



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

**DISEÑO DE UN EXTRUSOR DE INYECCIÓN VARIABLE
PARA MANUFACTURA ADITIVA**

presentada por

Ing. Filiberto Cruz Flores

como requisito para la obtención del grado de

**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Mecánica**

Director de tesis

Dr. Andrés Blanco Ortega

Cuernavaca, Morelos, México. Agosto de 2020.



“2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria”

Cuernavaca, Mor., **16/julio/2020**

OFICIO No. DIM/142/2020

Asunto: Aceptación de documento de tesis
CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del Ing. Filiberto Cruz Flores con número de control M18CE054, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado “Diseño de un extrusor de inyección variable para manufactura aditiva” y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

Dr. Andrés Blanco Ortega
Director de tesis

Dr. Eladio Martínez Rayón
Revisor 1

Dra. Claudia Cortés García
Revisor 2

Dr. Wilberth Melchor Alcocer Rosado
Revisor 3

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.
Expediente / Estudiante
Iniciales ABO/mrsr



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Cuernavaca, Morelos **17/julio/2020**

OFICIO No. SAC/ 227/2020

Asunto: Autorización de impresión de tesis

FILIBERTO CRUZ FLORES
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
P R E S E N T E

Por este conducto tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado *"Diseño de un extrusor de inyección variable para manufactura aditiva"*, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
"Conocimiento y tecnología al servicio de México"

DR. GERARDO VICENTE GUERRERO RAMÍREZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



**CENTRO NACIONAL
DE INVESTIGACIÓN
Y DESARROLLO
TECNOLÓGICO
SUBDIRECCIÓN
ACADÉMICA**

C.c.p. M.E. Guadalupe Garrido Rivera. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Expediente
CVGR/CHG



DEDICATORIA

A mis padres, a mi madre la profesora Celia Flores Ibarra y a mi padre el profesor Filiberto Cruz Ramírez por brindarme su apoyo incondicional para lograr mis metas, a pesar de sus propias dificultades, por eso les dedico este logro más en mi formación académica.

A mis hermanas Yelitza Rubí y Azucena Trinidad Cruz Flores por brindarme su apoyo y nunca dejarme solo cuando más lo necesite, por ser un ejemplo de vida para mí y siempre sé que puedo contar con ustedes en momentos difíciles, así como ustedes siempre contarán conmigo, las quiero.

A mi abuela Evelia Flores Ibarra por cuidarme y darme el cariño que necesité de pequeño cuando tuve problemas de salud y estuve lejos de mis padres, gracias por ser parte de mi vida.

A mi familia, que han sido la base de mi formación, cada uno de ustedes ha aportado grandes cosas a mi vida, y me han ayudado a enfrentar las situaciones difíciles que la vida me presento.

A mi novia Samanta López Salazar que me apoyo hasta el último minuto en la elaboración esta tesis y por brindarme su cariño, paciencia, y sobre todo por entenderme y aceptarme como soy sin pedirme nada a cambio más que el cariño que le tengo.

A las personas que se fueron pero que siempre estarán conmigo para cuidarme.

Gracias.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Teología (CONACYT) y al Tecnológico Nacional de México (TecNM) por el apoyo económico brindado durante mis estudios de maestría.

A mis padres y hermanas por su apoyo incondicional.

A mi asesor el Dr. Andrés Blanco Ortega, por darme la oportunidad de ser su estudiante y por compartir sus conocimientos conmigo. Gracias por el apoyo brindado durante este tiempo en la dirección de este trabajo.

A mis revisores Dra. Claudia Cortez García, Dr. Wilberth Melchor Alcocer Rosado, Dr. Eladio Martínez Rayón, por sus comentarios y acertadas sugerencias en la revisión de este documento, fueron de gran ayuda para mejorar la calidad de este trabajo.

A mis amigos, Romeo E., Daniel S., Luis Ángel F., Adrián M., Edgarlo S., Daniel T., Sebastián A., Juan José P., Jazmín C., Rodrigo M., Daniel B., por brindarme su amistad y su cariño a lo largo de mis etapas de vida. Se que puedo contar con ustedes cuando lo necesite, gracias.

A mis compañeros de especialidad: Fernando S., Eliasín A., Abraham G., Ricardo P., Brandon, y a mis compañeros del área de sistemas térmicos, Samanta Ls., Sandra A., Andrea, Eduardo L., Mauricio A., David P., por su apoyo y sus consejos que siempre brindaron y por compartir buenos momentos dentro y fuera de la institución, gracias.

Departamento de ingeniería mecánica, personal docente, administrativo y de servicios, por el apoyo brindado en este tiempo.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por permitirme realizar mis estudios de maestría.

Gracias.

RESUMEN

En este trabajo de investigación se presentan el diseño, la construcción y las pruebas experimentales de un mecanismo de diámetro variable acoplado a una impresora 3D. Después de llevar a cabo una extensa búsqueda de los mecanismos con las características ideales para realizar un control de apertura de diámetro, se realizó un diseño basado en el mecanismo principal de un obturador, llamado mecanismo iris o de diafragma. El mecanismo está compuesto por tres partes principales: El plato base, las cuchillas y el rotor. Este último cumple la función de realizar un movimiento rotatorio, lo que provoca que su unión con las cuchillas lleve a cabo este movimiento, al mismo tiempo que éstas se desplazan sobre las ranuras del plato base, realizando un movimiento complejo de apertura radial.

Para comprobar el funcionamiento del mecanismo diseñado, se realizaron tres pruebas experimentales: La primera prueba se llevó a cabo con el objetivo de comprobar el acople de las tres piezas principales del mecanismo. La segunda prueba se enfocó únicamente en comprobar el correcto funcionamiento de las cuchillas (mecanismo de apertura radial). La tercera y última prueba se realizó con el objetivo de verificar el acople del mecanismo rediseñado a una impresora 3D, así como el correcto funcionamiento de ésta, prestando especial atención al control de temperatura, e inspeccionar si durante la prueba había fugas de material fundido.

El diseño y construcción del mecanismo de diámetro variable realizado en este proyecto tuvo el objetivo de reducir el tiempo de trabajo que toma cambiar las boquillas de una impresora 3D, las cuales tienen que montarse y desmontarse de acuerdo con las necesidades del usuario y la pieza. Los resultados mostraron que la implementación del mecanismo de control de apertura ayuda a reducir el tiempo de trabajo, debido a que cumple la función de modificar su diámetro sin necesidad de interrumpir el proceso de impresión, lo cual se requiere al utilizar diferentes boquillas, de acuerdo con las pruebas realizadas el tiempo de trabajo se reduce más del 100%. Debido a que, con el diseño del mecanismo propuesto, no es necesario considerar el tiempo que tomaba desmontar y montar diferentes boquillas, encender la impresora y esperar a que este alcance su temperatura ideal de impresión, puesto que este proceso repetitivo es eliminado durante el proceso de impresión debido a la implementación del mecanismo de diámetro variable, únicamente reajustando el diámetro del mecanismo de

forma manual mediante un ajustador o de forma automática con un motor en el sistema de transmisión del mecanismo propuesto y continuando con el proceso de impresión normal.

ABSTRACT

In this research work, the design, construction and experimental testing of a mechanism with variable diameter coupled to a 3D printer are presented. After conducting an extensive search for mechanisms with the ideal characteristics to perform a diameter opening control, a design was made based on the main mechanism of a shutter, called the iris or diaphragm mechanism. The mechanism is made up of three main parts: The base plate, the blades and the rotor. The latter fulfills the function of making a rotary movement, which causes its union with the blades to carry out this movement, at the same time as these move over the grooves of the base plate, making a complex radial opening movement.

To check the operation of the designed mechanism, three experimental tests were carried out. The first test was carried out to check the coupling of the three main parts of the mechanism. The second test focused just on verifying the correct operation of the blades (radial opening mechanism). The third and last test was carried out to verify the coupling of the redesigned mechanism to a 3D printer, as well as its correct operation, paying special attention to temperature control, and to inspect whether during the test there were leaks of molten material.

The design and construction of the variable diameter mechanism carried out in this project had the objective of reducing the working time used to change the nozzles of a 3D printer which have to be assembled and disassembled according to the needs of the user and the piece. The results showed that the implementation of the opening control mechanism helps to reduce working time, since it fulfills the function of modifying its diameter without the need to interrupt the printing process, which is necessary when using different nozzles, according with the tests carried out, the working time is reduced more than 100%. Because, with the proposed mechanism design, it is not necessary to consider the time it took to disassemble and assemble different nozzles, turn on the printer, and wait for it to reach its ideal printing temperature, since this repetitive process is eliminated during the process. Printing due to the implementation of the variable diameter mechanism, only readjusting the diameter of the mechanism manually by means of an adjuster or automatically with a motor in the transmission system of the proposed mechanism and continuing with the normal printing process.

TABLA DE CONTENIDO

Tabla de contenido.....	i
Lista de figuras.....	v
Lista de tablas.....	xi
Nomenclatura.....	xii
Capítulo 1.....	1
1 Introducción.....	2
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Objetivos generales.....	4
1.3 Objetivos específicos.....	4
1.4 Justificación.....	4
1.5 Alcances y limitaciones.....	5
Capítulo 2.....	6
2 Estado del arte.....	7
2.1 Modelado por deposición fundida.....	12
2.2 Conclusión del estado del arte.....	21
Capítulo 3.....	23
3 Marco teórico.....	24
3.1 Principales características de la impresora 3D.....	25
3.2 Componentes principales de la impresora 3D.....	27
3.3 Descripción de los componentes importantes de una impresora 3D.....	28
3.3.1 Mecanismo de extrusión.....	28
3.3.2 Velocidad de extrusión.....	28
3.3.3 Extrusor.....	28
3.3.4 Hotend.....	28
3.3.5 Bloque calentador.....	29
3.3.6 Resistencia.....	29
3.3.7 Boquilla.....	29
3.3.8 Cama magnética de la impresora.....	29
3.4 Componentes mecánicos principales de la impresora 3D.....	30
3.4.1 Soporte-guía y componentes del sistema de extrusión en la impresora 3D.....	30

3.4.2	Extrusor MK-10	30
3.5	Descripción de las partes del extrusor	31
3.6	Métodos de transformación de plásticos.....	33
3.6.1	Extrusión de polímeros	34
3.6.2	Polímero	34
3.6.3	Viscosidad y características reológicas de un polímero	35
3.7	Polímeros más utilizados en el moldeado por extrusión.....	35
3.7.1	Ácido poliláctico (PLA).....	35
3.7.2	Principales usos del PLA.....	36
3.7.3	Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).....	37
3.8	Comparación de materiales para el modelado por extrusión.....	38
3.9	Conclusión del capítulo 3	41
Capítulo 4	42
4	Modelado del sistema de extrusión	43
4.1	Consideraciones.....	43
4.2	Componentes del sistema de extrusor.....	44
4.2.1	Zona caliente.....	47
4.2.2	Modelo matemático de control de temperatura	54
4.3	Zona fría	55
4.3.1	Modelo matemático para control de velocidad de inyección	56
4.4	Parámetros de velocidad y temperatura del material conforme al diámetro.....	59
4.5	Conclusión del capítulo 4	60
Capítulo 5	61
5	Diseño del sistema de extrusión.....	62
5.1	Análisis del sistema de variación radial.....	63
5.2	Metodología de solución.....	71
5.2.1	Reestructuración de las piezas para un nuevo tipo de mecanismo	71
5.2.2	Especificaciones generales del sistema	75
5.2.3	Adaptaciones de las piezas de prueba virtual y experimental.....	76
5.3	Prototipo experimental 1.....	79
5.3.1	Adaptación del sistema de transmisión para la Prueba Experimental 1.....	81
5.4	Prueba Experimental 2.....	82

5.4.1	Modificaciones en el mecanismo de variación diametral	82
5.4.2	Adaptación del sistema de transmisión para la Prueba Experimental 2.....	85
5.5	Prototipo experimental 2.....	86
5.6	Prototipo experimental 3.....	90
5.6.1	Prototipo final	90
5.6.2	Plato base de la Prueba Experimental 3.....	91
5.6.3	Cuchillas de la Prueba Experimental 3	93
5.6.4	Rotor de la Prueba Experimental 3	94
5.6.5	Tubo guía de la Prueba Experimental 3	95
5.6.6	Tapa de la Prueba Experimental 3.....	95
5.6.7	Adaptación del sistema de transmisión para la Prueba Experimental 2.....	97
5.7	Conclusiones del capítulo 5.....	100
Capítulo 6	101
6	Resultados de simulación	102
6.1	Piezas CAD y piezas físicas.	102
6.2	Propiedades mecánicas de las piezas del sistema	103
6.3	Ensamble general y funcionamiento del mecanismo	104
6.3.1	Componentes del ensamble general	104
6.3.2	Funcionamiento del mecanismo.....	105
6.4	Ajuste en el <i>HOME</i> de la impresora 3D.....	107
6.5	Marco de referencia.....	111
6.5.1	Articulaciones de capas de impresión con respecto al diámetro de la boquilla 112	
6.6	Análisis térmico del mecanismo de diámetro variable y de la boquilla estándar	113
6.6.1	Modelo matemático para medir el tiempo en el que el mecanismo alcanza la temperatura deseada.....	114
6.6.2	Resultados de simulación térmica.....	116
6.7	Pruebas de impresión con diferentes diámetros de boquilla.	118
6.7.1	Tiempos de producción de cada diámetro de boquilla	118
6.7.2	Volumen impresión en un tiempo de producción por cada diámetro de boquilla 119	
6.8	Prueba experimental.....	120
6.9	Pruebas de impresión.....	122

6.10	Conclusión del capítulo 6	124
	Capítulo 7	125
7	Conclusiones y recomendaciones	126
7.1	Conclusiones.....	126
7.2	Recomendaciones.....	128
	Referencias bibliográficas	130
	Referencias	131
	Citas de figuras.....	133
	Anexos.....	134
	Asignación de número de serie	135
	Electrónica y programación de prueba	137
	MicroServo 9 g (SG90).....	137
	Conexión con la tarjeta Arduino	138
	Conexión con la tarjeta Arduino	139
	Planos	141

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. CAPAS DE MATERIAL DE UN OBJETO GENERADO POR UN SISTEMA DE EXTRUSIÓN DE UNA IMPRESORA 3D.....	7
FIGURA 2. ELEMENTOS IMPORTANTES DE UNA EXTRUSORA INDUSTRIAL (FUENTE: MARIANO, 2011).	8
FIGURA 3. ESQUEMA DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM).	9
FIGURA 4. RIÑÓN CREADO POR EL DR. ANTHONY ATALA EN LOS LABORATORIOS DE LA UNIVERSIDAD DE WAKE FOREST (FUENTE: BBC MUNDO, 2016).	10
FIGURA 5. REPRAP LA PRIMERA IMPRESORA EN SER REPLICABLE EN SU TOTALIDAD POR UNA IMPRESORA MADRE	11
FIGURA 6. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO EN EL SINTERIZADO SELECTIVO POR LÁSER (SLS)	12
FIGURA 7. CONFIGURACIONES Y DIFERENCIAS ENTRE EXTRUSIÓN BOWDEN Y EXTRUSIÓN DIRECTA QUE PUEDE TENER UNA IMPRESORA 3D (FUENTE: LORENZO, 2020).	13
FIGURA 8. IMPRESORA 3D CON DOBLE EXTRUSOR EN LA CONFIGURACIÓN UNIDA LA CUAL PERMITE CREAR UNA SOLA PIEZA EN DOS COLORES DISTINTOS (FUENTE: LUCÍA C., 2013].	15
FIGURA 9. CLASIFICACIÓN DE PROCESO MA BASADA EN ISO/ASTM 529000:2015 (FUENTE: LEE <i>ET AL.</i> , 2017).	17
FIGURA 10. IMPRESIÓN BIOMIMÉTICA 4D (FUENTE: LEE <i>ET AL.</i> , 2017).	18
FIGURA 11. CAMPO DE PRESIÓN (EN PA) DEBAJO DEL CABEZAL DE LA IMPRESORA TOMADO A UNA DISTANCIA DEL SUSTRATO IGUAL A $e / 2$ CUANDO $U / V = 1/2$ ($U = 16 \text{ mm} / \text{s}$; $V = 32 \text{ mm} / \text{s}$) (FUENTE: AGASSANT <i>ET AL.</i> , 2019).	18
FIGURA 12. UN DIAGRAMA DEL MODELO DE COMPUTADORA DE ENSAMBLAJE EXPLOTADO CON UN RECUADRO QUE INCLUYE UNA VISTA TRANSVERSAL DEL STHE (A) Y UNA FOTOGRAFÍA DE LA VERSIÓN FINAL ENSAMBLADA DEL CABEZAL DE LA IMPRESORA PME (B) (FUENTE: BOYLE <i>ET AL.</i> , 2019).	19
FIGURA 13. REPRESENTACIONES TRIDIMENSIONALES DE MAPAS DE SUPERFICIE GENERADOS POR EL PERFILÓMETRO PARA PIEZAS IMPRESAS CON FFF FUERA DE PLA (A), HIPS (B) Y ABS (C.), ASÍ COMO, PARA PIEZAS IMPRESAS DE PME FUERA DE PLA (D), HIPS (E.) Y ABS (F.) EL ROJO INDICA UN PICO (+) POR ENCIMA DEL PUNTO 0 DESIGNADO (VERDE), MIENTRAS QUE EL AZUL INDICA UN VALLE (-) POR DEBAJO DEL PUNTO 0 DESIGNADO. EL RANGO DE MEDICIÓN ES DE ± 500 MICRAS ALREDEDOR DEL PUNTO 0 (FUENTE: BOYLE <i>ET AL.</i> , 2019).	19
FIGURA 14. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DEL FLUJO DEL MOLDE DE LA RANURA GUÍA, DIAGRAMA DE: (A) DISTRIBUCIÓN DE VELOCIDAD; (B) DISTRIBUCIÓN DE PRESIÓN Y (C) DISTRIBUCIÓN TURBULENTO (FUENTE: SHAHRUBUDIN <i>ET AL.</i> , 2019).	20
FIGURA 15. SISTEMA DE EXTRUSIÓN DE UNA IMPRESORA 3D.	24
FIGURA 16. PRINCIPALES COMPONTE QUE CONFORMAN A UNA IMPRESORA 3D.....	27
FIGURA 17. EJE X CONFORMADO POR EL EXTRUSOR Y SU RESPECTIVO CARRETE.....	30

FIGURA 18. COMPONENTES DEL EXTRUSOR MK-10.	31
FIGURA 19. EXTRUSOR UTILIZADO EN LA IMPRESORA 3D DE CONFIGURACIÓN BOWDEN CON UNA GUÍA DE TEFLÓN, UNIENDO EL INYECTOR A LA PARTE DE TRATAMIENTO TÉRMICO. MODELO DEL EXTRUSOR: MK10.	31
FIGURA 20. FILAMENTO DE UN MATERIAL PLÁSTICO.	34
FIGURA 21. IMPRESORA 3D.	41
FIGURA 22. CONFIGURACIONES Y DIFERENCIAS ENTRE EXTRUSIÓN BOWDEN Y EXTRUSIÓN DIRECTA QUE PUEDE TENER UNA IMPRESORA 3D (FUENTE: LORENZO, 2020).	43
FIGURA 23. EXTRUSOR UTILIZADO EN LA IMPRESORA 3D DE CONFIGURACIÓN BOWDEN CON UNA GUÍA DE TEFLÓN, UNIENDO EL INYECTOR A LA PARTE DE TRATAMIENTO TÉRMICO. MODELO DEL EXTRUSOR: MK10.	44
FIGURA 24. DESCRIPCIÓN DE PARTES DEL EXTRUSOR Y EL <i>HOTEND</i>	45
FIGURA 25. ZONAS EL EXTRUSOR Y LOS COMPONENTES PRINCIPALES EN CADA ZONA.	46
FIGURA 26. REDUCCIÓN DEL TAMAÑO DE MANERA VIRTUAL DEL VENTILADOR DE 12 VOLTS, PARA MEJORAR LA CALIDAD Y VISIBILIDAD DE LAS FIGURAS FUTURAS.	47
FIGURA 27. DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES DEL <i>HOTEND</i>	47
FIGURA 28. ZONAS EN EL QUE SE DIVIDE EL CONJUNTO DE PARTES DEL <i>HOTEND</i> DE UNA IMPRESORA 3D.	48
FIGURA 29. MODELO FÍSICO DEL <i>HOTEND</i>	49
FIGURA 30. SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA ZONA FRÍA DEL <i>HOTEND</i> , LA CUAL CONSIDERA LAS PÉRDIDAS CONVECTIVAS EN LAS ALETAS.	51
FIGURA 31. SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA ZONA CALIENTE DEL <i>HOTEND</i> , LA CUAL CONSIDERA EL FLUJO DE CALOR INDUCIDO POR UNA RESISTENCIA CERÁMICA CON UN REGRESO DE INFORMACIÓN MEDIANTE UN SENSOR DE TEMPERATURA.	52
FIGURA 32. SISTEMA DE TRATAMIENTO TÉRMICO EN EL <i>HOTEND</i>	53
FIGURA 33. SISTEMA DE INYECCIÓN DEL EXTRUSOR.	55
FIGURA 34. DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES DEL EXTRUSOR.	56
FIGURA 35. SISTEMA DEL CONTROL DE VELOCIDAD DE INYECCIÓN EN EL EXTRUSOR.	57
FIGURA 36. ROLLO DE FILAMENTO PARA IMPRESORA 3D.	58
FIGURA 37. DIÁMETROS ESTÁNDARES DE BOQUILLAS.	62
FIGURA 38. COMPORTAMIENTO DE DILATACIÓN Y CONTRACCIÓN DE LA PUPILA DEL OJO.	63
FIGURA 39. REPRESENTACIÓN DEL MOVIMIENTO DE LA PUPILA A UN PLANO DIGITAL.	64
FIGURA 40. OBTURADOR CENTRAL GENÉRICO DE UNA CÁMARA FOTOGRÁFICA PROFESIONAL.	64
FIGURA 41. VISUALIZACIÓN DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES EN EL MECANISMO DE APERTURA RADIAL DENTRO DE UN OBTURADOR DE CÁMARA FOTOGRÁFICA (FUENTE: NIKKON (2020)).	65
FIGURA 42. PIEZAS PRINCIPALES REALIZADAS EN UN AMBIENTE DE DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA.	66
FIGURA 43. DESARME DEL OBTURADOR DE MANERA EXPERIMENTAL.	67
FIGURA 44. PARTES QUE CONFORMAN EL MECANISMO DE MOVIMIENTO RADIAL.	67

FIGURA 45. FUNCIONAMIENTO DEL MECANISMO.	68
FIGURA 46. MOVIMIENTO NATURAL DE LAS CUCHILLAS UNIDAS A LA PIEZA PLATO BASE.	68
FIGURA 47. MOVIMIENTO NATURAL DE LAS CUCHILLAS UNIDAS A LA PIEZA PLATO BASE.	69
FIGURA 48. CONFIGURACIÓN DE LAS CUCHILLAS EN SU SISTEMA DE MOVIMIENTO.	70
FIGURA 49. INTERCALACIÓN DE LAS CUCHILLAS EN EL SISTEMA DE VARIACIÓN RADIAL.	70
FIGURA 50. LA REALIZACIÓN DEL REDISEÑO POR PARTE DE LA PIEZA “CUCHILLA”.....	71
FIGURA 51. NUEVO SISTEMA DE MOVIMIENTO POR PARTE DE LAS CUCHILLAS.	72
FIGURA 52. DISEÑO DE LA NUEVA PIEZA “CUCHILLA” Y SU MOVILIDAD EN EL MECANISMO.....	72
FIGURA 53. MOVIMIENTO TRASLACIONAL DE LAS CUCHILLAS.	72
FIGURA 54. CONFIGURACIÓN DE LA NUEVA RANURA EN LA PIEZA “PLATO BASE”.....	73
FIGURA 55. MOVIMIENTO TRASLACIONAL QUE REALIZA LA PIEZA CUCHILLA ENCIMA DE LA PIEZA PLATO BASE, LA CUAL REALIZA UN MOVIMIENTO LIMPIO Y LIGERO.....	73
FIGURA 56. ADAPTACIÓN DE LA PIEZA ROTOR CONFORME A LA NUEVA CONFIGURACIÓN DEL MECANISMO DE VARIACIÓN DE DIÁMETRO.	74
FIGURA 57. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA	75
FIGURA 58. PRIMERA CORRECCIÓN (CUCHILLA).	76
FIGURA 59. ACOUPLE CON EL SIGUIENTE NIVEL DE PIEZAS (CUCHILLA Y CARA SUPERIOR).	76
FIGURA 60. ACOUPLE CON EL SIGUIENTE NIVEL DE PIEZAS (CARA INFERIOR Y CUCHILLAS).....	77
FIGURA 61. ESTILOS DE VISUALIZACIÓN DEL MECANISMO IRIS.....	78
FIGURA 62. PERFILES PARA PRUEBA EXPERIMENTAL 1, MOTOR A PASOS, BASE Y ENGRANAJE DE 25 DIENTES.....	79
FIGURA 63. PERFILES PARA PRUEBA EXPERIMENTAL 1, PLATO BASE, CUCHILLAS Y ROTOR.....	79
FIGURA 64. CONFIGURACIÓN Y ENSAMBLE PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRIMERAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	80
FIGURA 65. VISTA SUPERIOR DEL MECANISMO Y VISTA LATERAL DEL MECANISMO DE PRUEBA 1.....	80
FIGURA 66. VISTA ISOMÉTRICA DEL MECANISMO DE PRUEBA 1.	80
FIGURA 67. RELACIÓN DE TRASMISIÓN DE ENGRANAJES.	81
FIGURA 68. NUEVA MODIFICACIÓN EN EL PLATO BASE.....	82
FIGURA 69. INCREMENTO DEL ÁNGULO DE ATAQUE EN LA CUCHILLA.	83
FIGURA 70. NUEVA MODIFICACIÓN EN LAS CUCHILLAS.....	83
FIGURA 71. NUEVA MODIFICACIÓN EN EL ROTOR.....	84
FIGURA 72. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA	84
FIGURA 73. TRASFORMACIÓN DEL MOVIMIENTO DEL MECANISMO	85
FIGURA 74. PROTOTIPO 2, PRUEBA EXPERIMENTAL 2, VERIFICACIÓN DE LA APERTURA Y CONTRACCIÓN DE LAS CUCHILLAS.	86
FIGURA 75. REESTRUCTURACIÓN DE LAS PIEZAS PRINCIPALES PARA LA PRUEBA EXPERIMENTAL 2..	86
FIGURA 77. ANILLO.	87
FIGURA 78. ENSAMBLE EL PROTOTIPO EN MADERA.....	88
FIGURA 79. APERTURA DEL MECANISMO.	89
FIGURA 80. VARIACIÓN DE DIÁMETRO CORRECTA.....	89

FIGURA 81. MOVIMIENTO DEL MECANISMO DE TRANSMISIÓN BIELA-MANIVELA.	90
FIGURA 82. TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO MEDIANTE UN PIÑÓN Y UNA CREMALLERA.....	90
FIGURA 83. PLATO BASE REDISEÑADO PARA EL PROTOTIPO FINAL.....	91
FIGURA 84. BASE CON LA ADAPTACIÓN REQUERIDA PARA QUE LA CUCHILLA NO GENERE UN TRABAMIENTO ENTRE ELLAS.....	91
FIGURA 85. CONTACTO ENTRE AMBAS PIEZAS GENERAN FRICCIÓN Y POR CONSECUENCIA SE GENERA UN TRABAMIENTO Y NO PERMITE UN GIRO ESTABLE.	92
FIGURA 86. RODAMIENTO DE BOLA DE DIMENSIONES 45,75,10 (MM).....	92
FIGURA 87. REDISEÑO EN LA PIEZA 2 A LA CUAL SE LE COLOCÓ UN RODAMIENTO PARA ELIMINAR EL ROZAMIENTO EN EL ROTOR.	93
FIGURA 88. PIEZA PLATO BASE Y LA PIEZA TAPA ENSAMBLADAS Y REDISEÑADAS EN SU FUNCIÓN.....	93
FIGURA 89. SE REALIZÓ UN REDISEÑO CON LA MODIFICACIÓN DE TRASPORTAR UN MATERIAL TÉRMICAMENTE TRATADO DE TAL MANERA TENGA UN MENOR RIESGO EN CUANTO AL DESBORDE DE MATERIAL.	93
FIGURA 90. COLOCACIÓN DE LA PIEZA 2 EN LA PIEZA 1 EN FORMA DE DESPLAZAMIENTO SIN JUEGO.	94
FIGURA 91. REDISEÑO DE LA PIEZA “ROTOR”, LA CUAL CUENTA CON UN CUADRADO EL CUAL PERMITE QUE UN ENGRANAJE SE UNA A ELLA PARA ACCIONAR A LAS CUCHILLAS.3	94
FIGURA 92. PRESENTACIÓN DEL ENSAMBLE ENTRE EL ROTOR Y LAS CUCHILLAS, ASÍ COMO LA COLOCACIÓN DEL ENGRANAJE DE 25 DIENTES CON SUS RESPECTIVOS TORNILLOS PRISIONEROS.....	95
FIGURA 93. REPRESENTACIÓN DEL TUBO GUÍA, EL CUAL GUIARÁ EL MATERIAL PROVENIENTE DEL BLOQUE CALENTADOR HACIA LAS CUCHILLAS.....	95
FIGURA 94. REDISEÑO DE LA PIEZA TAPA, LA CUAL CUENTA CON UNA PERFORACIÓN QUE PERMITE QUE LA PIEZA TUBO GUÍA Y LA PIEZA PLATO BASE SE UNAN A ELLA.	96
FIGURA 95. LA PIEZA TAPA SOSTENDRÁ LA TRANSMISIÓN POR CREMALLERA LA CUAL ACCIONARÁ EL PIÑÓN DE 25 DIENTES.	96
FIGURA 96. ENSAMBLE FINAL JUNTO CON EL ENSAMBLE EN EL <i>HOTEND</i>	96
FIGURA 97. CONJUNTO DE PIEZAS PARA EL ACCIONAMIENTO DE LA PIEZA ROTOR Y SUS TRES MOVIMIENTOS, 1 : CREMALLERA (MOVIMIENTO LINEAL), 2 : PIÑÓN UNIDO A LA PIEZA ROTOR DEL SISTEMA (MOVIMIENTO ANGULAR), 3 : EL ROTOR DEL MECANISMO TOMANDO EL MISMO MOVIMIENTO ANGULAR QUE LE OTORGA EL PIÑÓN.....	97
FIGURA 98. ACCIONAMIENTO DEL ROTOR, EL CUAL TOMARÁ UNA POSICIÓN ANGULAR CON RESPECTO A UN PUNTO DE REFERENCIA, Y OTORGANDO A LAS CUCHILLAS UNA POSICIÓN ESPECÍFICA PARA QUE SUS PUNTAS FORMEN UN SEMICÍRCULO Y DEN COMO RESULTADO APERTURAS DESEADAS.....	97
FIGURA 99. DIÁMETROS OBTENIDOS MEDIANTE LA POSICIÓN DEL ROTOR.....	98
FIGURA 100. OBTENCIÓN DE LOS GRADOS NECESARIOS PARA OBTENER CADA UNO DE LOS 11 DIÁMETROS CON LOS QUE SE DESEA TRABAJAR EN EL MECANISMO DE DIÁMETRO VARIABLE.	98

FIGURA 101. EN LA GRÁFICA SE PUEDE OBSERVAR EL INCREMENTO DESEADO EN LA APERTURA DEL SISTEMA CONFORME SE LE APLICA UN INCREMENTO ANGULAR.	99
FIGURA 102. PIEZAS CAD PARA EL PROTOTIPO FINAL.	102
FIGURA 103. PIEZAS MAQUINADAS PARA EL PROTOTIPO FINAL.	102
FIGURA 104. CORTE TRANSVERSAL DEL ENSAMBLE GENERAL DEL MECANISMO DE DIÁMETRO VARIABLE.	104
FIGURA 105. COMPONENTES QUE CONFORMAN AL ENSAMBLE GENERAL DEL MECANISMO DE DIÁMETRO VARIABLE.....	104
FIGURA 106. ENTRADA Y SALIDA DEL FILAMENTO A DIÁMETROS DESEADOS.	105
FIGURA 107. APERTURA DE DIÁMETRO EN EL MECANISMO.	106
FIGURA 108. COMPARATIVA DE APERTURA ENTRE EL MECANISMO DIGITAL Y FÍSICO.	106
FIGURA 109. SENSOR DE POSICIONAMIENTO EN EL EJE Z.	107
FIGURA 110. REPOSICIONAMIENTO DEL SENSOR EN EL EJE Z.....	108
FIGURA 111. DIFERENCIA DE GROSOR Y LA ALTURA EN EL MECANISMO A COMPARACIÓN DE LA BOQUILLA.	108
FIGURA 112. REAJUSTE DEL <i>HOME</i> PARA EL NUEVO MECANISMO.....	109
FIGURA 113. COLOCACIÓN DEL MECANISMO DE DIÁMETRO VARIABLE EN EL <i>HOTEND</i> MEDIANTE LOS ESTÁNDARES DE ROSCA YA ESTABLECIDOS EN EL BLOQUE CALENTADOR.	109
FIGURA 114. COLOCACIÓN GENERAL DEL MECANISMO DE DIÁMETRO VARIABLE EN EL <i>HOTEND</i> DE LA IMPRESORA 3D SIN PRESENTAR COMPLICACIONES EN SU COLOCACIÓN.	110
FIGURA 115. COLOCACIÓN DEL <i>HOME</i> EN LA IMPRESORA CON EL MECANISMO DE DIÁMETRO VARIABLE.	110
FIGURA 116. ANÁLISIS TÉRMICOS EN EL MECANISMO DE DIÁMETRO VARIABLE Y EN LA BOQUILLA ESTÁNDAR, LAS CUALES MARCAN LA PAUTA DE TIEMPO EN QUE LLEGAN A LAS TEMPERATURAS IDEALES PARA LA FUSIÓN DEL FILAMENTO DENTRO DE ELLOS.....	113
FIGURA 117. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE VARIACIÓN DE DIÁMETRO, DEPENDIENTE DE LA POTENCIA CALORÍFICA (WATTS) DESDE LA RESISTENCIA TÉRMICA A TRAVÉS DE UN BOQUE CALENTADOR REALIZANDO CONDUCCIÓN Y CONVECCIÓN EN EL MECANISMO DE DIÁMETRO VARIABLE CON UN COEFICIENTE DE CONVECCIÓN DE 6.8 Y UNA TEMPERATURA AMBIENTE DE 25°C.	114
FIGURA 118. CUBO DE 10 MM ³	118
FIGURA 119. RETIRO DEL MECANISMO DE DIÁMETRO VARIABLE DEL <i>HOTEND</i> DE LA IMPRESORA 3D.	120
FIGURA 120. VISUALIZACIÓN DE ERRORES EN EL MECANISMO POR DESBORDAMIENTO DE FILAMENTO EN LA TAPA.....	120
FIGURA 121. VISUALIZACIÓN DE ERRORES EN EL MECANISMO POR DESBORDAMIENTO DE FILAMENTO EN EL TUBO GUÍA.	121
FIGURA 122. VISUALIZACIÓN DEL MECANISMO POR DESBORDAMIENTO DE FILAMENTO EN EL PLATO BASE.....	121

FIGURA 123. DIÁMETRO DE EXTRUSIÓN DEL FILAMENTO DADO POR EL MECANISMO DE DIÁMETRO VARIABLE.....	122
FIGURA 124. IMPRESIÓN DE CUBO CON MATERIAL ABS Y CON DIÁMETROS DE BOQUILLA DIFERENTE.	122
FIGURA 125. MEDIDOR DE LÁMINA PARA AGUJEROS.	123
FIGURA 126. MECANISMO GENERAL.....	123
FIGURA 127. SERVO MOTOR.....	137
FIGURA 128. CABLEADO DEL SERVO MOTOR. CABLEADO DE UN SERVO MOTOR (ESQUEMA ELÉCTRICO).....	138
FIGURA 129. PROGRAMA Y VERIFICACIÓN DE LOS GRADOS QUE PUEDE TOMAR UN SERVO MOTOR SG90.	138
FIGURA 130. PRUEBA FÍSICA DE BARRIDO #1. STEP MOTOR - 28BYJ-48	138
FIGURA 131. STEP MOTOR-28BYJ-48.....	139
FIGURA 132. CABLEADO DEL STEP MOTOR. CABLEADO DE UN STEP MOTOR ESQUEMA ELÉCTRICO.	139
FIGURA 133. PROGRAMA Y VERIFICACIÓN DE LOS GRADOS QUE PUEDE TOMAR UN SERVO MOTOR SG90.	140
FIGURA 134. PRUEBA FÍSICA DE BARRIDO #2.....	140

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE EXTRUSIÓN DE UNA IMPRESORA 3D.	24
TABLA 2. ESPECIFICACIONES DE LA IMPRESORA 3D.	26
TABLA 3. DIMENSIONES Y PESO DE LA IMPRESORA 3D.	26
TABLA 4. COMPONENTES PRINCIPALES DE UNA IMPRESORA 3D.	27
TABLA 5. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DE UN EXTRUSOR “MK”.	31
TABLA 6. ASPECTOS POSITIVOS Y NEGATIVOS QUE SE PRESENTAN EN LA IMPRESORA 3D.	32
TABLA 7. PROPIEDADES DEL PLA PARA EL MOLDEADO POR EXTRUSIÓN.	36
TABLA 8. PROPIEDADES DEL ABS PARA EL MODELADO POR EXTRUSIÓN.	37
TABLA 9. COMPARACIÓN DE MATERIALES PARA EL MODELADO POR EXTRUSIÓN.	38
TABLA 10. COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.	40
TABLA 11. TABLA DE CONSTANTES MECÁNICAS.	59
TABLA 12. PARÁMETROS DE VELOCIDAD Y TEMPERATURA DEL MATERIAL PLA CONFORME AL DIÁMETRO.	59
TABLA 13. PARÁMETROS DE VELOCIDAD Y TEMPERATURA DEL MATERIAL ABS CONFORME AL DIÁMETRO.	59
TABLA 14. COMPONENTES DEL SISTEMA DE DIÁMETRO VARIABLE.	75
TABLA 15. COMPONENTES DEL SISTEMA DE DIÁMETRO VARIABLE.	85
TABLA 16. TABLA DE VALORES DEL DIÁMETRO CON RESPECTO AL ÁNGULO DESEADO	99
TABLA 17. COMPONENTES DEL ENSAMBLE GENERAL.	104
TABLA 18. COMPARATIVA DE LAS CAPAS DE IMPRESIÓN DE MATERIAL CONFORME A UN DIÁMETRO DE BOQUILLA.	112
TABLA 19. RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE CALENTAMIENTO DEL MECANISMO PARA EL MATERIAL PLA.	116
TABLA 20. RESULTADOS DE SIMULACIÓN DE CALENTAMIENTO DEL MECANISMO PARA EL MATERIAL ABS.	117
TABLA 21. TIEMPOS DE FABRICACIÓN DE CUBOS DE 10 MM ³ , POR DIÁMETRO.	118
TABLA 22. VOLUMEN DE IMPRESIÓN DE DISTINTOS DIÁMETROS DE BOQUILLAS EN UN TIEMPO DE PRODUCCIÓN ESTABLECIDO.	119

NOMENCLATURA

Símbolo		Unidades
V	Velocidad de inyección	mm
Q*	Caudal	m ³ /s
\dot{m}	Flujo masico	kg/s
C _p	Calor específico	J/kgK
A _b	Área de la boquilla	m ²
K	Conductividad térmica	W/mK
Δh	Diferencia de entalpía	Joules
e	Espesor del aislamiento	m
T _d	Temperatura deseada	°K
T _a	Temperatura del medio ambiente	°K
A	Área del recubrimiento del aislante	°C
\dot{Q}	Pérdidas de energía en la tubería	Watts
Q	Transferencia de calor requerida	W/m ²
t	Tiempo requerido para fundir el material	s
ΔT	Diferencial de temperatura ($T_{\text{fusión}} - T_{\text{ambiente}}$)	°K
P	Potencia calorífica	Watts
T _c	Tiempo para calentar el mecanismo	s
Símbolos griegos		
ρ	Densidad del material	Kg/m ³
∅	Diámetro	mm
θ	Ángulo	(°) grados
Abreviatura técnica		
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno	S/N
AC	Corriente alterna	S/N
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales	S/N
CNC	Control numérico	S/N
DC	Corriente directa	S/N
FDM	Modelado por deposición fundida	S/N
GRAS	Generalmente reconocido como seguro	S/N
MA	Manufactura aditiva	S/N
PLA	Ácido poliláctico	S/N
PPSF	<i>Polyphenylsulfone</i>	S/N
PTFE	Politetrafluoroetileno	S/N
SLS	Sinterización selectiva por láser	S/N
TCAC	Tasa de crecimiento anual compuesto	S/N
TPU	Poliuretano termoplástico	S/N
UL	Certificación emitida por <i>Underwriters Lab.</i>	S/N

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se realiza el planteamiento del proyecto de investigación, objetivos y consideración que se tomara en el trabajo de tesis.

1 Introducción

Hasta la llegada de la impresión 3D existían diversas formas para obtener un objeto, siendo la sustracción, flexión, fundición o amoldamiento las técnicas más comunes para la fabricación de objetos. Estas eran técnicas efectivas, aunque costosas y generadoras de residuos excesivos. Actualmente, la tecnología 3D es una de las más usadas, ya que es una herramienta revolucionaria a la hora de moldear los materiales. Permiten la realización de objetos sólidos mediante la impresión de finas capas de material, reduciendo notablemente los costos y los residuos excesivos, además de hacer real aquello que se genera en la imaginación en poco tiempo. Después de varios años de investigación, aún queda un amplio margen de mejora, en las empresas empiezan a interesarse por invertir en esta tecnología que revoluciona los mercados comenzando con la era de la manufactura aditiva.

1.1 Planteamiento del problema

El origen de las impresoras 3D proviene de la idea de convertir en objetos reales los modelos realizados con programas de diseño asistido por computadora (CAD). En la actualidad, se utilizan para crear prototipos rápidos o prefabricar piezas. Además, son apropiadas para la creación de prótesis médicas adaptando las características particulares de cada paciente.

En la actualidad, se dispone de impresoras 3D de código abierto (*open source*) a bajo costo. Sin embargo, presentan una baja calidad por los materiales y componentes que utilizan. Por ejemplo, en la inyección de material plástico, la boquilla presenta problemas para inyectar de manera uniforme y a una misma temperatura el material, lo que ocasiona que se formen rebabas y que la impresión no se realice de manera adecuada. Además de problemas en el diseño de la boquilla, también se presentan fallas ocasionadas por vibración de la estructura y el movimiento de los ejes XYZ (motor). Sumado a estos factores, la baja calidad del material limitando una buena calidad de impresión.

Para lograr una impresión con mayor calidad es necesario incrementar la velocidad de impresión (inyección), y reducir los tiempos de trabajo de la impresora, se requiere mantener una temperatura adecuada para el material de fabricación. Existen varias tecnologías para crear piezas de manera rápida, como el moldeado, fundición y la manufactura por adición (impresión en 3D). Para la fabricación de piezas y prototipos es muy importante el tiempo que toma su elaboración, considerando el proceso de diseño, el nivel de dificultad, y las dimensiones de estos, lo que se traduce en algunas ocasiones en tiempos de elaboración extensos.

En cuanto al tiempo de impresión de una pieza, en las impresoras 3D, depende principalmente del diámetro de la boquilla y los parámetros de control de temperatura, velocidad de inyección, propiedades del material, entre otros, dependiendo también del nivel de complejidad de la pieza y sus dimensiones. Normalmente, los usuarios de las impresoras 3D ocupan una sola boquilla, o en algunos casos optan por intercambiar boquillas para diferentes piezas según lo consideren necesario. La mayoría de las impresoras 3D usan boquillas de 0.4 mm, una medida que se considera óptima y de calidad estándar. Esto hasta cierto punto se considera funcional, siempre y cuando el nivel de complejidad y la calidad de la pieza no sean demandantes.

El utilizar una sola boquilla funciona, pero el usuario estaría limitando todo el funcionamiento que una impresora 3D puede ofrecer. Para mejorar la impresión y obtener piezas con la calidad que exige el diseño, el usuario tiene la posibilidad de utilizar otros diámetros de boquilla. Sin embargo, el proceso de impresión no puede ser interrumpido, en caso de que se requiera intercambiar una boquilla para disminuir el tiempo de elaboración (boquilla de diámetro mayor) o mejorar los detalles de la pieza (boquilla de diámetro menor).

Resumiendo, al utilizar un solo diámetro de boquilla, la funcionalidad de la impresora 3D se limita. Esto puede solucionarse al intercambiar los diámetros de las boquillas, para lograr dos objetivos, ya sea mejorar la calidad y los detalles de la pieza o para disminuir el tiempo de elaboración de ésta.

Con el presente proyecto se pretende lograr ambos objetivos al implementar un extrusor de flujo variable, cuya boquilla adquiera diferentes diámetros de manera automática, lo que permitirá que una pieza se pueda elaborar en menos tiempo y con mayor calidad.

1.2 Objetivos generales

- Diseñar, construir y acoplar un mecanismo que permita el control de apertura de diámetro de un extrusor para mejorar el tiempo de trabajo de una impresora 3D.

1.3 Objetivos específicos

- Buscar y recopilar información sobre un mecanismo que permita la variación a distintos diámetros.
- Realizar pruebas de diseño para verificar la funcionalidad del mecanismo.
- Adaptar de forma virtual y física el mecanismo que permita la variación de diámetros.
- Adecuar los componentes mecánicos, electrónicos y el software para el funcionamiento ideal del mecanismo elegido para que sea compatible con una impresora 3D comercial.

1.4 Justificación

Hoy en día, las impresoras 3D tienen mayor aplicación debido a que se pueden obtener productos funcionales a un bajo costo y poco tiempo. Con un buen material se obtienen productos que tengan aplicaciones inmediatas. Sin embargo, las impresoras aún presentan problemas para lograr productos impresos con buena calidad, por lo que se requiere de:

- Incrementar la inyección de material cuando se requiera una pieza de tamaño considerable para minimizar el tiempo de impresión.
- Minimizar los errores de impresión generados por la calidad del material mejorando el proceso de inyección de material a una temperatura adecuada para imprimir cada capa de material.
- Determinar la temperatura y velocidades adecuadas en el proceso de inyección para diferentes diámetros de boquillas del extrusor.
- Lograr impresiones de buena calidad que permitan obtener productos funcionales para utilizarlos de manera inmediata.

1.5 Alcances y limitaciones

Alcances

- Se realizará el diseño, construcción y acople de un mecanismo que permita el control de apertura de diámetro de un extrusor de una impresora 3D.
- Modificación o adaptación de componentes mecánicos, electrónicos y el software de la impresora 3D, de acuerdo con la temperatura y velocidad de inyección del material, para realizar pruebas con el extrusor de diámetro variable.

Limitaciones

- Solo se considera el uso de un tipo de material en la impresión para realizar pruebas.
- Se analizará la posibilidad de considerar diámetro variable en la impresión de pruebas al modificar el código de control numérico. En caso contrario se probará para diferentes diámetros con valor constante.

Capítulo 2

Estado del arte

En este capítulo se presentan los trabajos de investigación que fueron realizados durante los últimos años en el tema de la manufactura aditiva.

2 Estado del arte

Vazhnoy (2014) define que la impresión en tres dimensiones es una tecnología capaz de convertir un archivo de computadora en un bien material, mediante la superposición sucesiva de capas micrométricas de material, usualmente en forma de polvo. Para la reproducción casera de objetos suele utilizarse el término impresión 3D, mientras que las realizadas en la esfera industrial toman el nombre de manufactura aditiva (MA).

La primera impresora 3D fue patentada en los Estados Unidos por Charles Hull en 1986 bajo el nombre de *Stereolithography*. Hoy en día, esta tecnología es ampliamente utilizada en todo el mundo, la impresión 3D o la manufactura aditiva ha revolucionado la forma de fabricación mediante el diseño de estructuras complejas en una función personalizada que no puede realizarse mediante los métodos de procesamiento tradicionales. Los trabajos enfocados a mejorar la calidad y los tiempos de producción en la impresión 3D mediante extrusión de materiales se ha estudiado a lo largo de los años, diseñando o modificando los elementos de la impresora, con el objetivo de mejorar su desempeño. Algunas aplican una solución adhesiva sobre polvo de plástico, otras derriten titanio mediante rayos láser y las más sofisticadas utilizan material celular para reproducir órganos humanos.

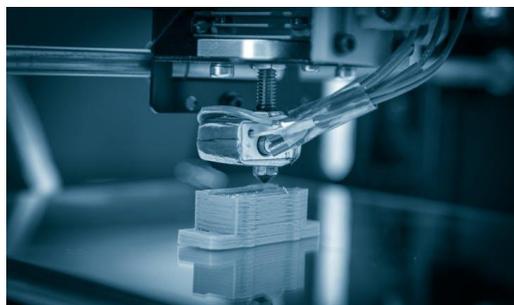


Figura 1. Capas de material de un objeto generado por un sistema de extrusión de una impresora 3D
(Fuente: una publicación ofrecida por EU Automation, 2019).

Barra Brito (2017) define el término general de "extrusión" como la extracción de una sustancia mediante presión a través de la boca de carga. Los extrusores están compuestos por uno o varios tornillos sin fin situados en una estrecha carcasa. Por un extremo se introduce la materia prima, por el otro, se extrae el producto a presión a través de una boquilla y,

eventualmente, se corta. Mientras tanto, la masa que se va a extruir se procesa térmicamente mediante la calefacción de la carcasa y mecánicamente a través del molde y del número de revoluciones de los tornillos sin fin.

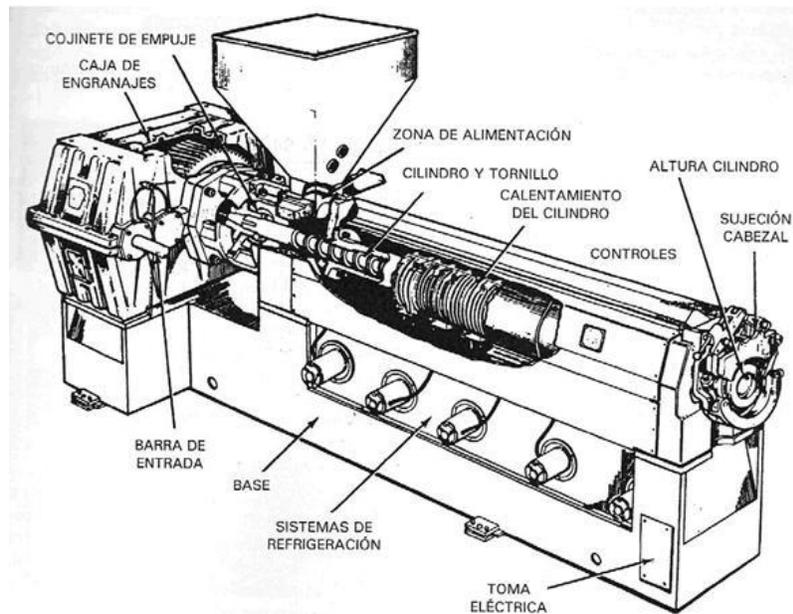


Figura 2. Elementos importantes de una extrusora industrial (Fuente: Mariano, 2011).

En 1797, Joseph Bramah patentó el primer proceso de extrusión para hacer un tubo de plomo. Este proceso consistía en el precalentamiento del metal para luego pasarlo por un troquel mediante un émbolo a mano. El proceso no fue desarrollado sino hasta 1820, cuando Thomas Burr construyó la primera prensa hidráulica. Hasta ese momento, el proceso se llamó *squirting*. En 1894, Alexander Dick expandió el proceso de extrusión al cobre y aleaciones de bronce (Wick, T. Benedict, & F. Veilleux, 1984)

El inicio de la impresión 3D se remonta a 1976, cuando se inventó la impresora de inyección de tinta. En 1984, algunas adaptaciones y avances sobre el concepto de la inyección de tinta transformaron la tecnología de impresión con tinta a impresión con materiales. A lo largo de las últimas décadas, ha habido una gran variedad de aplicaciones de la tecnología de impresión 3D que se han desarrollado a través de varias industrias (Impresoras3D, 2018).

Mejía (2016) planteó los cuatro procesos más utilizados en los inicios de una impresora 3D: procesos por adición, por compactación, por estilográfica, y por sintonización láser.

- **Por adición**, se inyecta polímeros que se agregan o suman por capas, método también denominado por polimerización.
- **Por compactación**, se forman una masa de polvo que se compacta por estratos.
- **Por estilográfica**, este método utiliza una masa de resina fotosensible que se solidifica al ser expuesta a la luz ultravioleta.
- **Por sintonización láser**, este método combina distintas capas de metal que son provistas por un suministrador que entrega el metal a un dispositivo láser que funde las capas y forma el objeto.

Más adelante, en el año 1989, Scott Crump desarrolló la técnica del *Fused Deposition Modeling* (FDM) sus siglas en español (modelado por deposición fundida, método para diversas aplicaciones). Estos métodos se basan en la deposición de material en una plataforma desplegable, que ofrece la oportunidad de diseñar e introducir nuevos materiales, incluidos las composiciones de diferentes materiales y colores (Dudek, 2013).

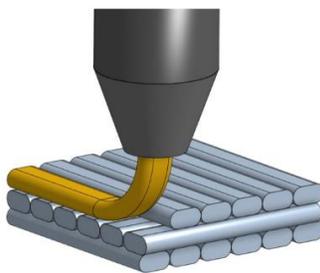


Figura 3. Esquema de modelado por deposición fundida (FDM).

En 1992, la impresión basada en un haz láser que provoca la reacción de resinas fotopoliméricas, es reconocida como el primer proceso de impresión 3D, capaz de hacer piezas bastante precisas. Se emite un haz de láser en dos ejes (XY), de modo que se dibuja la

forma de la capa de material que se desea imprimir en la zona superficial de la resina. Una vez impresa la capa en proceso, se hunde ligeramente el modelo en una piscina de resina, de modo que la próxima capa puede ser dibujada. Se repite el proceso hasta que la figura está terminada (Valls Pepió & Blay Pozo, 2018).

En 1999, en colaboración con las áreas de ingeniería y medicina, se crea el primer órgano de la vejiga urinaria implantado a un humano, utilizando un recubrimiento sintético empleado en las propias células del paciente (Bucco, 2016)

En 2002, el profesor Anthony Atala de la Universidad de Wake Forest desarrolló la investigación de la medicina regenerativa logrando el diseño de un riñón miniatura completamente funcional y con la capacidad de filtrar sangre y producir orina diluida en un animal, esto con el objetivo de imprimir tejidos y órganos mediante la tecnología de desarrollo de órganos. Son fabricados con las células del paciente, anulando en gran medida la probabilidad de rechazo (BBC, BBC News, 2016).



Figura 4. Riñón creado por el Dr. Anthony Atala en los laboratorios de la universidad de Wake Forest (Fuente: BBC mundo, 2016).

El material más utilizado en FDM es ABS seguido de PC, PLA, PPSF, ULTEM9085 y mezclas de estos. Recientemente, se ha trabajado en la posibilidad de aplicación de mezclas de ABS: polvos de acero, aluminio o incluso cenizas de madera. Desafortunadamente, la mayoría de los sistemas comerciales modernos están cerrados, evitando el uso de cualquier otro material que no sea el del fabricante. Durante mucho tiempo, la adquisición de una

impresora 3D tenía un precio muy elevado, hasta que en el año 2005 el Dr. Bowyer desarrolló la primera impresora de tecnología FDM auto replicable. La mayor parte de las piezas de ésta están impresas por otra impresora 3D, una impresora madre. En este marco de acercamiento de las impresoras 3D, aparece el concepto del código abierto *Open-Source*, donde cada usuario puede modificar, construir y programar su propia impresora dando lugar a la iniciativa RepRap (*Replicating Rapid Prototyper*) (R. Jerez Mesa, 2016).

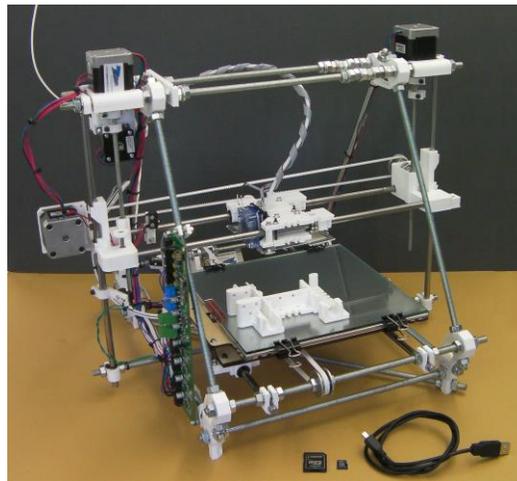


Figura 5. RepRap la primera impresora en ser replicable en su totalidad por una impresora madre (Fuente: RepRap, 2014).

En 2005, el código *Open Source* tiene colaboración dentro de la impresión 3D naciendo la iniciativa de código abierto RepRap por el Dr. Adrian Bowyer en la universidad de Bath, la cual permite imprimir la mayoría de sus componentes permitiendo crear los productos por su propia cuenta en filamento PLA, ABS, entre otros (B.T. Wittbrodt, 2013).

En 2006 nace la primera impresora del tipo (SLS) por sus siglas Sinterizado Láser Selectivo, permitiendo la fusión selectiva de materiales tales como el acero y otros metales, permitiendo hacer algunos tipos de pieza que pierden su utilidad al ser fabricadas en plástico (por ejemplo, en aplicaciones de matricería). Esta tecnología es muy precisa y avanzada, aunque también resulta bastante cara al necesitar mucha energía para poder fundir el metal (Valls Pepió & Blay Pozo, 2018).

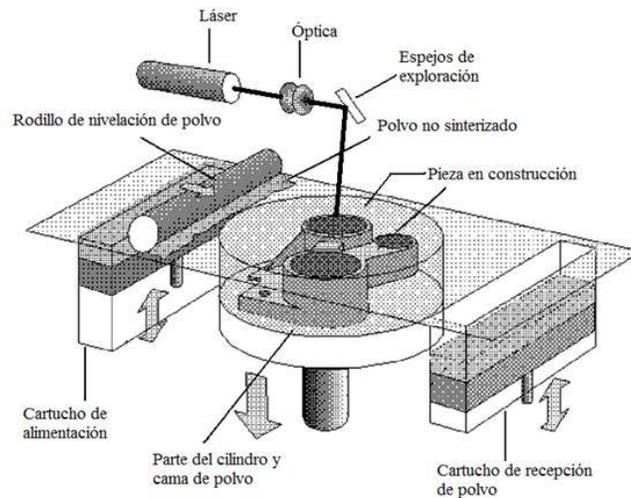


Figura 6. Esquema de funcionamiento en el sinterizado selectivo por láser (SLS)
(Fuente: Laboratory of Information Processing Science. Universidad de Helsinki.
www.cs.hut.fi)

En 2008 detrás de la nueva propuesta por RepRAP, se crea el proyecto Darwin. Esta máquina tiene la capacidad de autorreplicarse. En ese mismo año, se tiene la primera persona que camina sobre una prótesis impresa completamente en 3D (Morales, 2008).

2.1 Modelado por deposición fundida

A pesar de que hay muchas tecnologías posibles para la impresión 3D, la más común, la de Modelado por Deposición Fundida (FDM) es la más sencilla: crea objetos complejos a partir de plástico fundido que se expelle o se extruye a través de una boquilla. El filamento de plástico (o incluso de metal) está originalmente enrollado en un carrete que se desenrolla para entregar el material a la boquilla de extrusión al tiempo que la boquilla, o el objeto y en ocasiones ambos son movidos a lo largo de tres ejes (Fonda, 2014).

Desde la creación de la primera impresora 3D en 1984 por la empresa 3D Systems Corporation, en los Estados Unidos, la propagación de esta tecnología ha sido considerable. En 2015, el mercado mundial para equipos, materiales y servicios relacionados con la manufactura aditiva, comúnmente conocida como la impresión 3D, incrementó un 56% con respecto a años anteriores. Se estima que, en los siguientes años, la tasa de crecimiento anual compuesta (TCAC) de este sector se mantendrá en un 44%. El importante crecimiento de la

manufactura aditiva se debe principalmente al descubrimiento continuo de nuevos e importantes beneficios específicos que aporta esta tecnología a un creciente número de sectores industriales (Hensen Mendoza, 2015).

Una de las partes esenciales de la impresora 3D es el extrusor de filamento, ésta es la encargada de dar la calidad en la pieza. Conforme a su inyección, las temperaturas de fundición de material y los motores encargados de dar los movimientos del extrusor a lo largo, ancho y alto de la impresora, así como la inyección del material al sistema de extrusión, son los que definen el tiempo y la calidad de cada una de las piezas impresas. El extrusor tiene 2 configuraciones importantes ya que, dependiendo del modelo de la impresora y el área de trabajo en la cama calentada, el extrusor puede tomar una configuración sobre otra, conforme a su conveniencia.

Landry (2016) describió las dos configuraciones de extrusores más comunes en la impresión 3D, la configuración directa y configuración *Bowden*.

1. Configuración Directa

- Los extrusores directos son simplemente aquellos que están directamente unidos al extremo caliente.

2. Extrusor *Bowden*

- Un extrusor *Bowden* no está directamente conectado al extremo caliente. En su lugar, un tubo se extiende desde el cuerpo del extrusor hasta el extremo caliente.
- Esto se llama un tubo de *Bowden*. Es más comúnmente una sección de tubos de PTFE (teflón). El filamento está limitado por el tubo y se desplaza a través de éste hacia el extremo caliente.

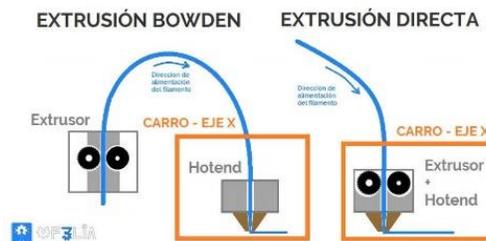


Figura 7. Configuraciones y diferencias entre extrusión Bowden y extrusión Directa que puede tener una impresora 3D (Fuente: Lorenzo, 2020).

Es importante tener en cuenta que un extrusor directo no es necesariamente lo mismo que un extrusor de accionamiento directo. Un extrusor de accionamiento directo solo significa que el mecanismo de accionamiento del filamento está montado directamente en el eje del motor. Tanto los extrusores directos como los extrusores Bowden pueden ser de accionamiento directo.

En el mundo 3D (2018) se describen las impresoras que manejan doble extrusor, el cual permite realizar dos piezas geométricamente iguales en el mismo lapso. Esto ayuda a rebajar los tiempos de trabajo en las piezas, pero limitando las dimensiones ellas. También, clasificó las ventajas y desventajas que presenta tener una impresora 3D con doble extrusor.

Ventajas

- Impresiones 3D a dos colores.
- Imprimir con dos materiales diferentes: Mezclar PLA y ABS, por ejemplo, imprimir en dos materiales sin parar la impresora para cargarlos.
- Mayor velocidad de impresión; si, la impresora dispone de doble extrusor independiente se ganará tiempo.

Desventajas

- La calibración debe ser perfecta, sobre todo en lo referente a la altura, para evitar fallos cuando pasa de un extrusor al otro.
- Sólo se gana velocidad de impresión, con el doble extrusor independiente. Con el resto sólo se gana algo de tiempo, con no tener que cambiar los filamentos, pero el mantenimiento de la máquina, y sus partes, también es mayor.

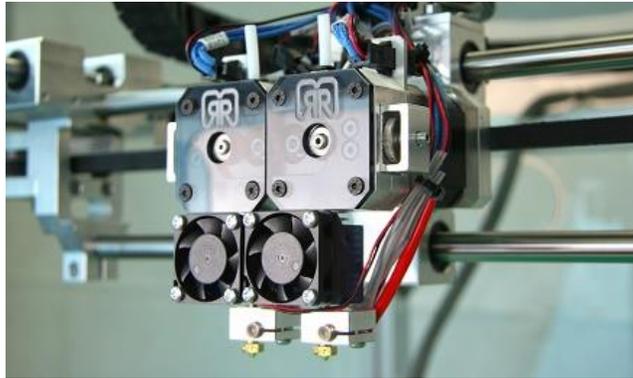


Figura 8. Impresora 3D con doble extrusor en la configuración unida la cual permite crear una sola pieza en dos colores distintos (Fuente: Lucía C., 2013).

Tianyun Yao (2020) realizó experimentos de tracción de una amplia gama de espesores de capa (0.1 mm a 0.6 mm) y ángulos de impresión (0° a 90°) para encontrar el rango de distribución y las características de falla entre capas. Además, estableció un nuevo modelo de resistencia generalizada para predecir la resistencia a la falla por tracción de la falla entre capas del material PLA de impresión 3D. Los resultados experimentales muestran que el rango de distribución de falla entre capas aumenta significativamente a medida que el espesor de la capa aumenta de 0.1 mm a 0.6 mm, y la falla entre capas tiende a ocurrir cuando el ángulo de impresión y la resistencia a la falla por tracción son pequeños.

Abdulrahman Albara (2020) presentó un sistema activo para la impresión 3D basada en extrusión de materiales cementosos. El sistema que se propuso utiliza un enfoque poco convencional pero simplista para generar una salida consistente de material durante todo el proceso de impresión. La efectividad de la extrusora se demuestra a través de una extensa impresión y prueba de varios materiales a base de cemento. Los parámetros de impresión y material, que son esenciales para el objeto impreso de alta resistencia mecánica, fueron investigados y optimizados a través de un ciclo lógico iterativo de ensayos. Los resultados mostraron que la retención de la forma de los objetos impresos en 3D utilizando el diseño propuesto del sistema basado en extrusión junto con la reología optimizada de materiales basados en cemento fue alentador para la impresión 3D a mayor escala.

D.Pollard (2017) realizó una investigación a las fluctuaciones en la temperatura del filamento durante los cambios de paso en la velocidad de alimentación y los movimientos de inicio / parada, monitoreando la temperatura usando una cámara térmica y termistores integrados tanto en el bloque como en la boquilla. Se observaron excesos de temperatura de 12 ° C y 18.5 ° C durante un aumento gradual en la velocidad de alimentación y un movimiento de cebado, respectivamente. La evaluación de estos cambios con un modelo de sinterización predijo un aumento del 20% en la formación de enlaces, aunque no se observaron diferencias significativas en el tamaño de los enlaces mediante la medición óptica.

Vinzenz Nienhaus (2019) realizó una investigación sobre la influencia de los parámetros geométricos. Las boquillas típicas están hechas de latón y presentan una disminución del diámetro desde un canal de entrada a un capilar con una sección cónica en el medio. En una entrada fija y diámetro capilar, los parámetros variables son el ángulo de la sección cónica y la longitud del capilar. Las boquillas personalizadas y comercialmente disponibles con varios de estos parámetros se investigaron en un banco de pruebas usando filamento de ácido poliláctico (PLA). Todas las boquillas exhiben un comportamiento común. La fuerza de extrusión aumenta linealmente al aumentar la velocidad de alimentación del filamento. En cierto punto las fuerzas fluctúan y aumentan rápidamente. Aquí, el plástico no fundido llega a la boquilla. Esta característica depende de la temperatura de extrusión y los parámetros geométricos de las boquillas. Las fuerzas de extrusión más bajas se encontraron para una sección cónica de 56°, pero las diferencias de fuerza entre los ángulos de 30 ° a 118 ° son bajas en comparación con la fuerza de extrusión total. Se utilizaron diferentes longitudes capilares para determinar la pérdida de presión de entrada a diferentes velocidades de alimentación de filamento. El material y el revestimiento de las boquillas no tuvieron influencia significativa en la fuerza de extrusión.

Lee *et al.* (2017) realizaron una revisión sobre los fundamentos y aplicaciones de la impresión 3D. Los autores describen la clasificación de los diferentes procesos de manufactura aditiva

basados en los estándares ASTM. Posteriormente, presentan los siete procesos fundamentales de la manufactura aditiva, en los que se encuentra la extrusión de material.



Figura 9. Clasificación de proceso MA basada en ISO/ASTM 529000:2015 (Fuente: Lee *et al.*, 2017).

Durante el proceso de extrusión de material la velocidad y la temperatura juegan un papel muy importante dentro de los parámetros de impresión, debido a que de estos depende la calidad de la pieza impresa. Dentro de las ventajas del proceso de extrusión de material se tiene bajo costo de impresión y la disponibilidad de materia prima. Sin embargo, los autores mencionan que dentro de sus desventajas la extrusión de material presenta un bajo nivel de precisión y conlleva un largo tiempo de impresión, por lo que es necesario realizar modificaciones a los elementos de la impresora, para solventar las desventajas que la extrusión del material presenta. Una forma correcta es rediseñar uno de los elementos principales: el extrusor, permitiendo que la precisión se mejore y los tiempos de trabajo se reduzcan.



Figura 10. Impresión biomimética 4D (Fuente: Lee *et al.*, 2017).

Agassant *et al.* (2019) realizaron un estudio para determinar los parámetros y características necesarios para evitar que el material (filamento) quede adherido a la boquilla y se presente estancamiento. Los autores se concentraron en determinar analíticamente tres parámetros: la presión a la salida de la boquilla, la temperatura óptima para calentar el filamento y la velocidad del cabezal. El objetivo del estudio fue calcular analíticamente la dispersión del polímero fundido entre el cabezal de impresión móvil y el sustrato. El polímero utilizado fue ABS, el estudio fue realizado numéricamente utilizando la técnica de elementos finitos. Los autores concluyen que para evitar el atascamiento del filamento en la boquilla los parámetros más importantes a considerar son: la temperatura a la que el filamento debe calentarse y la velocidad del cabezal.

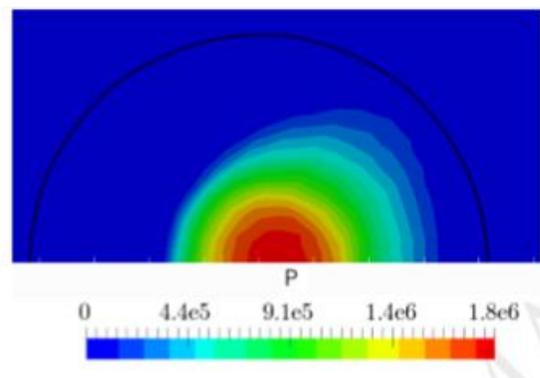


Figura 11. Campo de presión (en Pa) debajo del cabezal de la impresora tomado a una distancia del sustrato igual a $e/2$ cuando $U/V = 1/2$ ($U = 16 \text{ mm/s}$; $V = 32 \text{ mm/s}$) (Fuente: Agassant *et al.*, 2019).

Boyle *et al.* (2019) presentaron el diseño y la fabricación de un cabezal para imprimir piezas utilizando materiales en polvo en lugar de filamento. Para acoplar el cabezal diseñado, fue necesario hacer modificaciones a la boquilla, la presión aplicada al extrusor y la estructura del *hotend*. Para evaluar el rendimiento de la impresora se compararon piezas impresas con la impresora a base de material en polvo y a base de filamento (PLA, ABS, entre otros.).

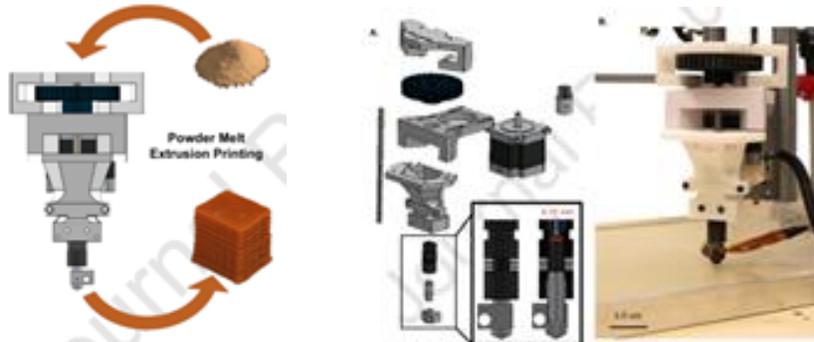


Figura 12. Un diagrama del modelo de computadora de ensamblaje explotado con un recuadro que incluye una vista transversal del STHE (A) y una fotografía de la versión final ensamblada del cabezal de la impresora PME (B) (Fuente: Boyle *et al.*, 2019).

Los resultados de la comparación muestran que los objetos impresos a base de material en polvo presentan mejor uniformidad y estructura en las capas de impresión, mostrando una menor rugosidad en la superficie.

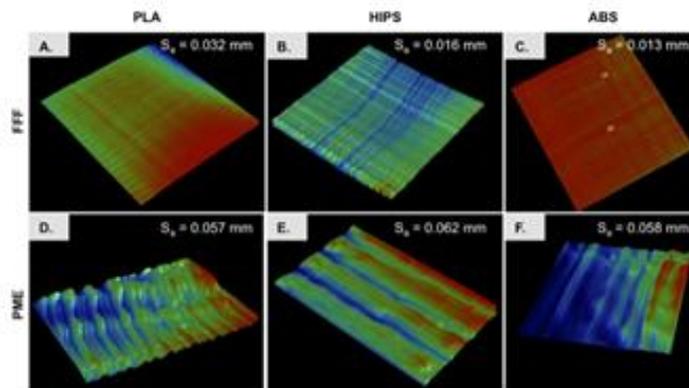


Figura 13. Representaciones tridimensionales de mapas de superficie generados por el perfilómetro para piezas impresas con FFF fuera de PLA (A), HIPS (B) y ABS (C.), así como, para piezas impresas de PME fuera de PLA (D), HIPS (E.) y ABS (F.) El rojo indica un pico (+) por encima del punto 0 designado (verde), mientras que el azul indica un valle (-) por debajo del punto 0 designado. El rango de medición es de ± 500 micras alrededor del punto 0 (Fuente: Boyle *et al.*, 2019).

Los autores concluyen que realizar un análisis para determinar los parámetros necesarios para el proceso de impresión (presión, temperatura y velocidad) es un paso importante en el diseño o rediseño de los elementos de la impresora, debido a que de estos depende la calidad de la pieza impresa.

Rajaguru (2019) presentan un estado del arte actualizado sobre manufactura aditiva, en donde al igual que Lee *et al.* (2017) clasifican los procesos que existen, en donde nuevamente se encuentra la extrusión de material. En este estudio, los autores mencionan que es realmente importante considerar la temperatura, la velocidad del extrusor y la velocidad del material a través de la boquilla debido a que de estos parámetros depende la precisión de la pieza impresa. Al realizar modificaciones a uno de los elementos principales como es el extrusor, la temperatura y velocidad para la extrusión del material también deben cambiar en función del material utilizado y sus dimensiones. Así mismo, Shahrubudin *et al.* (2019) presentan una visión general de los tipos de tecnologías de impresión 3D, sus aplicaciones y los materiales usados en la industria: aeroespacial, automovilística, alimenticia, de salud, arquitectura y construcción, textil, eléctrica y electrónica.

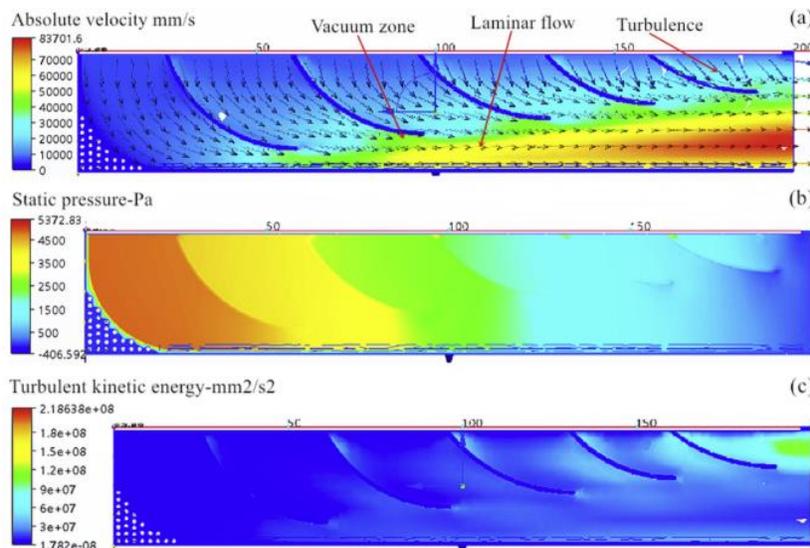


Figura 14. Resultados de la simulación del flujo del molde de la ranura guía, diagrama de: (a) distribución de velocidad; (b) distribución de presión y (c) distribución turbulenta (Fuente: Shahrubudin *et al.*, 2019).

Lee *et al.* (2017), Rajaguru *et al.* (2019) y Shahrubudin *et al.* (2019) presentan una revisión general de los tipos de manufactura aditiva, los siete procesos más importantes, dentro de los cuales se encuentra la extrusión de material.

2.2 Conclusión del estado del arte

Con base en la revisión bibliográfica de impresión en 3D, se encontró que existen los datos necesarios para comprender la complejidad de esta tecnología, los conceptos y mecanismos que la conforman, modelos matemáticos y físicos que la rigen, teoremas y casos experimentales. Así mismo, las metodologías de solución que existen en las diferentes ramas, como en la termodinámica, reología, mecanismos, mecánica de fluidos, entre otras.

Se plantean mejoras tanto en software como en hardware, logrando simplificar piezas y los procesos de impresión que comúnmente son muy robustos o anticuados, haciendo costosa esta tecnología. Dentro de la impresora 3D se observan fallas que los usuarios enfrentan, como el atascamiento del material en las boquillas, que comúnmente ocurre por la adherencia de los materiales a los que se les aplica la extrusión. En las boquillas es donde la impresora realiza el trabajo de crear la pieza, ya que de ella depende el tiempo que tome hacerla y la calidad del detalle. Pero esto es muy poco abordado, por lo que es una gran oportunidad para tomar en consideración.

Algunas empresas que se dedican a la manufactura aditiva logran ver los inconvenientes de trabajar con un solo diámetro de boquilla, por lo cual experimentan con otros diámetros en diferentes combinaciones y esto da resultados grandiosos. Pero hay un inconveniente: se tienen que intercambiar manualmente, lo que ocasiona tiempos muertos entre la impresión, lo cual repercute en la calidad de la pieza. Otras empresas han probado que para mayor volumen es mejor una boquilla de diámetro mayor, y para una pieza pequeña usar un diámetro menor, aunque esto es eficiente en los tiempos de impresión, es ineficiente en la calidad de detalle de las piezas.

Con base en esto, en el presente estudio se pretende abordar ambas opciones, implementando una boquilla que regule su apertura de forma automática, permitiendo reducir los tiempos muertos y mejorar la calidad del detalle de la pieza, sin importar sus dimensiones.

Capítulo 3

Descripción del sistema

En este capítulo se presenta la descripción del sistema de diámetro variable, así como las consideraciones del mecanismo y las acciones que se tomaron al diseñarlo.

3 Marco teórico

En la descripción del sistema se toman en consideración los parámetros de impresión que cada fabricante otorga a los usuarios. Con esto se realiza un análisis sobre el comportamiento del sistema de extrusión en una impresora 3D. En la Fig. 15, se muestran los componentes principales de un sistema de extrusión de una impresora 3D, y en la Tabla 1 se indican los nombres de dichos componentes.

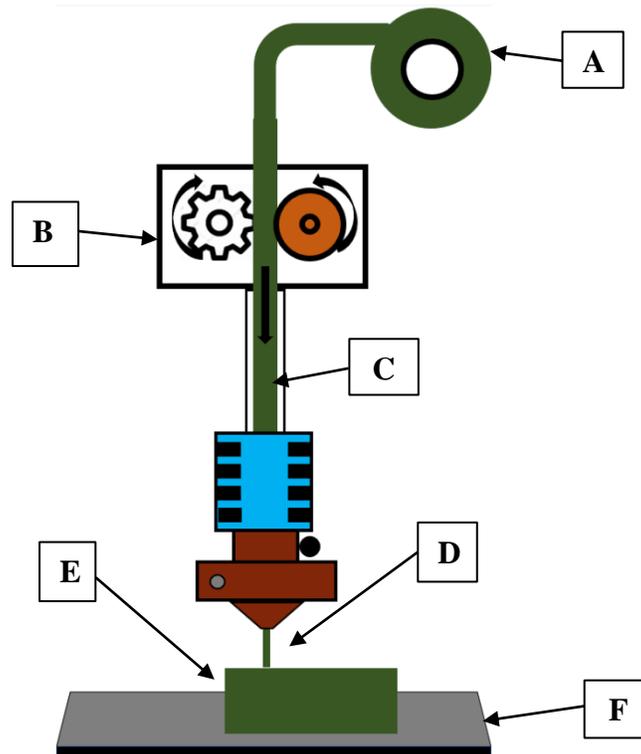


Figura 15. Sistema de extrusión de una impresora 3D.

Tabla 1. Componentes de un sistema de extrusión de una impresora 3D.

A	El filamento es dirigido al extrusor
B	El extrusor usa un sistema de rodamientos para suministrar la cantidad justa de filamento en cada momento
C	El filamento es empujado reduciendo el grosor de éste
D	El filamento es derretido a la temperatura requerida por el material
E	El material es depositado en la base creando la forma en 3D
F	La base se mueve en uno o más ejes para colocar el material en la posición correcta

Realizando la búsqueda de una impresora 3D comercial con las características básicas y de bajo costo se encontró con una impresora de la marca Creality con el modelo: Ender 3 pro, la cual provee de accesibles configuraciones y una estructura cómoda y fuerte; hacen que esta herramienta pueda llegar a tener modificaciones importantes en el hardware, pero no en el software, el cual impedirá realizar un sistema de control interno. La impresora 3D es capaz de ofrecer las características requeridas para impresiones de alta calidad si así se le exige. Esta máquina ofrece características incluso superiores a las de sus competencias más caras, ya que tiene un espacio de construcción de 220x220x250 mm, una cama magnética, un estrecho ducto de filamento en el cual facilita el trabajo con filamentos flexibles y una recuperación por fallo de la alimentación eléctrica.

La impresora 3D cuenta con una estructura de armado por separado, la cual es factible para los tipos de modificaciones que se piensa emplear en ella, como la alteración del *HOME* o cero máquinas, los cuales tienen que ser alterados de su posición original ya que la nueva boquilla sobrepasa las dimensiones de las boquillas comerciales.

3.1 Principales características de la impresora 3D

- El extrusor reduce considerablemente el riesgo de enchufes y la mala extrusión
- Nueva pegatina de plataforma viscosa que resuelve el problema de deformación
- La ranura en V de la rueda hace que se mueva de forma silenciosa, suave y duradera
- Mecanizado CNC de la ranura de montaje en riel y para garantizar un posicionamiento preciso y una calidad de impresión
- Fuente de alimentación con certificación Mean Well UL, protegiendo la impresora de sobretensiones de energía inesperadas.
- Reanuda la impresión desde la última posición grabada del extrusor después de sufrir cortes de energía inesperados.
- Función de protección de corte de energía adicional para satisfacer las necesidades de calentamiento rápido e impresión de larga duración, puede calentar a 110 °C en solo 5 minutos.

Tabla 2. Especificaciones de la impresora 3D.

Marca	Creality
Modelo	Ender 3 Pro
Tipo	DIY
Tecnología de modelado	FDM (Modelado por deposición fundida)
Fuente de alimentación	AC certificado por UL de pozo medio
Entrada	AC 100 – 265V, 50 – 60Hz
Salida	DC 24V, 15 A, 360W.
Modo de trabajo	en línea o SD sin conexión
Botonera	ruleta
Temperatura máxima de la cama	110 ° C.
Temperatura máxima de la boquilla	255 ° C.
Filamento	1.75 mm
Espesor de capa	0.1 – 0.4 mm
Diámetro de la boquilla	0.4 mm
Precisión	± 0.1 mm
Cantidad de boquilla	S/N
Velocidad de impresión	30 – 80 mm/s
Velocidad máxima de desplazamiento	180 mm / s

Tabla 3. Dimensiones y peso de la impresora 3D.

Tamaño de la máquina	440x410x465 mm
Tamaño del producto	220x220x250 mm
Peso de Producto	7.80 kg
Peso de Paquete	8.00 kg
Formato de archivo	STL, OBJ, G-Code
Material de apoyo	ABS, PLA, TPU, madera, flexible, fibra de carbono, entre otros

3.2 Componentes principales de la impresora 3D

En una impresora 3D se pueden destacar importantes componentes cuya función es esencial para su correcto funcionamiento a la hora de realizar la extrusión de material. En la Fig. 16, se observan ocho de los principales componentes, y en la Tabla 4, se indican los nombres de dichos componentes.

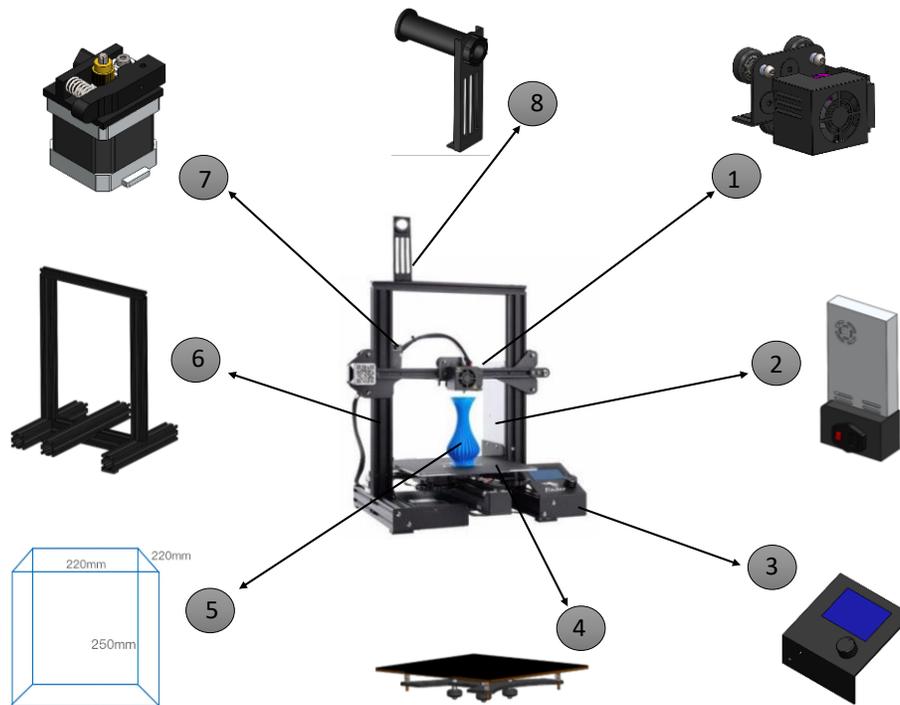


Figura 16. Principales compontes que conforman a una impresora 3D.

Tabla 4. Componentes principales de una impresora 3D.

1	<i>Hotend</i>
2	Fuente de alimentación
3	Pantalla LCD con control de perilla ciclable
4	Cama calentadora o cama magnética
5	Volumen de impresión
6	Estructura de alto estándar
7	Sistema de alimentación de material
8	Soporte del rollo de filamento

3.3 Descripción de los componentes importantes de una impresora 3D

3.3.1 Mecanismo de extrusión

El mecanismo de extrusión está compuesto por el motor del extrusor con un piñón acoplado al eje conductor, y una rueda dentada acoplada a un eje soportado por dos rodamientos y que a la vez conduce una pequeña rueda dentada que entra en contacto con el filamento de material, permitiendo así el suministro del material al calefactor.

3.3.2 Velocidad de extrusión

La velocidad de deposición se establece de acuerdo con la relación de la velocidad de los ejes x y y , en donde ésta debe ser un poco mayor debido al efecto de transferencia de calor, y al tener que darle reversa al extrusor en una impresión cuando se necesita dejar de depositar material, por ejemplo, en un cambio de capa.

3.3.3 Extrusor

Un extrusor de impresora 3D convencional contiene dos partes diferenciadas compuestas por varias piezas que tienen objetivos concretos. Existe una zona superior o zona fría, donde se realiza la alimentación del filamento mediante un sistema de empuje situado en una plataforma. La zona fría se conecta a la zona caliente a través de un tubo aislante que conduce el filamento en estado sólido. La zona inferior o zona caliente, se encarga de fundir el material y reducir su sección. Esta zona está compuesta por el bloque calentador y la boquilla.

3.3.4 Hotend

El *hotend*, punta caliente o fusor es una parte electromecánica, encargada de fundir el plástico que formará la pieza. Soporta altas temperaturas (del orden de 200 – 250°C), y por tanto es muy importante su diseño térmico. Está ligado directamente a una parte mecánica llamada extrusor, el cual se encarga de empujar el filamento de plástico para que, fundiéndose dentro del *hotend*, salga por el extremo de éste, generando así un chorro de plástico que irá, capa por capa, conformando la pieza.

3.3.5 Bloque calentador

El bloque calentador está formado por una pieza cilíndrica de latón (material adecuado para la transmisión de calor y el control de temperatura). Esta pieza en conjunto con una boquilla de extrusión de impresión 3D convencional forma un sistema de calentamiento, mezcla y extrusión de filamentos adecuado para las experimentaciones realizadas. La mezcla se realiza mediante la presión que los propios filamentos ejercen en el empuje.

3.3.6 Resistencia

La resistencia eléctrica tiene dos magnitudes, las cuales son voltaje y corriente. Requiere obtener dichos valores en diferentes puntos del bloque calentador, los cuales se pueden obtener usando teoremas como el de Fourier. La magnitud de la potencia eléctrica depende el flujo calorífico. Utilizando dos temperaturas se puede crear un sistema de control, el cual considere una temperatura fría en la superficie de la boquilla, y una temperatura caliente en donde la resistencia eléctrica está entregando conductividad térmica.

3.3.7 Boquilla

La boquilla (*nozzle*) es la parte con la cual la impresora imprime sus piezas. Por lo cual, es importante que sus características de fabricación sean correctas. Por norma, las boquillas se fabrican de latón, pero no necesariamente, actualmente se encuentran de acero inoxidable, titanio, acero endurecido, e incluso de punta de rubí. Pero estas tecnologías son algo elevadas de costo y por tal razón, aunque el latón es de baja calidad, se opta por éste ya que es muy barato.

3.3.8 Cama magnética de la impresora

Esta impresora está equipada con una cama de impresión magnética “C-MAG”. Se trata de una hoja flexible con la cual se puede extraer fácilmente la placa de construcción, en conjunto con la superficie texturizada ayuda a que tenga una mayor adhesión en las primeras capas y una forma sencilla de extraer los objetos impresos sin dañar su base o estructura general.

3.4 Componentes mecánicos principales de la impresora 3D

3.4.1 Soporte-guía y componentes del sistema de extrusión en la impresora 3D

La impresora está diseñada con una extrusión de aluminio de 40x40 mm y otras dos piezas de extrusión de aluminio de 20x20 y 40x20 mm, que hacen más resistente los ejes de trabajo. También, cuenta con ruedas de mayor rigidez, con las cuales tiene una mayor estabilidad y menor fricción para una estabilidad adimensional. Esto con cuatro pies de goma que reducen el nivel de ruido en la estructura.



Figura 17. Eje X conformado por el extrusor y su respectivo carrete.

El eje X de la impresora 3D cumple con una labor muy importante de sostener el sistema de extrusión de la impresora y otorgándole un movimiento cartesiano. Dentro de este proyecto se realizará un mecanismo que logre cambiar su diámetro, el cual estará situado en el sistema de extrusión de la impresora. Más detalladamente, estará conectado directamente en el *hotend*, lo que le estaría otorgando un peso extra en comparación de una boquilla tradicional de la impresora. Esto representa una mayor carga sobre el riel y una mayor inercia sobre los motores.

3.4.2 Extrusor MK-10

La impresora cuenta con una versión de extrusor “MK-10”, con este extrusor se busca reducir el riesgo de obstrucción y de extrusión desigual dentro del *HOTEND*. Los extrusores de la clase “MK” que se montan en las distintas impresoras 3D son considerados una gama media

alta en el área de la impresión 3D, con esto se es imprescindible la actualización continua de ellos debido a los grandes beneficios que pueden aportar a la manufactura aditiva.

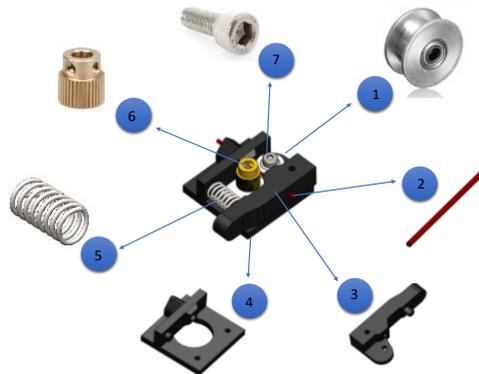


Figura 18. Componentes del extrusor MK-10.

Tabla 5. Descripción de los componentes de un extrusor “MK”.

1	Rueda de presión para filamento de 1.75mm
2	Idoneidad del filamento: 1.75mm PLA / ABS / otro
3	Palanca de plástico
4	Marco de plástico
5	resorte de alta tensión
6	engranaje de tracción de 26 dientes
7	Tornillo de montaje

3.5 Descripción de las partes del extrusor

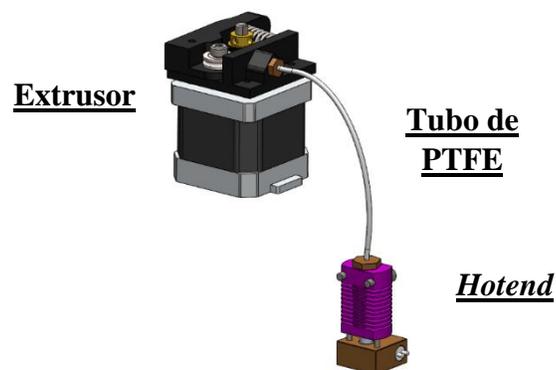


Figura 19. Extrusor utilizado en la impresora 3D de configuración Bowden con una guía de teflón, uniendo el inyector a la parte de tratamiento térmico. Modelo del extrusor: MK10.

Una vez conocido el extrusor con el que cuenta la impresora 3D, una de las configuraciones principales del sistema de extrusión es la configuración Bowden, la cual cuenta con un tubo interno de PTFE más grueso. Con esto se obtiene una mayor barrera térmica, lo que beneficiará la correcta temperatura de llegada del filamento desde el bloque calefactor a la boquilla; esto permite que el revestimiento tenga una mayor duración o sea menos propenso a sufrir daños.

Con el análisis general de la impresora 3D se pueden definir los conceptos positivos y negativos que ésta presenta, los cuales se ven involucrados directamente con el proyecto del mecanismo de diámetro variable que se requiere adaptar dentro de su sistema de impresión.

Tabla 6. Aspectos positivos y negativos que se presentan en la impresora 3D.

Aspectos positivos y negativos de la impresora 3D	
Aspectos positivos	Aspectos negativos
<ul style="list-style-type: none"> • Diseño compacto • Ensamble práctico • Volumen de impresión aceptable • Las impresiones son de una calidad media alta • Tamaño y precio accesible • Se permiten modificaciones gracias a su diseño • El ducto para el filamento es estrecho para el fácil uso de filamento flexible 	<ul style="list-style-type: none"> • La nivelación de la cama es complicada • Una cama magnética causa controversia y desagrado para algunos usuarios • En ocasiones, es necesario contar con materiales de adhesión adicionales • Se presentan problemas al momento de trabajar con filamentos frágiles • Adaptación del mecanismo al extrusor

Una de las principales ventajas de la fabricación aditiva para obtener piezas funcionales, es la disminución drástica de material utilizado y de desecho. Para producir una pieza complicada sólo se agregan estructuras de soporte, que permiten la impresión de los planos

complejos de la pieza final. La cantidad de soporte es la mínima requerida, y además para producirlos se minimiza la materia prima en ellos, y en comparación con procesos de mecanizado convencional, el material desperdiciado es marginal.

Otra ventaja particular, es que los desechos de impresión 3D FDM son potencialmente reciclables en casa. Las temperaturas necesarias para fundir dichos compuestos son inferiores a las de un horno de cocina común. Este aspecto hace muy atractiva la idea de tratar los materiales sobrantes, que, en comparación a los desechos de los procesos de manufactura convencional, no necesitan procesos complejos ni agresivos energéticamente hablando.

Existen fallas en el accionamiento de la máquina que empuja la materia prima de filamento a través de la licuadora. Esto puede causar una variación en el diámetro, provocando que un filamento con un diámetro demasiado grande bloquee el sistema. Un filamento con un diámetro demasiado pequeño no tocará la pared de la extrusora y causará que el material se levante entre la pared y el filamento.

La cavidad interior de la impresora se conoce como la cámara de construcción. Dentro de la cámara de construcción reside la plataforma de construcción climatizada. Aplicada a la superficie de construcción para mejorar la adherencia y liberación de objetos impresos. El sobrecalentamiento del ensamblaje del extrusor hace que el filamento se suavice prematuramente, lo que hace que el proceso de extrusión sea inconsistente.

3.6 Métodos de transformación de plásticos

Los materiales plásticos se caracterizan no sólo por la gran variedad de aplicaciones que ofrecen, sino también por la diversidad de métodos que se pueden utilizar para su tratamiento y la posterior fabricación de productos. A continuación, se detallan brevemente las principales tecnologías.

- Inyección por moldeo.
- El moldeo por compresión.
- El moldeo por transferencia.

- El moldeo centrífugo.
- El moldeo por soplado.
- El moldeo por inyección.

De estas tecnologías, el moldeo por inyección es un proceso mediante el cual se funde el polímero y se le hace fluir a presión a través de un conducto o tobera, con una forma determinada (boquilla), obteniendo así un cordón que polimeriza a la salida de la extrusora.

3.6.1 Extrusión de polímeros

La extrusión es la técnica de procesamiento de polímeros más importante de la actualidad, esto significa que una parte substancial de todos los polímeros que se producen pasan a través de una extrusora al menos una vez en su camino de producción, desde el reactor de polimerización hasta el producto terminado que llega a los consumidores.

3.6.2 Polímero

Los polímeros son compuestos con identidad como macro-moléculas, formadas por enlaces covalentes entre unidades más pequeñas llamadas monómeros. Desde 1992 se han desarrollado un sin número de aplicaciones de estos materiales, desde fibras, llantas, empaques, implantes, suturas, lentes de contacto, matrices para cultivo de tejidos, entre otras. Su costo relativamente bajo, resistencia a la corrosión, baja densidad, y sus propiedades mecánicas les ha permitido sustituir a los metales en muchas aplicaciones, a tal punto que el siglo XX fue denominado la edad del plástico.



Figura 20. Filamento de un material plástico.

3.6.3 Viscosidad y características reológicas de un polímero

La viscosidad en fundido es, junto con la dispersión de pesos moleculares, una de las características más importantes a la hora de la caracterización de los grados del polímero, ya que influyen directamente las condiciones de procesado, y por ello sobre la economía de los procesos. Una manera de caracterizar la viscosidad de los productos es por medio de un ensayo normalizado llamado índice de fluidez. Cuanto mayor es el índice de fluidez, menor es la viscosidad, y está relacionado de manera inversa con el peso molecular del polímero.

3.7 Polímeros más utilizados en el moldeo por extrusión

3.7.1 Ácido poliláctico (PLA)

Los polímeros sintéticos totalmente biodegradables como el ácido poliláctico (PLA), están disponibles comercialmente desde 1990. El PLA ha sido exhaustivamente estudiado para su uso en distintas aplicaciones médicas e industriales desde los años 80 del pasado siglo debido a su bio-degradabilidad.

3.7.1.1 Propiedades del PLA

Además de su capacidad para biodegradarse, el PLA tiene propiedades que comparan favorablemente con las de los plásticos comúnmente empleados, por ejemplo, para envolturas. Este es un factor importante pues permite sustituir por PLA a polímeros de la petroquímica sin necesidad de rediseñar productos o ejecutar grandes inversiones en nuevos equipos de proceso.

El PLA se puede formular para ser tanto rígido como flexible y polimerizarse con otros materiales; también producirse con propiedades mecánicas apropiadas para procesos de fabricación específicos como moldeo por inyección, extrusión de lámina, moldeo por soplado, termo formación, formación de películas e hilado, con la mayoría de las técnicas y

equipos convencionales. El PLA se clasifica como GRAS (generalmente reconocido como seguro) por la Food and Drug Administration de Estados Unidos.

3.7.2 Principales usos del PLA

Por ser biodegradable y reabsorbible, el PLA encuentra múltiples aplicaciones en medicina y en industrias como la alimentaria, la textil, de cosméticos y otras. Muchos de estos productos ya están utilizándose, pero otros aún están en fase de investigación en distintas etapas.

El PLA también encuentra aplicación en otras ramas industriales como la industria alimenticia, textil, en la de producción de envases, envolturas de distintos tipos, embalajes y otras.

Tabla 7. Propiedades del PLA para el moldeado por extrusión.

Parámetro	Descripción
Temperatura de impresión	180-230°C
Temperatura de transmisión vítrea	57°C
Temperatura de fusión	150-160°C
Cama caliente	Opcional
Temperatura de cama caliente	20-60°C
Ubicar en un recinto	Opcional
Boquilla atascada	Ocasionales
Adhesión de la primera capa	Problemas menores
Humos	Reducido
Absorción de humedad	Si

De lo único que el filamento PLA puede presumir con respecto a las propiedades mecánicas del material ABS, es de tener una mayor dureza superficial. Por lo demás, presenta una mejor adherencia entre las capas, pero esto tiende más a romperse que a doblarse.

3.7.3 Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

El ABS es un terpolímero, esto es, una larga cadena de unidades unidas entre sí mediante enlaces químicos y formados por tres monómeros distintos, unidades básicas que se repiten para dar lugar a un material polimérico. Cada monómero presente en el ABS obtiene su lugar en la formulación al aportar un conjunto de características de rendimiento:

- Acrilonitrilo (*Acrylonitrile*): ofrece resistencia al calor y a las sustancias químicas, así como resistencia a la tensión
- Butadieno (*Butadiene*) (caucho): aporta resistencia al impacto, dureza y buen rendimiento a bajas temperaturas
- Estireno (*Styrene*): aporta el aspecto brillante, capacidad de proceso y rigidez

Durante la fase de distribución de partículas de “Butadieno” éstas se manipulan y pueden tener otro efecto significativo en las propiedades del material. Es decir, aumentar el tamaño de las partículas puede aumentar la dureza y aumentar la longitud de la cadena del polímero produce un material más fuerte. Todos estos factores se equilibran con la «facilidad de fabricación» del material plástico, esto es, los materiales con longitudes de cadenas de polímeros excesivamente largas ofrecen buenas propiedades físicas. Sin embargo, estos tipos de materiales con cadenas largas tienen tasas de flujo de fusión muy bajas, lo que los hace complicados en el proceso de fusión. Las propiedades de los polímeros resultantes pueden manipularse mediante cambios en las proporciones de estos monómeros. Las proporciones típicas del ABS son: acrilonitrilo 20 %, butadieno 25 % y estireno 55 %.

Tabla 8. Propiedades del ABS para el modelado por extrusión.

Parámetro	Descripción
Temperatura de impresión	210-250°C
Temperatura de transmisión vítrea	104°C
Temperatura de fusión	N/A
cama caliente	Obligatoria
Temperatura de cama caliente	80-110°C
Ubicar en un recinto	Recomendada

Boquilla atascada	Nunca
Adhesión de la primera capa	Problemas menores
Humos	Malo o intenso
Absorción de humedad	Si

3.8 Comparación de materiales para el modelado por extrusión

Para determinar cuál material es mejor para la calidad de los productos, o bien cual es más barato de fabricar, es necesario compararlos e identificar cuándo es conveniente utilizar uno u otro. Los dos materiales descritos en párrafos anteriores son los elegidos para realizar las pruebas en este proyecto de investigación, ya que de acuerdo con la literatura son los más utilizados en manufactura aditiva, debido a sus precios accesibles, y a que cumplen con las normas de impresión necesarias para poder trabajar con ellos. Al comparar sus propiedades térmicas es posible determinar cuál es mejor de acuerdo con el trabajo requerido.

Tabla 9. comparación de materiales para el modelado por extrusión.

Temperatura	PLA	ABS
Temperatura de impresión	180-230°C	210-250°C
Temperatura de transmisión vítrea	57°C	104°C
Temperatura de fusión	150-160°C	N/A
cama caliente	Opcional	Obligatoria
Temperatura de cama caliente	20-60°C	80-110°C
Ubicar en un recinto	Opcional	Recomendada
Boquilla atascada	Ocasionales	Nunca
Adhesión de la primera capa	Problemas menores	Problemas menores
Humos	Reducido	Malo o intenso
Absorción de humedad	Si	Si

Una de las grandes ventajas que tiene el ABS sobre el PLA es la dificultad en la que el material ABS se llegue a atascar a comparación del material PLA que es más común. Una de las ventajas del PLA es que no necesita una cama caliente en la mayoría de los productos a comparación del ABS que es más sensible a grietas y deformaciones si se enfría demasiado rápido. Ambos materiales presentan algunos problemas menores de adhesión: la primera capa, a veces se queda adherida a la cama de impresión. Pero se ocupan técnicas muy prácticas para solucionar este problema como el colocar cintas a lo largo de la cama calentada.

Ambos materiales atraen y absorben la humedad del aire, esto puede causar problemas, ya que el aumento de los niveles de hidratación afecta negativamente al proceso de impresión. El cabezal se puede obstruir, se pueden hacer burbujas o incluso puede borbotear el material.

El material ABS es más duradero que el PLA, pero si se requieren piezas que trabajan con calor, por ejemplo, que cumplan jornadas largas bajo el sol, el ABS es de igual forma mucho mejor, ya que se requiere más calor para el poder deformar la pieza a comparación del PLA. De los principales parámetros que afecta directamente al acabado de las piezas realizadas con impresoras 3D FDM es la velocidad de impresión. Así, a mayor velocidad de impresión, peor acabado obtendremos y cuanto menor sea ésta, mejor acabado. Por tanto, se puede afirmar que la calidad del acabado es directamente proporcional al tiempo de impresión.

Y, por último, pero no menos importante, los costos de fabricación, el ABS y el PLA tienen precios no tan accesibles para el uso cotidiano; los precios pueden variar entre el 15% o 25% de uno al otro. Ya sea que se requieran pruebas y piezas de baja calidad siempre es mejor comprar el más barato, tiene la funcionalidad y las características necesarias para su fabricación.

Tabla 10. Comparación de las propiedades de los materiales.

Propiedad	PLA	ABS
Dureza	Dureza aceptable	Dureza por encima del promedio
Flexibilidad	Frágil	Moderadamente flexible
Resistencia al impacto	No	Sí
Resistencia al calor	No	Sí
Exposición a UV/H2O	Se degrada con el tiempo	Se degrada con el tiempo
Biodegradable	Sí	No
Reciclable	Sí	Sí
Corte, limado, lijado	Posible	Posible
Pintura, pegamento	Relativamente posible	Posible
Tratamiento con acetona	No es posible	Posible
Colores	Amplia gama disponible	Amplia gama disponible
Variedades exóticas	Algunos disponibles	Algunos disponibles
Precio	Económico	Económico

El filamento PLA es el más utilizado en la impresión 3D, no porque sea el mejor material, sino porque es fácil de extrudir. Se debe evitar el uso de filamento PLA en artículos que puedan doblarse, torcerse o caerse repetidamente, como carcasas de móviles, juguetes sometidos a alto desgaste o mangos de herramientas. También se debe evitar usarlo en elementos que necesitan soportar temperaturas elevadas, por ejemplo, aquellos expuestos directamente a la luz solar, o aquellos que vayan colocados en un automóvil o lavavajillas. Para los demás usos, el filamento PLA es una buena opción. Normalmente se suele utilizar en maquetas, juguetes sometidos a bajo desgaste, piezas de prototipos y contenedores.

El filamento ABS es más adecuado para artículos que se caen, se manipulan o calientan con frecuencia. Se puede usar para piezas mecánicas, especialmente si están sometidas a esfuerzos o deben encajarse con otras piezas. Ejemplos de impresiones que se realizan con filamento ABS son carcasas de móviles, juguetes sometidos a un gran desgaste, mangos de herramientas, componentes del revestimiento de los automóviles y cuadros eléctricos.

La complejidad del ciclo de vida de la herramienta se basa en la existencia de dos flujos diferentes, el flujo de datos de la herramienta y el flujo de la herramienta física.

Por medio del diseño asistido por computadora fue realizado el diseño general de la impresora 3d que se adquirió para la realización de las pruebas de funcionamiento las cuales se desean trabajar con un mecanismo de diámetro variable, este diseño ayuda a dimensionar las tolerancias que puede tomar el mecanismo dentro de ella.

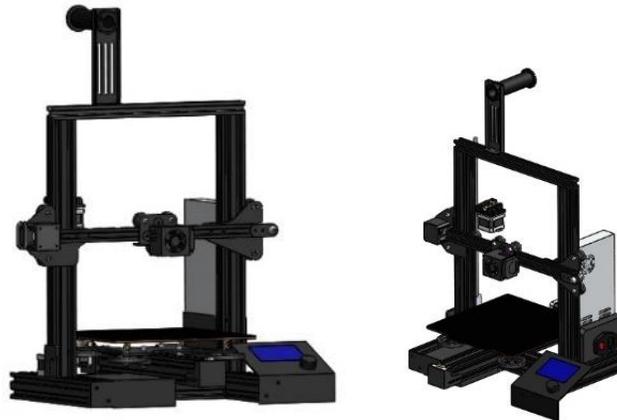


Figura 21. Impresora 3D.

3.9 Conclusión del capítulo 3

Para concluir con este capítulo se observó el sistema de la impresora 3D con la que se cuenta para realizar las pruebas de impresión con el nuevo mecanismo propuesto. En el análisis de la impresora que se adquirió y en su diseño CAD se identificaron las características de trabajo con las que cuenta, las dimensiones y tolerancias con las que se puede trabajar en cuanto a las adaptaciones para el nuevo mecanismo por ejemplo: el posicionamiento de los sensores en cada eje de la impresora, esto por el motivo de que el mecanismo que se propondrá tendrá dimensiones completamente diferentes a la de una boquilla comercial por esto se requerirá repositionar algunos sensores y a su vez verificar si los motores si cuentan con el torque necesario para lograr mover el *hotend* con el mecanismo de diámetro variable sin esfuerzo. Asimismo, las características de los materiales PLA y ABS, los cuales son los filamentos de material más usados en el ambiente de impresión doméstico, ya que cuentan con un costo menor y un mejor manejo a la hora de trabajar, así como sus características térmicas que serán de mucha utilidad a la hora de realizar los modelados en el sistema de extrusión como sus temperaturas y velocidad de extrusión.

Capítulo 4

Modelado del sistema de extrusión

En este capítulo se presentan los modelos matemáticos correspondientes al control de temperatura y el control de velocidad del sistema de extrusión de una impresora 3D.

4 Modelado del sistema de extrusión

El sistema de extrusión de una impresora es un conjunto de partes que impulsan, conducen, funden y depositan el filamento en la cama de la impresora. Es el conjunto que permite que la impresora realice el trabajo de una manera consistente y confiable.

4.1 Consideraciones

Para el planteamiento del modelo matemático del filamento del extrusor de diámetro variable se considera lo siguiente:

- Cálculo de tiempo de puesta en marcha del extrusor
- Se asumen pérdidas del orden del 10% en el calor entregado

Como anteriormente se mencionaba, el sistema de extrusión cuenta con dos configuraciones en una impresora 3D las cuales son: extrusor directo y extrusor Bowden. Con base en las dos configuraciones del sistema de extrusión, la impresora 3D adquirida para realizar las pruebas de extrusión cuenta con una configuración Bowden en su sistema, de tal manera que el sistema Bowden será analizado de manera separada (extrusor-*hotend*).

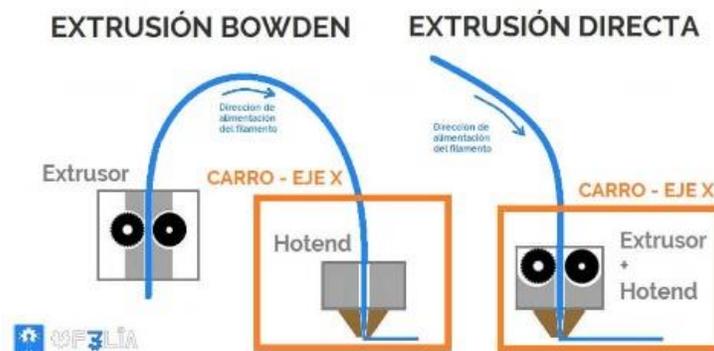


Figura 22. Configuraciones y diferencias entre extrusión Bowden y extrusión directa que puede tener una impresora 3D (Fuente: Lorenzo, 2020).

En una impresora 3D es importante contar con un sistema de extrusión de buena calidad, de esto depende que de la boquilla salga el material correctamente extruido y con sus propiedades intactas. El sistema de extrusión es el que permite que las capas sean generadas sin protuberancias o fallos de huecos por la mala alimentación del engranaje, o por pérdidas térmicas importantes que generaran una mala fusión.

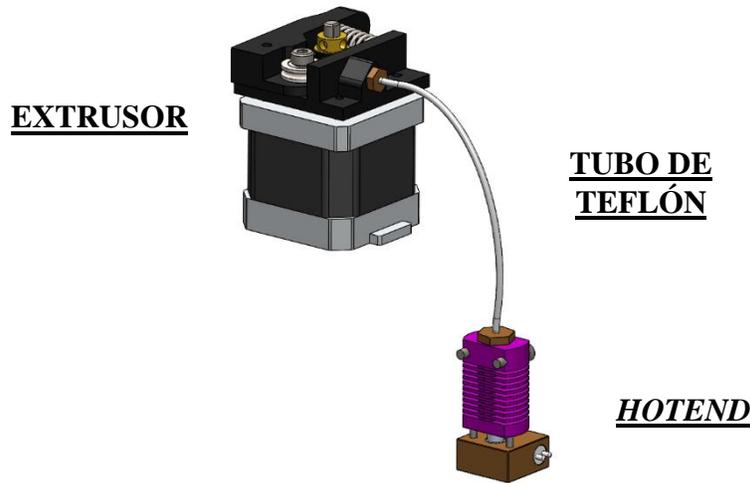


Figura 23. Extrusor utilizado en la impresora 3D de configuración Bowden con una guía de teflón, uniendo el inyector a la parte de tratamiento térmico. Modelo del extrusor: MK10.

La impresora 3D que se utiliza para la realización de pruebas de impresión utiliza un extrusor Bowden. Esta configuración permite tener bajas inercias en los desplazamientos de los ejes, en donde el motor a pasos está anclado a la estructura de la impresora 3D, y mediante una guía de teflón trasporta el filamento al *Hotend* permitiendo impresiones de más alta calidad y rápidas.

4.2 Componentes del sistema de extrusor

El sistema de extrusión cuenta con dos componentes principales.

- **El extrusor:** es el componente encargado de empujar el filamento hacia el *hotend* mediante la guía de tubo de teflón, éste está conformado por un motor a pasos, una rueda dentada y un rodamiento de presión principalmente.

- **Hotend:** es el encargado de recibir el filamento, fundirlo y expulsarlo por la boquilla para depositarlo sobre la cama calentada de la impresora 3D; principalmente está conformado por el disipador de aluminio, sensor de temperatura, elemento de calentamiento y una boquilla.

Como anteriormente se comentó, el sistema de extrusión cuenta con dos zonas de trabajo, las cuales son las encargadas de realizar un trabajo en específico. Cada zona juega un papel fundamental para la calidad de impresión, los parámetros de temperatura y velocidad; éstos están definidos esencialmente por el área de la boquilla con la que se trabajará. En este caso, la boquilla más común es de 0.4 mm, y conforme al material y el diámetro del filamento, se toman en cuenta cambios en la temperatura y velocidad. A estos cambios se añade la información dada por el fabricante, el cual maneja sus propios parámetros, aunque de esto existen ciertos estándares de temperatura de fusión y las velocidades de impresión por capa.

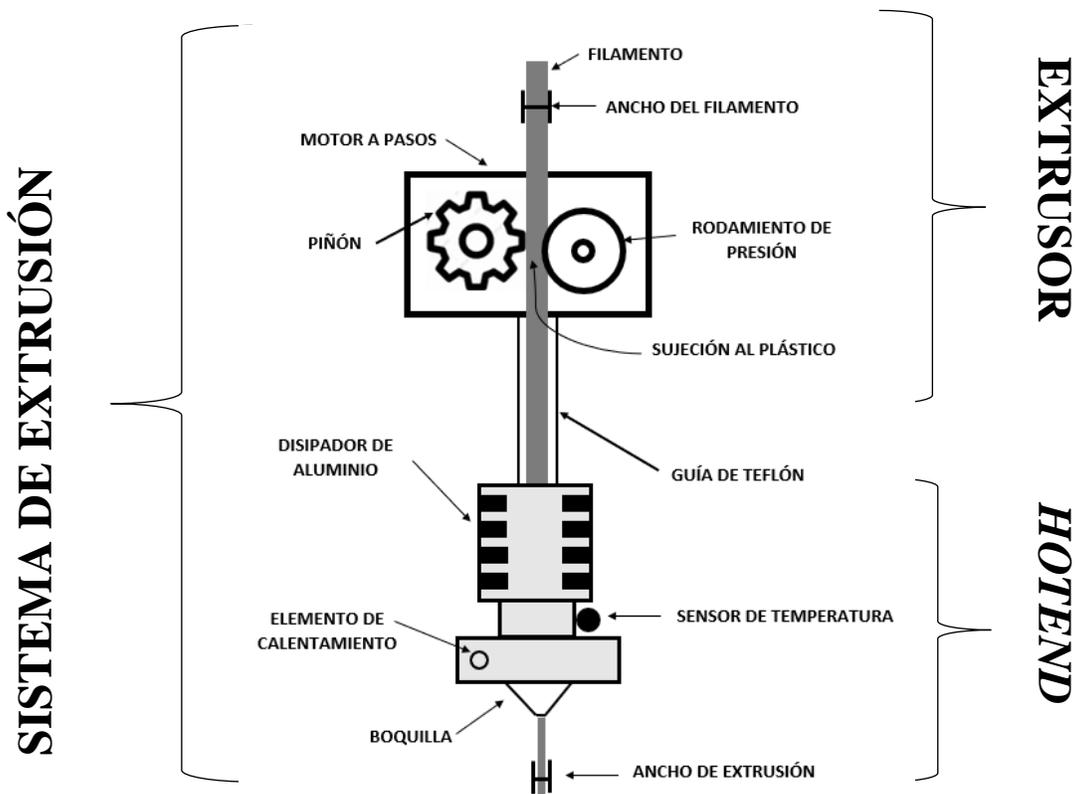


Figura 24. Descripción de partes del extrusor y el hotend.

Como se muestra en la Fig. 24 el sistema de extrusión cuenta con dos partes importantes para su funcionamiento, las cuales tienen que estar en constante comunicación para su funcionamiento correcto. Debido que cada zona cuenta con características específicas en las cuales se le pueden realizar modificaciones y/o sustituirlos por mejoras, aquí es donde permite realizar modificaciones en sus parámetros y en la parte estructural del sistema.

En la Fig. 25 se describen las zonas de trabajo térmico, esto permite identificar y desarrollar los modelos matemáticos para obtener los parámetros de temperatura y velocidad en los que estarán sometidos cada vez que la boquilla cambie su diámetro.

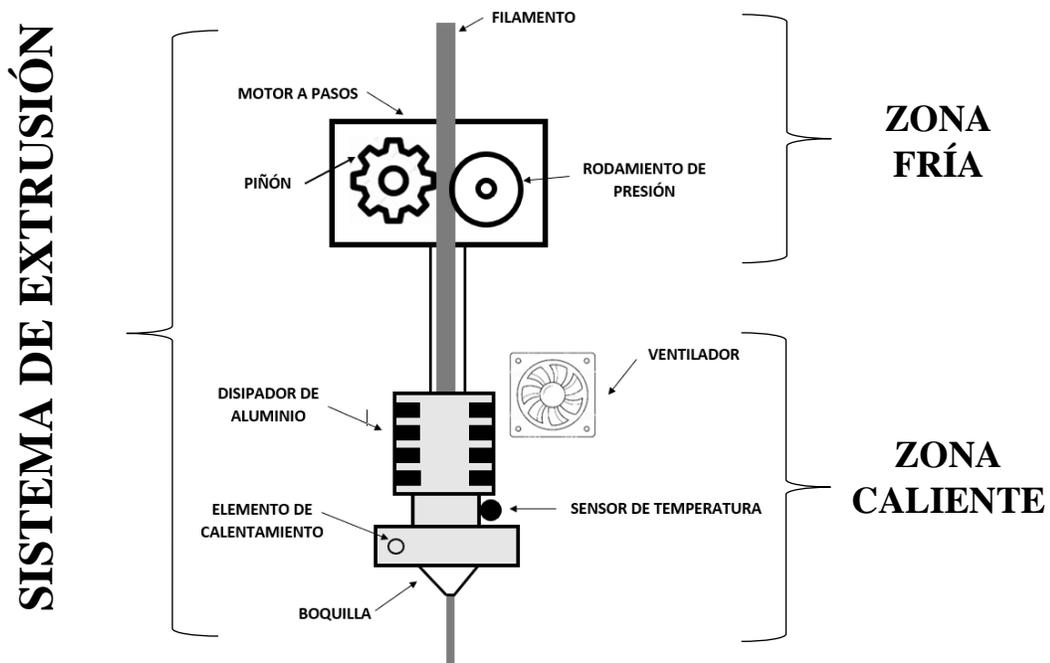


Figura 25. Zonas del extrusor y los componentes principales en cada zona.

La velocidad y la cantidad de filamento que es arrastrado al interior del *hotend* por parte de la rueda dentada para su fundición, es tan importante como la temperatura a la que está sometida la boquilla; ésta permite que el material fluya de manera armónica. Esto tiene que variar dependiendo del tipo de filamento utilizado en la geometría del objeto que se desea imprimir. La presión que genera el rodamiento de presión junto con el piñón que atrapan el filamento es vital para asegurar un flujo correcto, ya que a demasiada presión el filamento se

atascará y a una baja presión el filamento resbalará, y en ambos casos el filamento no avanzará. Comprender la anatomía del extrusor y el *hotend* es fundamental para lograr impresiones de buena calidad.

4.2.1 Zona caliente

La zona caliente es la encargada de fundir el material. Adecuando el tipo de *hotend* (V6 y Volcano) y la boquilla bajo el régimen del diámetro del filamento y sus propiedades mecánicas.

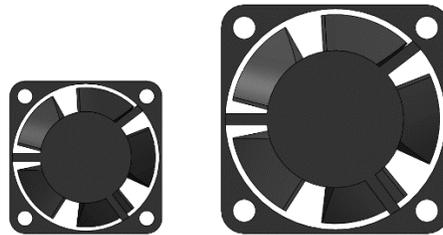


Figura 26. Reducción del tamaño de manera virtual del ventilador de 12 volts, para mejorar la calidad y visibilidad de las figuras futuras.

En la Fig. 27 se describen los componentes del sistema del cual está conformado el *hotend*. Por medio de esta figura se permite identificar y desarrollar los modelos matemáticos para la obtención de parámetros de temperatura dentro del sistema, estos parámetros estarán sometidos a un cambio cada vez que la boquilla cambie su diámetro.

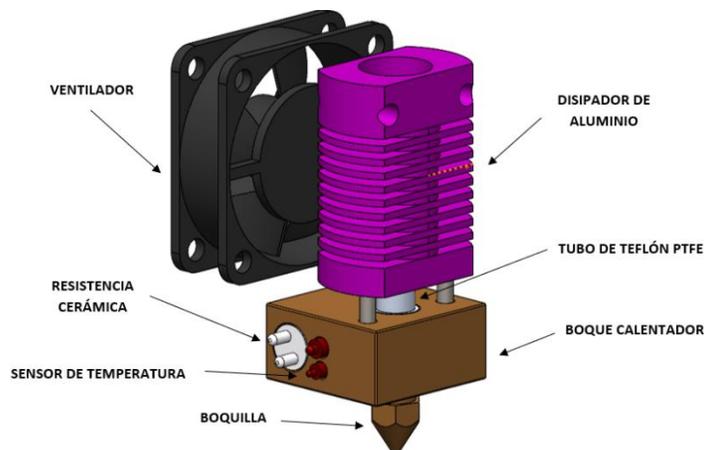


Figura 27. Descripción de los elementos principales del *hotend*.

Teniendo conocimiento de las partes que conforman al *hotend* se puede determinar el trabajo que realizan, y a su vez encontrar los tipos de modificaciones que se requieren para tener un trabajo más eficiente a la hora de imprimir con diferentes diámetros y no tener deficiencias a la hora de probar el sistema de manera experimental.

El *hotend* se puede dividir en dos subconjuntos con las cuales permite entender el comportamiento de la fundición del filamento y el control de la temperatura en cada cambio del diámetro de la boquilla.

El modelo físico del *HOTEND* se divide en 2 partes principales las cuales son:

- Zona de disipación térmica
- Zona de calentamiento

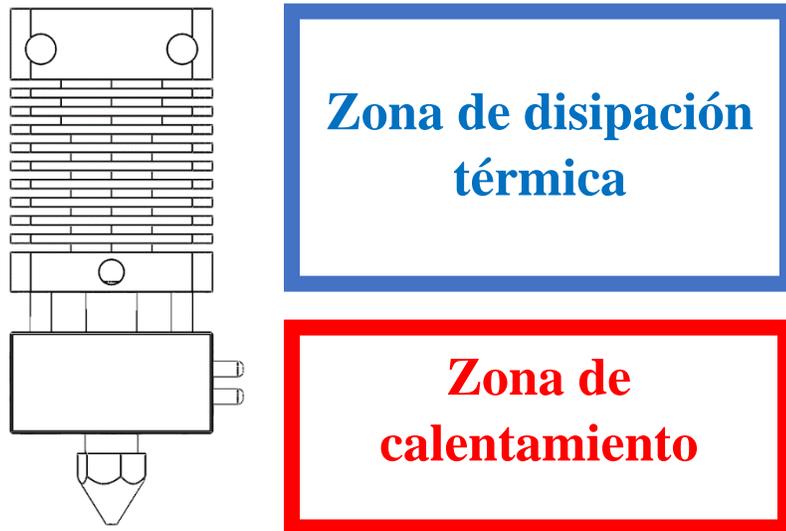


Figura 28. Zonas en el que se divide el conjunto de partes del *hotend* de una impresora 3D.

Para comprender el comportamiento básico del sistema de fundición del filamento en el *hotend* es crucial entender la funcionalidad y características de las piezas que conforman ambas zonas; una vez que el filamento entra a la zona de disipación térmica, el calor proveniente de la zona de calentamiento es removido. La consecuencia de que esta zona no disipe de manera correcta el calor ocasionaría que el filamento sufra un calentamiento excesivo, lo que provocaría un ablandamiento del filamento, impidiendo el avance correcto

a lo largo de la zona del disipador, y, en consecuencia, un atascamiento interno en el sistema. El punto crítico de este problema es ocasionado en el punto donde ambas zonas se unen por un tubo de teflón PTFE. El disipador es una pieza importante para realizar el retiro del calor excesivo en esa zona y con ello se suele acoplar uno o más ventiladores realizando una convección forzada en el sistema.

El modelo físico del *HOTEND* se divide en dos partes principales, las cuales son:

- Ventilador y disipador
- Resistencia cerámica y bloque calentador

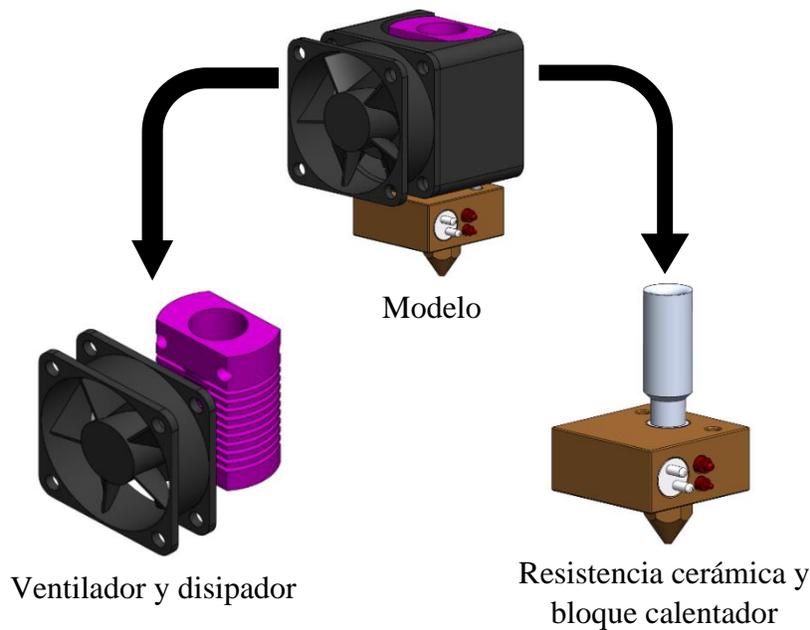


Figura 29. Modelo físico del *hotend*.

En ambas partes existen mecanismos de transferencia de calor presentes, el ventilador con el disipador presenta pérdidas convectivas a través de las aletas de éste y al mismo tiempo que el ventilador realiza una transferencia de calor por convección forzada.

La transferencia de calor ocurre siempre que exista una diferencia de temperatura, es decir, un desequilibrio termodinámico entre un cuerpo o cuerpos, ocurriendo una transferencia de

energía del cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura. Dicha transferencia puede ocurrir por diferentes modos (tipo de proceso por el cual ocurre la transferencia de energía). Los modos de transferencia de calor son: conducción, convección y radiación.

La ley de enfriamiento de Newton toma en cuenta dos fenómenos completamente diferentes:

- La emisión y absorción de radiación térmica
- La transferencia de calor por conducción y convección

4.2.1.1 Transferencia de calor por conducción.

La conductividad térmica, se define como la capacidad de un cuerpo para transferir energía. Consiste en la transferencia de calor entre dos puntos de un cuerpo, que se encuentran a diferente temperatura sin que se produzca transferencia de materia entre ellos. Para la conducción de calor la ecuación o modelo utilizado es la Ley de Fourier (Ec. 1).

$$\ddot{q}_{\text{conducción}} = \frac{-k\Delta T}{dx} \quad (4.1)$$

Donde:

$\ddot{q}_{\text{conducción}}$ = flujo de calor por conducción

ΔT = Diferencial de temperatura ($T_{\text{fusión}} - T_{\text{ambiente}}$)

dx = espesor del material

k = es la propiedad de transporte conocida como conductividad térmica y es característica del material de la pared de estudio

4.2.1.2 Transferencia de calor por convección.

La transferencia de calor por convección se lleva a cabo entre un fluido en movimiento (movimiento macroscópico) y una superficie sólida, cuando éstos se encuentran a diferente temperatura. Si el movimiento del fluido se genera a partir de diferencias de densidad ocasionadas por variaciones en su temperatura, el flujo de calor se denomina de convección natural. Por otra parte, cuando el movimiento del fluido se origina por una diferencia de

presiones o bien, por una fuente mecánica externa, la transferencia de calor se considera por convección forzada.

Sin importar la naturaleza del proceso de transferencia de calor por convección la ecuación o modelo apropiado es la Ley de enfriamiento de Newton (Ec. 2):

$$\ddot{q}_{convección} = h (T_s - T_\infty) \tag{4.2}$$

Donde:

- $\ddot{q}_{conducción}$ = flujo de calor por conducción
- $(T_s - T_\infty)$ = diferencia de temperatura
- H = el coeficiente de transferencia de calor por convección.
- T_s = temperatura de la superficie
- T_∞ = temperatura del fluido.

4.2.1.3 Modelo matemático del control de tiempo de fundición

Las aletas del disipador son las encargadas de tener las pérdidas convectivas del sistema al medio ambiente.

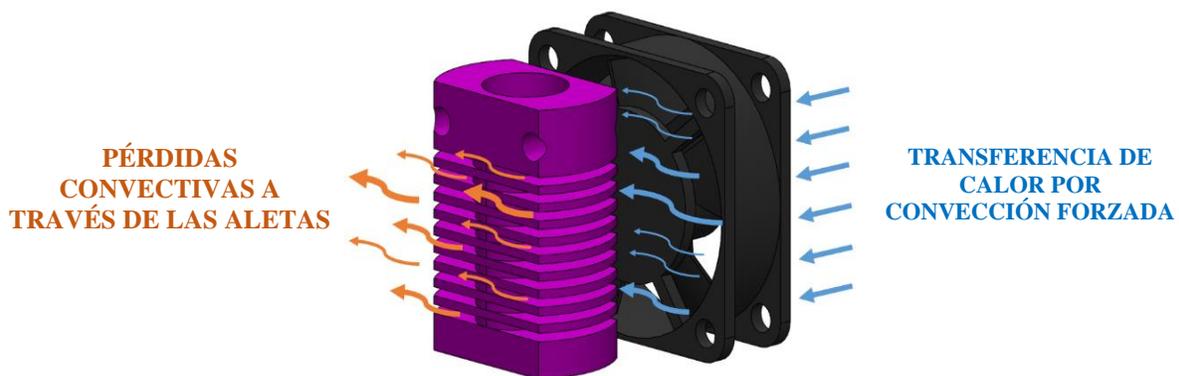


Figura 30. Sistema de transferencia de calor en la zona fría del *hotend*, la cual considera las pérdidas convectivas en las aletas.

Las pérdidas convectivas del sistema son obtenidas mediante la Ec. 3.

$$\dot{Q} = \frac{-kA\Delta T}{e} \quad (4.3)$$

Donde:

- k = conductividad térmica
- A = área de recubrimiento del aislante
- ΔT = diferencia de temperatura $(T_{\text{fusión}} - T_{\text{ambiente}})$
- e = espesor del aislamiento
- \dot{Q} = pérdidas de energía al entorno

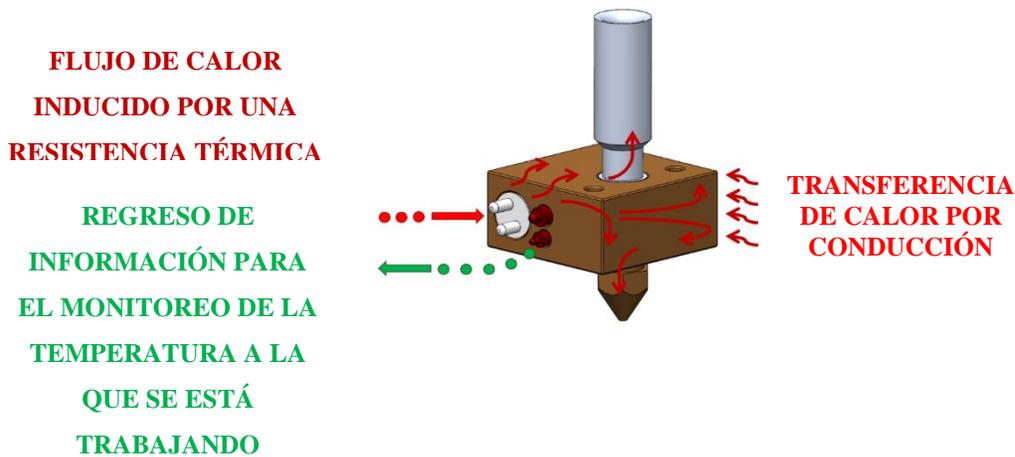


Figura 31. Sistema de transferencia de calor en la zona caliente del *hotend*, la cual considera el flujo de calor inducido por una resistencia cerámica con un regreso de información mediante un sensor de temperatura.

Se puede deducir que el modelo matemático eficiente para el cálculo de la energía necesaria para llevar el bloque calentador a la temperatura deseada, y asumiendo una temperatura del medio ambiente de 25°C, está dado por la Ec. 4.

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T = m C_p (T_{\text{fusión}} - T_{\text{ambiente}}) \quad (4.4)$$

Donde:

- \dot{m} = flujo másico
- C_p = calor específico a presión constante
- ΔT = diferencia de temperatura $(T_{\text{fusión}} - T_{\text{ambiente}})$

Q = transferencia de calor requerida

Considerando que la energía suministrada por el dissipador está dada por \dot{Q} , el tiempo requerido para poner a punto el sistema de extrusión está dado por la Ec. 5.

$$t = \frac{Q}{\dot{Q}} \tag{4.5}$$

Donde:

Q = energía requerida para fundir el material

\dot{Q} = pérdidas de energía

t = tiempo requerido para fundir el material

Donde t es el tiempo requerido para calentar el material conforme al diámetro de la boquilla, tomando en cuenta pérdidas y variables que se puedan presentar en la parte experimental con un porcentaje de error controlado.

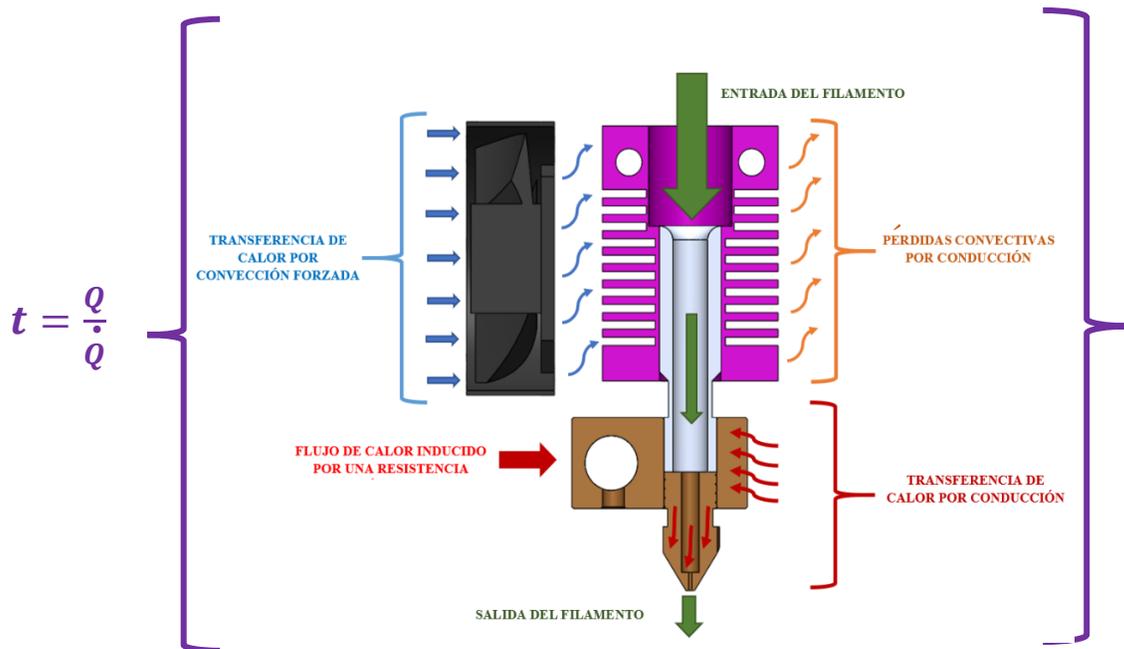


Figura 32. Sistema de tratamiento térmico en el *hotend*.

Para el análisis térmico se deben tomar en cuenta ciertas consideraciones, entre ellas, las propiedades físicas de los elementos para el análisis. Dichas propiedades como la conductividad térmica, la densidad, el calor específico, entre otras, están en función de la temperatura, presión y la concentración. Cuando el fluido a considerar, para este caso plástico, se considera como una sola sustancia, entonces las propiedades físicas solo dependen de la temperatura y presión. Debido a que los sistemas son de baja presión, entonces dichas propiedades quedan solo en función de la temperatura.

La conductividad térmica, se define como la capacidad de un cuerpo para transferir energía. La conductividad térmica de un sólido es mayor que la de un líquido, que a su vez es mayor que la de un gas. Entonces, para tener una menor conductividad térmica y así una disminución en la transferencia de energía, el sistema de fusión del plástico requiere una temperatura específica en consideración a cada diámetro del mecanismo de diámetro variable.

El calor específico se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad.

La densidad es la cantidad de masa por unidad de volumen.

4.2.2 Modelo matemático de control de temperatura

Asumiendo que el sistema se encuentra en estado permanente, y donde el flujo másico de entrada es igual al flujo másico de salida, según el principio de conservación de masa.

$$\dot{m}$$

La ecuación de conservación de la energía despreciando las pérdidas de energía cinética y potencial está dada por la Ec. 6.

$$Q = \dot{m} \Delta h$$

$$\Delta h = C_p \Delta T$$
(4.6)

Donde:

Δh : diferencia de entalpia

Por lo tanto:

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T$$
(4.7)

Donde:

- Q = energía requerida para fundir el material
- \dot{m} = flujo másico
- C_p = calor específico a presión constante
- ΔT = diferencia de temperatura

Entonces, el sistema puede ser modificado de forma externa para un mejor trabajo en los cambios de diámetro de la boquilla, utilizando herramientas de control ajenas a las de la impresora 3D.

4.3 Zona fría

La zona fría está constituida por el motor a pasos, que es el encargado de empujar el filamento a través de la guía de teflón. Está formado por una rueda dentada y un rodamiento, el cual ayuda en apretar el filamento hacia la rueda dentada (piñón).

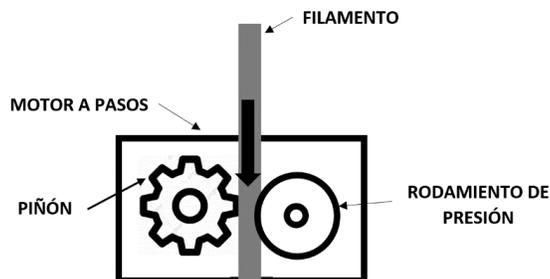


Figura 33. Sistema de inyección del extrusor.

Esta zona es la que controla la inyección del filamento conforme el *hotend* funde el material y lo deposita sobre la plancha formando el objeto a imprimir. Es importante recalcar el comportamiento de éste, ya que su inyección no es continua, sino que depende del caudal, en gran medida porque la mayoría de los objetos tienen zonas muertas de material que es donde el extrusor tiene que frenar su inyección y a continuación realizar una inyección más rápida o lenta.

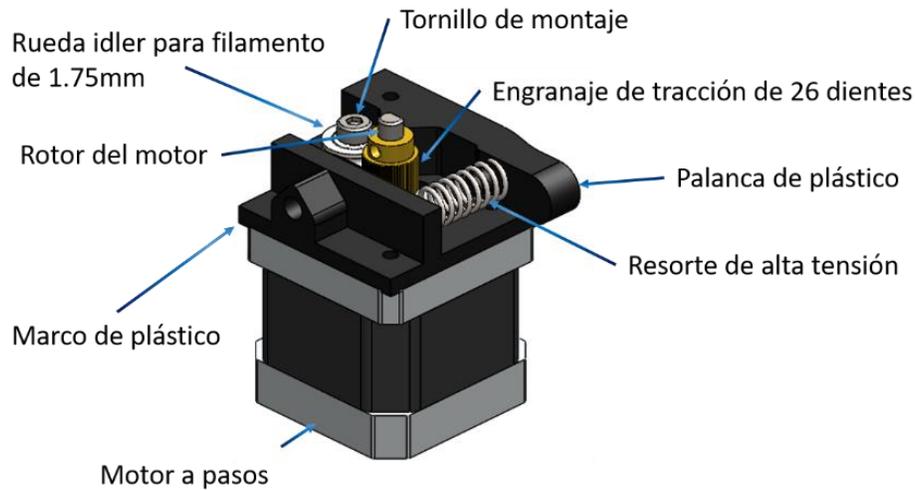


Figura 34. Descripción de los elementos principales del extrusor.

4.3.1 Modelo matemático para control de velocidad de inyección

De las ecuaciones anteriores se obtiene un flujo másico, con el cual es posible calcular el caudal:

$$Q^* = \frac{\dot{m}}{\rho} \tag{4.8}$$

Donde:

- Q^* caudal
- ρ = densidad
- \dot{m} = flujo másico

Considerando que para régimen de flujo laminar el caudal esta dado como:

$$Q^* = vA \quad (4.9)$$

Donde:

Q^* caudal
 v = velocidad
 A = área

A partir de la ecuación del caudal, es posible determinar la velocidad de flujo:

$$v = \frac{Q^*}{A} \quad (4.10)$$

Donde:

v = velocidad
 Q^* caudal
 A = área

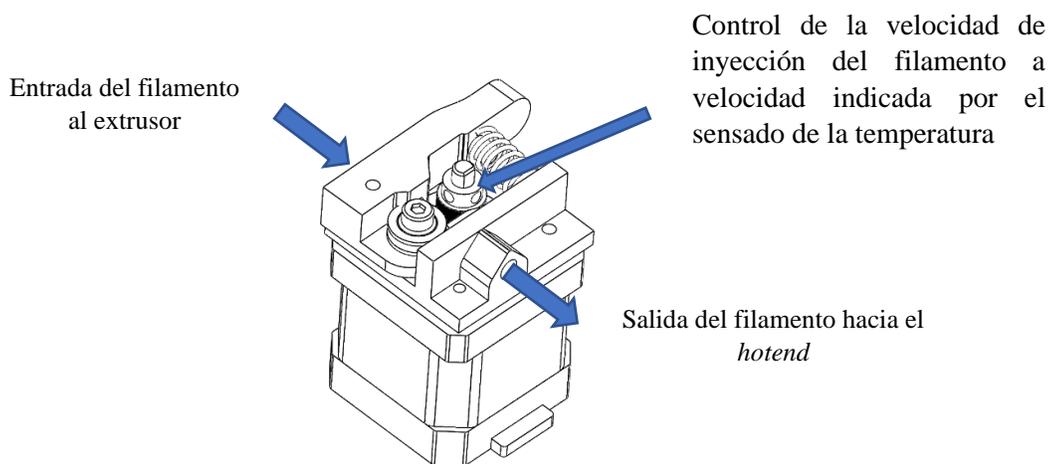


Figura 35. Sistema del control de velocidad de inyección en el extrusor.

Con el estudio realizado en el sistema de extrusión de una impresora 3D, se obtienen los modelos matemáticos que rigen el comportamiento del sistema. Esto demuestra que sus parámetros pueden llegar a ser alterados de una manera significativa. Los parámetros de temperatura y velocidad obtenidos de los modelos matemáticos fueron realizados bajo los estándares de las propiedades mecánicas ya establecidas, tomando en consideración 2 materiales primarios en la impresión 3D los cuales son:

- Ácido poliláctico (PLA)
- Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)

Estos materiales fueron escogidos tomando en consideración su facilidad de compra y por las propiedades mecánicas que manejan dando un trabajo más simple y limpio a comparación de otros filamentos como, la madera, metal, plásticos de alta densidad, entre otros.



Figura 36. Rollo de filamento para impresora 3D.

A continuación, en la Tabla 11 se muestran las propiedades mecánicas de cada uno de los dos materiales en una tabla de constantes mecánicas. Los parámetros de velocidad y temperatura se presentan conforme al diámetro del mecanismo propuesto.

En las Tablas 12 y 13 se muestran los parámetros de velocidad y temperatura que requiere cada diámetro del mecanismo (diámetros con incremento de 0.1, en un rango de 0 a 1 mm).

Tabla 11. Tabla de constantes mecánicas.

Tabla de constantes mecánicas			
Símbolo	Unidades	PLA	ABS
A	(m ²)	0.0001130	0.0001130
e	(m)	0.0001	0.0001
C_p	(j/kg °K)	1800	1240
ρ	(kg/m ³)	1250	1205
K	(w/m*°K)	0.13	0.17
T_a	(°K)	298.15	298.15
\dot{m}	(kg/s)	0.0003141	0.0003028
Q^*	(m ³ /s)	0.000002513	0.000002513

4.4 Parámetros de velocidad y temperatura del material conforme al diámetro

Tabla 12. Parámetros de velocidad y temperatura del material PLA conforme al diámetro.

PLA							
Diámetro (mm)	T_d (°C)	T_a (°K)	V (mm/seg)	Q (J/s)	t (seg)	A_b (m ²)	\dot{Q} (watts)
0.1	185	458.15	8	26	1.10619469	0.0000078	-23.5040
0.2	188	461.15	10	26.5	1.10671673	0.0000314	-23.9447
0.3	193	466.15	15	27.3	1.10619469	0.0000706	-24.6792
0.4	195	468.15	20	27.6	1.10519361	0.0001256	-24.9730
0.5	204	477.15	40	29.1	1.10667006	0.0001963	-26.2951
0.6	211	484.15	60	30.2	1.10527972	0.0002827	-27.3234
0.7	216	489.15	80	31	1.10485817	0.0003848	-28.0579
0.8	220	493.15	100	31.7	1.10663106	0.0005026	-28.6455
0.9	223	496.15	120	32.1	1.10361615	0.0006361	-29.0862
1	227	500.15	130	32.9	1.10872217	0.0007854	-29.6738

Tabla 13. Parámetros de velocidad y temperatura del material ABS conforme al diámetro.

ABS							
Diámetro (mm)	T_d (°C)	T_a (°K)	V (mm/seg)	Q (J/s)	t (seg)	A_b (m ²)	\dot{Q} (watts)
0.1	215	488.15	8	30.9	0.84659854	0.0000078	-36.4990
0.2	218	491.15	10	31.3	0.84422783	0.0000314	-37.0753
0.3	220	493.15	15	31.7	0.84624728	0.0000706	-37.4595
0.4	223	496.15	20	32.1	0.84394176	0.0001256	-38.0358
0.5	229	502.15	40	33.1	0.8446377	0.0001963	-39.1884
0.6	233	506.15	60	33.8	0.84591359	0.0002827	-39.9568
0.7	235	508.15	80	34.1	0.84529387	0.0003848	-40.3410
0.8	240	513.15	100	34.9	0.84500563	0.0005026	-41.3015
0.9	242	515.15	120	35.2	0.84441427	0.0006361	-41.6857
1	245	518.15	130	35.7	0.84473049	0.0007854	-42.2620

4.5 Conclusión del capítulo 4

En conclusión, en el modelado del sistema de extrusión se demuestra que es posible variar los parámetros de temperatura y velocidad para adaptarlos al sistema de cambio de diámetro. Estos parámetros pueden ser modificados de manera conjunta en el sistema interno de la impresora si se obtiene el código fuente de su sistema de control, o durante el proceso de fabricación de una impresora no comercial. Si éste no es el caso, la manera en la que los parámetros pueden ser colocados dentro del sistema de extrusión es de forma externa con un sistema de control ajeno al de la impresora, contando con un controlador y las herramientas necesarias para colocarlas dentro del conjunto de cada parte del extrusor y del *hotend*. Esto reduciría la precisión y se tendrían alteraciones extras al del sistema de extrusión interno, pero no limitando su funcionalidad en su totalida

Capítulo 5

Diseño del sistema de extrusión

En este capítulo se presentan los diseños que fueron creados, las pruebas virtuales y experimentales que fueron realizadas para conocer mejor el sistema de diámetro variable.

5 Diseño del sistema de extrusión

En la realización de un mecanismo que permita la variación de diámetros, se requiere un sistema complejo en cuanto a su movimiento, sumando la precisión y fricción entre cada componente que lo conforma, mediante un movimiento suave y que no contenga fugas de material en su interior. Además, este mecanismo tendrá una mayor demanda térmica en el sistema ya que se requerirá más calor para llegar a las temperaturas ideales de extrusión cuando se requiera de diámetros más grandes.

Al momento de realizar la extrusión de un filamento sobre la cama calentada es necesario que la boquilla alcance la temperatura ideal para la fusión del material dentro de él, y así, pueda ser transportado desde el bloque calentador a la cama calentada; esto con el fin de evitar capas de mala calidad, sobre todo en las primeras capas que son las que determinarán la calidad de la estructura. Al diseñar un mecanismo es importante señalar que al momento de cambiar de diámetro no se interrumpa el paso del filamento extruido. El extruido del filamento tiene que ser continuo, esto debido a que las capas anteriores pueden llegar a secarse si el proceso de trabajo tarda demasiado en continuar, y esto traerá errores en cuanto a la adición del material y comprometiendo la estructura general del objeto que se está imprimiendo.

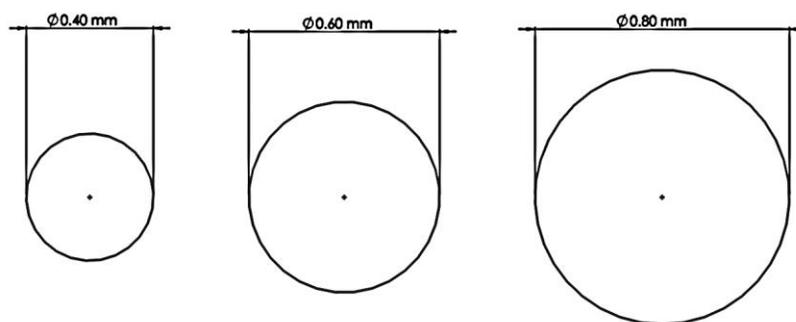


Figura 37. Diámetros estándares de bocanillas.

La realización de un nuevo mecanismo que cumpla estas características tiene que emplear un movimiento angular, ya que este movimiento permite obtener un semicírculo por el cual es ideal para controlar el diámetro del filamento extruido.

Como se mencionaba en los capítulos anteriores, la única manera de realizar los cambios de las boquillas es pausar o detener por completo el proceso de extrusión del filamento, ya que si no es así la máquina sufriría un grave daño en la parte estructural y en el sistema eléctrico. Esto ocurre por el regreso de corriente eléctrica al sistema de control mediante los motores.

5.1 Análisis del sistema de variación radial

Para satisfacer un diseño funcional se hizo una investigación sobre los tipos de mecanismos ya existentes que cambiaban sus diámetros y se presentaron las distintas ideas en las que se podría llegar a variar los diámetros de inyección de material.

Se consideraron desde el mecanismo de mordazas que ocupa un taladro o un torno hasta el intercambio de boquillas automático como una CNC, pero ya que la mayoría presentan problemas por fugas de material, o que el proceso de impresión se ve comprometido a detenerse, se prefirió buscar mecanismos ajenos al uso de la mecánica tradicional.

Se realizó un estudio de mecanismos de apertura de iris, esto refiriéndose al comportamiento de la pupila del ojo, la cual se contrae y dilata realizando una variación de diámetros limpios.



Figura 38. Comportamiento de dilatación y contracción de la pupila del ojo.

El mecanismo iris o bien conocido en algunas áreas como apertura de diafragma, es un mecanismo mediante un movimiento complejo que realiza una apertura ajustable. Este tipo de movimiento cumple con la función de un flujo de material constante y sin la necesidad de forzar al sistema a detenerse, en este caso el flujo es de fotones.

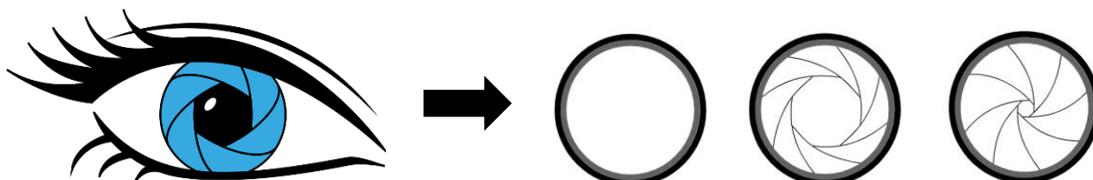


Figura 39. Representación del movimiento de la pupila a un plano digital.

El mecanismo iris o de diafragma es un mecanismo que en su mayoría funciona en las cámaras fotográficas bajo el nombre de obturador, es el mecanismo de la cámara que controla el tiempo que va a estar expuesto el sensor a la luz. Un obturador maneja un promedio de 10 hojas de plástico para proporcionar una apertura continua y semicircular.

La función del obturador como antes se mencionó es semejante a la del diafragma: es la que regula el sensor a la exposición a la luz, mientras que el obturador controla el tiempo de exposición.

Una cámara fotográfica maneja dos tipos de obturadores:

- **Obturador central:** está situado dentro del objetivo, está compuesto por varias láminas o cuchillas metálicas las cuales se abren de forma radial, simulando un diafragma. El disparador de la cámara mantiene abiertas las cuchillas mientras transcurre el tiempo de exposición a la luz.
- **Obturador de plano focal:** está situado delante del sensor, está conformado por dos cortinas de aleaciones plásticas; el movimiento de este obturador está controlado por la electrónica interna de la cámara.

En términos de conveniencia para el sistema de apertura de diámetro o boquilla de diámetro variable, el obturador central es uno de los candidatos ideales para realizar el trabajo deseado dentro del sistema de extrusión de filamento en una impresora 3D.



Figura 40. Obturador central genérico de una cámara fotográfica profesional.

Ya que el obturador cuenta con el mecanismo que se desea emplear en la impresora, se requiere conocer tanto la configuración como el movimiento que se genera de manera electrónica o mecánica en la cámara.

Al realizar un despiece del obturador se obtienen los componentes principales, los cuales conforman este mecanismo. Al visualizar el funcionamiento del mecanismo de apertura radial dentro del obturador, se pueden apreciar las 3 zonas más importantes, las cuales son las encargadas de realizar el accionamiento de apertura y contracción de este.



Figura 41. Visualización de los componentes principales en el mecanismo de apertura radial dentro de un obturador de cámara fotográfica (Fuente: Nikon (2020)).

Estas tres partes son las encargadas de otorgar diámetros con un accionamiento de giro angular en una sola zona, por lo tanto, solo se necesita de un movimiento para que se obtengan diámetros deseados. Asimismo, las aletas son las que se mueven de manera dependiente al movimiento del rotor con una base guía que ayuda a las aletas a obtener este movimiento armónico en cada una.

Conociendo el mecanismo y su configuración, se realiza un análisis completo de las tres partes principales del mismo. Son analizadas de manera individual y el conjunto para lograr un mejor entendimiento de su diseño y la interacción entre todas.

En la siguiente imagen los componentes de la cámara se realizaron mediante un programa CAD, el cual permite replicar las piezas y su ensamble para un mejor análisis. El siguiente diseño generado por computadora fue realizado tomando en cuenta diferentes aspectos del mecanismo dentro del obturador de manera experimental, esto gracias la obtención de un obturador de cámara, realizando la extracción de los componentes principales para el desarrollo de este proyecto.

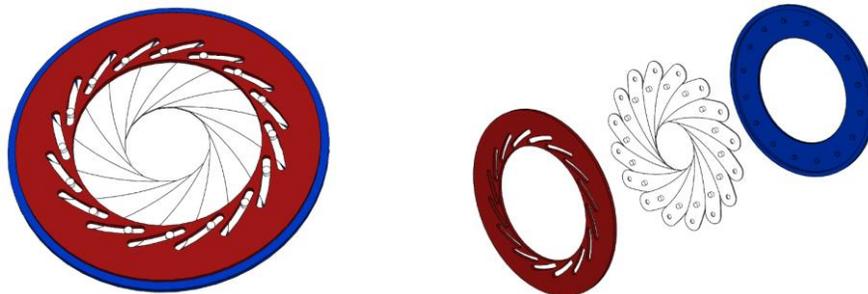


Figura 42. Piezas principales realizadas en un ambiente de diseño asistido por computadora.

En cuanto a la parte experimental en el reconocimiento de las piezas, se logró observar unas complicaciones en su configuración y en la parte funcional del sistema. Esto se debió a que dos de las tres piezas venían unidas sin forma de extracción limpia. Estas piezas fueron recortadas y extraídas de tal manera que se pudieran visualizar los detalles y la manera en que se realiza los accionamientos del mecanismo.

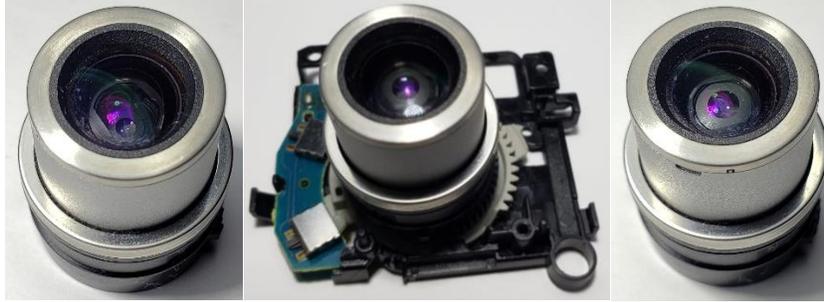


Figura 43. Desarme del obturador de manera experimental.

Para tener un mejor entendimiento en cuanto al diseño del mecanismo se les asignó un nombre para identificarlos mejor. El mecanismo cuenta con tres partes principales, como se indica en la Fig. 44:

1. Rotor
2. Chuchillas
3. Plato base

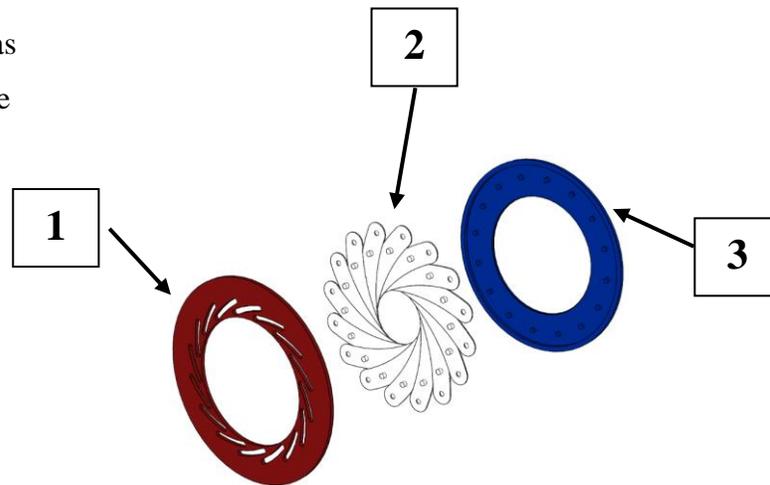


Figura 44. Partes que conforman el mecanismo de movimiento radial.

Se realizó un análisis de movimiento en las tres piezas y sus características particulares, en cuanto al movimiento del rotor conforme a la pieza fija del plano base.

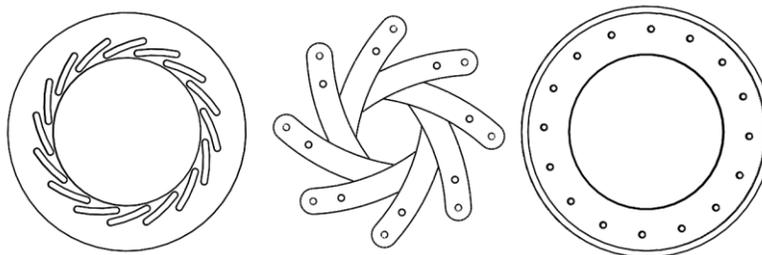


Figura 45. Funcionamiento del mecanismo.

Las cuchillas están unidas mediante un perno al plato base, el cual tiene un movimiento angular con respecto a la unión de ambas piezas. Este movimiento se realiza mediante el rotor, el cual tiene ranuras guías, las cuales encajan con pernos en una posición distinta en las chuchillas a comparación de los ya unidos en la tapa base. Al estar la cuchilla unida a la tapa base, el rotor realiza un movimiento angular forzando a la cuchilla a seguir los surcos, esto realizando el movimiento natural de la cuchilla unida a la tapa base.

Al darle un giro al rotor los surcos posicionan a las cuchillas a intercalarse entre sí, esta acción permite que las cuchillas se encimen entre ellas de tal manera que al desplazar el rotor a un mayor ángulo las cuchillas se intercalaran aún más disminuyendo el diámetro del obturador.

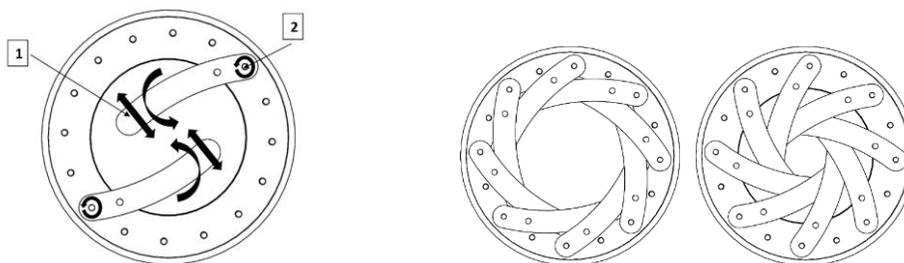


Figura 46. Movimiento natural de las cuchillas unidas a la pieza plato base.

1. Movimiento natural de las cuchillas: movimiento angular y bidireccional.
2. El movimiento natural de las cuchillas es generado por parte de la unión del perno en la pieza plato base al claro de la pieza cuchilla.

La cuchilla cuenta con dos sujetadores: un perno y un claro, los cuales son utilizados para brindar un movimiento angular a la cuchilla. Con esto el claro, como anteriormente se mencionó, está unido al perno de la pieza plato base, el cual le otorga su movimiento natural. El perno de la cuchilla se encuentra unido a la ranura del rotor realizando un deslizamiento por toda la ranura en el momento de realizar el movimiento rotacional de la pieza rotor, por lo que al moverse la cuchilla toma el ángulo impuesto por el rotor. Asimismo, todas las

cuchillas unidas al plato base y a las ranuras de la pieza rotor son posicionadas en conjunto, realizando así una apertura radial entre ellas.

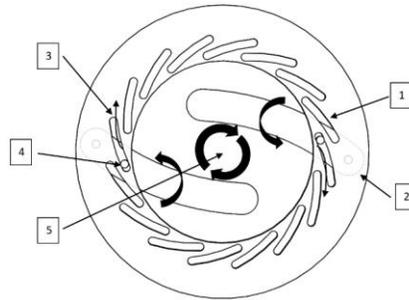


Figura 47. Movimiento natural de las cuchillas unidas a la pieza plato base.

1. Ranura guía en el rotor, encargada de darle movimiento a la cuchilla.
2. Cuchilla.
3. Movimiento del perno de la cuchilla entre la ranura guía del rotor.
4. Unión del perno con el claro, en este contacto la fricción deberá ser la menor posible para tener un movimiento más limpio entre todas las cuchillas.
5. Movimiento que genera el rotor.

Realizando un análisis detallado en cuanto a la configuración del mecanismo, se puede observar que son movimientos complejos y limpios, por lo tanto, es necesario realizar un análisis en el área donde se tiene pensado trabajar, que en este caso es en el área de la manufactura aditiva. Esta área es demandada por dos problemas los cuales son:

- Material fundido, con ello altas temperaturas de fusión.
- Presiones dentro del caudal del sistema.

El mecanismo interno de un obturador es el ideal para el sistema de inyección variable, el cual conlleva a variar el diámetro de la boquilla para realizar distintos acabados en las piezas impresas y así ahorrar tiempo de producción en ellas.

Para esto se tomará el funcionamiento base del mecanismo de 3 piezas para realizar las adaptaciones pertinentes en el nuevo sistema. Los principales problemas están en el material del mecanismo y en la configuración de las cuchillas, ya que estas son intercaladas para realizar el movimiento deseado.

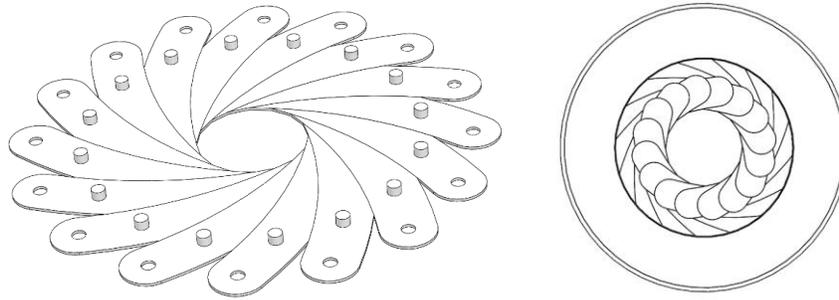


Figura 48. Configuración de las cuchillas en su sistema de movimiento.

Las cuchillas al intercalarse entre sí, permiten la flexión entre ellas logrando el movimiento angular deseado, pero esto es contraproducente a la hora de trabajar con metales: tendrían que ser cuchillas de metal flexible, pero a la vez resistente a la presión y a las temperaturas con las que se desea trabajar. Además, la fricción entre las cuchillas puede provocar atascamientos entre ellas, ya que se manejan coeficientes de fricción mayores a los del plástico, junto con calor y la presión a la que es inyectado el filamento.

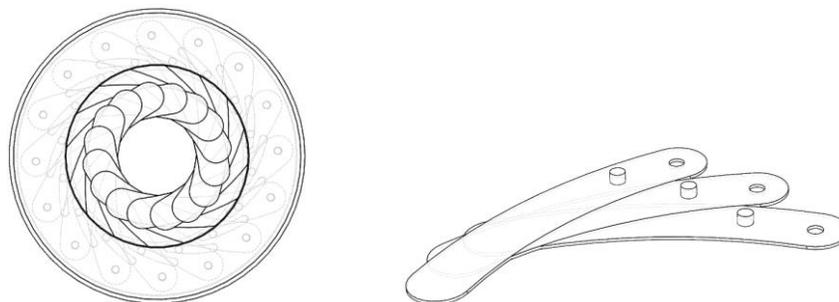


Figura 49. Intercalación de las cuchillas en el sistema de variación radial.

Para solucionar el problema se requiere un nuevo modelo de cuchillas y un nuevo modo de realizar sus movimientos dentro de las dos piezas que conforman al mecanismo. En las cuchillas se requieren estos puntos:

- Rigidez en las cuchillas.
- Movimiento sin piezas que se intercalen entre ellas mismas.
- Menor número de cuchillas en el sistema.
- Un rotor con menor fricción en su giro.
- Un plato base con un sistema de movimiento traslacional.
- Ranuras en ambas piezas (plato base y rotor).

5.2 Metodología de solución

5.2.1 Reestructuración de las piezas para un nuevo tipo de mecanismo

Se realizó un rediseño completo a las piezas cuchillas, se hizo una mejora en la geometría, la cual tendrá un mayor control en el rozamiento entre ellas. Asimismo, en los sujetadores se cambió el tipo de movimiento con la cual trabajará la nueva pieza.

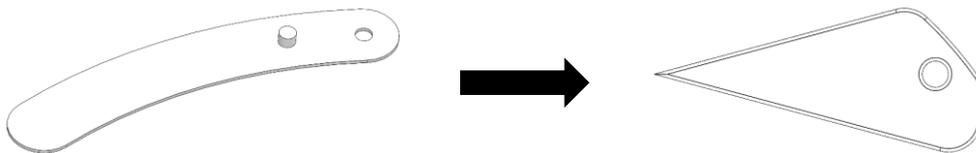


Figura 50. La realización del rediseño por parte de la pieza “cuchilla”.

En la realización de un rediseño completo del mecanismo se optó por analizar los movimientos para el tipo de desplazamiento que tendrán las nuevas cuchillas, ya que éstas no se intercalarán si no tienen un deslizamiento entre ellas.

Como se analizó en el mecanismo original, las cuchillas realizaban un movimiento angular, sobre el eje del claro de dicha pieza. Para la adaptación, este sistema fue reemplazado por una guía por parte de la cuchilla, el cual se traslada mediante una ranura en el plato base.



Figura 51. Nuevo sistema de movimiento por parte de las cuchillas.

La nueva cuchilla cuenta con:

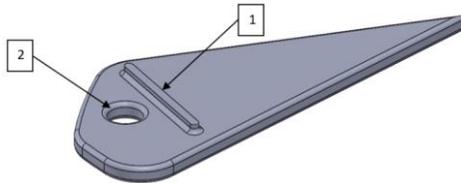


Figura 52. Diseño de la nueva pieza “cuchilla” y su movilidad en el mecanismo.

1. Una guía: la cual permite un desplazamiento traslacional sobre el plato base.
2. Barrenado: sustituyendo el perno que anteriormente se usaba para unirla con el rotor, esto permite reducir el contacto total entre las dos piezas.

El movimiento que realiza la cuchilla es traslacional, eliminando por completo el método del mecanismo original. En la siguiente figura se señalan los movimientos que realiza el mecanismo con su nuevo tipo de base.

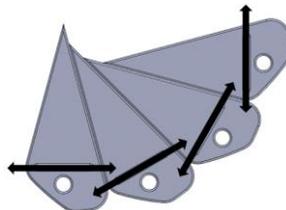


Figura 53. Movimiento traslacional de las cuchillas.

Las piezas plato base se rediseñaron de tal manera que satisficiera el movimiento traslacional de las cuchillas y le brindara un soporte adecuado, esto para evitar una descompensación entre ellas que ocasionara trabamientos en el sistema de apertura o cierre.

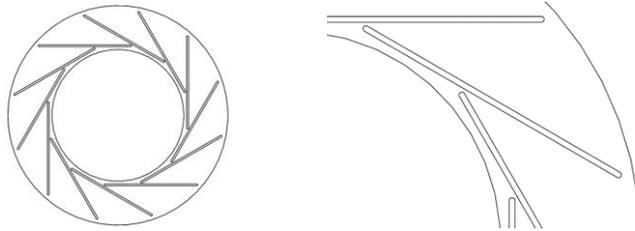


Figura 54. Configuración de la nueva ranura en la pieza "plato base".

La traslación de la cuchilla sobre el plato base siempre será realizado por un movimiento traslacional, este accionamiento como anteriormente se mencionó proporciona una mayor estabilidad en el mecanismo, por lo que las cuchillas tendrán un volumen mayor al de las cuchillas originales. El plato base tiene un diseño más compacto en cuanto a su configuración, también se vuelve más completo en el momento de obtener sus ranuras.

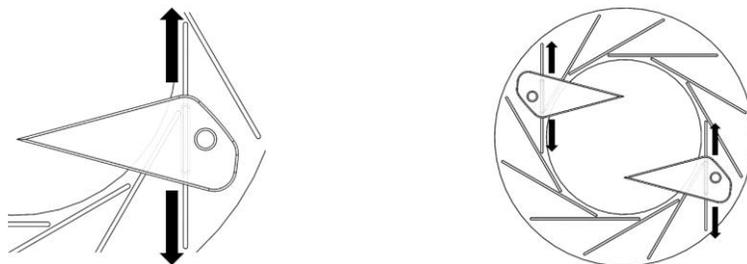


Figura 55. Movimiento traslacional que realiza la pieza cuchilla encima de la pieza plato base, la cual realiza un movimiento limpio y ligero.

Estas ranuras contienen una guía y cuenta con una tolerancia de $\pm 5\%$ a la guía de la pieza cuchilla. Esta tolerancia se tiene bajo el coste de un deslizamiento más suave, ya que la guía se podría trabar si se tiene más tolerancia, el cual generaría un juego excesivo en la cuchilla, y una tolerancia menor generaría un trabamiento en cuanto una cuchilla de todo el juego se inestabilice y el rotor no pueda girar de una manera fluida.

La pieza rotor fue la menos afectada en cuanto a un rediseño, esto porque la pieza conserva un movimiento rotatorio. La pieza solo fue rediseñada en sus ranuras ya que la cuchilla sufrió los cambios de posición en la sujeción de ella.

La pieza rotor solo se rediseñó a la altura y medidas de la cuchilla, conservando su configuración original. Las ranuras fueron reducidas en cuanto a la distancia que se tenía originalmente, para evitar que las piezas se presionen mucho entre ellas si de alguna forma el mecanismo quisiera sobrepasar su límite de giro. Asimismo, se hicieron más anchas para tener una mayor estabilidad con el perno de cada pieza y tener un mayor agarre de arrastre a la hora de rotar.

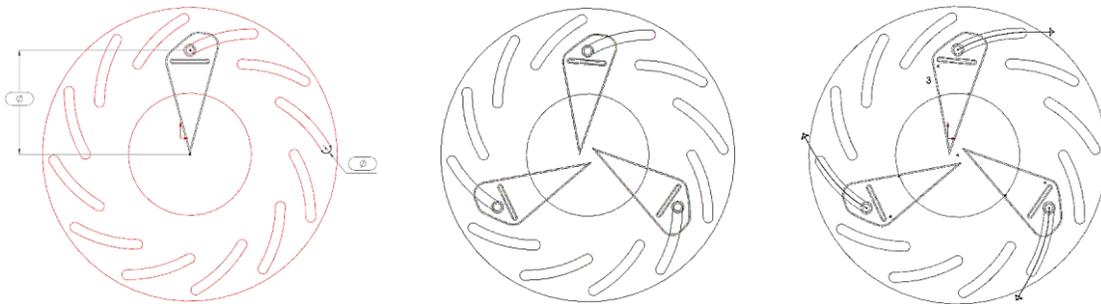


Figura 56. Adaptación de la pieza rotor conforme a la nueva configuración del mecanismo de variación de diámetro.

Posteriormente, se realizaron pruebas y análisis del nuevo sistema de variación de diámetro, todo bajo el concepto del ambiente virtual CAD, estas pruebas tuvieron ciertos puntos importantes como:

- Verificación del funcionamiento de las aspas juntas y contacto tangencial.
- Verificación del movimiento, para saber si el movimiento es constante y no causa cambios en su geometría.

Con estos dos puntos, se comprobó la funcionalidad del nuevo mecanismo, haciéndolo óptimo para el tipo de trabajo en el que se desea aplicar

5.2.2 Especificaciones generales del sistema

Las especificaciones generales para el sistema de diámetro variable son presentadas en la Fig. 57, y en la Tabla 14 se indican los nombres de dichos componentes.

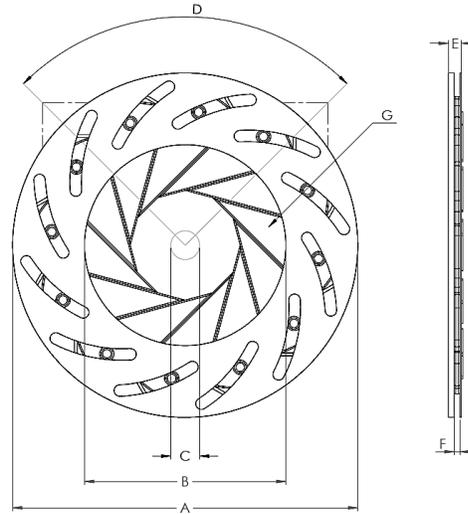


Figura 57. Especificaciones del sistema

Tabla 14. Componentes del sistema de diámetro variable.

A	Diámetro exterior
B	Apertura máxima
C	Apertura mínima
D	Ángulo del giro de la palanca
E	Grosor
F	Distancia entre hojas
G	Número de hojas

El nuevo mecanismo de diámetro variable presenta un diseño más acorde con el trabajo en donde se desea aplicar a comparación del mecanismo original (mecanismo iris u obturador), por lo que se realizaron tres distintas pruebas de diseño y funcionalidad. Estos conceptos tomaron la base de los tres componentes del mecanismo original con sus modificaciones.

5.2.3 Adaptaciones de las piezas de prueba virtual y experimental

5.2.3.1 Rediseños de los tres componentes principales

En la literatura no se encuentra este tipo de mecanismo con las especificaciones de trabajo deseadas, por lo que la forma de verificarlo es de manera experimental.

Para la realización de pruebas experimentales con el mecanismo de diámetro variable, se requirió un rediseño de las piezas en primer plano. Los rediseños en las tres piezas principales únicamente fueron aplicados en su unión y la geometría a tamaños considerablemente normales, así como piezas añadidas para conformar un mecanismo más completo y funcional. En la cuchilla se realizó una reestructuración en cuanto las uniones con las piezas plato base y rotor, esto con el fin de reducir errores dentro del movimiento y evitar trabamientos en los desplazamientos de ésta.

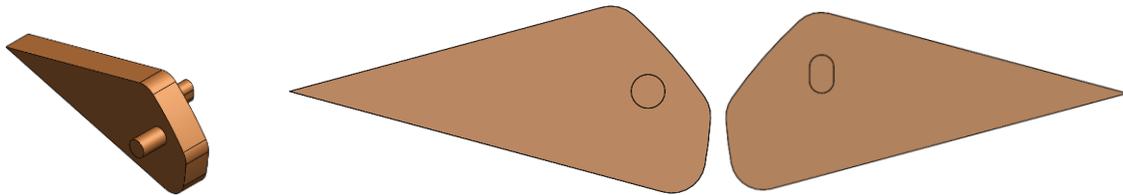


Figura 58. Primera corrección (Cuchilla).

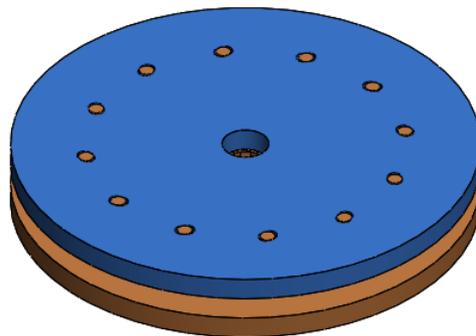
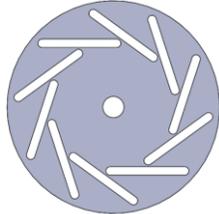
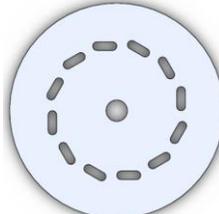
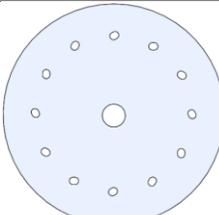
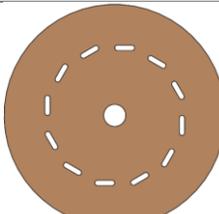


Figura 59. Acople con el siguiente nivel de piezas (cuchilla y cara superior).

Se realizaron cuatro correcciones importantes en el plato base:

Corrección	Pieza	Tipo de corrección
Primera corrección		Se adaptó el diámetro interior a 1 milímetro que sería su máximo diámetro.
Segunda corrección		Se redujeron las guías a un tamaño que solo permita abrir mecánicamente a su diámetro máximo.
Tercera corrección		Se hizo un ajuste en las dimensiones generales del disco para que fuese posible su maquinado.
Cuarta corrección		Ya que se adaptaron las guías y las dimensiones a un tamaño aproximado de operación, se hacen las primeras pruebas con otra pieza

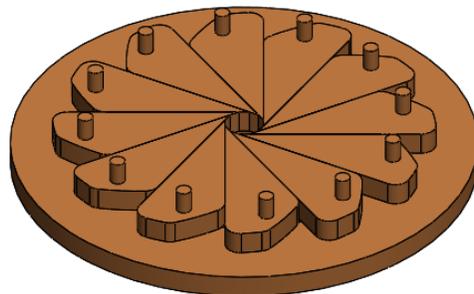
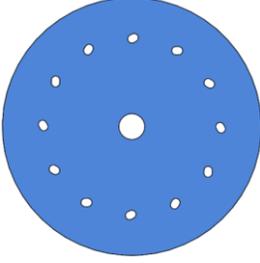


Figura 60. Acople con el siguiente nivel de piezas (cara inferior y cuchillas).

Se realizaron tres correcciones importantes en el rotor:

Corrección	Pieza	Tipo de corrección
Primera corrección		Se hizo un ajuste en las dimensiones generales del disco para que fuese posible su maquinado.
Segunda corrección		Se adaptó el diámetro interior a 1 milímetro que sería su valor máximo.
Tercera corrección		Se redujeron las guías a un tamaño que solamente permita abrir mecánicamente su diámetro máximo.

Con la información recolectada es posible crear un ensamble general el cual cumpla con los movimientos correctos de una manera virtual.

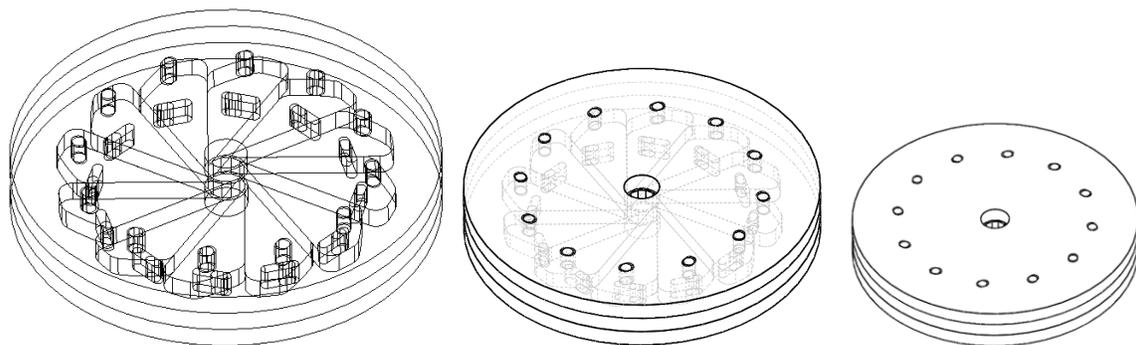


Figura 61. Estilos de visualización del mecanismo iris.

5.3 Prototipo experimental 1

Esta prueba experimental cuenta con un total de 6 piezas que lo conforman. En el mecanismo las tres piezas principales fueron adaptadas de tal forma que mantuvieran su función más una estabilidad estructural correcta.

Después de haber realizado un estudio para la obtención de los grados requeridos en el motor a pasos (ver anexo pág. 130), se encontró que el “Step motor 28BYJ-48” fue el indicado para realizar el trabajo de movimiento en el sistema.

Esta prueba proporcionó por primera vez la relación de posición y ajuste que tienen las piezas de manera experimental, por lo que es importante señalar que el mecanismo fue 100% fabricado en una impresora 3D. Fueron añadidas tres nuevas piezas en el mecanismo, entre ellas un motor a pasos y una base, la cual tendrá el soporte completo del sistema de apertura radial, así como un engranaje, el cual transmitirá el movimiento al sistema de apertura radial por parte del motor a pasos.



Figura 62. Perfiles para Prueba Experimental 1, motor a pasos, base y engranaje de 25 dientes.

Las tres piezas principales tienen un cambio estructural, modificando su estructura con el fin de que puedan ser piezas funcionales dentro del ensamble general.

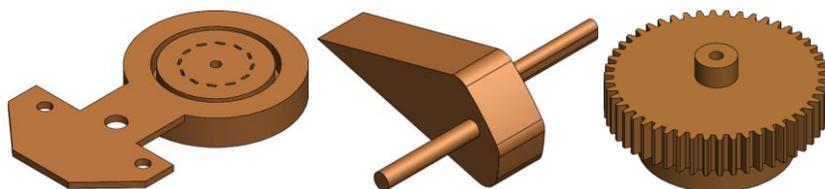


Figura 63. Perfiles para Prueba Experimental 1, plato base, cuchillas y rotor.

En el diseño del mecanismo de Prueba Experimental 1, se tiene un total de 6 piezas diferentes conformando el mecanismo. El ensamble está conformado por una base que servirá de soporte para el motor a pasos y del plato base, las cuchillas serán colocadas dentro del plato base con un total de 12 piezas; en términos de movimientos el sistema de transmisión está constituido por un sistema de dos engranajes, de tal manera que el piñón pequeño es el que transmitirá el movimiento del motor al piñón de mayor diámetro. Este piñón cuenta con la estructura base del rotor realizándole las ranuras necesarias para un ensamble con las cuchillas.



Figura 64. Configuración y ensamble para la realización de las primeras pruebas experimentales.

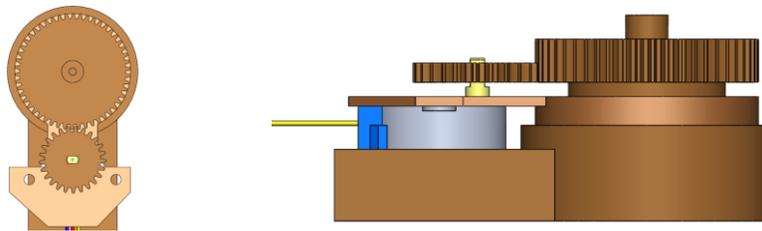


Figura 65. Vista superior del mecanismo y vista lateral del mecanismo de prueba 1.

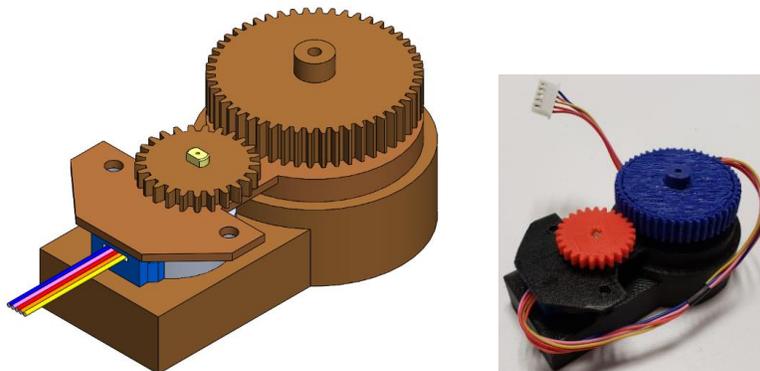


Figura 66. Vista isométrica del mecanismo de prueba 1.

En el mecanismo experimental 1 se visualizaron errores en cuanto al movimiento del rotor con las cuchillas. Esto indicó errores en el diseño de la cuchilla, ya que es ineficiente al momento de trasladarse sobre el plato base; independientemente que las piezas sean de plástico, las cuchillas pierden su rigidez en su ajuste con ambas piezas. La geometría de las cuchillas sufre rozamiento excesivo y crea un mal movimiento del rotor y bastante trabamiento en el plato base, por lo que se requiere reajustar la geometría de las cuchillas, las ranuras del rotor y una reestructuración en el plato base.

5.3.1 Adaptación del sistema de transmisión para la Prueba Experimental 1.

En la realización de la prueba 1 se tomó en cuenta un mecanismo compacto, el cual proporcione un movimiento limpio y a la vez práctico. Esta prueba es realizada para detectar errores en cuanto a los tres componentes principales y la manera en que interactúan entre sí de una manera física y no virtual.

El sistema de transmisión con el cual contará la Prueba Experimental 1 es denominado relación de transmisión (r_t) el cual cuenta con una relación entre velocidades de rotación de los dos o más engranajes, por lo que se toma la velocidad de salida y la velocidad de entrada.

$$r_t = \frac{w_2}{w_1} \quad \text{ó} \quad r_t = \frac{n_2}{n_1} \quad (5.1)$$

De tal manera que si:

$r_t < 1$, el sistema se denomina reductor

$r_t > 1$, el sistema se denomina multiplicador

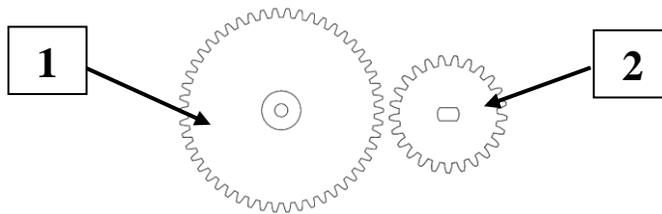


Figura 67. Relación de transmisión de engranajes.

siendo, ω_2 y ω_1 , las velocidades angulares (en rad/s) de los engranajes de salida y, de entrada, respectivamente;

n_2 y n_1 , las velocidades de giro (en r.p.m.) de los engranajes de salida y, de entrada, respectivamente;

5.4 Prueba Experimental 2

5.4.1 Modificaciones en el mecanismo de variación diametral

Los mecanismos que anteriormente fueron considerados tenían una transmisión por engranajes, ya que el motor y la boquilla de diámetro variable estaban relativamente cerca uno de otro, pero esto cambia con un nuevo mecanismo de transmisión, el cual es de manivela-biela. En la Prueba Experimental 2 se puede observar y analizar si el movimiento que se busca en el mecanismo es funcional, por la reestructuración general que se ha venido realizando en las diferentes etapas y todas las modificaciones geométricas y móviles otorgadas en las tres piezas principales.

5.4.1.1 Modificación en el plato base

La base tiene cambios importantes ante los diseños anteriores, limitando el número de cuchillas que se le pueden colocar: el diseño original constaba de 12 cuchillas y actualmente se redujo a 6 piezas. Este diseño se basa en una mejor adaptabilidad de la cuchilla tomando en consideración un mejor desplazamiento lineal y limitando aún más la fricción entre ambos, permitiendo que la cuchilla se mantenga dentro del riel y no tenga trabamientos.

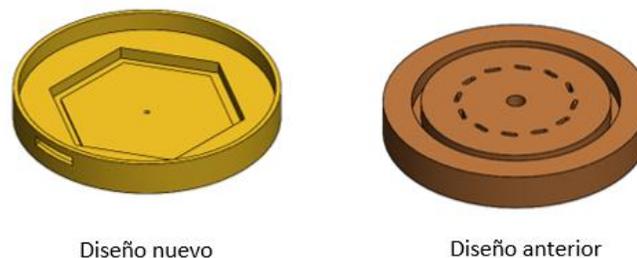


Figura 68. Nueva modificación en el plato base.

5.4.1.2 Modificación en las cuchillas

En las cuchillas se presenta una de las funciones más importantes dentro del sistema, ya que son las encargadas de otorgar los diámetros requeridos y soportar un desbordamiento de material fundido entre ellas. Es necesario que las piezas no presenten huecos y tengan un rodamiento suave, ya que, de no ser así, las cuchillas pueden llegar a atascarse entre sí y ocasionar daños directamente al motor. El rediseño de la pieza fue completo, desde modificar sus las pestañas con las que interactuaban con las piezas rotor y plato base, hasta sus dimensiones ya que al reducir de numero de cuchillas se incrementa el ángulo de ataque de la cuchilla. El incrementó del ángulo de la pieza se muestra en la Fig. 69 (la reducción del número de piezas utilizadas de 12 a 6 unidades).

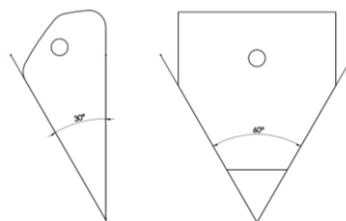


Figura 69. Incremento del ángulo de ataque en la cuchilla.

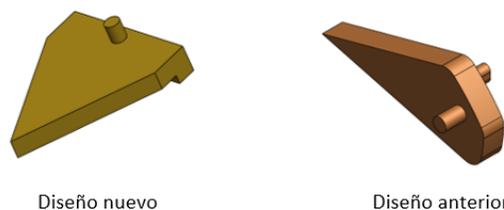


Figura 70. Nueva modificación en las cuchillas.

5.4.1.3 Modificación en el rotor

En el rediseño de la pieza rotor se tuvo un gran cambio en comparación con los diseños anteriores, que contaban con una superficie de contacto menor con las cuchillas. Esos diseños usaban ranuras más angulares, lo que les permitía girar más lento. En el rediseño el ángulo

de cada ranura es menor ya que no necesita que la cuchilla recorra una distancia grande, si no, lo que se busca es el movimiento uniforme y lento. En esta pieza el movimiento de las cuchillas conforme al movimiento del motor cuenta con una guía que se une directamente al motor conformando el mecanismo manivela-biela, la cual trasforma el movimiento angular del motor a un movimiento circular en las cuchillas.

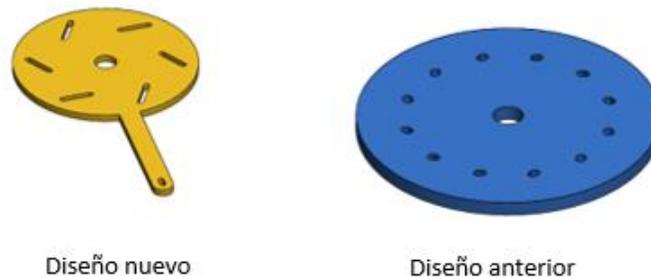


Figura 71. Nueva modificación en el rotor.

Especificaciones generales con las que cuenta el mecanismo para la Prueba Experimental 2.

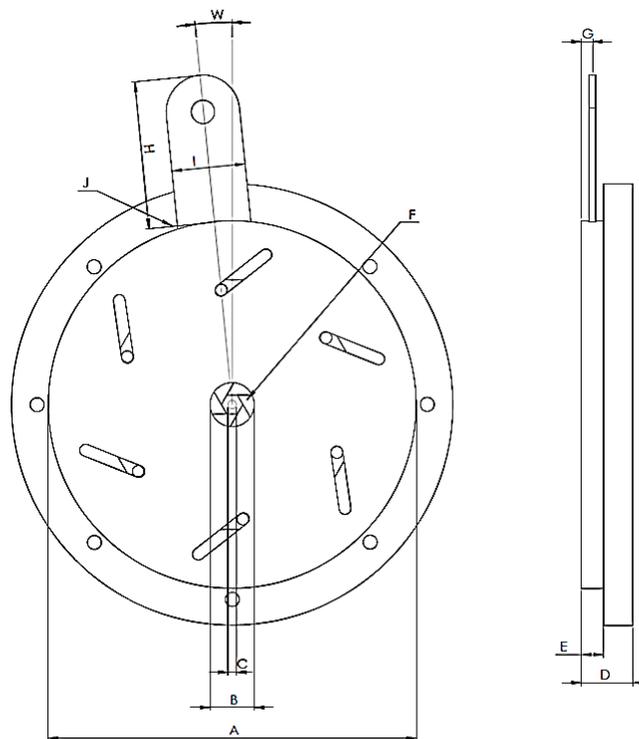


Figura 72. Especificaciones del sistema

Tabla 15. Componentes del sistema de diámetro variable.

A	Diámetro exterior
B	Apertura máxima
C	Apertura mínima
D	Grosor
E	Posición de las hojas
F	Número de hojas
G	Posición de la palanca
H	Longitud de la palanca
I	Diámetro del pasador de palanca
J	Hilo de palanca
K	Ángulo del giro de la palanca

5.4.2 Adaptación del sistema de transmisión para la Prueba Experimental 2.

El sistema de transmisión en este nuevo prototipo experimental está conformado por el sistema manivela-biela. De manera virtual se le acoplo un servomotor con el cual mediante la biela es otorgado el movimiento angular directamente en el sistema. El movimiento angular conserva el movimiento bidireccional de la pieza rotor por lo cual no hay alteraciones internas de movimiento en el sistema.

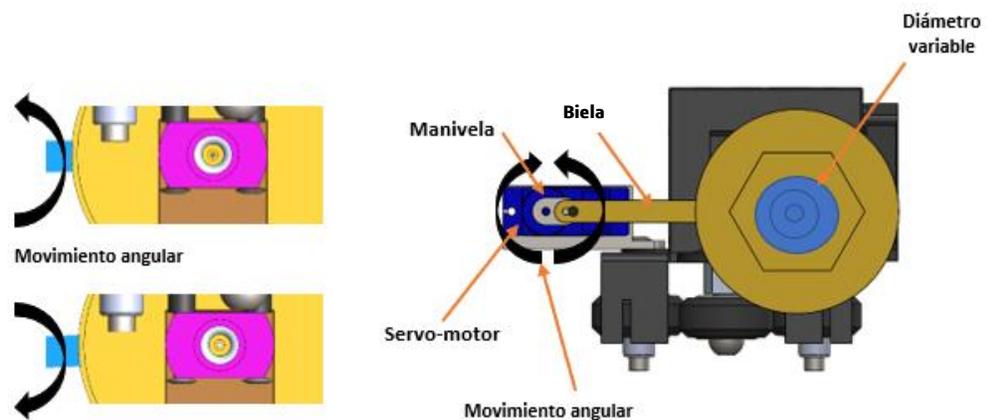


Figura 73. Transformación del movimiento del mecanismo

5.5 Prototipo experimental 2

Para la construcción del prototipo del mecanismo fue necesario llevar a cabo distintas pruebas, en las cuales se estudió el efecto de diferentes materiales en la calidad de las piezas. Se realizaron modificaciones importantes en cada pieza antes de proseguir al proceso de manufactura, con el objetivo de evitar fallas y gastos innecesarios. Anteriormente, se presentaron las piezas de una manera virtual y con base a las pruebas realizadas se llevó a cabo una serie de modificaciones, estas con la finalidad de tener un ensamble más sencillo y fácil de manufacturar. Como un primer acercamiento a la manufactura del mecanismo, se construyó a base de material PLA, sin embargo, los resultados obtenidos no fueron los esperados, por lo cual ese proceso fue parte de una prueba inicial la cual resultó fallida.

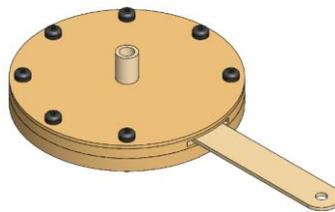


Figura 74. Prototipo 2, Prueba Experimental 2, verificación de la apertura y contracción de las cuchillas.

En la reestructuración de las tres piezas principales del mecanismo, las piezas que más fueron rediseñadas por completo, pero sin cambiar su sistema de movimiento principal, fueron las piezas plato base y cuchilla, de tal manera que a la pieza rotor solamente se le colocó una palanca, la cual servirá en el sistema de transmisión.

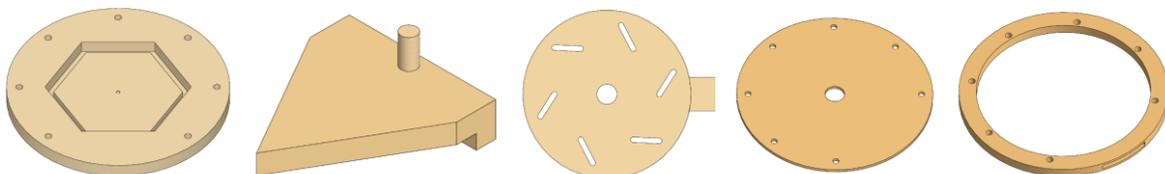


Figura 75. Reestructuración de las piezas principales para la Prueba Experimental 2.

En el prototipo se colocó una pieza con forma de anillo que cumple la función de sujetar la pieza “rotor” dentro del eje deseado, y, asimismo, darle más firmeza a la estructura mediante una tornillería.

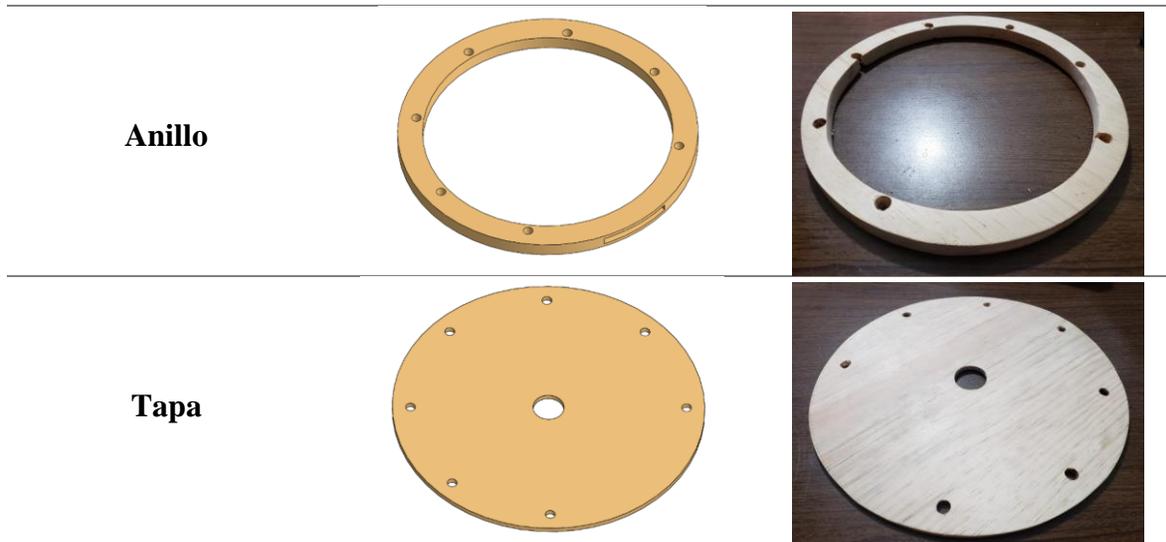


Figura 76. Anillo.

Desde el ambiente de diseño CAD se enviaron a manufacturar las piezas del mecanismo experimental, las cuales se fabricaron en madera de pino, con una escala de 5:1.

Piezas fabricadas en madera para la Prueba Experimental 2

Nombre de la pieza	Diseño de la pieza	Pieza manufacturada
Plato base		
Cuchillas		
Rotor		



Con la fabricación de las piezas en madera, se puede ensamblar y realizar pruebas de funcionamiento, estas pruebas cuentan con:

- El ensamble de las cuchillas en el plato base.
- Deslizamiento entre las cuchillas y las ranuras del plato base.
- Ensamble de las cuchillas con las ranuras del rotor.
- Deslizamiento de las cuchillas a través de las ranuras del rotor.
- Colocación del rotor dentro del anillo, así como el ensamblado del anillo al plato base.
- Verificación del movimiento rotacional del rotor dentro del anillo y con las cuchillas colocadas.
- Movimiento general de las cuchillas dentro del ensamble y con el sistema de transmisión.



Figura 77. Ensamble el prototipo en madera.

Como resultado se obtiene que el movimiento del mecanismo da una apertura de diámetro en su centro.



Figura 78. Apertura del mecanismo.

El mecanismo presenta un poco de dureza debido a la naturaleza del material y a la falta de precisión de las piezas, pero realiza el movimiento que se busca y la estabilidad que se desea en la apertura y contracción de las cuchillas. La variación de la apertura es mínima ya que solo se desea abrir en el límite de pared de 1 mm.

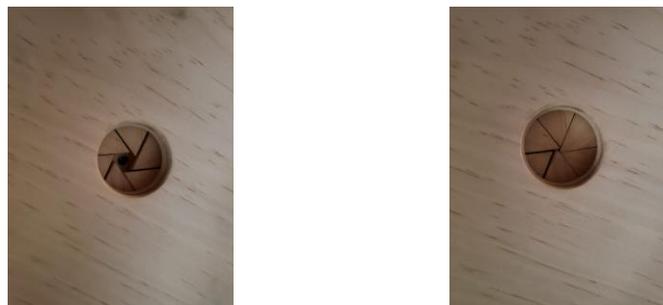


Figura 79. Variación de diámetro correcta.

Este prototipo ayudará a determinar lo eficiente que son las piezas para el mecanismo y las ventajas y desventajas que se presenten en su funcionamiento. Ya que, en el prototipo de madera, las piezas no son lo suficientemente lisas y perfectas en su maquinado. Con el mecanismo a escala 1:1, la manufactura será realizada en aluminio, mejorando la precisión de las piezas en su maquinado y teniendo un mejor coeficiente de fricción, el cual dará un mejor manejo del torque en el servomotor y en el mecanismo.

En el sistema de transmisión manivela-biela en la etapa de diseño se consideró el mecanismo que permitiera realizar la variación de diámetro, contando con el motor y la boquilla tenían una lejanía considerable para usar una transmisión de engranajes. Sin embargo, el mecanismo que se tenía contemplado era inestable y si bien transformaba un ángulo a un diámetro de manera correcta de manera virtual, en la parte experimental tenía muchas fallas y ocasionaba que el mecanismo tuviese un juego excesivo con el anillo, provocando trabamientos en cada momento.

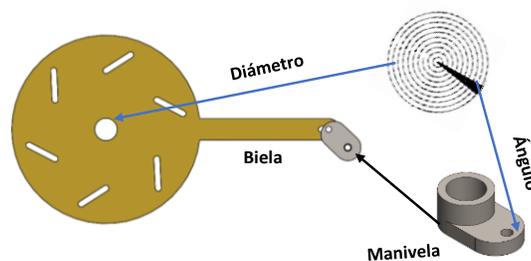


Figura 80. Movimiento del mecanismo de transmisión biela-manivela.

5.6 Prototipo experimental 3

5.6.1 Prototipo final

Con el sistema de transmisión anterior se tenían problemas a la hora de activar el mecanismo, por lo que se optó por renovar por tercera vez el sistema de transmisión por un sistema de mayor eficiencia y con un menor riesgo de introducir inestabilidad entre las piezas. Este mecanismo de transmisión está dado por un piñón, el cual tendrá un movimiento directo con la pieza rotor y será accionado mediante una cremallera

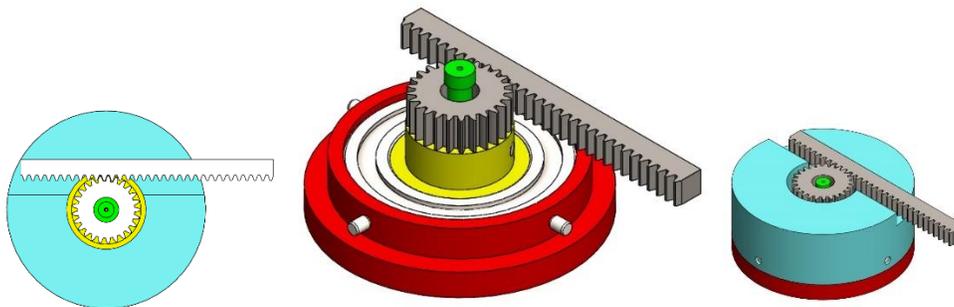


Figura 81. Transmisión de movimiento mediante un piñón y una cremallera.

Con base en el prototipo antes mencionado se encontraron fallas, las cuales afectaban el funcionamiento del mecanismo, de tal manera que se realizó un rediseño más en las piezas, las cuales al trabajar con un material mecánico se tendría un prototipo de mejor calidad.

5.6.2 Plato base de la Prueba Experimental 3

En la pieza plato base se tienen cambios importantes respecto a los diseños anteriores, el rediseño de las cuchillas, así como la base de ensamble entre ellas; este diseño se basa en una mejor adaptabilidad de la cuchilla tomando en consideración un desplazamiento lineal suave y permitiendo que la cuchilla se mantenga dentro del riel en todo momento.

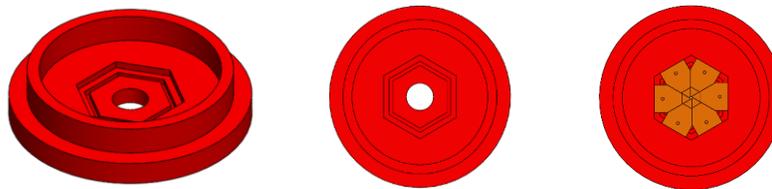


Figura 82. Plato base rediseñado para el prototipo final.

Para que las cuchillas tuvieran un mejor ensamble con el plato base, las ranuras tuvieron que ser reestructuradas de tal forma que las pestañas donde embonaban las cuchillas tuviesen mayor cobertura de arrastre. Esto fue solucionado con un desbaste adicional en un diámetro mayor al ya establecido. En el plato base fue colocado un saliente el cual serviría de soporte para poder sellar el mecanismo.

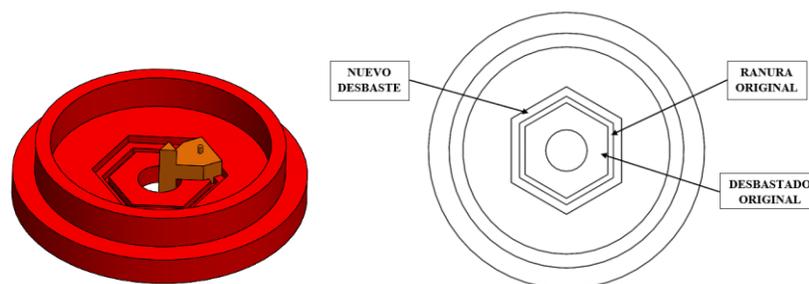


Figura 83. Base con la adaptación requerida para que la cuchilla no genere un trabamiento entre ellas.

La pieza rotor y la pieza plato base están unidas mediante un anillo, el cual permite que estas dos piezas queden fijas y tengan el soporte necesario para las demás piezas, lo que ocasiona que al estar presionadas generen un rozamiento muy grande hasta el grado de generar trabamientos.

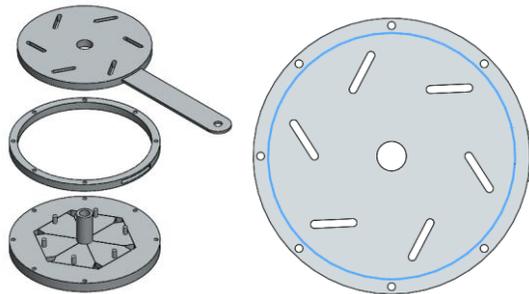


Figura 84. Contacto entre ambas piezas generan fricción y por consecuencia se genera un trabamiento y no permite un giro estable.

La solución fue el eliminar el anillo sujetador, el cual sostenía las dos piezas y en su lugar rediseñar la pieza plato base y acoplarle un rodamiento. El rodamiento fue seleccionado mediante la estandarización comercial y las características que satisficieran las dimensiones, dado que no estará sujeto a una carga radial.



Figura 85. Rodamiento de bola de dimensiones 45,75,10 (mm).

Este rodamiento fue ensamblado al nuevo diseño de la pieza plato base de tal manera que se logró eliminar por completo el rozamiento que generaban las dos piezas rotor y anillo, con la simplicidad de colocar un rodamiento y ensamblar dentro de él la pieza móvil.

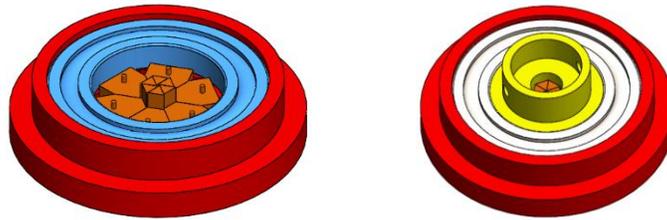


Figura 86. Rediseño en la pieza 2 a la cual se le colocó un rodamiento para eliminar el rozamiento en el rotor.

El cubo de la pieza también sirve para conectar con la pieza que soporta al mecanismo completo, y permite el ajuste con el cubo calentador el cual es la pieza tapa. Ésta, junto con tornillos opresores, dan una mayor resistencia al mecanismo en general.

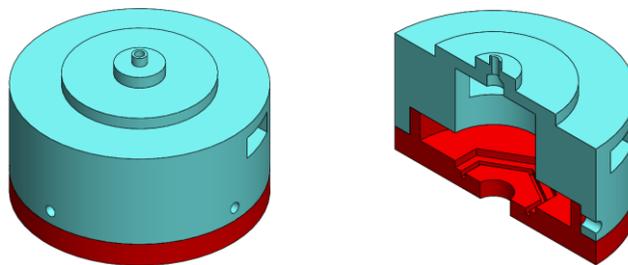


Figura 87. Pieza plato base y la pieza tapa ensambladas y rediseñadas en su función.

5.6.3 Cuchillas de la Prueba Experimental 3

Las cuchillas son las piezas más importantes en el mecanismo ya que éstas son las que dan directamente el diámetro de apertura de la boquilla, estas cuchillas se mueven de manera simultánea con respecto a las demás piezas.

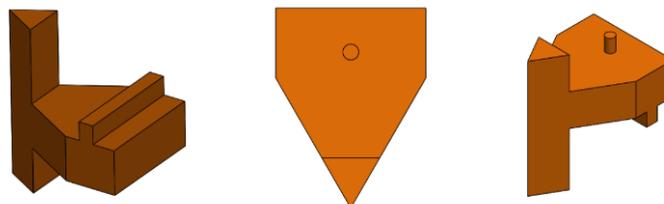


Figura 88. Se realizó un rediseño con la modificación de trasportar un material térmicamente tratado de tal manera tenga un menor riesgo en cuanto al desborde de material.

A las cuchillas se le añadieron puntas que atraviesan la pieza plato base y la pieza rotor, esto con el fin de trasportar el material a través de ellas y depositar el filamento sobre la cama calentada dándole un diámetro definido; también, se le añadieron pestañas, las cuales evitarán el tambaleo dentro de la pieza plato base al deslizarse de un lado a otro.

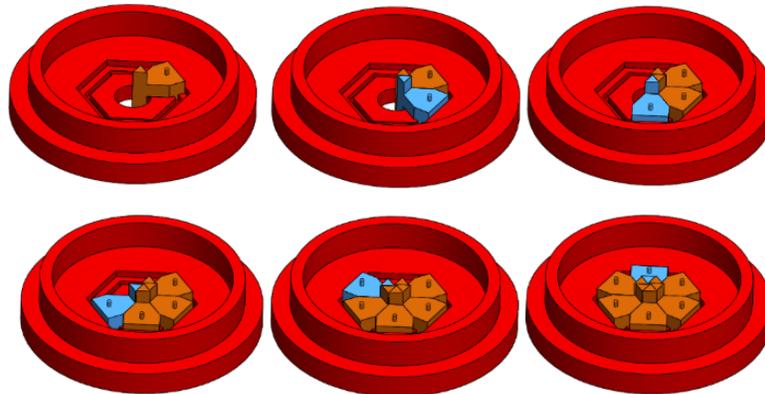


Figura 89. Colocación de la Pieza 2 en la Pieza 1 en forma de desplazamiento sin juego.

5.6.4 Rotor de la Prueba Experimental 3

En la reestructura de la pieza rotor se realizó un cambio en los diseños anteriores, los cuales contaban con una superficie de contacto menor con las cuchillas. Tales diseños usaban ranuras más angulares, lo que les permitían girar más lento; en este rediseño se realizó un ángulo en cada ranura, con el cual la cuchilla podría deslizarse con mayor precisión y disminuyendo el tambaleo del perno de la cuchilla a la ranura del rotor.

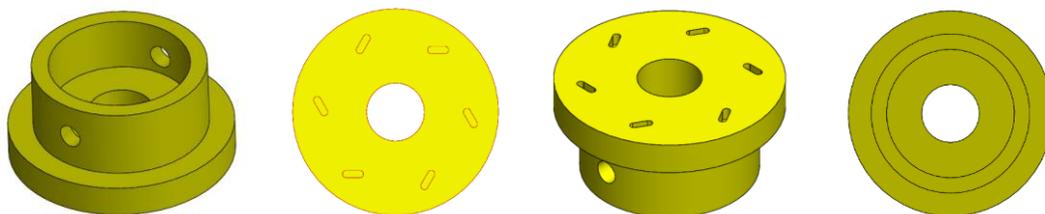


Figura 90. Rediseño de la pieza “rotor”, la cual cuenta con un cuadrado el cual permite que un engranaje se una a ella para accionar a las cuchillas.³

El rotor está unido directamente a un piñón de 25 dientes, el cual le otorga el movimiento a través de una cremallera, y éste a su vez a las cuchillas, otorgándoles una apertura o contracción en las mismas y así logrando arrojar un diámetro deseado.



Figura 91. Presentación del ensamblaje entre el rotor y las cuchillas, así como la colocación del engranaje de 25 dientes con sus respectivos tornillos prisioneros.

5.6.5 Tubo guía de la Prueba Experimental 3

Esta pieza fue agregada al mecanismo para guiar el filamento desde el bloque calentador a las cuchillas, trasportando el material derretido dentro de él. Esta pieza está atornillada a la pieza tapa para evitar el desbordamiento de material y aumentar la rigidez dentro del mecanismo hasta su llegada con las cuchillas, que serán las encargadas de otorgarle el diámetro final al filamento.

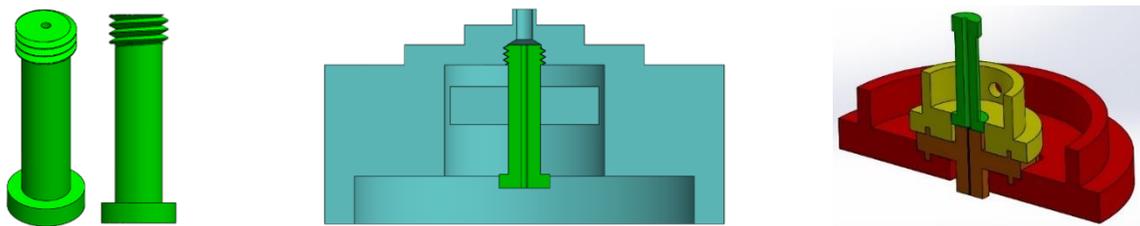


Figura 92. Representación del tubo guía, el cual guiará el material proveniente del bloque calentador hacia las cuchillas.

5.6.6 Tapa de la Prueba Experimental 3

Esta pieza es la encargada de mantener todo el mecanismo encapsulado y a su vez unido al bloque calentador, ya que cuenta con una cuerda a la medida de una boquilla comercial. Esta

pieza como antes se mencionó, tiene un contacto directo con el tubo guía, los cuales conducen de principio el material fundido. Esta nueva pieza es colocada junto a la pieza plato base desde sus sobresalientes o cuadrado; es sujeta mediante tornillos opresores.

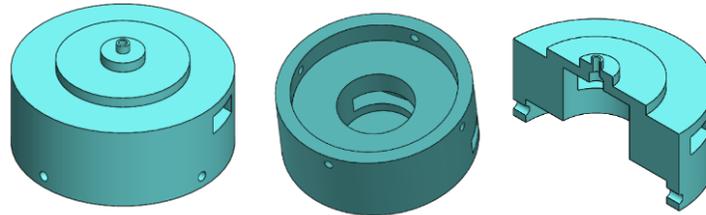


Figura 93. Rediseño de la pieza tapa, la cual cuenta con una perforación que permite que la pieza tubo guía y la pieza plato base se unan a ella.

Esta pieza no solo cumple con la función de encapsular el mecanismo, también es la que se encarga de la colocación de la transmisión, aprisionando la cremallera dentro de él y estabilizando el sistema.

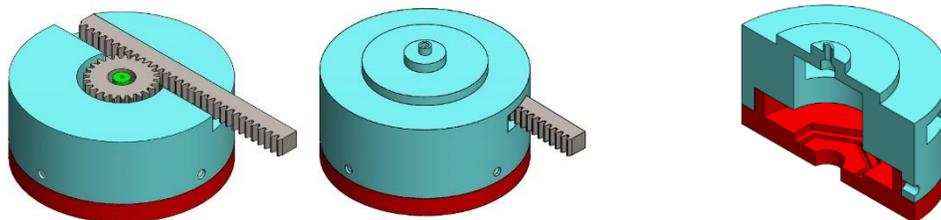


Figura 94. La pieza tapa sostendrá la transmisión por cremallera la cual accionará el piñón de 25 dientes.

Por lo tanto, el mecanismo se mandó a maquinar por el tamaño de las piezas, para poder realizar las pruebas experimentales pertinentes en la impresora 3D.

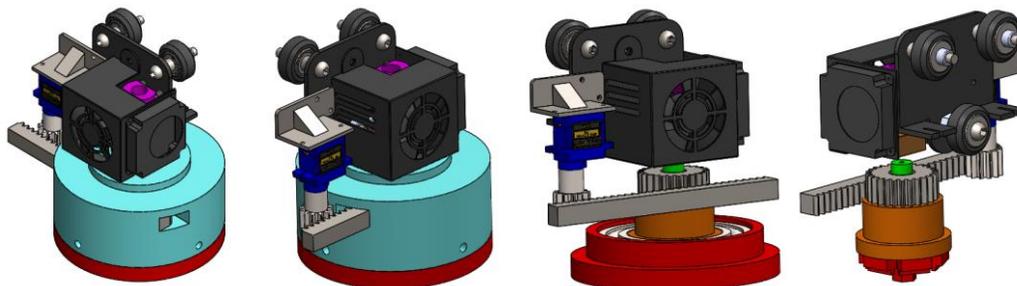


Figura 95. Ensamble final junto con el ensamble en el *hotend*.

5.6.7 Adaptación del sistema de transmisión para la Prueba Experimental 2

Para el control de la apertura del sistema se consideró un sistema de transmisión por cremallera-piñón. El propósito de este sistema es el de otorgar un movimiento angular al rotor, al estar unidos de manera directa, como se muestra en la Fig. 97. Al realizar el accionamiento del piñón que está conectado al rotor del mecanismo y mediante el deslizamiento de la cremallera, el rotor realiza un movimiento angular (Fig. 100), el cual a su vez será el encargado de activar las cuchillas. Así, el sistema cremallera-piñón es capaz de cumplir con la función deseada, realizando un deslizamiento y rotación por igual para que la punta de las seis cuchillas cree un semicírculo. Este semicírculo será el encargado de otorgar dicha variación radial, y, asimismo, soportar entre sus uniones las fugas de material fundido al ser o no accionadas.

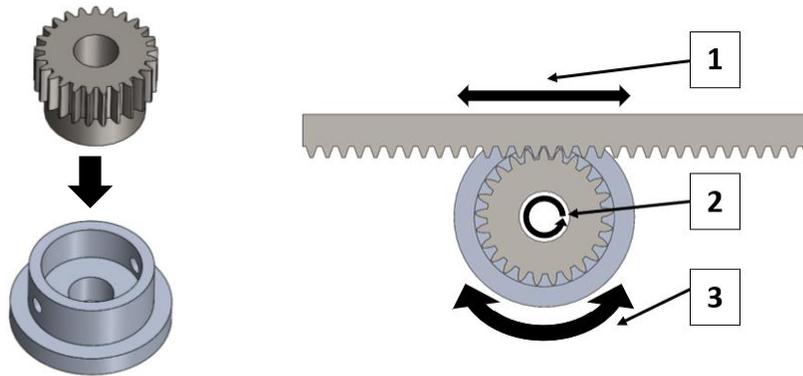


Figura 96. Conjunto de piezas para el accionamiento de la pieza rotor y sus tres movimientos, **1**: cremallera (movimiento lineal), **2**: piñón unido a la pieza rotor del sistema (movimiento angular), **3**: el rotor del mecanismo tomando el mismo movimiento angular que le otorga el piñón.

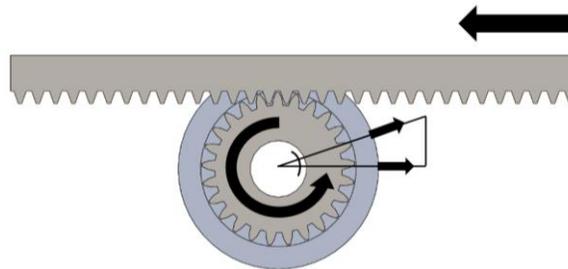


Figura 97. Accionamiento del rotor, el cual tomará una posición angular con respecto a un punto de referencia, y otorgando a las cuchillas una posición específica para que sus puntas formen un semicírculo y den como resultado aperturas deseadas.

Como se comentó en la sección 4.3.1, la nueva boquilla puede trabajar desde un radio cero y lograr una apertura de un milímetro, esto con incrementos de 0.1 mm, obteniendo un total de once diámetros diferentes. Estos diámetros son dependientes del movimiento del rotor y éste a su vez de una cremallera; cada diámetro es dependiente de la constante angular que proporciona el rotor, como se muestra en la Fig. 99. Este ángulo se vuelve constante ya que los diámetros tienen un incremento estable.

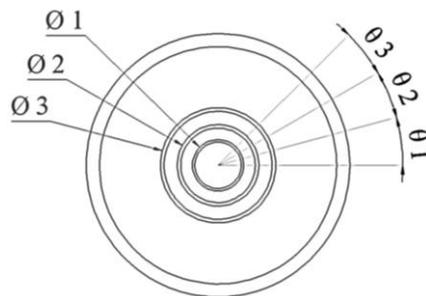


Figura 98. Diámetros obtenidos mediante la posición del rotor.

Para la obtención de los grados que se requieren para cada uno de los 11 diámetros (rango 0 a 1 mm, con incrementos de 0.1) definidos, se optó por obtener los datos mediante el sistema CAD con el cual las piezas fueron diseñadas, marcando un punto de referencia como se muestra en la Fig. 100. Este método arrojó que por cada 0.206 grados que firemos nuestro rotor obtendremos un incremento de diámetro en nuestra apertura, en la Tabla 16 y en la Fig. 101, se puede mostrar esta relación.

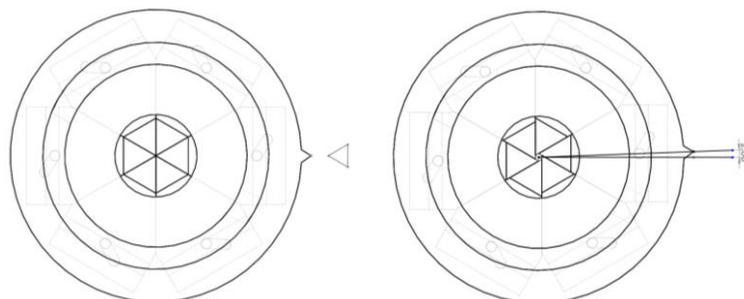


Figura 99. Obtención de los grados necesarios para obtener cada uno de los 11 diámetros con los que se desea trabajar en el mecanismo de diámetro variable.

Tabla 16. Tabla de valores del diámetro con respecto al ángulo deseado

Valores para la apertura de diámetro en el sistema	
Grados (°)	Milímetros (mm)
0	0.0
0.206	0.1
0.206	0.2
0.206	0.3
0.206	0.4
0.206	0.5
0.206	0.6
0.206	0.7
0.206	0.8
0.206	0.9
0.206	1.0

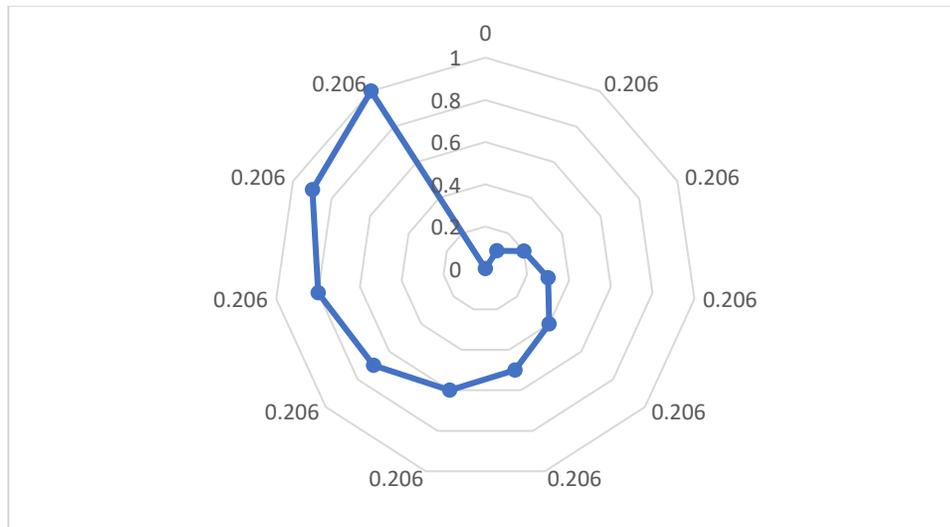


Figura 100. En la gráfica se puede observar el incremento deseado en la apertura del sistema conforme se le aplica un incremento angular.

La nueva boquilla cuenta con dos formas de trabajo: automática y manual. En la forma manual se le otorgan los diámetros de manera directa al sistema mediante el piñón. En la forma automática es dependiente de la cremallera, la que es accionada por un piñón externo, el cual está unido a un servomotor. Después de haber realizado un estudio para obtener grados con decimales al servomotor (anexo pág. 128), se encontró que cumplía con un 70% de la

precisión que se busca, lo cual lo hace el motor más apto para realizar pruebas de control en el sistema de forma automática.

5.7 Conclusiones del capítulo 5

En conclusión, se realizaron tres diseños experimentales y una diversidad de pruebas virtuales, las cuales fueron fundamentales en el proceso del mecanismo. Estas pruebas ayudaron a identificar y corregir los errores que en el ambiente de diseño CAD no surgían, pero en la parte experimental eran de gran relevancia para un funcionamiento correcto, así que se puede decir que al realizar las pruebas experimentales se identificaron errores cruciales, los cuales de manera virtual sería difícil de notar sin un buen análisis teórico. Las pruebas que se presentaron fueron las más relevantes en cuanto a los errores y aciertos en el sistema de variación radial, las cuales fueron tomadas con mucho cuidado para un mayor entendimiento, así como la contribución del mecanismo ya establecido en el obturador de una cámara y sus adaptaciones al ambiente de la manufactura aditiva.

Capítulo 6

Resultados de simulación

En este capítulo se presentan los resultados de simulación térmicos y de impresión para verificar el comportamiento del sistema de diámetro variable en una impresora 3D.

6 Resultados de simulación

Una vez realizadas las pruebas virtuales y experimentales sobre el movimiento del mecanismo se realizó un prototipo final, este prototipo cuenta con las verificaciones pertinentes bajo las normas establecidas en el proyecto. Como antes se mencionó se cuenta con un mecanismo fabricado en aluminio, este material es de fácil trabajo y con bajos costos en la mano de obra y el material en bruto.

A continuación, se presenta un análisis completo del prototipo final y del modelo físico.

El mecanismo cuenta con un total de trece piezas, de éstas tres son de medidas comerciales y diez fueron fabricadas. El total de piezas conforman un mecanismo capaz de variar su diámetro interno permitiendo el flujo de material fundido depositándolo en una cama caliente en movimientos cartesianos.

6.1 Piezas CAD y piezas físicas.

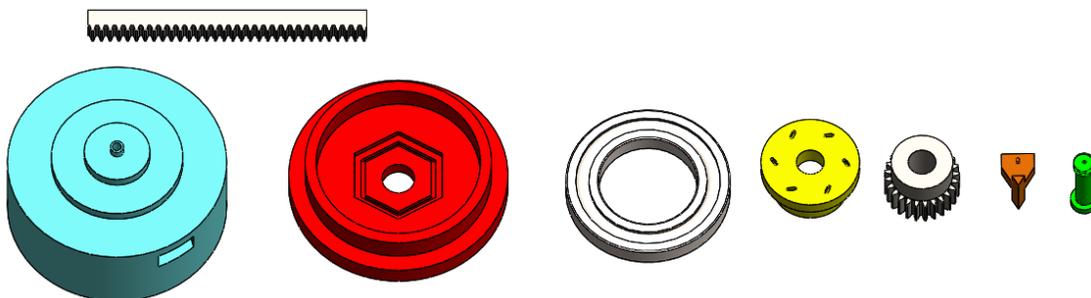


Figura 101. Piezas CAD para el prototipo final.

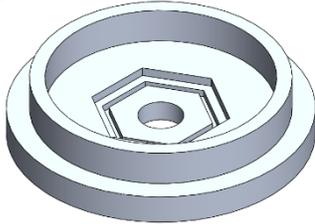
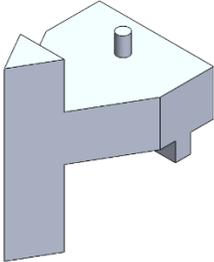
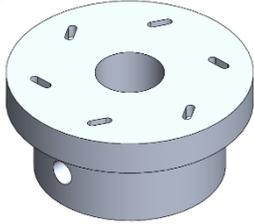
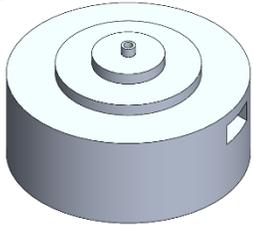


Figura 102. Piezas maquinadas para el prototipo final.

Para un mejor entendimiento del sistema se realizó un análisis de ensamble y movimiento, reajustando algunas inconsistencias en el prototipo experimental y en la impresora 3D.

6.2 Propiedades mecánicas de las piezas del sistema

Las piezas fueron fabricadas sobre: Aluminio 6061	
Propiedades físicas del aluminio 6061	
Densidad: 2.7 gr/cm ³ Rango de fusión: 575-650°C Módulo de elasticidad: 69500 MPa Coefficiente de dilatación: (0 a 100°C): 23.6	Conductividad térmica: (0 a 100°C): temple T6: 167 W/m °C Resistividad a 20°C: temple T6: 4.0 μcm Calor específico: (0 a 100°C) 940

Propiedades físicas	Pieza virtual	Pieza física
El plato base cuenta con: Masa = 236.71 gramos Volumen = 87671.26 mm ³ Centro de masa: (mm) X = 0.00 Y = 6.74 Z = 0.00		
La cuchilla cuenta con: Masa = 4.12 gramos Volumen = 1526.32 mm ³ Centro de masa: (mm) X = 0.00 Y = 1.39 Z = -2.98		
El rotor cuenta con: Masa = 41.85 gramos Volumen = 15501.50 mm ³ Centro de masa: (mm) X = 0.00 Y = -4.28 Z = 00.00		
La tapa cuenta con: Masa = 581.35 gramos Volumen = 215313.38 mm ³ Centro de masa: (mm) X = 0.00 Y = 624.75 Z = 1.02		
El tubo guía cuenta con: Masa = 11.24 gramos Volumen = 4163.19 mm ³ Centro de masa: (mm) X = 0.00 Y = 16.80 Z = 0.00		

6.3 Ensamble general y funcionamiento del mecanismo

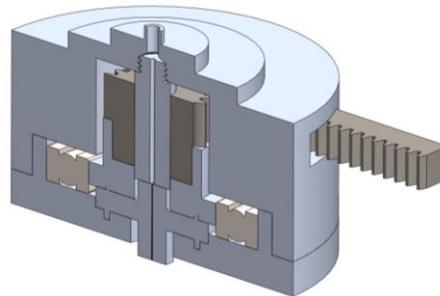


Figura 103. Corte transversal del ensamble general del mecanismo de diámetro variable.

6.3.1 Componentes del ensamble general

En la Fig. 105, se muestran los componentes que conforman el ensamble general del mecanismo de diámetro variable para una impresora 3D, y en la tabla 17 se indican los nombres de dichos componentes.

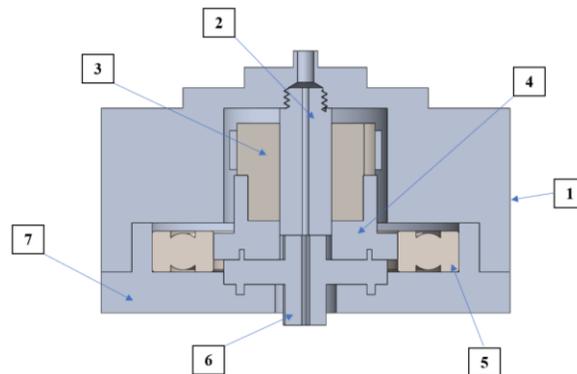


Figura 104. Componentes que conforman al ensamble general del mecanismo de diámetro variable.

Tabla 17. Componentes del ensamble general.

Componentes			
1	Tapa	5	Rodamiento
2	Tubo guía	6	Cuchillas
3	Piñón de 25 dientes	7	Plato base
4	Rotor		

6.3.2 Funcionamiento del mecanismo

Una vez que el filamento es introducido al *hotend* se realiza el tratamiento térmico en él; este tratamiento es el encargado de elevar la temperatura del material hasta llegar a alcanzar su fusión térmica. Asimismo, la resistencia térmica junto con el bloque calentador son los encargados de otorgar esta energía al filamento. Gracias a la conducción térmica el bloque calentador es capaz de otorgarle la energía necesaria a la boquilla, la cual servirá para que en el momento en que el filamento sea empujado a través de la boquilla, el material mantendrá su temperatura de fusión y no existan atascamientos u otra clase de dificultades a la hora de realizar las capas en la cama.

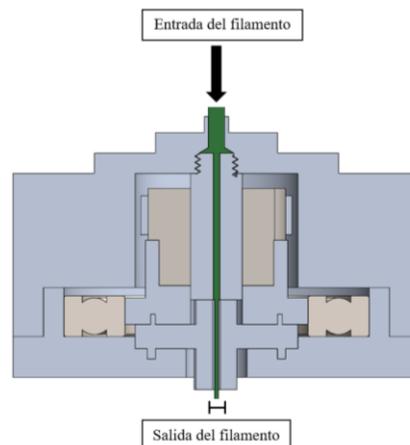


Figura 105. Entrada y salida del filamento a diámetros deseados.

En el mecanismo de diámetro variable ocurre lo mismo, al estar enroscado al bloque calentador la energía que recibe por parte de la resistencia térmica tendrá que aumentar por la cantidad de masa que posee este sistema, ya que es aún mayor a la de una boquilla estándar.

El mecanismo de diámetro variable, como se mencionaba en el Cap.5, tiene un sistema de transmisión por cremallera-piñón, el cual al deslizar la cremallera por el mecanismo el piñón toma una posición angular. Esta posición es la encargada de activar las cuchillas y a su vez las puntas de las cuchillas regresan un diámetro en sus puntas.



Figura 106. Apertura de diámetro en el mecanismo.

En la Fig. 107 se aprecia una apertura correcta y libre la cual es adecuada para continuar con las pruebas. Asimismo, en la Fig. 108 se realiza una comparación del mecanismo digital con el mecanismo físico, realizando dos diámetros de comparación entre ellos, los diámetros 0 y 1 mm.

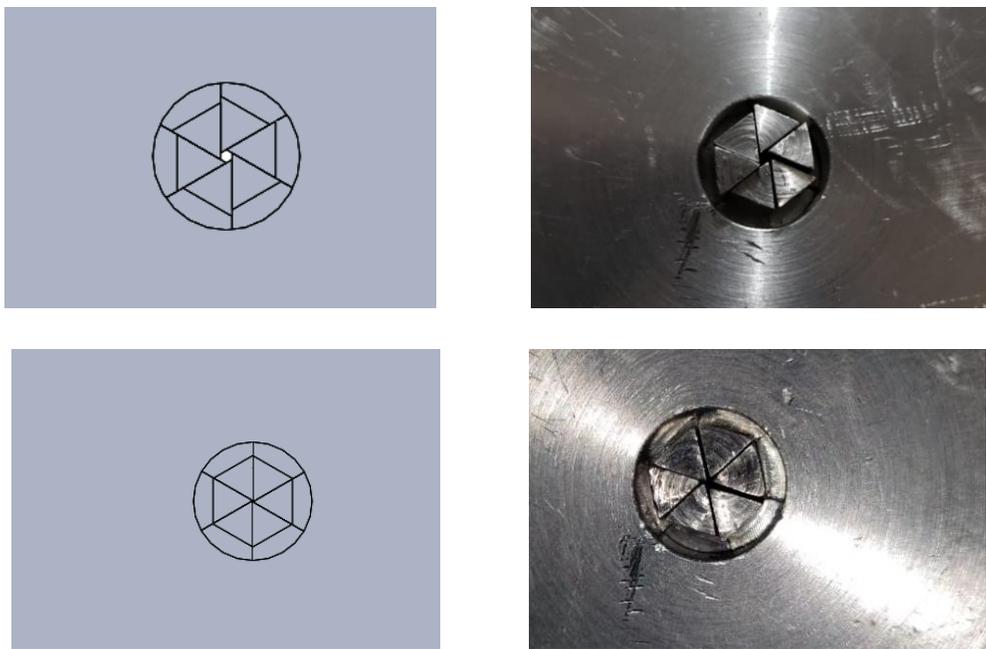


Figura 107. Comparativa de apertura entre el mecanismo digital y físico.

En el mecanismo digital la apertura es más detallada en cuanto al modelo físico, esto debido a las fallas de maquinado, las cuales tuvieron un error de precisión de ± 0.3 mm.

6.4 Ajuste en el *HOME* de la impresora 3D

La impresora 3D cuenta con un *HOME*, el cual define el cero máquina del sistema de extrusión; junto con esto cada eje de la impresora cuenta con un motor y un sensor independiente. Estos sensores son los encargados de limitar el posicionamiento límite del carro que cuenta con el *hotend* en los ejes X y Z, siendo así el eje Y sensado aparte, ya que éste cuenta con el movimiento únicamente de la cama calentada, de tal manera que los sensores tienen que ser reposicionados a una altura especial siendo que el mecanismo de diámetro variable tiene dimensiones superiores de una boquilla comercial.

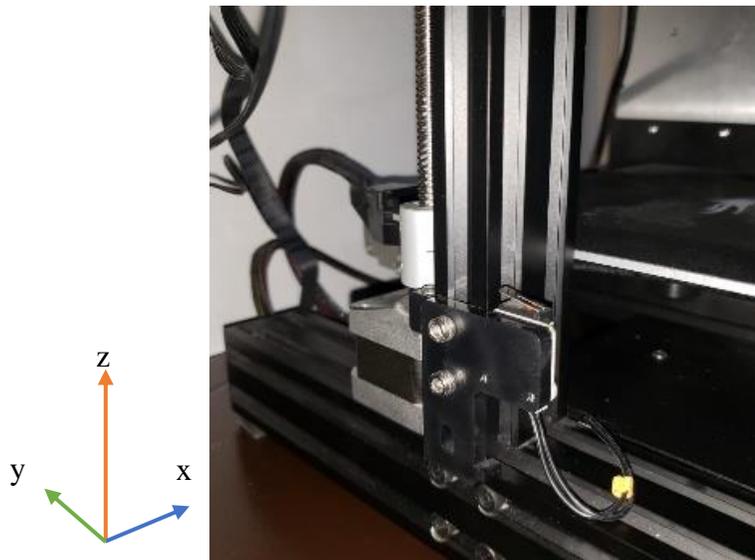


Figura 108. Sensor de posicionamiento en el eje Z.

El sensor que se ve más comprometido en cuanto a las sobredimensiones del mecanismo es el sensor del eje Z, siendo este el que determina la altura en la cual la salida del material extruido es colocada en la cama de la impresora 3D. Esta impresora cuenta con la posición independiente de los sensores, los cuales pueden ser reposicionados de una manera autónoma en el eje Z y en el eje Y, pero no así en el eje X ya que este sensor tiene una unión directamente a la estructura de la impresora 3D y al motor del eje X.

El reposicionamiento del sensor fue de 63 cm sobre el eje vertical con respecto a la posición original establecida por la impresora 3D.

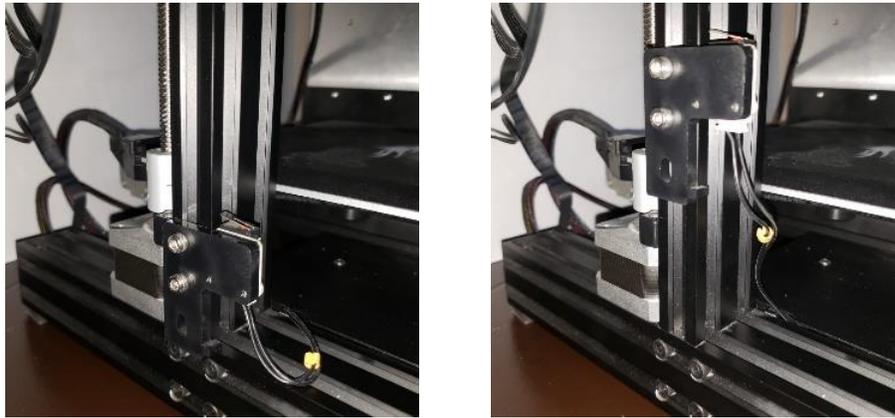


Figura 109. Reposicionamiento del sensor en el eje Z.

El nuevo mecanismo acoplado al *hotend* tiene dimensiones mayores a la de una boquilla común, por esta razón es importante realizar un reajuste en los sensores de los ejes X, Z de la impresora 3D. Se requiere una diferencia de dimensiones en la altura de puntas y los grosores de éstas, así como el peso aplicado en el *hotend*.

La diferencia entre el mecanismo de diámetro variable a la boquilla estándar son tres factores importantes tales como:

- Distancia entre puntas A: 540 mm.
- Grosor $\Delta(C-B)$: 930 mm
- Peso del mecanismo de diámetro variable: 1117.64 gramos
- Peso de la boquilla estándar: 1.90 gramos
- Diferencia de peso: 1115.74 gramos

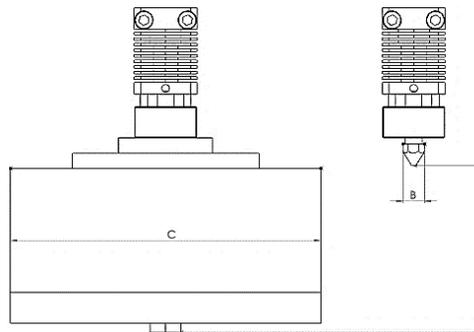


Figura 110. Diferencia de grosor y la altura en el mecanismo a comparación de la boquilla.

El sensor más importante es el eje Z, este sensor fue recolocado de tal forma que el saliente del sistema de extrusión variable quede a 0.3 mm de la cama calentadora para la configuración correcta del *HOME* de la máquina.

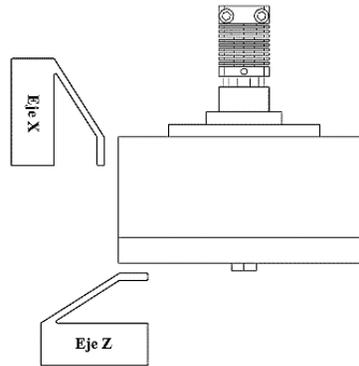


Figura 111. Reajuste del *HOME* para el nuevo mecanismo.

Se realizaron pruebas dentro del sistema de impresora 3D, realizando la colocación del mecanismo de diámetro variable colocado en el *hotend*. La colocación fue realizada mediante una cuerda con las dimensiones estándares de una boquilla comercial M4x0.7 de cuerda. La colocación fue realizada bajo las condiciones regulares de la impresora 3D.

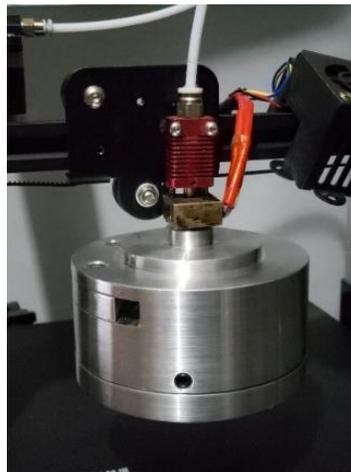


Figura 112. Colocación del mecanismo de diámetro variable en el *hotend* mediante los estándares de rosca ya establecidos en el bloque calentador.

Posteriormente, se realizó la colocación de los componentes restantes en el carrete del eje X los cuales son: ventilador de 12 volts, carcasa protectora y tornillería en general. La

colocación de la carcasa protectora no presentó problema alguno, lo que da lugar a un buen manejo de las tolerancias del mecanismo a la estructura de la impresora 3D.

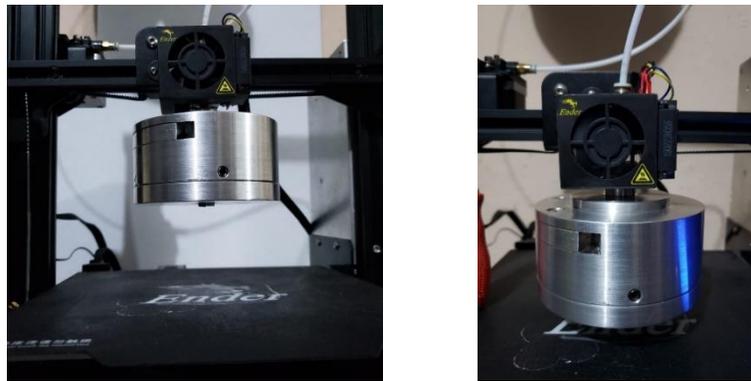


Figura 113. Colocación general del mecanismo de diámetro variable en el *hotend* de la impresora 3D sin presentar complicaciones en su colocación.

Se realizó y se reajustó el *HOME* de la impresora, con el mecanismo de diámetro variable colocado en ella, desde la consola de la impresora 3D. Estos reajustes provocaron problemas a la hora de realizarse, al desconectar los motores de la corriente para ajustar la punta del extrusor a una distancia de 0.3 mm de la cama calentada ya que la impresora no cuenta con un sistema que regule este problema. Estas fallas se presentaron por el aumento del peso que se le aplicó al eje Z, por lo que los reajustes se tuvieron que realizar de manera rutinaria mediante el movimiento manual en los motores desde la consola de la impresora 3D, sin que el motor presentara fallas de funcionamiento o pérdidas de potencia a la hora de realizar las pruebas de impresión con el mecanismo colocado.

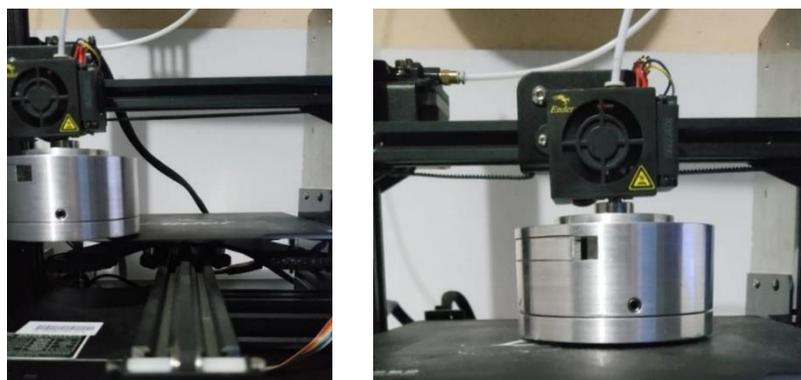


Figura 114. Colocación del *HOME* en la impresora con el mecanismo de diámetro variable.

Para la obtención de los diámetros del mecanismo se tuvieron que realizar las variaciones de manera manual, debido a que el sistema de transmisión es irregular en cuanto al sistema general de la impresora 3D. Esto ocasiona mucho ruido en la estructura y a su vez al motor, el cual provoca cambios repentinos en el mecanismo, los cuales son perjudiciales para una buena impresión por parte del nuevo mecanismo a la hora de realizar la extrusión del filamento sobre la cama de la impresora 3D.

6.5 Marco de referencia

Con las configuraciones y las adaptaciones, con el paso del tiempo, las impresoras 3D han sufrido cambios importantes desde la modificación de sus extrusores como en las distintas formas de imprimir, esto gracias a que la demanda de la tecnología abre nuevas brechas de oportunidades en cuanto la rapidez y la calidad de las piezas. Tomando en consideración que dichos cambios no siempre son favorables, por lo tanto, se tienen que tomar en cuenta los fallos que estos pudieran representar.

Se abarca de gran forma las partes esenciales de una impresora 3D como sus dimensiones de trabajo, la precisión de los motores para realizar los movimientos del *hotend* y los materiales que se pueden usar para obtener distintos trabajos, pero una de las partes principales como la boquilla no se considera en gran medida. La boquilla es una pieza muy importante dentro del *hotend*, esta define el tiempo y la calidad con la cual las piezas estarán listas para su uso. Conforme a su caudal las impresoras tienen que modificar tanto la velocidad en las que se imprime como la cantidad de temperatura que se aplica.

Una de las ventajas de poder cambiar la boquilla es obtener resultados diferentes, tanto en la calidad del objeto como en su tiempo de producción. La mayoría de las impresoras que trabajan por modelado por deposición fundida tienen un estándar de boquilla de 0.4 mm para piezas de calidad estándar. Realizar los cambios de boquillas no es complicado tratándose de tiempo, pero el proceso de impresión debe ser detenida en su totalidad para realizar el cambio, ya que si esto no es así el material podría chorrear y dañar el bloque calentador. El intercambiar la boquilla da una ventaja, la cual es rendir más en tiempo o tener un mejor nivel

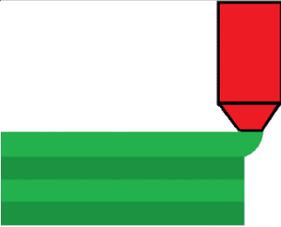
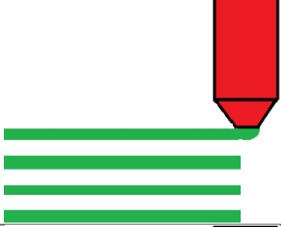
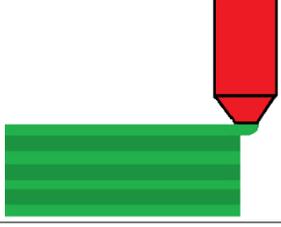
de detalle en la pieza si se elige la correcta. Una boquilla con diámetros mayores imprime más rápido pero el nivel de detalle es menor, de igual manera si se tienen diámetros menores el nivel de detalle se incrementa, pero toma más tiempo la impresión.

Al intercambiar una boquilla se tiene que tomar en cuenta la altura de la capa de impresión, el diámetro de la boquilla es la que limita la altura de cada capa de impresión de material, estudios revelan que se debe de mantener entre el 70 y 85% de del diámetro de la boquilla.

La altura de la capa es una de las configuraciones más importantes, esta define la firmeza de la pieza evitando rupturas o defectos en ellas. A continuación, se describe la comparativa del diámetro con la altura de la capa de impresión.

6.5.1 Articulaciones de capas de impresión con respecto al diámetro de la boquilla

Tabla 18. Comparativa de las capas de impresión de material conforme a un diámetro de boquilla.

Impresión de boquillas de 0,5 mm a una altura de capa de 0,5 mm		Capas que se tocan entre sí: articulación débil
Impresión de boquillas de 0,2 mm a una altura de capa de 0,5 mm		Las capas no se tocan entre sí y están demasiado lejos: nada para soportar cada una de las capas inferiores, por lo que la impresión fallará
Impresión de boquilla de 0,5 mm a una altura de capa de 0,4 mm		Las capas se presionan en la parte superior y se fusionan entre sí: forma articulaciones fuertes

Al realizar la modificación de diámetros de la boquilla la resolución afectará el plano horizontal, y el modificar la altura afecta directamente al plano vertical, ocasionando problemas en las superficies inclinadas.

La impresión puede ser un proceso muy lento, aunque se hable de piezas de escala menor, esto se debe a que las boquillas depositan perímetros de material muy cortos, por estas razones muchos usuarios optan por boquillas de 0.4 mm, tratándose de una medida media, la cual no provee de imperfectos en piezas pequeñas o piezas con mayor volumen. Los perímetros de inyección de material pueden ser más rápidos utilizando boquillas de 0.8 o 0.9 mm en piezas con un volumen muy alto, pero esto indicaría capas más anchas y con menor detalle, por eso es importante el saber con cual boquilla se tiene que trabajar. Sin embargo, con un solo perímetro la demora de impresión sería siempre la misma, sin importar el diámetro de la boquilla, esto porque la impresora tiene que realizar los mismos movimientos.

6.6 Análisis térmico del mecanismo de diámetro variable y de la boquilla estándar

La impresión del mecanismo de diámetro variable es muy similar a la impresión de una boquilla estándar, al no tener una gran diferencia del caudal de uno a otro sino a la diferencia de distancia que recorre el filamento, junto con el tiempo de espera que tiene el mecanismo al alcanzar las temperaturas de fusión del material, comparándolas con las de una boquilla estándar, este tiempo de espera supera el 334% del tiempo. Sin embargo, al momento de pausar la máquina por algún ajuste o un nuevo diseño el mecanismo reduce el tiempo de espera al no reducir por completo su calor interno, y así tomando un menor tiempo de espera y de demanda de energía de la impresora 3D, esta reducción a comparación de una boquilla estándar es del 102%.

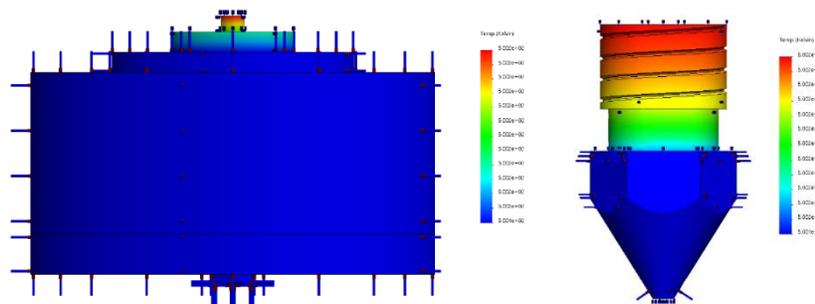


Figura 115. Análisis térmicos en el mecanismo de diámetro variable y en la boquilla estándar, las cuales marcan la pauta de tiempo en que llegan a las temperaturas ideales para la fusión del filamento dentro de ellos.

En el capítulo 4 se plantearon los modelos matemáticos para obtener la energía y las pérdidas de energía que están presentes en el sistema, esto con el fin de obtener la cantidad de tiempo en el que el material estaría bajo las condiciones ideales de fundición para realizar la extrusión del filamento sobre la cama calentada. Estos modelos fueron reflejados en dos tablas (Tabla 12 y 13, Cap. 4) de parámetros tanto para el PLA como para el ABS. Una vez se obtuvieron los parámetros de temperatura y velocidad de cada uno de los diámetros (rango de 0 a 1 mm, con incrementos de 0.1), se obtuvo la cantidad de watts que se necesita suministrar en el sistema. Este dato será el que se utilizará para realizar las simulaciones y así observar el comportamiento térmico del sistema, asumiendo la cantidad de tiempo que le tomará al mecanismo llegar a tal temperatura.

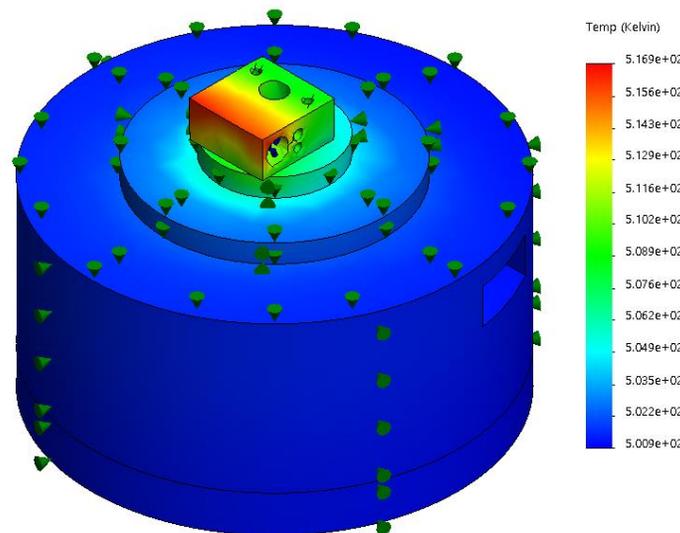


Figura 116. Simulación del sistema de variación de diámetro, dependiente de la potencia calorífica (watts) desde la resistencia térmica a través de un bloque calentador realizando conducción y convección en el mecanismo de diámetro variable con un coeficiente de convección de 6.8 y una temperatura ambiente de 25°C.

6.6.1 Modelo matemático para medir el tiempo en el que el mecanismo alcanza la temperatura deseada

Para la obtención del tiempo que tarda el mecanismo en alcanzar la magnitud térmica en su sistema, es necesario obtener un modelo matemático.

Para la obtención de este tiempo es necesario obtener los datos de la potencia calorífica que se suministra en el bloque calentador para cada uno de los diámetros del sistema, en el cap. 4, tabla 12 y 13 se pueden encontrar estas especificaciones.

La ecuación de conservación de la energía despreciando las pérdidas de energía cinética y potencial está dada por la Ec. 4.8 cap. 4.

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (4.8)$$

Podemos decir que la potencia calorífica (P) está dada en watts o J/s, y para encontrar el tiempo en que el mecanismo alcance la temperatura deseada es consistente tener la energía Q entre la potencia calorífica suministrada por la resistencia térmica por lo cual obtenemos una Ec. 6.1:

$$Tc = \frac{Q}{P} \quad (6.1)$$

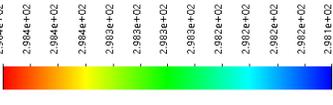
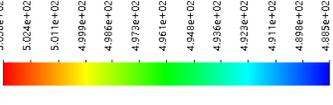
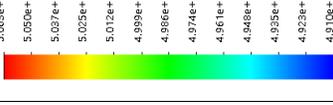
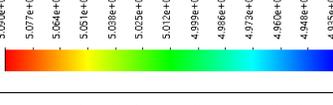
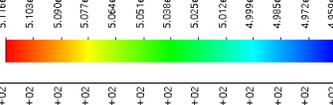
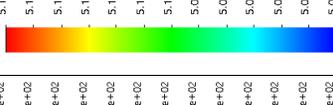
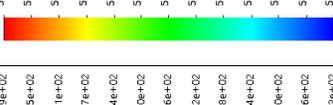
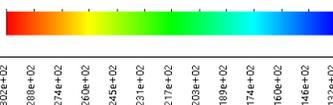
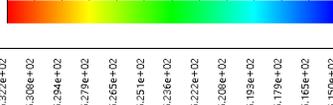
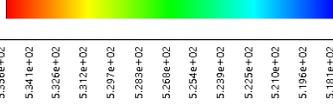
En las tablas 19 y 20 cabe hacer notar que los cálculos mencionados en el Cap. 4 y en las simulaciones son correctos. Se demuestra que se logró que el mecanismo alcance las temperaturas deseadas con una potencia calorífica controlada, y se conoce a su vez la cantidad de tiempo que le costaría al mecanismo alcanzar dichas temperaturas en cada uno de los diámetros del sistema (asumiendo que todo sería desde la temperatura inicial T_{ambiente}). El tiempo que toma llegar a dicha temperatura es dependiente de la masa del mecanismo, el calor específico del material del mecanismo y sus temperaturas ($T_{\text{deseada}} - T_{\text{ambiente}}$).

6.6.2 Resultados de simulación térmica

Tabla 19. Resultados de simulación de calentamiento del mecanismo para el material PLA.

Diámetro (mm)	Temperatura ambiente (°K)	Temperatura deseada (°K)	Energía requerida (Watts)	Tiempo de calentado (s)	Resultados de Simulación (°K)
0	298.15	0	0	0	
0.1	298.15	458.15	26	5575.95	
0.2	298.15	461.15	26.5	5573.32	
0.3	298.15	466.15	27.3	5575.95	
0.4	298.15	468.15	27.6	5581.00	
0.5	298.15	477.15	29.1	5573.55	
0.6	298.15	484.15	30.2	5580.56	
0.7	298.15	489.15	31	5582.69	
0.8	298.15	493.15	31.7	5573.75	
0.9	298.15	496.15	32.1	5588.97	
1	298.15	500.15	32.9	5563.23	

Tabla 20. Resultados de simulación de calentamiento del mecanismo para el material ABS.

Diámetro (mm)	Temperatura ambiente (°K)	Temperatura deseada (°K)	Energía requerida (Watts)	Tiempo de calentado (s)	Resultados de Simulación (°K)	
					Temp (kelvin)	Temp (kelvin)
0	298.15	0	0	0	Temp (kelvin)	
0.1	298.15	488.15	30.9	5571.43	Temp (kelvin)	
0.2	298.15	491.15	31.3	5587.08	Temp (kelvin)	
0.3	298.15	493.15	31.7	5573.75	Temp (kelvin)	
0.4	298.15	496.15	32.1	5588.97	Temp (kelvin)	
0.5	298.15	502.15	33.1	5584.37	Temp (kelvin)	
0.6	298.15	506.15	33.8	5575.95	Temp (kelvin)	
0.7	298.15	508.15	34.1	5580.03	Temp (kelvin)	
0.8	298.15	513.15	34.9	5581.94	Temp (kelvin)	
0.9	298.15	515.15	35.2	5585.85	Temp (kelvin)	
1	298.15	518.15	35.7	5583.76	Temp (kelvin)	

La impresora cuenta con una resistencia térmica que trabaja a 24 volts y proporciona una potencia máxima de 40 watts. De esta manera, la energía demandada por cada uno de los diámetros para ambos materiales utilizados en este trabajo de tesis está dentro del rango de

trabajo de esta resistencia, y debido a esto se considera viable realizar las pruebas de impresión con el mecanismo diseñado en este trabajo.

6.7 Pruebas de impresión con diferentes diámetros de boquilla.

Las pruebas de tiempo de impresión por cada centímetro cuadrado se realizaron con cuatro diámetros distintos de boquillas estándares. Las cuatro impresiones por parte del mecanismo contaron con diámetros de 0.2, 0.4, 0.6 y 0.8 milímetros para colaborar con la calidad de impresión de una boquilla estándar, a las cuales se les realizó el cambio de boquilla a las tres medidas antes mencionadas. Estas pruebas consistieron en la impresión de un objeto simétrico, el cual determinó el tiempo de fabricación de cada diámetro de boquilla. Estos objetos tienen una geometría cubica de 10 mm³.

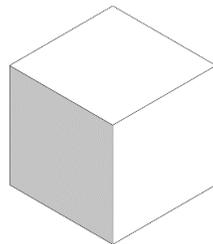


Figura 117. Cubo de 10 mm³.

6.7.1 Tiempos de producción de cada diámetro de boquilla

Tabla 21. Tiempos de fabricación de cubos de 10 mm³, por diámetro.

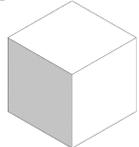
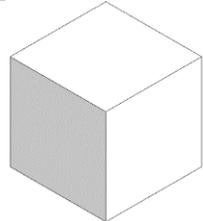
	Boquilla (mm)	Duración de trabajo (min)
Boquilla de prueba	0.8	09:34
	0.6	12:18
	0.4	13:24
	0.2	14:05

Los tiempos de impresión de las boquillas de menor diámetro (0.2-0.4 mm) incrementan con respecto a las de diámetro mayor (0.6-0.8 mm), ya que la impresora realiza más movimientos

para lograr depositar la misma cantidad de material. Las boquillas de diámetros mayores resultan mejor para realizar objetos sin tantos detalles, aunque las boquillas con diferencia de 0.1 a 0.3 mm entre ellas harán muy poco notable la diferencia. Sin embargo, se estará reduciendo el tiempo de trabajo por minutos u horas. Los diámetros más pequeños realizan más trayectorias para cubrir un grosor de pared en comparación con los diámetros mayores. Asimismo, las boquillas de diámetro mayor no podrían realizar un grosor de pared tan fino y preciso como una de diámetro menor. Todo esto recordando que una boquilla de diámetro 0.6 o 0.8 logra imprimir alturas de capas mayores y ahorrar aún más tiempo de fabricación.

6.7.2 Volumen impresión en un tiempo de producción por cada diámetro de boquilla

Tabla 22. Volumen de impresión de distintos diámetros de boquillas en un tiempo de producción establecido.

Tiempo (min.)	10	10	10
Boquilla (mm)	0.4	0.6	0.8
Volumen (cm ²)	8.9	9.6	11.2
Objeto impreso			

Las boquillas de mayor diámetro son efectivas en trabajos con mucho detalle u objetos con una baja demanda de volumen. Por otra parte, las boquillas de menor diámetro tienen una mejor estructura en sus capas y sufren menor riesgo de atascamiento de material, careciendo de detalle ya que sus capas son muy visibles.

Conociendo las ventajas y desventajas que presenta el intercambiar los diámetros de las boquillas para cada trabajo, ahorrando tiempo o aumentando el nivel de detalle, es posible identificar que uno de los problemas que presenta el utilizar distintos diámetros de boquillas es el lapso en el que se realizan los cambios de boquilla en el *hotend*. Esto presenta problemas en la deposición de material, ya que no se puede cortar el flujo de material en grandes lapsos de tiempo muerto de la máquina.

Al usar dos o más diámetros se está propenso a que la impresora 3D no realice el trabajo correspondiente por disminución de temperatura y/o deposición de material al *hotend*, y por

subsecuente el atascamiento del material en la boquilla o la saturación de material en la cama de la impresora o el objeto impreso. También se tiene que el posicionamiento no sería correspondiente al diámetro anterior, lo que llevaría a que la pieza no quede con las medidas exactas o tenga un excesivo producto de rebabas que dejarán burbujas de aire en el interior del objeto y la estructura se vea comprometida con grietas o soportes débiles.

6.8 Prueba experimental

Después de realizar las tres pruebas de impresión se desmontó el mecanismo de diámetro variable para verificar si se realizó un desborde de material dentro de él, o si el encapsulado logró soportar las tres impresiones realizadas en un lapso pequeño de tiempo.



Figura 118. Retiro del mecanismo de diámetro variable del *hotend* de la impresora 3D.

Al realizar el retiro del mecanismo se realizó un desencapsulado general del mecanismo, este proceso se llevó a cabo con el fin de identificar desbordamiento de material fundido en alguna de las zonas. El análisis se realizará únicamente a las piezas que transportan material.

Como se previó en el diseño, al colocar una cuerda que uniese la tapa con el tubo guía, se presenta un correcto depósito de material, asimismo, como la correcta función de la tapa al permanecer sin tambaleos dentro del *hotend*.



Figura 119. Visualización de errores en el mecanismo por desbordamiento de filamento en la tapa.

Como anteriormente se mencionó, al desmontar el mecanismo no se encontraron complicaciones de material desbordado en la unión de la tapa y el tubo guía, esto con la ayuda de una cuerda M10x1.5, la cual al recibir una mayor presión por parte del extrusor es crucial mantenga una buena guía de material a través del tubo guía para depositarlo de una forma suave y con diámetro reducido a las cuchillas.



Figura 120. Visualización de errores en el mecanismo por desbordamiento de filamento en el tubo guía.

Al desmontar el tubo base del conjunto de cuchillas, las cuales son las encargadas de dar el diámetro deseado al filamento que está fluyendo por él, este despiece dio como referencia a un buen manejo del filamento dentro del mecanismo y a su vez una buena colocación del tubo guía por encima de las cuchillas, así entregándole todo el filamento directamente.



Figura 121. Visualización del mecanismo por desbordamiento de filamento en el plato base.

Con la ayuda de la verificación de desbordamientos de material dentro del mecanismo, el sistema de extrusión realiza un eficiente trabajo de impresión en comparación con una

boquilla de diámetro variable. En la Fig. 123 se señala el cordón de filamento generado por el mecanismo de diámetro variable, y consigo un menor tiempo de espera a la hora de querer utilizar tres distintos diámetros en comparación con el montaje y desmontaje de una boquilla estándar.



Figura 122. Diámetro de extrusión del filamento dado por el mecanismo de diámetro variable.

6.9 Pruebas de impresión

Una vez que se colocó de manera exitosa el mecanismo en *HOME* y sin tener alguna falla con los motores, se asignó la creación de un cubo de 10 mm³ por cada diámetro de extrusión del mecanismo y de la boquilla estándar. Los tres diámetros asignados para pruebas de extrusión fueron: 0.2, 0.4 y 0.8 milímetros.

Diámetro de boquilla	Mecanismo	Boquilla
0.2 mm		
0.4 mm		
0.8 mm		

Figura 123. Impresión de cubo con material ABS y con diámetros de boquilla diferente.

Como se puede observar en los objetos impresos las capas de ambas impresiones son similares. El nuevo mecanismo tiene una menor calidad en las capas, esto se presenta por la descompensación de 2 piezas dentro del mecanismo, las cuales no fueron correctamente maquinadas. Además, la temperatura del mecanismo en ocasiones disminuía su temperatura al momento de estar imprimiendo, y al no contar con una resistencia térmica dentro de éste, era imposible monitorear y reparar las pérdidas de temperatura en el momento.

Por otra parte, los cambios manuales de los diámetros fueron calibrados con un medidor de lámina para agujeros, lo que permitió una mejor comparación de los diámetros del mecanismo con el diámetro de una boquilla estándar.



Figura 124. Medidor de lámina para agujeros.



Figura 125. Mecanismo general.

6.10 Conclusión del capítulo 6

En conclusión, el mecanismo de diámetro variable logra igualar a la extrusión de una boquilla estándar de impresora 3D, no logrando un 100 % en cuanto a la calidad del filamento extruido. Esto se debió a no contar con el dimensionamiento adecuado para una boquilla de menor tamaño, no logrado por no encontrar quien manufacturara las piezas al tamaño real, las cuales eran muy pequeñas, pero sí se logró la calidad de impresión en las piezas. También se apreciaron dificultades a la hora de calentar el mecanismo, ya que, al tener mucha más masa en comparación con la boquilla, la conducción térmica es más lenta y puede demorar bastante tiempo en alcanzar las temperaturas correctas para la fusión del filamento dentro de ella. Al tener diferentes diámetros de boquillas se realizan trabajos de mejor calidad. Mantener las temperaturas requeridas con una mayor eficiencia energética de la impresora, reduciendo el tiempo que le toma calentar el sistema, es fundamental para crear piezas más rápidamente. Entonces, el poder diseñar un mecanismo capaz de realizar estas dos configuraciones en un solo sistema es otra forma de ver una nueva brecha de aprovechamiento en los sistemas que deseen optimizar tiempos sin sacrificar calidad.

Capítulo 7

Conclusiones y recomendaciones

En este capítulo se detallan las conclusiones y recomendaciones obtenidas durante del presente trabajo de investigación.

7 Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos se concluye que el objetivo general, los objetivos específicos y el alcance de este proyecto se cumplieron exitosamente.

Diversos trabajos se han enfocado a diseñar y rediseñar sistemas de extrusión para las impresoras 3D, estos trabajos se han destacado por mostrar distintas modificaciones para los sistemas de extrusión, como el uso de un doble extrusor capaz de aplicar colores distintos a objetos o ampliar su aplicación a la fabricación de dos objetos al mismo tiempo. Por otra parte, se han realizado pruebas para el uso de materiales para impresión, como lo son los materiales en polvo, para lo cual se han realizado modificaciones para adaptar el sistema de extrusión para soportar materiales de uso complejo como: polvo de acero, aluminio o incluso ceniza de madera. De acuerdo con Lee et al., Agassant et al., Boyle et al. y Rajaguru quienes concluyen que realizar un análisis para determinar los parámetros necesarios para el proceso de impresión (presión, temperatura y velocidad) es un paso importante en el diseño o rediseño de los elementos de la impresora en este trabajo se planteó el uso de una boquilla personalizada capaz de variar su diámetro de salida, para lograr este objetivo en este capítulo se presentan las modificaciones realizadas a la boquilla, estas modificaciones representan cambios generales en el sistema de extrusión de la impresora, en la presión, temperatura y velocidad de inyección del material para impresión.

Para establecer los parámetros necesarios para lograr el funcionamiento óptimo del diseño de la boquilla propuesta en este trabajo, se realizaron pruebas experimentales del funcionamiento del mecanismo propuesto, estas pruebas involucraron la supervisión de la movilidad, el nivel de atascamiento de las piezas y el sellado en las uniones por donde se transporta el material fundido para la impresión. Estas pruebas se llevaron a cabo con la finalidad de evaluar el nivel de funcionalidad de la boquilla y los problemas que presentaba en cuanto al desbordamiento de material y a su vez evaluar la funcionalidad del uso de una boquilla de diámetro variable con respecto al uso de boquillas de diferentes diámetros las

cuales deben ser intercambiadas durante el proceso de impresión, de acuerdo con las necesidades del usuario.

Con respecto al mecanismo propuesto en este trabajo a una impresora 3D se concluye lo siguiente:

- No se logró la manufactura del mecanismo a su escala real, por lo que se manufacturó a una escala que se adecuara a los componentes estándares que fueron añadidos. Asimismo, la manufactura de las piezas fue de menor complejidad, lo que resultó un costo menor.
- El ensamble del mecanismo a la impresora no presentó fallas al no haber fricción entre las piezas del mecanismo y el diseño de la impresora.
- Debido a las dimensiones del mecanismo, se realizó un reposicionamiento de los sensores para restablecer el *home* de la impresora.
- Durante la tercera prueba experimental se observó que el calentamiento del material a través del mecanismo tomaba un tiempo considerable de hora y media para alcanzar la temperatura ideal, en comparación con el tiempo de tres minutos que toma hacerlo con una boquilla estándar. El tamaño a escala mayor ocasionó este incremento en tiempo para calentar la boquilla. Se esperaría que, con la manufactura a una escala menor del mecanismo, el tiempo de calentamiento disminuya considerablemente.
- Una vez que el mecanismo llegó a la temperatura idónea para fundir el material, éste no presentó problemas de fugas o desbordamiento de material.
- Por otra parte, debido a las propiedades del material con el que el mecanismo fue manufacturado y por sus dimensiones, las pérdidas de energía (disminución de temperatura) se redujeron considerablemente, esto se traduce en una reducción del tiempo que toma en calentar el *hotend* al finalizar una pieza y volver a iniciar.
- Durante la tercera prueba experimental, se comparó el tiempo que toma la impresión de una pieza al variar el diámetro del mecanismo de apertura en comparación con el tiempo que toma imprimir una pieza montando y desmontando tres diferentes boquillas (diámetros diferentes), obteniendo una reducción del tiempo de trabajo de

más del 100%. Esto quiere decir que el tiempo en que la máquina tomaba los tiempos muertos para detener la impresión como:

1. desmontar la boquilla,
2. realizar una limpieza del bloque calentador para que la cuerda de la nueva boquilla enroscara correctamente,
3. montar la boquilla,
4. encender la impresora y esperar a que alcance su temperatura ideal de impresión,

estos pasos para cambiar la boquilla se eliminaron con el nuevo mecanismo. Solamente se tuvo que reajustar el diámetro del mecanismo y continuar trabajando en su normalidad; el mecanismo cuenta con dos sistemas de calibración ya sea por medio electrónico o manual, en este caso se realizó de forma manual lo que ocasiono un tiempo muerto de la maquina al calibrar un nuevo diámetro, de forma electrónica no requiere de algún tiempo muerto ya que podría hacerlo incluso manufacturando la pieza.

7.2 Recomendaciones

- El uso del mecanismo diseñado y construido en este proyecto se recomienda para objetos con dimensiones mayores que las que se trabajan en una impresora casera.
- El uso del mecanismo es recomendable para trabajos donde se manejen fluidos con mayores magnitudes, ya que las dimensiones y aperturas del mecanismo serán más aprovechadas, reduciendo el costo de complejidad del tamaño en las piezas.
- Para el uso de este mecanismo para fines de impresión 3D se recomienda el rediseño de sus piezas, considerando una escala menor.
- El uso de este mecanismo se recomienda únicamente para limitar el caudal del material fundido, y no para calentarlo.
- Para el uso de este mecanismo en la impresión 3D y trabajar con materiales cuyo punto de fundición requiera altas temperatura, será necesario incluir en el análisis el uso de una resistencia eléctrica que cumpla la función requerida.

- El uso de este mecanismo se recomienda para otras áreas de investigación, en donde se requiera el control de apertura y la incorporación de este junto con el control de extrusión y temperatura por diámetro dentro del código general de una impresora casera o industrial.

Referencias bibliográficas

DISEÑO DE UN EXTRUSOR DE INYECCIÓN VARIABLE PARA MANUFACTURA ADITIVA

REFERENCIAS

- Abdulrahman Albara, M. C.-K. (junio de 2020). Effective extrusion-based 3D printing system design for cementitious-based materials. *Elsevier*, 6, 100135.
- B.T. Wittbrodt, A. G. (Septiembre de 2013). Life-cycle economic analysis of distributed manufacturing with open-source 3-D printers. *Elsevier*, 23, 713-726.
- Barra Brito, R. N. (2017). *Diseño de extrusora de filamento para impresión 3D a partir de plásticos reciclados*. Tesis para título profesional, Universidad Técnica Federico Santa María, Departamento de ingeniería civil mecánica, Chile.
- BBC, M. (17 de Marzo de 2016). *BBC News*. Obtenido de Anthony Atala, el científico peruano que busca un lugar en la historia de la medicina con una impresora: https://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/03/160315_atala_impresora_organos_a_m
- BBC, M. (16 de Abril de 2019). *BBC News*. Obtenido de El primer minicorazón vivo impreso en 3D y hecho con tejido y vasos humanos (y por qué lo ven como "la medicina del futuro"): <https://www.bbc.com/mundo/noticias-47937217>
- Bret M. Boyle, P. T. (2019). 3D printing using powder melt extrusion. *Elsevier*, 29, 100811.
- Bucco, M. (2016). *La impresión 3D y su impresión en los servicios médicos (prótesis, fármacos, órganos)*. Tesis de grado, Universidad de San Andrés, Ciudad autónoma de Buenos Aires.
- D.Pollard, C. G. (2017). Filament Temperature Dynamics in Fused Deposition Modelling and Outlook for Control. *Elsevier*, 11, 536-544.
- Dudek, P. (20 de September de 2013). FDM 3D printing technology in manufacturing composite elements. *Archives of Metallurgy and Materials*, 58(No 4 December), 4. Obtenido de PAN: <https://journals.pan.pl/dlibra/show-content?id=88150&>
- El mundo 3D*. (2018). Obtenido de Doble Extrusor en las impresoras 3d. ¿Ventajas e inconvenientes?: <https://elmundo3d.com/doble-extrusor-impresora-3d/>
- Fonda, C. (2014). *Guía Práctica para tu Primera*. The Abdus Salam International Centre Theoretical Physics, Science Dissemination Unit, Trieste4.
- Hensen Mendoza, C. (2015). *DESARROLLO DE UN SISTEMA EXTRUSOR PARA UNA MÁQUINA DE PROTOTIPADO RÁPIDO*. Tesis de título profesional, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de ingeniería UNAM, ciudad de México.

- Impresoras3D. (1 de Enero de 2018). *Impresoras3D.com*. Obtenido de Impresoras3D.com everything to creat Web site: <https://www.impresoras3d.com/breve-historia-de-la-impresión-3d/>
- Jean-François Agassant, F. P. (octubre de 2019). Flow analysis of the polymer spreading during extrusion additive manufacturing. *Elsevier*, 29, 100794.
- Jian-Yuan Lee, J. A. (2017). Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Elsevier*, 120-133.
- K. Rajaguru, T. K. (s.f.). Additive manufacturing – State of art. *Elsevier*.
doi:www.elsevier.com/locate/matpr
- Landry, T. (15 de Marzo de 2016). *MatterHackers*. Obtenido de Extruders 101: A crash course on an essential component of your 3D printer:
<https://www.matterhackers.com/articles/extruders-101:-a-crash-course-on-an-essential-component-of-your-3d-printer>
- Mejía Flores, H. J. (22 de 07 de 2016). Ventajas y desventajas de las impresoras 3D. *Revista Tecnológica*, 5.
- Morales, R. (17 de abril de 2008). *Tendencias Informáticas*. Obtenido de Crean una impresora 3D capaz de autoreplicarse: https://www.tendencias21.net/Crean-una-impresora-3D-capaz-de-autoreplicarse_a2199.html
- R. Jerez Mesa, G. G. (2016). Estudio comparativo del comportamiento térmico de diferentes disipadores de calor para impresoras 3D a través de MEF. *Sociación Española de Ingeniería Mecánica, XXI Congreso nacional de ingeniería mecánica*, 8.
- Tianyun Yao, K. Z. (agosto de 2020). A novel generalized stress invariant-based strength model for inter-layer failure of FFF 3D printing PLA material. *Elsevier*, 193, 108799.
- Valls Pepió, I., & Blay Pozo, D. (2018). *Impresora 3D de resina por estereolitografía*. Tesis de grado, Universidad Politécnica de Catalunya, E.G., Catalunya.
- Vazhnoy, A. (2014). Impresión 3D. *Como va a cambiar el mundo*.
- Vinzenz Nienhaus, K. S. (Agosto de 2019). Investigations on nozzle geometry in fused filament fabrication. *Elsevier*, 28, 711-718.
- Wick, C., T. Benedict, J., & F. Veilleux, R. (1984). En S. o. Engineers, & E. S. 1986) (Edits.), *Tool and manufacturing engineers handbook* (Fourth Edition ed., Vol. 2, pág. 840).

CITAS DE FIGURAS

Mariano. (2011). Esquemas - Extrusoras. mayo 31, 2011, de Tecnología de los Plásticos Sitio web: <https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/esquemas-extrusoras.html>

BBC Mundo. (2016). Anthony Atala, el científico peruano que busca un lugar en la historia de la medicina con una impresora. BBC, 1, 1.

RepRap. (2014). RepRapPro Mendel/es. noviembre 28, 2014, de RepRap Sitio web: https://reprap.org/wiki/RepRapPro_Mendel/es

Lorenzo, J. (2020). Guía Definitiva sobre Extrusores y *Hotends* para Impresora 3D. marzo, 2020, de Ofelia Sitio web: <https://of3lia.com/guia-extrusor-y-hotend-impresora-3d/>

Lucía C. (2013). article_dualextruder. octubre 16, 2013, de 3D natives Sitio web: https://www.3dnatives.com/es/top-impresoras-3d-con-doble-extrusor-171020172/article_dualextruder/

Una publicación ofrecida por EU Automation. (10 de septiembre de 2019). ¿Es viable la fabricación aditiva? Reino Unido. AUTOMATED Recuperado de <https://www.euautomation.com/es/automated/article/es-viable-la-fabricacion-aditiva>

Nikkon. (2020). *Nikkon inc.* Obtenido de Nikkon.com.mx: <https://www.nikon.com.mx/nikon-products/camera-lenses/overview.page>

Anexos

ASIGNACIÓN DE NÚMERO DE SERIE

Para realizar un mejor análisis en el sistema se representarán en tres niveles diferentes anotados como N#, esto ayudará a identificar de mejor forma el área de trabajo de las piezas e identificar fallas en su ensamblado y funcionamiento, estos niveles están definidos mediante las características de las piezas y la función principal que la pieza realiza dentro del mecanismo.

Estos niveles están representados por:

- **N1** = Cero movimientos
- **N2** = Transporte de material
- **N3** = Movimiento

Piezas en cada nivel

Primer nivel:

- Plato base
- Tapa

Segundo nivel:

- Cuchilla
- Tubo guía

Tercer nivel:

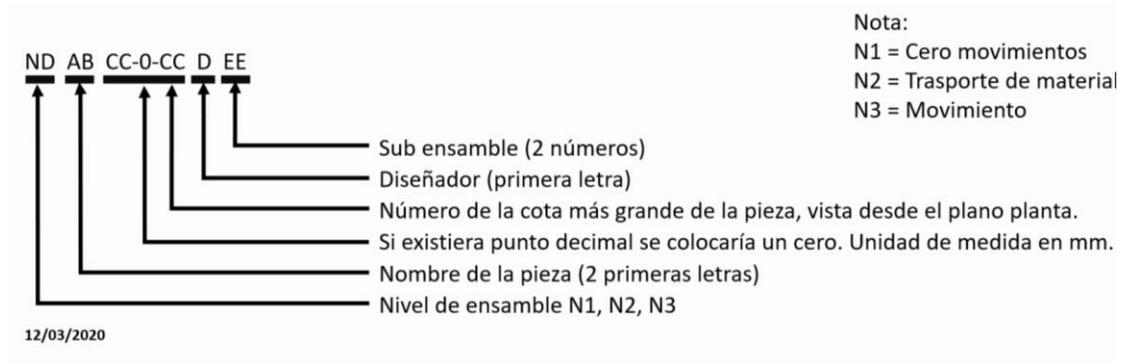
- Rotor
- Rodamiento
- Engranaje
- Cremallera

Para la fabricación de las piezas fue necesario realizar un seguimiento a las mismas, por lo que se les colocó un número de serie a cada pieza para darles referencia en el taller de manufactura. El serial de cada pieza fue dado mediante la lista de material, los niveles de ensamble y otros conceptos que definen al proyecto.

Reglas necesarias para codificar el ND, con el fin de estandarizar una identificación en las piezas del proyecto, ya que de esta manera se ejerce un mayor control y seguimiento de aquellas partes, componentes y/o productos que deban ser fabricados en talleres ajenos al institucional.

DISEÑO DE UN EXTRUSOR DE INYECCIÓN VARIABLE PARA MANUFACTURA ADITIVA
ANEXOS

A cada pieza se le otorgó un número de serie bajo las siguientes condiciones.



- A. Nivel de ensamble N1, N2, N3
- B. Nombre de la pieza (2 primeras letras)
- C. Número de la cota más grande de la pieza, vista desde el plano planta. Si existiera punto decimal se colocaría un cero. Unidad de medida en mm.
- D. Diseñador (primera letra)
- E. Subensamble (2 números)

Asignación de número de serie a los componentes del mecanismo.

Nombre de las piezas	Número de Serie
Plato base	N1PB100F01
Cuchillas	N2CU020F03
Tapa	N1TA100F07
Rotor	N3RO45F04
Tubo guía	N2TG12070F05

ELECTRÓNICA Y PROGRAMACIÓN DE PRUEBA

Se estudiaron las respuestas de cada motor con pruebas experimentales de software y hardware.

En consideración, se tomaron 2 tipos de motores para el movimiento del mecanismo iris, un motor a pasos y un servo motor, se plantean las condiciones de trabajo y sus características.

- Servomotor: MicroServo 9 g (SG90)
- Stepper motor: Step motor 28BYJ-48

MicroServo 9 g (SG90)

Un servo motor es un efector final empleado usualmente en la electrónica. A diferencia de otros motores que son controlados con la velocidad de giro, al servo se le indica directamente los ángulos deseados, la operación de un servo es de 0 a 180 grados sin excepción, ya que tienen internamente un mecanismo reductor no permite pasar de esos ángulos mecánicamente. Por lo que proporciona un alto par y grado de precisión **incluyendo decimas de grado.** Pero se sacrifica las velocidades de giro en comparación con los motores CC.



Figura 126. Servo motor

Conexión con la tarjeta Arduino

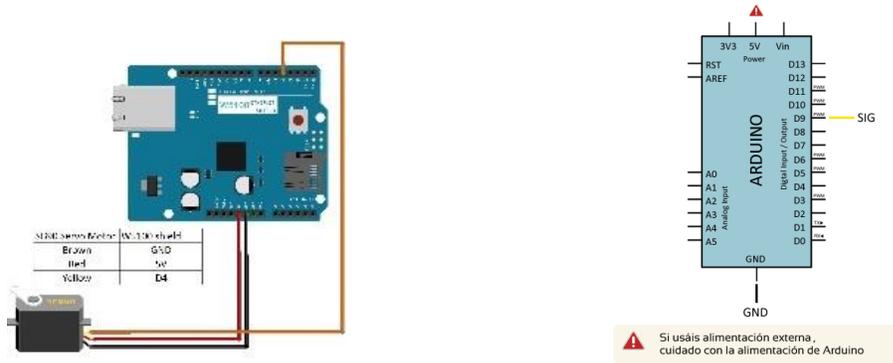


Figura 127. Cableado del servo motor.

Cableado de un servo motor (esquema eléctrico).

La posición "0" (pulso de 1,5 ms) es la media, "90" (pulso de ~ 2 ms) es la media, está completamente hacia la derecha, "-90" (pulso de ~ 1 ms) está completamente hacia la izquierda. Conectado GND y Vcc de la placa Arduino a los pines correspondientes del controlador.

Se realizaron las pruebas mediante un lenguaje de programación y compilado en el ambiente Arduino.

```
#include <Servo.h>
Servo servo1;
int pos = 0;
void setup()
{
  servo1.attach(9);
  servo1.write(0);
}
```



Figura 128. Programa y verificación de los grados que puede tomar un servo motor SG90.

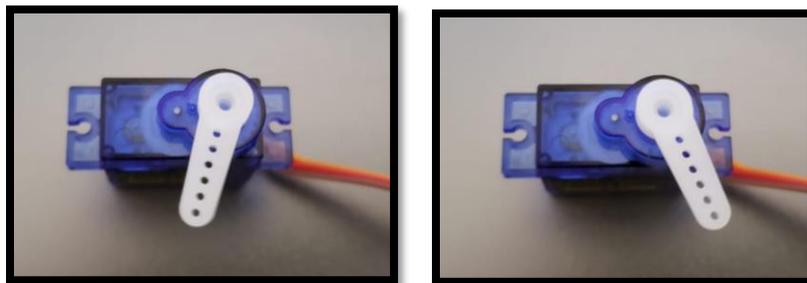


Figura 129. Prueba física de barrido #1. Step motor - 28BYJ-48

Un *stepper motor*, o motor a pasos como se conoce comúnmente, es un dispositivo electromecánico, que principalmente tiene la función de convertir pulsos electrónicos en movimientos mecánicos discretos. Su eje gira en incrementos discretos cuando los pulsos eléctricos se aplican en la secuencia correcta. La secuencia de pulsos está relacionada directamente con la dirección de rotación de los ejes del motor, la velocidad en el que puede rotar el motor está relacionada con la frecuencia de pulsos en su entrada y su durabilidad de rotación con el número de pulsos de entrada aplicada.



Figura 130. Step motor-28BYJ-48.

La ventaja de este tipo de motor es que no tiene un sistema de control de lazo cerrado, ya que su precisión no tiene la necesidad de dispositivos de detección y codificadores ópticos, entre otros.

Conexión con la tarjeta Arduino

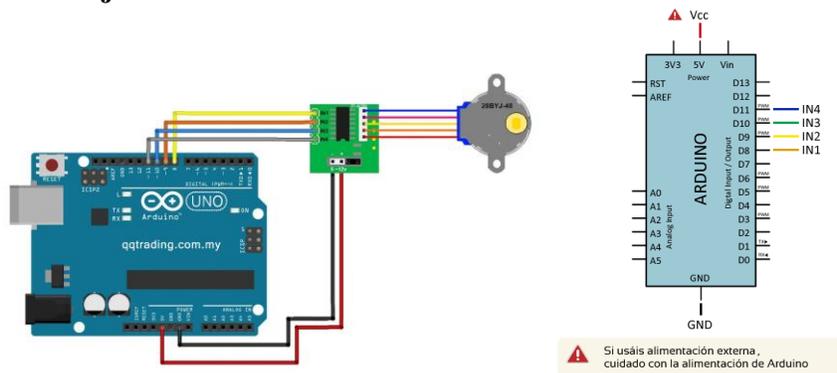


Figura 131. Cableado del step motor.

Cableado de un step motor esquema eléctrico.

Para excitar de manera independiente o junta a las 4 fases IN1, IN2, IN3, IN3, se toman 4 puertos digitales de nuestra placa Arduino para que en la secuencia deseada obtengan un

HIGH del pin correspondiente de la placa Arduino. Conectado GND y VCC de la placa Arduino a los pines correspondientes del controlador.

Se realizaron las pruebas mediante un lenguaje de programación y compilado en el ambiente Arduino.

Programa parcial del control del motor Step motor 28BYJ-48

```
//definicion de pins
const int motorPin1 = 9; // 28BYJ48 In1
const int motorPin2 = 10; // 28BYJ48 In2
const int motorPin3 = 11; // 28BYJ48 In3
const int motorPin4 = 12; // 28BYJ48 In4

//definicion variables
int motorSpeed = 1200; //variable para fijar la velocidad
int stepCounter = 0; // contador para los pasos
int stepsPerRev = 4076; // pasos para una vuelta completa
```



Figura 132. Programa y verificación de los grados que puede tomar un servo motor SG90.

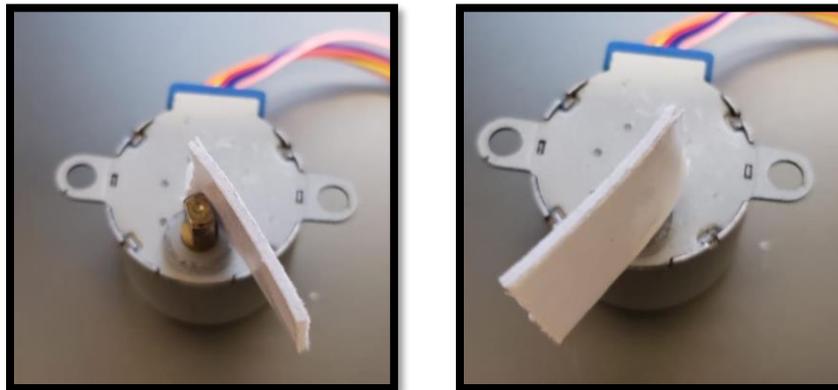


Figura 133. Prueba física de barrido #2.

Una vez teniendo los datos de las pruebas e información de la literatura se procede a la experimentación física únicamente del mecanismo.

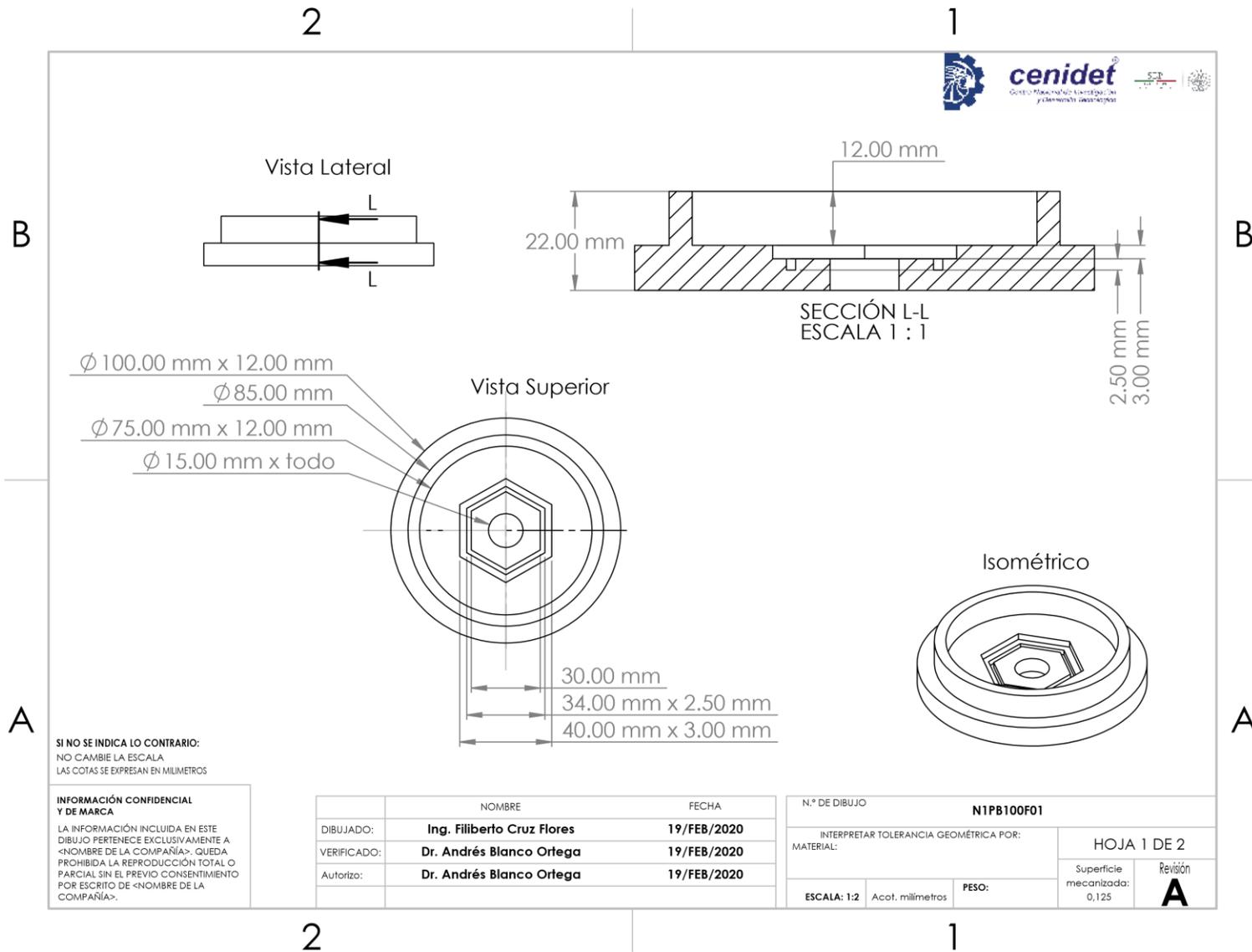
Colocando un sistema de movimiento independiente y automatizado, para lograr observar sus fallas y aciertos que esté presente.

Planos

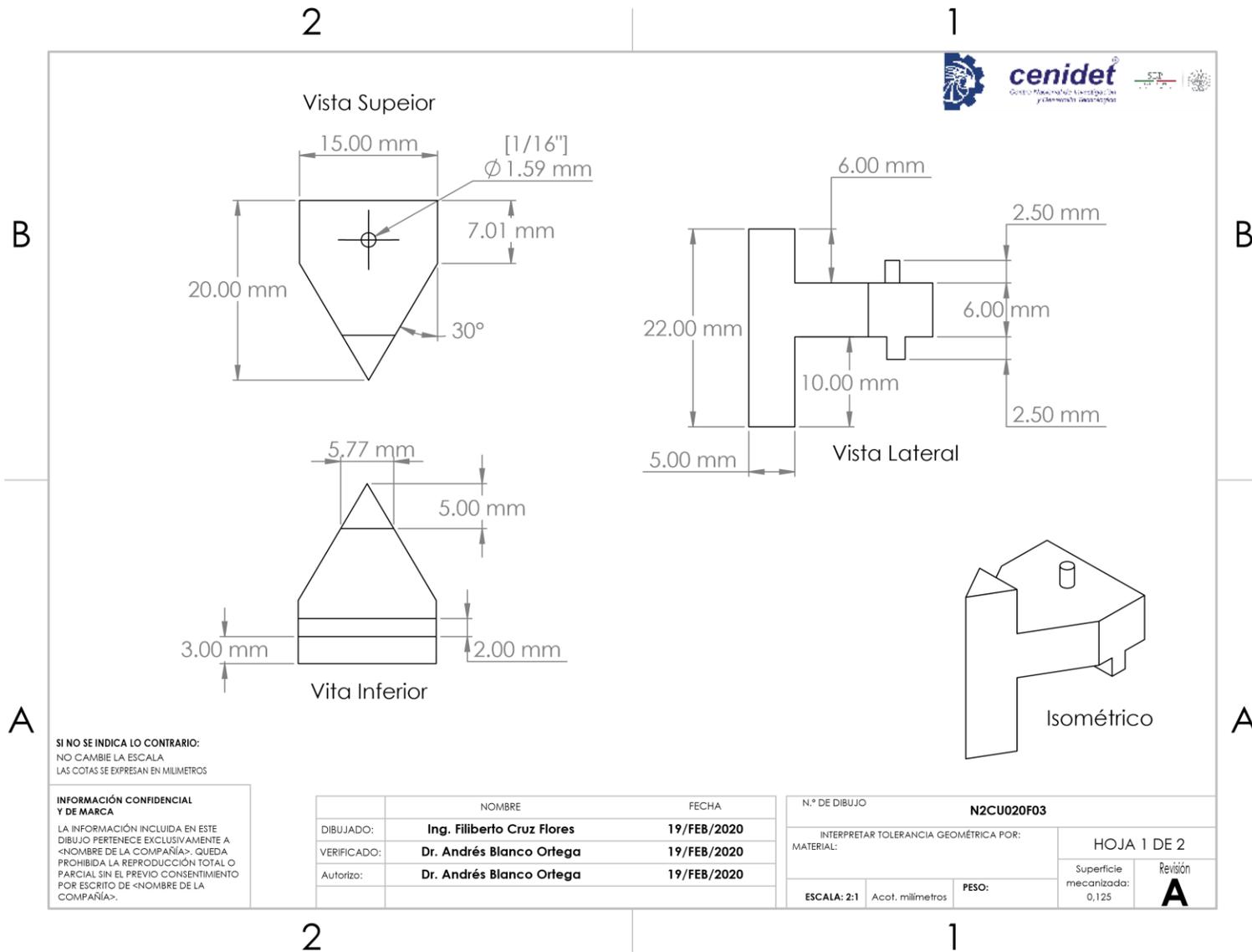
Las piezas fueron fabricadas en aluminio 6061

DISEÑO DE UN EXTRUSOR DE INYECCIÓN VARIABLE PARA MANUFACTURA ADITIVA

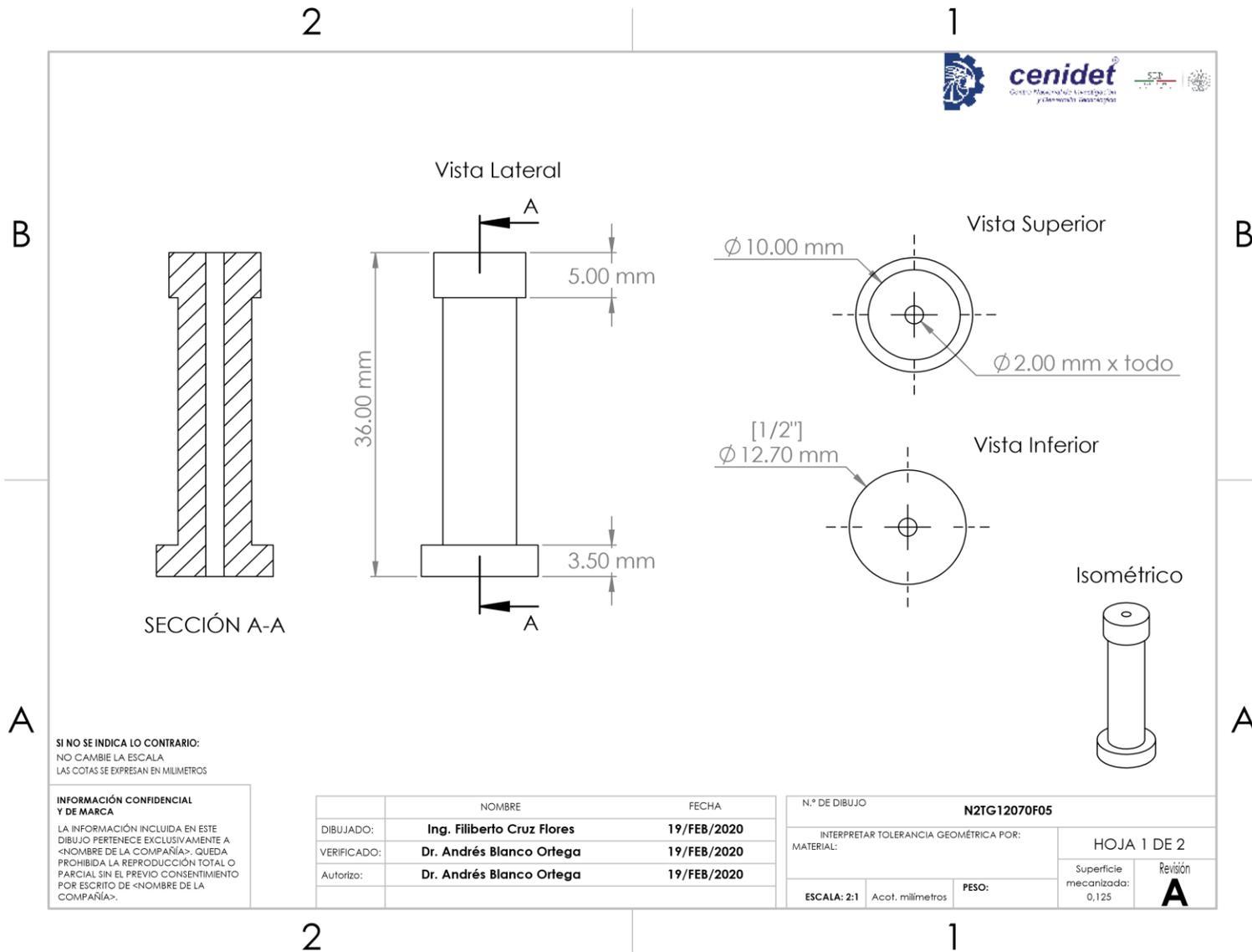
ANEXOS



ANEXOS



ANEXOS



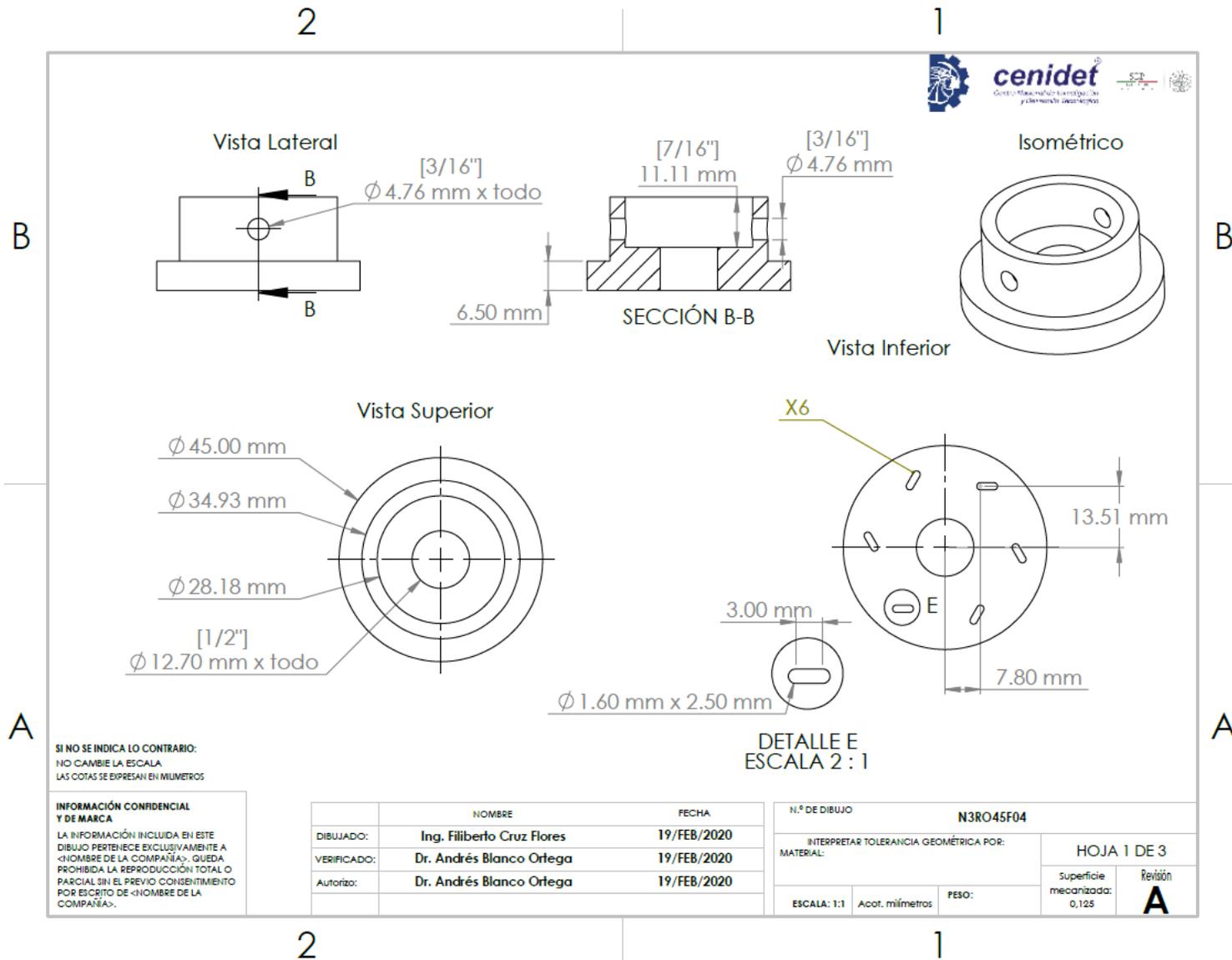
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
NO CAMBIE LA ESCALA
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MILIMETROS

INFORMACIÓN CONFIDENCIAL Y DE MARCA
LA INFORMACIÓN INCLUIDA EN ESTE DIBUJO PERTENECE EXCLUSIVAMENTE A «NOMBRE DE LA COMPAÑÍA». QUEDA PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN EL PREVIO CONSENTIMIENTO POR ESCRITO DE «NOMBRE DE LA COMPAÑÍA».

	NOMBRE	FECHA
DIBUJADO:	Ing. Filiberto Cruz Flores	19/FEB/2020
VERIFICADO:	Dr. Andrés Blanco Ortega	19/FEB/2020
Autorizo:	Dr. Andrés Blanco Ortega	19/FEB/2020

N.º DE DIBUJO		N2TG12070F05	
INTERPRETAR TOLERANCIA GEOMÉTRICA POR:		HOJA 1 DE 2	
MATERIAL:		Superficie mecanizada:	Revisión
ESCALA: 2:1	Acot. milímetros	0,125	A

ANEXOS



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
NO CAMBIE LA ESCALA
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MILIMETROS

INFORMACIÓN CONFIDENCIAL Y DE MARCA
LA INFORMACIÓN INCLUIDA EN ESTE DIBUJO PERTENECE EXCLUSIVAMENTE A <NOMBRE DE LA COMPAÑÍA>. QUEDA PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL SIN EL PREVIO CONSENTIMIENTO POR ESCRITO DE <NOMBRE DE LA COMPAÑÍA>.

	NOMBRE	FECHA
DIBUJADO:	Ing. Filiberto Cruz Flores	19/FEB/2020
VERIFICADO:	Dr. Andrés Blanco Ortega	19/FEB/2020
Autorizó:	Dr. Andrés Blanco Ortega	19/FEB/2020

N.º DE DIBUJO		N3RO45F04	
INTERPRETAR TOLERANCIA GEOMÉTRICA POR:		HOJA 1 DE 3	
MATERIAL:		Superficie mecanizada:	Revisión
ESCALA: 1:1	Acot. milímetros	0,125	A