



# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**



## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EXTRUSOR PARA UN EQUIPO DE MANUFACTURA ADITIVA CON LA FINALIDAD DE DEPOSITAR CERA DE FUNDICIÓN**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**VEGA GALARZA DAVID MAURICIO**  
david.vegad@epn.edu.ec

**DIRECTOR: Ing. OSCAR EFRAÍN SOTOMAYOR GÁLVEZ**  
oscar.sotomayor@epn.edu.ec

**Quito, Noviembre, 2017**

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el señor **DAVID MAURICIO VEGA GALARZA**, bajo mi supervisión.

---

Ing. Óscar Sotomayor

**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## DECLARACIÓN

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

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

---

David Mauricio Vega Galarza

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a mis padres, a mis hermanos a mi abuelito y a mi novia, porque siempre estuvieron a mi lado siendo esa base sólida sobre la cual he podido sostenerme y apoyarme en los momentos difíciles.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, por el amor, el apoyo, la paciencia y la motivación que fueron necesarios para que alcance esta meta.

A mis hermanos por enseñarme que nunca hay que darse por vencido sin importar todas las adversidades que se pueden presentar.

A mis familiares, por todo el cariño y aliento que me supieron brindar.

A mi novia Analí, porque siempre estuvo a mi lado para ayudarme y darme ánimos para continuar.

Un agradecimiento especial a mi padre Luis Vega y a mis amigos Santiago Aguas y Esteban Castellanos por su ayuda que fue esencial para lograr este objetivo.

Todos son actores directos de este logro y por ello les agradeceré inmensamente toda mi vida.

# ÍNDICE

<b>Certificación</b> .....	i
<b>Declaración</b> .....	ii
<b>Dedicatoria</b> .....	iii
<b>Agradecimientos</b> .....	iv
<b>Resumen</b> .....	xiii
<b>Abstract</b> .....	xiv
<b>Introducción</b> .....	1
<b>Pregunta de investigación</b> .....	3
<b>Objetivo general</b>	
<b>Objetivos específicos</b>	
<b>1. MARCO TEÓRICO</b> .....	4
1.1. Fundición a la cera perdida	
1.1.1. Antecedentes	
1.1.2. Método de la cera perdida .....	5
1.2. Manufactura aditiva.....	6
1.2.1. Modelado por deposición fundida (FDM) .....	9
1.2.2. Estereolitografía (SLA) .....	12
1.2.3. Sinterizado selectivo por láser (SLS) .....	13
1.3. Extrusión .....	14
1.3.1. Tipos de extrusores	
<b>2. METODOLOGÍA</b> .....	18
2.1. Descripción de la metodología	
2.2. Descomposición funcional .....	20
2.2.1. Módulo 1: Alimentación .....	22
2.2.2. Módulo 2: Extrusión.....	25
2.2.3. Módulo 3: Control .....	30
2.2.4. Esquema final.....	37

2.3. Diseño esquemático del prototipo .....	38
2.4. Diseño y selección de componentes.....	39
2.4.1. Motor de pasos y tornillo de potencia	
2.4.2. Sistema de extrusión .....	42
2.4.3. Sistema de control.....	56
2.5. Construcción de los componentes del prototipo .....	63
2.5.1. Sistema de extrusión .....	64
2.5.2. Piezas de soporte.....	65
2.6. Ensamble del prototipo .....	66
2.6.1. Ensamble de elementos mecánicos	
2.7. Protocolo de pruebas .....	70
2.7.1. Preparación de la cera	
2.7.2. Pruebas de funcionamiento.....	71
2.7.3. Pruebas de impresión.....	72
2.8. Repotenciación del diseño .....	73
2.9. Diseño de detalle .....	76
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	77
3.1. Resultados	
3.1.1. Preparación de las ceras	
3.1.2. Pruebas de funcionamiento.....	78
3.1.3. Pruebas de impresión.....	89
3.2. Discusión.....	99
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	103
4.1. Conclusiones	
4.2. Recomendaciones .....	104
<b>Referencias Bibliográficas.....</b>	<b>106</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>109</b>
<b>Anexo A: Fichas técnicas y catálogo</b>	
<b>Anexo A1: Ficha técnica motor de pasos .....</b>	<b>110</b>

<b>Anexo A2:</b> Catálogo de rodamientos lineales y cálculo de vida nominal .....	111
<b>Anexo A3:</b> Fichas técnicas ceras .....	114
<b>Anexo A4:</b> Ficha técnica driver A4988 .....	129
<b>Anexo A5:</b> Ficha técnica Arduino UNO .....	139
<b>Anexo A6:</b> Ficha técnica termostato W1209 .....	143
<b>Anexo B: Código de programación</b> .....	146
<b>Anexo C: Planos de conjunto y despiece</b> .....	150

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Evaluación de cada criterio.....	23
Tabla 2.2. Evaluación de las soluciones respecto de la facilidad de acoplar. ....	23
Tabla 2.3. Evaluación de las soluciones respecto de la facilidad de alimentación.....	24
Tabla 2.4. Evaluación de las soluciones respecto de la facilidad de fabricación. ....	24
Tabla 2.5. Tabla de soluciones para el módulo 1. ....	24
Tabla 2.6. Alternativas de solución para el módulo de extrusión. ....	27
Tabla 2.7. Evaluación de cada criterio.....	28
Tabla 2.8. Evaluación de las soluciones respecto de la facilidad de fabricar.....	28
Tabla 2.9. Evaluación de las soluciones respecto del tamaño. ....	28
Tabla 2.10. Evaluación de las soluciones respecto del bajo costo.....	29
Tabla 2.11. Evaluación de las soluciones respecto del bajo peso. ....	29
Tabla 2.12. Evaluación de las soluciones respecto de la facilidad de trabajar con cera. ...	29
Tabla 2.13. Tabla de soluciones para el módulo 2. ....	30
Tabla 2.14. Alternativas de solución para el módulo de control. ....	33
Tabla 2.15. Evaluación de cada criterio.....	34
Tabla 2.16. Evaluación de las soluciones respecto de la precisión de flujo de material. ...	34
Tabla 2.17. Evaluación de las soluciones respecto del control de temperatura. ....	35
Tabla 2.18. Evaluación de las soluciones respecto de la facilidad de acoplamiento. ....	35
Tabla 2.19. Evaluación de las soluciones respecto del bajo costo.....	36
Tabla 2.20. Evaluación de las soluciones respecto del bajo peso. ....	36
Tabla 2.21. Tabla de soluciones para el módulo 3. ....	37
Tabla 2.22. Selección de la resolución de micropasos.....	60



Tabla 2.23. Lista de componentes del prototipo.....	63
Tabla 2.24. Porcentaje en peso de las mezclas de ceras. ....	70
Tabla 3.1. Datos de temperatura vs tiempo: W1209 vs termocupla.....	78
Tabla 3.2. Datos de encendido/apagado: $T_{SET} = 61^{\circ}C$ . ....	81
Tabla 3.3. Datos de encendido/apagado: $T_{SET} = 58^{\circ}C$ . ....	82
Tabla 3.4. Datos de encendido/apagado: $T_{SET} = 64^{\circ}C$ . ....	83
Tabla 3.5. Temperatura máxima y mínima en cada ciclo: $T_{SET} = 61^{\circ}C$ . ....	84
Tabla 3.6. Temperatura máxima y mínima en cada ciclo: $T_{SET} = 58^{\circ}C$ . ....	85
Tabla 3.7. Temperatura máxima y mínima en cada ciclo: $T_{SET} = 64^{\circ}C$ . ....	86
Tabla 3.8. Calibración del prototipo extrusor. ....	87
Tabla 3.9. Ensamble de la base. ....	90
Tabla 3.10. Ensamble del marco superior. ....	90
Tabla 3.11. Ensamble del sistema motriz. ....	91
Tabla 3.12. Configuración del software MACH3 CNC. ....	95

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Proceso de fundición a la cera perdida. ....	6
Figura 1.2. Resumen de pasos del proceso de manufactura aditiva.....	7
Figura 1.3. Estratificación y altura de capa: 1mm (izq.), 100µm (der.) .....	8
Figura 1.4. Cabezal de impresión de una máquina FDM. ....	10
Figura 1.5. Cadena de Acrilonitrilo Butadieno Estireno. ....	11
Figura 1.6. Obtención del Ácido Poliláctico. ....	11
Figura 1.7. Estereolitografía. ....	12
Figura 1.8. Sinterizado selectivo por láser.....	13
Figura 1.9. Extrusor de pistón.....	14
Figura 1.10. Extrusor de tornillo.....	15
Figura 1.11. Extrusión plana.....	16
Figura 1.12. Extrusor de rodillo de impresoras 3D. ....	17
Figura 2.1. Procedimiento general.....	19
Figura 2.2. Descomposición funcional: Nivel 0.....	21
Figura 2.3. Descomposición funcional: Nivel 1.....	21
Figura 2.4. Descomposición funcional: Nivel 2.....	21
Figura 2.5. Tolva de alimentación.....	22
Figura 2.6. Rodillos accionados por motor. ....	22
Figura 2.7. Tochos de cera.....	23
Figura 2.8. Luz halógena doble contacto.....	25
Figura 2.9. Niquelinas.....	25
Figura 2.10. Mechero.....	26
Figura 2.11. Extrusor de pistón.....	26
Figura 2.12. Extrusor de tornillo.....	26
Figura 2.13. Extrusor de rodillos.....	27
Figura 2.14. Interruptor de control de temperatura.....	30
Figura 2.15. Tarjeta Arduino UNO.....	31
Figura 2.16. Motor DC. ....	32
Figura 2.17. Cilindro hidráulico. ....	32
Figura 2.18. Cilindro neumático.....	32
Figura 2.19. Motor de pasos.....	33
Figura 2.20. Diseño conceptual del prototipo de extrusor de cera. ....	37
Figura 2.21. Boceto del prototipo de extrusor de cera.....	38

Figura 2.22. Cargas interactuando sobre la rosca al elevar una carga W.....	40
Figura 2.23. Dimensiones del cilindro.....	43
Figura 2.24. Dimensiones del bloque calefactor.....	44
Figura 2.25. Dimensiones del émbolo. ....	44
Figura 2.26. Dimensiones de los soportes del cilindro. ....	45
Figura 2.27. Dimensiones del soporte del motor. ....	46
Figura 2.28. Dimensiones del soporte del émbolo. ....	46
Figura 2.29. Boquilla de extrusión. ....	47
Figura 2.30. Esquema del extrusor.....	47
Figura 2.31. Diagrama de cuerpo libre de la viga doblemente empotrada.....	48
Figura 2.32. Valores de momento en los apoyos en Abaqus. ....	53
Figura 2.33. Valores de deflexión en Abaqus. ....	53
Figura 2.34. Perfil estructural de aluminio. ....	54
Figura 2.35. Acople flexible 5-8. ....	54
Figura 2.36. Rodamiento lineal LM8UU.....	56
Figura 2.37. Tarjeta de control Arduino UNO. ....	57
Figura 2.38. Resistencia eléctrica de calentamiento. ....	58
Figura 2.39. Interruptor W1209.....	59
Figura 2.40. Diagrama de conexión microcontrolador-driver en modo “full steps”. ....	59
Figura 2.41. “Decay Mode”: pasos completos (izq), medios pasos (der). ....	60
Figura 2.42. Driver Pololu A4988.....	62
Figura 2.43. Fuente 12V.....	62
Figura 2.44. Diseño del prototipo de extrusor de cera.....	62
Figura 2.45. Construcción del calefactor y émbolo.....	64
Figura 2.46. Piezas de soporte: a) Soporte del cilindro 1 b) Soporte del cilindro 2 c) Soporte del émbolo d) Soporte del motor.....	66
Figura 2.47. Piezas de soporte montadas sobre el riel. ....	67
Figura 2.48. Montaje de motor, guía y tornillo de potencia.....	67
Figura 2.49. Ensamble del cilindro y émbolo con la estructura de soporte. ....	68
Figura 2.50. Resistencia eléctrica y sensor de temperatura en el bloque calefactor. ....	68
Figura 2.51. Caja de control. ....	69
Figura 2.52. Esquema de conexión.....	69
Figura 2.53. Ceras: a) “Cera de savia de látex, b) Cera 115308, c) Cera parafina. ....	70
Figura 2.54. Balanza digital. ....	71
Figura 2.55. Esquema del montaje para la prueba de impresión. ....	72
Figura 2.56. Nuevo diseño para dos guías.....	73

Figura 2.57. Nuevo diseño de los soportes con nervaduras. ....	74
Figura 2.58. Nuevo diseño con cojinete de deslizamiento para el tornillo de potencia. ....	74
Figura 2.59. Diseño final del prototipo extrusor de cera. ....	75
Figura 3.1. Fundición de la mezcla 1 (100% cera en base de savia de látex). ....	77
Figura 3.2. Elaboración de tochos de cera. ....	77
Figura 3.3. Tochos: a) cera de savia de látex, b) cera 115308, c) cera parafina. ....	78
Figura 3.4. Mesa giratoria con circuito regulador de velocidad. ....	89
Figura 3.5. Impresora ILIOS 3D printer ensamblada. ....	93
Figura 3.6. Montaje del prototipo extrusor sobre la impresora ILIOS. ....	94
Figura 3.7. Montaje de la mesa giratoria. ....	98
Figura 3.8. Deposición de cera. ....	98
Figura 3.9. Impresión de prueba. ....	98
Figura 3.10. Impresión con la mezcla 1 (100% cera de savia de látex). ....	99
Figura 3.11. Impresión con la mezcla 4 (50% cera de látex y 50% cera 115308). ....	99
Figura 3.12. Impresión con la mezcla 5 (100% cera 115308). ....	99

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 2.1. Diagrama de fuerza cortante.....	51
Gráfica 2.2. Diagrama de momento flector.....	51
Gráfica 3.1. Temperatura vs tiempo: W1209 vs termocupla, $T_{SET} = 61^{\circ}C$ .....	80
Gráfica 3.2. Temperatura vs tiempo: W1209 vs termocupla, $T_{SET} = 58^{\circ}C$ .....	80
Gráfica 3.3. Temperatura vs tiempo: W1209 vs termocupla, $T_{SET} = 64^{\circ}C$ .....	81
Gráfica 3.4. Encendido/apagado vs tiempo: $T_{SET} = 61^{\circ}C$ .....	82
Gráfica 3.5. Encendido/apagado vs tiempo: $T_{SET} = 58^{\circ}C$ .....	83
Gráfica 3.6. Encendido/apagado vs tiempo: $T_{SET} = 64^{\circ}C$ .....	84
Gráfica 3.7. $T_{m\acute{a}x}$ y $T_{m\acute{i}n}$ vs $N^{\circ}$ de ciclos: $T_{SET} = 61^{\circ}C$ .....	85
Gráfica 3.8. $T_{m\acute{a}x}$ y $T_{m\acute{i}n}$ vs $N^{\circ}$ de ciclos: $T_{SET} = 58^{\circ}C$ .....	86
Gráfica 3.9. $T_{m\acute{a}x}$ y $T_{m\acute{i}n}$ vs $N^{\circ}$ de ciclos: $T_{SET} = 64^{\circ}C$ .....	87

## RESUMEN

El presente proyecto tiene por objetivo construir un extrusor para un equipo de manufactura aditiva con el fin de depositar cera de fundición. Lo que se pretende es desarrollar un prototipo, como el primer paso al desarrollo futuro de una impresora 3D que utilice este extrusor para la deposición de cera y elaboración de modelos para fundición a la cera perdida.

Para esto, se parte de un análisis funcional para establecer alternativas de solución; posteriormente se procede a la selección del tipo de extrusor que se adapte a las necesidades a través de tablas de ponderación. Una vez que se selecciona la alternativa se realiza el diseño de materialización del prototipo y se construye un primer prototipo de extrusor. Se realizan pruebas de funcionamiento y con base en las limitaciones del proceso se repotencia el diseño. Con el diseño final se construye un nuevo prototipo y se repiten las pruebas de funcionamiento. De las pruebas se desprenden correcciones finales y calibración del prototipo. Con el funcionamiento comprobado se procede a realizar pruebas de deposición con varias mezclas de ceras; dos tipos de ceras utilizadas en joyería, y cera parafina. Estas pruebas se realizaron bajo diferentes condiciones de temperatura de extrusión.

Finalmente, se procede a realizar una prueba de impresión acoplado el prototipo extrusor a una impresora 3D ILIOS para obtener un pequeño cilindro con las diferentes mezclas de cera.

**Palabras Clave:** cera de fundición, cera perdida, extrusión, fundición, manufactura aditiva, modelado por deposición fundida.

## ABSTRACT

The aim of this work is to build an extruder for an additive manufacturing device in order to deposit casting wax. What is intended is to develop a prototype, as the first step in the future development of a 3D printer using this extruder for the deposition of casting wax and manufacturing of lost wax casting models.

For this, it is started from a functional analysis to establish alternative solutions; subsequently the selection of the type of extruder that adapts to the needs is carried out through weighing tables. Once the alternative is selected, the prototype materialization design is performed and a first extruder prototype is built. Performance tests are performed, and based on the limitations of the process, the design is reworked. With the final design, a new prototype is built and the performance tests are repeated. From the tests, final corrections and calibration of the prototype will be released. Once the operation is tested, deposition tests are carried out with several mixtures of waxes; two types of waxes used in jewelry, and paraffin wax. These tests were performed with different extrusion temperature conditions.

Finally, a printing test is carried out by coupling the prototype extruder to an ILIOS 3D printer to obtain a small cylinder with the different mixtures of waxes.

**Keywords:** additive manufacturing, casting, extrusion, fused deposition modeling, investment casting wax, lost wax.

# **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EXTRUSOR PARA UN EQUIPO DE MANUFACTURA ADITIVA CON LA FINALIDAD DE DEPOSITAR CERA DE FUNDICIÓN**

## **INTRODUCCIÓN**

La fundición es una de las técnicas de fabricación más antiguas y de mayor uso por su facilidad de fabricación de distintos metales. Dependiendo del producto final que se desea obtener, se puede aplicar diferentes métodos de fundición, en los cuales los modelos se pueden realizar con una amplia gama de materiales; pero por lo general su elaboración es artesanal. Al tratarse de un proceso artesanal, es susceptible a fallos y defectos, y con baja repetitividad. Recientemente, por ejemplo, la fabricación del busto del Ex Rector Rubén Orellana se realizó en el Laboratorio de Fundición de la Facultad. En caso de que se requiera la fabricación de otro busto sería necesario realizar un nuevo modelo; y al ser un trabajo artesanal, seguramente será diferente al anterior.

La forma de obtener modelos con gran precisión geométrica, minimizando defectos y que permita repetitividad, es con el uso de alguna tecnología de manufactura controlada por un computador; es así que el uso de manufactura aditiva o el maquinado CNC pueden contribuir al proceso de fabricación de modelos de fundición. Pero no solo depende de la precisión del modelo para obtener un producto final de alta calidad, sino también del proceso de fundición utilizado. Una de las técnicas de fundición se conoce como fundición en cera perdida; como menciona De la Fuente en [1], se trata de un proceso en el cual, el modelo se realiza en un material que puede ser fundido, quemado o disuelto sin destruir el molde, asegurando una buena precisión geométrica de las piezas y sobre todo permitiendo la fabricación de piezas con alta complejidad. Debido a que no se necesita extraer el modelo, las partes a fabricar pueden tener contrasalidas, lo cual no es posible por otros métodos.

En la manufactura aditiva por extrusión termoplástica, un diseño preparado en un software CAD (Computer Aid Design) se fabrica con un polímero termoplástico. Comúnmente Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), o ácido poliláctico (PLA). En concordancia con Vallejo et al. [2], estos modelos poliméricos pueden ser utilizados como modelos de fundición al natural o perdidos. Sin embargo, usar un modelo plástico como modelo perdido presenta varias desventajas. En primer lugar, se necesitan altas temperaturas para



provocar la fusión del modelo plástico, lo que incrementa costos de producción y el riesgo de daños en los moldes por choque térmico. En segundo lugar, los modelos plásticos son de difícil remoción del interior del molde. Entre los defectos en las piezas obtenidas por Vallejo et al. en su trabajo de investigación [2], desarrollado en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional, están la falta de fusión del polímero utilizado generando la presencia de residuos sólidos en cavidades pequeñas, y la falta de llenado de la aleación fundida.

El modelo de plástico también puede ser utilizado para construir un modelo en cera de forma indirecta. A partir de ese modelo en plástico se puede obtener un molde, sea este de silicona, goma, látex, entre otros; y con este molde fundir la cera para obtener el modelo a ser utilizado en la fundición de la pieza final. Sin embargo, los distintos pasos en la construcción del modelo en cera, reducen la productividad y eficiencia del proceso y pueden afectar de forma significativa las tolerancias de la parte a producir. Por esta razón, el presente proyecto contribuirá en la construcción de un equipo de manufactura aditiva que fabrique los modelos directamente en cera de fundición.

A pesar de que comercialmente existen equipos de manufactura aditiva que utilizan cera, y que normalmente son utilizados en joyería, estos equipos tienen un alto costo. Se puede mencionar como ejemplo la impresora PROJET 3510, cuyo precio aproximado en el mercado es de USD \$70.000,00 como se puede constatar en la página de 3DHubs, una plataforma en línea que brinda servicio de impresión 3D globalmente [3]. Pero este no es el único inconveniente de adquirir uno de estos equipos, pues además se genera una dependencia tecnológica con los países fabricantes, a quienes se debe recurrir para mantenimiento, reparación e incluso para que brinden capacitación al personal técnico nacional y para la compra de insumos que son normalmente costosos.

Esta modalidad de fabricación supone una nueva revolución industrial y es la pieza angular de la fábrica de la era digital y del futuro industrial de los países. Contrario a la adquisición de un equipo de manufactura aditiva, este estudio contribuirá a la construcción del equipo en el laboratorio de fundición. Esto permitirá un conocimiento profundo del equipo, lo que repercutirá en incrementar la capacidad de reparación o ensamble, independiente de proveedores externos. Además, se plantea el uso de programas o paquetes computacionales de código abierto, los mismos que permitirán un control del equipo sin la necesidad de adquirir licencias de uso. De igual manera, se pretende usar controladores electrónicos de código abierto, los mismos que se comercializan a costos bajos y de los que se tiene toda la información disponible para el programador y ensamblador.

Al combinar las ventajas de la manufactura aditiva con las ventajas del uso de la técnica de fundición a la cera perdida, se puede lograr el desarrollo de la industria metalúrgica en nuestro país, incrementando los estándares de calidad y disminuyendo los tiempos de fabricación de modelos para fundición.

## **Pregunta de investigación**

¿Es factible la construcción de un extrusor para un equipo de manufactura aditiva con el fin de depositar cera de fundición?

## **Objetivo general**

Diseñar y construir un extrusor para un equipo de manufactura aditiva que deposite cera de fundición

## **Objetivos específicos**

- Desarrollar el sistema de extrusión para depositar cera de fundición.
- Establecer el mecanismo de calentamiento para fundir la cera de moldeo y que sea útil para el proceso de inyección.
- Determinar el flujo de material necesario para completar de manera exitosa el proceso de manufactura aditiva.
- Especificar un sistema de control que permita depositar y regular la cantidad exacta de material con una velocidad de deposición adecuada.

# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Fundición a la cera perdida

### 1.1.1. Antecedentes

La fundición es uno de los procesos de manufactura más utilizados en la industria. En este proceso se calienta un metal a una temperatura lo suficientemente elevada para que sea transformado completamente a su estado líquido; luego de esto, el metal líquido es vertido en un molde. Una vez que el metal líquido ha alcanzado la cavidad del molde, empieza a solidificarse adoptando su forma. Finalmente, cuando el metal se ha enfriado lo suficiente, se procede a extraerlo del molde y de ser requerido se realiza algún proceso de acabado de la pieza [4, 5].

De acuerdo con una nota histórica en [4], la fundición de metales data del período comprendido entre los años 4000 y 3000 años A. C. con el descubrimiento del cobre. Las civilizaciones, que hasta esa época solo martillaban el oro dándole la forma deseada, tuvieron que buscar otra manera de trabajar con el cobre, pues, aunque este podía ser forjado, no era posible obtener formas complejas debido a que el endurecimiento por deformación hacía el proceso más difícil.

Con el tiempo se han desarrollado diferentes métodos de fundición con el propósito de mejorar el proceso por lo que cada uno de estos métodos tiene sus propias características y aplicaciones.

Con base en el tipo de molde utilizado, los procesos de fundición pueden ser divididos en dos categorías según Groover [4]: moldes desechables y moldes permanentes. Sin embargo, Kalpakjian et al. [5] menciona una tercera categoría que son los moldes compuestos.

#### 1.1.1.1. Moldes desechables

En los procesos con este tipo de moldes, una vez que el metal fundido ha solidificado, es necesario destruir el molde para obtener la pieza. Generalmente estos moldes están hechos de yeso, arena, cerámicos o materiales similares que son refractarios para soportar las temperaturas de los metales fundidos; y se mezclan con aglutinantes. La fundición con arena es el proceso más utilizado de molde desechable. El molde se obtiene partiendo de un modelo, el cual también puede ser permanente o desechable [4].

#### **1.1.1.2. Moldes permanentes**

Como su nombre lo indica, este tipo de moldes no se destruyen al extraer la pieza fundida y se los usa repetidamente en la obtención de varias piezas. Los moldes permanentes están hechos de metal, a fin de mantener su resistencia a altas temperaturas y además están diseñados para que la extracción de la pieza fundida sea fácil. Debido a que los moldes metálicos son mejores conductores de calor, la pieza fundida se somete a una mayor velocidad de enfriamiento afectando la microestructura y tamaño de grano de la misma [4].

#### **1.1.1.3. Moldes compuestos**

Estos moldes están hechos de dos o más materiales diferentes como arena, grafito y metal. Tienen una parte desechable y otra permanente, y son utilizados con el fin de controlar la velocidad de enfriamiento de la pieza fundida, mejorar la resistencia del molde y reducir costos del proceso [5].

#### **1.1.2. Método de la cera perdida**

El proceso de fundición a la cera perdida, conocido también como fundición por revestimiento, es un ejemplo de proceso de molde y modelo desechable.

Un modelo desechable es aquel que se fabrica en un material que puede ser derretido para extraerlo del molde antes de verter el metal fundido, o un material que pueda ser quemado durante el vertido del metal. Esto permite que los moldes no necesiten planos de separación y ángulos de retiro [6].

De acuerdo con el Investment Casting Institute en el investment casting handbook [7], este proceso consiste en fabricar un modelo, de la pieza a ser elaborada, en cera u otro material apropiado, mediante moldeo. Posteriormente este modelo es recubierto por material refractario, como sílice muy fina, alúmina o una mezcla de estas junto con aglutinantes como la sílice coloidal, a fin de conseguir un revestimiento inicial. Después que este revestimiento inicial se seca, se repite este procedimiento varias veces para formar un molde alrededor del modelo. En el revestimiento inicial se puede utilizar sílice más fina para obtener un mejor acabado superficial, mientras que en las capas posteriores se puede utilizar partículas más grandes para aumentar el espesor del recubrimiento más rápidamente. El molde se seca al aire libre y luego se lo calienta a una temperatura de entre 90°C y 175°C en posición invertida para extraer la cera del molde. A continuación el molde es quemado a una temperatura superior a los 600°C para eliminar el agua y quemar la cera residual, como menciona Kalpakjian et al. [5]. Finalmente se vierte el metal fundido y una vez que se ha solidificado se rompe el molde para obtener la pieza final.

En la Figura 1.1 se muestran las etapas del proceso de fundición a la cera perdida.

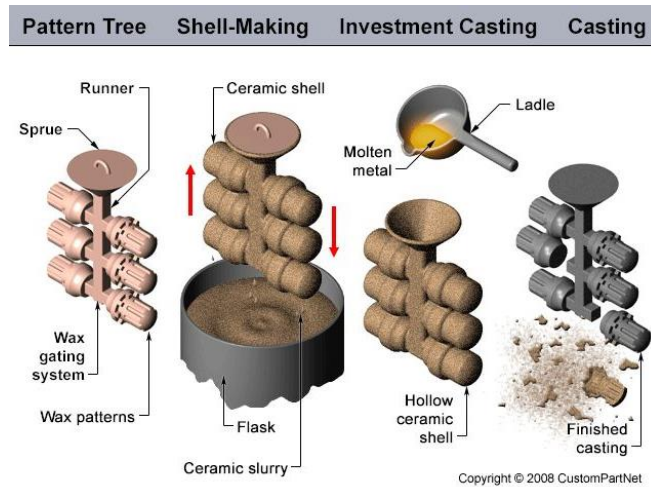


Figura 1.1. Proceso de fundición a la cera perdida.  
(Fuente: <http://entresd.es/blog/fundicion-a-la-cera-perdida-con-impresoras-3d/>)

## 1.2. Manufactura aditiva

Conocido en un principio como Prototipado Rápido (RP por sus siglas en inglés), pues de acuerdo con Mazzei [8], quien cita a Stucker et al. [9] y Gebhardt [11], su principal objetivo era el de proporcionar, en el menor tiempo posible, una representación física de una pieza o producto, antes de su posterior manufactura mediante técnicas tradicionales, con el propósito de permitir la evaluación de modelos de concepto o prototipos. Pero, con el desarrollo y avances en la tecnología, los objetos fabricados mediante esta técnica fueron adquiriendo la capacidad de desempeñarse como piezas funcionales, por lo que hoy en día es considerada como una forma legítima de manufactura. Esto ha ocasionado que el término prototipado rápido se encuentre cada vez más en desuso, pues como Stucker et al. menciona en [9], “Este término es inadecuado y en particular no describe efectivamente las más recientes aplicaciones de la tecnología.” Debido a que la base de la tecnología se centra en la adición de material en capas, se adoptó el término “Manufactura aditiva”.

La Manufactura Aditiva (AM por sus siglas en inglés) comprende todos aquellos procesos de fabricación de modelos físicos tridimensionales mediante la superposición selectiva de capas de material, a partir de un modelo virtual. Esta tecnología facilita la materialización de un modelo conceptual con gran precisión por complejo que sea, concordando con Fogluera et al. [10] que menciona que una de las principales ventajas que ofrece esta tecnología es la de pasar del mundo virtual al físico, generando objetos tridimensionales con formas muy complejas, y que además son más precisas y versátiles que cualquier otro sistema de producción.

Gebhardt [11], menciona que debido a la evolución acelerada del campo de la manufactura aditiva, han surgido varios sinónimos al término, tales como: manufactura generativa, manufactura directa, fabricación por capas y el más conocido coloquialmente Impresión 3D.

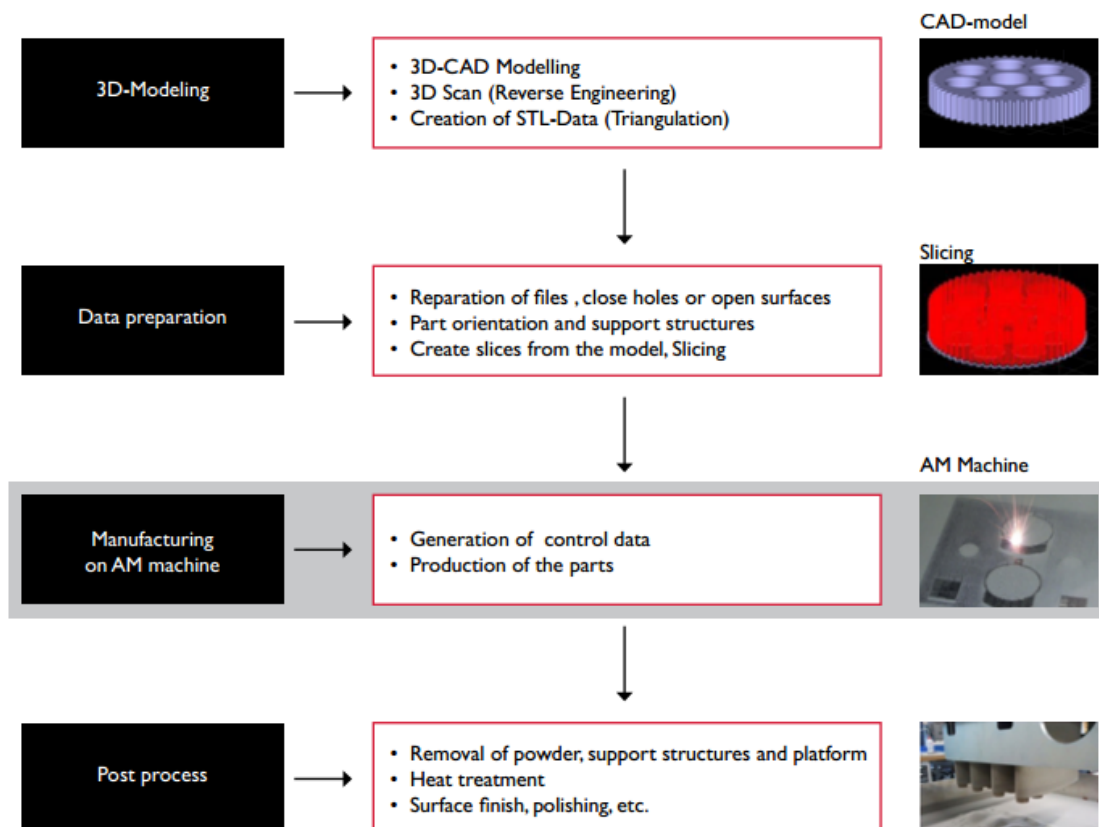


Figura 1.2. Resumen de pasos del proceso de manufactura aditiva.  
(Fuente: Introduction to Additive Manufacturing Technology, EPMA, pdf)

La Figura 1.2 resume el proceso de manufactura aditiva que básicamente, parte de un modelo tridimensional computarizado del objeto que se desea fabricar, generalmente, diseñado mediante un software CAD. Sea cual sea el método de manufactura aditiva que se utilice, el modelo virtual debe ser convertido a un formato estandarizado, como STL, para luego ser procesado mediante un software especializado. Como se menciona en [12], este software convierte su modelo tridimensional y determina la trayectoria para la herramienta de la impresora 3D en función de las opciones seleccionadas. Determina las coordenadas en las que debe desplazarse y las velocidades a las que lo hará. Esta información se exporta como un archivo “.gcode”, que es un archivo de texto sin formato con una serie de comandos en código G y una lista de las coordenadas completas de los ejes X, Y y Z utilizadas para imprimir el modelo 3D. A este tipo de software se le denomina motor de rebanado (slicing engine) [12], y la estratificación generada se muestra a continuación en la Figura 1.3.

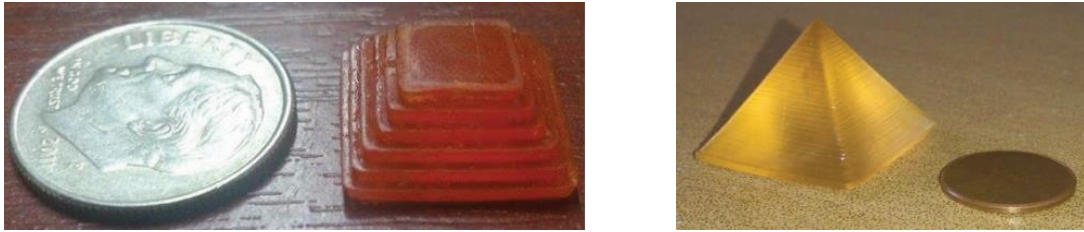


Figura 1.3. Estratificación y altura de capa: 1mm (izq.), 100µm (der.)  
(Fuente: Chicaisa, Vallejo, 2016 [2])

Como se puede deducir de la Figura 1.3, mientras menor sea la altura de las capas generadas por el software, el resultado final se acercará más al modelo CAD. Sin embargo, una disminución en la altura de capa conlleva un incremento en el tiempo de fabricación de la pieza.

El desarrollo de un sinnúmero de sistemas de manufactura aditiva, basados en el mismo principio de adición de material capa a capa, pero con diferencias en los materiales utilizados y la forma en que las capas del sólido son fabricadas, sumado a la rápida evolución de este campo, ha hecho del establecimiento de estándares y clasificaciones una tarea difícil. Sin embargo, de acuerdo con Stucker et al. [9], en el año 2009 la organización ASTM formó el comité F42, que sería el encargado de intentar cumplir este cometido. En el año 2012, se publicó el estándar ASTM F2792 [13], donde se llega a un consenso en cuanto a la clasificación y nomenclatura de las tecnologías de manufactura aditiva, tal como se menciona a continuación:

**Binder jetting (chorro de agente adhesivo):** Proceso de manufactura aditiva donde se hace uso de un agente adhesivo para unir partículas de polvo.

**Directed energy deposition (deposición por energía dirigida):** Proceso en el cuál se enfoca energía térmica a modo de generar unión de materiales por medio de fusión de los mismos.

**Material extrusion (extrusión de material):** Proceso en el cual el material de interés es aplicado mediante una boquilla u orificio.

**Material jetting (chorro de material):** Proceso en el cual gotas del material son depositadas de manera selectiva.

**Powder bed fusión (fusión de lecho en polvo):** Proceso en el cual energía térmica funde de manera selectiva regiones de un lecho en polvo.

**Sheet lamination (laminado):** Proceso en el cual se apilan y luego se unen hojas de un material a modo de construir un objeto.

Vat photopolymerization (fotopolimerización): Proceso en el cual un monómero en estado líquido contenido en un recipiente es polimerizado de manera selectiva por exposición a luz.

De todos los tipos de manufactura aditiva que se han desarrollado, los más reconocidos y de mayor uso son el Modelado por Deposición Fundida, la Estereolitografía y el Sinterizado Selectivo por Láser.

### **1.2.1. Modelado por deposición fundida (FDM)**

#### **1.2.1.1. Antecedentes**

La técnica de manufactura aditiva llamada Modelado por Deposición Fundida (FDM por sus siglas en inglés) fue desarrollada por Scott Crump y su compañía Stratasys, quienes a finales de los 80 patentaron en EE.UU. el método y el equipo necesarios para fabricar un objeto partiendo de un modelo computarizado [8]. De acuerdo con la Patente US5121329 A [14], su invención consiste en un cabezal móvil que deposita capas de material fundido sobre una plataforma siguiendo el borde de una sección del objeto deseado. El vencimiento de la propiedad intelectual de Stratasys sobre las características más importantes del proceso, han promovido el surgimiento de un gran número de equipos de FDM en el mercado. Han surgido comunidades en internet que distribuyen equipos de fuente abierta, donde toda la información está disponible al público. Como el ejemplo más representativo de estos movimientos “open source” se tiene a la impresora 3D auto replicable “RepRap”, actualizada constantemente por una comunidad abierta en internet. Lo que según Lanzotti et al. [15], ha ocasionado caídas en los costos asociados al proceso y un aumento en el interés en la técnica de manufactura, por lo que FDM es considerado el pionero de la manufactura aditiva de bajo costo.

#### **1.2.1.2. Definición**

FDM es un proceso de manufactura aditiva que crea sus capas fundiendo material termoplástico a un estado semilíquido que es extruido por una boquilla. De acuerdo con la descripción de Mazzei [8], la boquilla está montada sobre un cabezal móvil que por lo general se mueve en el plano horizontal dibujando la geometría de cada capa del objeto en fabricación. La plataforma donde es depositado este material es la que tiene el movimiento en el eje Z dando la altura de capa y permitiendo que cada capa de material se deposite sobre la anterior. El material termoplástico, suministrado en forma de carretes de filamento, llega al cabezal de impresión por acción mecánica por medio de rodillos, donde un sistema de calefacción, que generalmente está constituido por resistencias eléctricas, funde al material previo a su salida por la boquilla de extrusión. A medida que el



material se funde, el empuje del filamento hacia el cabezal fuerza la salida del material fundido por la boquilla en forma de fibras.

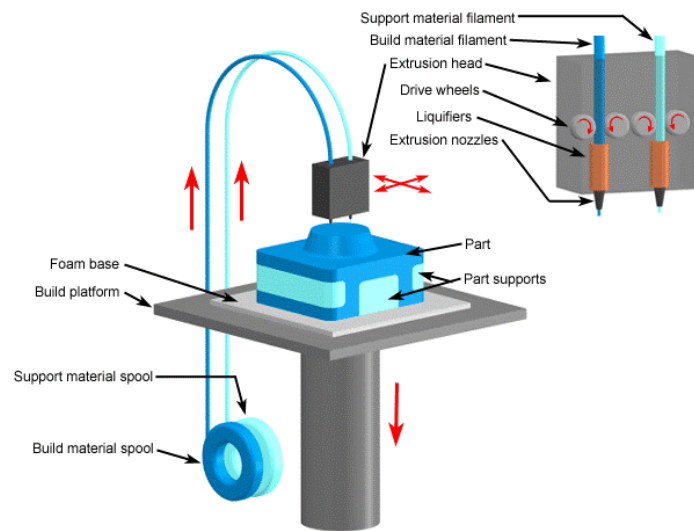


Figura 1.4. Cabezal de impresión de una máquina FDM.  
(Fuente: <http://delta2020.com/blog/134-3d-printing-technologies>)

Las piezas complejas pueden ser difíciles de construir en forma directa, pues si por ejemplo su geometría presenta voladizos como la pieza mostrada en el esquema de la Figura 1.4, la primera capa de estos voladizos tendría que ser depositada en un sitio donde no existe material subyacente para soportarla. Por ello, según la geometría del objeto, puede ser necesario hacer uso de estructuras secundarias que permitan que todas las capas estén soportadas por material depositado. Según González et al. [16], estas estructuras de soporte deben ser removidas una vez finalizada la impresión, por lo que, si son elaboradas del mismo material de la pieza en fabricación, tienen una capa de separación menos densa para hacerla frágil y que se rompa con facilidad; o pueden ser elaboradas en máquinas más sofisticadas, que poseen un extrusor extra con un material fabricado específicamente para ser utilizado como soporte.

Los sistemas de impresión FDM utilizan materiales termoplásticos basados en su mayoría en el ABS y PLA.

ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno): Es un termoplástico duro, resistente a los impactos y al calor. Se trata de un copolímero obtenido de la polimerización de acrilonitrilo y estireno en presencia de polibutadieno. Básicamente, el acrilonitrilo proporciona rigidez, resistencia a ataques químicos y estabilidad a altas temperaturas así como dureza. El butadieno, que es un elastómero, proporciona tenacidad a cualquier temperatura. El estireno aporta resistencia mecánica y rigidez [17,18]. En la Figura 1.5 se muestra el esquema de una cadena de ABS.

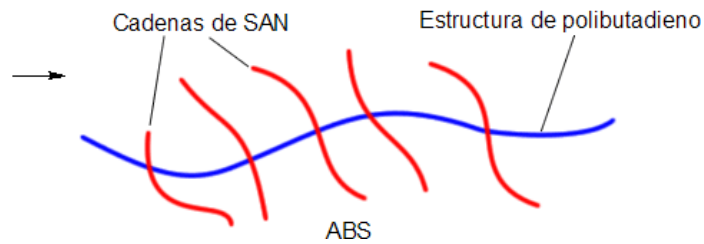
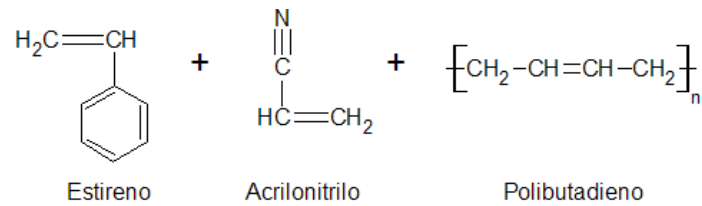


Figura 1.5. Cadena de Acrilonitrilo Butadieno Estireno.  
 (Fuente: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/abs.html>)

PLA (Ácido Poliláctico): De acuerdo con [19], el poliácido láctico es un polímero termoplástico, reabsorbible, biodegradable, altamente versátil, que se hace a partir de recursos renovables al 100%, como son el maíz, la remolacha, el trigo y otros productos ricos en almidón. Se encuentra formado por unidades de ácido láctico unidas por enlaces éster, entre el grupo carboxilo de una molécula con el grupo hidroxilo de la vecina.

En [20] se menciona que el PLA puede obtenerse por condensación directa del ácido láctico o bien por polimerización por apertura de anillo, partiendo de la lactida (Véase la Figura 1.6). Puesto que la condensación es una reacción de equilibrio, existen dificultades para eliminar cierta cantidad de agua durante las últimas etapas de la polimerización lo cual limita el peso molecular del polímero obtenido por este método.

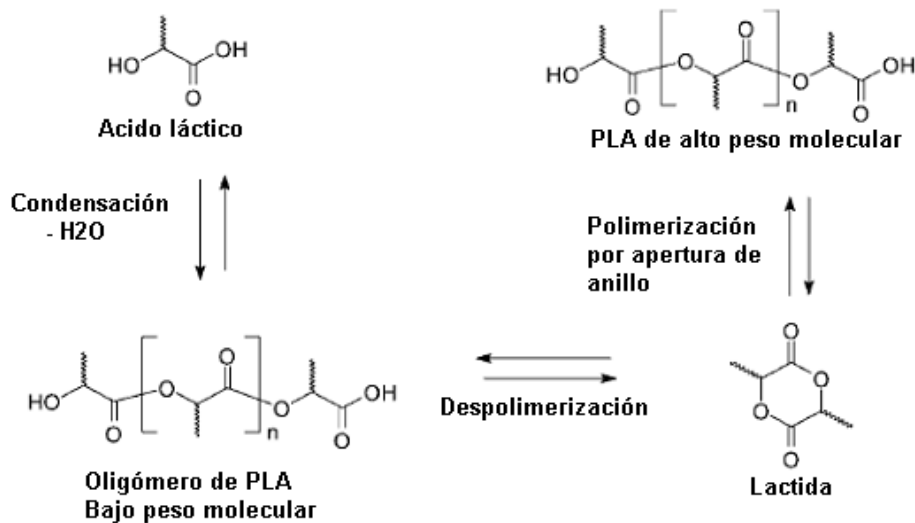


Figura 1.6. Obtención del Ácido Poliláctico.  
 (Fuente: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/08/poliacido-lactico-pla.html>)

### 1.2.2. Estereolitografía (SLA)

Fue la primera tecnología de manufactura aditiva; fue creada por Charles Hull alrededor de 1988 e introducida por la compañía 3D Systems. Es un proceso que se basa en el principio de curado de un fotopolímero líquido, usando un haz de luz, de un determinado rango de frecuencia, dirigido para solidificar el polímero [21].

Wicker et al. [22] describe al equipo como una plataforma que se mueve verticalmente dentro de un recipiente que contiene el polímero líquido fotosensible. El líquido es una mezcla de monómeros acrílicos, oligómeros y un fotoiniciador. Un láser genera un haz de luz ultravioleta que puede controlarse en la dirección x e y en el plano horizontal. La posición más alta de la plataforma está por debajo del nivel del líquido, una altura igual a la altura de capa. El rayo UV se mueve a través de una trayectoria endureciendo el fotopolímero en los puntos donde el rayo hace contacto con el líquido, formando una capa sólida de polímero que se adhiere a la plataforma, como se muestra en la Figura 1.7. La plataforma baja una altura igual a la altura de capa y el proceso se repite. Antes de que el rayo cure cada nueva capa de polímero, una cuchilla limpiadora asegura que el nivel de la resina sea el mismo en toda la superficie.

Finalmente, una vez que se ha terminado el proceso, la pieza se retira de la plataforma, se seca y se limpia ultrasónicamente y con un baño de alcohol. Posteriormente, de ser el caso, se quita la estructura de soporte y la pieza pasa a una etapa de curado final en una autoclave [5].

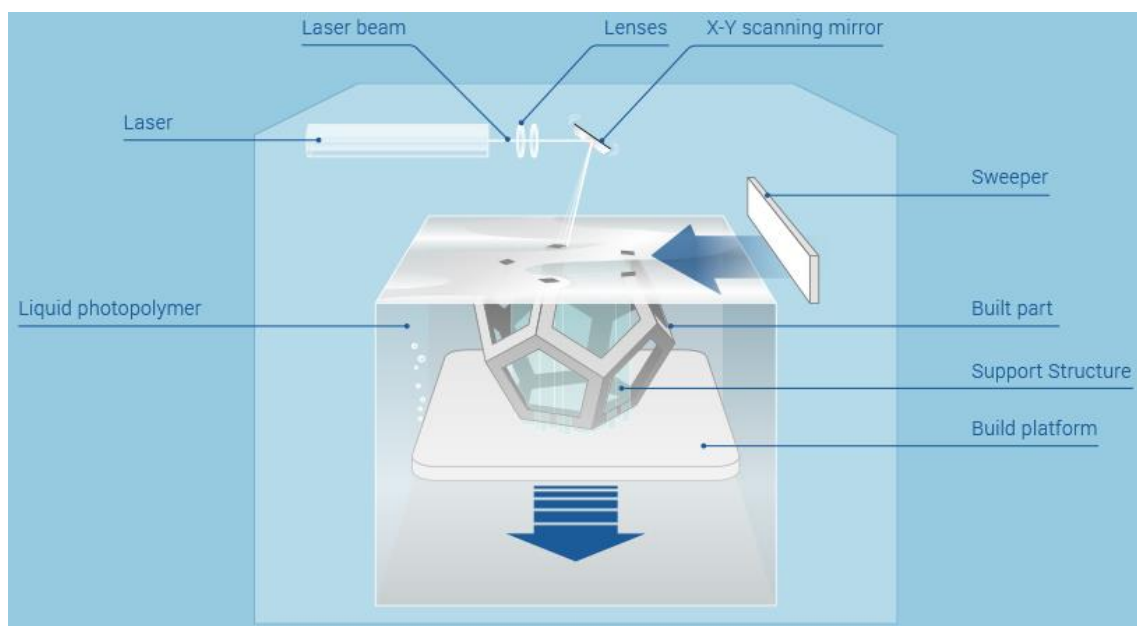


Figura 1.7. Estereolitografía.  
(Fuente: <https://www.additively.com/en/learn-about/stereolithography>)

### 1.2.3. Sinterizado selectivo por láser (SLS)

Folguera et al. [10] y Blandón et al. [23], describen la tecnología de sinterizado selectivo por láser como una técnica que usa un rayo láser móvil para sinterizar polvos de manera selectiva para realizar cada capa o corte transversal del objeto. Como se observa en la Figura 1.8, en este proceso se utilizan dos cámaras, en una de ellas se construye la pieza y en la otra se encuentra el material de suministro. Este material es llevado desde la cámara de suministro hacia la cámara de construcción mediante un mecanismo con rodillo.

Primero se aplica una capa de polvo sobre la cámara de construcción con un rodillo, y el rayo láser se enfoca sobre esa capa trazando y sinterizando una sección transversal correspondiente al modelo en una masa sólida. En las áreas donde no incidió el rayo, el polvo sigue suelto, pero sirve como soporte a la parte sinterizada y a la siguiente capa de polvo. Los polvos son previamente calentados a una temperatura ligeramente inferior a su punto de fusión para facilitar el pegado y disminuir la distorsión. El proceso se repite una y otra vez y los polvos se pegan gradualmente hasta obtener toda la pieza tridimensional.

Según Groover [4] y Kalpakjian et al. [5], el polvo fusible puede ser de una variedad de materiales como PVC, nylon, ABS, poliéster, poliestireno, policarbonato y cera fundida por inversión.

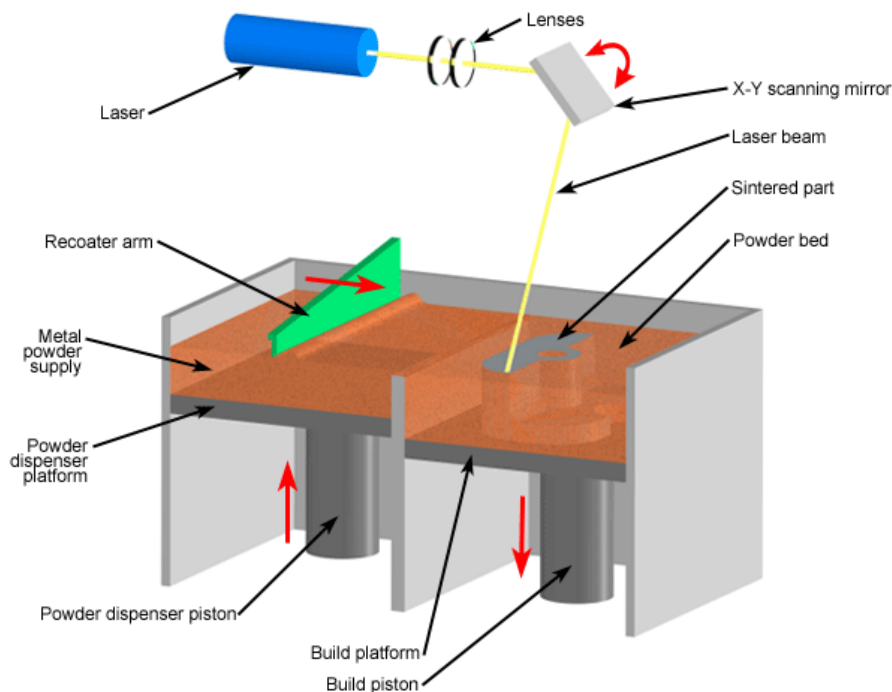


Figura 1.8. Sinterizado selectivo por láser.

(Fuente: <http://tallerdesoluciones.blogs.inti.gob.ar/2009/09/22/sinterizado-laser-selectivo-principios-de-funcionamiento/>)

## 1.3. Extrusión

Uno de los métodos más comunes de procesamiento de los plásticos es la extrusión. Sobre un 60% de los plásticos se procesan por dicho método [24]. La extrusión es un proceso de conformado por compresión, en el cual se fuerza a fluir de forma continua a través de la abertura de un dado o boquilla un plástico o material fundido para darle forma a su sección transversal. Así la geometría del orificio de salida queda grabada en toda la longitud del producto extruido.

La función del extrusor es fundir el material alimentado y empujarlo hacia afuera a través de la boquilla a una velocidad constante. El material que sale debe ser enfriado tan rápidamente como sea posible. [24]

### 1.3.1. Tipos de extrusores

De acuerdo con Suárez [25], los extrusores pueden ser clasificados desde el punto de vista operativo en: extrusores de desplazamiento positivo, y extrusores de fricción viscosa.

#### 1.3.1.1. Extrusores de desplazamiento positivo

Los extrusores de desplazamiento positivo son los que generan una extrusión directa, el material se coloca en el contenedor y es forzado a través de la abertura mediante un pistón mecánico o ariete de prensa.

Extrusores de pistón:

Constan de un cilindro con calefactores; la materia prima al interior del cilindro es plastificada y obligada a pasar a través de una boquilla por presión del pistón accionado mecánica o hidráulicamente. El esquema de un extrusor de pistón se muestra en la Figura 1.9.

El proceso es discontinuo, por lo que las piezas producidas son de longitud limitada. Para fabricación continua se utilizan varios pistones [25].

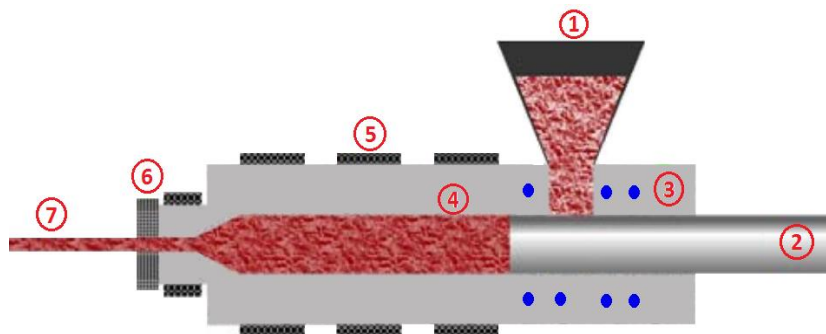


Figura 1.9. Extrusor de pistón.  
(Fuente: La extrusión de materiales poliméricos [26])

1. Tolva
2. Pistón
3. Circuito refrigeración
4. Cilindro
5. Camisa calefactora
6. Matriz
7. Perfil extruido

Bombas de extrusión:

Las bombas de extrusión poseen algunos pares de engranajes que están acoplados y alojados en una carcasa. La fuerza de empuje que ejercen los dientes sobre el material, por el lado de la carcasa, permiten el transporte del plástico. El acoplamiento entre dientes aísla el lado de descarga de presión, del lado de succión. El flujo de material es proporcional a la frecuencia de rotación de los discos dentados obteniéndose así un flujo de material esencialmente constante [25].

### 1.3.1.2. Extrusores de fricción viscosa

En este tipo de extrusores, la fricción produce el calentamiento del material convirtiéndolo en un fluido viscoso.

Extrusores de tornillo

Tal como se muestra en la Figura 1.10, el polímero se alimenta a través de una tolva, hasta un cañón, en el cual un tornillo helicoidal transporta el polímero hacia el extremo en el cual se encuentra la matriz de extrusión [25].

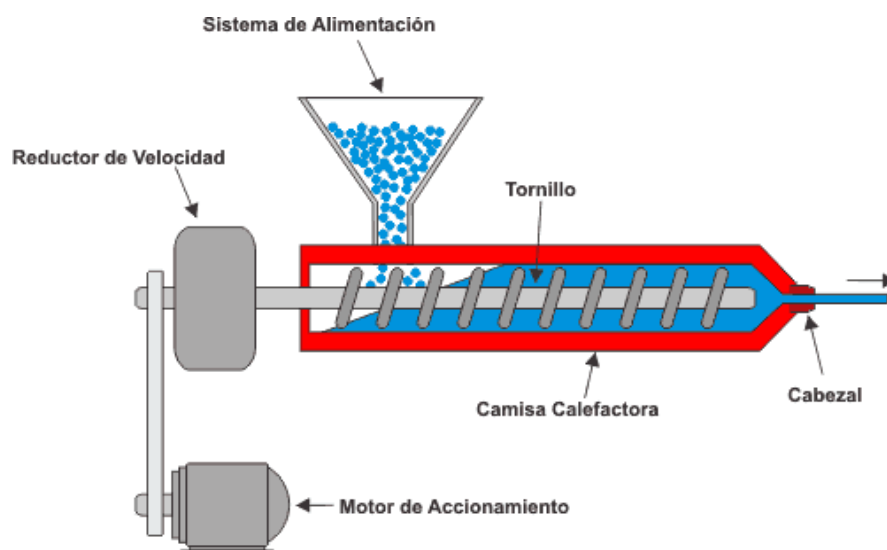


Figura 1.10. Extrusor de tornillo.

(Fuente: <http://aprendemasdelamanufactura.blogspot.com/2014/08/manufactura.html?m=1>)

### Extrusores de tambor rotatorio:

La cámara de extrusión está formada por el tambor rotatorio y por el bastidor fijo o cuerpo estático. En este tipo de extrusores, la alimentación de material se produce por gravedad e ingresa por el émbolo hasta la cámara.

La temperatura de extrusión es controlada a través del bastidor, en el cual se puede aumentar o disminuir la temperatura de sus paredes. En la cámara de extrusión, el polímero es arrastrado por el cilindro rotor. El cilindro rotor es el encargado de efectuar la plastificación del polímero al ponerlo en contacto con las paredes calientes del bastidor y con el material previamente fundido.

La homogeneización del material fundido tiene lugar en la pequeña holgura que existe entre el marco fijo y el cilindro que gira [25].

El plástico así fundido es separado del cilindro rotatorio mediante una pieza en forma de cuchilla; la fundición, bajo acción de las fuerzas tangenciales se mueve hacia la boquilla y la atraviesa.

### Extrusores de rodillos

Los extrusores de rodillos son aquellos utilizados en la denominada extrusión plana empleada en la fabricación de láminas y películas, su funcionamiento está basado en la utilización de rodillos [25]. En la Figura 1.11 se muestra un esquema del proceso de extrusión plana por rodillos.

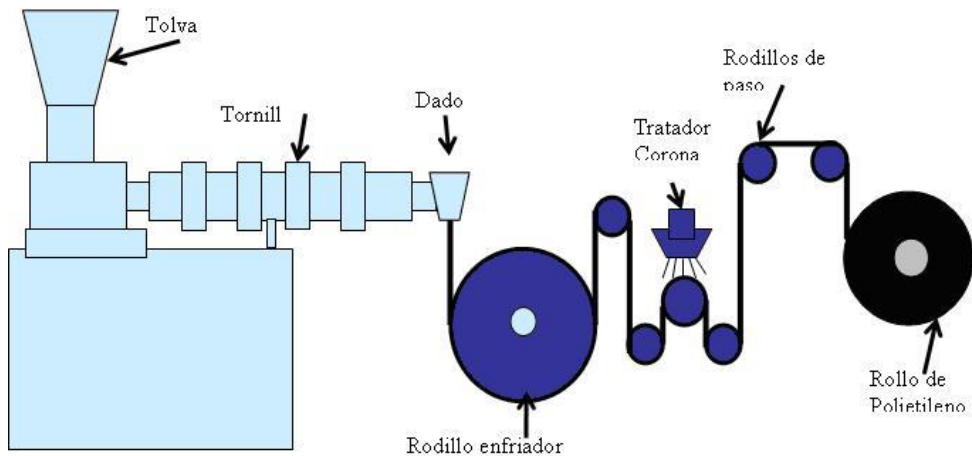


Figura 1.11. Extrusión plana.

(Fuente: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html>)

También existen los extrusores de rodillo empleados en los procesos de impresión 3D por extrusión plástica. En la figura 1.12 se muestra el esquema de este tipo de extrusores.

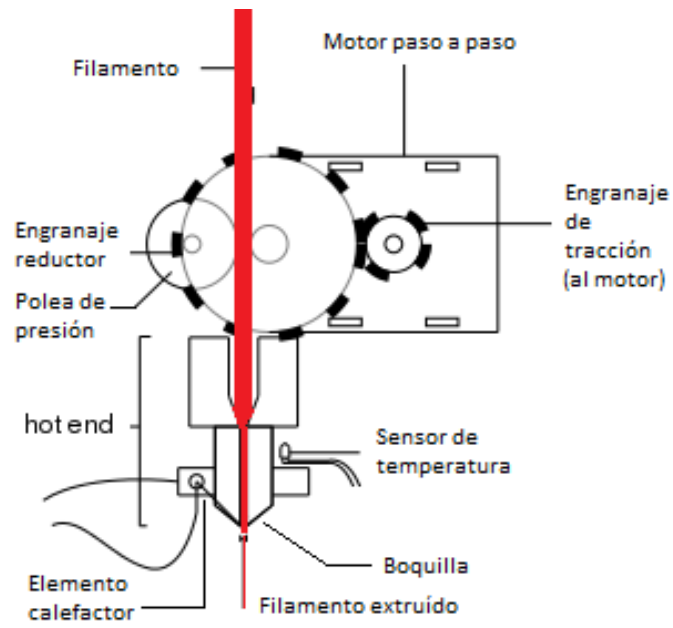


Figura 1.12. Extrusor de rodillo de impresoras 3D.  
 (Fuente: [http://www.mibqyyo.com/2014/09/22/asi-funciona-la-extrusion-en-las-impresoras-3d/#/vanilla/discussion/embed/?vanilla\\_discussion\\_id=0](http://www.mibqyyo.com/2014/09/22/asi-funciona-la-extrusion-en-las-impresoras-3d/#/vanilla/discussion/embed/?vanilla_discussion_id=0))



## **2. METODOLOGÍA**

En este capítulo se detalla la metodología seguida para el desarrollo de este trabajo de investigación.

### **Método**

La ejecución del trabajo de investigación se enmarca en el método hipotético deductivo, considerando que se fundamenta en una profunda revisión de literatura con el propósito de poner a prueba la hipótesis planteada.

### **Enfoque**

El enfoque que rige el presente trabajo de investigación es el cualitativo, por el análisis de información científica realizada con respecto al tema, lo cual permitió la construcción de un marco teórico sustentado; y cuantitativo porque se ejecutó procesos de cálculo matemático que apoyen la comprobación de la hipótesis y sustenten el funcionamiento del equipo diseñado.

### **Tipo de investigación**

El trabajo de investigación tiene un alcance exploratorio porque se analizan diferentes alternativas para la construcción del prototipo de extrusor.

Así como experimental, considerando que se realizan varias pruebas tanto de los materiales adecuados para la construcción del prototipo, del diseño del mismo para un óptimo funcionamiento y de la materia prima utilizada en las pruebas de extrusión durante la etapa de verificación del funcionamiento del prototipo de extrusor.

### **2.1. Descripción de la metodología**

El procedimiento seguido en el presente proyecto se detalla de manera global en la Figura 2.1.

Inicialmente se realizan una selección de alternativas de solución para obtener un diseño preliminar del extrusor, basándose en el análisis funcional propuesto por el ingeniero estadounidense Lawrence D. Miles [27].

En este análisis se desglosa las funciones del extrusor hasta obtener una estructura modular, y a cada uno de los módulos obtenidos se propone alternativas de solución. Las mejores alternativas son seleccionadas utilizando tablas de ponderación donde se establecen criterios de selección y se les asigna un valor basado en su importancia.

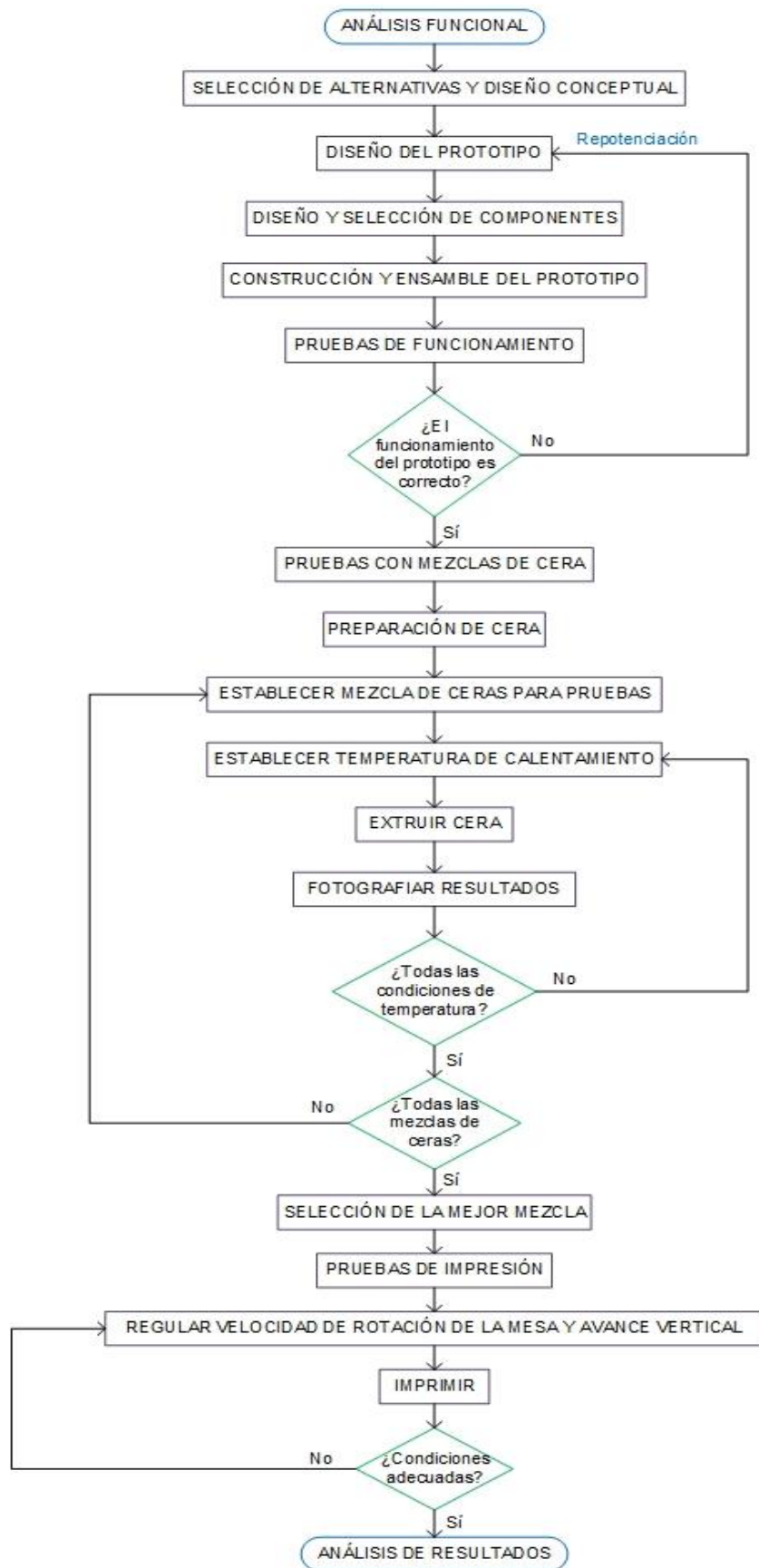


Figura 2.1. Procedimiento general.  
(Fuente: Propia)

Posterior a esto, se procede a la construcción de un primer prototipo para realizar las primeras pruebas de extrusión de cera, con el fin de conocer inconvenientes que se pueden presentar en el proceso de extrusión. Una vez conocidas experimentalmente las limitaciones del proceso, se realiza una repotenciación del diseño del extrusor y se procede a la construcción del mismo.

Adicionalmente, se realiza el control del extrusor por medio del controlador electrónico de código abierto ARDUINO UNO. También se definieron las condiciones de operación del equipo en las cuales se realizarán las pruebas de funcionamiento. Estas condiciones son alcanzadas al variar la temperatura y velocidad de extrusión a través del código de programación que controla el equipo.

Una vez que se ha comprobado el correcto funcionamiento del prototipo, se procede a realizar pruebas de extrusión para la calibración del equipo, es decir, encontrar la temperatura y velocidad de extrusión que brinden resultados adecuados. Se realizan mezclas de ceras, para usarlas en las pruebas de extrusión, utilizando tres tipos de cera: cera en base a savia de látex, cera de joyería 115308 de Freeman y cera parafina (las dos primeras comúnmente utilizadas en joyería), variando el porcentaje de cada una. Con estas mezclas se obtienen tochos de cera.

La prueba final será montar el extrusor sobre la estructura de una impresora ILIOS 3D printer para elaborar un cilindro con las mezclas de cera.

## **2.2. Descomposición funcional**

Se procede a realizar la descomposición de las funciones del extrusor en módulos para establecer alternativas de solución para cada uno y de esta manera obtener la mejor solución y poder realizar un diseño conceptual.

Para aplicar este análisis es necesario establecer claramente las funciones del producto y desglosarlas a fin de llegar a un esquema modular. Cada bloque o módulo es el encargado de realizar una o más funciones específicas, para las cuales se busca establecer diversas alternativas a ser posteriormente comparadas y evaluadas objetivamente. Siendo el diseño último, el ensamble y relación de las variantes más convenientes.

La descomposición funcional del equipo se lleva a cabo mediante diagramas de flujo en los que en cada recuadro aparece una función. Se parte de la función global o nivel 0, el cual se muestra en la Figura 2.2. En este nivel se establece la función principal del prototipo, la cual luego se desglosa en sub-funciones en los siguientes niveles.

## Nivel 0

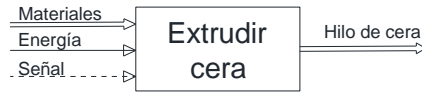


Figura 2.2. Descomposición funcional: Nivel 0.  
(Fuente: Propia)

Esta función general de la máquina a diseñar se detalla más claramente, por lo cual se procede al nivel 1, mostrado en la Figura 2.3, en el cual se especifican dos modos de operación principales e identificables a simple vista por su relativa independencia:

Primer Modo de Operación.- es la alimentación de cera al sistema de extrusión.

Segundo Modo de Operación.- es la extrusión propiamente dicha.

## Nivel 1

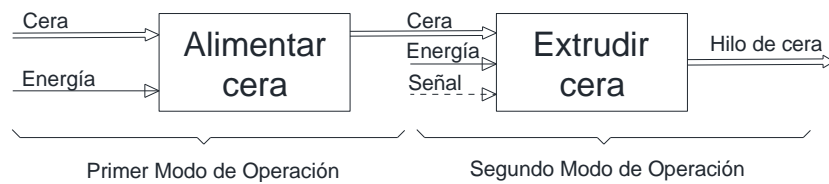


Figura 2.3. Descomposición funcional: Nivel 1.  
(Fuente: Propia)

Es conveniente llevar al diagrama funcional hasta un nivel 2, donde se establecen módulos claramente definidos, (Figura 2.4).

## Nivel 2

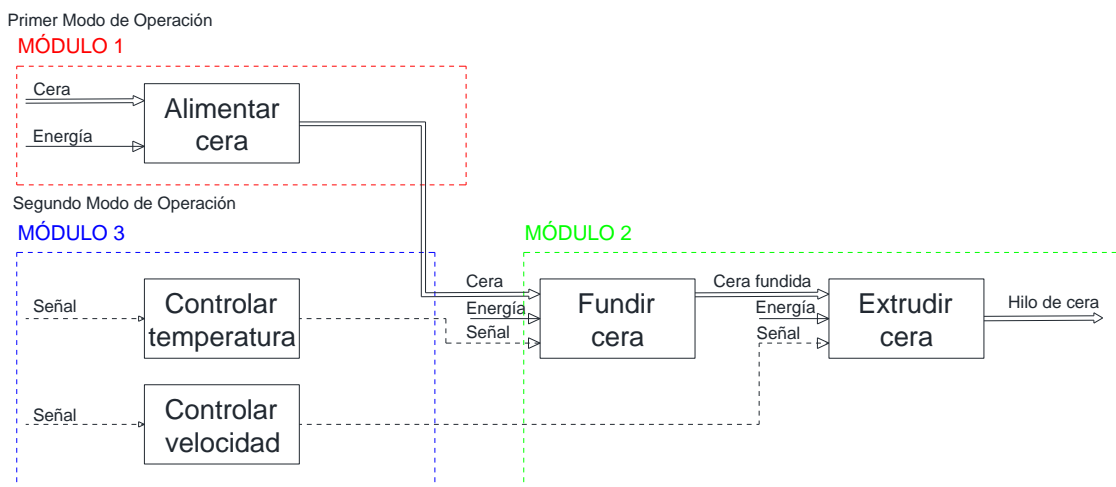


Figura 2.4. Descomposición funcional: Nivel 2.  
(Fuente: Propia)

### 2.2.1. Módulo 1: Alimentación

De acuerdo con el diagrama funcional, este módulo cumple con la función de alimentar cera al sistema. Para esta función se establecen las siguientes alternativas:

#### Alimentación por tolva:

Proveer la cera sólida al sistema de extrusión a través de una tolva de alimentación, tal como se muestra en la Figura 2.5.

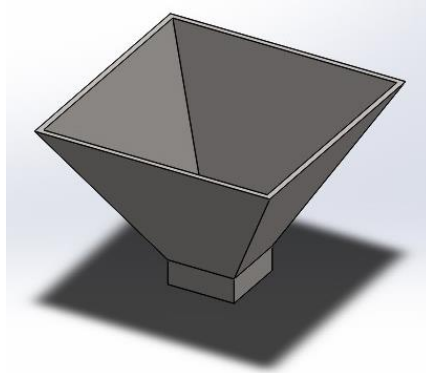


Figura 2.5. Tolva de alimentación.  
(Fuente: Propia)

#### Alimentación por rodillos:

La cera se alimenta en forma de hilo arrastrado por rodillos que se mueven por un motor. En la Figura 2.6 se muestra un esquema del sistema de rodillos.

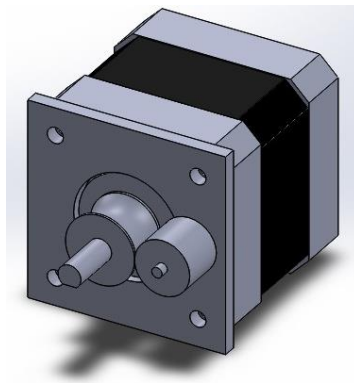


Figura 2.6. Rodillos accionados por motor.  
(Fuente: Propia)

#### Alimentación en tochos:

Tochos de cera para colocar en el sistema de extrusión de forma manual, (véase Figura 2.7)

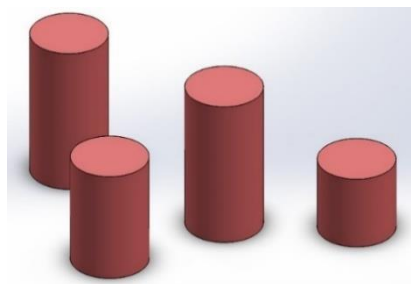


Figura 2.7. Tochos de cera.  
(Fuente: Propia)

### 2.2.1.1. Evaluación y selección de alternativas para el módulo de alimentación

Para la determinación del módulo más conveniente, se emplea el método ordinal corregido de criterios ponderados de acuerdo con Riba en [28].

Criterios de valoración más determinantes:

- Facilidad de alimentación
- Baja complejidad de fabricación
- Facilidad de acople con el sistema de extrusión

Con estos criterios se procede a realizar tablas de ponderación para determinar la mejor opción.

Tabla 2.1. Evaluación de cada criterio.

Criterio	fácil de acoplar	Facilidad de alimentación	fácil de fabricar	$\Sigma+1$	Ponderación
Fácil de acoplar		1	1	3	0,50
Facilidad de alimentación	0		1	2	0,33
Fácil de fabricar	0	0		1	0,17
				6	1,00
Fácil de acoplar > Facilidad de alimentación > Fácil de fabricar					

(Fuente: Propia)

Tabla 2.2. Evaluación de las soluciones respecto de la facilidad de acoplar.

Fácil de acoplar	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0	2	0,33
Alternativa 2	0		0	1	0,17
Alternativa 3	1	1		3	0,50
				6	1,00
Alternativa 3 > Alternativa 1 > Alternativa 2					

(Fuente: Propia)

Tabla 2.3. Evaluación de las soluciones respecto de la facilidad de alimentación.

Facilidad de alimentación	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	1	3	0,50
Alternativa 2	0		0	1	0,17
Alternativa 3	0	1		2	0,33
				6	1,00
Alternativa 1 > Alternativa 3 > Alternativa 2					

(Fuente: Propia)

Tabla 2.4. Evaluación de las soluciones respecto de la facilidad de fabricación.

Facilidad de fabricación	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0	2	0,33
Alternativa 2	0		0	1	0,17
Alternativa 3	1	1		3	0,50
				6	1,00
Alternativa 3 > Alternativa 1 > Alternativa 2					

(Fuente: Propia)

Finalmente se presenta la tabla de conclusiones

Tabla 2.5. Tabla de soluciones para el módulo 1.

Conclusiones	fácil de acoplar	Facilidad de alimentación	fácil de fabricar	$\Sigma$	Ponderación
Alternativa 1	0,17	0,17	0,06	0,39	2
Alternativa 2	0,08	0,06	0,03	0,17	3
Alternativa 3	0,25	0,11	0,08	0,44	1

(Fuente: Propia)

Según los resultados en la Tabla 2.5, la solución que más se acerca a los criterios establecidos es la ALTERNATIVA 3.

## 2.2.2. Módulo 2: Extrusión

De acuerdo con el diagrama funcional, este módulo cumple con las siguientes funciones:

- Fundir cera
- Extrudir cera

### 2.2.2.1. Fundir cera

Para esta función se establecen las siguientes alternativas:

#### Luz halógena de doble contacto:

Utilizar el calor generado por estas fuentes de luz. En la Figura 2.8 se muestra este tipo de calefactores por luz.



Figura 2.8. Luz halógena doble contacto.  
(Fuente: Propia)

#### Niquelina o resistencia eléctrica

Utilizar resistencias para calentar el cuerpo del extrusor y que este caliente y funda la cera. En la Figura 2.9 se observa una niquelina de tipo abrazadera a la izquierda y una tipo cartucho a la derecha.



Figura 2.9. Niquelinas.  
(Fuente: propia)

#### Quemador:

Utilizar una fuente de calor por llama para calentar el cuerpo del extrusor y que este funda la cera. En la Figura 2.10 se muestra una fuente de calor del tipo quemador.



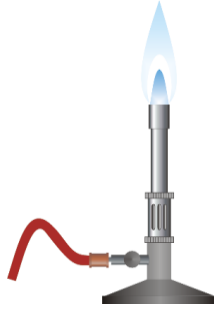


Figura 2.10. Mechero.

(Fuente: [http://www.periodni.com/gallery/preuzimanje\\_slike.php?name=bunsen\\_burner.png](http://www.periodni.com/gallery/preuzimanje_slike.php?name=bunsen_burner.png))

### 2.2.2.2. Extrudir cera

Para esta función se establecen las siguientes alternativas:

#### Extrusor de pistón:

Se muestra en la Figura 2.11.

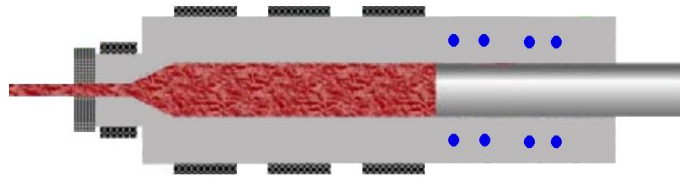


Figura 2.11. Extrusor de pistón.

(Modificado de: La extrusión de materiales poliméricos [22])

#### Extrusor de tornillo:

Se muestra en la Figura 2.12.

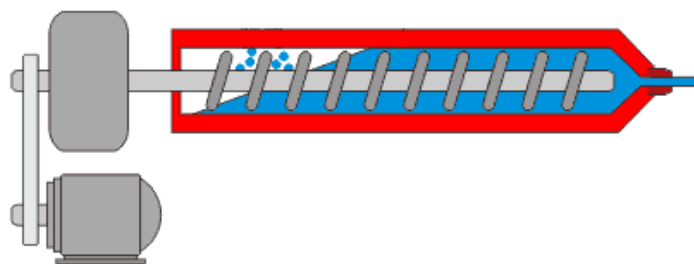


Figura 2.12. Extrusor de tornillo.

(Modificado de: <http://aprendemasdelamanufactura.blogspot.com/2014/08/manufactura.html?m=1>)

#### Extrusor de rodillos:

Utilizar un extrusor de rodillos normalmente utilizados en las impresoras 3D de extrusión plástica, como el de la Figura 2.13.

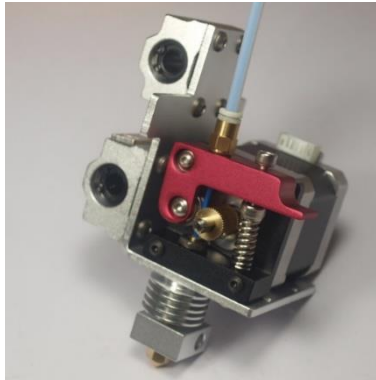


Figura 2.13. Extrusor de rodillos.

(Fuente: [https://es.aliexpress.com/store/product/Reprap-Prusa-i3-3D-printer-metal-carriage-1-75-mm-all-metal-direct-drive-Extruder-hotend/1395549\\_32596733183.html](https://es.aliexpress.com/store/product/Reprap-Prusa-i3-3D-printer-metal-carriage-1-75-mm-all-metal-direct-drive-Extruder-hotend/1395549_32596733183.html))

Para establecer las diferentes alternativas de módulos se combinan entre si las soluciones para cada función, como se muestra en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Alternativas de solución para el módulo de extrusión.

Función	Componente		
Fundir Cera	Luz halógena doble contacto	Resistencias eléctricas	Quemador o mechero
Extrudir Cera	Extrusor de pistón	Extrusor de tornillos	Extrusor de rodillos
<p style="text-align: center;"> <span style="color: grey;">Alternat. 1</span>             <span style="color: blue;">Alternat. 2</span>             <span style="color: red;">Alternat. 3</span>             <span style="color: yellow;">Alternat. 4</span>             <span style="color: green;">Alternat. 5</span> </p>			

(Fuente: Propia)

### 2.2.2.3. Evaluación y selección de alternativas para el módulo de extrusión

Criterios de valoración más determinantes:

- Baja complejidad de fabricación
- Tamaño pequeño
- Bajo costo de fabricación
- Bajo peso
- Facilidad de trabajar con cera

Con estos criterios se procede a realizar tablas de ponderación para determinar la mejor opción.

Tabla 2.7. Evaluación de cada criterio.

Criterio	Fácil de fabricar	Pequeño	Bajo costo	Bajo peso	Trabajar con cera	$\Sigma+1$	Ponderación
Fácil de fabricar		1	1	1	0	4	0,27
Pequeño	0		1	0	0	2	0,13
Bajo costo	0	0		0	0	1	0,07
Bajo peso	0	1	1		0	3	0,20
Trabajar con cera	1	1	1	1		5	0,33
						15	1,00
Trabajar con cera > Fácil de fabricar > Bajo peso > Pequeño > Bajo costo (Fuente: Propia)							

Tabla 2.8. Evaluación de las soluciones respecto de la facilidad de fabricar.

Fácil de fabricar	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0	1	1	4	0,27
Alternativa 2	0		0	1	0	2	0,13
Alternativa 3	1	1		1	1	5	0,33
Alternativa 4	0	0	0		0	1	0,07
Alternativa 5	0	1	0	1		3	0,20
						15	1,00
Alternativa 3 > Alternativa 1 > Alternativa 5 > Alternativa 2 > Alternativa 4 (Fuente: Propia)							

Tabla 2.9. Evaluación de las soluciones respecto del tamaño.

Pequeño	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	0	0	0	1	0,07
Alternativa 2	1		1	0	0	3	0,20
Alternativa 3	1	0		0	0	2	0,13
Alternativa 4	1	1	1		0	4	0,27
Alternativa 5	1	1	1	1		5	0,33
						15	1,00
Alternativa 5 > Alternativa 4 > Alternativa 2 > Alternativa 3 > Alternativa 1 (Fuente: Propia)							

Tabla 2.10. Evaluación de las soluciones respecto del bajo costo.

Bajo costo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0	1	1	4	0,27
Alternativa 2	0		0	1	1	3	0,20
Alternativa 3	1	1		1	1	5	0,33
Alternativa 4	0	0	0		1	2	0,13
Alternativa 5	0	0	0	0		1	0,07
						15	1,00
Alternativa 3 > Alternativa 1 > Alternativa 2 > Alternativa 4 > Alternativa 5							

(Fuente: Propia)

Tabla 2.11. Evaluación de las soluciones respecto del bajo peso.

Bajo peso	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	0	0	0	1,5	0,10
Alternativa 2	0,5		0	0	0	1,5	0,10
Alternativa 3	1	1		0,5	0	3,5	0,23
Alternativa 4	1	1	0,5		0	3,5	0,23
Alternativa 5	1	1	1	1		5	0,33
						15	1,00
Alternativa 5 > Alternativa 3 = Alternativa 4 > Alternativa 1 = Alternativa 2							

(Fuente: Propia)

Tabla 2.12. Evaluación de las soluciones respecto de la facilidad de trabajar con cera.

Trabajar con cera	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	Alternativa 5	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	0,5	0,5	1	3,5	0,23
Alternativa 2	0,5		0,5	0,5	1	3,5	0,23
Alternativa 3	0,5	0,5		0,5	1	3,5	0,23
Alternativa 4	0,5	0,5	0,5		1	3,5	0,23
Alternativa 5	0	0	0	0		1	0,07
						15	1,00
Alternativa 1 = Alternativa 2 = Alternativa 3 = Alternativa 4 > Alternativa 5							

(Fuente: Propia)

Finalmente se presentan las conclusiones en la Tabla 2.13.

Tabla 2.13. Tabla de soluciones para el módulo 2.

Conclusiones	Fácil de fabricar	Pequeño	Bajo costo	Bajo peso	Trabajar con cera	$\Sigma$	Ponderación
Alternativa 1	0,07	0,01	0,02	0,02	0,08	0,20	2
Alternativa 2	0,04	0,03	0,01	0,02	0,08	0,17	4
Alternativa 3	0,09	0,02	0,02	0,05	0,08	0,25	1
Alternativa 4	0,02	0,04	0,01	0,05	0,08	0,19	3
Alternativa 5	0,05	0,04	0,00	0,07	0,02	0,19	3

(Fuente: Propia)

Según los resultados en la Tabla 2.13, la solución que más se acerca a los criterios establecidos es la ALTERNATIVA 3.

### 2.2.3. Módulo 3: Control

De acuerdo con el diagrama funcional, este módulo cumple con las siguientes funciones:

- Controlar temperatura de calentamiento
- Definir velocidad de extrusión
- Accionar extrusor

#### 2.2.3.1. Controlar temperatura de calentamiento

Para esta función se establecen las siguientes alternativas:

##### Control ON/OFF:

Un interruptor para controlar la temperatura, el cual enciende y apaga el elemento calefactor en los valores de temperatura establecidos. El interruptor W1209 se muestra en la Figura 2.14

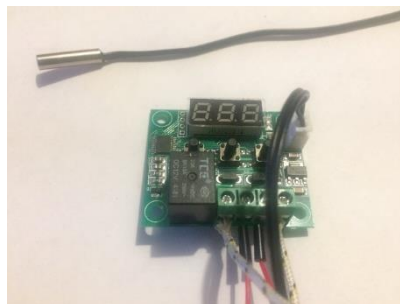


Figura 2.14. Interruptor de control de temperatura.  
(Fuente: Propia)

De igual forma este control de encendido y apagado del elemento calefactor se lo puede realizar mediante programación utilizando un sensor de temperatura y estableciendo el valor de lectura al cual la tarjeta de control enciende o apaga el elemento de calentamiento.

### **Control P.I.D.:**

Controlar por medio de realimentación de un bucle cerrado donde la diferencia entre el valor obtenido a la salida y el valor deseado se realimenta y será la entrada para el siguiente ciclo. Este tipo de control proporciona un rango mucho más pequeño en el que se mantiene la temperatura, pero es mucho más complicado de implementar y calibrar, requiere de varios pasos previos para la obtención de los parámetros de proporcionalidad, integración y derivación.

#### **2.2.3.2. Definir velocidad de extrusión**

Para esta función se establecen las siguientes alternativas:

##### **Circuito electrónico:**

Utilizar un circuito electrónico que permita regular la velocidad de un motor eléctrico por medio de elementos como potenciómetros.

##### **Válvulas de estrangulamiento:**

Utilizar válvulas de estrangulamiento en el circuito neumático o hidráulico para controlar el paso del fluido al accionar el cilindro neumático o hidráulico.

##### **Tarjeta de control:**

Utilizar una tarjeta de control donde la velocidad se define dentro del código de programación. La tarjeta de control Arduino Uno se presenta en la Figura 2.15.

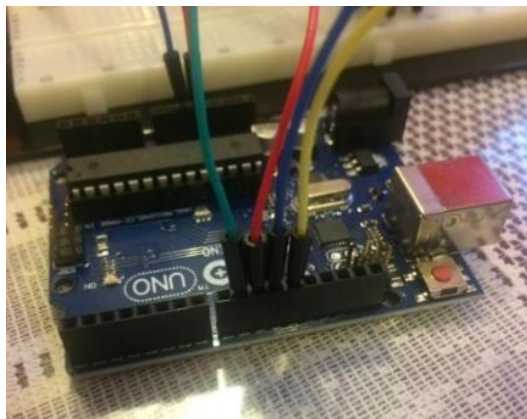


Figura 2.15. Tarjeta Arduino UNO.  
(Fuente: Propia)

#### **2.2.3.3. Accionar extrusor**

Para accionar el extrusor se tienen los siguientes actuadores:

**Motor DC:**

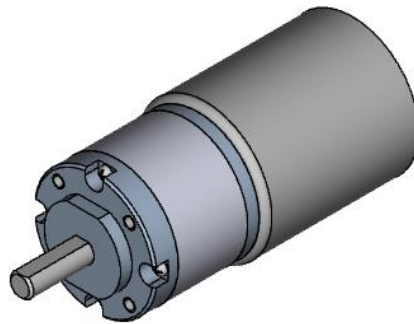


Figura 2.16. Motor DC.  
(Fuente: <http://www.3dcontentcentral.com/download-model.aspx?catalogid=171&id=206856>)

**Cilindro hidráulico:**

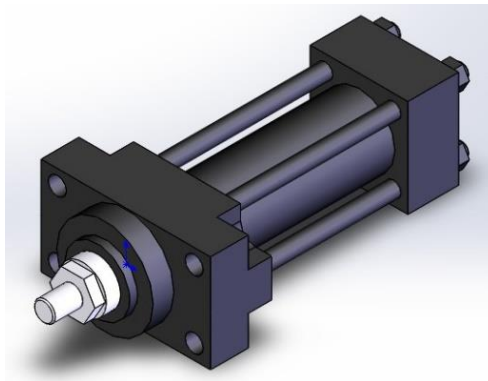


Figura 2.17. Cilindro hidráulico.  
(Fuente: Propia)

**Cilindro neumático:**

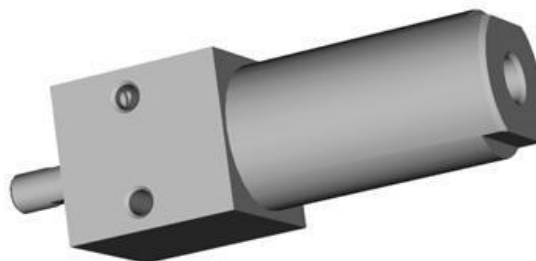


Figura 2.18. Cilindro neumático.  
(Fuente: Propia)

**Motor de pasos:**

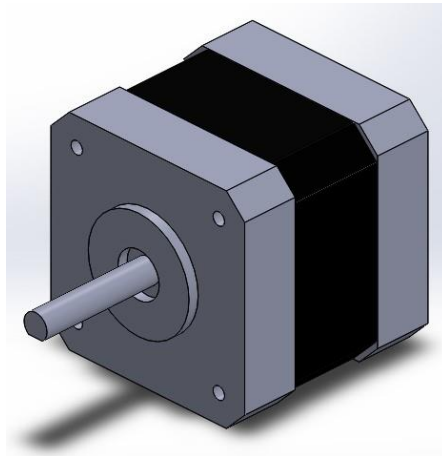
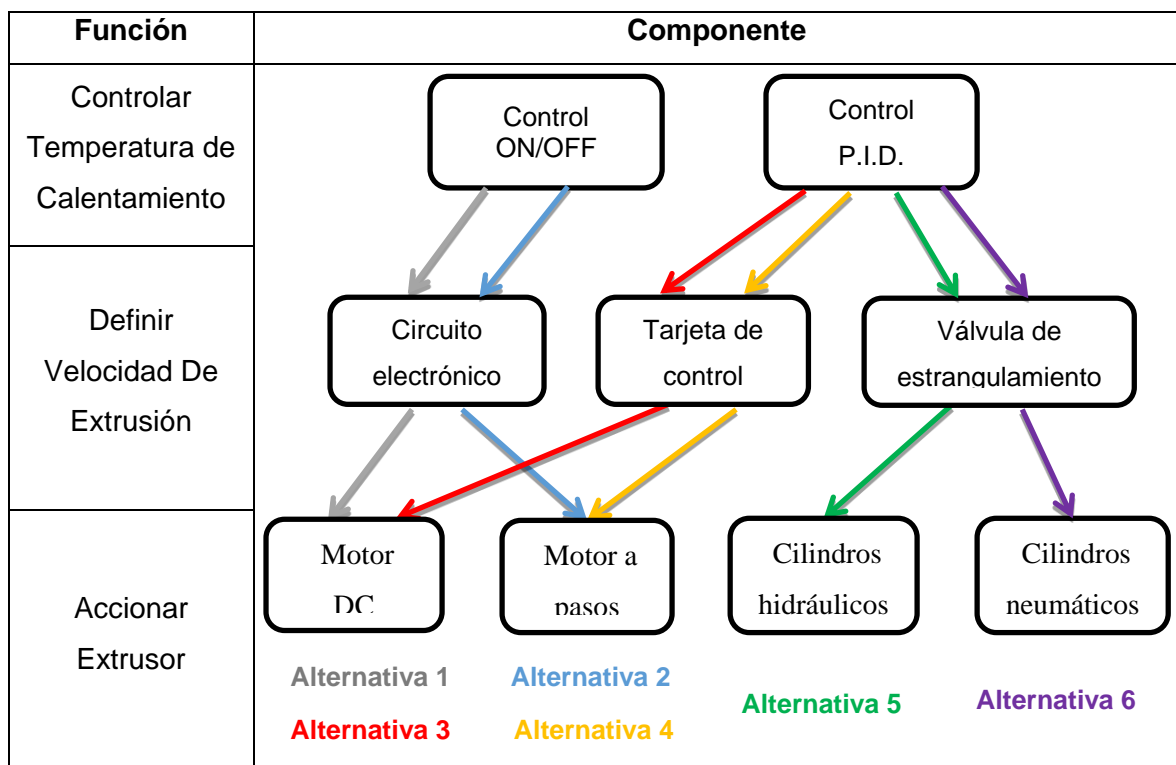


Figura 2.19. Motor de pasos.  
(Fuente: Propia)

Tabla 2.14. Alternativas de solución para el módulo de control.



(Fuente: Propia)

**2.2.3.4. Evaluación y selección de alternativas para el módulo de extrusión**

Criterios de valoración más determinantes:

- Precisión en flujo de material



- Precisión en control de temperatura
- Facilidad de acoplar con el extrusor
- Bajo costo
- Bajo peso

Con estos criterios se procede a realizar tablas de ponderación para determinar la mejor opción.

Tabla 2.15. Evaluación de cada criterio.

Criterio	Precisión en flujo	Precisión en temperatura	Fácil de acoplar	Bajo costo	Bajo peso	$\Sigma+1$	Ponderación
Precisión en flujo		1	1	1	1	5	0,33
Precisión en temperatura	0		1	1	1	4	0,27
Fácil de acoplar	0	0		1	0	2	0,13
Bajo costo	0	0	0		0	1	0,07
Bajo peso	0	0	1	1		3	0,20
						15	1,00

Precisión flujo = Precisión temperatura > Bajo peso > Fácil de acoplar > Bajo costo  
(Fuente: Propia)

Tabla 2.16. Evaluación de las soluciones respecto de la precisión de flujo de material.

Precisión en flujo	Altern. 1	Altern. 2	Altern. 3	Altern. 4	Altern. 5	Altern. 6	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0	0,5	0	1	1	3,5	0,17
Alternativa 2	1		1	1	1	1	6	0,29
Alternativa 3	0,5	0		0	1	1	3,5	0,17
Alternativa 4	1	0	1		1	1	5	0,24
Alternativa 5	0	0	0	0		0,5	1,5	0,07
Alternativa 6	0	0	0	0	0,5		1,5	0,07
							21	1,00

Alternativa 4 = Alternativa 2 > Alternativa 3 = Alternativa 1 > Alternativa 5 = Alternativa 6  
(Fuente: Propia)

Tabla 2.17. Evaluación de las soluciones respecto del control de temperatura.

Precisión en temperatura	Altern. 1	Altern. 2	Altern. 3	Altern. 4	Altern. 5	Altern. 6	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	0	0	0	0	1,5	<b>0,07</b>
Alternativa 2	0,5		0	0	0	0	1,5	<b>0,07</b>
Alternativa 3	1	1		0,5	0,5	0,5	4,5	<b>0,21</b>
Alternativa 4	1	1	0,5		0,5	0,5	4,5	<b>0,21</b>
Alternativa 5	1	1	0,5	0,5		0,5	4,5	<b>0,21</b>
Alternativa 6	1	1	0,5	0,5	0,5		4,5	<b>0,21</b>
							21	<b>1,00</b>

Alternativa 3 = Alternativa 4 = Alternativa 5 = Alternativa 6 > Alternativa 1 = Alternativa 2

(Fuente: Propia)

Tabla 2.18. Evaluación de las soluciones respecto de la facilidad de acoplamiento.

Fácil de acoplar	Altern. 1	Altern. 2	Altern. 3	Altern. 4	Altern. 5	Altern. 6	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	1	1	1	1	5,5	<b>0,26</b>
Alternativa 2	0,5		1	1	1	1	5,5	<b>0,26</b>
Alternativa 3	0	0		1	1	1	4	<b>0,19</b>
Alternativa 4	0	0	0		1	1	3	<b>0,14</b>
Alternativa 5	0	0	0	0		0,5	1,5	<b>0,07</b>
Alternativa 6	0	0	0	0	0,5		1,5	<b>0,07</b>
							21	<b>1,00</b>

Alternativa 1 = Alternativa 2 = Alternativa 3 = Alternativa 4 > Alternativa 5 = Alternativa 6

(Fuente: Propia)

Tabla 2.19. Evaluación de las soluciones respecto del bajo costo.

Bajo costo	Altern. 1	Altern. 2	Altern. 3	Altern. 4	Altern. 5	Altern. 6	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	1	1	1	1	5,5	0,26
Alternativa 2	0,5		1	1	1	1	5,5	0,26
Alternativa 3	0	0		0,5	1	1	3,5	0,17
Alternativa 4	0	0	0,5		1	1	3,5	0,17
Alternativa 5	0	0	0	0		0	1	0,05
Alternativa 6	0	0	0	0	1		2	0,10
							21	1,00

Alternativa 1 = Alternativa 2 > Alternativa 3 = Alternativa 4 > Alternativa 6 > Alternativa 5

(Fuente: Propia)

Tabla 2.20. Evaluación de las soluciones respecto del bajo peso.

Bajo peso	Altern. 1	Altern. 2	Altern. 3	Altern. 4	Altern. 5	Altern. 6	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	0,5	0,5	1	1	4,5	0,21
Alternativa 2	0,5		0,5	0,5	1	1	4,5	0,21
Alternativa 3	0,5	0,5		0,5	1	1	4,5	0,21
Alternativa 4	0,5	0,5	0,5		1	1	4,5	0,21
Alternativa 5	0	0	0	0		0	1	0,05
Alternativa 6	0	0	0	0	1		2	0,10
							21	1,00

Alternativa 1 = Alternativa 2 = Alternativa 3 = Alternativa 4 > Alternativa 6 > Alternativa 5

(Fuente: Propia)

Tabla 2.21. Tabla de soluciones para el módulo 3.

Conclusiones	Precisión en flujo	Precisión en temperatura	Fácil de acoplar	Bajo costo	Bajo peso	$\Sigma$	Ponderación
Alternativa 1	0,06	0,02	0,03	0,02	0,04	0,17	3
Alternativa 2	0,10	0,02	0,03	0,02	0,04	0,21	1
Alternativa 3	0,06	0,06	0,03	0,01	0,04	0,19	2
Alternativa 4	0,08	0,06	0,02	0,01	0,04	0,21	1
Alternativa 5	0,02	0,06	0,01	0,00	0,01	0,10	5
Alternativa 6	0,02	0,06	0,01	0,01	0,02	0,12	4

(Fuente: Propia)

Según los resultados en la Tabla 2.21, existen dos soluciones que se acercan a los criterios establecidos y son la alternativa 2 y la alternativa 4. Entre estas dos opciones se escoge la ALTERNATIVA 2 debido a que el control ON/OFF de temperatura es mucho más sencillo de implementar y presenta una precisión suficiente para los requerimientos del prototipo.

#### 2.2.4. Esquema final

En base a las alternativas seleccionadas se procede a realizar un esquema final (Figura 2.20), uniendo los distintos módulos para obtener un diseño conceptual.

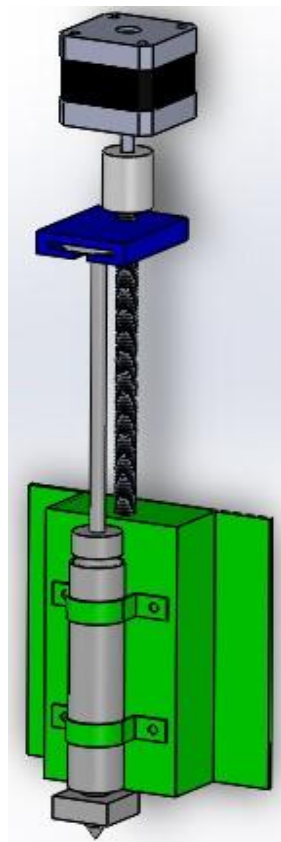


Figura 2.20. Diseño conceptual del prototipo de extrusor de cera.  
(Fuente: Propia)

### 2.3. Diseño esquemático del prototipo

Partiendo del diseño conceptual mostrado en la Figura 2.20 se procede a afinar el diseño del prototipo. Para este diseño se tiene en consideración las características de trabajo del prototipo. El émbolo ejercerá una fuerza longitudinal por lo que es necesario que el cilindro no se desplace en esta dirección, para esto se añade una aleta en la parte posterior que encajará en la base sobre la que se apoya el cilindro. Además el movimiento del émbolo debe ser preciso, esto requiere de guías que aseguren este movimiento. El émbolo será accionado por un sistema de tornillo de potencia con motor de pasos, esto con el fin de obtener un movimiento mucho más preciso y controlado. El calentamiento de la cera se realizará a través de un elemento calefactor que funciona con una resistencia eléctrica tipo cartucho, tal como funciona un extrusor de impresora 3D de tipo FDM, y la temperatura será controlada por Arduino al igual que el avance del émbolo.

Con estas consideraciones se establece un diseño preliminar para el prototipo, el cual se muestra en la Figura 2.21.

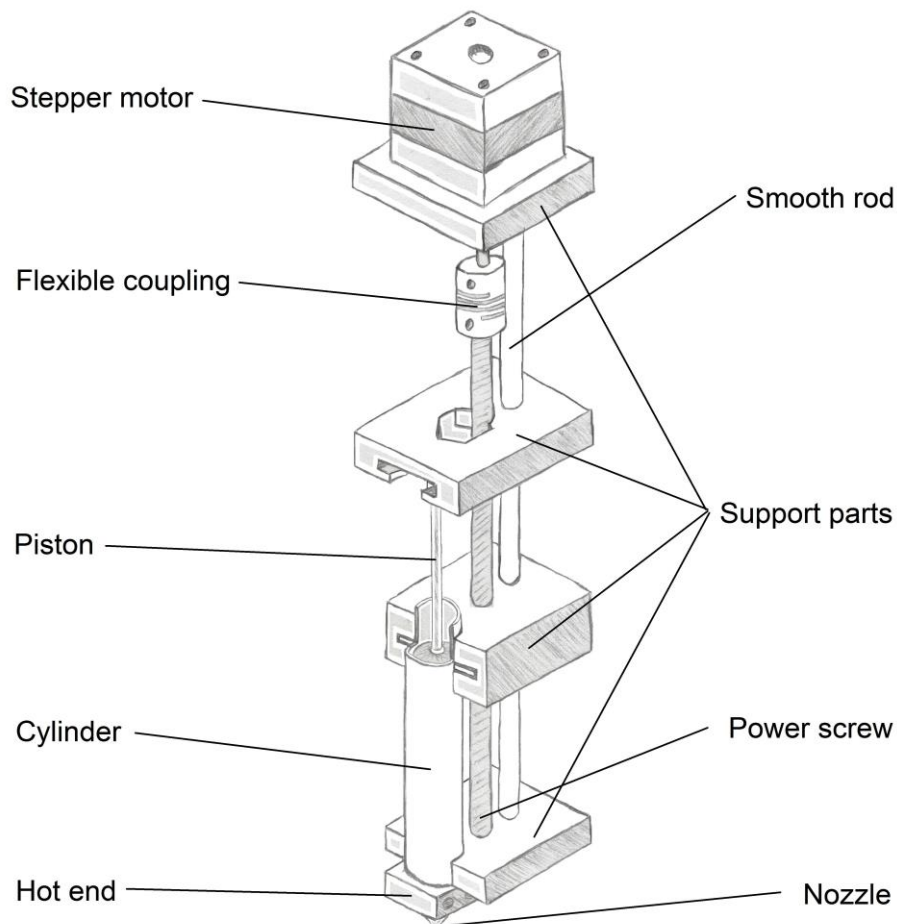


Figura 2.21. Boceto del prototipo de extrusor de cera.  
(Fuente: Propia)

Como se observa en la Figura 2.21 se propone un cilindro metálico, un elemento calefactor en el extremo, donde se colocará una boquilla de extrusión, y un émbolo para conformar el sistema de extrusión. Además elementos de soporte del sistema que a la vez sirven para poder alinear los elementos móviles. Se utilizará una varilla lisa como guía del movimiento del émbolo con su pieza de soporte y este movimiento será realizado por un motor a pasos que acciona un tornillo de potencia que a su vez mueve el soporte del émbolo por medio de una tuerca fija en el mismo. Un acople flexible entre el eje del motor y el tornillo de potencia para absorber cualquier desalineamiento entre ellos.

## **2.4. Diseño y selección de componentes**

El diseño parte del esquema preliminar y se basa principalmente en la presión necesaria para la extrusión de la cera en estado pastoso. Esta información se obtiene de productores de cera, y de acuerdo con especificaciones de Castaldo en [29], se requiere una presión entre 4 y 7 psi (27 - 48 kPa), según Freeman [30], otra productora de cera, la presión se encuentra entre 2 y 10 psi (13 - 69 kPa), de acuerdo con Arbe [31], la presión está entre 12 y 20 psi (82 - 138 kPa), y Boothroy et al. [32] dice que se requieren presiones de 40 psi (275 kPa).

De acuerdo con la selección de alternativas realizada en la sección 2.2, el prototipo será accionado por un motor de pasos, ya que este permite un movimiento más preciso y controlado, lo cual no se puede obtener por medio de un motor de corriente continua. Esta característica es necesaria para el movimiento del émbolo del prototipo extrusor.

El primer punto será seleccionar el motor de pasos y el tornillo de potencia, pues de estos dependen los valores de presión que se pueden obtener con el extrusor.

### **2.4.1. Motor de pasos y tornillo de potencia**

El sistema de accionamiento del extrusor será por medio de un tornillo de potencia accionado por un motor de pasos debido a la precisión requerida en el movimiento del émbolo para la extrusión de la cera.

Por la relativa dificultad de construcción de un tornillo de potencia, se utilizará un tornillo de potencia de rosca métrica M8x1.25 de una impresora 3D y se calcula el torque necesario para lograr la presión de extrusión. En vista que estos tornillos son usados en las impresoras 3D para la extrusión de plásticos PLA y ABS, se estima que será adecuado para la extrusión de cera. Como se mencionó de acuerdo con los datos proporcionados por los fabricantes de ceras la presión necesaria está en un rango de 2 a 40 psi (13 a 275 kPa). Además se estima un diámetro del cilindro de 20mm.

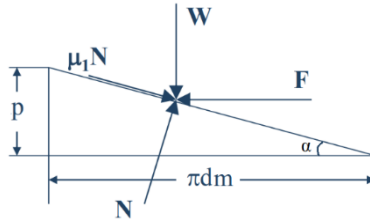


Figura 2.22. Cargas interactuando sobre la rosca al elevar una carga W.  
(Modificado de: <http://www2.ula.ve/dsiportal/dmdocuments/elementos/TORNILLOPOTENCIA.pdf>)

$$P = \frac{W}{A} \quad (1)$$

$$W = PA \quad (2)$$

$$W = 275000 \frac{N}{m^2} * \pi * 0,01^2 m^2$$

$$W = 86,39 N$$

Con el valor de W que se requiere para lograr la presión de extrusión en un cilindro de 20mm de diámetro se calcula el valor de F que es la fuerza que el motor debe ejercer sobre el tornillo para vencer la fuerza de rozamiento y hacer ascender/descender la carga por el plano inclinado de la rosca del tornillo.

De la sumatoria de fuerzas verticales y horizontales del diagrama de la Figura 2.22 se obtienen las siguientes ecuaciones respectivamente.

$$N = \frac{W}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} \quad (3)$$

$$F = N(\sin \alpha + \mu \cos \alpha) \quad (4)$$

Reemplazando (3) en (4):

$$F = \frac{W(\sin \alpha + \mu \cos \alpha)}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} \quad (5)$$

Dividiendo para  $\cos \alpha$  tanto al numerador como al denominador se tiene:

$$F = \frac{W(\tan \alpha + \mu)}{1 - \mu \tan \alpha} \quad (6)$$

Donde:

$$\tan \alpha = \frac{p}{\pi d_m} \quad (7)$$

Reemplazando (7) en (6):

$$F = \frac{W(p + \mu\pi d_m)}{\pi d_m - \mu p} \quad (8)$$

Con los siguientes datos se calcula F

$\mu = 0,74$  (coeficiente de rozamiento cinético acero-acero)

$d_m = 7,19\text{mm}$  (diámetro primitivo de la rosca)

$p = 1,25\text{mm}$  (paso de la rosca)

$$F = 71,64 \text{ N}$$

Ahora, se tiene:

$$F = \frac{T}{r_m} \quad (9)$$

Donde:

T = Torque necesario

$r_m = \text{radio primitivo de la rosca} = 3,6\text{mm}$

Entonces:

$$\begin{aligned} T &= F * r_m & (10) \\ T &= 71,64 \text{ N} * 0,36 \text{ cm} \\ T &= 25,7 \text{ N.cm} \end{aligned}$$

Existen algunos factores en el proceso de extrusión tales como la fricción en el interior del cilindro de extrusión entre las paredes de este y la cera. Por esta razón se utiliza un motor con mayor torque para darle un factor de seguridad.

El motor seleccionado es un CHANGZHOU SONGYANG MACHINERY & ELECTRONICS SY42STH38-1684A que de acuerdo con la ficha técnica que se encuentra en el Anexo A1, tiene un torque de 36 N.cm.

De donde:



$$n = \frac{T_{real}}{T_{calculado}} \quad (11)$$

$$n = \frac{36 \text{ N.cm}}{25,7 \text{ N.cm}}$$

$$n = 1,4$$

Con este valor de torque ejercido por el motor se obtiene una fuerza de extrusión mayor

$$W = 86,39 \text{ N} * 1,4$$

$$W = 120,95 \text{ N}$$

### 2.4.2. Sistema de extrusión

Para el sistema de extrusión, los elementos a ser diseñados son:

- Cilindro
- Calefactor
- Émbolo
- Piezas de soporte

Estos elementos no se encuentran sometidos a grandes sollicitaciones mecánicas debido a que la presión de trabajo no es elevada.

Mientras que los elementos que serán seleccionados son:

- Boquilla
- Guía
- Riel
- Acople flexible
- Rodamiento lineal

#### 2.4.2.1. Cilindro

Este elemento estará sometido a la presión de trabajo, pero la característica principal que requiere es que debe almacenar y transferir calor de forma adecuada para que la cera en su interior sea fundida antes de la extrusión. Basado en estas consideraciones, el cilindro será de tubería cobre, por su capacidad de transferencia de calor. Además de esto presenta una aleta que servirá como elemento de acople con las piezas de soporte.

Se realiza el cálculo del espesor de pared necesario de acuerdo a la resistencia del material y la presión de trabajo. En cilindros de pared delgada sometidos a presión se generan dos tipos de esfuerzos: tangencial y longitudinal. De estos el esfuerzo tangencial es el crítico,

por lo que con base en el esfuerzo tangencial admisible se realiza el cálculo del espesor necesario para soportar la presión de trabajo.

$$\sigma_t = \frac{p * r}{e} \quad (12)$$

$$\sigma_{admisible} = \frac{p * r}{e_{mín}} \quad (13)$$

Donde:

$\sigma_{admisible}$  = Esfuerzo admisible igual al límite elástico = 270 Mpa

$p$  = Presión = 385 kPa

$r$  = Radio interno del cilindro

$e_{mín}$  = Espesor mínimo de pared

$$e_{mín} = \frac{p * r}{\sigma_{admisible}} \quad (14)$$

$$e_{mín} = \frac{385 \text{ kPa} * 0,01 \text{ m}}{270000 \text{ kPa}}$$

$$e_{mín} = 1,43 * 10^{-5} \text{ m} = 0,014 \text{ mm}$$

En el mercado existe disponibilidad de tuberías de cobre de 3/4" por 1,1 mm de espesor, que claramente soportará la presión que se ejercerá durante la operación del extrusor. Sus dimensiones se muestran en la figura 2.23

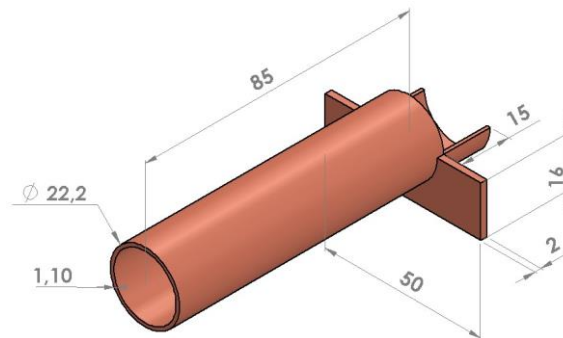


Figura 2.23. Dimensiones del cilindro.  
(Fuente: Propia)

#### 2.4.2.2. Calefactor

El bloque calefactor tiene la función de albergar la resistencia eléctrica de calentamiento y transferir esta energía a todo el cilindro, para que este la transfiera a la cera. El bloque irá unido al cilindro por medio de soldadura, además que requiere una buena capacidad de

transferencia de calor, por lo cual será fabricado en bronce. Posee agujeros donde irán insertados la resistencia eléctrica y el sensor de temperatura.

Su diseño se basa en requerimientos dimensionales y de forma más que por sollicitación mecánica. Este elemento se muestra en la figura 2.24.

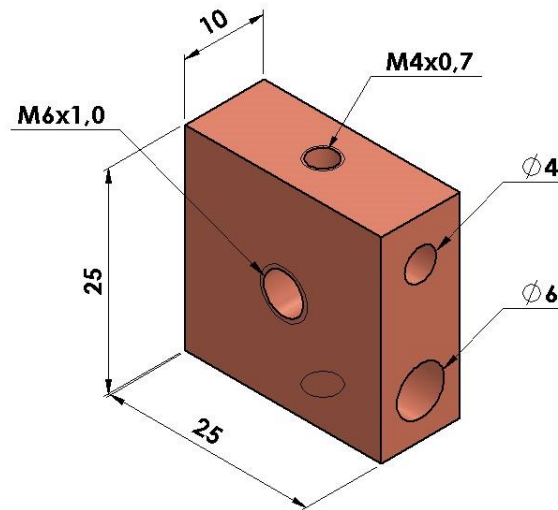


Figura 2.24. Dimensiones del bloque calefactor.  
(Fuente: Propia)

### 2.4.2.3. Émbolo

El émbolo o pistón tiene la función de ejercer la presión sobre el tocho de cera para hacerlo fluir a través de la boquilla de extrusión.

El diseño del émbolo se lo realiza con base en sus requerimientos dimensionales y como se observa en la Figura 2.23 el cilindro tiene una longitud de 85mm con un diámetro de 20mm

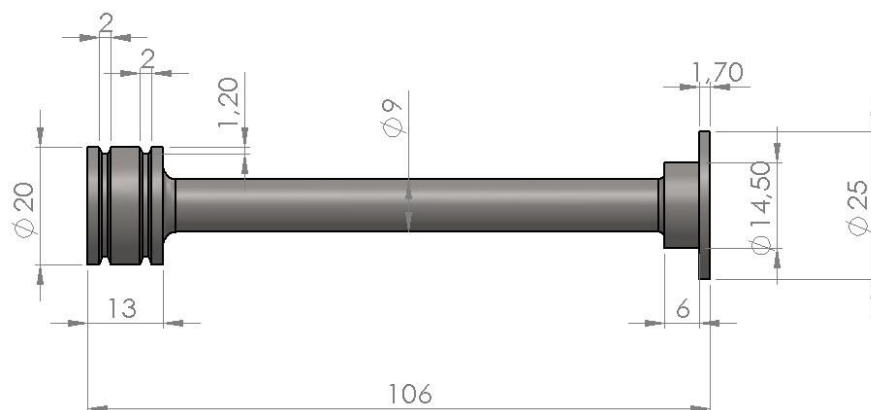


Figura 2.25. Dimensiones del émbolo.  
(Fuente: Propia)

Con el diámetro de 20mm se calcula la presión de extrusión utilizando la ecuación (1)

$$P = \frac{4W}{\pi D^2}$$
$$P = \frac{4 * 120,95 \text{ N}}{\pi(0,02 \text{ m})^2}$$
$$P = 385 \text{ kPa}$$

#### 2.4.2.4. Piezas de soporte

Estos elementos se encargan de soportar el cilindro, el pistón y el motor del prototipo. Las sollicitaciones mecánicas son mínimas por lo que su diseño se realiza de acuerdo a las necesidades de geometría para que se puedan ensamblar con los elementos a los que van a soportar. Estas piezas son:

##### Soportes del cilindro

Las piezas de soporte del cilindro presentan una cara cóncava sobre la cual se asentará el cilindro, además de los orificios para las guías, el tornillo de potencia y la sujeción sobre el riel de aluminio. Sus dimensiones se muestran en la Figura 2.26

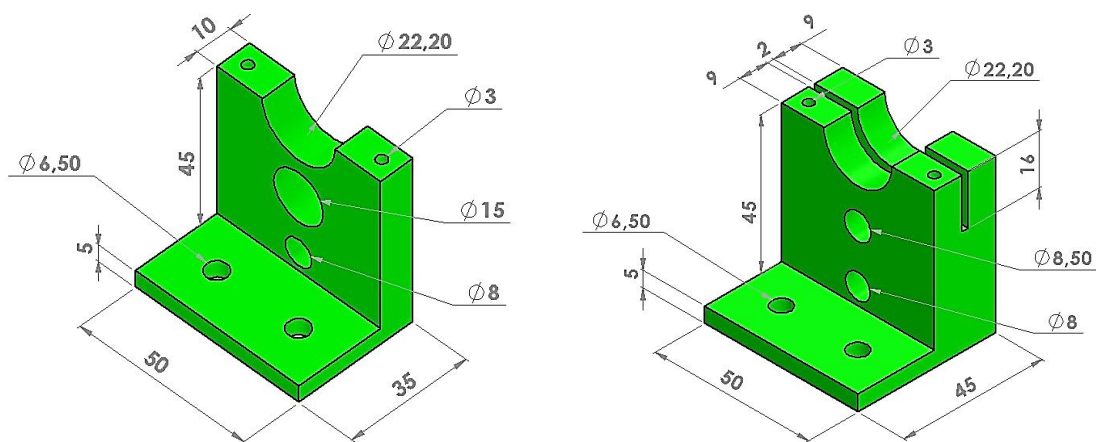


Figura 2.26. Dimensiones de los soportes del cilindro.  
(Fuente: Propia)

##### Soporte del motor

El soporte del motor debe presentar orificios que permitan colocar el motor con facilidad y el motor será sujetado por medio de pernos. De igual manera que en los soportes del cilindro tendrá orificios para sujetar sobre el riel de aluminio.

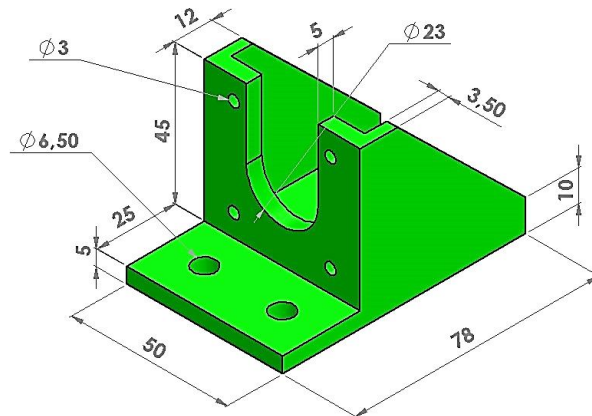


Figura 2.27. Dimensiones del soporte del motor.  
(Fuente: Propia)

### Soporte del émbolo

El soporte del émbolo debe sujetarlo firmemente además de permitir colocarlo y quitarlo de manera fácil pues esto es necesario para poder colocar el tocho de cera dentro del cilindro.

Con estas consideraciones se realiza el diseño del soporte con una ranura donde se inserta la parte trasera del émbolo deslizándolo por esta; un orificio para el rodamiento lineal que permite su desplazamiento sobre la guía y un agujero donde se inserta la tuerca que permite la transmisión de potencia del tornillo.

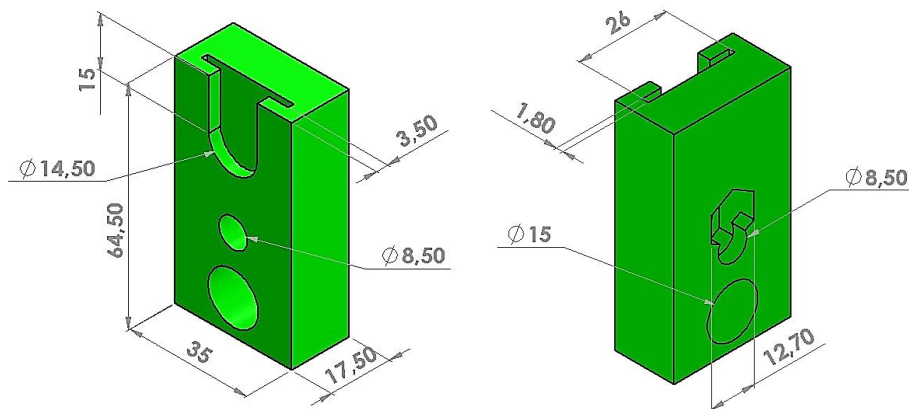


Figura 2.28. Dimensiones del soporte del émbolo.  
(Fuente: Propia)

### 2.4.2.5. Boquilla

La boquilla de extrusión es un elemento que se puede conseguir en el mercado, para extrusores de impresoras 3D. Vienen en varias medidas, siendo las más comunes las de 0,4mm en el extremo de salida. Estas boquillas son de bronce pues necesita tener una buena conducción de calor y tienen una rosca M6x1 para acoplar al bloque calefactor.

Se selecciona una boquilla de 0,4mm y se muestra en la Figura 2.29

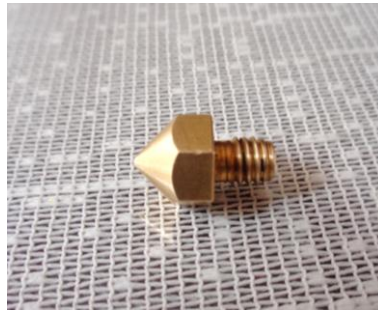


Figura 2.29. Boquilla de extrusión.  
(Fuente: Propia)

#### 2.4.2.6. Guía

El elemento que funcionará como guía para el movimiento del émbolo será una varilla cilíndrica lisa de 8mm de las que son utilizadas en máquinas cartesianas accionadas por tornillos de potencia como fresadoras y cortadoras CNC y las mismas impresoras 3D. Estas varillas son de un material conocido como acero plata y se puede conseguir fácilmente en el mercado.

La varilla atravesará las piezas de soporte y en el soporte del émbolo se utilizará un rodamiento lineal para permitir el movimiento suave de esta pieza sobre la varilla.

Esta varilla se considera como una viga doblemente empotrada en la cual actúa un momento flector generado por la reacción de la fuerza de extrusión a una distancia del centro de la varilla como se muestra en la Figura 2.30.

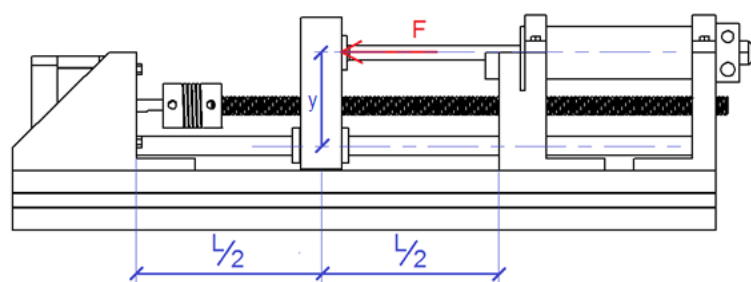


Figura 2.30. Esquema del extrusor.  
(Fuente: Propia)

Al tratarse de una viga doblemente empotrada se considera como una viga estáticamente indeterminada, es decir que las reacciones no pueden ser determinadas con ecuaciones de equilibrio solamente y es necesario utilizar ecuaciones adicionales.

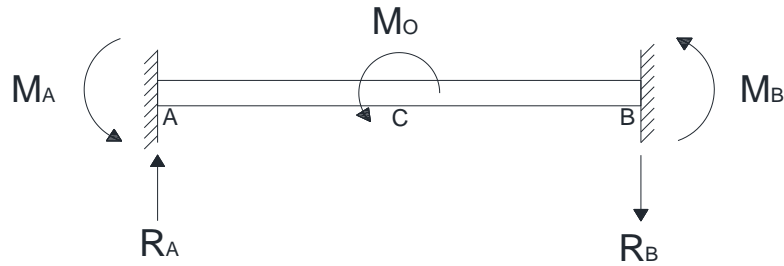


Figura 2.31. Diagrama de cuerpo libre de la viga doblemente empotrada.  
(Fuente: Propia)

Para resolver esta viga estáticamente indeterminada se va a utilizar el método del análisis de la curva de deflexión como lo explica Gere et al. en [33].

Los datos para los cálculos son los siguientes:

- La varilla lisa tiene una longitud de 155mm entre apoyos.
- La distancia entre la línea de acción de la fuerza de reacción de la extrusión y el centro de la varilla lisa es de 39mm como se muestra en el esquema de la Figura 2.30.
- La fuerza de reacción es de 120,9 N
- El momento flector que actúa sobre la varilla es igual a la fuerza de reacción de la extrusión multiplicado por la distancia desde la línea de acción de la fuerza al centro de la varilla (4,7 N.m).

En el caso de esta viga que es de sección constante, las ecuaciones diferenciales son las siguientes:

$$EI \frac{d^2v}{dx^2} = M \quad (15)$$

$$EI \frac{d^3v}{dx^3} = V \quad (16)$$

$$EI \frac{d^4v}{dx^4} = -q \quad (17)$$

Donde:

$E$  = Módulo de Elasticidad

$I$  = Momento de Inercia

$v$  = Deflexión

$M$  = Momento flector

$V = \text{Cortante}$

$q = \text{Carga}$

Como primer punto se expresan las ecuaciones obtenidas a partir del equilibrio estático con base en el diagrama de la Figura 2.31. Dado que la viga es simétrica se tiene

$$R_A = R_B \quad (18)$$

$$M_A = M_B \quad (19)$$

De la sumatoria de momentos en el extremo B se tiene:

$$\sum M = 0$$

$$R_A L - M_A - M_O - M_B = 0 \quad (20)$$

$$R_A = \frac{2M_A + M_O}{L} \quad (21)$$

Las ecuaciones necesarias para determinar todas las reacciones se obtienen del análisis de la curva de deflexión, que en este caso se utiliza la ecuación de momento flector. Para obtener esta ecuación se hace una sumatoria de momentos en un punto a una distancia  $x$  desde el extremo A de tal manera que  $0 \leq x \leq L/2$

$$EIv'' = R_A x - M_A \quad (22)$$

Reemplazando (21) en (22) se tiene:

$$EIv'' = \left( \frac{2M_A + M_O}{L} \right) x - M_A \quad (23)$$

La ecuación (23) se integra hasta obtener la ecuación de deflexión.

$$EIv' = \left( \frac{2M_A + M_O}{2L} \right) x^2 - M_A x + C_1 \quad (24)$$

$$EIv = \left( \frac{2M_A + M_O}{6L} \right) x^3 - \frac{M_A}{2} x^2 + C_1 x + C_2 \quad (25)$$

Se tiene que encontrar las constantes  $C_1$ ,  $C_2$  y  $M_A$  a partir de las condiciones de frontera. Al tratarse de un extremo empotrado, tanto la deflexión como la pendiente son nulas, es decir:



$$v(0) = 0$$

$$v'(0) = 0$$

Aplicando estas condiciones se tiene:

$$C_1 = 0$$

$$C_2 = 0$$

La tercera condición de frontera que se necesita para el cálculo de  $M_A$  se obtiene del hecho de que en el punto C donde actúa el momento, no se produce desplazamiento, es decir:

$$v\left(\frac{L}{2}\right) = 0$$

$$EIv\left(\frac{L}{2}\right) = \left(\frac{2M_A + M_O}{6L}\right)\left(\frac{L}{2}\right)^3 - \frac{M_A}{2}\left(\frac{L}{2}\right)^2 = 0 \quad (26)$$

$$\left(\frac{2M_A + M_O}{6L}\right)\left(\frac{L^3}{8}\right) - \frac{M_A}{2}\left(\frac{L^2}{4}\right) = 0 \quad (27)$$

$$\left(\frac{2M_A + M_O}{48}\right) - \frac{M_A}{8} = 0 \quad (28)$$

$$M_A = \frac{M_O}{4} \quad (29)$$

Entonces las ecuaciones de deflexión y de pendiente

$$EIv' = \left(\frac{3M_O}{4L}\right)x^2 - \frac{M_O}{4}x \quad (30)$$

$$EIv = \left(\frac{M_O}{4L}\right)x^3 - \frac{M_O}{8}x^2 \quad (31)$$

Reemplazando (29) en (21)

$$R_A = \frac{3M_O}{2L} \quad (32)$$

En conclusión:

$$R_A = 45,48 \text{ N}$$

$$R_B = 45,48 \text{ N}$$

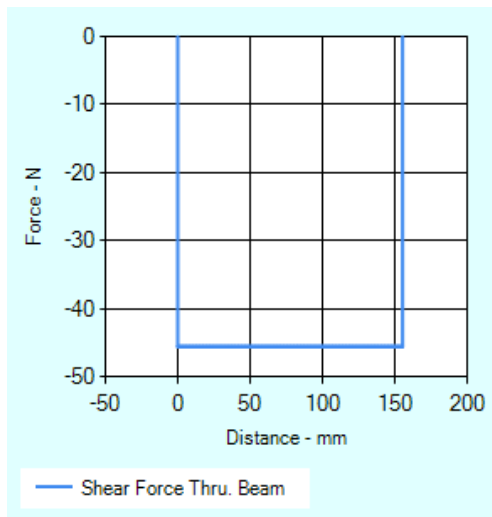
$$M_A = 1,175 \text{ N.m}$$

$$M_B = 1,175 \text{ N.m}$$

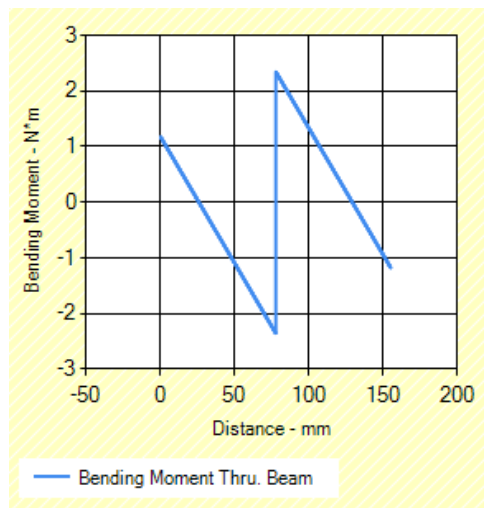
Derivando la ecuación (22) se obtiene la ecuación de cortante:

$$EIv''' = R_A \quad (33)$$

Con las ecuaciones (33) y (22) se puede construir los diagramas de cortante y momento flector y se muestran en las Gráficas 2.1 y 2.2.



Gráfica 2.1. Diagrama de fuerza cortante.  
(Fuente: Propia)



Gráfica 2.2. Diagrama de momento flector.  
(Fuente: Propia)

Como se puede observar en el diagrama de momentos, el momento máximo se presenta en el centro de la viga y tiene un valor de 2,35 N.m.

Para el cálculo del diámetro de la varilla lisa se realiza el diseño estático de la misma donde la sección crítica es en el centro de la viga de tal manera que:

$$\sigma_x = \sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M * c}{I} \quad (34)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{32M}{\pi d^3} \quad (35)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{S_y}{n} \quad (36)$$

El diámetro de la varilla se calcula con un factor de seguridad de 3. La varilla es de acero plata que tiene una resistencia a la fluencia de 580 MPa.

$$\frac{580 * 10^6}{3} = \frac{32 * 2,35}{\pi d^3}$$

$$d^3 = 1,238 * 10^{-7}$$

$$d = 0,00498 \text{ m} = 5 \text{ mm}$$

Se selecciona una varilla de 8mm y se realiza una simulación en Abaqus a fin de verificar la deflexión que se produce en esta varilla. De igual forma se lo puede calcular con la ecuación (31) para  $x = L/3$  donde la pendiente es cero, y la deflexión es máxima. El módulo de elasticidad es de 200 GPa.

$$EIv\left(\frac{L}{3}\right) = \left(\frac{M_0}{4L}\right)\left(\frac{L}{3}\right)^3 - \frac{M_0}{8}\left(\frac{L}{3}\right)^2$$

$$EIv\left(\frac{L}{3}\right) = \left(\frac{M_0}{4L}\right)\left(\frac{L^3}{27}\right) - \frac{M_0}{8}\left(\frac{L^2}{9}\right)$$

$$EIv\left(\frac{L}{3}\right) = \left(\frac{M_0 L^2}{108}\right) - \frac{M_0 L^2}{72}$$

$$v\left(\frac{L}{3}\right) = -\frac{3M_0 L^2}{648EI}$$

$$v\left(\frac{L}{3}\right) = v_{m\acute{a}x} = -1,3 * 10^{-5} \text{ m}$$

$$v_{m\acute{a}x} = -0,0013 \text{ mm}$$

De la simulación en Abaqus se obtienen los siguientes resultados

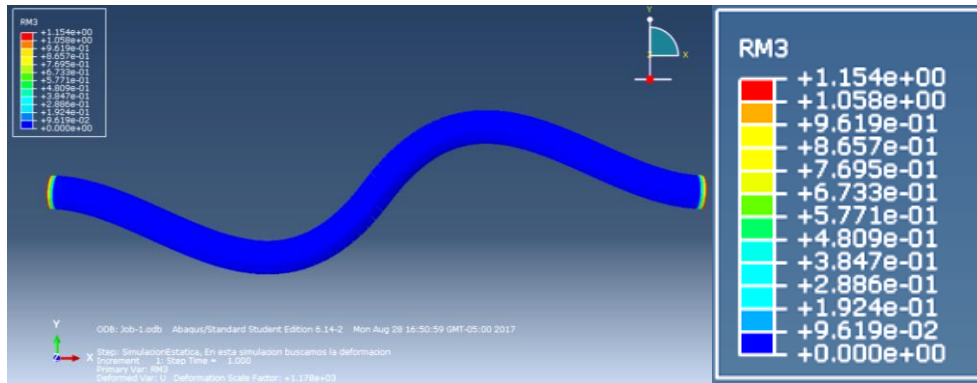


Figura 2.32. Valores de momento en los apoyos en Abaqus.  
(Fuente: Propia)

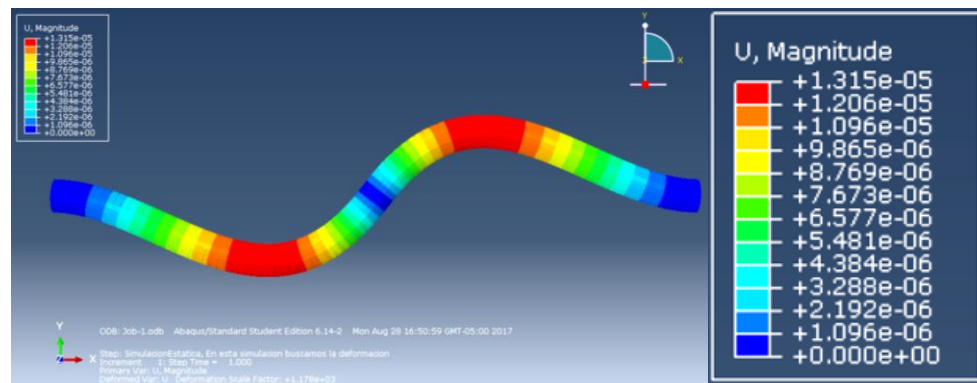


Figura 2.33. Valores de deflexión en Abaqus.  
(Fuente: Propia)

Como se observa en la Figura 2.32 los momentos en los extremos empotrados son de 1,154 N.m que se acerca mucho a los valores calculados. Así mismo en la Figura 2.33 se observa que el desplazamiento máximo es de  $1,3 \times 10^{-5}$  m confirmando los cálculos realizados.

#### 2.4.2.7. Riel

El riel servirá tanto como base sobre la que se asentará todo el prototipo, así como también permitirá una mejor alineación entre las piezas de soporte facilitando el ensamblaje y el funcionamiento del extrusor.

Se establece como riel un perfil estructural de aluminio debido a que este presenta canales que permiten la sujeción de las piezas de soporte por medio de conectores especiales con pernos, los cuales se adquiere junto con el perfil. En la Figura 2.34 se presenta una imagen del perfil estructural.



Figura 2.34. Perfil estructural de aluminio.  
(Fuente: Propia)

#### 2.4.2.8. Acople flexible

Es de uso común en las uniones entre motores de pasos y tornillos de potencia debido a la flexibilidad como indica su nombre. Esta característica permite que el acople absorba hasta cierto grado de desalineación entre el tornillo y el eje del motor. Además tienen agujeros con prisioneros M4x0.7 para ajuste del eje y el tornillo. Existen acoples de varias medidas y su selección se realiza con base en las dimensiones tanto del eje del motor como del tornillo.

Con esta consideración, el acople que se selecciona es un acople 5-8, esta denominación hace referencia a las medidas de los agujeros en cada extremo. Sus dimensiones se muestran en la Figura 2.35.

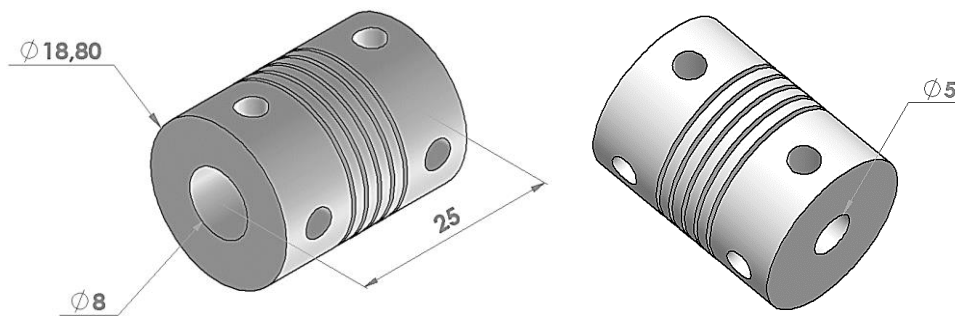


Figura 2.35. Acople flexible 5-8.  
(Fuente: Propia)

#### 2.4.2.9. Rodamiento lineal

El rodamiento lineal de desplazamiento vertical tiene la función de permitir el movimiento relativo axial entre el soporte del émbolo y la varilla lisa de acero plata.

Al tener una varilla lisa de 8mm de diámetro se selecciona un rodamiento LM8UU. Para calcular su vida se utilizan las siguientes fórmulas.

$$L = \left( \frac{f_H f_T f_c}{f_W} * \frac{C}{P_c} \right)^3 * 50 \quad (37)$$

$$L_h = \frac{L * 10^3}{2 * l_s * n_1 * 60} \quad (38)$$

$L$  = Vida nominal [km]

$f_H$  = Factor de dureza

$f_T$  = Factor de temperatura

$f_c$  = Factor de contacto

$f_W$  = Factor de carga

$C$  = Capacidad de carga dinámica

$P_c$  = Carga calculada en los rodamientos

$L_h$  = Vida nominal [h]

$l_s$  = Longitud de carrera [m]

$n_1$  = Frecuencia de ciclo (1 ciclo = 2 carreras) [ $\text{min}^{-1}$ ]

Se considera que la fuerza que actúa sobre el rodamiento es igual a las reacciones calculadas sobre los apoyos de la varilla, es decir 45,5 N. Los factores se obtienen de las gráficas disponibles en el catálogo de rodamientos. Estas gráficas se presentan en el Anexo A2

$$L = \left( \frac{1 * 1 * 1}{1} * \frac{260}{45,5} \right)^3 * 50$$

$$L = 9329,45 \text{ km}$$

$$L_h = \frac{9329,45 * 10^3}{2 * 0,155 * 0,3 * 60}$$

$$L_h = 1,672 * 10^6 \text{ h} \approx 190 \text{ años}$$

En la Figura 2.36 se muestra una imagen del rodamiento lineal.



Figura 2.36. Rodamiento lineal LM8UU.  
(Fuente: Propia)

### **2.4.3. Sistema de control**

El sistema de control, como se describió en el análisis funcional, cumple con las tareas de definir y controlar la temperatura de calentamiento de la cera, y controlar la velocidad de avance del émbolo de extrusión a través de un motor de pasos.

El extrusor contará con un elemento calefactor similar al de los extrusores de impresoras 3D de tipo FDM, con una resistencia de tipo cartucho y un sensor de temperatura.

Además de estas consideraciones, también se tiene en cuenta que entre los objetivos del presente trabajo de investigación está el de desarrollar un prototipo de bajo costo y de fácil reproducción, por lo que se plantea el uso de programas o paquetes computacionales de código abierto, los mismos que permitirán un control del equipo sin la necesidad de adquirir licencias de uso. De igual manera, se pretende usar controladores electrónicos de código abierto, los mismos que se comercializan a costos bajos y de los que se tiene toda la información disponible para el programador y ensamblador.

#### **2.4.3.1. Tarjeta de control**

Una de las plataformas open source o código abierto de mayor difusión es Arduino, debido a su facilidad de programación y bajo costo de sus controladores. El software de Arduino es fácil de usar para programadores principiantes y es lo suficientemente flexible para ser usado por programadores avanzados.

Para este proyecto se utilizará una tarjeta Arduino Uno R3. De acuerdo con la información encontrada en su sitio web [34], "Arduino Uno es una placa microcontroladora que se basa en la ATmega328P. Tiene 14 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 6 se pueden utilizar como salidas PWM), 6 entradas analógicas, un cristal de cuarzo de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP y un botón de reinicio. La

placa Uno (Figura 2.37), es la primera de una serie de placas USB Arduino, y el modelo de referencia para la plataforma Arduino”.



Figura 2.37. Tarjeta de control Arduino UNO.  
(Fuente: Propia)

El código de programación permite ejecutar las acciones requeridas para el funcionamiento del prototipo. Este código realizará lo siguiente:

Una vez que la tarjeta de control esté conectada al computador, se abre el monitor serial, pues desde este se manejará el prototipo.

En el monitor serial aparecerá un mensaje solicitando que se ingrese el sentido del movimiento del émbolo o pistón, es decir si se quiere que el pistón avance o retroceda.

Al ingresar este valor una última solicitud aparecerá y es el número de vueltas que se quiere que avance o retroceda el émbolo.

Al ingresar el número de vueltas el prototipo empezará a trabajar. Una vez que ha avanzado las vueltas ingresadas, volverá a aparecer el mensaje de solicitud de sentido de movimiento y el proceso se repite desde este punto.

La velocidad de avance deberá ser calibrada de acuerdo a las pruebas de funcionamiento del prototipo, modificando el código de programación. La velocidad de retroceso debe ser alta para que no tome mucho tiempo extraer el émbolo para una nueva carga de cera en el cilindro.

Además presentará una orden de frenado para cualquier situación que requiera detener el avance del émbolo. Esta orden será ingresar la letra f en el serial y el motor se detiene y nos muestra un mensaje con el número de pasos que dio el motor hasta el instante del frenado.



### 2.4.3.2. Resistencia eléctrica

Para el calentamiento de la cera se utilizará una resistencia eléctrica tipo cartucho que se colocará en el interior del elemento calefactor. De acuerdo con mediciones experimentales realizadas con la cera se determina un rango aproximado de temperatura de ablandamiento de entre 58 y 65°C, lo cual se acerca con los resultados expuestos por Moreno [35], que en su trabajo de investigación realiza la obtención de la temperatura de ablandamiento para varias mezclas de ceras para fundición. Además se tiene los datos de las fichas técnicas de las ceras con las que se cuenta (Anexo A3), donde las temperaturas de fusión oscilan entre 51°C y 82°C.

La resistencia a ser utilizada es de una impresora 3D ULTIMAKER ORIGINAL+ DE 40W y 18V y se la muestra en la Figura 2.38.



Figura 2.38. Resistencia eléctrica de calentamiento.  
(Fuente: Propia)

### 2.4.3.3. Sensor de temperatura

Con el fin de controlar la temperatura de calentamiento de la cera es necesario un sensor que nos permita conocer su valor y usarlo como señal para el encendido o apagado de la resistencia eléctrica de calentamiento. Como ya se mencionó la temperatura está alrededor de los 70°C, por lo que el rango de trabajo del sensor deberá ser apto para esta temperatura.

Se ha seleccionado un interruptor de control de temperatura W1209 que posee un sensor de temperatura NTC, lo que hace este interruptor es permitir setear una temperatura que queremos alcanzar y mantener, y a través de un relé abre o cierra el circuito que enciende la resistencia. Este interruptor cierra el circuito cuando la temperatura que registra el sensor NTC está por debajo del set y permite establecer a qué temperatura por encima del set se desea desconectar la resistencia. Una imagen del controlador de temperatura se muestra en la Figura 2.39.

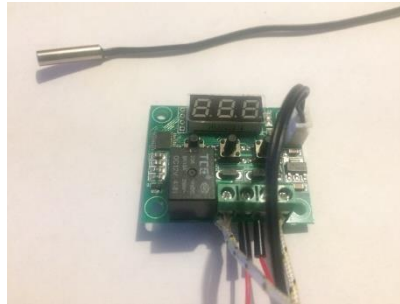


Figura 2.39. Interruptor W1209.  
(Fuente: Propia)

#### 2.4.3.4. Driver para manejo del motor de pasos

Existen varios drivers que permiten el control de motores de pasos, por lo que su selección se la realiza en base al amperaje que se debe entregar al motor.

El motor seleccionado es el SY42STH38-1684A y de acuerdo con su hoja de especificaciones que se encuentra en el Anexo A1, tiene una corriente nominal de 1,68 A. el driver debe entregar esta corriente por lo que se selecciona el driver A4988 de Pololu que puede entregar hasta 2A, como se especifica en su hoja de datos en el Anexo A4.

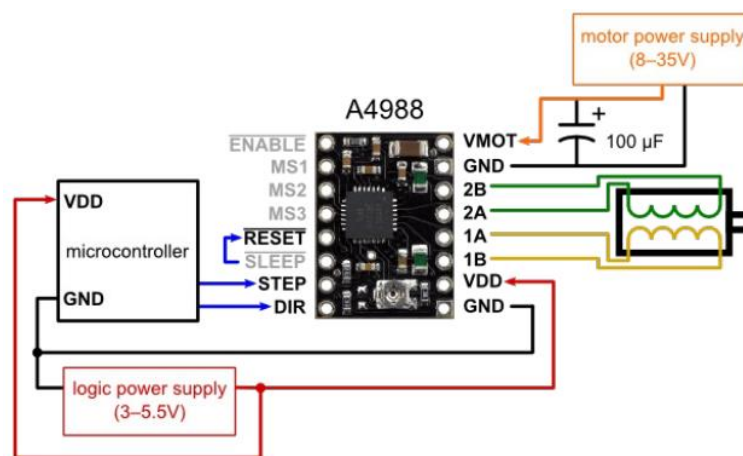


Figura 2.40. Diagrama de conexión microcontrolador-driver en modo "full steps".  
(Fuente: A4988 data sheet)

En la Figura 2.40 se tiene el diagrama de pines de conexión del driver A4988. Los motores de pasos presentan una especificación de su paso como por ejemplo el motor seleccionado tiene un ángulo de  $1.8^\circ$  por paso o 200 pasos por vuelta; esta especificación aplica al modo de "full steps" o pasos completos. El driver A4988 permite mayores resoluciones para movimientos más precisos. La resolución se la selecciona a través de los pines MS1, MS2 y MS3 como se muestra en la Tabla 2.22.

Tabla 2.22. Selección de la resolución de micropasos.

MS1	MS2	MS3	RESOLUCIÓN
Low	Low	Low	Pasos completos
High	Low	Low	Medio paso
Low	High	Low	Cuarto de paso
High	High	Low	Octavo de paso
High	High	High	Dieciseisavo de paso

(Fuente: A4988 data sheet, elaboración propia)

De todas formas en el prototipo se utilizará pasos completos o medios pasos, pues como se observa en las Figuras 9 a la 13 de la ficha técnica que se encuentra en el Anexo A4, al utilizar una mayor resolución se pierde corriente y por ende fuerza del motor, lo cual puede hacer que se pierdan pasos. En pasos completos o medios pasos se utiliza como mínimo el 70.71% de la corriente máxima como se muestra en la Figura 2.41.

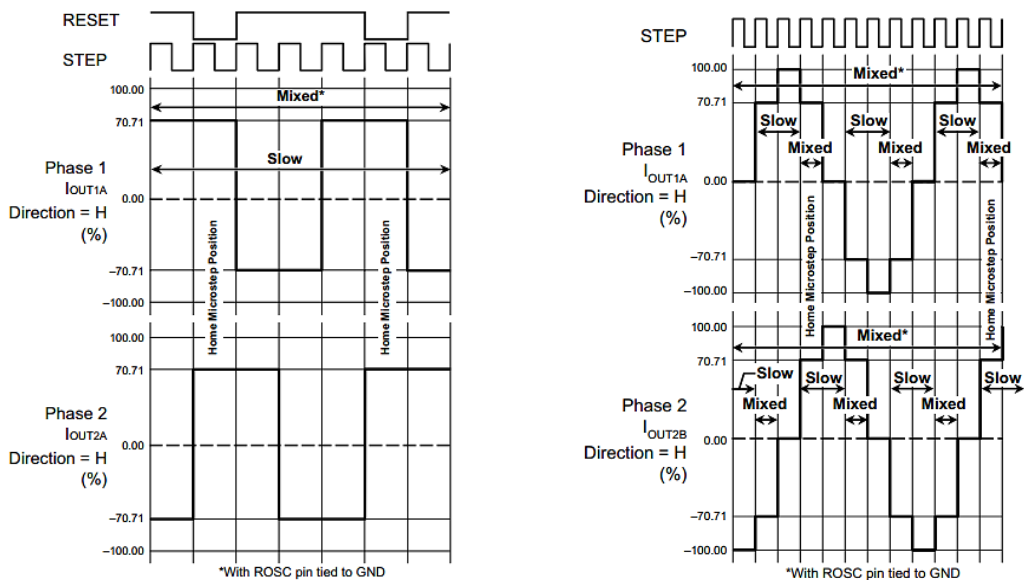


Figura 2.41. “Decay Mode”: pasos completos (izq), medios pasos (der).  
(Fuente: A4988 data sheet)

Mientras en mayores resoluciones el decaimiento de la corriente puede llegar a un 9.8% de la corriente máxima.

Es importante regular la corriente que se entrega al motor para evitar problemas como pérdida de pasos o incluso que el motor se recaliente o se quemé. Entre las causas de pérdida de pasos están:

- Baja corriente
- Bajo voltaje
- Alta velocidad
- Exceso de carga

La tercera opción no se presenta en nuestro prototipo pues las velocidades de funcionamiento son muy bajas para provocar pérdida de pasos.

Pero la corriente es necesario regular pues aunque bajas corrientes provoquen pérdidas de pasos, una corriente elevada es más peligroso pues se puede recalentar e incluso quemar el motor.

Para esto, el fabricante del driver en su ficha técnica proporciona una fórmula para la corriente límite que es:

$$I_{m\acute{a}x} = \frac{V_{REF}}{(8 * R_S)} \quad (31)$$

Donde:

$V_{REF}$  = Voltaje de entrada en el pin REF del driver

$R_S$  = Resistencia de sensibilidad =  $0.1\Omega$

El valor de voltaje en el pin REF se debe calibrar a través de un tornillo con el fin de limitar la corriente máxima. El motor seleccionado funciona con una corriente nominal de 1.68A por lo que este será el valor límite que debe entregar el driver.

$$V_{REF} = I_{m\acute{a}x} * 8 * R_S \quad (32)$$

$$V_{REF} = 1.68 * 8 * 0.1$$

$$V_{REF} = 1.3 V$$

Este valor del voltaje es el que se debe calibrar en el pin REF a través del tornillo con ayuda de un voltímetro colocando la punta común en la tierra del driver y la punta positiva en el pin REF.

En la Figura 2.42 se muestra el driver A4988.



Figura 2.42. Driver Pololu A4988.  
(Fuente: Propia)

#### 2.4.3.5. Fuente de poder

La fuente de poder se selecciona con base en los requerimientos de energía de los componentes del prototipo como la tarjeta de control, el motor de pasos y la resistencia de calentamiento. Todos estos elementos pueden trabajar con 12V, por esta razón se utiliza una fuente de 12V que se muestra en la Figura 2.43.



Figura 2.43. Fuente 12V.  
(Fuente: Propia)

Una vez que se ha realizado el diseño y selección de los componentes del prototipo de extrusor se presenta el esquema de diseño en la Figura 2.44

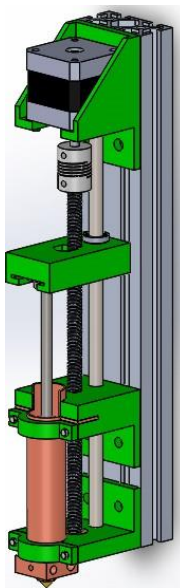


Figura 2.44. Diseño del prototipo de extrusor de cera.  
(Fuente: Propia)

## 2.5. Construcción de los componentes del prototipo

En este punto se detalla la construcción y el ensamble de los componentes del prototipo.

La lista de componentes se presenta en la Tabla 2.23.

Tabla 2.23. Lista de componentes del prototipo.

COMPONENTE	MATERIAL	CANTIDAD	CONSTRUIR/ SELECCIONAR
<b>MECÁNICOS</b>			
Cilindro	Cobre	1	C
Calefactor	Bronce	1	C
Émbolo	Aluminio	1	C
Soporte Cilindro 1	PLA	1	C
Soporte Cilindro 2	PLA	1	C
Soporte Émbolo	PLA	1	C
Soporte Motor	PLA	1	C
Abrazadera	PLA	2	C
Cojinete de deslizamiento	Bronce	1	C
Varilla roscada M8x1.25	-	1	S
Tuerca M8x1.25	-	1	S
Varilla lisa 8mm	-	1	S
Rodamiento lineal LM8UU	-	1	S
Acople flexible 5-8	-	1	S
Tornillo M3x0.5x50	-	4	S
Tornillo M3x0.5x13	-	4	S
Tuerca M3x0.5	-	8	S
Perfil estructural	Aluminio	1	S
Perno allen para perfil	-	6	S
Prisioneros M4x0.7x4	-	2	S
Prisioneros M4x0.7x6	-	4	S
Empaques	Caucho	2	S
<b>ELÉCTRICOS/ELECTRÓNICOS</b>			
Arduino UNO	-	1	S
Driver A4988	-	1	S
Capacitor 100µF 50V	-	1	S
Resistencia eléctrica	-	1	S
Termostato W1209	-	1	S
Fuente ATX	-	1	S
Cables eléctricos	-	-	S
Cable USB	-	1	S

(Fuente: Propia)

La descripción del proceso de construcción de los componentes mecánicos del prototipo se divide en dos grupos: el sistema de extrusión y los elementos de soporte.

### 2.5.1. Sistema de extrusión

El sistema de extrusión consta de los siguientes elementos a ser construidos: cilindro, calefactor y émbolo.

El cilindro es construido a partir de tubería de cobre de 3/4" y platina de 1,5mm de espesor. El proceso comprende el corte de la tubería en la forma indicada en el diseño y posteriormente el refrentado de sus caras; el corte de la platina y la unión con el cilindro mediante soldadura.

El calefactor es construido a partir de una barra cuadrada de bronce de 1". Se realiza el refrentado de las caras y se realiza en torno la guía para insertar el cilindro y la perforación central en la que posteriormente se realiza la rosca con un machuelo para colocar la boquilla. Dos agujeros pasantes laterales realizados con un taladro de pedestal donde se colocarán la resistencia eléctrica y el sensor de temperatura y con agujeros roscados para ajuste por medio de prisioneros. El cilindro se inserta en el agujero como guía para asegurar concentricidad y facilitar la soldadura. Finalmente se realiza actividades de acabado. El émbolo se lo fabrica a partir de una barra de acero de transmisión mediante mecanizado por torno.

En la Figura 2.45 se resumen las actividades de mecanizado de las partes.

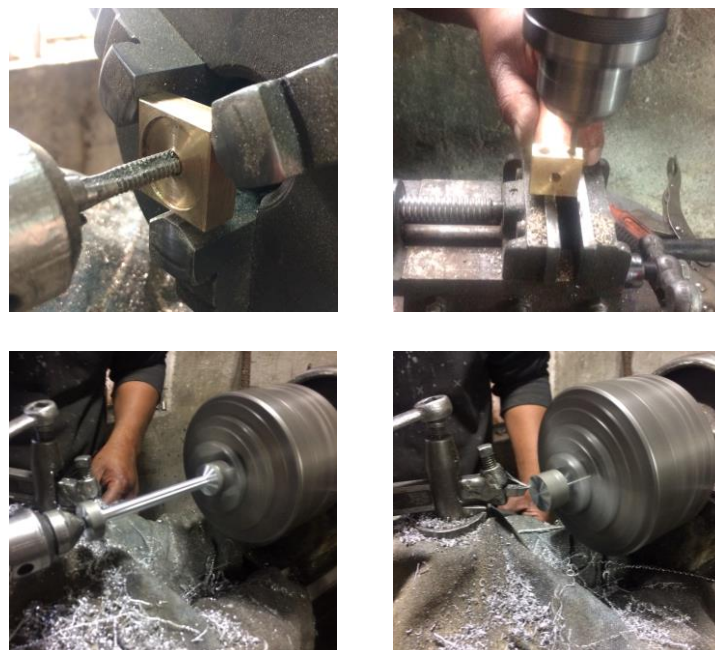


Figura 2.45. Construcción del calefactor y émbolo.  
(Fuente: Propia)

### 2.5.2. Piezas de soporte

Los elementos de soporte del extrusor, al tener geometrías complejas y no ser sometidos a grandes esfuerzos, se decide fabricarlos mediante el proceso de modelado por deposición fundida FDM en una impresora 3D. Estos componentes son:

- Soporte del cilindro 1
- Soporte del cilindro 2
- Soporte del émbolo
- Soporte del motor
- Abrazaderas

La impresora utilizada es la ULTIMAKER ORIGINAL+ y de acuerdo con sus especificaciones que se pueden encontrar en su página web [36], presenta las siguientes características:

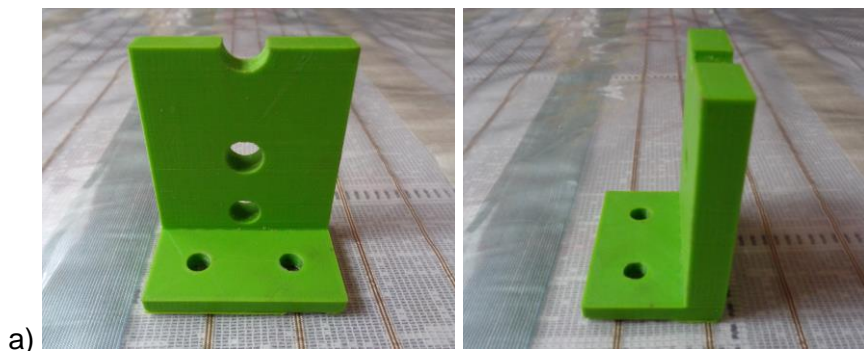
- Resolución desde 0,2mm hasta 0,02mm
- Material PLA, ABS, CPE
- Velocidad de inyección de hasta 8mm<sup>3</sup>/s
- Espacio de impresión de 210 x 210 x 205mm

Para la fabricación de estas piezas de soporte se parte del diseño en software CAD de cada una de las piezas, posterior a esto se las convierte a un archivo de formato STL y se imprime utilizando PLA como material.

Uno de los inconvenientes de utilizar esta tecnología es la restricción en el tamaño de los elementos que se pueden fabricar, pues como se mencionó anteriormente, el espacio de impresión es de 210mm x 210mm x 205mm.

Los elementos que van a ser fabricados no exceden los 100mm por lo que esto no representa un problema para el desarrollo del presente trabajo.

En la Figura 2.46 se





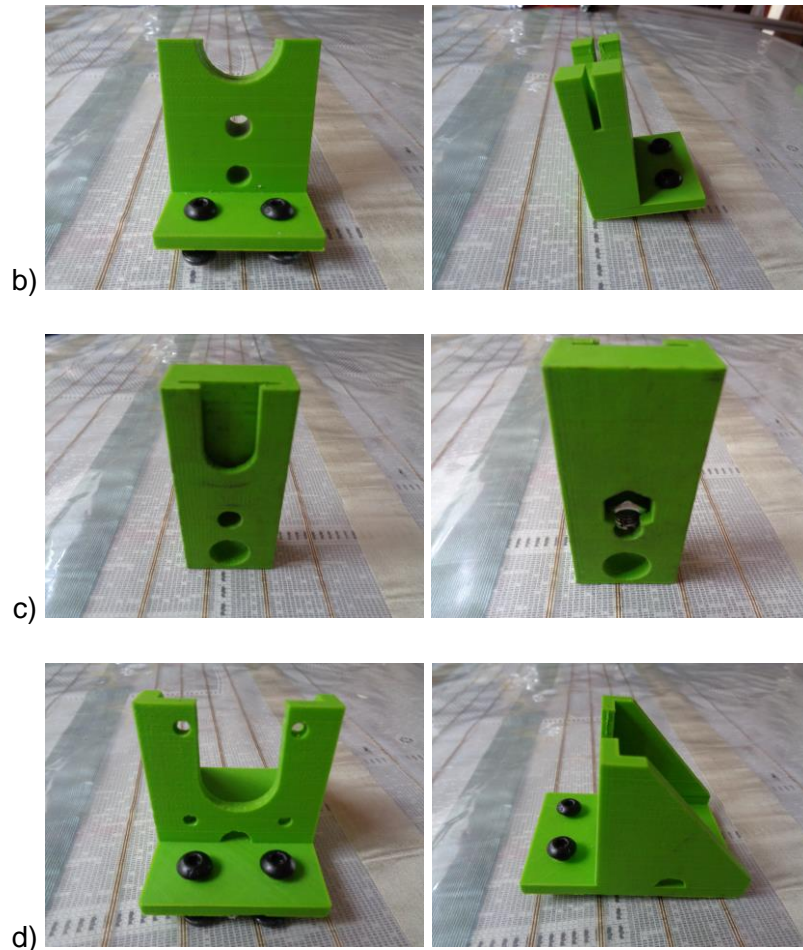


Figura 2.46. Piezas de soporte: a) Soporte del cilindro 1 b) Soporte del cilindro 2 c) Soporte del émbolo d) Soporte del motor.  
(Fuente: Propia)

## 2.6. Ensamble del prototipo

En esta sección se describe el procedimiento seguido para ensamblar el prototipo de extrusor para cera de fundición. Primero se describe el ensamble de los elementos mecánicos y luego el ensamble del sistema de control y potencia.

### 2.6.1. Ensamble de elementos mecánicos

Todo el conjunto será montado sobre un riel de aluminio que además de soportar todo el sistema, servirá para una correcta alineación de todas las piezas de soporte.

Sobre este riel se colocan las dos piezas de soporte del cilindro y la pieza de soporte del motor de pasos. La sujeción se realiza por medio de pernos.

En la Figura 2.47 se puede observar el montaje de las piezas de soporte sobre el perfil estructural de aluminio.



Figura 2.47. Piezas de soporte montadas sobre el riel.  
(Fuente: Propia)

La alineación de las piezas es importante para el desplazamiento adecuado del émbolo.

Se coloca el rodamiento lineal LM8UU en la pieza de soporte del émbolo, en esta pieza también se inserta la tuerca que permitirá el movimiento del émbolo con el tornillo de potencia.

Se inserta la varilla lisa a través del agujero inferior de todas las piezas de soporte y el tornillo de potencia a través del agujero superior. El tornillo de potencia debe ser insertado a través de la tuerca colocada en la pieza de soporte del émbolo.



Figura 2.48. Montaje de motor, guía y tornillo de potencia.  
(Fuente: Propia)

Se coloca el cilindro sobre las piezas de soporte deslizando la aleta del mismo por la ranura de la pieza posterior. El motor se coloca sobre su soporte y se lo sujeta con pernos M3 con tuercas.

Se coloca los empaques en las ranuras del émbolo, y se ubica el émbolo sobre su pieza de soporte haciendo deslizar la parte posterior sobre la ranura

Finalmente se utiliza el acople flexible para la unión entre el eje del motor de pasos y el tornillo de potencia y se ajusta los prisioneros.

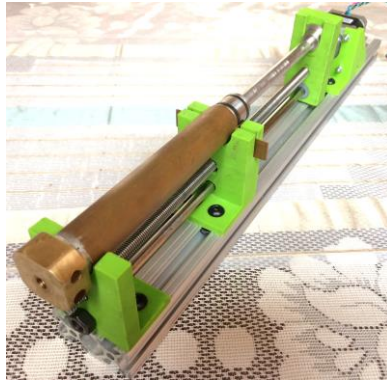


Figura 2.49. Ensamble del cilindro y émbolo con la estructura de soporte.  
(Fuente: Propia)

#### 2.6.1.1. Ensamble del control

Como se mencionó anteriormente el control consta de una parte encargada del calentamiento y otra encargada del movimiento del émbolo pero todo será controlado por medio de la tarjeta Arduino UNO.

La tarjeta Arduino UNO estará conectada mediante puerto USB a la computadora, pues el manejo y envío de órdenes serán realizadas desde el monitor serial del software de Arduino. Además este cable USB alimenta con 5V a la tarjeta de control.

Para el proceso de calentamiento del bloque calefactor se coloca la resistencia eléctrica en el alojamiento del calefactor y para controlar la temperatura se inserta el sensor de temperatura de igual manera en el bloque calefactor.

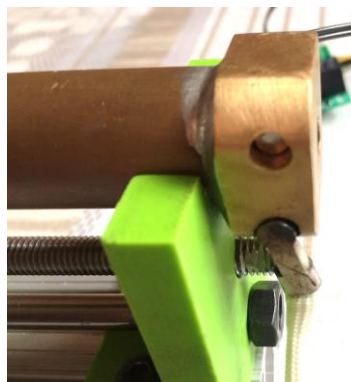


Figura 2.50. Resistencia eléctrica y sensor de temperatura en el bloque calefactor.  
(Fuente: Propia)

Todo el circuito de control será colocado en el interior de una caja (Figura 2.51), la cual tendrá los bornes de conexión de los elementos externos como la resistencia eléctrica de calentamiento, el sensor de temperatura, el motor de pasos y la fuente de poder. En el interior se encuentra la tarjeta de control Arduino UNO, el driver del motor A4988 y el circuito de conexión del control.

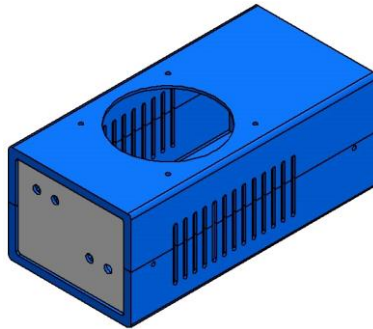


Figura 2.51. Caja de control.  
(Fuente: Propia)

La conexión de los elementos de control, sensores y actuadores se muestran en la Figura 2.52.

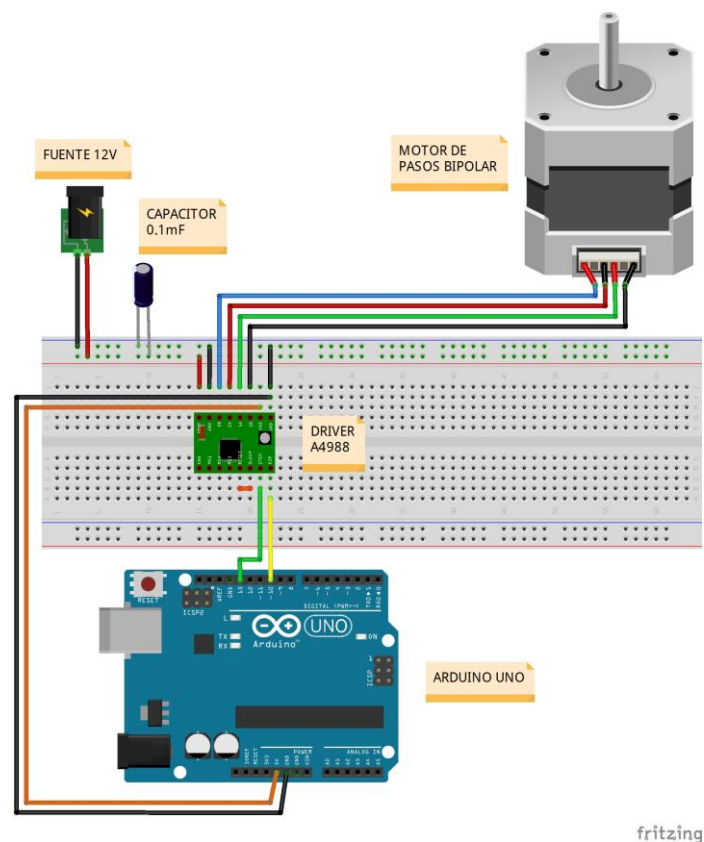


Figura 2.52. Esquema de conexión.  
(Fuente: Propia)

## 2.7. Protocolo de pruebas

Es necesario comprobar que el prototipo construido funcione adecuadamente, es decir, que sea capaz de extrudir cera de fundición. Para esto se establece el siguiente protocolo de pruebas.

### 2.7.1. Preparación de la cera

Se dispone de tres tipos de cera, pero no fue posible conseguir mayor información de ellas. La primera es una cera utilizada en joyería, y está elaborada en base a savia de látex, es de color rojo. La segunda es una cera Wax Wire Spool 115308 de marca Freeman, de color azul. La tercera es cera parafina, de color blanco. Las fichas técnicas se encuentran en el Anexo A3.



Figura 2.53. Ceras: a) “Cera de savia de látex, b) Cera 115308, c) Cera parafina.  
(Fuente: Propia)

Al no conocer todas las propiedades de las ceras, no se puede establecer las mezclas con base en ellas, por lo cual las mezclas se las realiza como se muestra en la Tabla 2.24 y a partir de los resultados se establece las mezclas más adecuadas.

Tabla 2.24. Porcentaje en peso de las mezclas de ceras.

MEZCLA	% CERA EN BASE A SAVIA DE LATEX	% CERA PARAFINA	% CERA 115308
1	100	-	-
2	50	50	-
3	-	100	-
4	50	-	50
5	-	-	100

(Fuente: Propia)

Se procede a obtener las cantidades de cera para cada una de las mezclas con ayuda de una balanza digital cuya apreciación es de 1 gramo, Figura 2.54.

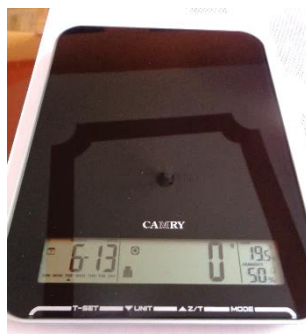


Figura 2.54. Balanza digital.  
(Fuente: Propia)

Una vez obtenidas las cantidades de cera se procede a fundirlas para producir tochos para realizar las pruebas de extrusión. Se utiliza pedazos de tubería como moldes para la obtención de los tochos de cera.

### **2.7.2. Pruebas de funcionamiento**

Para comprobar un funcionamiento correcto primero se verifica que no existan errores en el código de programación, luego se realizan pruebas en vacío y por último se procede con las pruebas con cera.

#### **Código de programación:**

Una vez compilado y cargado el programa al Arduino se comprueba el accionamiento adecuado del motor de pasos. Para esto se conecta la fuente de poder y se corre el programa; el motor no está montado en el prototipo para evitar algún daño por algún error de código.

De igual forma se comprueba el control de temperatura con la resistencia eléctrica y el sensor pt100 colocados en el bloque calefactor. Con un sensor infrarrojo se verifica que las lecturas de temperatura del sensor sean correctas.

#### **Prueba en vacío:**

Para estas pruebas el prototipo debe ser ensamblado completamente. Se verifica que el motor mueva el conjunto émbolo-pieza de soporte y que este movimiento sea suave y sin trabarse.

#### **Prueba con carga y calibración**

Para esta prueba se utiliza la cera en base a savia de látex y se hace funcionar el extrusor con el fin de determinar una velocidad adecuada de extrusión y una temperatura suficiente para que el tocho se ablande y pueda ser extruido por la boquilla.

Se empieza con una velocidad de 30rpm o 0,5rps que representa un avance de 0,625mm/s, y una temperatura de 64°C. Con base en el resultado se varía estas condiciones aumentando o disminuyendo la velocidad y la temperatura.

Se realiza esta prueba hasta obtener los parámetros para una extrusión adecuada de la cera.

### 2.7.3. Pruebas de impresión

Una vez que el equipo está calibrado, se procede a realizar una prueba de impresión de una pequeña figura sencilla tridimensional.

Para facilitar esta prueba se va a fabricar un cilindro de una sola capa de espesor y para realizarlo es necesario fabricar una mesa giratoria sobre la cual será depositado el material extruido.

El extrusor será acoplado a la estructura de una impresora ILIOS a través de la cual se controlará el movimiento vertical del prototipo; mientras que la mesa giratoria será colocada en la parte inferior de tal forma que la boquilla de extrusión se encuentre excéntrica con la mesa y así conseguir que se deposite el material formando una circunferencia en cada vuelta de la mesa, tal como se muestra en la Figura 2.55.

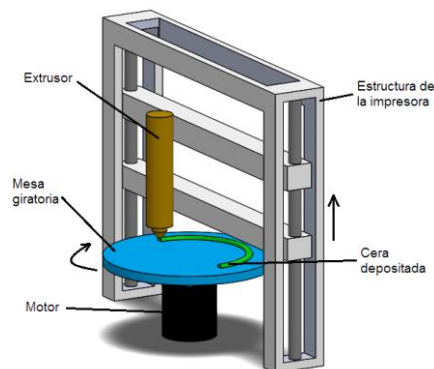


Figura 2.55. Esquema del montaje para la prueba de impresión.  
(Fuente: Propia)

El prototipo será adaptado a la estructura de la impresora, y esta será la que realiza el movimiento vertical, el cual se controla manualmente por medio del teclado de la computadora que posee el software de funcionamiento de la impresora.

Estas pruebas de impresión se realizarán con las mezclas de cera con el fin de observar qué mezcla brinda los mejores resultados. De ser necesario, se realizarán ajustes en la temperatura para cada mezcla.

El procedimiento para las pruebas de impresión es el siguiente:

- Activar el extrusor para que se empiece a calentar.
- Encender la mesa giratoria y establecer una velocidad de giro.
- Colocar la boquilla de extrusión a la altura adecuada para iniciar la impresión por medio de las teclas de dirección del teclado.
- Colocar el tocho de cera.
- Esperar que el extrusor se caliente y el tocho de cera se ablande para que esté listo para trabajar.
- Empezar la extrusión y controlar el movimiento de la impresora con la mesa girando
- Extrudir al menos 2 capas de cera
- Parar todo
- Observar resultado
- Si la deposición no es adecuada regular velocidad de giro y repetir el procedimiento
- Una vez obtenida una buena deposición de cera realizar la impresión del cilindro
- Registrar fotográficamente los resultados

## 2.8. Repotenciación del diseño

Una vez realizadas las pruebas de extrusión se pudo conocer algunos puntos a ser mejorados en cuanto al diseño del prototipo. Esta repotenciación del diseño se la realizó luego de las pruebas con carga y calibración del extrusor descritas en la sección anterior.

Uno de los primeros puntos a mejorar del diseño tiene que ver con el movimiento del émbolo. Durante las pruebas se vio la necesidad de utilizar doble guía con el propósito de asegurar de mejor manera un movimiento sin desviaciones y minimizar la posibilidad de que se produzca algún atascamiento y su consecuente sobrecarga del motor. El nuevo diseño se muestra en la Figura 2.56.

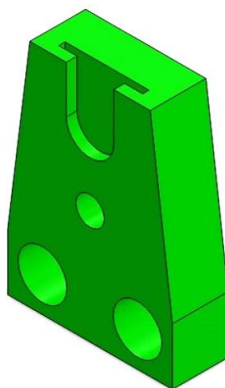


Figura 2.56. Nuevo diseño para dos guías.  
(Fuente: Propia)



El segundo punto a mejorar es el diseño de las piezas de soporte; en primer lugar para dar cabida a las dos guías, y el siguiente cambio fue agregar unas nervaduras a los costados con el fin de evitar deflexiones por efecto de la fuerza de extrusión, como se muestra en la Figura 2.57.

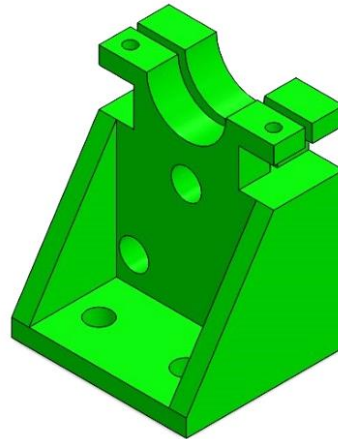


Figura 2.57. Nuevo diseño de los soportes con nervaduras.  
(Fuente: Propia)

Finalmente se agregó un cojinete de deslizamiento en el extremo final del tornillo de potencia (Figura 2.58). Se seleccionó el cojinete sobre un rodamiento debido a que las velocidades de giro son bastante bajas y no está sometido a grandes solicitaciones mecánicas. Este cojinete será de bronce debido a su bajo coeficiente de rozamiento con el acero.

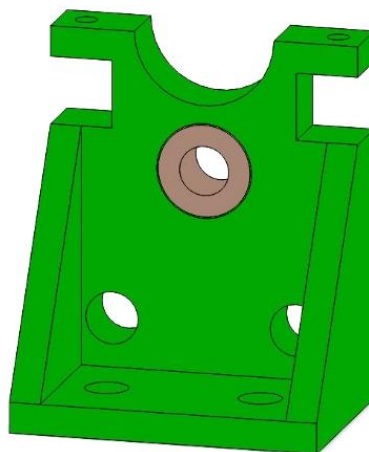


Figura 2.58. Nuevo diseño con cojinete de deslizamiento para el tornillo de potencia.  
(Fuente: Propia)

El diseño final se presenta en la Figura 2.59.

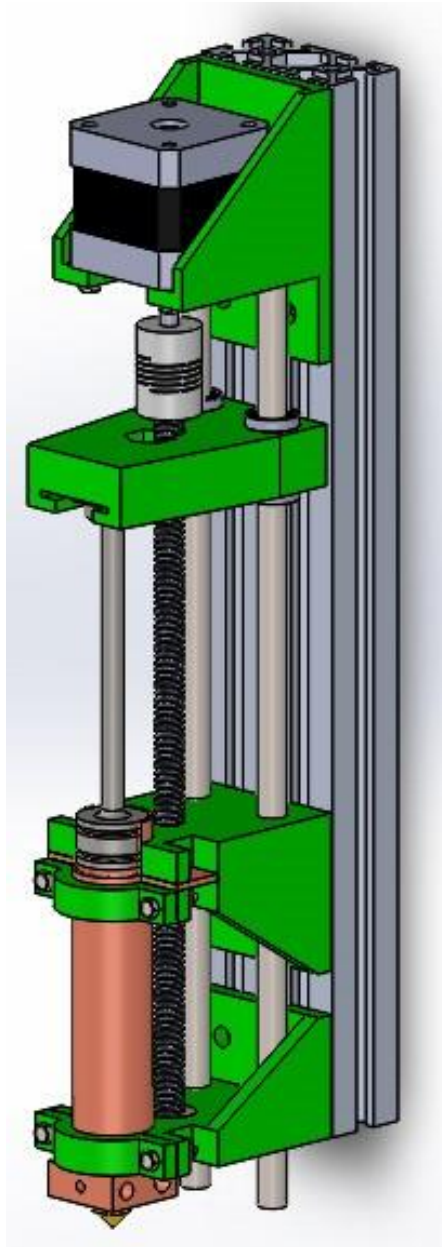


Figura 2.59. Diseño final del prototipo extrusor de cera.  
(Fuente: Propia)

Se procede a la construcción y ensamble del nuevo prototipo siguiendo el procedimiento ya descrito en las secciones anteriores, y se realiza todo el protocolo de pruebas. Desde las pruebas de funcionamiento, las pruebas con las mezclas de ceras y la prueba de impresión con la mezcla seleccionada.

Los resultados de las pruebas realizadas se presentan en el siguiente capítulo.

## **2.9. Diseño de detalle**

Una vez que se comprueba el correcto funcionamiento del prototipo se procede a realizar los planos de conjunto y despiece del mismo. El resultado de lo realizado en esta etapa se presenta en los planos de cada una de las piezas diseñadas que se encuentran en el Anexo C.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los registros fotográficos de las pruebas realizadas y los datos de las condiciones establecidas para cada una de dichas pruebas. Adicionalmente se realiza un análisis cuantitativo de los resultados por medio de inspección visual para determinar los mejores resultados obtenidos.

#### 3.1. Resultados

##### 3.1.1. Preparación de las ceras

Como se mencionó en el protocolo de pruebas se prepara las ceras en forma de tochos de cada una de las mezclas.

Se realizó cada mezcla con 20g de cera, por lo que para las mezclas 50-50 se utilizó 10g de cada tipo de cera.

Para esto se utilizó una balanza digital con una apreciación de 1g. para las cantidades de cada cera; y se utilizó un recipiente metálico y una estufa eléctrica para la fundición de las mezclas.



Figura 3.1. Fundición de la mezcla 1 (100% cera en base de savia de látex).  
(Fuente: Propia)

De cada mezcla se realizaron tochos utilizando como molde pedazos de tubería.



Figura 3.2. Elaboración de tochos de cera.  
(Fuente: Propia)

Finalmente se desmolda los tochos



Figura 3.3. Tochos: a) cera de savia de látex, b) cera 115308, c) cera parafina.  
(Fuente: Propia)

### 3.1.2. Pruebas de funcionamiento

Se siguió el procedimiento descrito en el protocolo para comprobar el correcto funcionamiento del prototipo.

Se verificó que el código no presenta errores y que las órdenes enviadas son realizadas correctamente tanto por el motor como por la resistencia eléctrica. El motor gira en el sentido y a la velocidad que se ingresa en el monitor serial. Esto se comprobó tomando el tiempo que tarda en dar un número de vueltas.

La resistencia eléctrica enciende hasta alcanzar una temperatura 1°C por encima de la temperatura ingresada y se mantiene apagada hasta que la temperatura descienda de la temperatura ingresada. Por medio de un termómetro con una termocupla tipo K se comprobó que lectura por parte del sensor sea correcta.

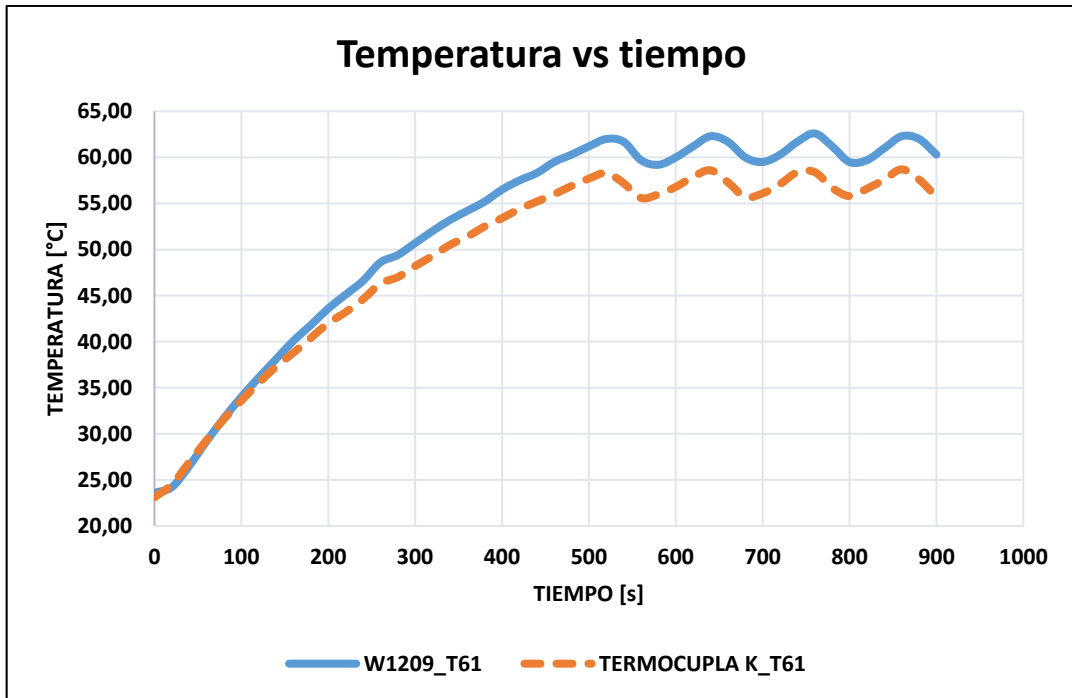
Tabla 3.1. Datos de temperatura vs tiempo: W1209 vs termocupla.

TEMPERATURA [°C]							TIEMPO [s]
W1209	TERMOCUPLA K	W1209	TERMOCUPLA K	W1209	TERMOCUPLA K		
T <sub>SET</sub> = 61°C		T <sub>SET</sub> = 58°C		T <sub>SET</sub> = 64°C			
23,60	23,10	23,70	23,50	23,50	23,20	0	
24,20	24,50	24,30	25,30	24,10	25,00	20	
26,50	26,90	26,50	28,00	26,80	28,10	40	
29,20	29,30	29,20	30,60	30,40	29,30	60	
31,70	31,60	31,70	33,10	31,70	32,70	80	
34,00	33,60	34,00	35,20	34,00	35,00	100	
36,10	35,50	36,00	37,30	36,10	36,90	120	

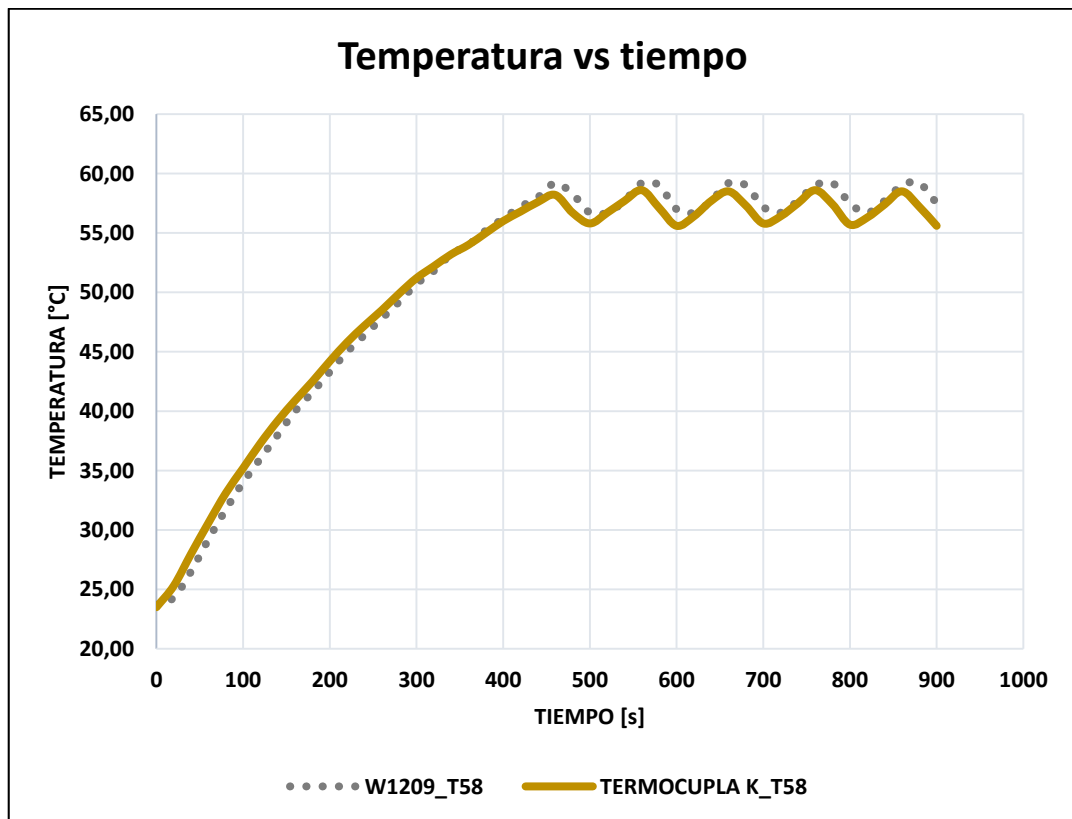
38,10	37,30	38,00	39,20	38,00	38,80	140
40,10	38,80	40,00	40,90	40,00	40,50	160
41,80	40,40	41,60	42,50	41,60	42,20	180
43,60	42,00	43,30	44,20	43,50	43,80	200
45,10	43,20	45,00	45,80	45,00	45,40	220
46,60	44,60	46,40	47,20	46,40	46,80	240
48,60	46,30	47,80	48,50	48,00	48,20	260
49,40	47,00	49,20	49,90	49,20	49,50	280
50,70	48,20	50,70	51,20	50,50	50,60	300
52,00	49,30	51,80	52,20	51,80	51,80	320
53,20	50,50	53,20	53,20	53,00	52,80	340
54,20	51,40	54,00	54,00	54,20	54,00	360
55,20	52,50	55,20	55,00	55,20	54,90	380
56,50	53,40	56,20	56,00	56,20	55,90	400
57,50	54,40	57,20	56,80	57,20	56,80	420
58,30	55,20	58,00	57,60	58,30	57,70	440
59,50	56,00	59,20	58,20	59,20	58,60	460
60,30	56,90	58,30	56,70	60,30	59,50	480
61,20	57,70	56,70	55,80	61,20	60,20	500
62,00	58,30	56,70	56,70	62,00	61,00	520
61,70	57,20	57,70	57,70	63,00	61,80	540
59,70	55,60	59,20	58,60	63,60	62,50	560
59,20	56,00	59,00	57,10	64,20	63,20	580
60,00	56,80	57,00	55,60	65,00	63,80	600
61,20	57,90	56,70	56,40	64,70	62,30	620
62,30	58,60	57,70	57,70	63,00	60,40	640
61,70	57,30	59,20	58,50	62,00	60,90	660
60,00	55,70	59,00	57,30	62,60	61,80	680
59,50	56,10	57,20	55,80	64,00	62,70	700
60,30	57,10	56,70	56,40	64,70	63,60	720
61,70	58,40	57,70	57,50	65,00	63,20	740
62,60	58,40	59,00	58,60	64,00	61,10	760
61,20	56,70	59,20	57,40	62,00	60,80	780
59,50	55,80	57,50	55,70	62,60	61,70	800
59,70	56,60	56,70	56,30	63,60	62,60	820
61,00	57,60	57,70	57,40	64,50	63,50	840
62,30	58,70	59,00	58,50	65,30	63,60	860
62,00	57,60	59,20	57,20	64,20	61,70	880
60,30	55,70	57,50	55,60	62,30	60,60	900

(Fuente: Propia)

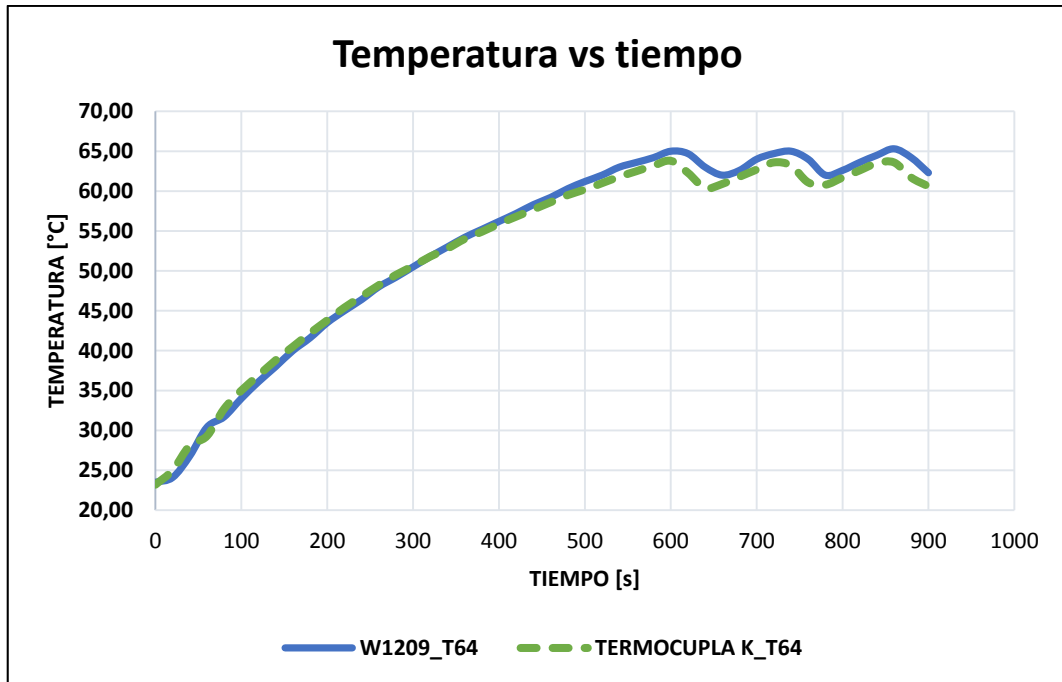
A partir de los datos presentados en la Tabla 3.1 se obtienen las siguientes gráficas:



Gráfica 3.1. Temperatura vs tiempo: W1209 vs termocupla,  $T_{SET} = 61^{\circ}C$   
(Fuente: Propia)



Gráfica 3.2. Temperatura vs tiempo: W1209 vs termocupla,  $T_{SET} = 58^{\circ}C$   
(Fuente: Propia)



Gráfica 3.3. Temperatura vs tiempo: W1209 vs termocupla,  $T_{SET} = 64^{\circ}C$   
(Fuente: Propia)

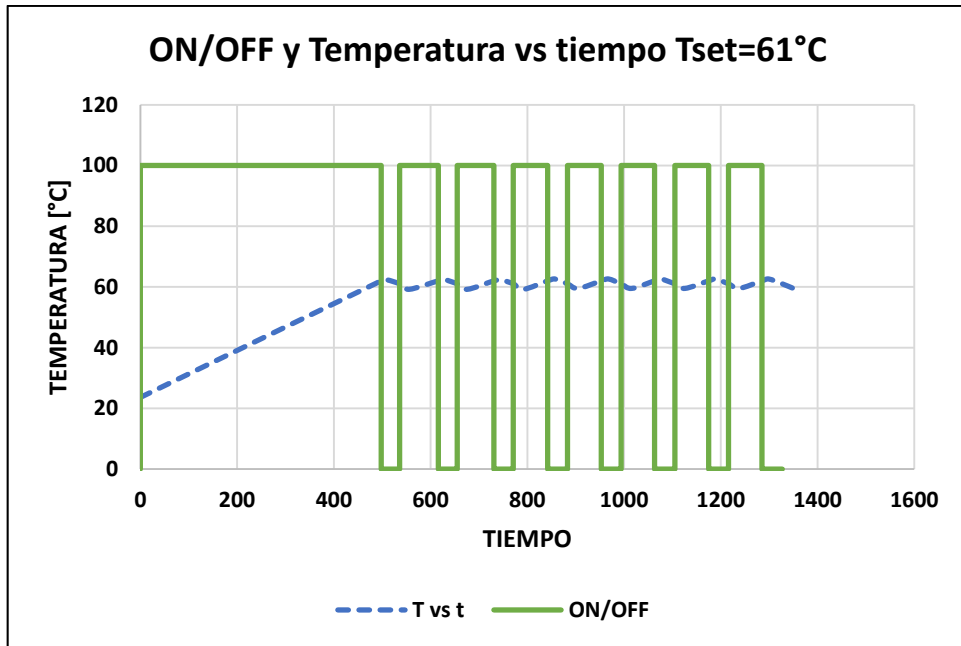
Además se tomó datos del tiempo de encendido y apagado de la resistencia eléctrica, bajo diferentes ajustes de temperaturas y se presentan de la Tabla 3.2 a la Tabla 3.4

Tabla 3.2. Datos de encendido/apagado:  $T_{SET} = 61^{\circ}C$ .

$T_{INICIAL} [^{\circ}C] = 23,6$	$T_{SET} [^{\circ}C] = 61$
Tiempo [s]	Estado
0	ON
498	OFF
536	ON
616	OFF
655	ON
731	OFF
771	ON
842	OFF
883	ON
953	OFF
994	ON
1063	OFF
1105	ON
1175	OFF
1216	ON
1285	OFF

(Fuente: Propia)



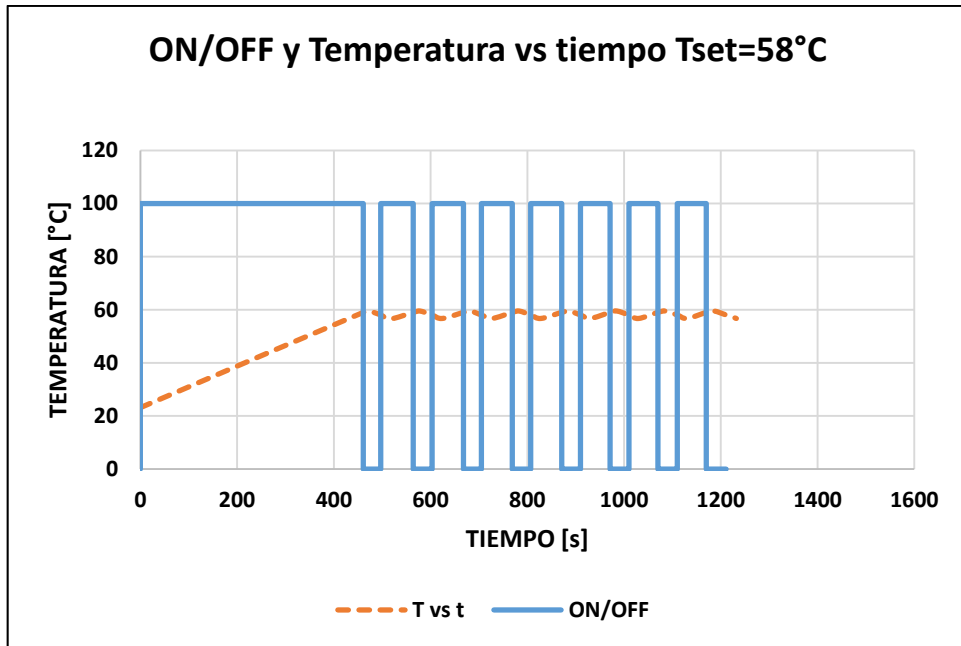


Gráfica 3.4. Encendido/apagado vs tiempo:  $T_{SET} = 61^{\circ}\text{C}$   
(Fuente: Propia)

Tabla 3.3. Datos de encendido/apagado:  $T_{SET} = 58^{\circ}\text{C}$ .

$T_{INICIAL} [^{\circ}\text{C}] = 23,6$	$T_{SET} [^{\circ}\text{C}] = 58$
Tiempo [s]	Estado
0	ON
461	OFF
497	ON
564	OFF
603	ON
668	OFF
705	ON
769	OFF
807	ON
871	OFF
910	ON
971	OFF
1010	ON
1070	OFF
1110	ON
1170	OFF

(Fuente: Propia)

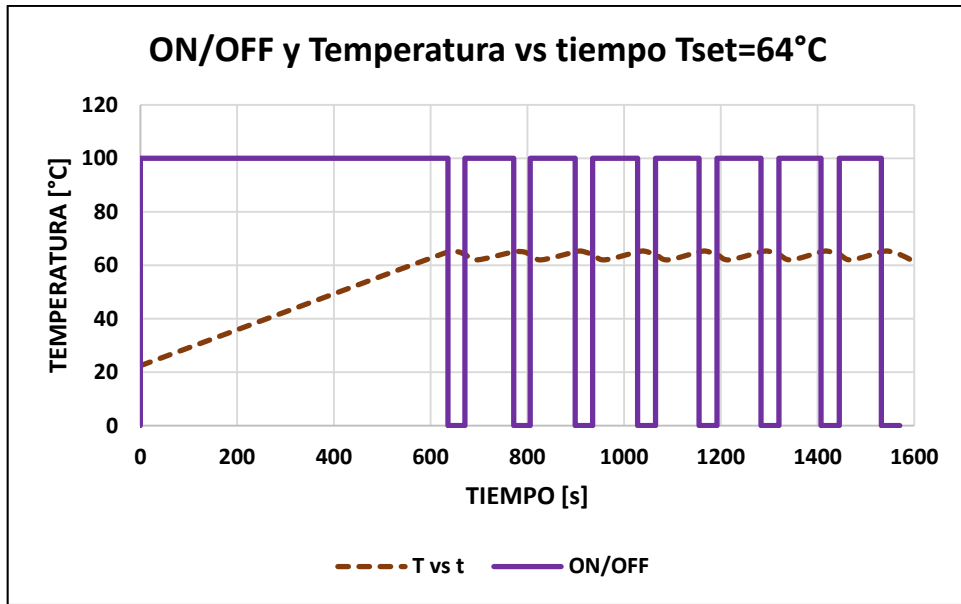


Gráfica 3.5. Encendido/apagado vs tiempo:  $T_{SET} = 58^{\circ}\text{C}$   
(Fuente: Propia)

Tabla 3.4. Datos de encendido/apagado:  $T_{SET} = 64^{\circ}\text{C}$ .

$T_{INICIAL} [^{\circ}\text{C}] = 23,6$	$T_{SET} [^{\circ}\text{C}] = 64$
Tiempo [s]	Estado
0	ON
636	OFF
671	ON
772	OFF
806	ON
899	OFF
935	ON
1028	OFF
1065	ON
1155	OFF
1192	ON
1283	OFF
1320	ON
1407	OFF
1445	ON
1532	OFF

(Fuente: Propia)



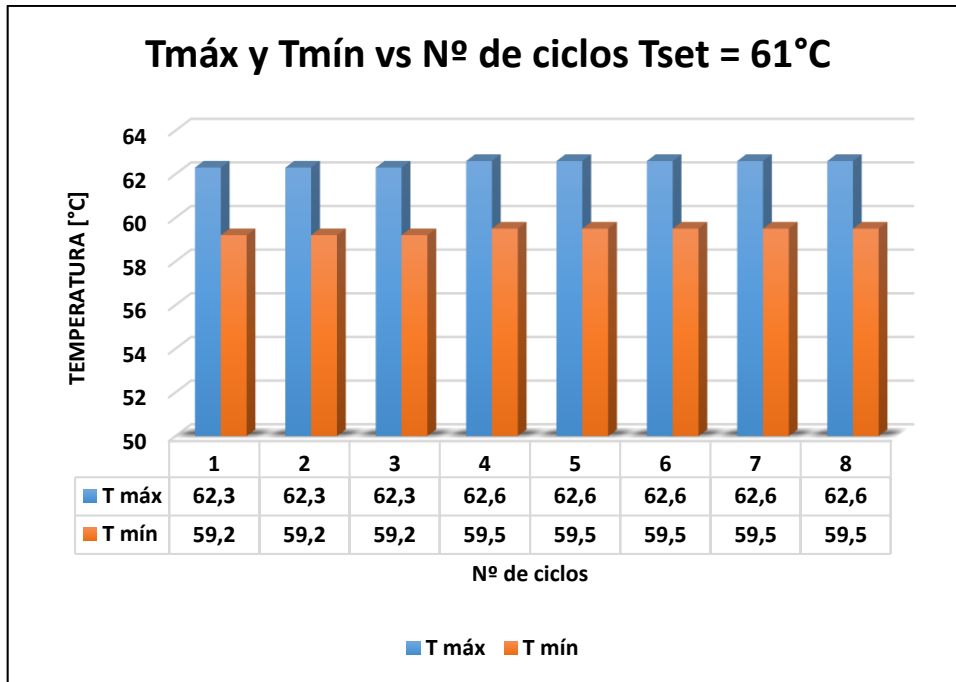
Gráfica 3.6. Encendido/apagado vs tiempo:  $T_{SET} = 64^{\circ}\text{C}$   
(Fuente: Propia)

Adicionalmente se tomaron datos de la temperatura máxima y mínima del rango en el que se encuentra oscilando la temperatura medida por el sensor en el interior del bloque calefactor, y el tiempo en el que se alcanzan estos valores límite.

Tabla 3.5. Temperatura máxima y mínima en cada ciclo:  $T_{SET} = 61^{\circ}\text{C}$ .

$T_{INICIAL} [^{\circ}\text{C}] = 23,6$		$T_{SET} [^{\circ}\text{C}] = 61$
Nº de ciclo	$T_{m\acute{a}x} [^{\circ}\text{C}]$	$T_{m\acute{i}n} [^{\circ}\text{C}]$
1	62,3	59,2
2	62,3	59,2
3	62,3	59,2
4	62,6	59,5
5	62,6	59,5
6	62,6	59,5
7	62,6	59,5
8	62,6	59,5

(Fuente: Propia)

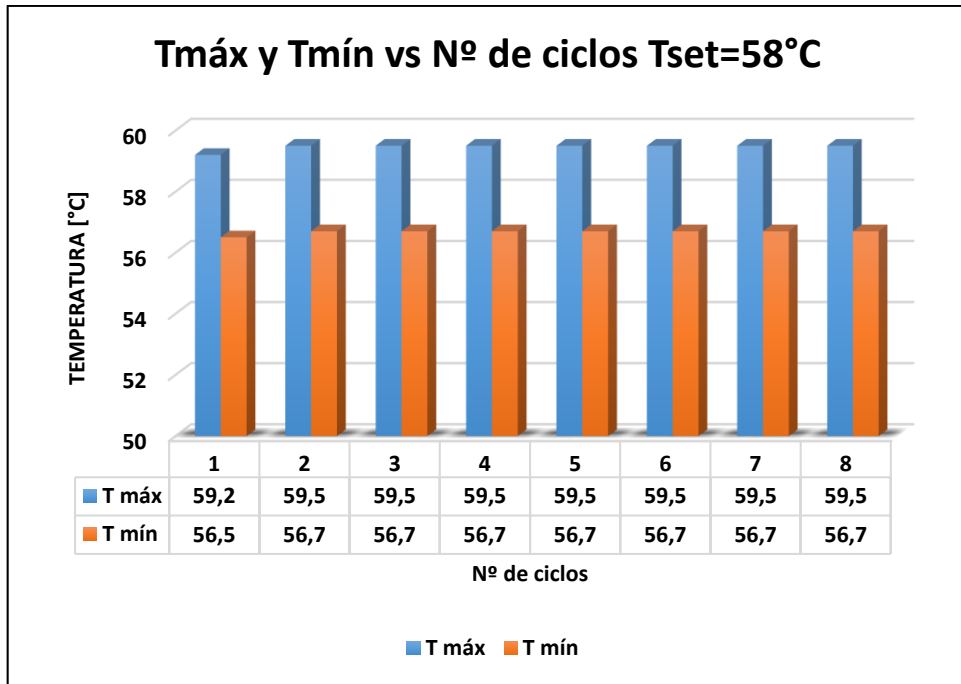


Gráfica 3.7. T<sub>máx</sub> y T<sub>mín</sub> vs N<sup>o</sup> de ciclos: T<sub>SET</sub> =61°C.  
(Fuente: Propia)

Tabla 3.6. Temperatura máxima y mínima en cada ciclo: T<sub>SET</sub> =58°C.

T <sub>INICIAL</sub> [°C] = 23,6		T <sub>SET</sub> [°C] = 58
N <sup>o</sup> de ciclo	T <sub>máx</sub> [°C]	T <sub>mín</sub> [°C]
1	59,2	56,5
2	59,5	56,7
3	59,5	56,7
4	59,5	56,7
5	59,5	56,7
6	59,5	56,7
7	59,5	56,7
8	59,5	56,7

(Fuente: Propia)

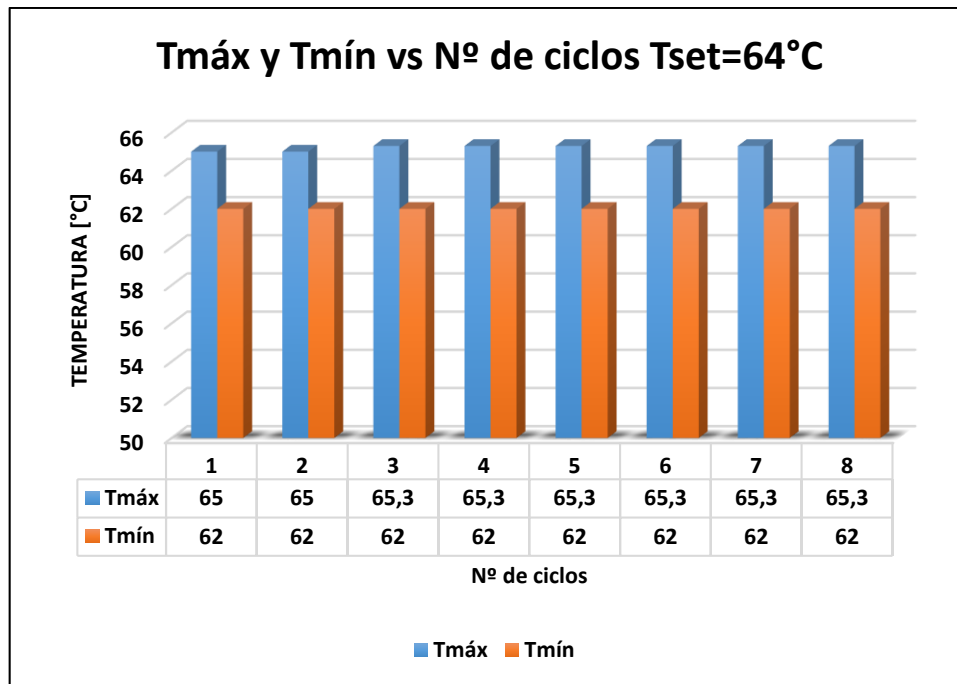


Gráfica 3.8. T<sub>máx</sub> y T<sub>mín</sub> vs N<sup>o</sup> de ciclos: T<sub>SET</sub> =58°C.  
(Fuente: Propia)

Tabla 3.7. Temperatura máxima y mínima en cada ciclo: T<sub>SET</sub> =64°C.

T <sub>INICIAL</sub> [°C] = 23,6		T <sub>SET</sub> [°C] = 64
Nº de ciclo	T <sub>máx</sub> [°C]	T <sub>mín</sub> [°C]
1	65	62
2	65	62
3	65,3	62
4	65,3	62
5	65,3	62
6	65,3	62
7	65,3	62
8	65,3	62

(Fuente: Propia)






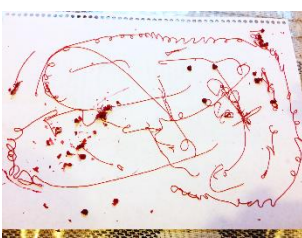

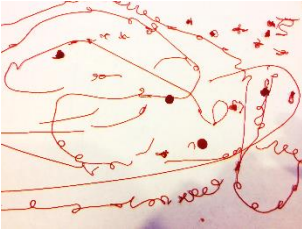
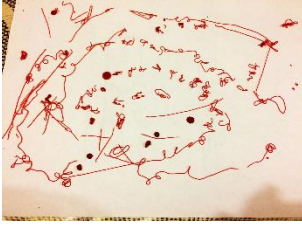
Gráfica 3.9. Tmáx y Tmín vs N° de ciclos: T<sub>SET</sub> =64°C.  
(Fuente: Propia)

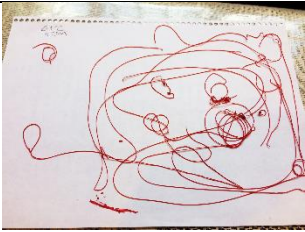
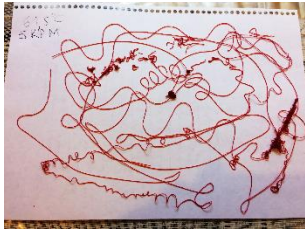
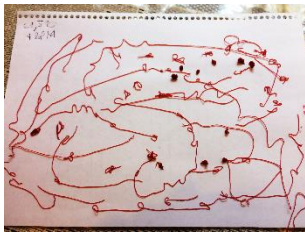
Posteriormente se realizaron las pruebas en vacío y con carga. La primera fue para comprobar que el movimiento del émbolo sea suave y que la alineación de las piezas sea correcta. Se probó diferentes velocidades de giro del motor, con una velocidad mínima de 2,5rpm y una máxima de 375rpm.

La segunda fue para comprobar que el torque del motor sea adecuado para la función destinada. Se probó diferentes temperaturas y velocidades del motor en la extrusión de la cera, utilizando para esto la cera de savia de látex. Los resultados se presentan a continuación.

Tabla 3.8. Calibración del prototipo extrusor.

TEMPERATURA DE EXTRUSIÓN [°C]	VELOCIDAD DEL MOTOR [RPM]	CALIDAD DE EXTRUSIÓN
64	30	

64	15	
64	7,5	
64	3	
63	7,5	
63	3	
62	7,5	
62	6	

61	5	
61,5	5	
61,5	4	

(Fuente: Propia)

### 3.1.3. Pruebas de impresión

Para la realización de estas pruebas fue necesario construir la mesa giratoria; la misma fue construida de madera y se la acopló a un motorreductor pues la velocidad de giro debe ser baja. Adicionalmente se realizó un circuito regulador para poder variar la velocidad de giro de la mesa. La mesa giratoria se muestra en la Figura 3.4.

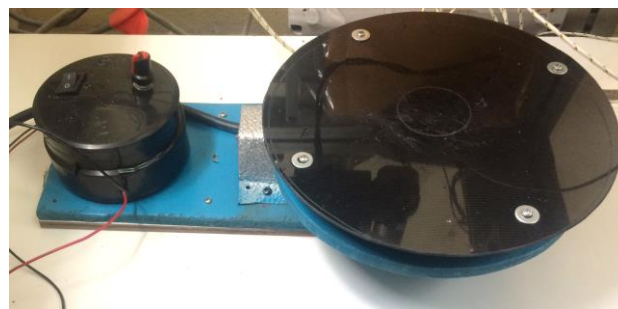


Figura 3.4. Mesa giratoria con circuito regulador de velocidad.  
(Fuente: Propia)

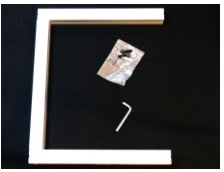

Se utilizó para la realización de estas pruebas, la impresora ILIOS 3D Printer que se encuentra en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional, la cual nos permite el movimiento vertical del prototipo con el fin de obtener una altura de capa.



El proceso de ensamble de la impresora se divide en tres grupos: la base o patas de la impresora, el marco superior y el sistema motriz

### 3.1.3.1. Ensamble de la base

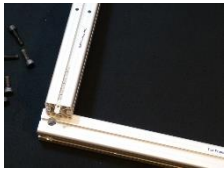



Tabla 3.9. Ensamble de la base.

ENSAMBLE DE LA BASE		
1	Insertar los pernos en los agujeros de cada pierna Conectar las piernas frontal izquierda y posterior izquierda con la pierna soporte y ajustar los pernos Hacer lo mismo con las piernas frontal derecha y posterior derecha con la otra pierna soporte	
2	Se recomienda colocar los pedestales de las piernas en este punto porque luego será más complicado por el peso del ensamble	

(Fuente: Propia)

### 3.1.3.2. Ensamble del marco superior


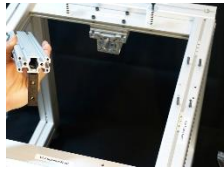


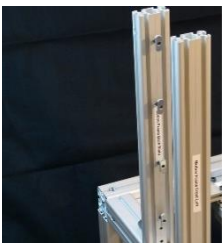

Tabla 3.10. Ensamble del marco superior.


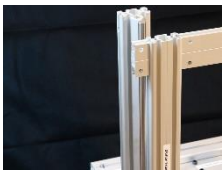


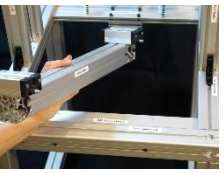


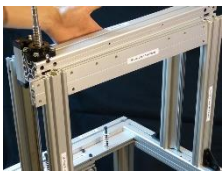

ENSAMBLE DEL MARCO SUPERIOR		
1	Insertar 4 tuercas ovaladas en las ranuras superiores (donde se encuentran las etiquetas) de los perfiles izquierdo y derecho del marco	
2	Ensamblar los perfiles del marco utilizando los pernos más cortos del kit	
3	Ensamblar el marco con las patas utilizando los pernos largos del kit	
4	Colocar las tapas de los perfiles del marco	


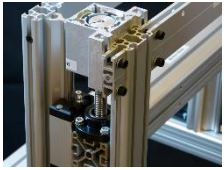

(Fuente: Propia)

### 3.1.3.3. Ensamble del sistema motriz

Tabla 3.11. Ensamble del sistema motriz.

ENSAMBLE DE LA PARTE MOTRIZ		
1	<p>Colocar los pernos más largos en los perfiles laterales del marco superior. Colocarlos desde abajo hacia arriba</p> <p>Dejar dos tuercas ovaladas de las ranuras del marco superior hacia la parte externa de la ubicación de los pernos como se observa en la imagen</p>	
2	<p>Unir los soportes de esquina a los perfiles del sistema motriz utilizando dos pernos y tuercas ovaladas</p>	
3	<p>Alinear los perfiles con los pernos del paso 1</p>	
4	<p>Sujetar el otro lado de los soportes de esquina al marco superior con los pernos y las tuercas ovaladas descritas en el paso 1</p> <p>Realizar esto con los cuatro perfiles del sistema motriz</p>	
5	<p>Colocar los cuatro pernos con tuercas ovaladas en los agujeros de los dos perfiles posteriores como se muestra en la imagen</p>	
6	<p>Insertar el eje de deslizamiento con ayuda de la ranura a través de las tuercas ovaladas en cada perfil</p>	

7	<p>Ensamblar la junta frontal superior que mantiene unidos los perfiles del sistema motriz</p>	
8	<p>Para sujetarla se utiliza los soportes pequeños con las varillas roscadas</p>	
9	<p>Ensamblar la junta posterior y sujetarla con pernos</p>	
10	<p>Ensamblar las tuercas de husillo con las carcasas para lo cual se debe aflojar los pernos de estas para poder introducir las tuercas</p> <p>Ajustar el prisionero para alinear y centrar el ensamble</p>	
11	<p>Ensamblar los bloques de deslizamiento con la base de movimiento con ayuda de pernos y tuercas ovaladas que se deslizan en las ranuras de los bloques</p> <p>Coloca los ensambles de las tuercas de husillo en los agujeros de la base de movimiento</p>	
12	<p>Insertar los husillos en los ensambles del paso anterior</p>	
13	<p>Coloca la chumacera en la estructura sobre los perfiles del marco superior entre los perfiles verticales del sistema motriz</p>	
14	<p>Coloca el ensamble de la base de movimiento sobre la estructura deslizando los bloques sobre los ejes de deslizamiento y el husillo en la chumacera inferior.</p>	
15	<p>Ensamblar la chumacera superior en el husillo y luego colocar el acople del motor sobre el extremo del husillo</p>	

16	Empernar la chumacera superior al montaje del motor	
17	Unir este a la estructura con los agujeros en la junta frontal y en los soportes pequeños como se muestra en la imagen	
18	Ensamblar los conectores superiores y colocar las tapas	

(Fuente: Propia)

La impresora ILIOS ensamblada se muestra en la Figura 3.5

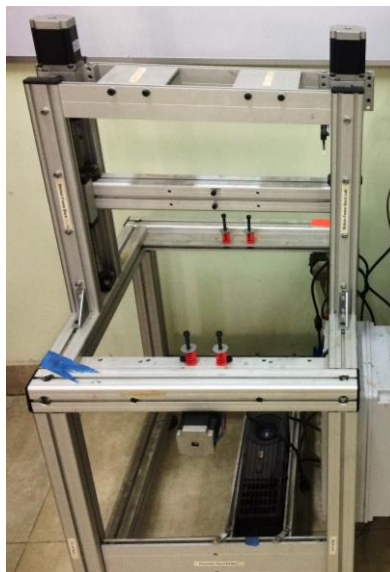


Figura 3.5. Impresora ILIOS 3D printer ensamblada.  
(Fuente: Propia)

El prototipo se montó sobre la estructura de la impresora ILIOS, esto se realizó con el uso de piezas angulares emperradas a la impresora y que permiten regular la altura a la que se coloca el prototipo con ayuda de tuercas ovaladas que se insertan en las ranuras del perfil de aluminio del extrusor.

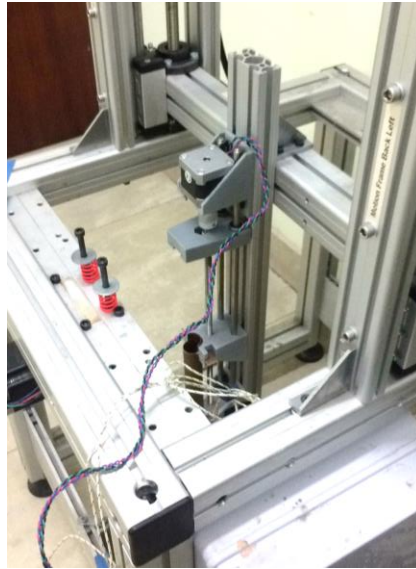


Figura 3.6. Montaje del prototipo extrusor sobre la impresora ILIOS.  
(Fuente: Propia)

Para el movimiento vertical que se realiza con la impresora es necesario el uso del software MACH3 para manejo de equipos CNC. Este software se puede descargar de forma gratuita y trabaja con el sistema operativo Windows XP de 32 bits, ya que en computadores con 64 bits se producen ciertos errores.

#### **3.1.3.4. Instalación del software**

Como se mencionó este software trabaja con un sistema operativo de 32 bits y en la instalación se debe crear un perfil para la máquina a ser controlada, en este caso la impresora. Para esto se debe ingresar un nombre para crear el perfil: Kit Ilios HD.

Luego se debe seleccionar el tipo de máquina, en este caso se selecciona el tipo “MILL” y se finaliza la instalación. Se creará un acceso directo en el escritorio con el nombre del perfil creado.

#### **3.1.3.5. Configuración del software**

En este software se debe realizar la configuración de varios parámetros para el funcionamiento de esta impresora. Toda esta configuración está disponible en la página web de ILIOS 3D [37], y se la realiza ejecutando el acceso directo que se creó en la instalación.

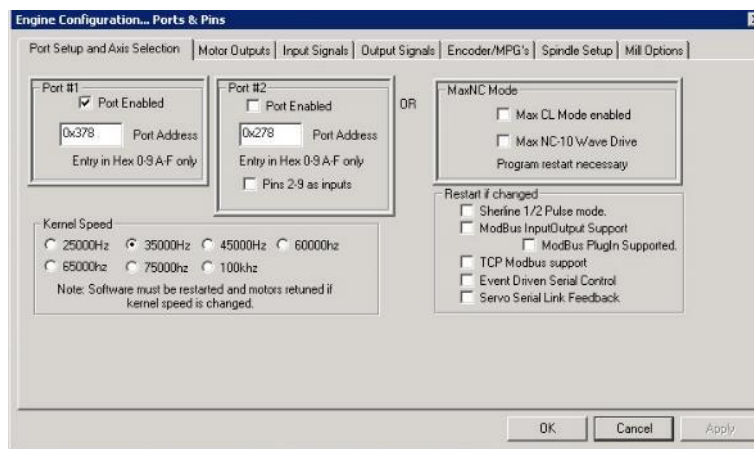
Una vez que se ha abierto el software, se abre la pestaña “Config” de la barra de menú y en esta pestaña se realizarán toda la configuración que se necesita para operar la impresora.

Tabla 3.12. Configuración del software MACH3 CNC.

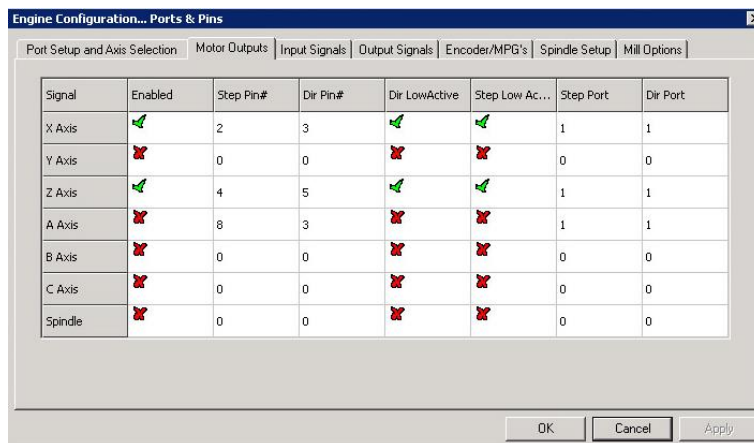
En la opción “Select Native Units” se selecciona las unidades métricas



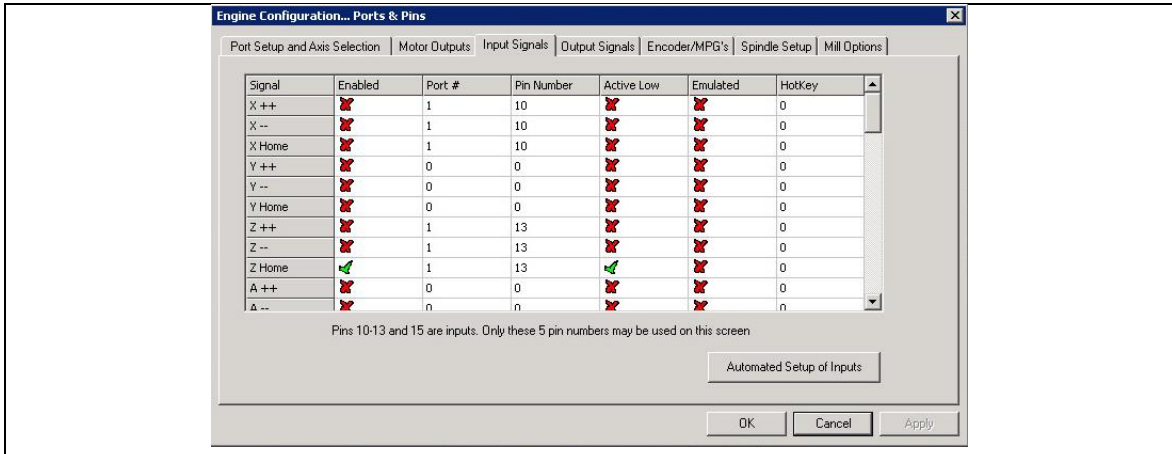
En la opción “Ports and Pins” configurar los parámetros de la primera pestaña de la ventana emergente como se muestra en la imagen



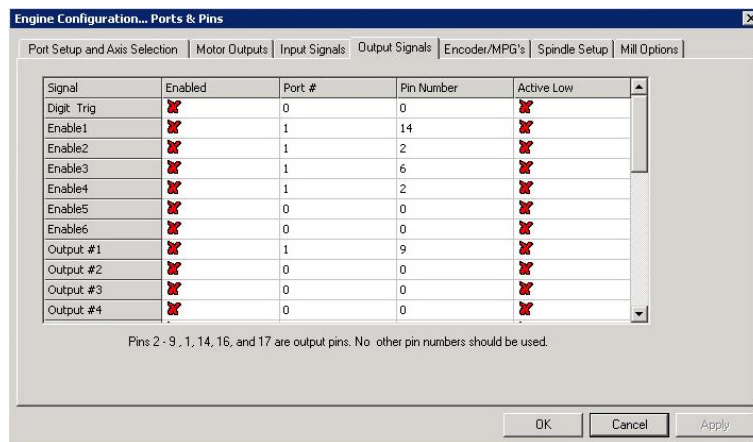
En la segunda pestaña de la ventana de Ports and Pins configurar la tabla como se muestra en la imagen para controlar los motores en modo de alto torque



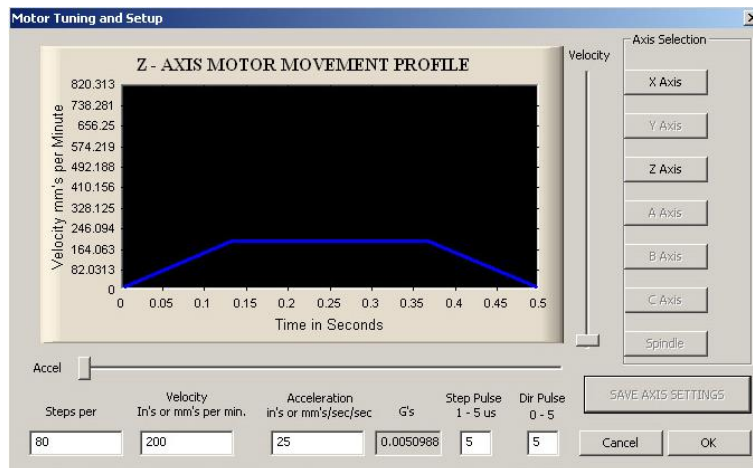
En la siguiente pestaña se configura la señal del sensor de posicionamiento para lo cual se debe configurar la tabla como se muestra en la imagen



En la siguiente pestaña se configura las salidas como se muestra en la imagen

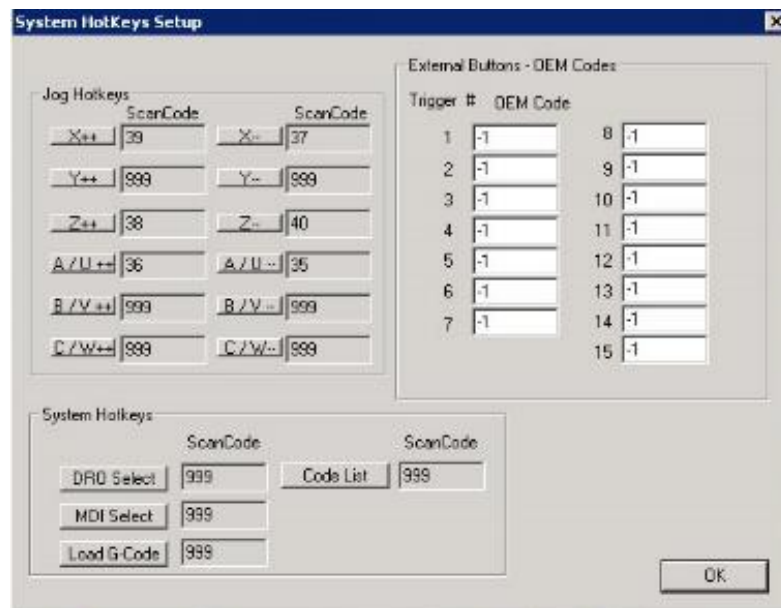


Ahora se selecciona la opción Motor Tuning de la pestaña Config en el cual se establecen especificaciones del motor y ciertos límites en la aceleración y movimiento de los motores. En este caso solo utilizaremos el eje Z por lo cual solo configuraremos este eje.



En la siguiente opción System Hotkeys de la pestaña Config. se configura el teclado para poder mover los motores mediante las teclas de dirección. Para esto se debe presionar en la pantalla el movimiento a configurar y luego la tecla de dirección que se desea que

cumpla esta función. En este caso solo se configura los movimientos Z+ y Z- con las teclas arriba y abajo respectivamente



Finalmente seleccionar la opción Homing/Limits donde se configura la posición inicial y los límites donde debe detenerse. Configurar como se muestra en la imagen



Una vez que se configuró el software para el manejo de la impresora se pudo continuar con el montaje de la mesa giratoria en la parte inferior de la estructura de la impresora con ayuda de una base de madera a la cual se fija la mesa, y se reguló la distancia entre la boquilla del extrusor y la mesa.



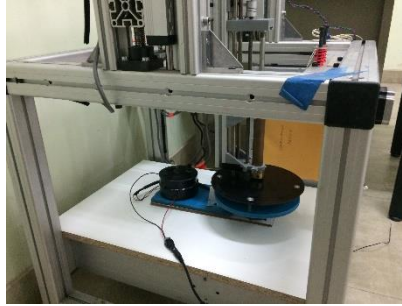


Figura 3.7. Montaje de la mesa giratoria.  
(Fuente: Propia)

La excentricidad de la salida de la boquilla de extrusión con el centro de giro de la mesa es de aproximadamente 20mm.

Una vez montado el prototipo sobre la estructura de la impresora ILIOS, se debió regular la velocidad de giro de la mesa con el fin de que la deposición de cera sobre la misma sea adecuada.

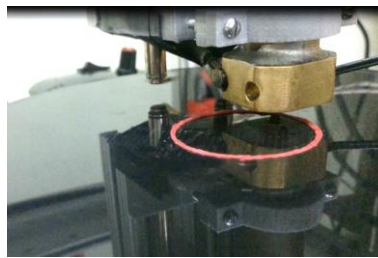


Figura 3.8. Deposición de cera.  
(Fuente: Propia)

Se logró regular la velocidad de la mesa y se pudo comenzar las pruebas de impresión de un cilindro. Este cilindro fue fabricado con la deposición de una circunferencia de material en cada capa.

Se realizó la impresión de un cilindro de prueba para calibración de la velocidad de giro de la mesa.

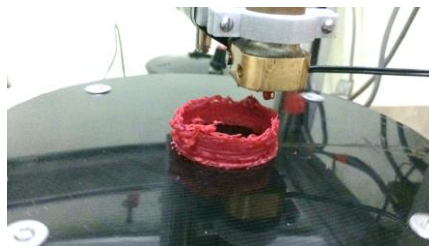


Figura 3.9. Impresión de prueba.  
(Fuente: Propia)

Una vez que se logró una velocidad adecuada se imprimió un cilindro con las mezclas 1, 4 y 5 pues con las mezclas 2 y 3 (que contienen parafina), no se logró una extrusión adecuada.

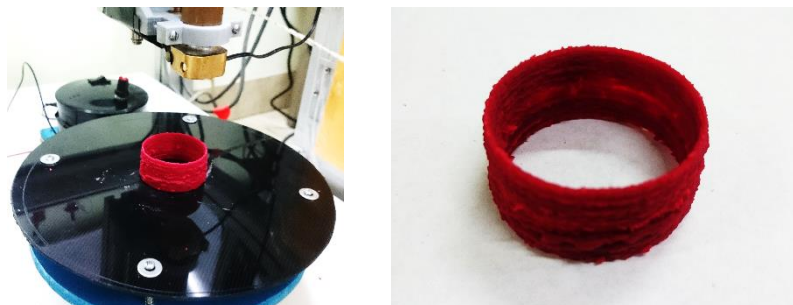


Figura 3.10. Impresión con la mezcla 1 (100% cera de savia de látex).  
(Fuente: Propia)

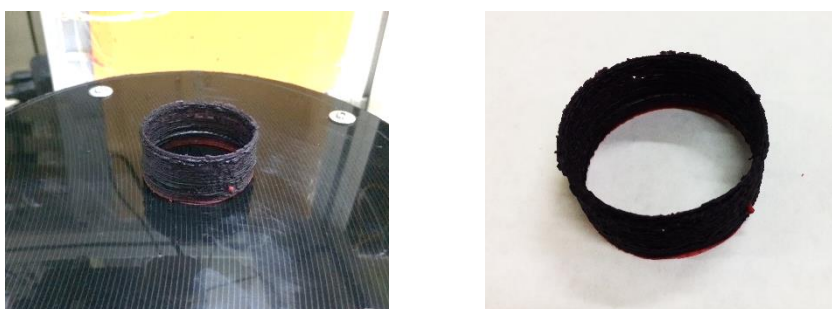


Figura 3.11. Impresión con la mezcla 4 (50% cera de látex y 50% cera 115308).  
(Fuente: Propia)

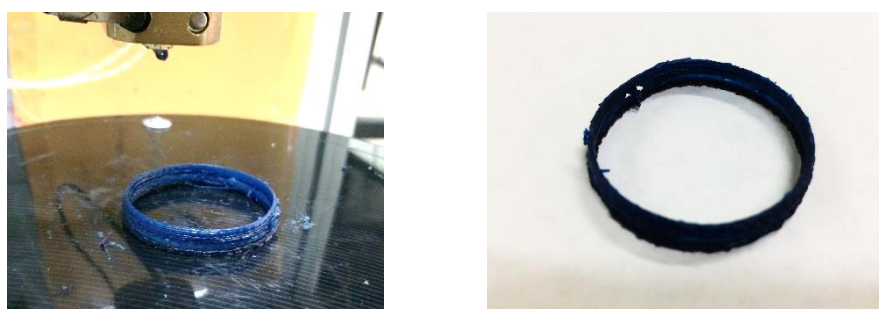


Figura 3.12. Impresión con la mezcla 5 (100% cera 115308).  
(Fuente: Propia)

## 3.2. Discusión

El punto de fusión de la cera de savia de látex se encuentra entre los 72°C y 82°C según la hoja de especificaciones técnicas del fabricante (F.E. Knight Castaldo Inc.) 2013. En el trabajo de investigación se calibró la temperatura de ablandamiento de la cera en 61,5°C,

resultado pertinente con la evolución hacia el punto de fusión que propone la casa comercial.

La temperatura de ablandamiento de la cera de savia de látex se genera mediante la ubicación de una resistencia eléctrica de calentamiento en el interior del bloque calefactor que se encuentra en el extremo de salida del extrusor, controlado por un switch de control de temperatura, activado por la señal que envía un sensor de temperatura NTC.

Al ser el extrusor de pistón, no es posible mantener una alimentación de cera continua, lo cual obliga a considerar el volumen del objeto a ser fabricado.

El motor que acciona el movimiento del pistón del extrusor se seleccionó de 36 N.cm, tomando en cuenta los datos de presión de inyección proporcionados por fabricantes de cera como Castaldo, Freeman y Arbe y los datos de Boothroy et al. [32], y considerando un factor de seguridad de 1,4 para compensar cualquier aspecto del proceso que se obvie en los cálculos.

De acuerdo a los ensayos de funcionamiento del prototipo extrusor se utilizó un driver A4988 para el manejo de motor de pasos, pues este driver permite entregar la corriente necesaria para un funcionamiento óptimo del motor.

Los movimientos del pistón deben ser precisos y controlados para un adecuado flujo de material, razón por la cual se seleccionó el motor de pasos, que facilita el control del desplazamiento y velocidad de avance del pistón.

En las pruebas de lectura de temperatura del sensor se comparó con la lectura de un termómetro con una termocupla tipo K. Estas lecturas se registraron cada 20 segundos para tres valores diferentes de set de temperatura: 61°C, 58°C y 64°C. Como se observa en las gráficas 3.1 a la 3.3 el valor de temperatura que entrega el termómetro es muy cercano al valor que entrega el sensor del switch W1209 a temperaturas bajas, pero conforme la temperatura aumenta, la diferencia entre las lecturas también se incrementa, obteniéndose un valor más bajo con el termómetro.

Si se observa en la gráfica 3.1 la diferencia es mucho más marcada, llegando a aproximadamente 4°C, e inicia a temperaturas inferiores (aproximadamente 34°C) que en las otras dos pruebas, esto puede responder al hecho de que la termocupla no estuvo ubicada en el mismo lugar en la primera prueba.

Como era de esperarse, el tiempo que tarda en alcanzar la temperatura de trabajo depende del valor seteado y de la temperatura inicial (que para las tres pruebas es casi la misma), así como también el tiempo que permanece en cada estado (ON/OFF). Al setear una

temperatura de 58°C, el tiempo que tarda en llegar desde la temperatura inicial es de 461 segundos (7 minutos y 41 segundos), para la temperatura de 61°C tarda 498 segundos (8 minutos y 18 segundos), y para 64°C el tiempo es de 636 segundos (10 minutos y 36 segundos). A pesar que el incremento de la temperatura de seteo fue de 3°C para cada prueba, el incremento en el tiempo no es el mismo, pues de 58°C a 61°C la diferencia es de 37 segundos, y de 61°C a 64°C la diferencia es de 2 minutos y 18 segundos.

De igual manera en relación a los tiempos de permanencia en cada estado, para cada valor de temperatura de seteo estos tiempos son diferentes, así: en 58°C el tiempo que permanece encendido está entre 60 y 67 segundos y el tiempo que permanece apagado está entre 37 y 40 segundos; para 61°C el tiempo encendido está entre 70 y 76 segundos y apagado entre 38 y 42 segundos; finalmente para 64°C el tiempo de encendido está entre 87 y 93 segundos y apagado entre 34 y 38 segundos.

El incremento en la diferencia de los tiempos de encendido con relación al incremento del set de temperatura no es lineal de acuerdo con los datos analizados.

De la gráfica 3.7 a la 3.9 se tienen los valores máximos y mínimos de temperatura entre los que se mantiene la temperatura debido al funcionamiento del switch W1209. Para los tres valores de temperatura de seteo, el rango de temperatura en el que se mantiene es de aproximadamente el mismo (aproximadamente 3°C). Este rango es adecuado para el trabajo del extrusor, pues de esta manera el tiempo de ciclo de encendido/apagado no es muy corto y el relé del controlador de temperatura no sufre un desgaste muy severo que pueda acortar su tiempo de vida útil.

En la Tabla 3.8 se presentan los resultados de las pruebas con carga y de calibración del extrusor. El análisis que se realiza a estos resultados es netamente cualitativo por inspección visual. Se observa que los mejores resultados nos proporcionó la prueba con una velocidad del motor de 5 rpm y con una temperatura de seteo de 61,5°C.

Las pruebas de impresión se realizaron montando el prototipo construido, en la estructura de la impresora ILIOS 3D printer que se encuentra en el Laboratorio de Fundición de la Escuela Politécnica Nacional. Esta impresora es del tipo SLA pero se desmonta el recipiente de resina para colocar el prototipo y la mesa giratoria. Se aprovecha que la impresora posee una estructura robusta en el eje Z.

Los movimientos de los ejes de esta impresora son controlados por el software MACH3 que utiliza código G. Sin embargo, también es posible controlarlos por medio de las teclas

de dirección del teclado de la computadora. Para las pruebas se controló el movimiento de eje Z con el teclado.

Como se puede observar en las figuras 3.10 a la 3.12 se pudo obtener los cilindros con las mezclas 1, 4 y 5, sin embargo el cilindro elaborado con la cera de savia de látex es el que presentó un mejor resultado.

Los cilindros presentan irregularidades y en los elaborados con las mezclas 4 y 5 existen zonas huecas. Esto se debe a que la prueba es algo rústica, donde la mesa giratoria no presenta una buena rectitud y no se logró nivelarla perfectamente. Además el movimiento en el eje Z se lo realiza manualmente por lo que no es exacto.

Esta prueba busca evaluar la capacidad de la cera para ser utilizada en un proceso de manufactura aditiva por deposición fundida y no en la precisión de la impresión, pues el alcance de este trabajo es la construcción del extrusor capaz de trabajar con cera como material a ser extruido.

Para la prueba de impresión con la mezcla 4 fue necesario elevar la temperatura de extrusión a 62°C y para la prueba con la mezcla 5 se elevó la temperatura a 62,5°C.

Con las mezclas 2 y 3 que contienen parafina no se logró una extrusión adecuada, razón por la cual no se pudo realizar las pruebas de impresión con estas mezclas.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

La temperatura se controló por medio de un termostato electrónico que permite setear la temperatura deseada y mediante un relé enciende y apaga la resistencia eléctrica para mantener la temperatura. La temperatura del bloque calefactor que brindó los mejores resultados en la extrusión de la cera de savia de látex fue de 61,5°C.

El flujo de material se controla por medio del código de programación, en el cual se establece un tiempo de espera entre cada impulso que se envía a las bobinas del motor de pasos; este tiempo de espera es de milisegundos.

Las pruebas de calibración se empezaron con un valor de tiempo de espera de 5 milisegundos, que da una velocidad del motor de 30rpm, esto depende de cada motor pues en este caso el motor da 200 pasos por vuelta.

Se obtuvo los mejores resultados con un tiempo de espera de 30 milisegundos, es decir con una velocidad del motor de 5rpm. Esto nos da un avance del émbolo de 6,25mm/min y un flujo de material de aproximadamente 30mm<sup>3</sup>/s.

La calibración del equipo fue uno de los mayores retos del presente trabajo, pues una temperatura alta ocasiona que la cera se funda y que se deposite en forma de gotas de un diámetro aproximado de 5mm, lo cual no favorece al proceso de manufactura aditiva para el que fue diseñado. Una temperatura baja no ablanda a la cera y la presión de extrusión que se logra con el motor de pasos no es suficiente para extrudir la cera en estado sólido.

La velocidad de avance del émbolo también juega un papel muy importante y fue un reto lograr calibrarla, esto debido a que con una velocidad muy alta provoca que los hilos de cera se acumulen y se enreden entre sí como se observa en la tabla 3.8, y una velocidad muy baja hace que la cera no logre salir como hilos sino que se quedan en la salida de la boquilla y se forma una sola masa que después cae por su peso.

Para la realización de estas pruebas de impresión fue necesario calibrar la velocidad de giro de la mesa para que la deposición de cera sobre la mesa sea adecuada. Si la velocidad de giro es muy baja se acumula demasiado material lo cual provoca que la circunferencia no sea uniforme e incluso hace que la boquilla se tape. Una velocidad muy alta hace que el hilo de cera extruido sea “arrancado” de la boquilla haciendo intermitente la deposición dejando huecos entre capas.

Otro de los inconvenientes en la realización de esta prueba es el movimiento vertical del extrusor, el cual se lo realiza por medio del software MACH3 que controla la impresora. Este movimiento se lo realizó manualmente por medio del teclado de la computadora, razón por la cual este movimiento no fue exacto, quitando precisión a la elaboración de los cilindros, pues no se puede elevar una misma altura de capa ni realizar este movimiento exactamente cuando se completa una vuelta de la mesa.

Un pequeño error en el instante de elevar el extrusor o en la altura que se eleva provoca una falla en cadena en la deposición, pues en cada vuelta se acarrea el error de la capa inferior, alterando los resultados obtenidos.

Se logró completar el primer paso que es la construcción de un extrusor capaz de depositar cera de fundición para elaboración de modelos en cera para el proceso de fundición a la cera perdida. El siguiente paso es la construcción de la impresora 3D para este extrusor y así completar el equipo.

## **4.2. Recomendaciones**

Se puede utilizar una boquilla de extrusión de mayor diámetro a la utilizada (0,5mm), para disminuir la presión requerida y evaluar los resultados, así como también probar con un diámetro de cilindro menor para que la velocidad de giro del motor no deba ser tan baja y mantener el flujo de material recomendado.

Se sugiere utilizar precalentadores en el cilindro para un ablandamiento más rápido y uniforme del tocho de cera.

Se recomienda seleccionar el driver del motor de pasos con base en la corriente nominal del motor, para poder obtener el máximo del torque de estos. Además utilizar siempre la configuración de pasos completos pues para la función de extrusión se necesita más torque que precisión.

Se plantea como trabajo a futuro la realización de la impresora 3D para utilizarla con el extrusor expuesto en este trabajo y así poder realizar modelos 3D que pueden dar una mejor idea de los puntos a mejorar en este prototipo.

Se podría probar un proceso de deposición de la cera en estado líquido, pero para esto se deberá controlar minuciosamente el flujo de líquido para que las gotas depositadas no tengan un tamaño muy grande. Además el enfriamiento será un reto pues si el flujo de aire es muy alto puede esparcir la cera líquida perdiendo toda la precisión para el proceso de manufactura aditiva, y si es muy baja no se logrará enfriar lo suficiente para que la siguiente capa depositada no se derrame sobre la anterior.

Por medio de la elaboración de modelos en tres dimensiones se puede evaluar la adherencia de las capas, se puede evaluar si se requiere de una cama caliente, si se necesita enfriar el hilo de cera al momento que sale de la boquilla de extrusión. Se puede evaluar si la cera presenta las propiedades adecuadas para el proceso de manufactura aditiva por deposición fundida.

Se puede realizar pruebas de extrusión con mezclas de ceras basadas en sus características tanto físicas como mecánicas, con el fin de obtener mejores resultados.

Se puede realizar pruebas de impresión adaptando el prototipo extrusor a una impresora 3D que tenga movimiento en los 3 ejes para obtener resultados más precisos en cuanto a los movimientos de impresión.

Como trabajo a futuro se puede realizar una caracterización de las ceras que se pueden encontrar con facilidad en el mercado nacional y evaluar si son aptas tanto para el proceso de manufactura aditiva por deposición fundida como para el proceso de fundición a la cera perdida. Realizando mezclas de las mismas para optimizar sus características.



## Referencias Bibliográficas

- [1] Fundición a la cera perdida. Curso en línea. Disponible en: <https://es.slideshare.net/epsilonglass/curso-pdffundicin-a-la-cera-perdida-autor-manuel-de-la-fuente>
- [2] D. Chicaiza, C. Vallejo, Desarrollo de un método para fabricar modelos al natural y perdidos con técnicas de manufactura aditiva en el Laboratorio de Fundición, 2016.
- [3] 3D Hubs, Projet 3510. Disponible en: <https://www.3dhubs.com/3d-printers/projet-3510>
- [4] M. P. Groover, Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas. Pearson Educación, 1997.
- [5] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología, Pearson Educación, 2002
- [6] B. Amstead, P. Ostwald, M. Begeman, Procesos de manufactura, Editorial Continental, 1981.
- [7] Investment Casting Institute, Investment casting handbook, 1979.
- [8] G. Mazzei, Conductividad térmica y eléctrica de filamento a base de PLA cargado con grafeno. Sartenejas, 2016.
- [9] I. Gibson, D. W. Rosen, y B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies, EEUU: Springer, (2015).
- [10] S. Folguera, F. Folguera, Introducción a la impresión 3D (prototipado rápido) como instrumento de innovación tecnológica en el campo dental, 2016.
- [11] A. Gebhardt, Understanding Additive Manufacturing, Alemania: Hanser Publications, (2012).
- [12] Slicing Software. Disponible en: <https://www.lulzbot.com/slicing>
- [13] Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies, ASTM F2792-12a (2012).
- [14] S. S. Crump, "Apparatus y method for creating three-dimensional objects," Patente US5121329 A (1992).

- [15] A. Lanzotti, D.M. Del Giudice, A. Lepore, G. Staiano, y M. Martorelli, "On the Geometric Accuracy of RepRap Open-Source Three-Dimensional Printer," *Journal of Mechanical Design*, 137 (10), 101703-101703-8 (2015).
- [16] H. González, J. Vicente, *Desarrollo de un procedimiento de diseño óptimo para fabricación de componentes mediante tecnologías aditivas*, 2012.
- [17] Acrilo Nitrilo Butadieno Estireno (ABS): Descripción, propiedades y aplicaciones. Disponible en: <https://www.quiminet.com/articulos/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs-descripcion-propiedades-y-aplicaciones-4433.htm>
- [18] Tecnología de los plásticos, 2011. Disponible en: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/abs.html>
- [19] Tecnología de los plásticos, 2011. Disponible en: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/08/poliacido-lactico-pla.html>
- [20] Ácido Ploiláctico. Disponible en: [https://www.ecured.cu/%C3%81cido\\_Polil%C3%A1ctico](https://www.ecured.cu/%C3%81cido_Polil%C3%A1ctico)
- [21] F. Cotec, *La fabricación aditiva, tecnología avanzada para el diseño y desarrollo de productos*, 2012.
- [22] R. Wicker, E. McDonald, *Multi-material, multi-technology stereolithography*, *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 7.
- [23] S. Blandón, A. Rojas, *Diseño y construcción de una plataforma de impresión 3D robusta y flexible bajo estándares open hardware y open source*, Universidad Autónoma de Occidente, Colombia IV CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA MECATRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN - CIIMA 2015
- [24] "Lección 10: Plásticos/Extrusión". [En línea]. Disponible en: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion10.PLASTICOS.Extrusion.2005.pdf>
- [25] J. Suárez, *Proyecto de máquina extrusora para creación de hilos de poli etilén tereftalato*, 2015.
- [26] "La extrusión de materiales poliméricos", apuntes de clase de Tecnologías de fabricación con materiales poliméricos y compuestos, Universidad Politécnica de Valencia.
- [27] J. Shigley, *Manual de diseño mecánico*. Mc Graw Hill, México, 1989.
- [28] C. RIBA, *Diseño concurrente*, 2002.

- [29] Castaldo, Especificaciones de la cera para joyería Plast-O-Wax, disponible en: <https://www.etsy.com/es/listing/238427157/castaldo-inyeccion-cera-plast-o-cera>
- [30] Freeman, Specialty waxes for the jewelry industry, Disponible en: <http://www.freemanwax.com/how-to-jewelry-injection-wax.html>
- [31] ARBE, Professional jewelers wax injector, disponible en: <http://www.arbemachine.com/files/112641/wi-201.pdf>
- [32] G. Boothroyd, P. Dewhurst, W. A. Knight, Product design for manufacture and assembly, 3<sup>rd</sup> Edition, CRC Press, 2011.
- [33] J. Gere, B. Goodno, Mechanics of materials, 7ma edición, Cengage learning, 2009
- [34] "Arduino Uno Rev3", Disponible en: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>
- [35] J. Moreno, Obtención de ceras para el proceso de fundición a la cera perdida, Universidad Nacional de Colombia.
- [36] ULTIMAKER ORIGINAL+, Key specifications. Disponible en: <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-original/specifications>
- [37] ILIOS MACH 3 SETUP, Disponible en: <http://www.ilios3d.com/en/ilios-documentation-page/35-10-mach-3-setup>

## **Anexos**

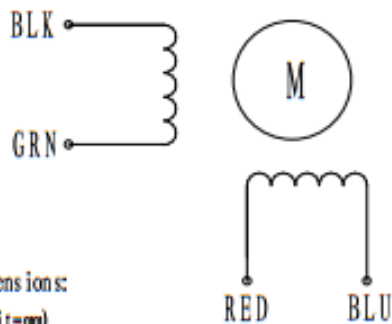
### **ANEXO A: FICHAS TÉCNICAS Y CATÁLOGO**

## ANEXO A1: Ficha técnica motor de pasos

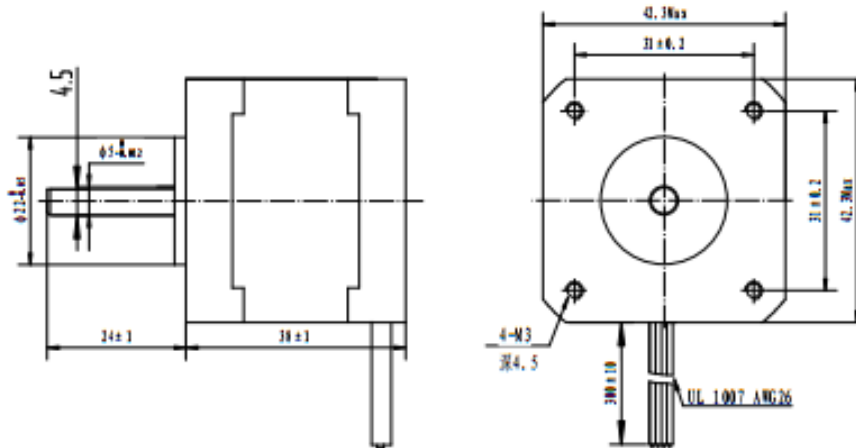
### HIGH TORQUE HYBRID STEPPING MOTOR SPECIFICATIONS

General specifications		Electrical specifications	
Step Angle (°)	1.8	Rated Voltage (V)	2.8
Temperature Rise (°C)	80 Max (rated current, 2 phase on)	Rated Current (A)	1.68
Ambient Temperature (°C)	-20 ~ +50	Resistance Per Phase ( $\pm 10\%$ $\Omega$ )	1.65 (25°C)
Number of Phase	2	Inductance Per Phase ( $\pm 20\%$ mH)	3.2
Insulation Resistance (M $\Omega$ )	100 Min (500VDC)	Holding torque (N.cm)	36
Insulation Class	Class B		
Max.radial force (N)	28 (20mm from the flange)		
Max.axial force (N)	10		

#### ● Wiring Diagram :

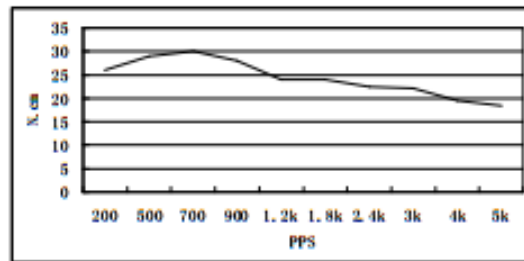


Dimensions:  
(unit=mm)



#### ● PULL out torque curve :

VOLTAGE: 24VDC CONSTANT CURRENT : 1.68A HALF STEP



REV	REVISIONS	DESCRIPTION	BY	DATE	SY42S TH3 8-168 4A	TECHNICAL CONDITIONS
DRAW					CHANGZHOU SONGYANG MACHINERY & ELECTRONICS NEW TECHNIC INSTITUTE	060038079
CHECK						
APPROVE						

## ANEXO A2: Catálogo de rodamientos lineales y cálculo de vida nominal

### [Calculating the Nominal Life]

The nominal life of the Linear Bushing is obtained using the following equation.

$$L = \left( \frac{f_H \cdot f_T \cdot f_C}{f_W} \cdot \frac{C}{P_C} \right)^3 \times 50$$

L	: Nominal life	(km)
C	: Basic dynamic load rating	(N)
P <sub>c</sub>	: Calculated load	(N)
f <sub>T</sub>	: Temperature factor	(see Fig.2 on A-539)
f <sub>C</sub>	: Contact factor	(see Table2 on A-539)
f <sub>W</sub>	: Load factor	(see Table3 on A-539)
f <sub>H</sub>	: Hardness factor	(see Fig.1)

### ● When a Moment Load is Applied to a Single Nut or Two Nuts in Close Contact with Each Other

When a moment load is applied to a single nut or two nuts in close contact with each other, calculate the equivalent radial load at the time the moment is applied.

$$P_u = K \cdot M$$

P <sub>u</sub>	: Equivalent radial load	(N)
	(with a moment applied)	
K	: Equivalent factors	
	(see Table4 to Table6 on A-540)	
M	: Applied moment	(N-mm)

However, "P<sub>u</sub>" is assumed to be within the basic static load rating (C<sub>0</sub>).

### ● When a Moment Load and a Radial Load are Simultaneously Applied

When a moment and a radial load are applied simultaneously, calculate the service life based on the sum of the radial load and the equivalent radial load.

#### ■ f<sub>H</sub>: Hardness Factor

To maximize the load capacity of the Linear Bushing, the hardness of the raceways needs to be between 58 to 64 HRC.

If the hardness is lower than this range, the basic dynamic load rating and the basic static load rating decrease. Therefore, it is necessary to multiply each rating by the respective hardness factor (f<sub>H</sub>).

Normally, f<sub>H</sub>=1.0 since the Linear Bushing has sufficient hardness.

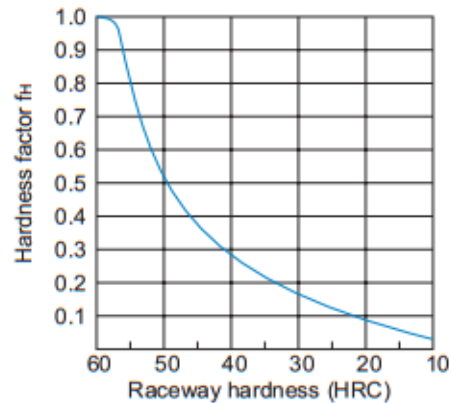


Fig.1 Hardness Factor (f<sub>H</sub>)

■**f<sub>t</sub>**: Temperature Factor

If the temperature of the environment surrounding the operating Linear Bushing exceeds 100°C, take into account the adverse effect of the high temperature and multiply the basic load ratings by the temperature factor indicated in Fig.2. Also note that the Linear Bushing itself must be of high temperature type.

Note) If the environment temperature exceeds 80°C, use a Linear Bushing type equipped with metal retainer plates.

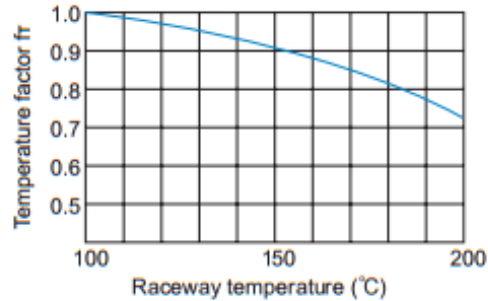


Fig.2 Temperature Factor (f<sub>t</sub>)

■**f<sub>c</sub>**: Contact Factor

When multiple nuts are used in close contact with each other, their linear motion is affected by moments and mounting accuracy, making it difficult to achieve uniform load distribution. In such applications, multiply the basic load rating (C) and (C<sub>0</sub>) by the corresponding contact factor in Table2.

Note) If uneven load distribution is expected in a large machine, take into account the respective contact factor indicated in Table2.

Table2 Contact Factor (f<sub>c</sub>)

Number of nuts in close contact with each other	Contact factor f <sub>c</sub>
2	0.81
3	0.72
4	0.66
5	0.61
Normal use	1

■**f<sub>w</sub>**: Load Factor

In general, reciprocating machines tend to involve vibrations or impact during operation. It is difficult to accurately determine vibrations generated during high-speed operation and impact during frequent start and stop motion. Therefore, when loads applied on a Linear Bushing cannot be measured, or when speed and impact have a significant influence, divide the basic load rating (C or C<sub>0</sub>), by the corresponding load factor in Table3.

Table3 Load Factor (f<sub>w</sub>)

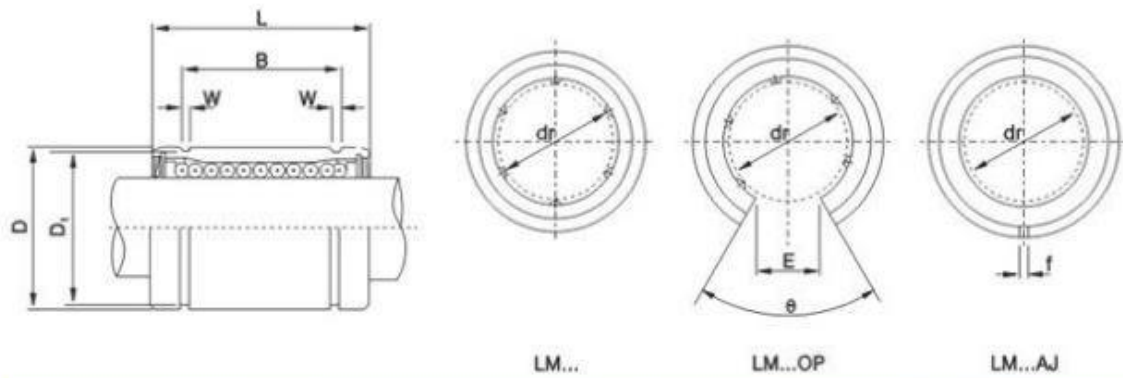
Vibrations/ impact	Speed(V)	f <sub>w</sub>
Faint	Very low V ≤ 0.25m/s	1 to 1.2
Weak	Slow 0.25 < V ≤ 1m/s	1.2 to 1.5
Medium	Medium 1 < V ≤ 2m/s	1.5 to 2
Strong	High V > 2m/s	2 to 3.5

[Calculating the Service Life Time]

When the nominal life (L) has been obtained, if the stroke length and the number of reciprocations per minute are constant, the service life time is obtained using the following equation.

$$L_h = \frac{L \times 10^3}{2 \times l_s \times n_1 \times 60}$$

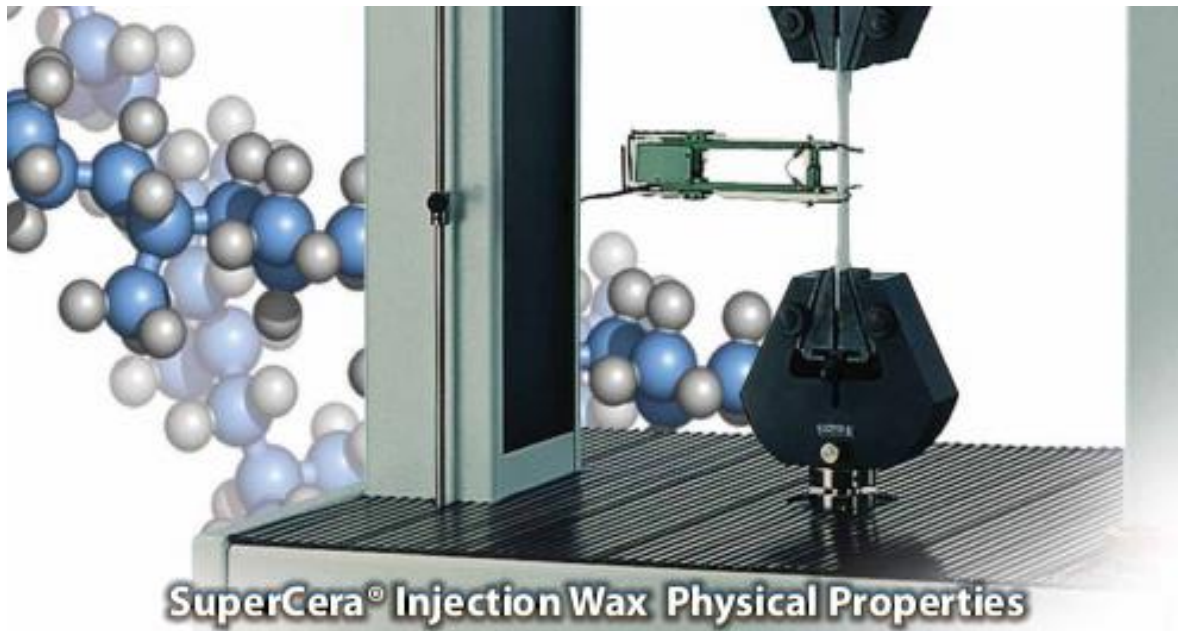
- L<sub>h</sub> : Service life time (h)
- l<sub>s</sub> : Stroke length (m)
- n<sub>1</sub> : Number of reciprocations per minute (min<sup>-1</sup>)



Major dimensions and tolerance											Ratings load		Type
D (mm)	Tolerance (mm)	L (mm)	Tolerance (mm)	B (mm)	Tolerance (mm)	W (mm)	D1 (mm)	f (mm)	E (mm)	e	Dynamic C(N)	Static Co(N)	
8	0	12	0	-	-	-	-	-	-	-	88	127	LM4UU
10	-0.009	15	-0.12	10.2	0 -0.2	1.1	9.6	-	-	-	167	206	LM5UU
12	0 -0.011	19	0 -0.2	13.5		1.1	11.5	1	-	-	206	265	LM6UU
15		17		11.5		1.1	14.3	1	-	-	176	216	LM8UU
15	24	17.5		1.1		14.3	1	-	-	274	392	LM8UU	
19	0 -0.013	29		22		1.3	18	1	6.8	80°C	372	549	LM10UU
21		30		23		1.3	20	1.5	8	80°C	510	784	LM12UU
23		32		23		1.3	22	1.5	9	80°C	510	784	LM13UU
28		37		26.5		1.6	27	1.5	11	80°C	774	1180	LM16UU
32		42		30.5		1.6	30.5	1.5	11	60°C	882	1370	LM20UU



## ANEXO A3: Fichas técnicas ceras Supercera Castaldo Roja



	SuperCera® Red	SuperCera® Aqua	SuperCera® Gold	SuperCera® Green	SuperCera® Orange
Viscosity *	130 -150 cps.	130 -150 cps.	145 -165 cps.	150 -170 cps.	280 -300 cps.
Melting Point	72 -82°C 162 -180°F	59 -65°C 138 -149°F	69 -74°C 156 -165°F	71 -78°C 160 -172°F	60 -68°C 140 -154°F
Ash Content	< 0.03%	< 0.03%	< 0.03%	< 0.03%	< 0.03%
Penetration **	1 -3 dmm	3 -6 dmm	1 -2 dmm	2 -5 dmm	3 -5 dmm

\* Viscosity is a measure of a liquid's fluidity — how easily it flows.

Here is a helpful comparison guide for evaluating the numbers above:

Water .....	1	Maple Syrup .....	150	Molasses .....	5,000
Blood .....	10	Castor Oil .....	250	Chocolate Syrup .....	10,000
Anti-Freeze .....	15	Glycerin .....	1,000	Ketchup .....	50,000
Corn Oil .....	50	Honey .....	2,000		

\*\* Penetration is a measure of how hard or soft a wax is. It measures the distance a needle point will penetrate a sample under standard conditions.

**Safety Data Sheet**  
**Castaldo® SuperCera® Jewelry Injection Wax**



SDS Revision Date:

12/05/2014

**1. Identification of the substance/mixture and of the company/undertaking**

**1.1. Product identifier**

**Product Identity** Castaldo® SuperCera® Jewelry Injection Wax  
**Alternate Names** Castaldo® SuperCera® Jewelry Injection Wax

**1.2. Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against**

**Intended use** See Technical Data Sheet.  
**Application Method** See Technical Data Sheet.

**1.3. Details of the supplier of the safety data sheet**

**Company Name** F. E. Knight Inc.  
120 Constitution Blvd.,  
Franklin, MA 02038. USA

**Emergency**

**24 hour Emergency Telephone No.** Chem-Tel: 1-800-255-3924 or 617-969-5399  
**Customer Service: F. E. Knight Inc.** 508-520-1666

**2. Hazard identification of the product**

**2.1. Classification of the substance or mixture**

No applicable GHS categories.

**2.2. Label elements**

Using the Toxicity Data listed in section 11 and 12 the product is labeled as follows.

No applicable GHS categories.

**[Prevention]:**

No GHS prevention statements

**[Response]:**

No GHS response statements

**[Storage]:**

No GHS storage statements

**[Disposal]:**

**Safety Data Sheet**  
**Castaldo® SuperCera® Jewelry Injection Wax**



SDS Revision Date:

12/05/2014

No GHS disposal statements

**3. Composition/information on ingredients**

There are no ingredients in this product which are classified as hazardous.

**4. First aid measures**

**4.1. Description of first aid measures**

<b>General</b>	In all cases of doubt, or when symptoms persist, seek medical attention. Never give anything by mouth to an unconscious person.
<b>Inhalation</b>	Remove to fresh air, keep patient warm and at rest. If breathing is irregular or stopped, give artificial respiration. If unconscious place in the recovery position and obtain immediate medical attention. Give nothing by mouth.
<b>Eyes</b>	Exposure to fumes, vapors or smoke of over-heated product can result in irritation to eyes. Direct contact with molten material may cause eye injury and burns. Should contact occur, flush eyes with generous amounts of water for at least 15 minutes and seek medical attention immediately.
<b>Skin</b>	Exposure to fumes, vapors or smoke of thermally degraded product can result in irritation to skin. Direct contact with molten material may cause injury and burns. For burns apply running water to the injured area for 15 minutes. Do not attempt to remove any material bonded to the skin. Seek medical attention immediately.
<b>Ingestion</b>	If swallowed obtain immediate medical attention. Keep at rest. Do NOT induce vomiting.

**4.2. Most important symptoms and effects, both acute and delayed**

<b>Overview</b>	Eye Contact: Contact with solid material may cause irritation. Direct contact with molten wax to the eye may cause thermal burns. Skin Contact: No danger at room temperature. Direct contact with molten wax to the skin may cause thermal burns. Inhalation: Molten wax fumes may cause respiratory discomfort and irritation. Ingestion: Material is essentially inert and non-toxic. May cause gastrointestinal irritation, nausea, vomiting and diarrhea if ingested in large quantities. See section 2 for further details.
-----------------	---

**5. Fire-fighting measures**

**5.1. Extinguishing media**

**Safety Data Sheet**  
**Castaldo® SuperCera® Jewelry Injection Wax**



SDS Revision Date:

12/05/2014

Recommended extinguishing media; alcohol resistant foam, CO<sub>2</sub>, powder, water spray.  
Do not use; water jet.

**5.2. Special hazards arising from the substance or mixture**

Hazardous decomposition: Upon decomposition, this product emits carbon monoxide, carbon dioxide and/or low molecular weight hydrocarbons.

**5.3. Advice for fire-fighters**

This product will burn if involved in a fire. Do not use water on molten product to avoid splattering and spreading of fire.

Wear full firefighting gear and self-contained breathing apparatus.

**ERG Guide No.**        ---

**6. Accidental release measures**

**6.1. Personal precautions, protective equipment and emergency procedures**

Put on appropriate personal protective equipment (see section 8).

**6.2. Environmental precautions**

Use good personal hygiene practices. Wash hands before eating, drinking, smoking or using toilet. Promptly remove soiled clothing and wash thoroughly before reuse.

**6.3. Methods and material for containment and cleaning up**

Treat as a thermoplastic. With molten spills, allow the material to cool and solidify. Keep material out of sewers and water streams by diking or impounding. Recover and place into appropriate containers for salvage or disposal according to Local, State and Federal regulations.

**7. Handling and storage**

**7.1. Precautions for safe handling**

Avoid contact with skin and eyes. Avoid contact with molten material. Wash thoroughly after handling. Avoid breathing fumes if used at high temperatures. Use in adequate ventilation.

**7.2. Conditions for safe storage, including any incompatibilities**

Handle containers carefully to prevent damage and spillage.

Incompatible materials: Strong oxidizing agents (i.e. peroxides, chlorine).

Store sealed containers in a cool dry place away from heat and direct sunlight.

**7.3. Specific end use(s)**

No data available.

**8. Exposure controls and personal protection**

**8.1. Control parameters**

There are no ingredients in this product which are classified as hazardous.

## Safety Data Sheet

### Castaldo® SuperCera® Jewelry Injection Wax



SDS Revision Date:

12/05/2014

#### 8.2. Exposure controls

<b>Respiratory</b>	If workers are exposed to concentrations above the exposure limit they must use the appropriate, certified respirators.
<b>Eyes</b>	Protective safety glasses with eye shields recommended.
<b>Skin</b>	Proper protective splash resistant clothing, thermal gloves, splash resistant shoes,
<b>Engineering Controls</b>	Provide adequate ventilation. Where reasonably practicable this should be achieved by the use of local exhaust ventilation and good general extraction. If these are not sufficient to maintain concentrations of particulates and any vapor below occupational exposure limits suitable respiratory protection must be worn.
<b>Other Work Practices</b>	This material will be utilized in molten form. Use molten material in well ventilated areas. When working in confined areas, use of appropriate respiratory gear is recommended. Use good personal hygiene practices. Wash hands before eating, drinking, smoking or using toilet. Promptly remove soiled clothing and wash thoroughly before reuse.

<b>9. Physical and chemical properties</b>
--

<b>Appearance</b>	Various Colors blocks/flakes, solid @25C/77F
<b>Odor</b>	No
<b>Odor threshold</b>	Not Measured
<b>pH</b>	NA
<b>Melting point / freezing point</b>	58-80 C
<b>Initial boiling point and boiling range</b>	NA
<b>Flash Point</b>	420 F (COC)
<b>Evaporation rate (Ether = 1)</b>	NA
<b>Flammability (solid, gas)</b>	Not Applicable
<b>Upper/lower flammability or explosive limits</b>	<b>Lower Explosive Limit: NA</b> <b>Upper Explosive Limit: NA</b>
<b>Vapor pressure (Pa)</b>	NA
<b>Vapor Density</b>	NA
<b>Specific Gravity</b>	< 1 (H2O=1)
<b>Solubility in Water</b>	Soluble
<b>Partition coefficient n-octanol/water (Log Kow)</b>	Not Measured
<b>Auto-ignition temperature</b>	NA
<b>Decomposition temperature</b>	NA
<b>Viscosity (cSt)</b>	NA
<b>VOC %</b>	NA
<b>% Volatile</b>	Negligible

#### 9.2. Other information

**Safety Data Sheet**  
**Castaldo® SuperCera® Jewelry Injection Wax**



SDS Revision Date:

12/05/2014

No other relevant information.

**10. Stability and reactivity**

**10.1. Reactivity**

Hazardous Polymerization will not occur.

**10.2. Chemical stability**

Stable under normal circumstances.

**10.3. Possibility of hazardous reactions**

No data available.

**10.4. Conditions to avoid**

Excessive heat and open flame.

**10.5. Incompatible materials**

Strong oxidizing agents (i.e. peroxides, chlorine).

**10.6. Hazardous decomposition products**

Upon decomposition, this product emits carbon monoxide, carbon dioxide and/or low molecular weight hydrocarbons.

**11. Toxicological information**

**Acute toxicity**

There are no ingredients in this product which are classified as hazardous.

Note: When no route specific LD50 data is available for an acute toxin, the converted acute toxicity point estimate was used in the calculation of the product's ATE (Acute Toxicity Estimate).

Classification	Category	Hazard Description
Acute toxicity (oral)	---	Not Applicable
Acute toxicity (dermal)	---	Not Applicable
Acute toxicity (inhalation)	---	Not Applicable
Skin corrosion/irritation	---	Not Applicable
Serious eye damage/irritation	---	Not Applicable
Respiratory sensitization	---	Not Applicable
Skin sensitization	---	Not Applicable
Germ cell mutagenicity	---	Not Applicable

**Safety Data Sheet**  
**Castaldo® SuperCera® Jewelry Injection Wax**



SDS Revision Date:

12/05/2014

Carcinogenicity	---	Not Applicable
Reproductive toxicity	---	Not Applicable
STOT-single exposure	---	Not Applicable
STOT-repeated exposure	---	Not Applicable
Aspiration hazard	---	Not Applicable

**12. Ecological information**

**12.1. Toxicity**

This product is stable in water and can be mechanically separated from water. The water may be suitable for disposal in a biological waste water treatment plant. Not expected to be acutely toxic to aquatic organisms.

**Aquatic Ecotoxicity**

There are no ingredients in this product which are classified as hazardous.

**12.2. Persistence and degradability**

There is no data available on the preparation itself.

**12.3. Bioaccumulative potential**

Not Measured

**12.4. Mobility in soil**

No data available.

**12.5. Results of PBT and vPvB assessment**

This product contains no PBT/vPvB chemicals.

**12.6. Other adverse effects**

No data available.

**13. Disposal considerations**

**13.1. Waste treatment methods**

Observe all federal, state and local regulations when disposing of this substance.

**14. Transport information**

	<b>DOT (Domestic Surface Transportation)</b>	<b>IMO / IMDG (Ocean Transportation)</b>	<b>ICAO/IATA</b>
<b>14.1. UN number</b>	Not Applicable	Not Regulated	Not Regulated
<b>14.2. UN proper shipping name</b>	Not Regulated	Not Regulated	Not Regulated

**Safety Data Sheet**  
**Castaldo® SuperCera® Jewelry Injection Wax**



SDS Revision Date:

12/05/2014

- |   |   |   |                                  |
|---|---|---|----------------------------------|
| <b>14.3. Transport hazard class(es)</b>   | <b>DOT Hazard Class:</b> Not Applicable | <b>IMDG:</b> Not Applicable<br><b>Sub Class:</b> Not Applicable | <b>Air Class:</b> Not Applicable |
| <b>14.4. Packing group</b>                | Not Applicable                          | Not Applicable  | Not Applicable                   |
| <b>14.5. Environmental hazards</b>        |   |   |                                  |
| <b>IMDG</b>                               | Marine Pollutant: No                    |   |                                  |
| <b>14.6. Special precautions for user</b> |   |   |                                  |
| No further information                    |   |   |                                  |

**15. Regulatory information**

**Regulatory Overview** The regulatory data in Section 15 is not intended to be all-inclusive, only selected regulations are represented.

**Toxic Substance Control Act ( TSCA)** All components of this material are either listed or exempt from listing on the TSCA Inventory.

**WHMIS Classification** Not Regulated

- |                               |                                       |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| <b>US EPA Tier II Hazards</b> | <b>Fire:</b> No                       |
|                               | <b>Sudden Release of Pressure:</b> No |
|                               | <b>Reactive:</b> No                   |
|                               | <b>Immediate (Acute):</b> No          |
|                               | <b>Delayed (Chronic):</b> No          |

**EPCRA 311/312 Chemicals and RQs:**  
(No Product Ingredients Listed)

**EPCRA 302 Extremely Hazardous :**  
(No Product Ingredients Listed)

**EPCRA 313 Toxic Chemicals:**  
(No Product Ingredients Listed)

**Proposition 65 - Carcinogens (>0.0%):**  
(No Product Ingredients Listed)

**Proposition 65 - Developmental Toxins (>0.0%):**  
(No Product Ingredients Listed)

**Proposition 65 - Female Repro Toxins (>0.0%):**  
(No Product Ingredients Listed)

**Proposition 65 - Male Repro Toxins (>0.0%):**  
(No Product Ingredients Listed)

**N.J. RTK Substances (>1%) :**  
(No Product Ingredients Listed)

**Penn RTK Substances (>1%) :**  
(No Product Ingredients Listed)



**Safety Data Sheet**  
**Castaldo® SuperCera® Jewelry Injection Wax**



SDS Revision Date:

12/05/2014

**16. Other information**

The information and recommendations contained herein are based upon data believed to be correct. However, no guarantee or warranty of any kind, expressed or implied, is made with respect to the information contained herein. We accept no responsibility and disclaim all liability for any harmful effects which may be caused by exposure to our products. Customers/users of this product must comply with all applicable health and safety laws, regulations, and orders.

The full text of the phrases appearing in section 3 is:

Not Applicable

**This is the first version in the GHS SDS format. Listings of changes from previous versions in other formats are not applicable.**

Disclaimer: The information contained herein is considered accurate; however, F .E. Knight, Inc. makes no warranty regarding the accuracy of the information. The user must determine the suitability of the product for the intended use and accepts all risk and liability associated with that use.

End of Document

# Cera Parafina

## ficha de datos de seguridad

conforme al Reglamento (CE) no 1907/2006 (REACH) modificado por 2015/830/UE



### ceras de parafina y ceras hidrocarbonadas for histology

número de artículo: X880

#### • otras medidas de protección

Hacer períodos de recuperación para la regeneración de la piel. Protectores de la piel preventivos (cremas de protección/pomadas) están recomendados.

#### Protección respiratoria

Normalmente no es necesaria protección respiratoria personal.

#### Controles de exposición medioambiental

Manteniendo el producto alejado de los desagües y de las aguas superficiales y subterráneas.

## SECCIÓN 9: Propiedades físicas y químicas

### 9.1 Información sobre propiedades físicas y químicas básicas

#### Aspecto

Estado físico	sólido (pellets)
Color	blanco
Olor	inodoro
Umbral olfativo	No existen datos disponibles

#### Otros parámetros físicos y químicos

pH (valor)	Esta información no está disponible.
Punto de fusión/punto de congelación	56 °C
Punto inicial de ebullición e intervalo de ebullición	371 °C
Punto de inflamación	199 °C (vaso cerrado)
Tasa de evaporación	no existen datos disponibles
Inflamabilidad (sólido, gas)	No inflamable
<u>Límites de explosividad</u>	
• límite inferior de explosividad (LIE)	esta información no está disponible
• límite superior de explosividad (LSE)	esta información no está disponible
Límites de explosividad de nubes de polvo	estas informaciones no están disponibles
Presión de vapor	Esta información no está disponible.
Densidad	0,8 g/cm <sup>3</sup>
Densidad de vapor	Esta información no está disponible.
Densidad aparente	400 - 500 kg/m <sup>3</sup>
Densidad relativa	Las informaciones sobre esta propiedad no están disponibles.

Cera 115308 Freeman  
***Safety Data Sheet***

**Freeman Blue Wire Wax**

Date of Preparation: June 1, 2015

<b>Section 1 Chemical Product and Company Identification</b>													
<p><b>1.1 Product identifiers</b> Product name: Freeman Blue Wire Wax</p> <p><b>1.2 Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against</b> Identified uses: N/A</p> <p><b>1.3 Details of the supplier of the safety data sheet</b> Freeman Manufacturing and Supply Company 1101 Moore Road, Avon, OH 44011 Phone (440) 934-1902 FAX (440) 934-7200</p> <p><b>1.4 Emergency telephone number</b> Emergency Phone (800) 424-9300</p>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <th colspan="2" style="padding: 2px;">HMIS</th> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;"><b>H</b></td> <td style="padding: 2px;">0</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;"><b>F</b></td> <td style="padding: 2px;">1</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;"><b>R</b></td> <td style="padding: 2px;">0</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="padding: 2px;"><b>PPE</b></td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="padding: 2px;">Sec. 8</td> </tr> </table>	HMIS		<b>H</b>	0	<b>F</b>	1	<b>R</b>	0	<b>PPE</b>		Sec. 8	
HMIS													
<b>H</b>	0												
<b>F</b>	1												
<b>R</b>	0												
<b>PPE</b>													
Sec. 8													
<b>Section 2 Hazards Identification</b>													
<p><b>2.1 Classification of the substance or mixture</b> Not a hazardous substance or mixture.</p> <p><b>2.2 GHS Label elements, including precautionary statements</b> Not a hazardous substance or mixture.</p> <p><b>2.3 Hazards not otherwise classified (HNOC) or not covered by GHS</b> None.</p>													
<b>Section 3 Composition/Information on Ingredients</b>													
<p><b>3.1 Substance</b> Proprietary mixture of waxes. No ingredients are hazardous according to OSHA criteria. No components need to be disclosed according to the applicable regulations.</p>													
<b>Section 4 First Aid Measures</b>													
<p><b>4.1 Description of first aid measures</b></p> <p><b>If inhaled</b> Move person into fresh air. If not breathing, give artificial respiration.</p> <p><b>In case of skin contact</b> Wash off with soap and plenty of water.</p> <p><b>In case of eye contact</b> Flush eyes with water as a precaution.</p> <p><b>If swallowed</b> Never give anything by mouth to an unconscious person. Rinse mouth with water.</p> <p><b>4.2 Most important symptoms and effects, both acute and delayed</b> The most important known symptoms and effects are described in the labelling (see section 2.2) and/or in section 11.</p> <p><b>4.3 Indication of any immediate medical attention and special treatment needed</b> No data available.</p>													

## Freeman Blue Wire Wax

<b>Section 5 Fire Fighting Measures</b>	
<b>5.1 Extinguishing media</b>	Suitable extinguishing media: Use water spray, alcohol-resistant foam, dry chemical or carbon dioxide.
<b>5.2 Special hazards arising from the substance or mixture</b>	Nature of decomposition products not known.
<b>5.3 Advice for firefighters</b>	Wear self-contained breathing apparatus for firefighting if necessary.
<b>5.4 Further information</b>	No data available.
<b>Section 6 Accidental Release Measures</b>	
<b>6.1 Personal precautions, protective equipment and emergency procedures</b>	Avoid dust formation. Avoid breathing vapors, mist or gas. For personal protection see section 8.
<b>6.2 Environmental precautions</b>	Do not let product enter drains.
<b>6.3 Methods and materials for containment and cleaning up</b>	Sweep up and shovel. Keep in suitable, closed containers for disposal.
<b>Section 7 Handling and Storage</b>	
<b>7.1 Precautions for safe handling</b>	Use normal precautions when handling hot molten liquid solutions. Do not breathe fumes or vapor from heated material. Do not allow hot material to contact skin. Provide appropriate exhaust ventilation at places where dust is formed. Try to avoid creating dust.
<b>7.2 Conditions for safe storage, including any incompatibilities</b>	Store at ambient temperatures in closed containers. This material can catch fire if overheated. Do not heat this material above the flash point. Keep away from flame and open electrical coils. No chemical incompatibilities.
<b>Section 8 Exposure Controls/Personal Protection</b>	
<b>8.1 Control parameters</b>	<b>Components with workplace control parameters</b> Wax Fume                      ACGIH STEL: 2 mg/m <sup>3</sup> NIOSH TWA: 2 mg/m <sup>3</sup>
<b>8.2 Exposure controls</b>	<b>Appropriate engineering controls</b> Provide exhaust ventilation or other engineering controls to keep the airborne concentrations of mists and/or vapors below the recommended exposure limits (see below). An eye wash station and safety shower should be located near the workstation.
<b>8.3 Personal protective equipment</b>	<b>Eye /face protection</b> Use a full-face shield and safety glasses if handling heated material. With product at ambient temperatures, use safety glasses equipped with side shields.

## Freeman Blue Wire Wax

### Section 8 Exposure Controls/Personal Protection cont.

#### 8.4 Skin protection

##### Hand Protection

When handling product at elevated temperatures, use heat-resistant gloves. With product at ambient temperatures, use disposable nitrile, neoprene or butyl rubber gloves with repeated or prolonged use.

##### Body Protection

Prevent skin contact when handling heated material. Use insulated, heat resistant clothing such as apron or slicker suit.

#### 8.5 Respiratory Protection

The need for respiratory protection is not anticipated under normal use conditions and with adequate ventilation. If elevated airborne concentrations above applicable workplace exposure levels are anticipated, a NIOSH-approved organic vapor respirator equipped with a dust/mist prefilter should be used.

#### 8.6 Safety Stations

Make emergency eyewash stations, safety/quick-drench showers, and washing facilities available in work area.

#### 8.7 General Hygienic Practices

Avoid breathing dust, vapor or mist. Avoid contamination of food, beverages, or smoking materials. Wash thoroughly after handling, and before eating, drinking or smoking. Remove contaminated clothing promptly and clean thoroughly before reuse.

### Section 9 Physical and Chemical Properties

#### 9.1 Information on basic physical and chemical properties

<b>Appearance</b>	Blue solid
<b>Odor</b>	Mild
<b>Odor Threshold</b>	No data available
<b>pH</b>	No data available
<b>Melting Point</b>	No data available
<b>Ring and Ball Softening Point</b>	177°F
<b>VOC Content</b>	0
<b>Initial boiling point &amp; boiling range</b>	No data available
<b>Flash Point(COC)</b>	465°F (240°C)
<b>Evaporation rate</b>	No data available
<b>Flammability (solid, gas)</b>	No data available
<b>Upper/lower flammability</b>	No data available
<b>Vapor Pressure</b>	No data available
<b>Vapor density</b>	No data available
<b>Relative density (g/cc)</b>	0.9 ±0.05
<b>Water Solubility</b>	Insoluble
<b>Coefficient: n-octanol/ water</b>	No data available
<b>Auto-ignition temperature</b>	No data available
<b>Viscosity</b>	No data available
<b>Explosive Properties</b>	None
<b>Oxidizing Properties</b>	None
<b>% Volatile</b>	0

## Freeman Blue Wire Wax

<b>Section 10 Stability and Reactivity</b>	
<b>10.1 Reactivity</b>	None.
<b>10.2 Chemical stability</b>	Stable under recommended storage conditions.
<b>10.3 Possibility of hazardous reactions</b>	None.
<b>10.4 Conditions to avoid</b>	Heat and open flames.
<b>10.5 Incompatible materials</b>	None.
<b>10.6 Hazardous decomposition products</b>	Thermal oxidative decomposition can produce CO and CO <sub>2</sub> .
<b>Section 11 Toxicological Information</b>	
<b>11.1 Information on toxicological effects</b>	
<b>Acute toxicity</b>	No data available
<b>Inhalation</b>	No data available
<b>Dermal</b>	No data available
<b>Skin corrosion/irritation</b>	No data available
<b>Serious eye damage/eye irritation</b>	No data available
<b>Respiratory or skin sensitization</b>	No data available
<b>Germ cell mutagenicity</b>	No data available
<b>Carcinogenicity</b>	
<b>IARC</b>	No component of this product present at levels greater than or equal to 0.1% is identified as probable, possible or confirmed human carcinogen.
<b>ACGIH</b>	No component of this product present at levels greater than or equal to 0.1% is identified as a carcinogen or potential carcinogen.
<b>NTP</b>	No component of this product present at levels greater than or equal to 0.1% is identified as a known or anticipated carcinogen.
<b>OSHA</b>	No component of this product present at levels greater than or equal to 0.1% is identified as a carcinogen or potential carcinogen.
<b>Reproductive toxicity</b>	No data available
<b>Specific target organ toxicity</b>	
- single exposure	No data available
<b>Specific target organ toxicity</b>	
- repeated exposure	No data available
<b>Aspiration hazard</b>	No data available
<b>Section 12 Ecological Information</b>	
<b>12.1 Toxicity</b>	No data available
<b>12.2 Persistence and degradability</b>	No data available
<b>12.3 Bioaccumulative potential</b>	No data available
<b>12.4 Mobility in soil</b>	No data available
<b>12.5 Results of PBT &amp; vPvB assessment</b>	No data available

## Freeman Blue Wire Wax

<b>Section 13 Disposal Considerations</b>
<p><b>13.1 Disposal</b> Use safety containers for disposal. Contact your supplier or a licensed contractor for detailed recommendations. Follow applicable Federal, state, and local regulations.</p>
<b>Section 14 Transport Information</b>
<p><b>14.1 Shipping Name:</b> <b>DOT:</b> Not regulated <b>TDG:</b> Not regulated <b>IMDG:</b> Not regulated <b>IATA:</b> Not regulated</p>
<b>Section 15 Regulatory Information</b>
<p><b>15.1 US Federal Regulations</b> RCRA Hazardous Waste Number (40 CFR 261.33): Not listed RCRA Hazardous Waste Classification (40 CFR 261): Not classified CERCLA Hazardous Substance (40 CFR 302.4): Listed/unlisted specific per RCRA Sec. 3001 SARA 311/312 Codes: No hazard categories identified SARA Toxic Chemical (40 CFR 372.65): No components were identified TSCA Inventory Status: All ingredients listed on TSCA inventory requirements</p> <p><b>15.2 State Regulations</b> This product is not known to contain any components for which the State of California has found to cause cancer, birth defects or other reproductive harm.</p>
<b>Section 16 Other Information</b>
<p><b>16.1 Disclaimer</b> The following supersedes Buyer's documents. SELLER MAKES NO REPRESENTATION OR WARRANTY, EXPRESSED OR IMPLIED, INCLUDING ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. No statements herein are to be construed as inducements to infringe any relevant patent. Under no circumstances shall Seller be liable for incidental, consequential or indirect damages for alleged negligence, breach of warranty, strict of liability arising in connection with the product(s). Buyer's sole remedy and Seller's sole liability for any claims shall be Buyer's purchase price. Data and results are based on controlled lab work and must be confirmed by Buyer by testing for its intended conditions of use. The product(s) has not been tested for, and is therefore not recommended for, uses for which prolonged contact with mucous membranes, abraded skin, or blood is intended; or for uses for which implantation within the human body is intended.</p>

## ANEXO A4: Ficha técnica driver A4988



**A4988**

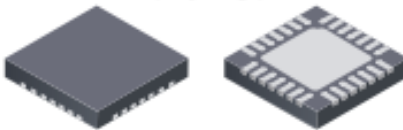
### *DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection*

#### Features and Benefits

- Low  $R_{DS(ON)}$  outputs
- Automatic current decay mode detection/selection
- Mixed and Slow current decay modes
- Synchronous rectification for low power dissipation
- Internal UVLO
- Crossover-current protection
- 3.3 and 5 V compatible logic supply
- Thermal shutdown circuitry
- Short-to-ground protection
- Shorted load protection
- Five selectable step modes: full,  $1/2$ ,  $1/4$ ,  $1/8$ , and  $1/16$

#### Package:

28-contact QFN  
with exposed thermal pad  
5 mm × 5 mm × 0.90 mm  
(ET package)



Approximate size

#### Description

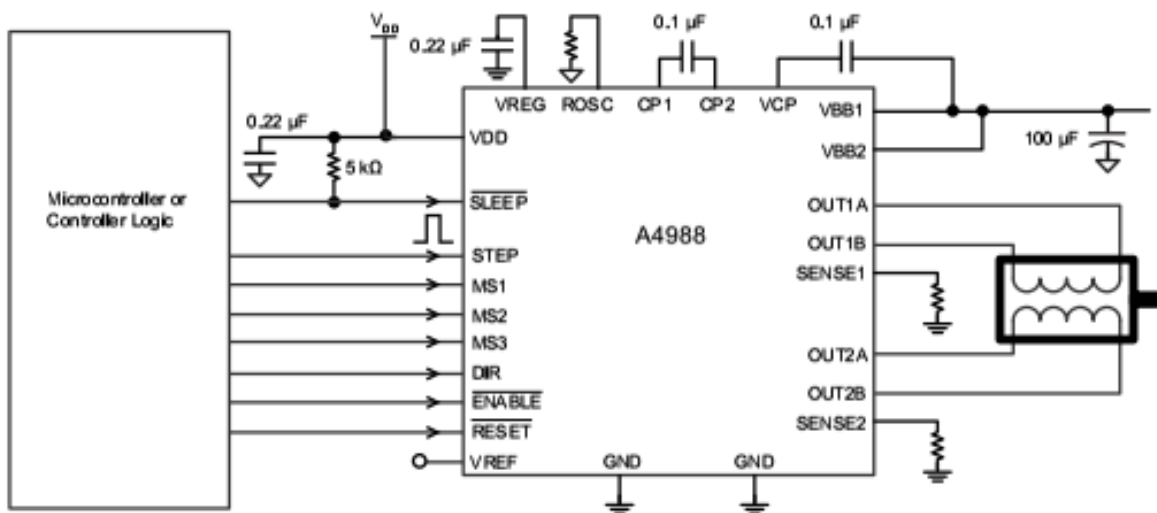
The A4988 is a complete microstepping motor driver with built-in translator for easy operation. It is designed to operate bipolar stepper motors in full-, half-, quarter-, eighth-, and sixteenth-step modes, with an output drive capacity of up to 35 V and  $\pm 2$  A. The A4988 includes a fixed off-time current regulator which has the ability to operate in Slow or Mixed decay modes.

The translator is the key to the easy implementation of the A4988. Simply inputting one pulse on the STEP input drives the motor one microstep. There are no phase sequence tables, high frequency control lines, or complex interfaces to program. The A4988 interface is an ideal fit for applications where a complex microprocessor is unavailable or is overburdened.

During stepping operation, the chopping control in the A4988 automatically selects the current decay mode, Slow or Mixed. In Mixed decay mode, the device is set initially to a fast decay for a proportion of the fixed off-time, then to a slow decay for the remainder of the off-time. Mixed decay current control results in reduced audible motor noise, increased step accuracy, and reduced power dissipation.

*Continued on the next page...*

#### Typical Application Diagram





# A4988

## DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection

### Description (continued)

Internal synchronous rectification control circuitry is provided to improve power dissipation during PWM operation. Internal circuit protection includes: thermal shutdown with hysteresis, undervoltage lockout (UVLO), and crossover-current protection. Special power-on sequencing is not required.

The A4988 is supplied in a surface mount QFN package (ES), 5 mm × 5 mm, with a nominal overall package height of 0.90 mm and an exposed pad for enhanced thermal dissipation. It is lead (Pb) free (suffix -T), with 100% matte tin plated leadframes.

### Selection Guide

Part Number	Package	Packing
A4988SETTR-T	28-contact QFN with exposed thermal pad	1500 pieces per 7-in. reel

### Absolute Maximum Ratings

Characteristic	Symbol	Notes	Rating	Units
Load Supply Voltage	$V_{BB}$		35	V
Output Current	$I_{OUT}$		±2	A
Logic Input Voltage	$V_{IN}$		-0.3 to 5.5	V
Logic Supply Voltage	$V_{DD}$		-0.3 to 5.5	V
Motor Outputs Voltage			-2.0 to 37	V
Sense Voltage	$V_{SENSE}$		-0.5 to 0.5	V
Reference Voltage	$V_{REF}$		5.5	V
Operating Ambient Temperature	$T_A$	Range S	-20 to 85	°C
Maximum Junction	$T_{J(max)}$		150	°C
Storage Temperature	$T_{stg}$		-55 to 150	°C



Allegro MicroSystems, LLC  
115 Northeast Cutoff  
Worcester, Massachusetts 01615-0036 U.S.A.  
1.508.853.5000; www.allegromicro.com

2

# A4988

## DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection

ELECTRICAL CHARACTERISTICS<sup>1</sup> at  $T_A = 25^\circ\text{C}$ ,  $V_{BB} = 35\text{ V}$  (unless otherwise noted)

Characteristics	Symbol	Test Conditions	Min.	Typ. <sup>2</sup>	Max.	Units
<b>Output Drivers</b>						
Load Supply Voltage Range	$V_{BB}$	Operating	8	–	35	V
Logic Supply Voltage Range	$V_{DD}$	Operating	3.0	–	5.5	V
Output On Resistance	$R_{DSON}$	Source Driver, $I_{OUT} = -1.5\text{ A}$	–	320	430	m $\Omega$
		Sink Driver, $I_{OUT} = 1.5\text{ A}$	–	320	430	m $\Omega$
Body Diode Forward Voltage	$V_F$	Source Diode, $I_F = -1.5\text{ A}$	–	–	1.2	V
		Sink Diode, $I_F = 1.5\text{ A}$	–	–	1.2	V
Motor Supply Current	$I_{BB}$	$f_{PWM} < 50\text{ kHz}$	–	–	4	mA
		Operating, outputs disabled	–	–	2	mA
Logic Supply Current	$I_{DD}$	$f_{PWM} < 50\text{ kHz}$	–	–	8	mA
		Outputs off	–	–	5	mA
<b>Control Logic</b>						
Logic Input Voltage	$V_{IN(1)}$		$V_{DD} \times 0.7$	–	–	V
	$V_{IN(0)}$		–	–	$V_{DD} \times 0.3$	V
Logic Input Current	$I_{IN(1)}$	$V_{IN} = V_{DD} \times 0.7$	–20	<1.0	20	$\mu\text{A}$
	$I_{IN(0)}$	$V_{IN} = V_{DD} \times 0.3$	–20	<1.0	20	$\mu\text{A}$
Microstep Select	$R_{MS1}$	MS1 pin	–	100	–	k $\Omega$
	$R_{MS2}$	MS2 pin	–	50	–	k $\Omega$
	$R_{MS3}$	MS3 pin	–	100	–	k $\Omega$
Logic Input Hysteresis	$V_{HYS(IN)}$	As a % of $V_{DD}$	5	11	19	%
Blank Time	$t_{BLANK}$		0.7	1	1.3	$\mu\text{s}$
Fixed Off-Time	$t_{OFF}$	OSC = $V_{DD}$ or GND	20	30	40	$\mu\text{s}$
		$R_{OSC} = 25\text{ k}\Omega$	23	30	37	$\mu\text{s}$
Reference Input Voltage Range	$V_{REF}$		0	–	4	V
Reference Input Current	$I_{REF}$		–3	0	3	$\mu\text{A}$
Current Trip-Level Error <sup>3</sup>	$err_I$	$V_{REF} = 2\text{ V}$ , % $I_{THPMAX} = 38.27\%$	–	–	$\pm 15$	%
		$V_{REF} = 2\text{ V}$ , % $I_{THPMAX} = 70.71\%$	–	–	$\pm 5$	%
		$V_{REF} = 2\text{ V}$ , % $I_{THPMAX} = 100.00\%$	–	–	$\pm 5$	%
Crossover Dead Time	$t_{DT}$		100	475	800	ns
<b>Protection</b>						
Overcurrent Protection Threshold <sup>4</sup>	$I_{OCPST}$		2.1	–	–	A
Thermal Shutdown Temperature	$T_{TSD}$		–	165	–	$^\circ\text{C}$
Thermal Shutdown Hysteresis	$T_{TSDHYS}$		–	15	–	$^\circ\text{C}$
VDD Undervoltage Lockout	$V_{DDUVLO}$	$V_{DD}$ rising	2.7	2.8	2.9	V
VDD Undervoltage Hysteresis	$V_{DDUVLOHYS}$		–	90	–	mV

<sup>1</sup>For input and output current specifications, negative current is defined as coming out of (sourcing) the specified device pin.

<sup>2</sup>Typical data are for initial design estimations only, and assume optimum manufacturing and application conditions. Performance may vary for individual units, within the specified maximum and minimum limits.

<sup>3</sup> $V_{ERR} = [(V_{REF}/8) - V_{SENSE}] / (V_{REF}/8)$ .

<sup>4</sup>Overcurrent protection (OCP) is tested at  $T_A = 25^\circ\text{C}$  in a restricted range and guaranteed by characterization.



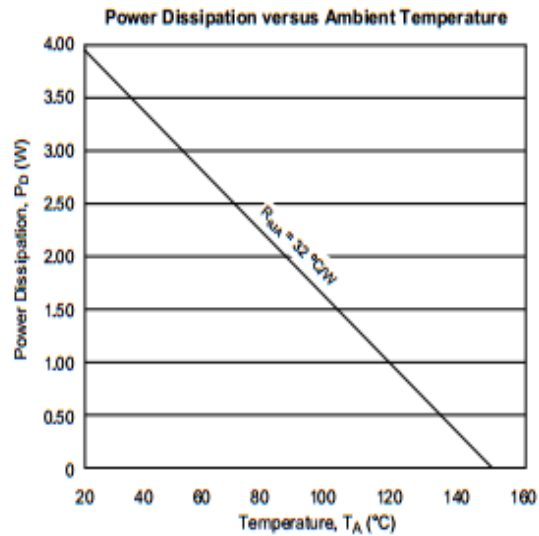
Allegro MicroSystems, LLC  
115 Northeast Cuttuff  
Worcester, Massachusetts 01615-0036 U.S.A.  
1.508.853.5000; www.allegromicro.com

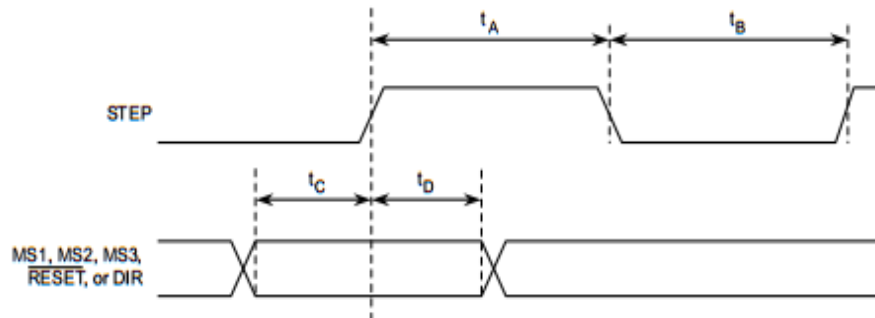
4

### THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Test Conditions*	Value	Units
Package Thermal Resistance	$R_{\theta JA}$	Four-layer PCB, based on JEDEC standard	32	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$

\*Additional thermal information available on Allegro Web site.





Time Duration	Symbol	Typ.	Unit
STEP minimum, HIGH pulse width	$t_A$	1	$\mu s$
STEP minimum, LOW pulse width	$t_B$	1	$\mu s$
Setup time, input change to STEP	$t_C$	200	ns
Hold time, input change to STEP	$t_D$	200	ns

Figure 1: Logic Interface Timing Diagram

Table 1: Microstepping Resolution Truth Table

MS1	MS2	MS3	Microstep Resolution	Excitation Mode
L	L	L	Full Step	2 Phase
H	L	L	Half Step	1-2 Phase
L	H	L	Quarter Step	W1-2 Phase
H	H	L	Eighth Step	2W1-2 Phase
H	H	H	Sixteenth Step	4W1-2 Phase

input sequences the translator and advances the motor one increment. The translator controls the input to the DACs and the direction of current flow in each winding. The size of the increment is determined by the combined state of the MSx inputs.

**Direction Input (DIR).** This determines the direction of rotation of the motor. Changes to this input do not take effect until the next STEP rising edge.

**Internal PWM Current Control.** Each full-bridge is controlled by a fixed off-time PWM current control circuit that limits the load current to a desired value,  $I_{TRIP}$ . Initially, a diagonal pair of source and sink FET outputs are enabled and current flows through the motor winding and the current sense resistor,  $R_{SE}$ . When the voltage across  $R_{SE}$  equals the DAC output voltage, the current sense comparator resets the PWM latch. The latch then turns off the appropriate source driver and initiates a fixed off time decay mode

The maximum value of current limiting is set by the selection of  $R_{SE}$  and the voltage at the VREF pin. The transconductance function is approximated by the maximum value of current limiting,  $I_{TRIPMAX}$  (A), which is set by

$$I_{TRIPMAX} = V_{REF} / (8 \times R_{SE})$$

where  $R_{SE}$  is the resistance of the sense resistor ( $\Omega$ ) and  $V_{REF}$  is the input voltage on the REF pin (V).

The DAC output reduces the  $V_{REF}$  output to the current sense comparator in precise steps, such that

$$I_{TRIP} = (\%I_{TRIPMAX} / 100) \times I_{TRIPMAX}$$

(See Table 2 for  $\%I_{TRIPMAX}$  at each step.)

It is critical that the maximum rating (0.5 V) on the SENSE1 and SENSE2 pins is not exceeded.

**Fixed Off-Time.** The internal PWM current control circuitry uses a one-shot circuit to control the duration of time that the DMOS FETs remain off. The off-time,  $t_{OFF}$ , is determined by the ROSC terminal. The ROSC terminal has three settings:

- ROSC tied to VDD — off-time internally set to 30  $\mu$ s, decay mode is automatic Mixed decay except when in full step where decay mode is set to Slow decay
- ROSC tied directly to ground — off-time internally set to 30  $\mu$ s, current decay is set to Mixed decay for both increasing and decreasing currents for all step modes.

- ROSC through a resistor to ground — off-time is determined by the following formula, the decay mode is automatic Mixed decay for all step modes except full step which is set to slow decay.

$$t_{OFF} \approx R_{OSC} / 825$$

Where  $t_{OFF}$  is in  $\mu$ s.

**Blanking.** This function blanks the output of the current sense comparators when the outputs are switched by the internal current control circuitry. The comparator outputs are blanked to prevent false overcurrent detection due to reverse recovery currents of the clamp diodes, and switching transients related to the capacitance of the load. The blank time,  $t_{BLANK}$  ( $\mu$ s), is approximately

$$t_{BLANK} \approx 1 \mu s$$

#### Shorted-Load and Short-to-Ground Protection.

If the motor leads are shorted together, or if one of the leads is shorted to ground, the driver will protect itself by sensing the overcurrent event and disabling the driver that is shorted, protecting the device from damage. In the case of a short-to-ground, the device will remain disabled (latched) until the SLEEP input goes high or VDD power is removed. A short-to-ground overcurrent event is shown in Figure 4.

When the two outputs are shorted together, the current path is through the sense resistor. After the blanking time ( $\approx 1 \mu$ s) expires, the sense resistor voltage is exceeding its trip value, due to the overcurrent condition that exists. This causes the driver to go into a fixed off-time cycle. After the fixed off-time expires the driver turns on again and the process repeats. In this condition the driver is completely protected against overcurrent events, but the short is repetitive with a period equal to the fixed off-time of the driver. This condition is shown in Figure 5.

During a shorted load event it is normal to observe both a positive and negative current spike as shown in Figure 3, due to the direction change implemented by the Mixed decay feature. This is shown in Figure 6. In both instances the overcurrent circuitry is protecting the driver and prevents damage to the device.

**Charge Pump (CP1 and CP2).** The charge pump is used to generate a gate supply greater than that of VBB for driving the source-side FET gates. A 0.1  $\mu$ F ceramic capacitor, should be connected between CP1 and CP2. In addition, a 0.1  $\mu$ F ceramic capacitor is required between VCP and VBB, to act as a reservoir for operating the high-side FET gates.

Capacitor values should be Class 2 dielectric  $\pm 15\%$  maximum, or tolerance R, according to EIA (Electronic Industries Alliance) specifications.



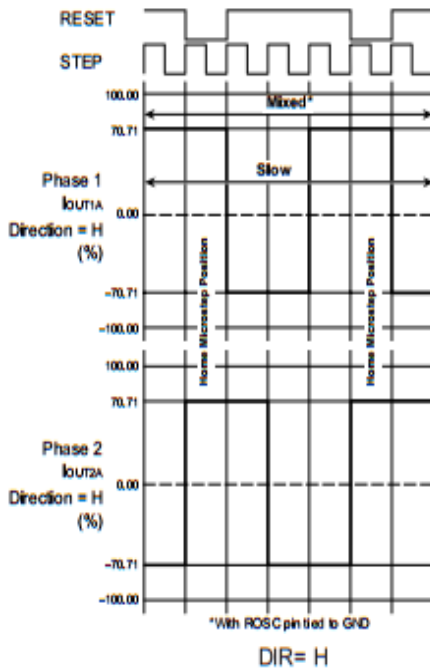


Figure 9: Decay Mode for Full-Step Increments

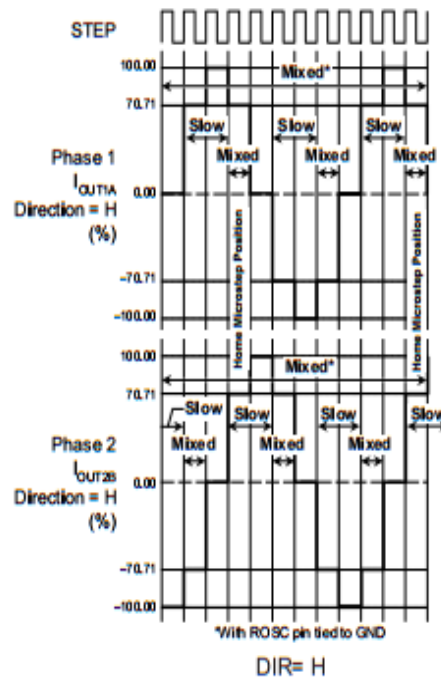


Figure 10: Decay Modes for Half-Step Increments

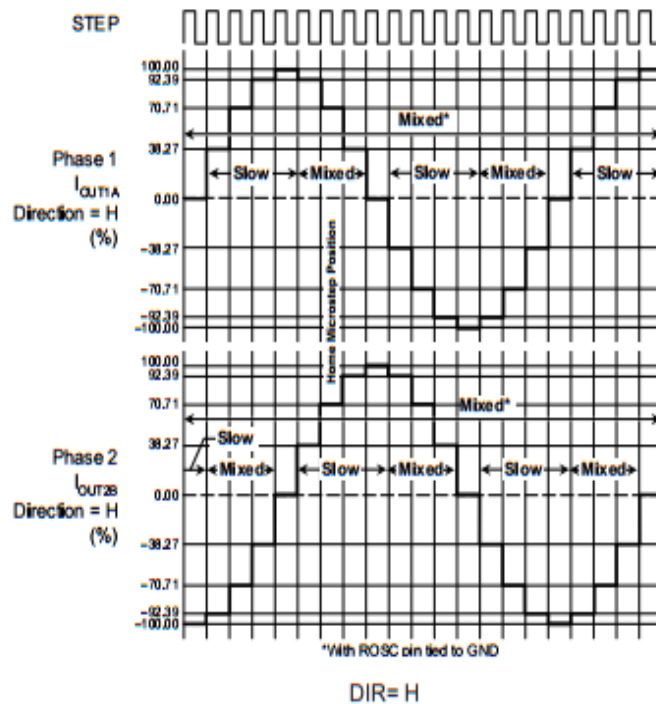


Figure 11: Decay Modes for Quarter-Step Increments

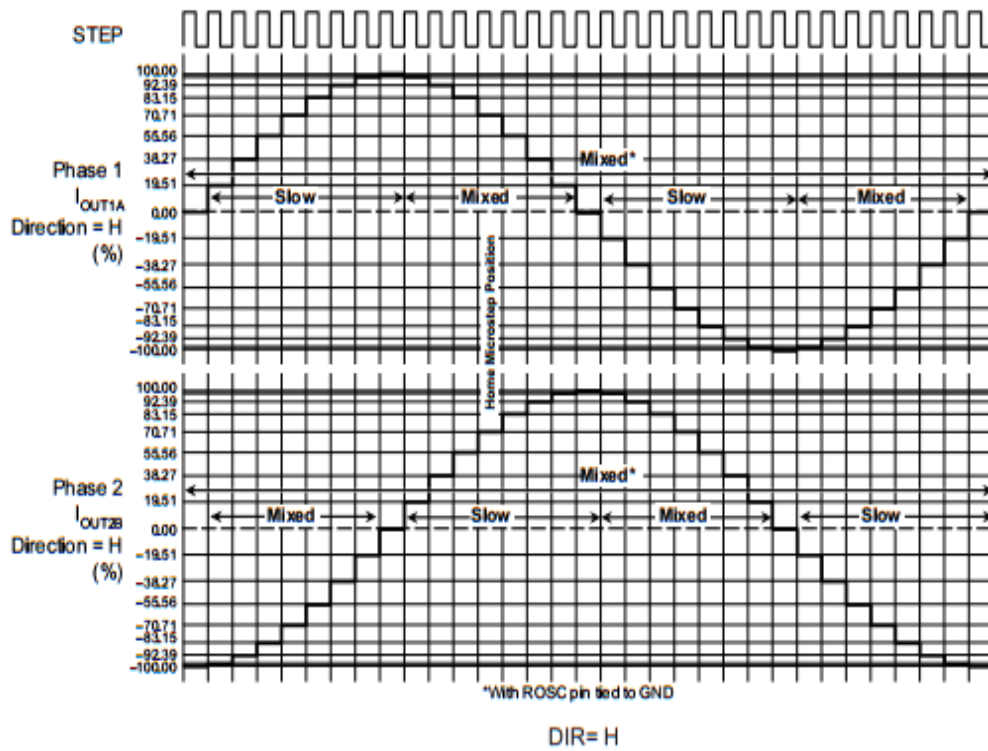


Figure 12: Decay Modes for Eighth-Step Increments

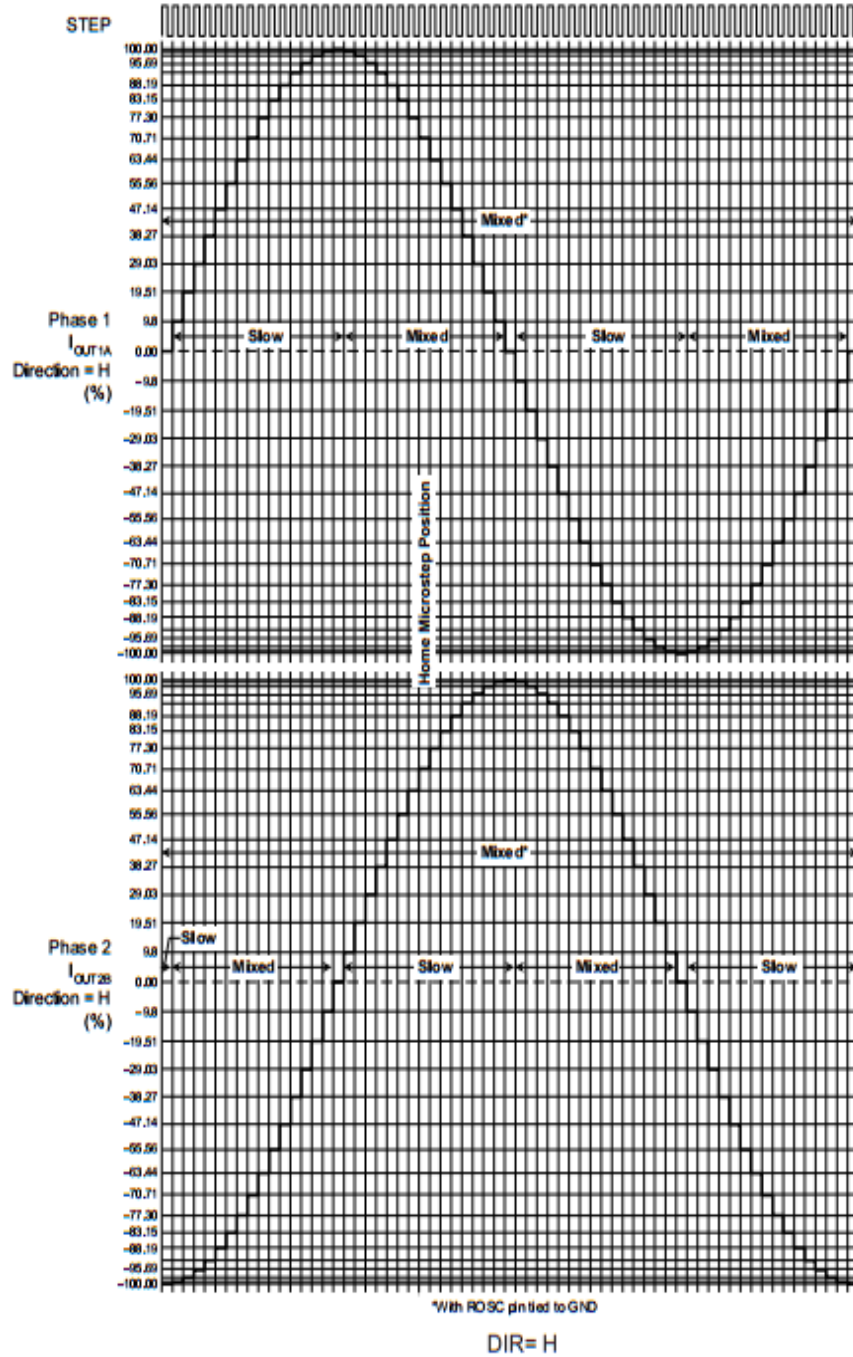
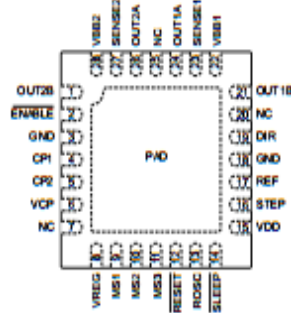


Figure 13: Decay Modes for Sixteenth-Step Increments





Pin-out Diagram



Terminal List Table

Name	Number	Description
CP1	4	Charge pump capacitor terminal
CP2	5	Charge pump capacitor terminal
VCP	6	Reservoir capacitor terminal
VREG	8	Regulator decoupling terminal
MS1	9	Logic input
MS2	10	Logic input
MS3	11	Logic input
RESET	12	Logic input
ROSC	13	Timing set
SLEEP	14	Logic input
VDD	15	Logic supply
STEP	16	Logic input
REF	17	$G_m$ reference voltage input
GND	3, 18	Ground*
DIR	19	Logic input
OUT1B	21	DMOS Full Bridge 1 Output B
VBB1	22	Load supply
SENSE1	23	Sense resistor terminal for Bridge 1
OUT1A	24	DMOS Full Bridge 1 Output A
OUT2A	26	DMOS Full Bridge 2 Output A
SENSE2	27	Sense resistor terminal for Bridge 2
VBB2	28	Load supply
OUT2B	1	DMOS Full Bridge 2 Output B
ENABLE	2	Logic input
NC	7, 20, 25	No connection
PAD	-	Exposed pad for enhanced thermal dissipation*

\*The GND pins must be tied together externally by connecting to the PAD ground plane under the device.

## ANEXO A5: Ficha técnica Arduino UNO

### Arduino Uno



Arduino Uno R3 Front

Arduino Uno R3 Back



Arduino Uno R2 Front



Arduino Uno SMD



Arduino Uno Front



Arduino Uno Back

### Overview

The Arduino Uno is a microcontroller board based on the ATmega328 ([datasheet](#)). It has 14 digital input/output pins (of which 6 can be used as PWM outputs), 6 analog inputs, a 16 MHz ceramic resonator, a USB connection, a power jack, an ICSP header, and a reset button. It contains everything needed to support the microcontroller; simply connect it to a computer with a USB cable or power it with a AC-to-DC adapter or battery to get started.

The Uno differs from all preceding boards in that it does not use the FTDI USB-to-serial driver chip. Instead, it features the Atmega16U2 (Atmega8U2 up to version R2) programmed as a USB-to-serial converter.

[Revision 2](#) of the Uno board has a resistor pulling the 8U2 HWB line to ground, making it easier to put into [DFU mode](#).

[Revision 3](#) of the board has the following new features:

- 1.0 pinout: added SDA and SCL pins that are near to the AREF pin and two other new pins placed near to the RESET pin, the IOREF that allow the shields to adapt to the voltage provided from the board. In future, shields will be compatible both with the board that use the AVR, which operate with 5V and with the Arduino Due that operate with 3.3V. The second one is a not connected pin, that is reserved for future purposes.
- Stronger RESET circuit.
- Atmega 16U2 replace the 8U2.

"Uno" means one in Italian and is named to mark the upcoming release of Arduino 1.0. The Uno and version 1.0 will be the reference versions of Arduino, moving forward. The Uno is the latest in a series of USB Arduino boards, and the reference model for the Arduino platform; for a comparison with previous versions, see the [index of Arduino boards](#).

### Summary

Microcontroller	ATmega328
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V

Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Clock Speed	16 MHz

## Schematic & Reference Design

EAGLE files: [arduino-uno-Rev3-reference-design.zip](#) (NOTE: works with Eagle 6.0 and newer)

Schematic: [arduino-uno-Rev3-schematic.pdf](#)

**Note:** The Arduino reference design can use an Atmega8, 168, or 328, Current models use an ATmega328, but an Atmega8 is shown in the schematic for reference. The pin configuration is identical on all three processors.

## Power

The Arduino Uno can be powered via the USB connection or with an external power supply. The power source is selected automatically.

External (non-USB) power can come either from an AC-to-DC adapter (wall-wart) or battery. The adapter can be connected by plugging a 2.1 mm center-positive plug into the board's power jack. Leads from a battery can be inserted in the Gnd and Vin pin headers of the POWER connector.

The board can operate on an external supply of 6 to 20 volts. If supplied with less than 7V, however, the 5V pin may supply less than five volts and the board may be unstable. If using more than 12V, the voltage regulator may overheat and damage the board. The recommended range is 7 to 12 volts.

The power pins are as follows:

- **VIN.** The input voltage to the Arduino board when it's using an external power source (as opposed to 5 volts from the USB connection or other regulated power source). You can supply voltage through this pin, or, if supplying voltage via the power jack, access it through this pin.
- **5V.** This pin outputs a regulated 5V from the regulator on the board. The board can be supplied with power either from the DC power jack (7 - 12V), the USB connector (5V), or the VIN pin of the board (7-12V). Supplying voltage via the 5V or 3.3V pins bypasses the regulator, and can damage your board. We don't advise it.
- **3V3.** A 3.3 volt supply generated by the on-board regulator. Maximum current draw is 50 mA.
- **GND.** Ground pins.

## Memory

The ATmega328 has 32 KB (with 0.5 KB used for the bootloader). It also has 2 KB of SRAM and 1 KB of EEPROM (which can be read and written with the [EEPROM library](#)).

## Input and Output

Each of the 14 digital pins on the Uno can be used as an input or output, using [pinMode\(\)](#), [digitalWrite\(\)](#), and [digitalRead\(\)](#) functions. They operate at 5 volts. Each pin can provide or receive a maximum of 40 mA and has an internal pull-up resistor (disconnected by default) of 20-50 kOhms. In addition, some pins have specialized functions:

- **Serial: 0 (RX) and 1 (TX).** Used to receive (RX) and transmit (TX) TTL serial data. These pins are connected to the corresponding pins of the ATmega8U2 USB-to-TTL Serial chip.
- **External Interrupts: 2 and 3.** These pins can be configured to trigger an interrupt on a low value, a rising or falling edge, or a change in value. See the [attachInterrupt\(\)](#) function for details.
- **PWM: 3, 5, 6, 9, 10, and 11.** Provide 8-bit PWM output with the [analogWrite\(\)](#) function.

- **SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK).** These pins support SPI communication using the [SPI library](#).
- **LED: 13.** There is a built-in LED connected to digital pin 13. When the pin is HIGH value, the LED is on, when the pin is LOW, it's off.

The Uno has 6 analog inputs, labeled A0 through A5, each of which provide 10 bits of resolution (i.e. 1024 different values). By default they measure from ground to 5 volts, though is it possible to change the upper end of their range using the AREF pin and the [analogReference\(\)](#) function. Additionally, some pins have specialized functionality:

- **TWI: A4 or SDA pin and A5 or SCL pin.** Support TWI communication using the [Wire library](#).

There are a couple of other pins on the board:

- **AREF.** Reference voltage for the analog inputs. Used with [analogReference\(\)](#).
- **Reset.** Bring this line LOW to reset the microcontroller. Typically used to add a reset button to shields which block the one on the board.

See also the [mapping between Arduino pins and ATmega328 ports](#). The mapping for the Atmega8, 168, and 328 is identical.

## Communication

The Arduino Uno has a number of facilities for communicating with a computer, another Arduino, or other microcontrollers. The ATmega328 provides UART TTL (5V) serial communication, which is available on digital pins 0 (RX) and 1 (TX). An ATmega16U2 on the board channels this serial communication over USB and appears as a virtual com port to software on the computer. The '16U2 firmware uses the standard USB COM drivers, and no external driver is needed. However, [on Windows, a .inf file is required](#). The Arduino software includes a serial monitor which allows simple textual data to be sent to and from the Arduino board. The RX and TX LEDs on the board will flash when data is being transmitted via the USB-to-serial chip and USB connection to the computer (but not for serial communication on pins 0 and 1).

A [SoftwareSerial library](#) allows for serial communication on any of the Uno's digital pins.

The ATmega328 also supports I2C (TWI) and SPI communication. The Arduino software includes a Wire library to simplify use of the I2C bus; see the [documentation](#) for details. For SPI communication, use the [SPI library](#).

## Programming

The Arduino Uno can be programmed with the Arduino software ([download](#)). Select "Arduino Uno from the **Tools > Board** menu (according to the microcontroller on your board). For details, see the [reference](#) and [tutorials](#).

The ATmega328 on the Arduino Uno comes preburned with a [bootloader](#) that allows you to upload new code to it without the use of an external hardware programmer. It communicates using the original STK500 protocol ([reference, C header files](#)).

You can also bypass the bootloader and program the microcontroller through the ICSP (In-Circuit Serial Programming) header; see [these instructions](#) for details.

The ATmega16U2 (or 8U2 in the rev1 and rev2 boards) firmware source code is available . The ATmega16U2/8U2 is loaded with a DFU bootloader, which can be activated by:

- On Rev1 boards: connecting the solder jumper on the back of the board (near the map of Italy) and then resetting the 8U2.
- On Rev2 or later boards: there is a resistor that pulling the 8U2/16U2 HWB line to ground, making it easier to put into DFU mode.

You can then use [Atmel's FLIP software](#) (Windows) or the [DFU programmer](#) (Mac OS X and Linux) to load a new firmware. Or you can use the ISP header with an external programmer (overwriting the DFU bootloader). See [this user-contributed tutorial](#) for more information.

## Automatic (Software) Reset

Rather than requiring a physical press of the reset button before an upload, the Arduino Uno is designed in a way that allows it to be reset by software running on a connected computer. One of the hardware flow control lines (DTR) of the ATmega8U2/16U2 is connected to the reset line of the ATmega328 via a 100 nanofarad capacitor. When this line is asserted (taken low), the reset line drops long enough to reset the chip. The Arduino software uses this capability to allow you to upload code by simply pressing the upload button in the Arduino environment. This means that the bootloader can have a shorter timeout, as the lowering of DTR can be well-coordinated with the start of the upload. This setup has other implications. When the Uno is connected to either a computer running Mac OS X or Linux, it resets each time a connection is made to it from software (via USB). For the following half-second or so, the bootloader is running on the Uno. While it is programmed to ignore malformed data (i.e. anything besides an upload of new code), it will intercept the first few bytes of data sent to the board after a connection is opened. If a sketch running on the board receives one-time configuration or other data when it first starts, make sure that the software with which it communicates waits a second after opening the connection and before sending this data.

The Uno contains a trace that can be cut to disable the auto-reset. The pads on either side of the trace can be soldered together to re-enable it. It's labeled "RESET-EN". You may also be able to disable the auto-reset by connecting a 110 ohm resistor from 5V to the reset line; see [this forum thread](#) for details.

## **USB Overcurrent Protection**

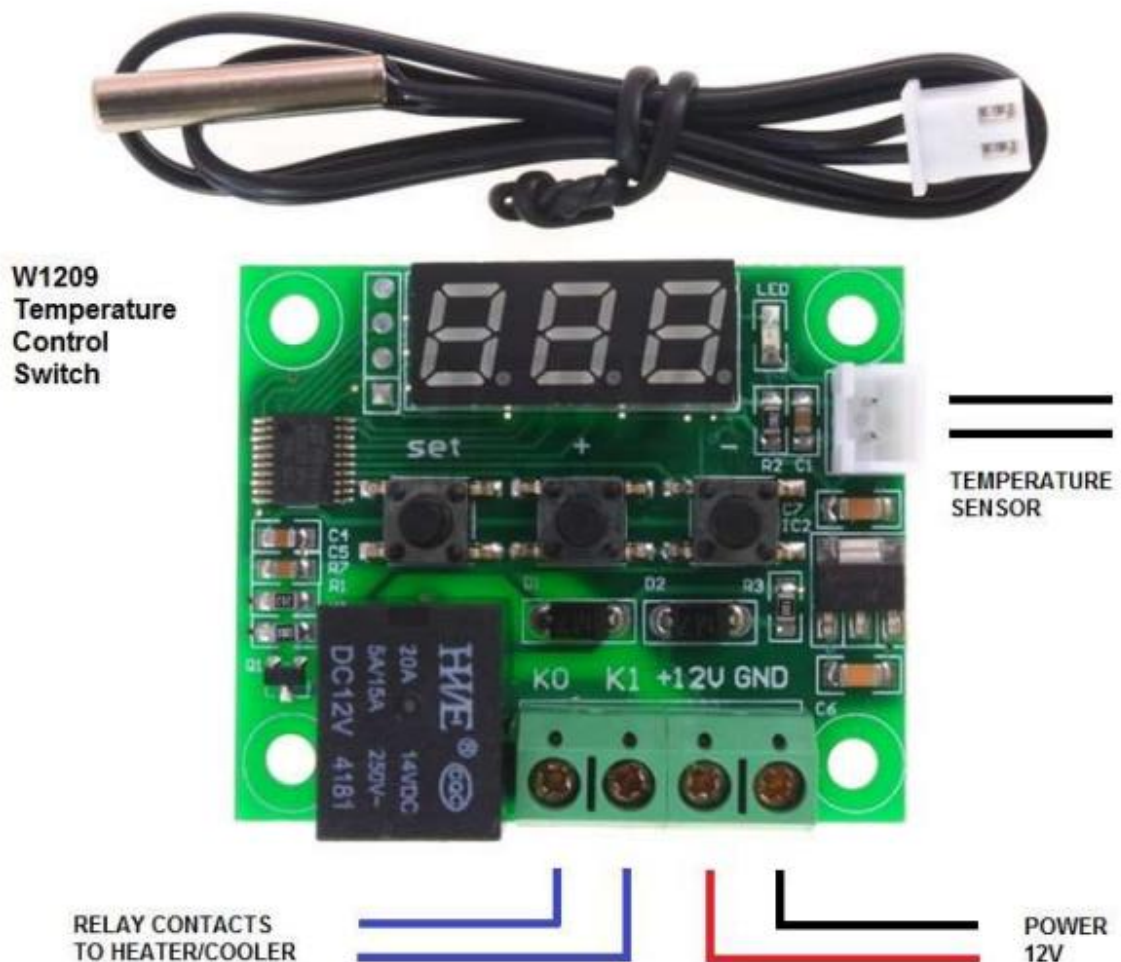
The Arduino Uno has a resettable polyfuse that protects your computer's USB ports from shorts and overcurrent. Although most computers provide their own internal protection, the fuse provides an extra layer of protection. If more than 500 mA is applied to the USB port, the fuse will automatically break the connection until the short or overload is removed.

## **Physical Characteristics**

The maximum length and width of the Uno PCB are 2.7 and 2.1 inches respectively, with the USB connector and power jack extending beyond the former dimension. Four screw holes allow the board to be attached to a surface or case. Note that the distance between digital pins 7 and 8 is 160 mil (0.16"), not an even multiple of the 100 mil spacing of the other pins.

## ANEXO A6: Ficha técnica termostato W1209

### W1209 Temperature Control Switch



#### DESCRIPTION:

The W1209 is an incredibly low cost yet highly functional thermostat controller. With this module you can intelligently control power to most types of electrical device based on the temperature sensed by the included high accuracy NTC temperature sensor. Although this module has an embedded microcontroller no programming knowledge is required. 3 tactile switches allow for configuring various parameters including on & off trigger temperatures. The on board relay can switch up to a maximum of 240V AC at 5A or 14V DC at 10A. The current temperature is displayed in degrees Centigrade via its 3 digit seven segment display and the current relay state by an on board LED.

## **SPECIFICATION:**

Temperature Control Range: -50 ~ 110 C  
Resolution at -9.9 to 99.9: 0.1 C  
Resolution at all other temperatures: 1 C  
Measurement Accuracy: 0.1 C  
Control Accuracy: 0.1 C  
Refresh Rate: 0.5 Seconds  
Input Power (DC): 12V  
Measuring Inputs: NTC (10K 0.5%)  
Waterproof Sensor: 0.5M  
Output: 1 Channel Relay Output, Capacity: 10A

### **Power Consumption**

Static Current: <=35mA  
Current: <=65mA

### **Environmental Requirements**

Temperature: -10 ~ 60 C  
Humidity: 20-85%

### **Dimensions**

48mm x 40mm x 14mm

### **Settings Chart**

Long press the "SET" button to activate the menu.

Code	Description	Range	Default Value
P0	Heat C/H	C	
P1	Backlash Set	0.1-15	2
P2	Upper Limit	110	110
P3	Lower Limit	-50 -50	
P4	Correction	-7.0 ~ 7.0	0
P5	Delay Start Time	0-10 mins	0
P6	High Temperature Alarm	0-110	OFF

Long pressing +- will reset all values to their default

### **Displaying the current temperature:**

The thermostat will display the current temperature in oC by default. When in any other mode making no input for approximately 5 seconds will cause the thermostat to return to this default display.

**Setting the trigger temperature:**

To set the trigger temperature press the button marked 'SET'. The seven segment display will flash. You can now set a trigger temperature (in °C) using the '+' and '-' buttons in 0.1 degree increments. If no buttons are pressed for approximately 2 seconds the trigger temperature will be stored and the display will return back to the current temperature.

**Setting the parameters:**

To set any parameter first long press the 'SET' button for at least 5 seconds. The seven segment display should now display 'P0'. This represents parameter P0. Pressing the '+' or '-' buttons will cycle through the various parameters (P0 to P6). Pressing the 'SET' button whilst any of these parameters are displayed will allow you to change the value for that parameter using the '+' and '-' buttons (see below). When finished setting a parameter press the set button to exit that option. If no buttons are pressed for approximately 5 seconds the thermostat will exit the parameter options and will return back to the default temperature display.

**Setting the cooling or heating parameter P0:**

The parameter P0 has two settings, C and H. When set to C (default) the relay will energise when the temperature is reached. Use this setting if connecting to an air-conditioning system. When set to H the relay will de-energise when the temperature is reached. Use this setting if controlling a heating device.

**Setting the hysteresis parameter P1:**

This sets how much change in temperature must occur before the relay will change state. For example if set to the default 2°C and the the trigger temperature has been set to 25°C, it will not de-energise until the temperature falls back below 23°C. Setting this hysteresis helps stop the thermostat from continually triggering when the temperature drifts around the trip temperature.

**Setting the upper limit of the thermostat parameter P2:**

This parameter limits the maximum trigger temperature that can be set. It can be used as a safety to stop an excessively high trigger temperature from accidentally being set by the user.

**Setting the lower limit of the thermostat parameter P3:**

This parameter limits the minimum trigger temperature that can be set. It can be used as a safety to stop an excessively low trigger temperature from accidentally being set by the user.

**Setting temperature offset correction parameter P4:**

Should you find there is a difference between the displayed temperature and the actual temperature (for instance if the temperature probe is on a long run of cable) you can make minor corrections to the temperature reading with this parameter.

**Setting the trigger delay parameter P5:**

This parameter allows for delaying switching of the relay when the trigger temperature has been reached. The parameter can be set in one minute increments up to a maximum of 10 minutes.

**Setting the high temperature alarm parameter P6:**

Setting a value for this parameter will cause the relay to switch off when the the temperature reaches this setting. The seven segment display will also show '---' to indicate an alarm condition. The relay will not re-energise until the temperature falls below this value. The default setting is OFF.



## ANEXO B: CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

```
/*      ***** MANEJO DE MOTORES A PASOS *****
*
* Se realiza a través del monitor serial el ingreso del tipo de giro de motor
* y las vueltas que se desea que dé (200 pasos una vuelta). Se tiene la posi-
* bilidad de frenado instantáneo con visualización del número de pasos dados
* hasta que se detuvo el motor.
*/

const int steppin = 10; // declaramos el pin 10 del arduino como step
const int dirpin = 13; // declaramos el pin 13 del arduino con dir
char movimiento = 'z';
int vueltas;
int steps = 0;
int i = 0;
int x = 0;
char AUX = 'z';

void setup() {

  pinMode(steppin, OUTPUT); // declaramos como salidas
  pinMode(dirpin, OUTPUT); // declaramos como salida
  Serial.begin(9600);

}

void loop() {

  Serial.println("Tipo de movimiento: [a] Avance [b] Avance rápido [c] Retroceso");
  Serial.print("Ingrese el tipo de movimiento: ");
  while (i == 0) {
    movimiento = Serial.read();
```

```

if (movimiento == 'a') {
    i = 1;
}
if (movimiento == 'b') {
    i = 1;
}
if (movimiento == 'c') {
    i = 1;
}
if (movimiento == 'f') {
    i = 1;
}
}
Serial.println(movimiento);
Serial.print("Ingrese el numero de vueltas que desea: ");
while (steps < 1) {
    vueltas = Serial.parseInt();
    steps = 200 * vueltas;
}
Serial.println(vueltas);

if (movimiento == 'a') { // Identificamos el tipo de giro que desea el usuario y
    digitalWrite(dirpin, LOW); // ponemos en bajo o 0 logico a pin dir para que gire hacia un
sentido
    for (x = 0; x < steps; x++) { // creamos un lazo [for], en nuestro caso el motor es de 200 pasos,
para dar una vuelta
        digitalWrite(stepin, HIGH); // las intrucciones que se encuentran dentro del lazo
        delay(30); // son las que haran que nuestro motor se mueva, es la parte donde van
los pulsos
        digitalWrite(stepin, LOW); // necesarios para que el motor se mueva
        delay(30);
        AUX = Serial.read(); // Incluimos un lectura serial dentro del [for] para estar atentos en
caso de que
        if (AUX == 'f') { // se requiera un frenado de emergencia del motor, con lo que
inmediatamente
            movimiento = 'f'; // se dirige al apagado el motor a la vez q rompe el lazo [for].

```

```

        break;
    }
}

Serial.print("Pasos dados: "); // Se imprime el numero de pasos dados, ya sea que terminó las
vuelatas solicitadas

Serial.println(x); // o si se presentó un frenado de emergencia.

Serial.println("\n");

movimiento = 'f';
}

if (movimiento == 'b') { // Identificamos el tipo de giro que desea el usuario y
    digitalWrite(dirpin, LOW); // ponemos en bajo o 0 logico a pin dir para que gire hacia un
    sentido

    for (x = 0; x < steps; x++) { // creamos un lazo [for], en nuestro caso el motor es de 200 pasos,
    para dar una vuelta

        digitalWrite(stepin, HIGH); // las intrucciones que se encuentran dentro del lazo

        delayMicroseconds(400); // son las que haran que nuestro motor se mueva, es la
        parte donde van los pulsos

        digitalWrite(stepin, LOW); // necesarios para que el motor se mueva

        delayMicroseconds(400);

        AUX = Serial.read(); // Incluimos un lectura serial dentro del [for] para estar atentos en
        caso de que

        if (AUX == 'f') { // se requiera un frenado de emergencia del motor, con lo que
        inmediatamente

            movimiento = 'f'; // se dirige al apagado el motor a la vez q rompe el lazo [for].

            break;

        }

    }

}

Serial.print("Pasos dados: "); // Se imprime el numero de pasos dados, ya sea que terminó las
vuelatas solicitadas

Serial.println(x); // o si se presentó un frenado de emergencia.

Serial.println("\n");

movimiento = 'f';
}

if (movimiento == 'c') {

```

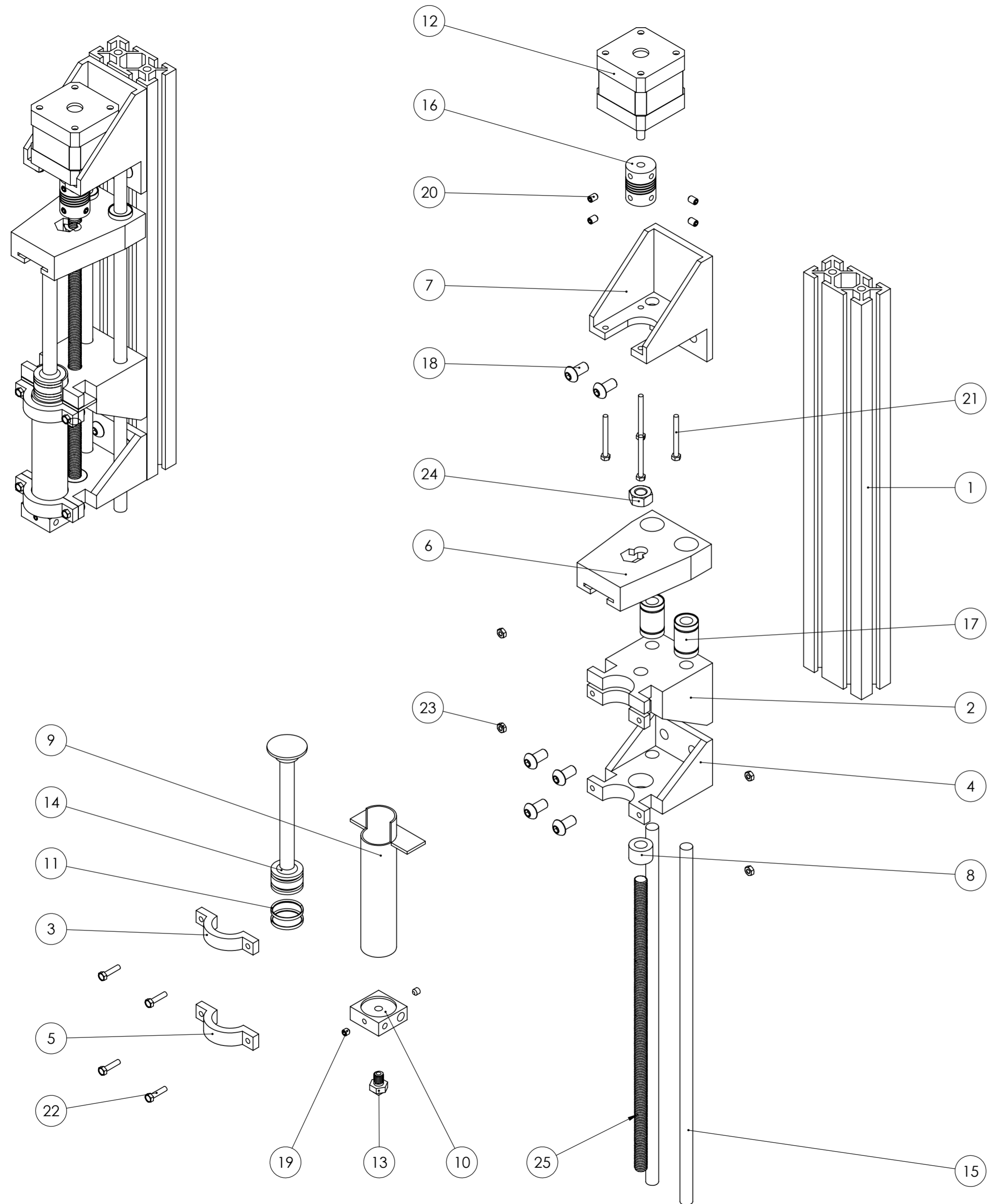
```
digitalWrite(dirpin, HIGH); // Ponemos en alto o 1 logico a pin dir para que gire hacia el otro
sentido
```

```
for (x = 0; x < steps; x++) {
  digitalWrite(stepin, HIGH);
  delayMicroseconds(400);
  digitalWrite(stepin, LOW);
  delayMicroseconds(400);
  char AUX = Serial.read();
  if (AUX == 'f') {
    movimiento = 'f';
    break;
  }
}
Serial.print("Pasos dados: ");
Serial.println(x);
Serial.println("\n");
movimiento = 'f';
}
```

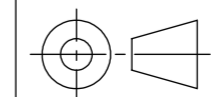
```
if (movimiento == 'f') { // Sentencia [if] que permite el reseteo de variables, así como el
frenado total del motor.
```

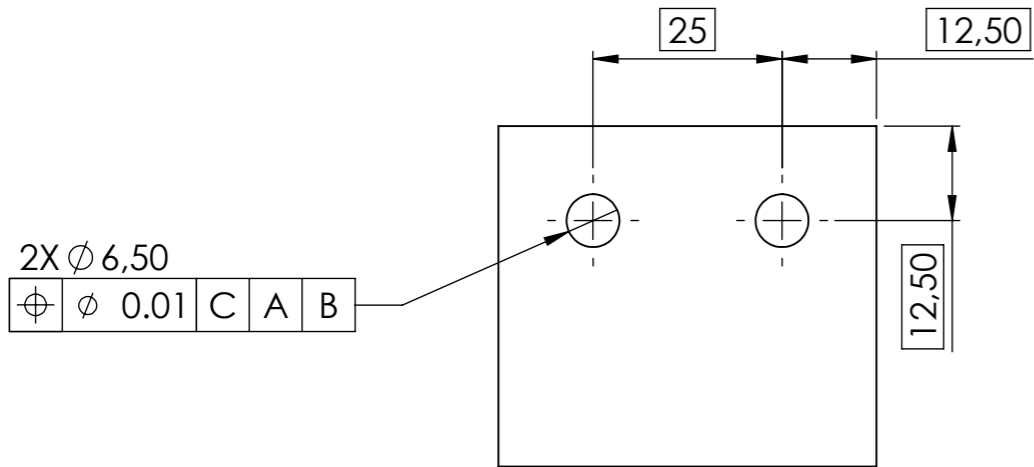
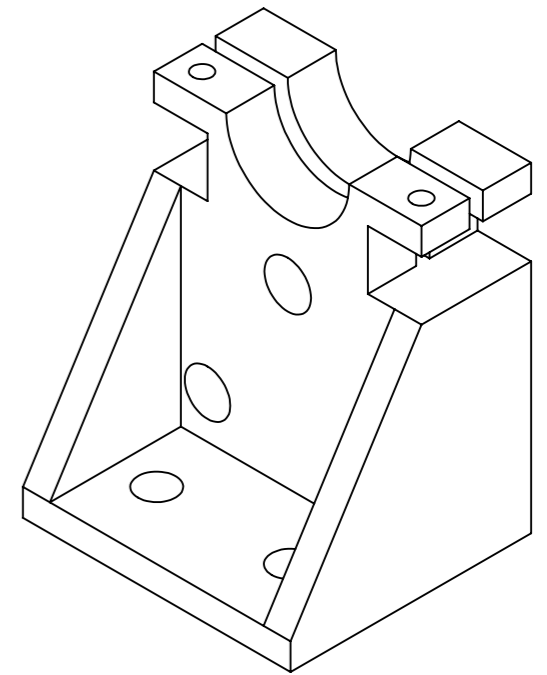
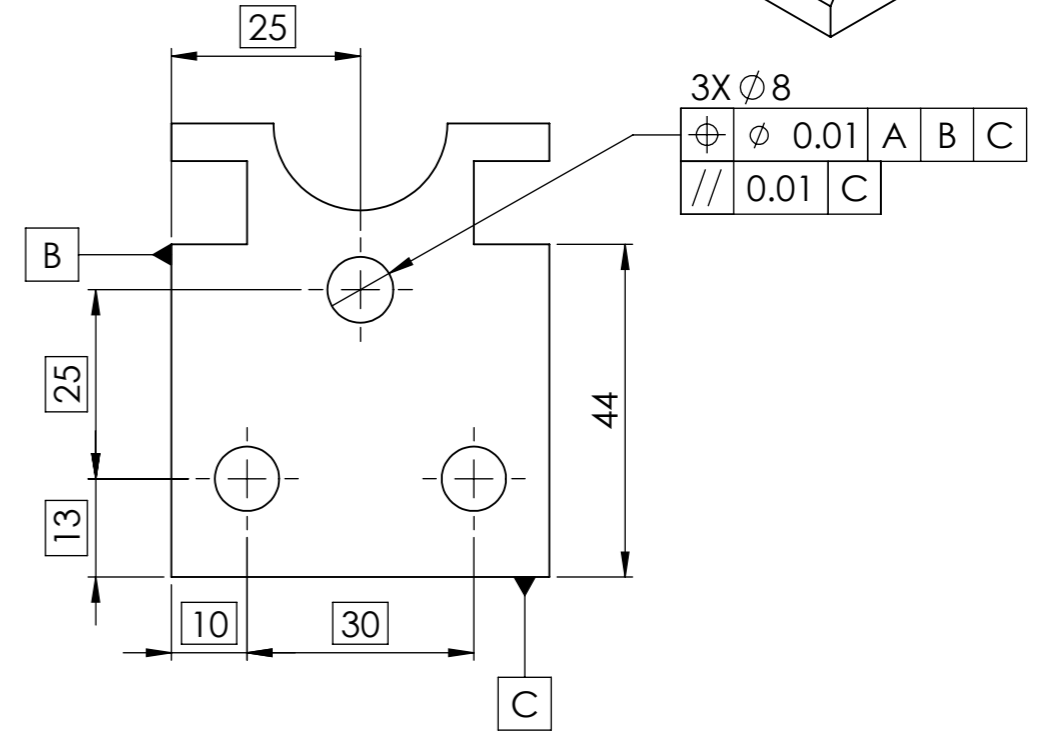
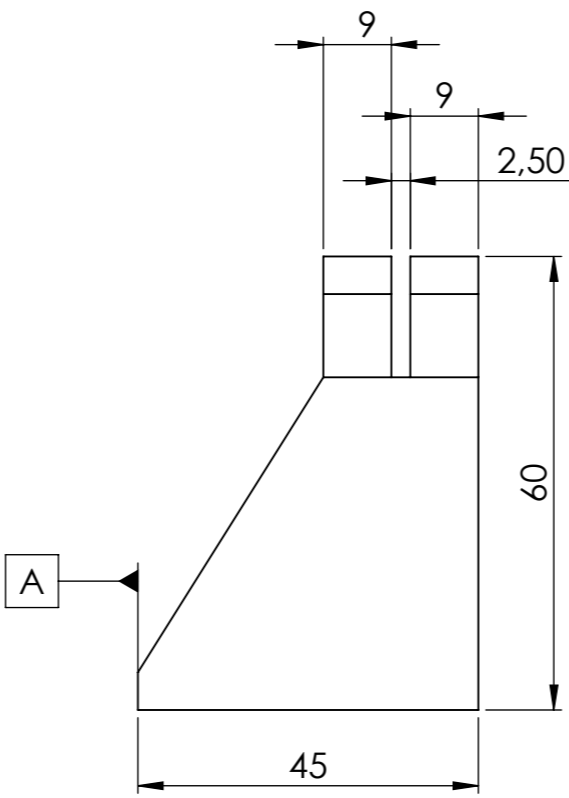
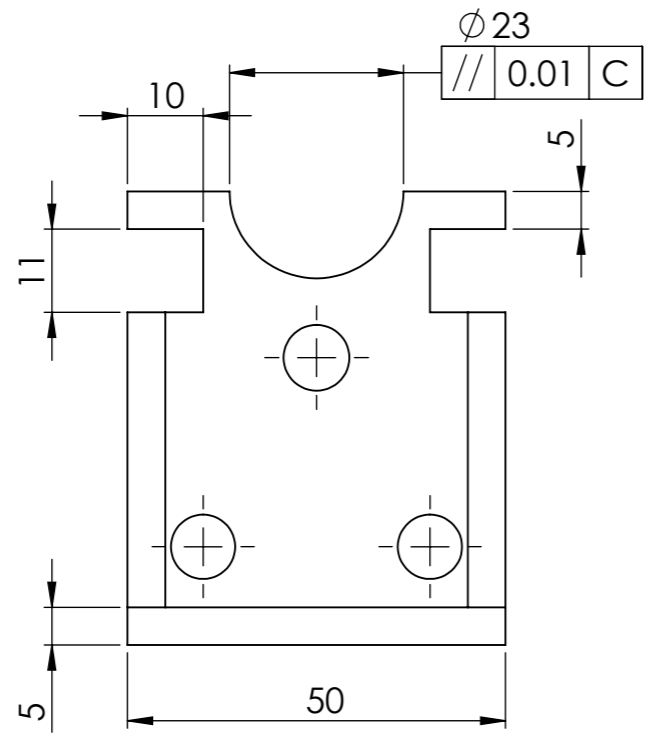
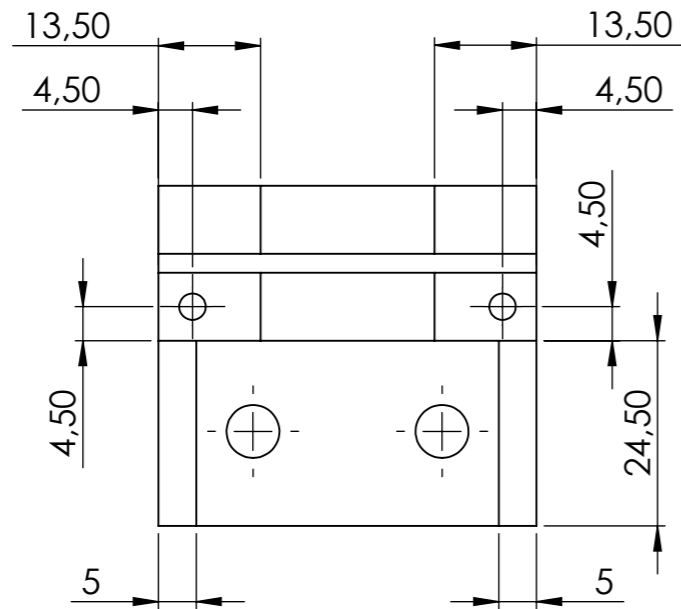
```
digitalWrite(stepin, LOW);
steps = 0;
i = 0;
}
}
```

## **ANEXO C: PLANOS DE CONJUNTO Y DESPIECE**

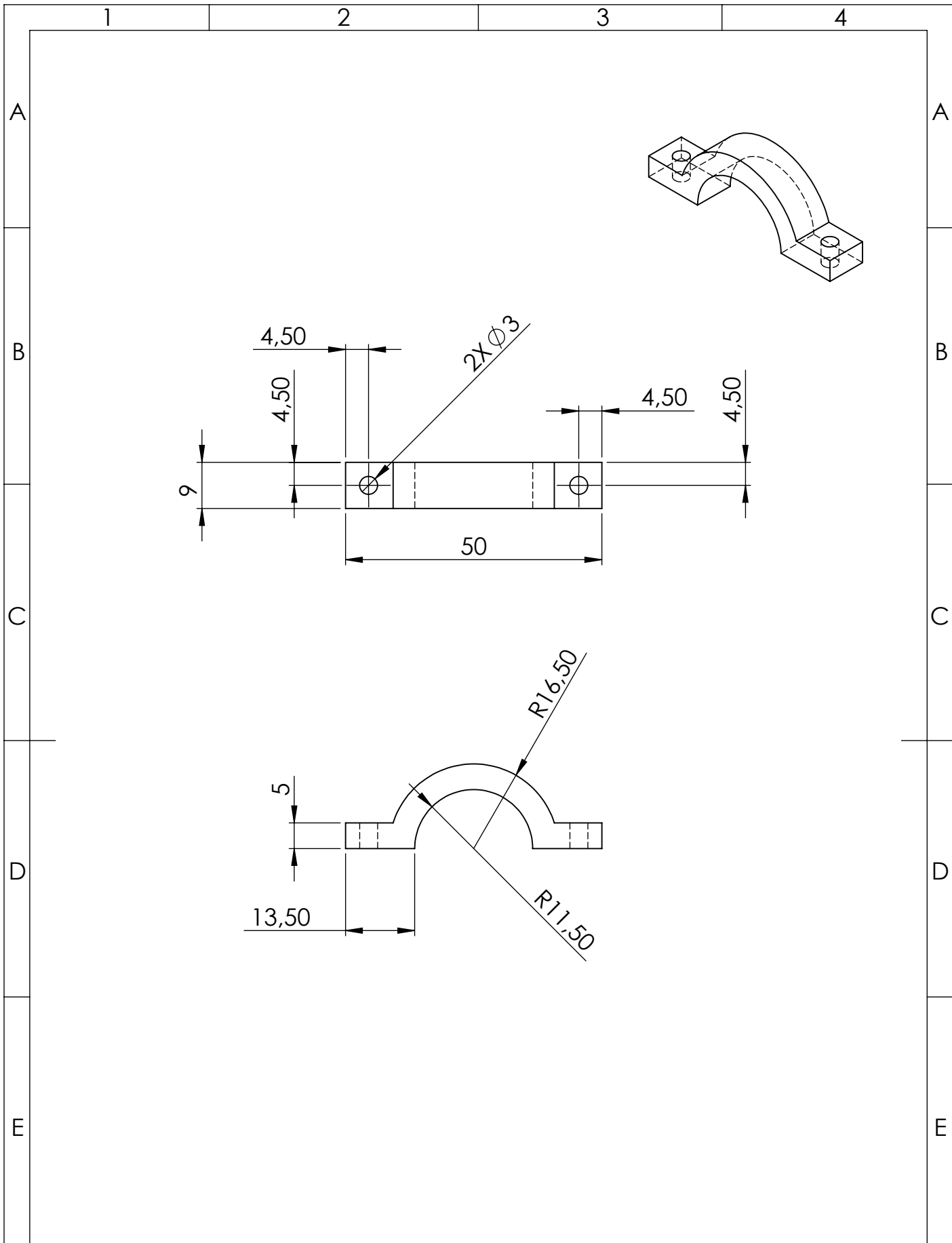


MARCA	NOMBRE	MATERIAL	PLANO N°	CANTIDAD
1	Riel	Aluminio		1
2	Soporte de cilindro 1	PLA	P.E. 1.001	1
3	Abrazadera 1	PLA	P.E. 1.002	1
4	Soporte de cilindro 2	PLA	P.E. 1.003	1
5	Abrazadera 2	PLA	P.E. 1.004	1
6	Soporte de émbolo	PLA	P.E. 1.005	1
7	Soporte de motor	PLA	P.E. 1.006	1
8	Cojinete de deslizamiento	Bronce	P.E. 1.007	1
9	Cilindro	Cobre	P.E. 1.008	1
10	Calefactor	Bronce	P.E. 1.009	1
11	Empaque	Caucho		2
12	Motor de pasos			1
13	Nozzle	Bronce		1
14	Embolo	Aluminio	P.E. 1.010	1
15	Varilla lisa	Acero plata		2
16	Acople flexible			1
17	Rodamiento lineal			2
18	Perno Allen M6 x 1.0			6
19	Prisionero M4 x 0.7 x 4mm			2
20	Prisionero M4 x 0.7 x 6mm			4
21	Perno M3 x 0.5 x 50mm			4
22	Perno M3 x 0.5 x 13mm			4
23	Tuerca M3 x 0.5			4
24	Tuerca M8 x 1.25			1
25	Varilla roscada M8			1

TRAT. TÉRMICO	NINGUNO	E.P.N.	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
RECUBRIMIENTO	NINGUNO		
MATERIAL	Tolerancias no indicadas UNE-EN 22768	ESCALA 1:2	DIB. DAVID VEGA GALARZA DIS. DAVID VEGA GALARZA REV.
		<b>EXTRUSOR</b>	<b>P. E. 1.000</b>
			FECHA 07/09/2017

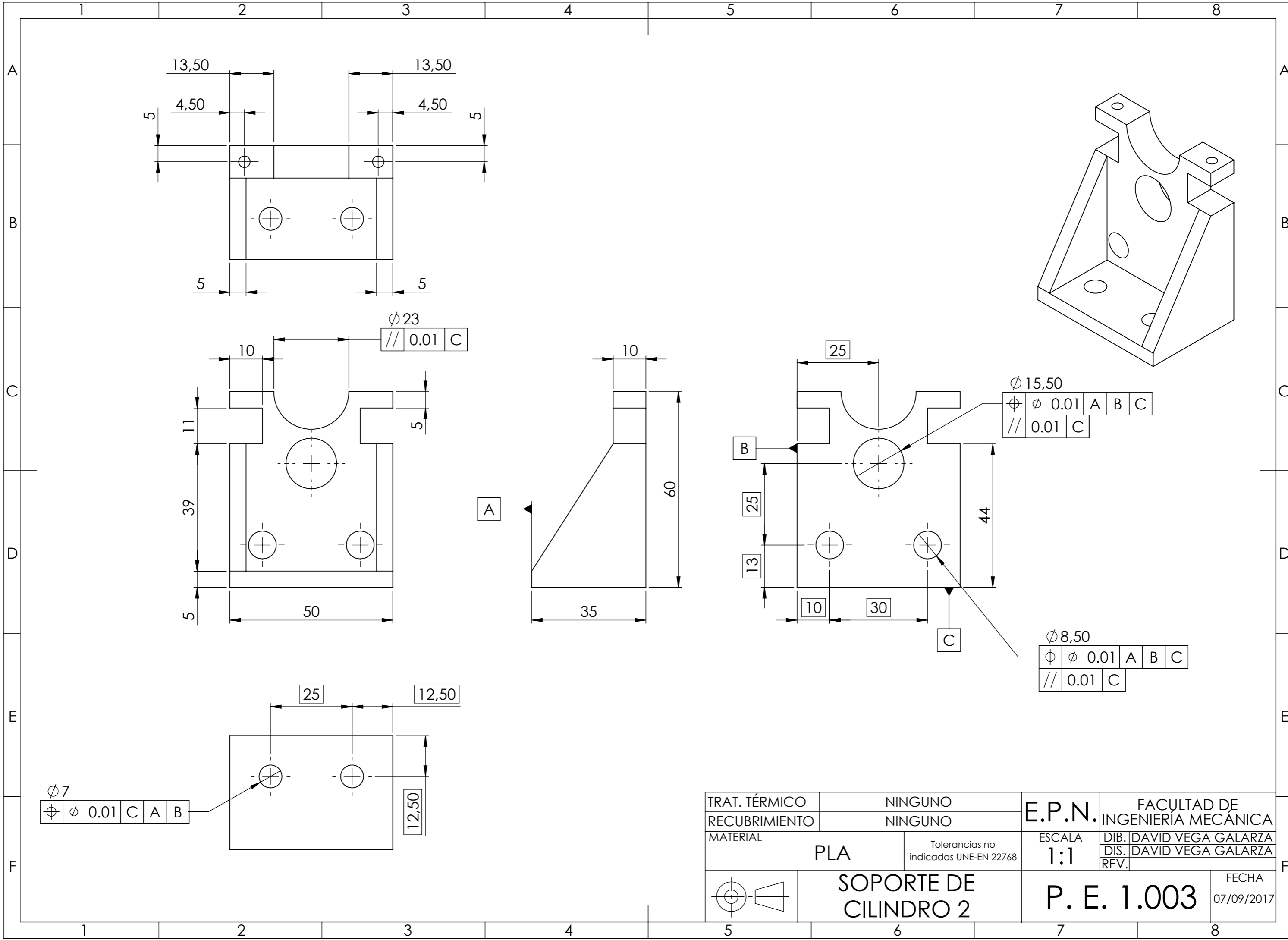


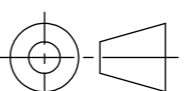
TRAT. TÉRMICO	NINGUNO	<b>E.P.N.</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
RECUBRIMIENTO	NINGUNO		DIB. DAVID VEGA GALARZA	DIS. DAVID VEGA GALARZA
MATERIAL	PLA	ESCALA	REV.	
	Tolerancias no indicadas UNE-EN 22768	1:1		
	<b>SOPORTE DE CILINDRO 1</b>	<b>P. E. 1.001</b>	FECHA	
			07/09/2017	

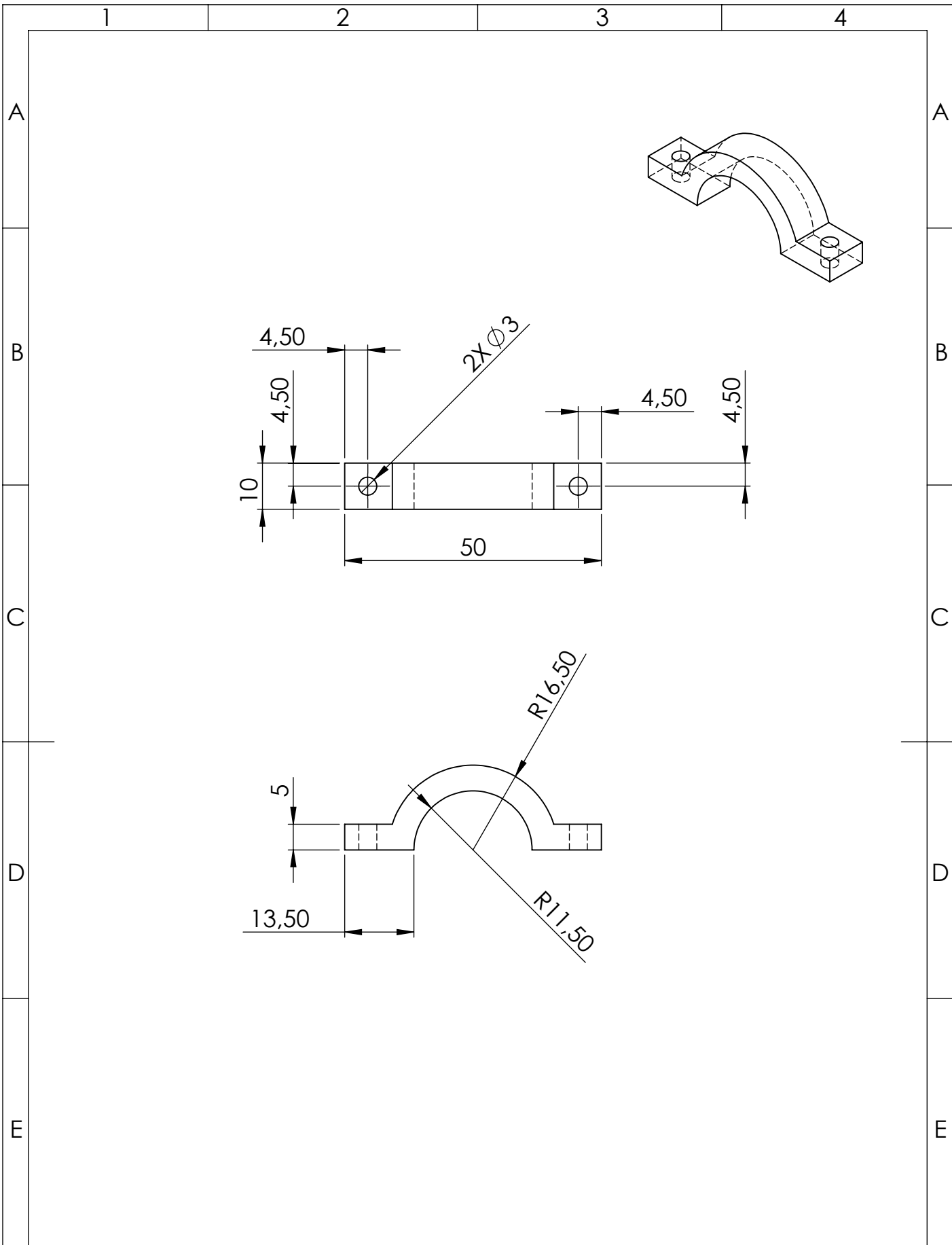


TRAT. TÉRMICO		NINGUNO		<b>E.P.N.</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
RECUBRIMIENTO		NINGUNO			DIB. DAVID VEGA GALARZA	
MATERIAL		PLA	Tolerancias no indicadas UNE-EN 22768	ESCALA	DIS. DAVID VEGA GALARZA	
				1:1	REV.	
		<b>ABRAZADERA 1</b>		FECHA 07/09/2017		

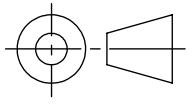




TRAT. TÉRMICO	NINGUNO	<b>E.P.N.</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
RECUBRIMIENTO	NINGUNO		DIB. DAVID VEGA GALARZA
MATERIAL	PLA	ESCALA	DIS. DAVID VEGA GALARZA
	Tolerancias no indicadas UNE-EN 22768	1:1	REV.
 <b>SOPORTE DE CILINDRO 2</b>		<b>P. E. 1.003</b>	FECHA
			07/09/2017



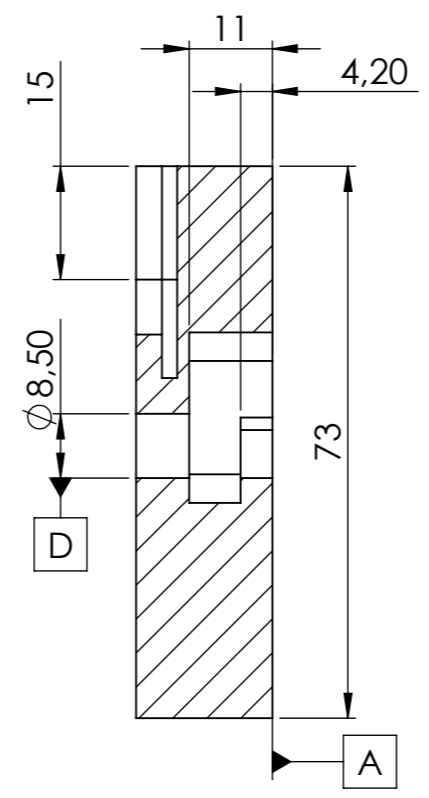
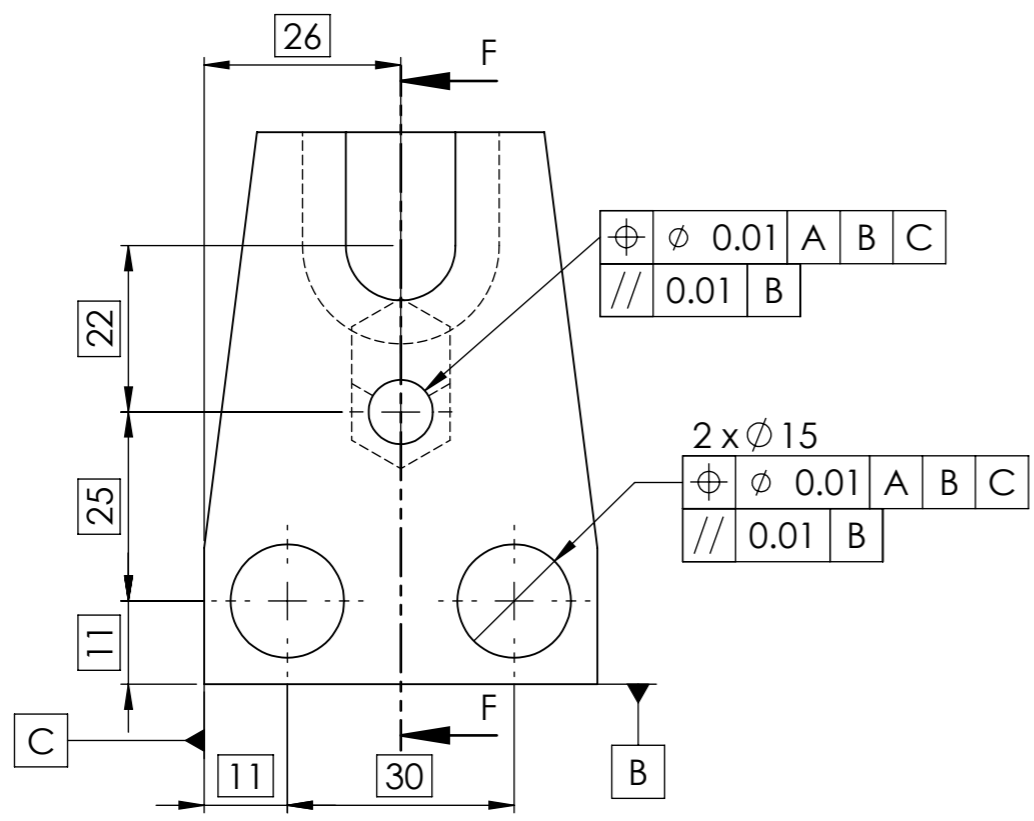
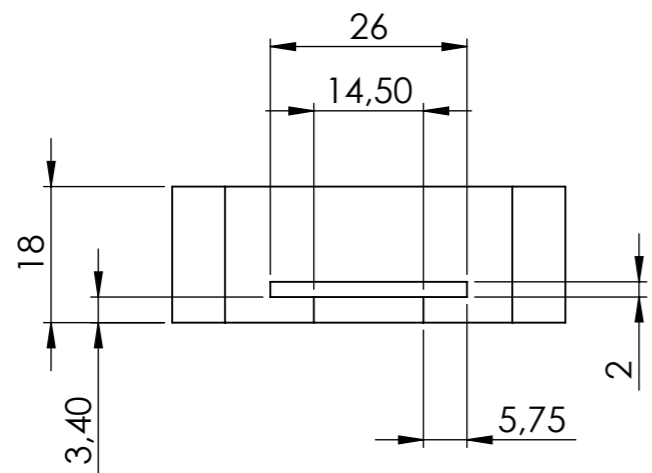
TRAT. TÉRMICO	NINGUNO	<b>E.P.N.</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
RECUBRIMIENTO	NINGUNO		DIB. DAVID VEGA GALARZA
MATERIAL	PLA	ESCALA 1:1	DIS. DAVID VEGA GALARZA
Tolerancias no indicadas UNE-EN 22768			REV.



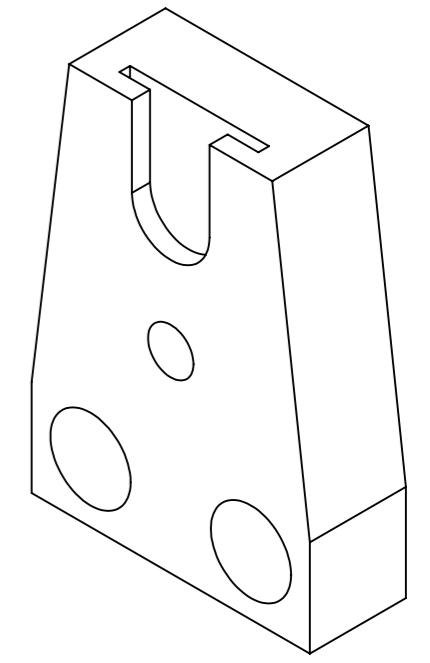
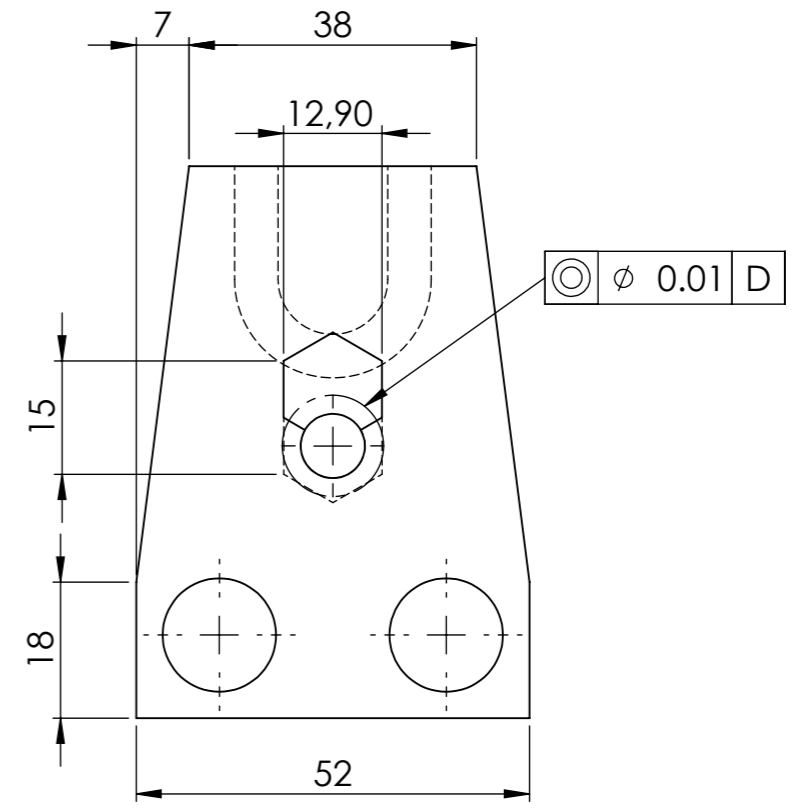
**ABRAZADERA 2**

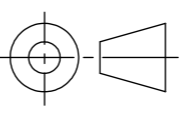
**P. E. 1.004**

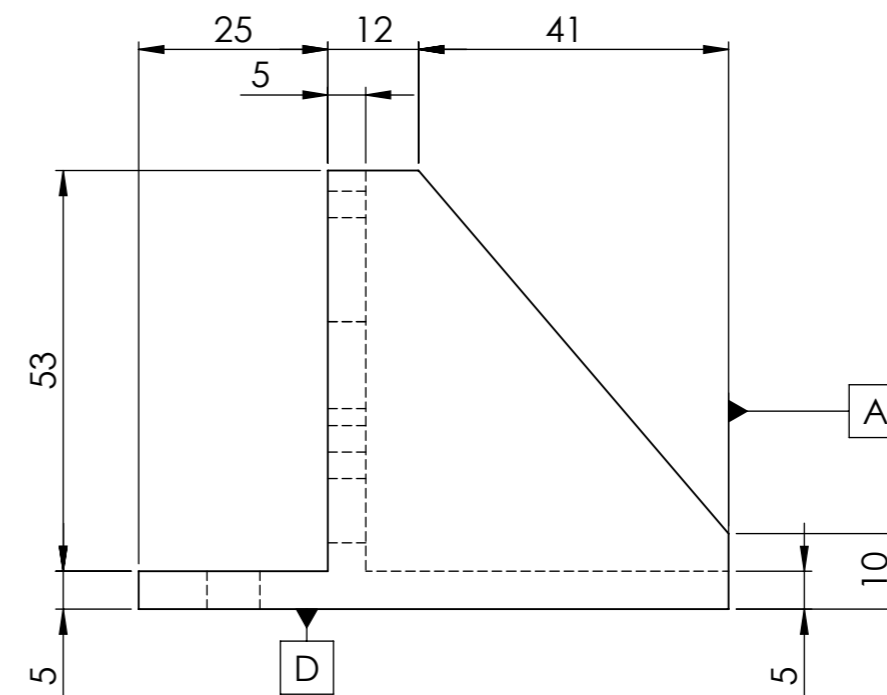
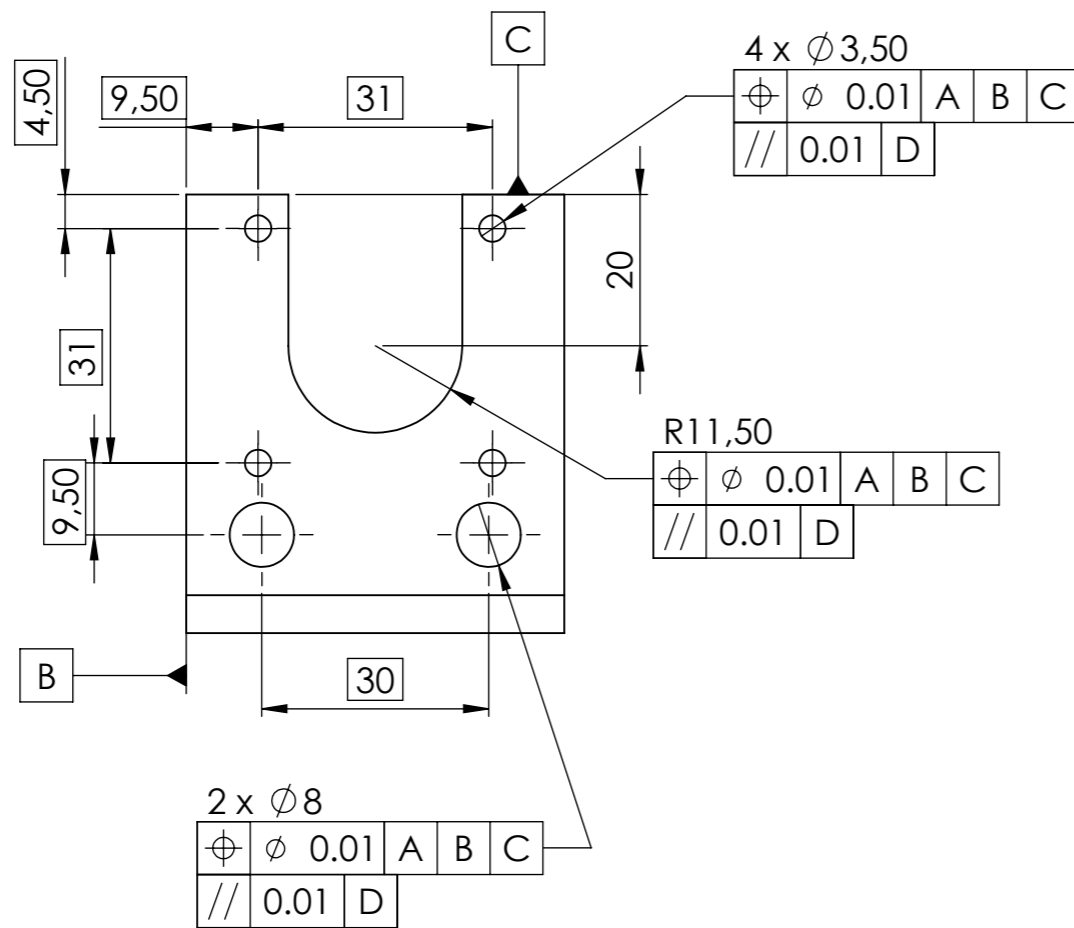
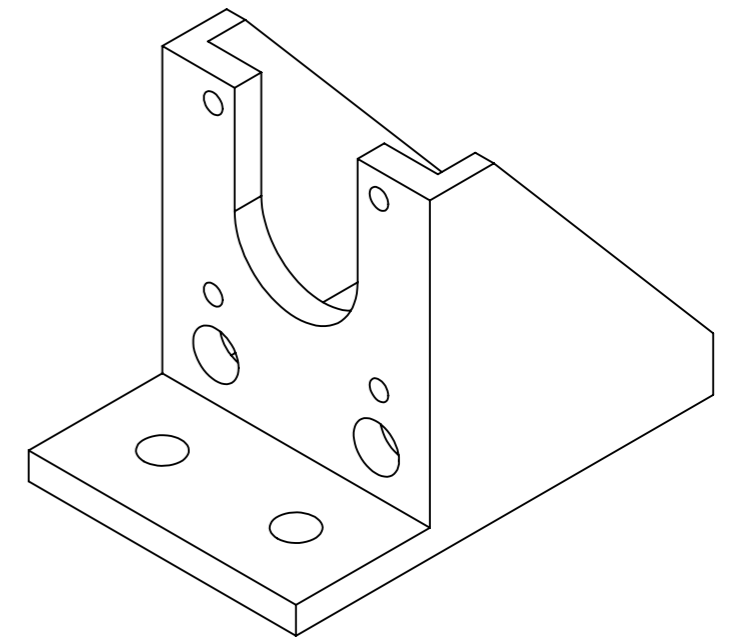
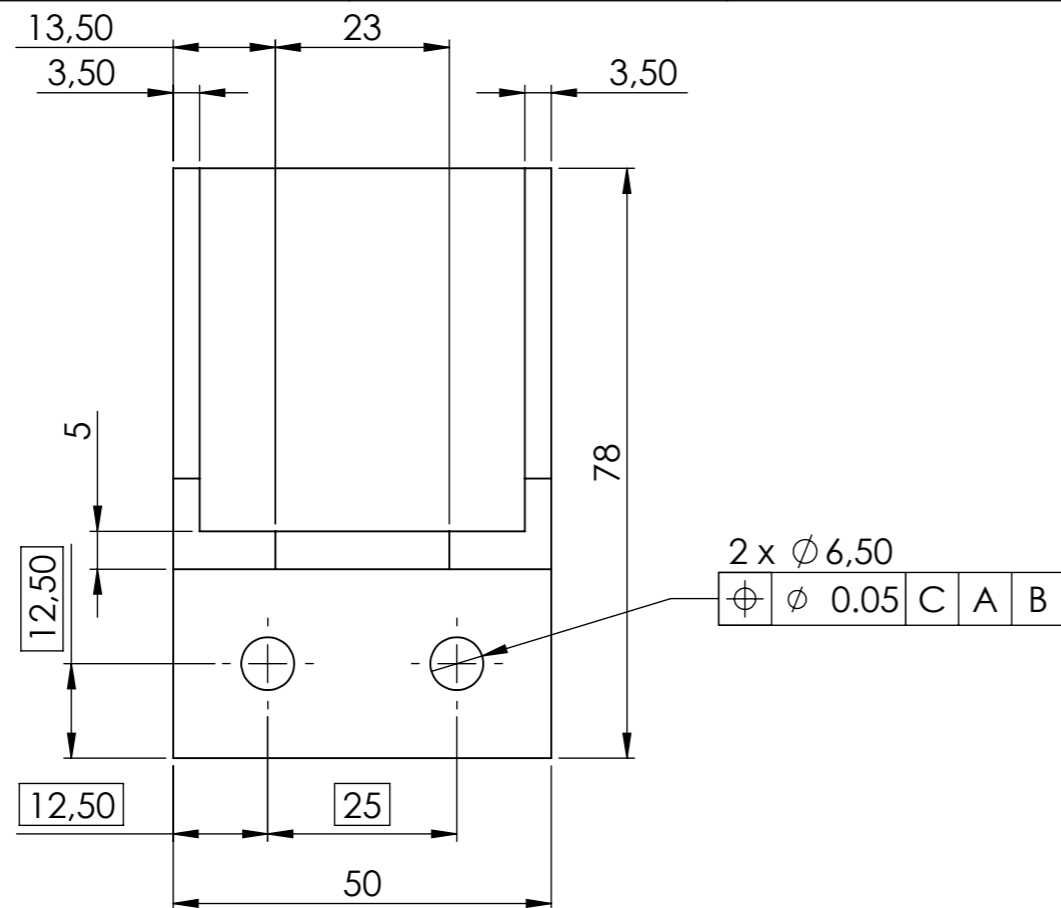
FECHA  
07/09/2017



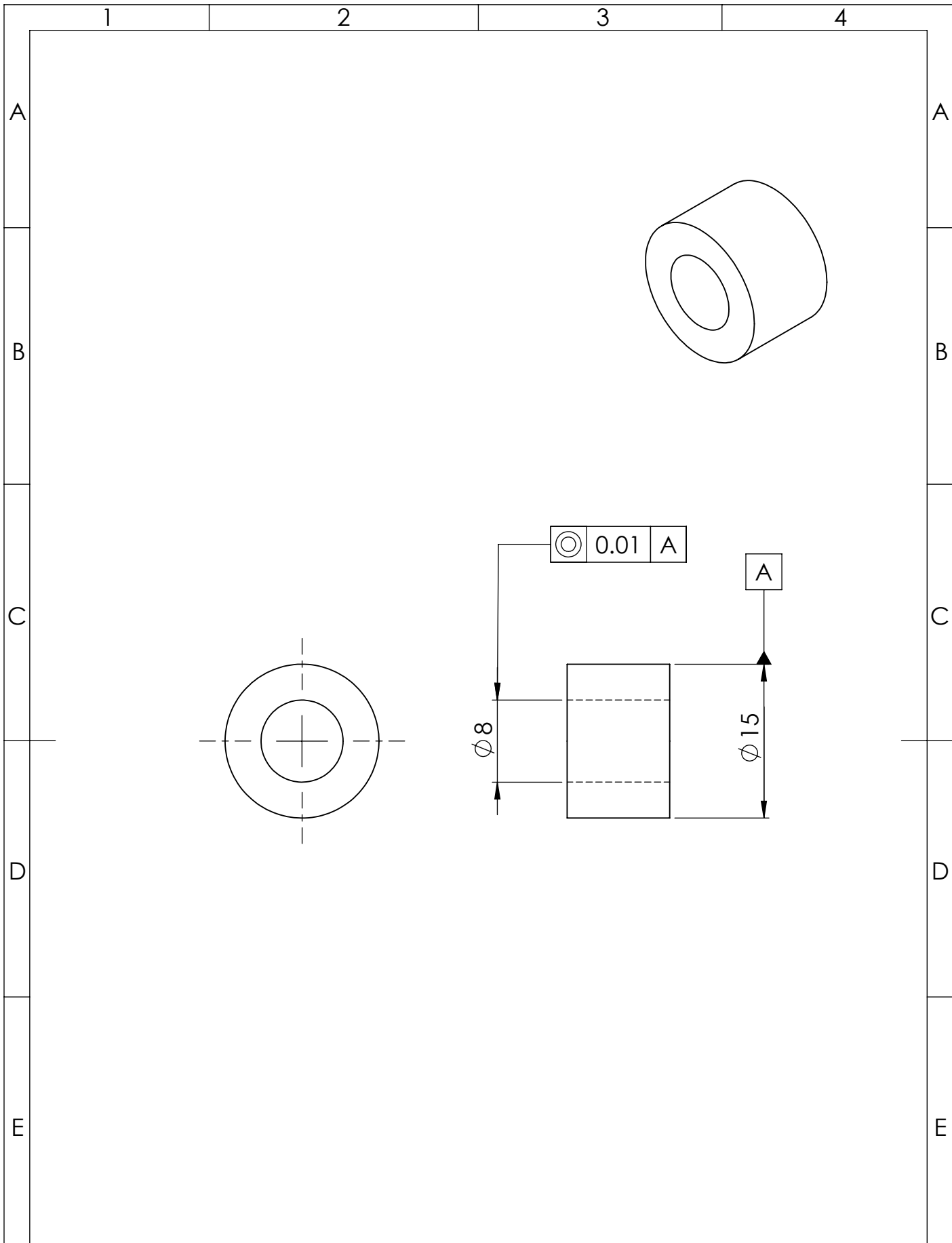
SECCIÓN F-F



TRAT. TÉRMICO	NINGUNO	E.P.N.	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
RECUBRIMIENTO	NINGUNO		DIB. DAVID VEGA GALARZA	DIS. DAVID VEGA GALARZA
MATERIAL	PLA	ESCALA 1:1	REV.	FECHA
		Tolerancias no indicadas UNE-EN 22768		07/09/2017
		SOPORTE DE ÉMBOLO		P. E. 1.005



TRAT. TÉRMICO	NINGUNO	E.P.N.	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
RECUBRIMIENTO	NINGUNO		DIB. DAVID VEGA GALARZA	DIS. DAVID VEGA GALARZA
MATERIAL	PLA	ESCALA	REV.	
	Tolerancias no indicadas UNE-EN 22768	1:1	FECHA	
	SOPORTE DE MOTOR	P. E. 1.006		07/09/2017



TRAT. TÉRMICO

NINGUNO

**E.P.N.**

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

RECUBRIMIENTO

NINGUNO

MATERIAL

**BRONCE**

Tolerancias no indicadas UNE-EN 22768

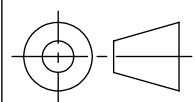
ESCALA

**2:1**

DIB. DAVID VEGA GALARZA

DIS. DAVID VEGA GALARZA

REV.



**COJINETE DE DESLIZAMIENTO**

**P. E. 1.007**

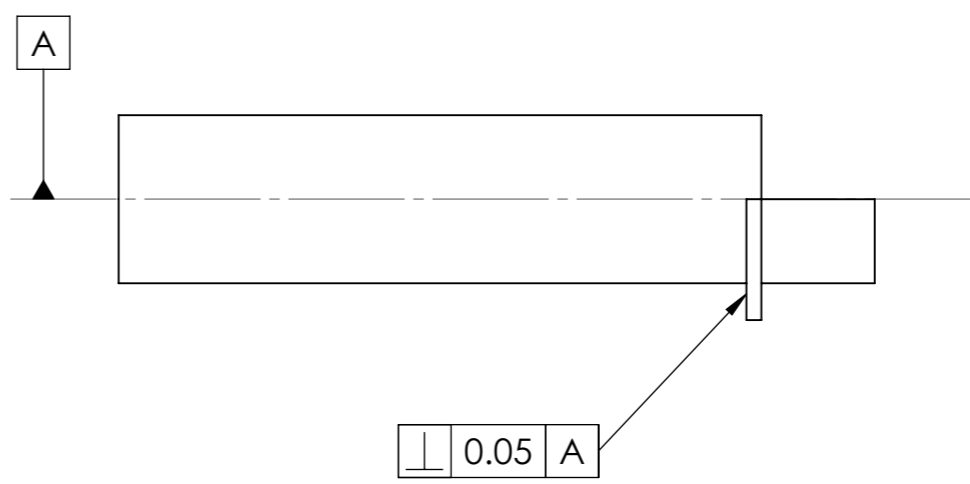
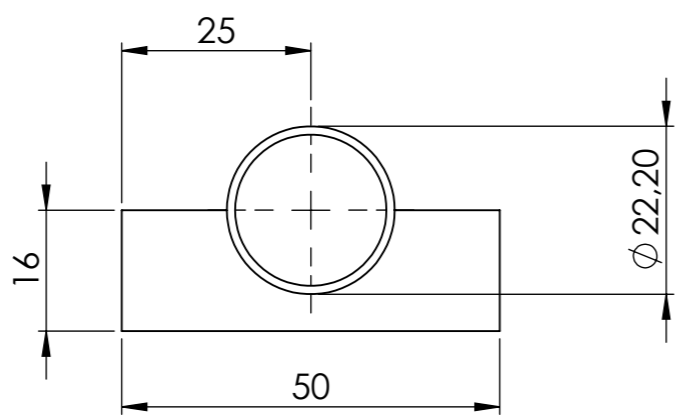
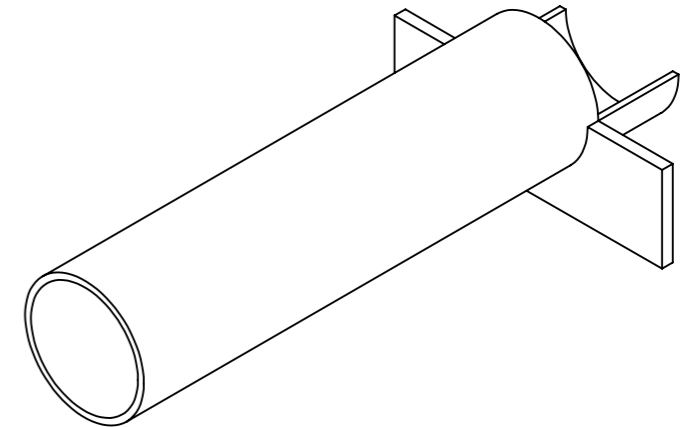
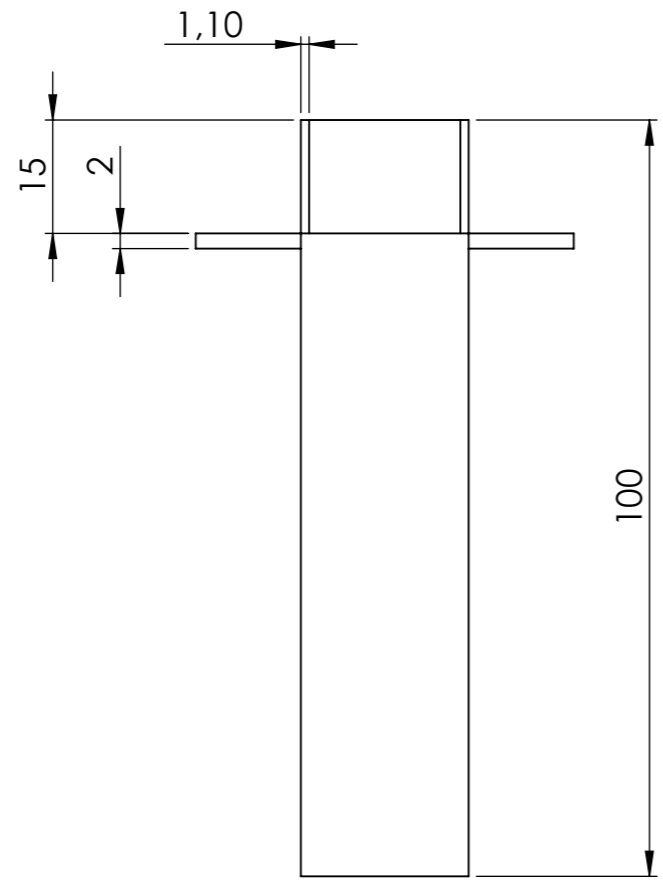
FECHA  
07/09/2017

1

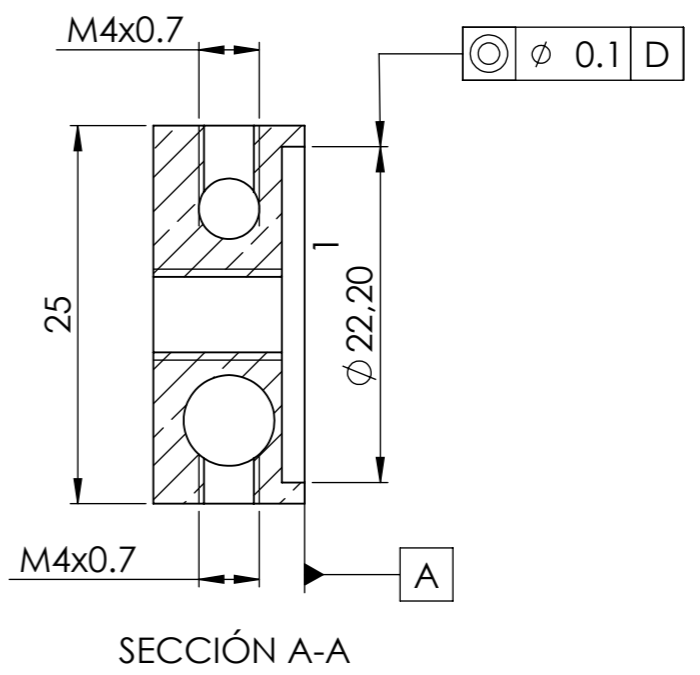
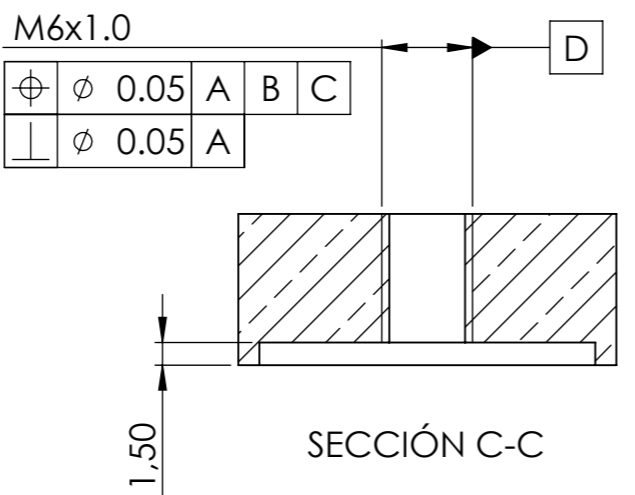
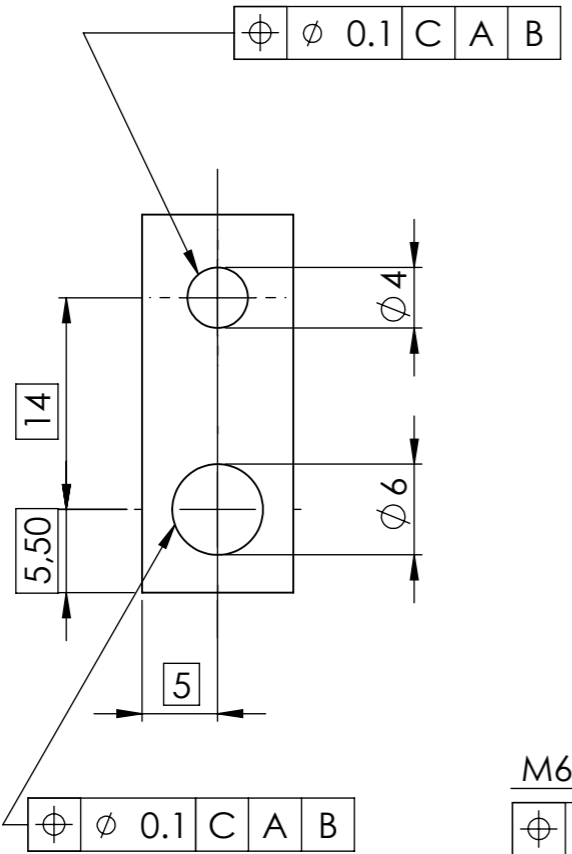
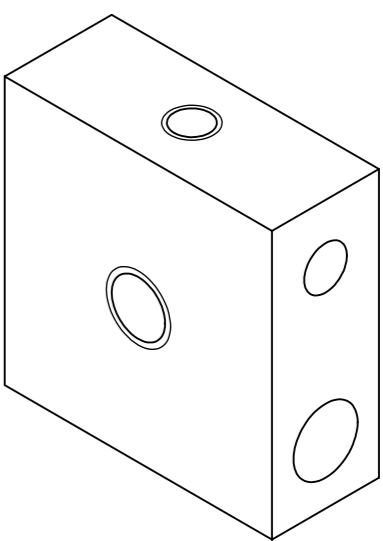
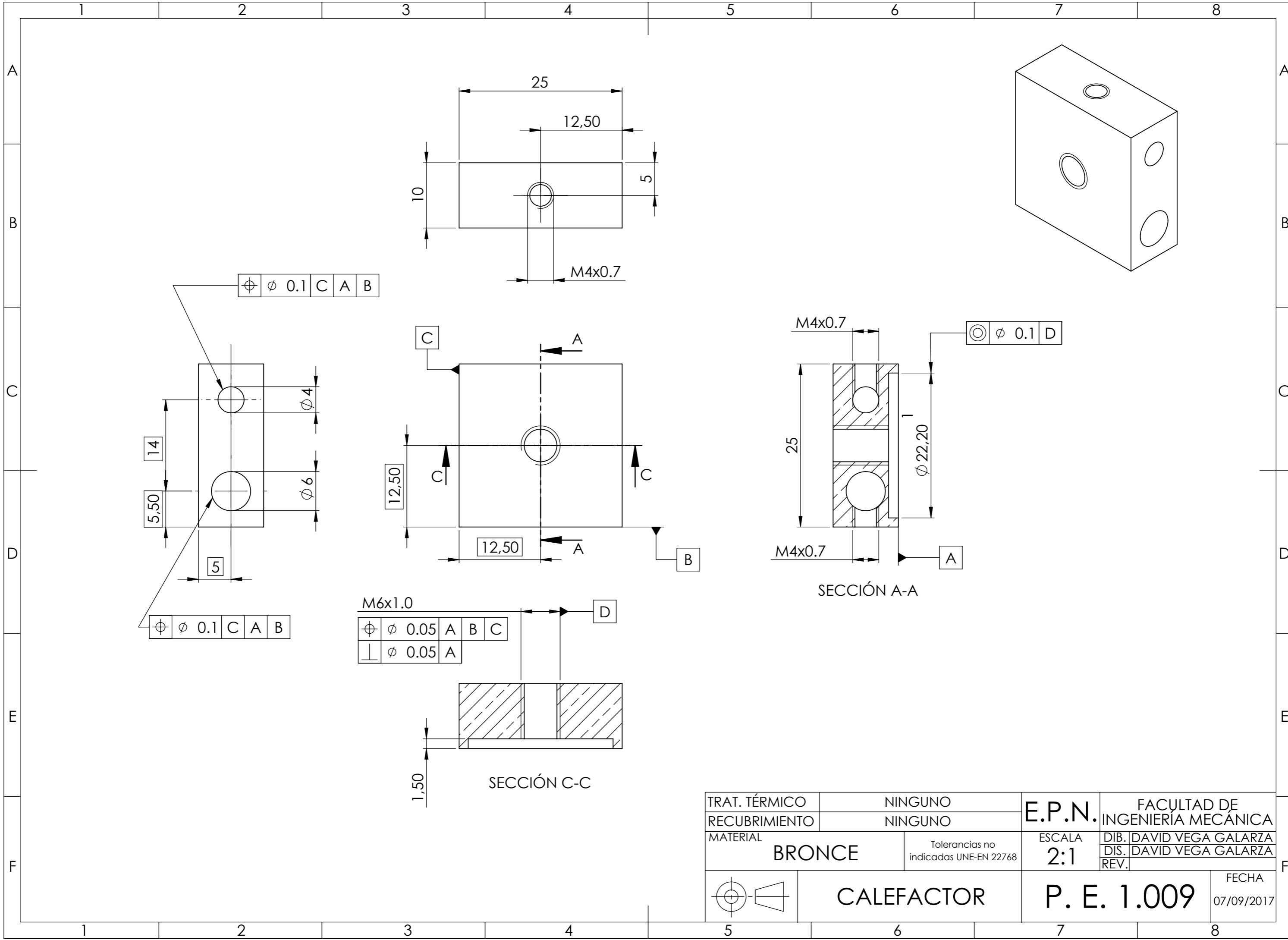
2

3

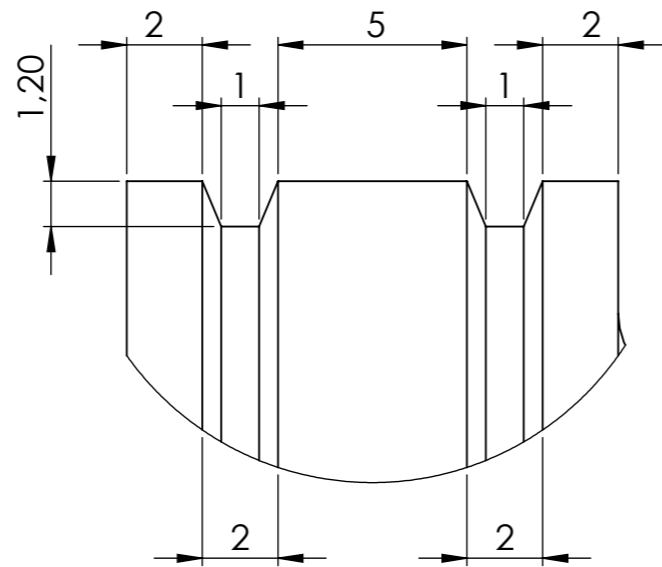
4



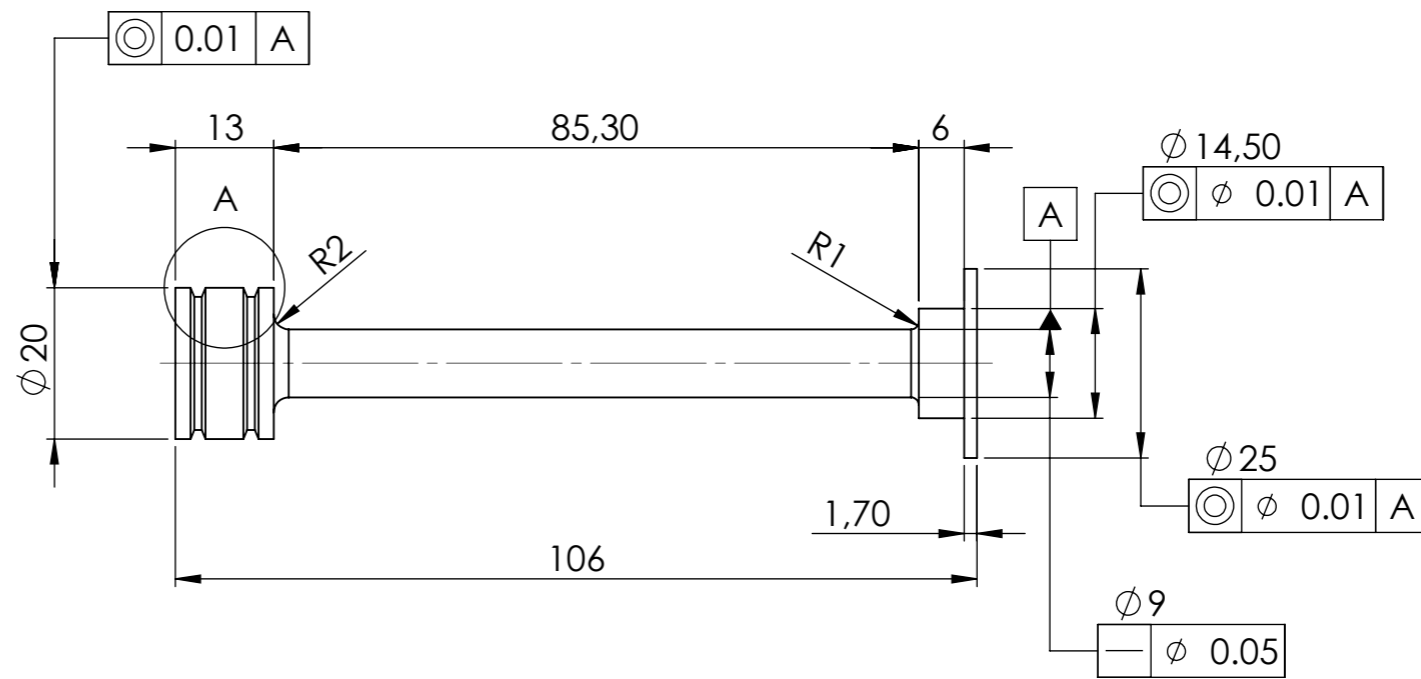
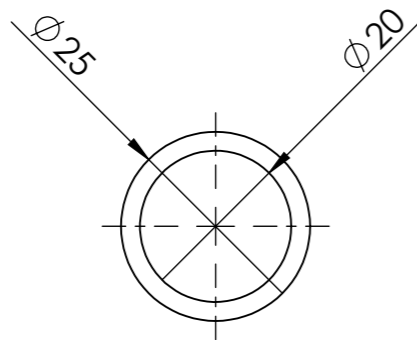
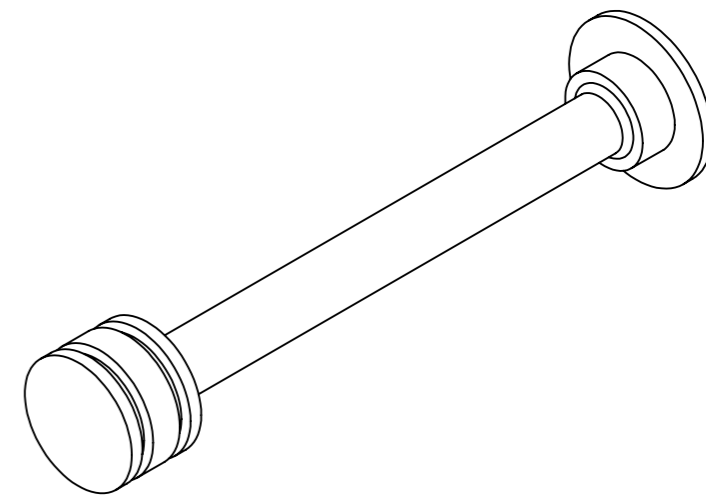
TRAT. TÉRMICO	NINGUNO	<b>E.P.N.</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
RECUBRIMIENTO	NINGUNO		DIB. DAVID VEGA GALARZA	DIS. DAVID VEGA GALARZA
MATERIAL	<b>COBRE</b>	Tolerancias no indicadas UNE-EN 22768	ESCALA <b>2:1</b>	REV.
	<b>CILINDRO</b>	<b>P. E. 1.008</b>	FECHA	07/09/2017



TRAT. TÉRMICO	NINGUNO	<b>E.P.N.</b>	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
RECUBRIMIENTO	NINGUNO		DIB. DAVID VEGA GALARZA	DIS. DAVID VEGA GALARZA
MATERIAL	<b>BRONCE</b>	ESCALA	REV.	
	Tolerancias no indicadas UNE-EN 22768	<b>2:1</b>		
	<b>CALEFACTOR</b>	<b>P. E. 1.009</b>	FECHA	07/09/2017



DETALLE A  
ESCALA 5 : 1



TRAT. TÉRMICO	NINGUNO	E.P.N.	FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
RECUBRIMIENTO	NINGUNO		DIB. DAVID VEGA GALARZA	DIS. DAVID VEGA GALARZA
MATERIAL	ALUMINIO	ESCALA	REV.	
	Tolerancias no indicadas UNE-EN 22768	1:1		
	ÉMBOLO	P. E. 1.010	FECHA	
			07/09/2017	