusión de actuador giratorio de empuje.

4.3.3. Mecanismo alimentación filamento

4.4. Ensamblaje.

Como se mostró en la figura 4.2, con todos los elementos listos tanto construidos como adquiridos, se procede a ensamblar el sistema completo. La figura 4.11 permite observar en primera instancia el ensamble del sistema de extrusión implementado en el robot delta.

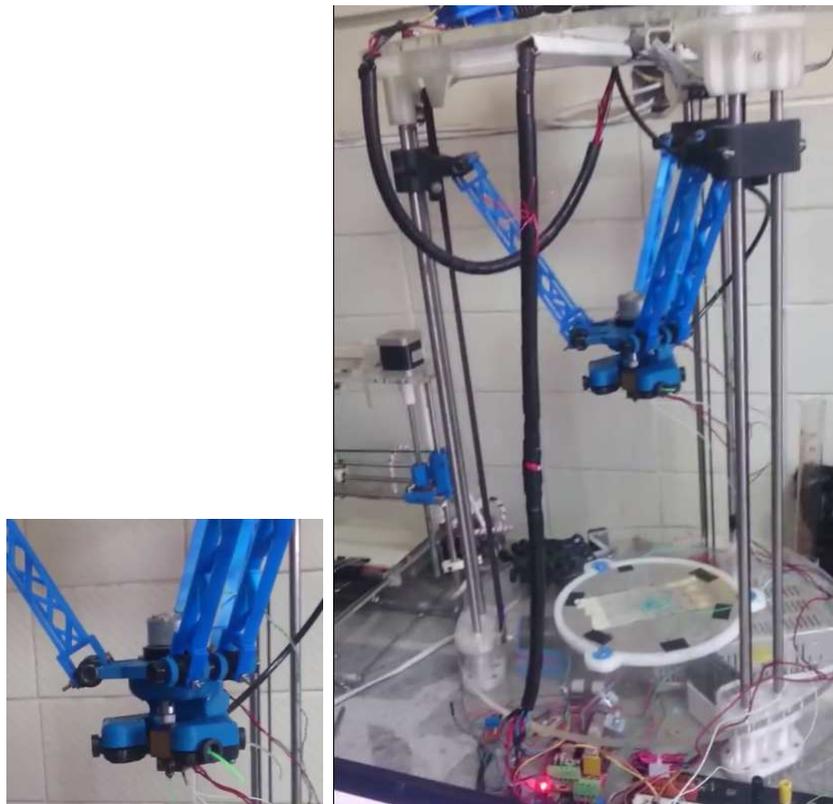


Figura 4.11: Sistema de extrusión incluido en robot delta.

4.5. Calibración motores a pasos para alimentación filamento.

Para una correcta y estable extrusión, se requiere que la alimentación del filamento sea lo suficientemente precisa, variar el tiempo entre paso y paso o la cantidad que den los mismos durante la alimentación. Los motores de alimentación de filamento, son motores NEMA 17, con precisión de 1.8° por paso. es decir se necesitan 200 pasos para una vuelta completa. Justamente por la forma en la que se realiza el control a través de programación en el controlador, se permite variar este parámetro. Según pruebas se determinó una relación entre tiempo de accionamiento de las bobinas de los motores a pasos y el volumen que se inserta en la extrusión (tabla 4.1). La figura 4.12 demuestra la relación entre intervalo de energización y caudal de alimentación.

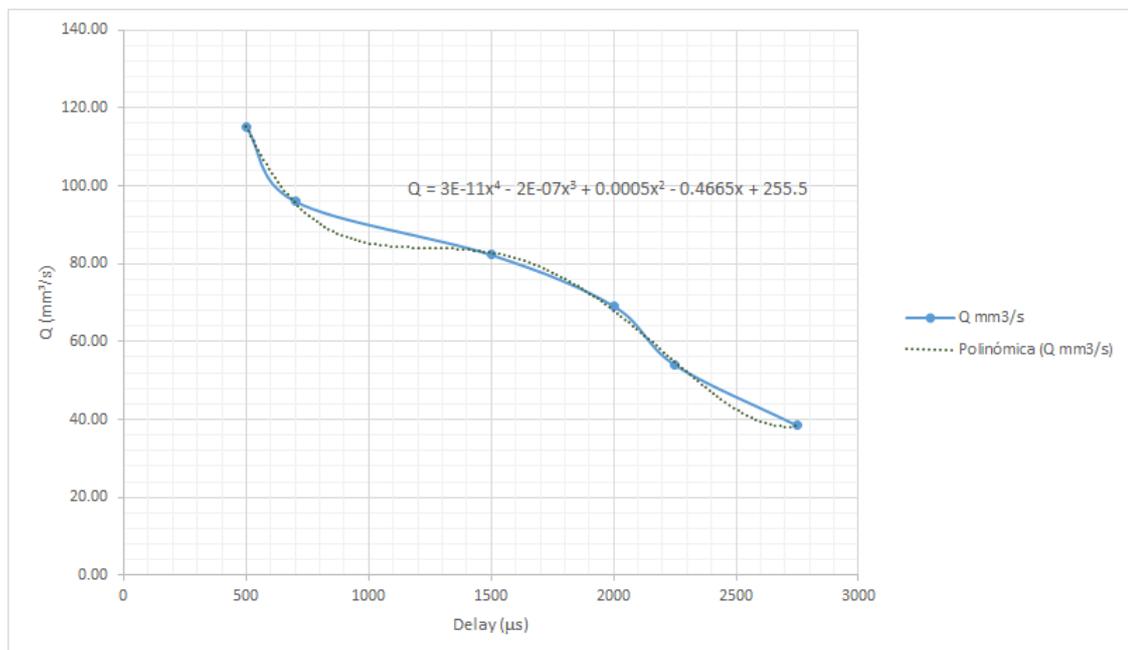


Figura 4.12: Calibración de motores, según intervalos de tiempo de energización de bobinas de motor a pasos.

Tabla 4.1:
Tabla de calibración de bombas.

$L[mm]$	$V[mm^3]$	$t[s]$	$Delay[\mu s]$	$Q[mm^3/s]$
100	1727.18	15	500	115.15
100	1727.18	18	700	95.95
100	1727.18	21	1500	82.25
100	1727.18	25	2000	69.09
100	1727.18	32	2250	53.97
100	1727.18	45	2750	38.38

Si conocemos que según el *firmware* del controlador del robot, 100 mm de filamento de 1.75mm de diámetro lo hace en 20s. Se buscó realizar una analogía a el volumen que se requiere insertar en la cámara durante una extrusión. Es decir la extrusión por defecto permite la alimentación de $86,36[mm^3/s]$. Si únicamente se incluiría un solo filamento, este sería la alimentación. Por motivos de mezcla se consideró únicamente tres alternativas de mezcla. Reducir el volumen de alimentación del filamento blanco (base) y variación de volumen para la inclusión de cada filamento, únicamente del 25 % de la extrusión será blanco. El 75 % restante sera dividido en los tres y hasta cuatro filamentos extras.

Tabla 4.2: Regulación de caudal a través de relación con intervalo de energización.

# de colores	Porcentaje %	$Delay[\mu s]$
1	75	1600
2	37.5	2735
3	12.5	3125
4	3.125	3854

El valor del *delay* es el que se ve modificado según variaciones reales. Con los datos escritos se obtuvieron los mejores resultados.

4.6. Interfaz.

EL diseño de la interfaz se muestra en la figura 4.13 donde se observa los elementos y las variables del sistema de extrusión.

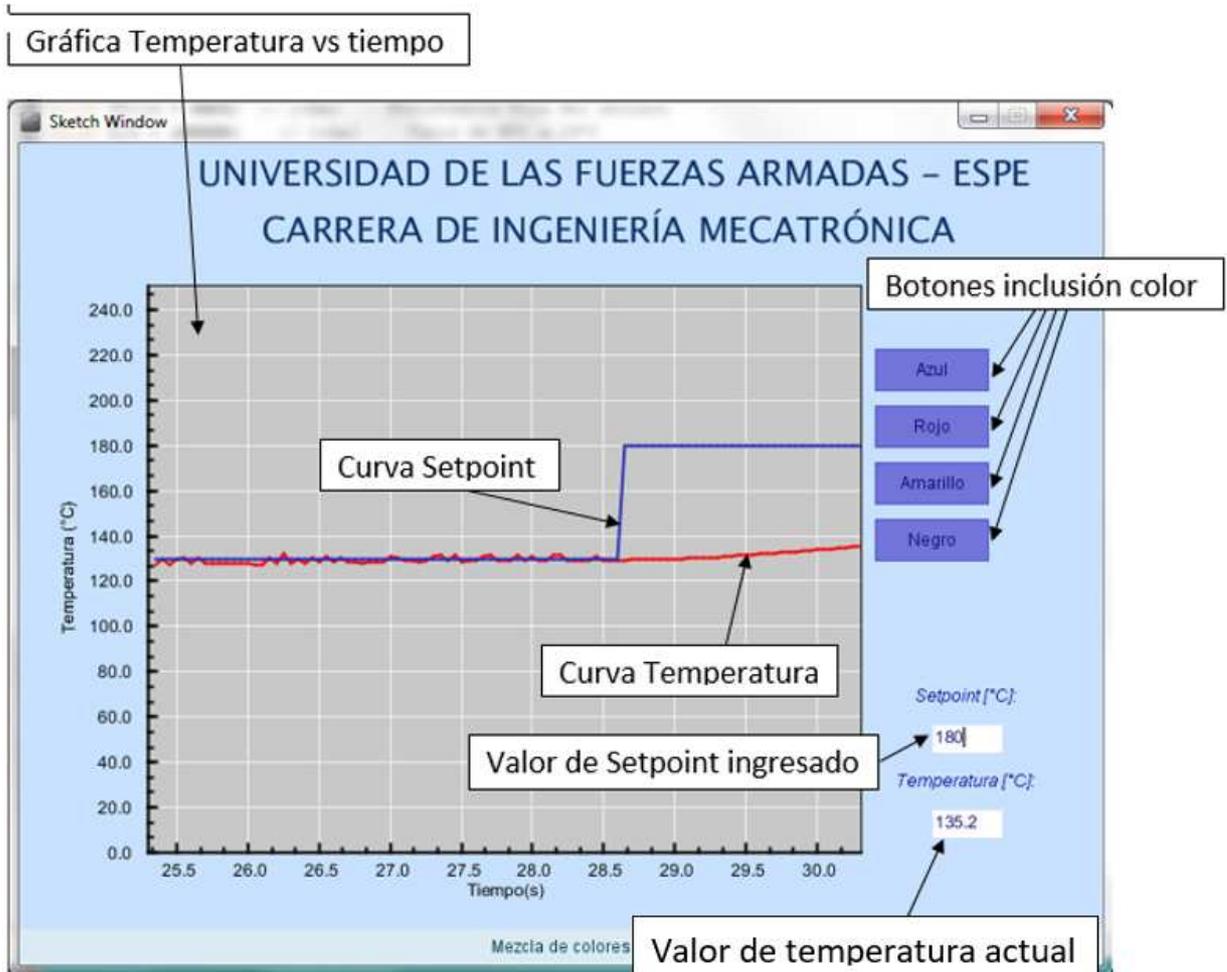


Figura 4.13: Interfaz usuario.

La curva de temperatura vs tiempo permite visualizar los valores tanto de setpoint como la temperatura en ese instante. Se obtiene los pulsadores que permiten la activación o desactivación del ingreso de colores a la extrusión. El usuario únicamente puede controlar el setpoint requerido para el control de temperatura y los pulsadores de ingreso de colores.

4.7. Pruebas funcionamiento prototipo.

Para arrancar las pruebas de funcionamiento en un inicio no se colocó en el robot. El módulo como tal, independiente permite la extrusión de cualquier polímero por medio de

alimentación independiente de filamento. La figura 4.14 muestra las primeras pruebas del extrusor.

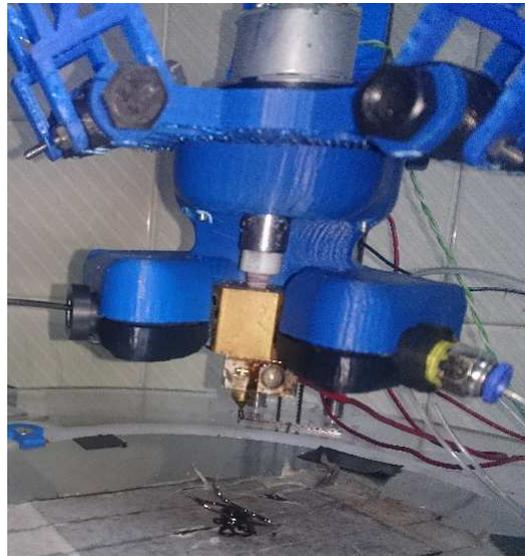


Figura 4.14: Extrusor completamente ensamblado.

Como se menciona en la sección de alimentación del filamento, se requiere de un husillo que permita generar la presión necesaria para la extrusión. Se realizaron pruebas con la inclusión de diversos colores, las transiciones entre color y color se logran observar con claridad si se extrae el husillo durante la extrusión. Las figuras 4.15, 4.16, 4.17 muestran algunas de las transiciones realizadas.



Figura 4.15: Transición amarillo - rojo.



Figura 4.16: Transición inyección concentrado rojo.



Figura 4.17: Transición inyección concentrado negro.

Durante las primeras pruebas se obtuvieron los resultados mostrados en la figuras antes mostradas.

Un ejemplo de mezcla entre dos colores diferentes se observa en la figura 4.18.

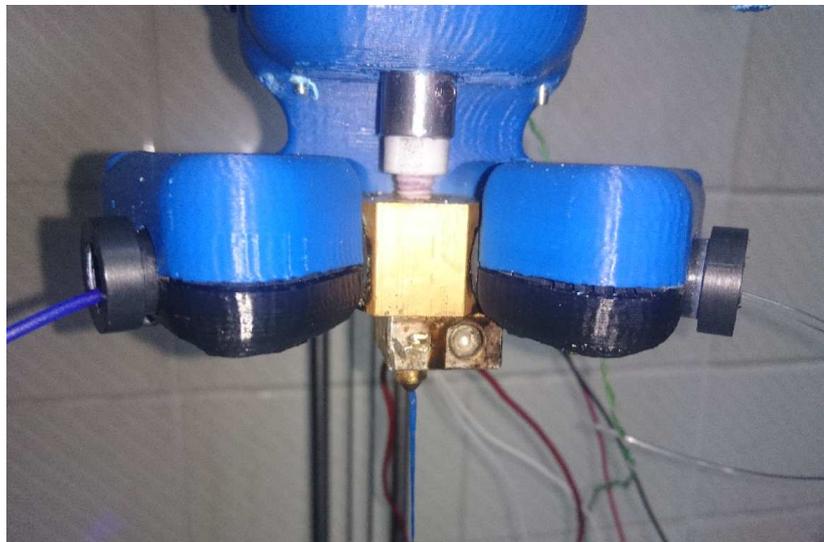


Figura 4.18: Transición inyección concentrado negro.

Los resultados se de transiciones durante una extrusión se muestra en la figura 4.19.



Figura 4.19: Transición de colores durante extrusión, con sistema completo de extrusión montado en el robot



Figura 4.20: Resultados de transiciones de colores en extrusiones, con boquilla de 1mm de diámetro. Transiciones entre azul-transparente y azul-rojo.

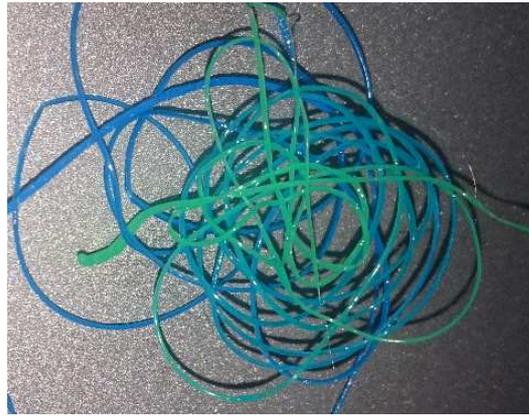


Figura 4.21: Resultados de transiciones de colores en extrusiones, con boquilla de 1mm de diámetro. Transición entre azul-verde.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

En el presente capítulo se evalúan resultados para obtener las conclusiones obtenidas del proyecto. Así, plantear las propuestas de mejoras y recomendaciones. Se plantean las dificultades que y diversas oportunidades de mejoras en cada etapa tanto del diseño como de la construcción. Cada etapa con las respectivas fortalezas y debilidades en el desarrollo del proyecto se detalla a continuación:

- **Tipo de concentrado, tinturante o colorante:** El resultado de combinar filamentos aunque resulta muy efectivo, presentó grandes inconvenientes en el análisis de inclusión de distintos volúmenes, así como el estudio de las presiones necesarias para permitir la extrusión. Además sigue presentando pequeñas transiciones de color a color.
- **Forma de la cámara de mezcla:** Con la selección de inclusión de filamentos de colores, la cámara de mezcla requiere una forma que muestre la versatilidad para insertar varios disipadores en un tamaño considerablemente mínimo. Si bien el diseño muestra una gran ventaja para impresoras 3D basadas en un robot delta, puede presentar una gran dificultad en impresoras cartesianas por el tamaño horizontal que muestra el extrusor.
- **Mecanismo de alimentación de filamento:** El sistema de alimentación es de suma importancia en el control y calidad del filamento extruído. Tener un motor para cada filamento puede resultar bastante preciso en cada filamento, pero resulta bastante complejo en el sentido de practicidad y movilidad del módulo. El tamaño que representan cinco motores adicionando el consumo de corrientes de cada uno representa una desventaja del sistema.
- **Sistema de disipación de calor:** La disipación así como la transferencia de calor representa una de las claves del proyecto. El sistema de disipadores con material

PEEK presenta una gran ventaja con respecto al tamaño como tal del extrusor, aún así colocar un disipador por cada filamento garantiza un aislamiento y posterior disipación en las zonas frías del extrusor.

- **Tipo de control de temperatura:** El control de temperatura es el idóneo para el tipo de sistema y planta requerida, una desventaja presenta si se incluye en la tarjeta de control del robot, el control de temperatura entre el software del robot y la programación del controlador en los valores de temperaturas resultan inconsistencias.
- **Tipo de comunicación entre controlador y ordenador:** El tipo de comunicación es la comunicación serial ya sea entre el controlador del robot y el ordenador o entre el modulo de extrusión de colores. Aún resulta fácil establecer este tipo de conexión entre dispositivos periféricos y un ordenador, pero resulta bajo ciertas circunstancias caótico si se encuentra conectado mas de dos periféricos, como precisamente se encontrará conectado el ordenador si consideramos una conexión con la tarjeta de control del robot y la tarjeta de control del módulo multicolor.
- **Tipo de control motores a pasos:** El control de los motores a pasos resulta bastante versátil por medio de los controladores A4988. Tan solo se requiere tres pines de conexión por motor y facilita el control por programación del mismo. A pesar de las bondades aún resulta un gran inconveniente considerar cinco controladores para los cinco motores de los distintos colores.

5.1. Conclusiones

- El diseño de un sistema de extrusión para impresoras 3D con la inclusión de cinco colores diferentes, permite adicionar colores a cualquier impresión y que estos sean controlados a través de un proceso totalmente autónomo al control en sí de la impresora.
- Para permitir la extrusión de polímero resultó imprescindible realizar un análisis térmico del sistema de extrusor completo, separar las zonas térmicas (caliente y fría) es un requisito fundamental para generar las variables necesarias que permitan la extrusión por la boquilla. La selección de materiales es necesaria para la separación térmica de zonas y etapas en el sistema. La selección de materiales conductores y de propiedades térmicas óptimas para conservar en calor son necesarios en la zona caliente del extrusor ('hotend'), materiales como el bronce y aluminio presentan grandes bondades en el aspecto térmico. Para las zonas frías se selecciono polímeros

(PEEK - PTFE) que sean capaces de aislar el calor y cuenten con propiedades de convección.

- Realizar un control de temperatura lo suficientemente preciso para determinar y seleccionar las diversas temperaturas de extrusión del polímero. Cabe recalcar que se incluirá cinco polímeros de características similares pero no iguales, cada filamento de color cuenta con temperaturas de transición diferentes. Para determinar la temperatura correcta de extrusión promedio de los filamentos es requerido obtener un control preciso de esta variable. Las temperaturas de extrusión (170°C - 220°C) dependen de la cantidad y la velocidad de extrusión. El diseño permite un aislamiento en menos de 1cm entre temperaturas de 150°C a 45°C.
- Para permitir la inclusión de cinco filamentos fue totalmente necesario determinar todas las variables necesarias como fuerzas de alimentación, volúmenes de ingreso a la cámara de mezcla y el esfuerzo térmico requerido para permitir una extrusión estable y continua, así como el dimensionamiento del actuador giratorio que realizara una presión extra para la extrusión a través de la boquilla.
- Para diseñar un sistema totalmente autónomo al control de movimientos de la impresora fue requerido realizar determinadas conexiones entre la placa del robot y la placa de control del módulo de extrusión, permitir una señal paralela del sensor y modificar la cantidad de pasos necesarios para alimentar con cierta longitud el filamento fueron algunas de las modificaciones necesarias. La inclusión de volúmenes diferentes al sistema de extrusión necesitó regular cada motor que permite dicha alimentación, es decir; relacionar ya sea cantidad de pasos o intervalo de conexión entre bobinas, con la longitud de filamento necesario para una extrusión de buena calidad.
- Como se utilizó la teoría de color aditivo (MCYK), es requerido contar con la extrusión de filamento blanco como base para las mezclas de diversos colores. Para realizar distintas de combinaciones según concentraciones el control requerido es aquel que busque regular la cantidad de material que será añadido a la cámara de mezcla. Con una excesiva alimentación de filamento la calidad de impresión así, como las tonalidad se verán totalmente alteradas. El control requerido para esta parte del sistema es únicamente el manejo de impulsos o tiempos de energización de las bobinas de los motores a pasos. Una relación en la que el tiempo de energización es inversamente proporcional a la velocidad de alimentación del filamento. No amerita realizar algún tipo de control de lazo cerrado.

- Gracias a la versatilidad del diseño, es posible que el módulo sea incluido en cualquier impresora 3D, un control autónomo e independiente. Asimismo como su propia interfaz de usuario, permite que únicamente con la inclusión de los actuadores de alimentación y la modificación en la cantidad de pasos de alimentación en sí de la impresora se incluya una impresión con variedad de colores.
- Para la adaptación física del módulo fue necesario la inclusión de 5 sistemas de alimentación autónomos, mismos que requerían ser controlados de forma autónoma en un inicio, el software (*Repetier*) permite que dichas modificaciones y alteraciones en el control se lo complemente con el mismo software del robot. Así no es necesario realizar grandes modificaciones.

5.2. Recomendaciones

- Realizar un re-dimensionamiento correcto en cada etapa del extrusor, tanto el diseño térmico como el termodinámico de todo el sistema de extrusión es imprescindible para esta técnica de impresión 3D. Con un mal dimensionamiento de cualquiera de las zonas, simplemente la extrusión no será posible y no se obtendrá bajo ninguna circunstancia filamento fundido y extruído. El diseño como tal permite la mezcla de colores pero a través de una boquilla de 1mm de diámetro, reducir dicha variable permite perfeccionar y mejorar la calidad de impresión.
- Seleccionar de manera correcta el tipo de concentrado que permita la coloración es necesaria. Buscar un principio de coloración en el que las transiciones de color a color sean mínimas representaría un gran avance en este ámbito.
- Para el diseño de la interfaz fue necesario seleccionar el software (*Processing*) que permita una comunicación sencilla entre el controlador y el ordenador. El envío recepción de datos fue uno de los alcances del proyecto, el resultado fue obtener un envío y recepción de datos sincronizados entre el controlador y la interfaz diseñada.
- Incluir el sistema completo en una misma placa de control con la impresora o robot. Con un control central tanto de los movimientos como de la extrusión de colores variados, permite la generación de un único código de impresión. Los distintos *softwares* así como *firmwares* de las impresoras, permite la modificación e inclusión de aspectos como los mencionados anteriormente.

Bibliografía

- [Aarrestad, 2013] Aarrestad, O. (2013). Standard terminology for additive manufacturing technologies. *ASTM Stand. News*, 1(2), 3–5.
- [Alexander, 2015] Alexander, A. F. L. M. R. V. M. (2015). *Diseño y construcción de un prototipo de una incubadora con agitación de 10 litros de capacidad*. Tesis, Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE Departamento de ciencias de la energía y mecánica.
- [Bird, 2012] Bird, J. (2012). Exploring the 3d printing opportunity. *The Financial Times*, 1(1), 6.
- [Canalys, 2015] Canalys (2015). 3d printing market surpasses us\$3.3 billion worldwide in 2014.
- [Celi, 2015] Celi, A. M. S. R. (2015). *Estudio, diseño e implementación de un robot delta para utilizarse en una impresora 3D*. Technical report, Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.
- [Cengel, 2001] Cengel, Y. A. (2001). *Transferencia de calor y masa*. Mc Graw Hill.
- [Corbett, 2012] Corbett, J. (2012). Reprap colour mixing project. Master's thesis, University of Bath.
- [CustomPartNet, 2011] CustomPartNet (2011). Additive fabrication [<http://www.custompartnet.com/wu/additive-fabrication>].
- [de Valencia, 2011] de Valencia, U. P. (2011). *Curso de Fundamentos de ciencia de materiales*. Technical report, Universidad Politécnica de Valencia.
- [Enrique Yacuzzi, 2011] Enrique Yacuzzi, F. M. (2011). *QFD: Conceptos, aplicaciones y nuevos desarrollos*. Technical report, Universidad del CEMA - Avantis Pharma.
- [Forum, 2011] Forum, R. (2011). Hot-end.[<http://www.reprap.org/wiki/hotend>].

- [industries, 2013] industries, M. (2013). Makerbot replicator 2
<http://store.makerbot.com/>.
- [Kodama., 1981] Kodama., H. (1981). *A Scheme for Three-Dimensional Display by Automatic Fabrication of Three-Dimensional Model.*, chapter Vol.J64-C, No.4., (pp. 237–241). EICE TRANSACTIONS on Electronics (Japanese Edition).
- [Kuo, 2004] Kuo, B. C. (2004). *Sistema de Control Automático*. Prentice Hall.
- [Lipson & Kurman, 2013] Lipson, H. & Kurman, M. (2013). *Fabricated: The new world of 3D printing*. John Wiley & Sons.
- [Lokensgard., 2000] Lokensgard., R. . (2000). *Industria del Plástico*. PARANINFO.
- [Mandado, 1995] Mandado, E. (1995). *Instrumentación Electrónica*. MARCOMBO.
- [Mariano, 2011] Mariano (2011). Coloración de plásticos
<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/coloracion-de-plasticos.html>.
Tecnología de los plásticos, 1, 1.
- [Mendoza, 2011] Mendoza, J. R. C. (2011). *Diseño y simulación de sistema microcontrolados en lenguaje C*.
- [Moreno, 2004] Moreno, L. (2004). Historia del color y sus principios básicos
<https://docs.google.com/document/d/1xziqc2i1dtywd1gquv3xikun2dzbfpmwehrag6blp1s/edit?hl=>
- [Ogata, 1995] Ogata, K. (1995). *Discrete-Time Control Systems*. Prentice Hall.
- [OSHW, 2008] OSHW (2008). Open source hardware logo
<http://www.oshwa.org/open-source-hardware-logo>.
- [Rashid, 1995] Rashid, M. H. (1995). *Electrónica de potencia*, chapter 8, (pp. 280–286). Prentice Hall.
- [RepRap, 2013] RepRap (2013). Reprap darwin
<http://reprap.org/wiki/darwin>.
- [Roxas & Ju, 2008] Roxas, M. & Ju, S. (2008). *Fluid Dynamics Analysis of Desktop-based Fused Deposition Modeling Rapid Prototyping*. Technical report, Department of Mechanical and Industrial, Engineering, University of Toronto.
- [Selcuk & Bellini, 2004] Selcuk & Bellini, B. M. A. (2004). *Liquifier Dynamics in Fused Deposition*. Journal of Manufacturing Science and Engineering.

- [Stirling, 2003] Stirling, B. . (2003). A short history of the polymerase chain reaction. In *Methods Mol Biol* chapter 226, (pp. 3–6). Springer.
- [Stucker, 2010] Stucker, G. I. R. D. W. B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies*. Springer.
- [Taubert, 2012] Taubert, P. (2012). Continuously-variable material properties in rewrap 3d printing. Master’s thesis, University of Bath - Department of mechanical engineering.
- [Wohlers, 2013] Wohlers, T. (2013). Additive manufacturing and 3d printing state of the industry. *Wohlers Associates, Fort Collins, CO*, 1(234), 256–278.
- [Wolf, 2011] Wolf, L. K. (2011). Personal manufacturing. Researchers take a step toward bringing three-dimensional printers to the masses by developing new materials compatible with the object-building technology.
- [Xu, 2012] Xu, K. (2012). Cubify 3d printer
<http://www.hardwarezone.com/2012/05/01/cubify-3d-printer-is-available-for-pre-order/>.

5.3. Esquema electrónico.

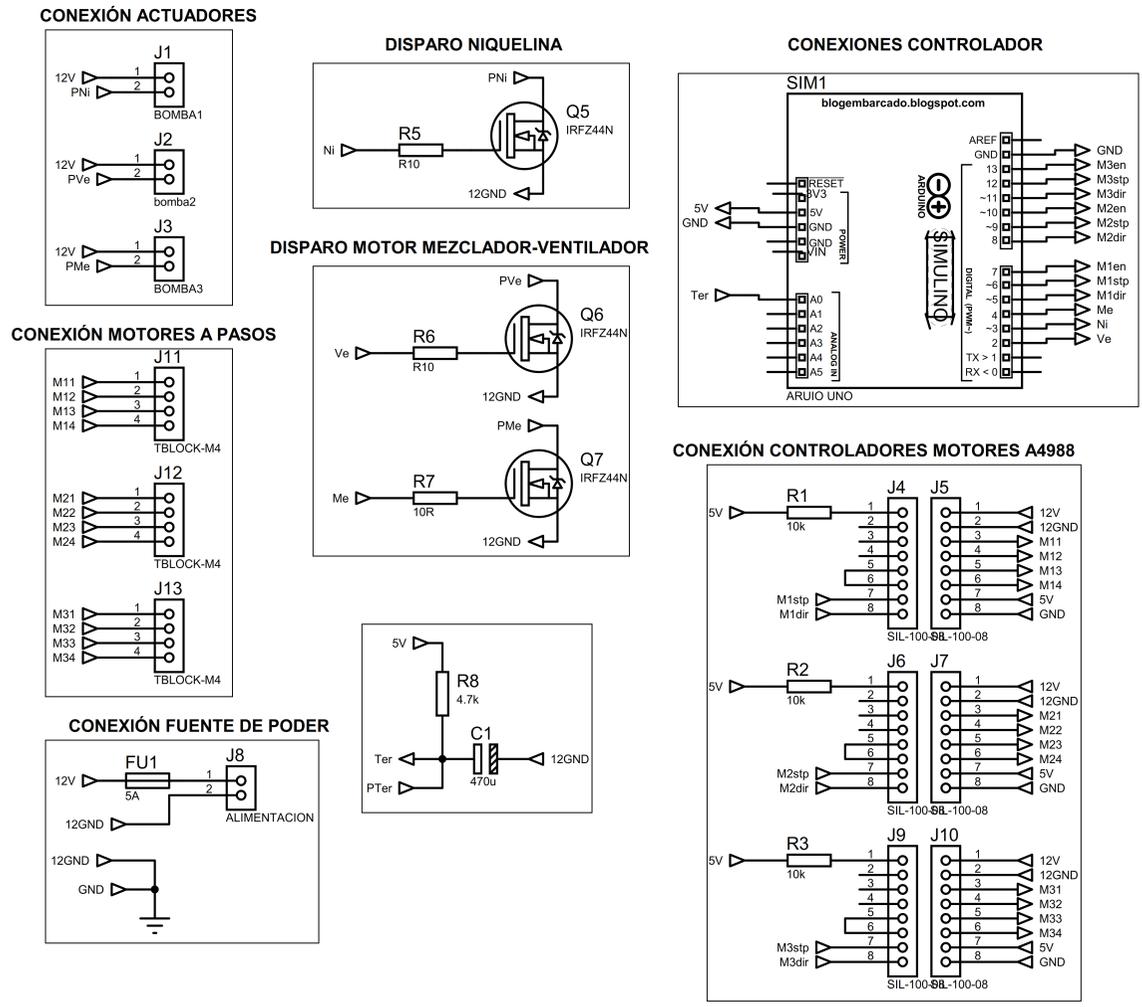


Figura 5.1: Esquema completo electrónico.