


DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.



JERSSON XAVIER LEÓN MEDINA
EDWIN TORRES DÍAZ

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
2013

DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO
RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

JERSSON XAVIER LEÓN MEDINA
EDWIN TORRES DÍAZ

Trabajo de grado en la modalidad de proyecto de investigación para optar al título de
Ingeniero Electromecánico

Director:
MSc. EDGAR ABSALÓN TORRES BARAHONA
Magister en Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
2013

Nota de aceptación:

Firma del Director de Proyecto

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Duitama, 5 de Agosto de 2013

DEDICATORIA

A mis padres, por su apoyo constante, sus consejos y palabras motivadoras que en cada momento alientan la esperanza de realizar mi gran sueño

Jersson Xavier León Medina

DEDICATORIA

Mi tesis la dedico con todo el cariño a Dios por darme la oportunidad de vivir y fortaleza para seguir adelante y no desfallecer en los momentos de dificultad, enseñándome enfrentar las adversidades sin perder la dignidad.

Con todo el amor a mi madre por ser el pilar más importante en mi vida, aunque hemos pasado momentos difíciles siempre ha estado apoyándome.

Edwin Torres Diaz

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su común gratitud a:

A Dios todopoderoso y a nuestras familias a quienes les debemos ser las personas que somos hoy en día; nos brindaron sus mejores consejos, nos inculcaron sus buenos valores y el respeto a las demás personas; por brindarnos su amor incondicional en los buenos y en los malos momentos, y a nuestros amigos quienes nos motivaron para seguir siempre adelante en busca de nuestros sueños.

Al ingeniero Edgar Torres por su permanente y valioso apoyo en la dirección del presente trabajo que con su lema "*sin prisa pero sin pausa*" motivo en todo momento la constancia y el gusto hacia lo que se hace.

A la Ingeniera María Luisa Pinto y al Ingeniero Oliverio Duran por su continua colaboración, comprensión y apoyo durante la realización del trabajo y compartir su conocimiento en temas concernientes en la investigación.

A todas esas buenas personas que hacen parte de la familia de la UPTC y que a través de su trabajo contribuyeron para que nuestra estancia en la universidad fuese la mejor y parecida al calor del hogar.

De igual forma a los funcionarios de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia que fueron involucrados en el proyecto de la impresora de prototipado rápido.

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 18 |
| 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN | 19 |
| 1.1 Planteamiento del problema. | 19 |
| 1.2 Descripción del problema. | 19 |
| 1.3 Formulación del problema..... | 19 |
| 1.4 OBJETIVOS..... | 20 |
| 1.4.1 Objetivo General | 20 |
| 1.4.2 Objetivos específicos..... | 20 |
| 1.5 JUSTIFICACIÓN. | 21 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 23 |
| 2.1 MECANIZADO 2.5D VS 3D | 23 |
| 2.2 DIFERENCIA ENTRE IMPRESIÓN 2D Y 3D..... | 24 |
| 2.3 PROTOTIPADO RÁPIDO | 26 |
| 2.4 ESTADO DEL ARTE DEL PROTOTIPADO RÁPIDO..... | 28 |
| 2.5 PARÁMETROS DE SELECCIÓN DE SISTEMAS DE PROTOTIPADO RÁPIDO | 33 |
| 2.6 TECNOLOGÍA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM) | 34 |
| 2.7 ESTADO DEL ARTE | 36 |
| 2.7.1 Impresoras industriales..... | 36 |
| 2.7.1 La impresión 3D y la manufactura personal | 37 |
| 2.7.2 Impresoras Personales Comerciales Con Licencia Restringida | 39 |
| 2.7.3 Impresoras Personales de Código Abierto..... | 39 |
| 2.8 MATERIALES UTILIZADOS PARA FDM | 41 |
| 2.8.1 Selección de un Termoplástico | 42 |
| 2.9 SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO 3D | 44 |
| 2.9.1 Gantry | 44 |
| 2.9.2 Cama Movable | 45 |
| 2.9.3 Deltabot | 46 |

| | | |
|--------|--|----|
| 2.9.4 | Robot Scara | 47 |
| 2.9.5 | Hexapodo | 47 |
| 2.10 | ESTRATEGIAS DE CONTROL..... | 48 |
| 2.11 | ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE SOFTWARE PARA EL DISEÑO. | 50 |
| 2.12 | MECANISMOS DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO LINEAL..... | 51 |
| 2.12.1 | Efecto de backlash en sistemas mecánicos..... | 51 |
| 2.12.2 | Husillos a bolas o tornillos de bolas | 52 |
| 2.12.3 | Polea-correa dentada..... | 53 |
| 2.12.4 | Tornillo de avance-husillo | 56 |
| 2.13 | PROCESO DE EXTRUSIÓN DE POLÍMEROS EN LA TECNOLOGÍA FDM | 57 |
| 2.13.1 | Cargar material | 59 |
| 2.13.2 | Fundición..... | 59 |
| 2.13.3 | Extrusión | 60 |
| 2.13.4 | Solidificación | 61 |
| 2.13.5 | Control Posicional | 61 |
| 2.13.6 | Proceso de sinterizado de material | 62 |
| 2.14 | PARÁMETROS DE CONTROL DE PROCESO FDM..... | 63 |
| 3. | DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO | 65 |
| 3.1 | ALGORITMO DE POSICIONAMIENTO | 65 |
| 3.2 | CRITERIOS DE DISEÑO | 66 |
| 3.3 | MECANISMOS DE TRASMISIÓN DE MOVIMIENTO | 67 |
| 3.3.1 | Movimiento en el eje X | 67 |
| 3.3.2 | Movimiento en el eje Y | 69 |
| 3.3.3 | Movimiento en el eje Z | 70 |
| 3.4 | CÁLCULOS DE LOS PARÁMETROS DE MOVIMIENTO EN LOS TRES EJES | 71 |
| | Movimiento en el eje X..... | 72 |
| | El valor del torque total TTX se utiliza en la selección del motor que comandará el eje X.... | 74 |
| | Movimiento en el eje Y | 74 |
| 3.5 | DISEÑO DE LA ESTRUCTURA | 79 |
| 4. | SISTEMA DE EXTRUSIÓN DE PLÁSTICO..... | 81 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.1 | MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL PROCESO FDM..... | 81 |
| 4.1.1 | Geometría Del Filamento..... | 81 |
| 4.1.2 | Enfriamiento Del Material..... | 82 |
| 4.1.3 | Enlace Entre Capas De Material..... | 82 |
| 4.2 | MATERIAL FUNDENTE UTILIZADO EN LAS PIEZAS FABRICADAS | 83 |
| 4.3 | PROPIEDADES DEL MATERIAL ABS P400..... | 84 |
| 4.4 | DISEÑO MECÁNICO DE LA HERRAMIENTA EXTRUSORA | 85 |
| 4.4.1 | Diseño térmico | 86 |
| 4.4.2 | Cálculo de tiempo de puesta en marcha del extrusor | 87 |
| 4.4.3 | Cálculo de flujo de material | 87 |
| 4.4.4 | Mecanismo de extrusión de material | 89 |
| 4.4.5 | Longitud de avance de material por paso del motor..... | 89 |
| 4.4.6 | Cálculo de los parámetros del extrusor | 91 |
| | Cálculo de tiempo de puesta en marcha del extrusor | 92 |
| | Cálculo de flujo de material | 93 |
| | Longitud de avance de material por paso del motor..... | 93 |
| 4.5 | SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE EXTRUSIÓN A PARTIR DEL USO DE UN SOFTWARE CAE. | 94 |
| 5. | SELECCIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO..... | 100 |
| 5.1 | CONTROLADOR PRINCIPAL | 101 |
| 5.1.1 | Variables del sistema | 101 |
| 5.1.2 | Tarjeta Arduino | 102 |
| 5.1.3 | Comunicación..... | 103 |
| 5.2 | ACTUADORES | 103 |
| 5.3 | CIRCUITOS CONTROLADORES PARA LOS ACTUADORES. | 104 |
| 5.4 | SENSORES DE TEMPERATURA Y MECÁNICOS. | 104 |
| 5.4.1 | Señal de temperatura | 105 |
| 5.4.2 | Circuito acondicionador de señal térmica | 105 |
| 5.4.3 | Sensado de posicionamiento | 107 |
| 5.5 | CIRCUITO DE POTENCIA DEL EXTRUSOR..... | 108 |
| 5.6 | CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS CIRCUITOS ELECTRÓNICOS | 108 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 6. | SELECCIÓN Y USO DE HERRAMIENTAS SOFTWARE PARA EL GOBIERNO DE LA IMPRESORA . | 110 |
| 6.1 | FIRMWARE | 111 |
| 6.1.1 | Configuración del firmware <i>MARLIN</i> | 112 |
| 6.2 | SOFTWARE UTILIZADO | 122 |
| 6.2.1 | Software CAD | 122 |
| 6.2.2 | Lenguaje base de programación python..... | 122 |
| 6.2.3 | Alternativas de software de conversión a lenguaje de máquina..... | 122 |
| 6.2.4 | Alternativas de software host de control | 130 |
| 7. | IMPLEMENTACIÓN..... | 134 |
| 7.1 | SISTEMA MECÁNICO IMPLEMENTADO | 134 |
| 7.1.1 | Pruebas al sistema de posicionamiento | 137 |
| 7.2 | ENSAMBLE DEL SISTEMA ELECTRÓNICO..... | 138 |
| 7.3 | PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL EXTRUSOR | 141 |
| 7.4 | PRUEBA INICIAL EN DOS DIMENSIONES | 143 |
| 7.5 | RESULTADOS DE PIEZAS IMPRESAS EN 3D..... | 143 |
| 7.5.1 | Impresión 3D hueca con tapa | 144 |
| 7.5.2 | Impresión 3D hueca sin tapa..... | 145 |
| 7.5.3 | Impresión 3D maciza con infill honey comb | 146 |
| | CONCLUSIONES..... | 147 |
| | RECOMENDACIONES..... | 150 |
| | LOGROS..... | 151 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 154 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2-1. Ilustración de dos diferentes tipos de piezas, Arriba Pieza 2.5D, Abajo Pieza 3D..... | 24 |
| Figura 2-2. Diferencia entre impresora 2D y 3D. A la izquierda, EPSON STYLUS OFFICE T1110 y a la derecha STRATASYS MOJO 3D PRINTER. | 25 |
| Figura 2-3. Prototipo de Motocicleta impresa en 3D. | 27 |
| Figura 2-4. Descripción Gráfica de la tecnología Modelado por Deposición Fundida FDM. | 35 |
| Figura 2-5. Impresoras industriales Stratasys Ltd. © de izquierda a derecha a. Fortus b. Mojo c. Dimensión | 37 |
| Figura 2-6. Impresora 3D personal, en la imagen se evidencia su tamaño relativo..... | 38 |
| Figura 2-7. Modelo “MENDEL” de impresora 3D auto replicante de la comunidad RepRap | 38 |
| Figura 2-8. Impresora 3d personal comercial Leapfrog Creatr..... | 39 |
| Figura 2-9. Impresora 3D Ultimaker de código abierto | 40 |
| Figura 2-10. Diferentes tipos de Termoplásticos utilizados en impresión 3D FDM..... | 41 |
| Figura 2-11. Sistema de posicionamiento Gantry | 45 |
| Figura 2-12. Sistema de posicionamiento cama movible | 46 |
| Figura 2-13. Robot paralelo, impresora 3D FDM | 46 |
| Figura 2-14. Robot SCARA, impresora 3D FDM..... | 47 |
| Figura 2-15. Robot hexápodo realizando operaciones de mecanizado..... | 48 |
| Figura 2-16. Diagrama de control PID..... | 49 |
| Figura 2-17. Modelo CAD y Formato .STL de un modelo creado..... | 50 |
| Figura 2-18. Diagrama de flujo de información para el control del sistema. | 51 |
| Figura 2-19. Husillo a bolas | 52 |
| Figura 2-20. Polea-Correa dentada..... | 53 |
| Figura 2-21. Geometría mecanismo de polea- correa dentada..... | 54 |
| Figura 2-22. Contacto existente entre los dientes de un piñón y cavidades de una correa dentada | 56 |
| Figura 2-23. Tornillo de avance-husillo..... | 56 |
| Figura 2-24. Características comunes de un sistema de extrusión..... | 58 |
| Figura 2-25. Carrete de filamento de ABS, material suministrado a la máquina. | 59 |
| Figura 2-26. Configuración general de un sistema de extrusión | 60 |
| Figura 2-27. Proceso de sinterizado entre dos filamentos adyacentes a) contacto de superficies, b) agentes humectantes, c) difusión, d) aleatorización | 62 |
| Figura 2-28. Detalle de la acumulación de cordones impresos capa sobre capa. | 63 |
| Figura 3-1. Movimiento establecido según algoritmo de Bresenham..... | 65 |
| Figura 3-2. Actuador para movimiento en el eje x..... | 67 |
| Figura 3-3. Actuador para movimiento en el eje Y | 69 |
| Figura 3-4. Actuador para movimiento en el eje | 70 |
| Figura 3-5. Rampa de movimiento ejecutada por los actuadores..... | 71 |
| Figura 3-6. Inercias establecidas en el eje x..... | 73 |

| | |
|---|-----|
| Figura 3-7. Inercias establecidas en el eje y..... | 75 |
| Figura 3-8. Inercias establecidas en el eje z..... | 77 |
| Figura 3-9. Estructura base de la impresora 3D..... | 79 |
| Figura 3-10. Ensamble final de la impresora 3D FDM..... | 80 |
| Figura 4-1. Representación gráfica de la forma elíptica del cordón depositado de material | 81 |
| Figura 4-2. Parámetros geométricos definidos para el proceso de Sinterización en FDM..... | 83 |
| Figura 4-3. Relación del cambio de la viscosidad del ABS-P400 respecto de la temperatura | 85 |
| Figura 4-4. Configuración de la herramienta extrusora..... | 86 |
| Figura 4-5. Conjunto mecanismo de extrusión | 89 |
| Figura 4-6. Sistema mecánico de dosificación del ABS. | 89 |
| Figura 4-7. Temperaturas esperadas en las fronteras de cada material del extrusor..... | 91 |
| Figura 4-8. Diámetros externo e interno del extrusor en la zona del calefactor | 92 |
| Figura 4-9. Modelo CAD del extrusor y mallado del mismo. | 95 |
| Figura 4-10. Parámetros configurados en el software NX 7.5 correspondientes al material ABS-P400 | 95 |
| Figura 4-11. Condiciones de frontera aplicadas al extrusor en la simulación. | 96 |
| Figura 4-12. Perfiles de temperatura del material fundido | 97 |
| Figura 4-13. Perfiles de temperatura del material fundido (Continuación) | 97 |
| Figura 4-14. Flujo de Calor a través de la herramienta extrusora | 98 |
| Figura 4-15. Distribucion de la presion dentro del extrusor | 98 |
| Figura 4-16. Perfil de velocidad de salida del material fundido | 99 |
| Figura 5-1. Sistema de control para la planta | 100 |
| Figura 5-2. Diagrama de bloques del sistema de control asumido para la impresora. | 101 |
| Figura 5-3. Tarjeta Arduino Mega R3 seleccionada | 102 |
| Figura 5-4. Motor pasó a paso seleccionado como actuador para la impresora y la curva característica torque-velocidad. | 103 |
| Figura 5-5. Diseño de la tarjeta controladora de motor pasó a paso | 104 |
| Figura 5-6. Termopar tipo k físico y relación temperatura-voltaje..... | 105 |
| Figura 5-7. Sistema de control de temperatura en la extrusión. | 105 |
| Figura 5-8. Conexionado del circuito integrado AD 595 para el acondicionamiento de la señal ... | 106 |
| Figura 5-9. Tarjeta complementaria | 107 |
| Figura 5-10. Sensor óptico de barrera | 107 |
| Figura 5-11. Circuito amplificador de potencia para el extrusor. | 108 |
| Figura 5-12. Disposición general de los circuitos de los componentes electrónicos de la impresora. | 109 |
| Figura 6-1. Diagrama de flujo de información para el control del sistema. | 110 |
| Figura 6-2. Proceso de selección de board en el firmware Marlin | 112 |
| Figura 6-3. Elección del sensor de temperatura | 113 |
| Figura 6-4. Parámetros del firmware para controlar máxima y mínima temperatura del extrusor..... | 114 |

| | |
|---|-----|
| Figura 6-5. Parámetros del firmware que establecen el control PID de temperatura en el extrusor..... | 115 |
| Figura 6-6. Configuración de activación de los finales de carrera | 115 |
| Figura 6-7. Configuración de apagado de los motores cuando no están en uso..... | 116 |
| Figura 6-8. Configuración de la dirección de los ejes..... | 116 |
| Figura 6-9. Dimensiones máximas de restricción de movimiento..... | 117 |
| Figura 6-10. Velocidades de homing y número de ejes usados..... | 117 |
| Figura 6-11. Configuración de los pasos por mm en cada eje, máxima velocidad y máxima aceleración en el movimiento..... | 119 |
| Figura 6-12. Diagramas de flujo del proceso de impresión | 120 |
| Figura 6-13. Continuación de la figura 6-12..... | 121 |
| Figura 6-14. Interfaz de usuario del software Skeinforge..... | 123 |
| Figura 6-15. Pestaña Skeiniso entregada por el software skeinforge..... | 124 |
| Figura 6-16. Pestaña Skeinlayer entregada por el software skeinforge | 125 |
| Figura 6-17. Resumen del proceso de rebanado entregado por el software skeinforge | 125 |
| Figura 6-18. Pestaña plater del software SLIC3R | 126 |
| Figura 6-19. Apartado layers and perimeters del software SLIC3R | 127 |
| Figura 6-20. Apartado infill del software SLIC3R | 127 |
| Figura 6-21. Apartado speed del software SLIC3R..... | 128 |
| Figura 6-22. Pestaña Filament Settings del software SLIC3R..... | 128 |
| Figura 6-23. Pestaña Printer Settings del software SLIC3R..... | 129 |
| Figura 6-24. Configuración parámetros del extrusor en el software SLIC3R..... | 129 |
| Figura 6-25. Interfaz del software Replicatorg | 130 |
| Figura 6-26. Interfaz del software Pronterface..... | 131 |
| Figura 6-27. Simulación de una capa de una pieza rebanada..... | 131 |
| Figura 6-28. Interfaz principal del Software Repetier-Host | 132 |
| Figura 6-29. Interfaz del software Cura | 133 |
| Figura 7-1. Fabricación del sistema mecánico | 135 |
| Figura 7-2. Trabajo de construcción de la impresora 3D..... | 135 |
| Figura 7-3. Abajo el sistema mecánico diseñado renderizado en Keyshot 3 y Arriba la impresora construida. | 136 |
| Figura 7-4. Medidor de espesor de pintura utilizado en la máquina..... | 137 |
| Figura 7-5. Etapas del proceso de diseño: diagrama esquemático, diseño de la tarjeta y disposición de componentes respectivamente. | 139 |
| Figura 7-6. Proceso de construcción de las tarjetas de potencia de los motores. | 140 |
| Figura 7-7. Tarjeta complementaria construida acoplada a la tarjeta controladora Arduino Mega | 140 |
| Figura 7-8. Acople entre las tarjetas de potencia de los motores y conexas con la tarjeta de control..... | 141 |
| Figura 7-9. Sesión de torneado de piezas en el taller de mecanizado..... | 141 |

| | |
|---|-----|
| Figura 7-10. Ensamble de la boquilla calefactora de extrusión de material..... | 142 |
| Figura 7-11. Componentes reales de la herramienta extrusora de material y modelo construido | 142 |
| Figura 7-12. A la izquierda la pieza: STL idealizada y a la derecha la impresión de dos capas de la pieza de prueba..... | 143 |
| Figura 7-13. Pieza impresa de un cubo hueco con tapa. | 144 |
| Figura 7-14 Pieza impresa de un cubo hueco sin tapa..... | 145 |
| Figura 7-15. Pieza impresa de un cubo macizo..... | 146 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 2-1. Diversas Tecnologías de Prototipado Rápido..... | 29 |
| Tabla 2-2. Cuadro Comparativo de algunas impresoras 3D..... | 40 |
| Tabla 4-1. Valores de viscosidad a diferentes temperaturas para e ABS P400 | 85 |
| Tabla 4-2 Características de los materiales que componen el extrusor | 86 |
| Tabla 5-1. Variables del sistema | 101 |
| Tabla 7-1. Especificaciones generales del sistema de posicionamiento diseñado | 137 |
| Tabla 7-2. Datos de histéresis de los ejes y error de posición existente | 138 |
| Tabla 7-3 Especificaciones calculadas y medidas del movimiento de la herramienta de extrusión. | 138 |

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Descripción de la interpretación de código G

Anexo B. Circuitos Esquemáticos de las tarjetas electrónicas diseñadas

Anexo C. Conexión del sistema electrónico de control de la impresora 3D

Anexo D. Planos ensamble impresora 3D

Anexo E. Datasheets de diferentes componentes del sistema electrónico

ABREVIATURAS

RP: *RAPID PROTOTYPING* (PROTOTIPADO RÁPIDO)

FDM: *FUSED DEPOSITION MODELING* (MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA)

CI: CIRCUITO INTEGRADO

RESUMEN

La tecnología de impresión en tercera dimensión es capaz de fabricar piezas en diferentes tipos de materiales, por técnicas como solidificación a partir del uso de rayos láser, Luz ultravioleta, inyección de partículas, adhesivos, deposición fundida entre otros. En la técnica de prototipado rápido modelado por deposición fundida un filamento plástico se desenvuelve de un rollo y alimenta una boquilla de extrusión. La boquilla se calienta para fundir el plástico y tiene un mecanismo que permite controlar el flujo del plástico fundido. La boquilla se monta a un cabezal móvil que puede moverse en direcciones X, Y y Z y deposita un pequeño cordón o gota de plástico para formar cada capa. El plástico endurece al contacto con la capa anterior y la exposición al medio. El proyecto plantea dos fases para su desarrollo, la primera contempla el diseño de una impresora 3d que aplica la técnica de prototipado rápido modelado por deposición fundida y la segunda la implementación de un prototipo, utilizando herramientas de automatización y control, posicionamiento mecánico, informática, electrónica, software entre otras. El estudio parte de la identificación de las diversas ramas del conocimiento y de las diferentes técnicas de prototipado rápido que existen, comparando una a una y seleccionando la alternativa más apropiada de acuerdo con los recursos técnicos y financieros disponibles, posteriormente a partir de los resultados de la fase de diseño se hará la implementación del sistema.

INTRODUCCIÓN

Colombia forma parte de un mundo en proceso de globalización, que cada día posee más alcances y brinda facilidades a algunas personas u organizaciones en la sociedad. Al ser un país en vía de desarrollo requiere que la ingeniería colombiana de soluciones a necesidades del mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes y asuma los retos de afrontar un mercado abierto donde el conocimiento, desarrollo e innovación se convierten en los pilares de un país competitivo a partir del ofrecimiento de productos y servicios.

Una de las múltiples áreas en desarrollo corresponde al Prototipado Rápido – PR, el cual se constituye en una de las tecnologías de manufactura por capas que crea modelos tridimensionales como prototipos reales terminados. Esta tecnología con una trayectoria de más de veinte años, se basa en el uso de diferentes procesos como la estereolitografía, sinterización selectiva por láser, manufactura de objetos laminados, foto polimerización por luz UV, Fusión láser, modelado por deposición fundida, entre otros.

Este proyecto plantea las fases de diseño y construcción de una impresora 3D y en su desarrollo se integran teorías, principios, estrategias y herramientas del diseño mecánico, la automatización y control que permiten la construcción de una base conceptual, teórica y empírica, que trasciende a su concepción. Los resultados de esta investigación en el campo del PR constituyen un referente de diseño de un equipo y la evaluación de los productos terminados por su uso en el campo del prototipado rápido.

El texto está dividido en siete capítulos que describen el diseño e implementación de la impresora 3D. En el capítulo uno se describe el problema de investigación, en el segundo se presenta la revisión bibliográfica sobre el estado actual del conocimiento y las teorías aplicadas, en los capítulo tres y cuatro se muestra el diseño mecánico del sistema de posicionamiento tridimensional y el diseño de la herramienta extrusora de material, en los capítulos cinco y seis se explica la selección del sistema electrónico de control y las herramientas informáticas que comandan el proceso de impresión, en el capítulo siete Finalmente se presentan los apartados de conclusiones, recomendaciones y logros obtenidos con el proyecto.

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento del problema.

Al hacer un análisis de referentes se observa que en el campo de la automatización y control, Colombia aplica tecnología pero el desarrollo de la misma es limitado, lo que genera dependencia externa y limitaciones en construcción, puesta en servicio y acceso a la misma por parte de los sectores productivos, tal como lo establece un estudio que elabora anualmente The Economist Group, en el que ubica a Colombia como uno de los países con menos avances en el tema de las nuevas tecnologías.

1.2 Descripción del problema.

Las últimas tecnologías de punta son muy costosas y limitan su aplicación al alcance de todos. En Colombia se observa que los procesos industriales modernos, solo se implementan en multinacionales reconocidas o en empresas con gran poder adquisitivo, esto genera una monopolización del mercado y un estancamiento en la sociedad que no progresa, lo cual evidencia la necesidad de diseñar e implementar sistemas que permitan evaluar la posibilidad de acceso a este tipo de tecnologías y den respuesta a las necesidades de múltiples sectores.

1.3 Formulación del problema.

¿Es posible diseñar e implementar un prototipo de impresora 3d, que aplique la técnica de prototipado rápido modelado por deposición fundida apropiando conocimiento y utilizando insumos y materia prima disponible en la región?

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

Diseñar un prototipo de impresora 3d que aplica la técnica de prototipado rápido modelado por deposición fundida, para la fabricación de piezas en tres dimensiones.

1.4.2 Objetivos específicos

- Describir el proceso de impresión en tres dimensiones aplicando la técnica de modelado por deposición fundida y las estrategias para su control.
- Diseñar un sistema mecánico que permita la ubicación de un punto en un sistema coordenado tridimensional.
- Diseñar una herramienta de extrusión de plástico que cumpla con los requerimientos del proceso FDM.
- Seleccionar el sistema electrónico para el control del prototipo de impresora 3d, en sus componentes de actuación, sensado y control.
- Estudiar y seleccionar diferentes alternativas informáticas para el gobierno del proceso FDM, que establezcan el enlace entre el sistema mecánico, la unidad de control y el usuario
- Integrar los componentes del sistema y evaluar el desempeño de la impresora frente al diseño inicial.

1.5 JUSTIFICACIÓN

La técnica de modelado por deposición fundida FDM, asumida para el desarrollo de este trabajo, representa una de las principales técnicas para el prototipado rápido, tal y como lo muestran diferentes publicaciones, es el caso del estudio realizado por D.T. Pham y R.S. Gault, y publicado en International Journal of Machine Tools & Manufacture, en el que se comparan diferentes tecnologías con respecto al costo y el acabado del modelo impreso, la eficiencia del volumen construido con respecto al volumen de la máquina, las emisiones y el trabajo de post-proceso, mostrando como resultado una favorabilidad en cuanto a costo, volumen de impresión, simplicidad y versatilidad.

El desarrollo del presente trabajo tiene en cuenta el acceso a tecnologías locales, materia prima, y costo para construcción del sistema; también se tiene en cuenta que la construcción de un prototipo de esta naturaleza, permite evaluar la capacidad de apropiar tecnología y desarrollar sistemas utilizando tecnología local con la técnica de prototipado Modelado por Deposición Fundida-FDM.

La incorporación de la tecnología de PR, proveniente del proceso productivo industrial, en el proceso de enseñanza-aprendizaje, posibilita la transferencia de experiencias de la actividad industrial al aula, por lo que se constituye en una innovación educativa que además está en línea con el concepto actual de formación basada en competencias.

Así como el modelado sólido 3D facilita el diseño de formas complejas y su representación gráfica, el PR permite la fácil materialización de una maqueta real o de un modelo funcional y potencia la capacidad deductiva y el raciocinio espacial del estudiante.

En cuanto a innovación y desarrollo de estas tecnologías, en el mundo se viene trabajando en temáticas como: la optimización de los sistemas a través del control avanzado para mejorar la precisión y terminado superficial, Caracterización y aplicación de nuevos materiales para las diferentes técnicas de PR, aumento en la velocidad de fabricación, aumento en los tamaños de los prototipos, disminución de costos, minimizar efectos de post-proceso, entre otros.

El presente proyecto se enmarca dentro del diseño e implementación del sistema de posicionamiento tridimensional y la aplicación, en esta primera etapa, de un algoritmo de control, utilizando herramientas de automatización y control, posicionamiento mecánico, informática, electrónica, software entre otras.

Dada la pertinencia de las áreas de estudio con el desarrollo de esta propuesta se atienden las necesidades de la misma universidad, teniendo en cuenta que el prototipado rápido aporta al desarrollo y conocimiento de programas como las ingenierías Industrial, mecánica y electrónica y de las ciencias de la salud como odontología y desarrollo de prótesis. En el sector productivo se requiere de este tipo de sistemas para disminuir el tiempo de diseño y establecer características de un producto.

En Colombia existen organizaciones vinculadas a la tecnología de prototipado rápido, algunas de ellas como la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá - UN cuenta con un laboratorio del Centro de Estudios Inter Facultades (CEIF) tiene un Stratasys Titan FDM, la Fuerza Aérea Colombiana (FAC) tiene un Stratasys Vantage FDM y la multinacional IMOCOM tiene un Zcorp. Z402 (3DP)..

En la UN se promueven la investigación y el desarrollo en este campo a través de estudios de pre proceso para RP e Inspección de la Calidad en el Proceso FDM, en ambos trabajos se realizan y analizan interesantes experimentos con el propósito de caracterizar importantes propiedades mecánicas, superficiales y en general de acabado, exactitud y precisión de las piezas terminadas en el equipo FDM y la influencia en dichas propiedades de la manipulación de algunos parámetros de proceso.

2. MARCO TEÓRICO

Comparando diversas formas de producción de piezas se evidencia que si se solicita a un mecánico construir un prototipo de acuerdo a planos, se encuentra que tiene que fabricar empleando una variedad de métodos de construcción, que van desde la talla a mano, a través de moldeo y las técnicas de formación, hasta mecanizado CNC. El tallado a mano se encuentra propenso a errores, la tecnología de moldeo puede ser desordenada y requiere la construcción de uno o más moldes, el mecanizado CNC requiere una planificación cuidadosa y un enfoque secuencial que también puede requerir la construcción de accesorios antes de que la pieza pueda ser hecha. En contraste, la construcción de una pieza en una máquina de prototipado rápido se lleva a cabo generalmente en un solo paso independientemente de la complejidad de la misma; mientras se incluyan más características en el diseño, el número de las etapas de fabricación puede aumentar drásticamente. De esta forma el prototipado rápido se convierte en una forma de predecir con mayor eficacia la cantidad de tiempo para fabricar prototipos, independientemente de los cambios que se pueden implementar en la etapa del desarrollo del producto.

La tecnología de prototipado rápido ha sido revolucionaria en el desarrollo de productos y fabricación de los mismos. Esto por diversos factores como: la velocidad en términos del tiempo de construcción de las piezas, la confiabilidad y precisión del proceso de desarrollo de productos basada en procesos de diseño y fabricación asistidos por el computador CAD/CAM y la reducción de costos evidenciada en el desarrollo de productos terminados.

2.1 MECANIZADO 2.5D VS 3D

Dentro de las múltiples formas de mecanizado de piezas se encuentran la 2.5D y la 3D que difieren principalmente en las trayectorias hechas por la herramienta para desbastar material; la tecnología de mecanizado 2.5D, se refiere al trabajo realizado sobre una superficie, desbastando material capa por capa sobre planos 2D y proyectando hacia la tercera dimensión, los objetos de este tipo se representan a menudo como un mapa de contorno que da la altura (es decir, el grosor o profundidad) del objeto. Los objetos 2.5D se prefieren en gran medida para el mecanizado, ya que el código de control es fácil de generar, sin embargo se presentan dificultades, sobre todo cuando se trata del mecanizado de geometrías complejas.

El mecanizado 3D se presenta en piezas donde las superficies que se cortan se encuentran en diferentes planos además de que pueden ser distintos de los tres planos principales de la máquina, por ejemplo, las caras de una pirámide o de la superficie de un hemisferio como un paraboloides. El mecanizado 3D requiere que los tres ejes de la máquina tengan la capacidad de moverse de forma simultánea.

El mecanizado 2.5D se puede realizar en una máquina de fresado de 3 ejes ortogonales X Y y Z, pero se puede realizar la operación de corte sólo en dos de los tres ejes a la vez. El código de control para un mecanizado 2.5D es significativamente menor en extensión que un mecanizado 3D. Por consiguiente una pieza 2.5D es una representación simplificada de superficie en tres dimensiones (X, Y, Z) que contiene como máximo una profundidad (z) del valor de cada punto en la posición (X, Y) así la pieza se puede dividir en capas apropiadas para la impresión 3d. Esto se puede evidenciar en la figura 2-1 donde se diferencian los dos tipos de piezas.

Figura 2-1. Ilustración de dos diferentes tipos de piezas, Arriba Pieza 2.5D, Abajo Pieza 3D



Fuente: <http://www.featurecam.com/applications/>

2.2 DIFERENCIA ENTRE IMPRESIÓN 2D Y 3D

Para la mayoría de la gente el término impresora corresponde a un dispositivo pequeño, mediano o grande que se utiliza para crear una copia en papel, de su archivos digitales (documentos de Word, fotos, folletos, archivos PDF). Las impresoras vienen en una variedad de formas y tamaños; existen en la actualidad varios métodos de poner la tinta en el papel (impresión 2D).

Las dos tecnologías de impresión 2D más comunes usadas hoy en día se conocen como chorro de tinta y láser. Un chorro de tinta rocía un poco de tinta (negro o color) en el papel. Las impresoras láser utilizan un método diferente, más complicado, en donde aplican una carga eléctrica a una ronda tambor que recoge el tóner (en una impresora láser "la tinta") y luego se aplica el tóner a la página.¹

El chorro de tinta y las impresoras láser imprimen en papel plano comercial. La salida de estos dispositivos es de dos dimensiones. El papel tiene una longitud y una anchura, técnicamente, el papel tiene una tercera dimensión grosor, (o altura), pero el papel es lo suficientemente delgado como para tenerlo en cuenta.

En la impresión 3D se sustituye la tinta por otro material que pueda acumularse, de forma que al depositarse capa sobre capa se pueda percibir dicho apilamiento, dando forma a un objeto tridimensional. Los materiales más utilizados en impresión 3D son poliméricos, ceras y laminados de papel. Aunque posteriormente se introdujeron materiales compuestos, metales, y cerámicos. La diferencia entre la impresión 2D y 3D se esquematiza en la Figura 2-2.

Figura 2-2. Diferencia entre impresora 2D y 3D. A la izquierda, EPSON STYLUS OFFICE T1110 y a la derecha STRATASYS MOJO 3D PRINTER.



Fuentes: <http://global.latin.epson.com/Catalog/Epson-Stylus-Office-T1110>,
<http://www.mojo3dprinting.com/applications/industries/automotive.aspx>.

¹ KELLY, J.F. y HOOD P. Printing in Plastic: Build Your Own 3D Printer. New York. Apress. 2011. 446 p. ISBN 9781430234449

2.3 PROTOTIPADO RÁPIDO

El prototipado rápido es una tecnología relativamente nueva que ha sido además recientemente comercializada, La empresa que introdujo el primer sistema comercial de PR fue 3D Systems, CA, EEUU en 1988. Antes de esto, las primeras raíces de la tecnología de prototipado rápido se remontan al siglo XIX donde la “foto escultura”² en 1860 intenta crear réplicas exactas de objetos tridimensionales, incluyendo formas humanas y posteriormente en el siglo XX la “topografía”³ en 1890 propone un método de capas para hacer un molde de relieve topográfico de un mapa. Estas técnicas se basaron en la elaboración manual intensiva y apilada de capas de material para lograr modelos tridimensionales, y no fue sino hasta 1981 que Kodama⁴ construyó una máquina de prototipado rápido totalmente automatizada. Beaman⁵ detalla aún más la historia del prototipado rápido en el *Japanese/World Technology Evaluation Center Panel Report on Rapid Prototyping in Europe and Japan*,⁶.

El término prototipado rápido pertenece a una amplia rama llamada manufactura por capas, la cual comprende un conjunto de tecnologías de alto grado de automatización y flexibilidad, que permiten la obtención de piezas sólidas a partir de modelos o prototipos virtuales creados con casi cualquiera de los programas CAD (diseño asistido por computador) de modelamiento tridimensional; se caracteriza porque demanda un tiempo relativamente corto de desarrollo de modelos, un bajo consumo de energía, contaminación casi nula y poco ruido⁷.

Su desarrollo inicialmente buscó satisfacer la necesidad de crear rápidamente modelos o prototipos tridimensionales reales que permitieran al diseñador una interacción conceptual y/o funcional con el producto durante las etapas de diseño. La evolución de esta variedad de tecnologías de prototipado rápido hizo ver al diseñador la posibilidad de elaborar no solamente prototipos sino de fabricar directamente productos terminados mediante el uso de estas herramientas, una muestra de esto se aprecia en la Figura 2-3 donde se evidencia una motocicleta totalmente impresa en 3D.

² BOGART, M. In art the ends don't always justify means. Smithsonian, 1979 pp. 104-110.

³ BLANTHER J.E. “Manufacture of Contour Relief Maps”, US Patent #473,901, 1892.

⁴ KODAMA, H. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. Rev. Sci. Instrum. 1981. pp. 1770-73.

⁵ PRINZ, Friedrich B. *et al.* Rapid Prototyping in Europe and Japan VOLUME I. ANALYTICAL CHAPTERS. Japanese Technology Evaluation Center/World Technology Evaluation Center. 1997. p. 21-31.

⁶ SELLS, E.A. Towards a Self-Manufacturing Rapid Prototyping Machine, in a thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. University of Bath: Department of Mechanical Engineering. 2009. 307 p.

⁷ KELLY, J.F. y HOOD P. Printing in Plastic: Build Your Own 3D Printer. New York. Apress. 2011. 446 p. ISBN 9781430234449

Figura 2-3. Prototipo de Motocicleta impresa en 3D.



Fuente: http://farm5.staticflickr.com/4108/5058195641_9cc3bfeec1_o.jpg

Múltiples factores pueden considerarse para encontrar ventajas del prototipado rápido sobre el mecanizado CNC entre ellos se encuentran:

- Material: En productos finales se diferencian sobre todo en que el CNC se destaca con metales en cambio el prototipado rápido hace uso principalmente de polímeros con una diferencia final evidenciadas en las propiedades mecánicas de la pieza.
- Velocidad: La tecnología de CNC se caracteriza por comprender una larga etapa de preparación y planeamiento de las etapas de proceso incrementándose mientras más compleja sea la geometría de la pieza, en cambio en prototipado rápido solo se incluye una etapa de preparación para obtener el producto final.
- Complejidad de la pieza: Algunas características geométricas no pueden ser fabricadas en CNC si no se segmenta el proceso en varias etapas, sin embargo el prototipado rápido no se restringe de forma que cortes internos y vacíos pueden ser diseñados sin preocupaciones de fabricación.
- Precisión: La fabricación digital de prototipos se encuentra en el orden de las micras de precisión variando según la tecnología y la calidad requerida para las piezas, sin embargo se puede distinguir un aspecto fundamental en prototipado rápido en el que la resolución varía en los ejes ortogonales, por ejemplo indicando Z como el vertical para definir el espesor de capa, este eje tendrá menor resolución respecto a los ejes de movimiento en el plano, en cambio, en el mecanizado CNC la precisión de los ejes ortogonales poseen una resolución de

posicionamiento similar y depende en gran medida del diámetro de las herramientas que desbistan.

- Programación: Las variables a configurar en los software CAM correspondientes a cada tecnología para generar el código de control que va a ser traducido para fabricar la pieza, son totalmente diferentes encontrándose una favorabilidad en el prototipado rápido debido a menos cantidad de parámetros a configurar, por supuesto una mala configuración dará como resultado un error en la fabricación sin embargo en el mecanizado CNC un error puede resultar en un serio daño para la máquina como tal.

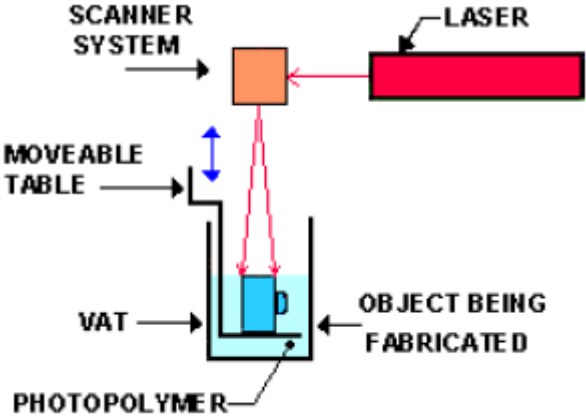
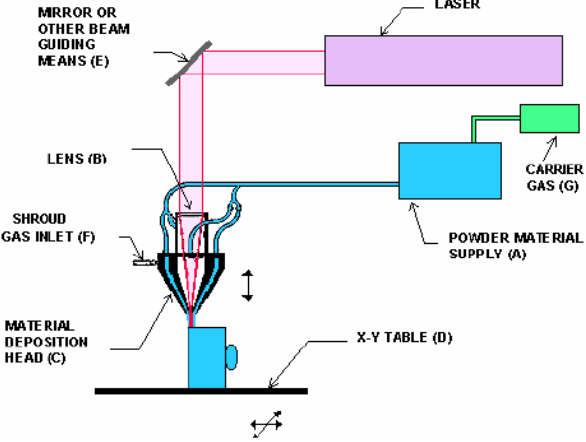
2.4 ESTADO DEL ARTE DEL PROTOTIPADO RÁPIDO

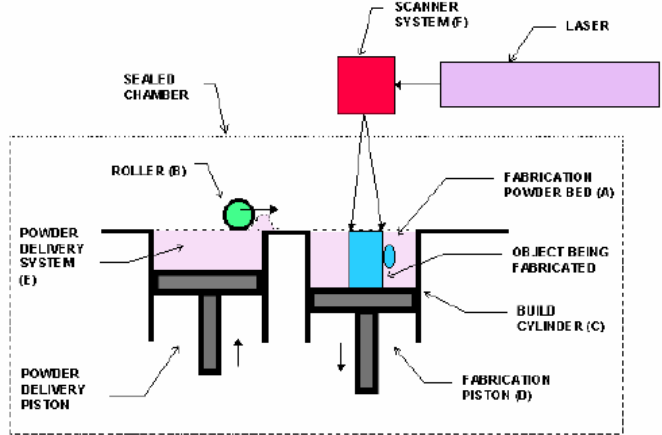
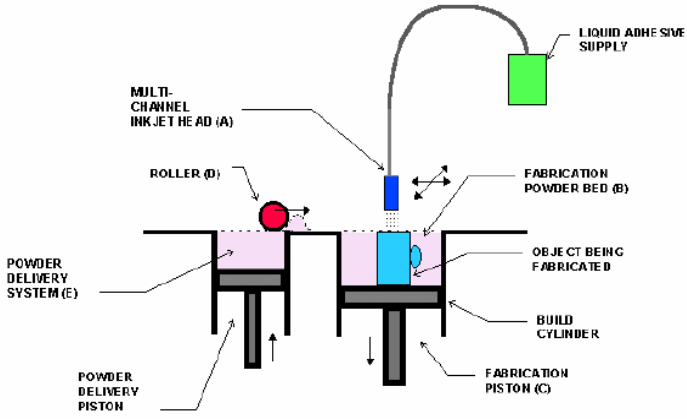
En la década de los 80's fueron desarrolladas una serie de tecnologías de prototipado rápido⁸ que varían según el material y el proceso físico-químico que utilizan para producir sus prototipos; todas ellas se encuentran patentadas y la mayoría fue desarrollada en Estados Unidos, en la Tabla 2-1. Se describen algunas de ellas:

⁸ CARNEVALE, Federico J., Rapid Prototyping. Ingeniería Mecánica, Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo ,Mayo 2008.

Tabla 2-1. Diversas Tecnologías de Prototipado Rápido.

| TECNOLOGÍA | DESCRIPCIÓN | ESQUEMA |
|---|---|--|
| <p>Modelado por deposición fundida (FDM)</p> | <p>Uno de los principales sistemas de prototipado por aditivo es el modelado por deposición de fundida o FDM. Fue desarrollado por Scott Crump y vendido por la empresa Stratasys desde 1991. Consta de una mesa con movimiento vertical y un cabezal automatizado en dos movimientos planos ortogonales. El cabezal funciona como extrusor, alimentado por un filamento de material termoplástico de diversos tamaños y calentándolo hasta derretirlo. Cada sección o capa de la pieza se construye depositando este material sobre una base. Una vez completada la capa, la mesa baja o sube según la configuración para continuar con la siguiente capa.</p> | <p>El diagrama ilustra el proceso de fabricación FDM. A la izquierda, un cabezal de extrusión (B) deposita un filamento de material termoplástico (rojo) sobre una mesa (D) que se mueve verticalmente. El material proviene de una bobina de suministro (A). El sistema está alojado en un horno (E) y controlado por un sistema de etapas X-Y-Z (C). Se muestra un objeto que está siendo fabricado.</p> |

| | | |
|---------------------------------------|---|---|
| <p>Estereolitografía (SLA)</p> | <p>Esta técnica fue inventada por Charles Hull en 1984 y hoy en día es desarrollada por 3D Systems Inc. Consiste en usar un rayo de luz ultravioleta para curar un fotopolímero, es decir, endurecer un polímero sensible a la luz. Una plataforma sumergida en un depósito tiene la capacidad de moverse verticalmente y el rayo UV dibuja sobre una pequeña capa la sección a construir. El material recorrido endurece formando el sólido. A continuación la plataforma baja, dejando otra capa para la sección siguiente.</p> |  <p>The diagram illustrates the SLA process. A red laser beam originates from a 'LASER' block and passes through a 'SCANNER SYSTEM' (orange box). The beam is focused through a lens onto a 'MOVEABLE TABLE' (blue double-headed arrow) which is submerged in a 'VAT' containing 'PHOTOPOLYMER'. The beam cures a thin layer of the polymer, forming an 'OBJECT BEING FABRICATED' (blue block). The table then moves vertically to expose a new layer.</p> |
| <p>Fusión Láser</p> | <p>El fusinado láser permite fabricar piezas metálicas densas con buenas propiedades mecánicas a velocidades razonables. Fue desarrollado por varias universidades y laboratorios de Estados Unidos y Europa y actualmente lo comercializa Optomec Design Corp. entre otros. Se utiliza un láser de gran potencia para derretir polvos metálicos que se suministran coaxialmente al foco del rayo. Una mesa con movimiento en dos ejes desplaza la pieza para crear cada capa.</p> |  <p>The diagram shows the L-PBF process. A 'LASER' (purple box) beam is directed through a 'MIRROR OR OTHER BEAM GUIDING MEANS (E)' and a 'LENS (B)' to a 'MATERIAL DEPOSITION HEAD (C)'. This head is mounted on an 'X-Y TABLE (D)'. Inside the head, 'POWDER MATERIAL SUPPLY (A)' and 'CARRIER GAS (G)' are delivered coaxially with the laser. A 'SHROUD GAS INLET (F)' surrounds the nozzle. The laser melts the powder to form a solid layer.</p> |

| | | |
|--|--|---|
| <p>Sinterizado selectivo con láser (SLS)</p> | <p>Este proceso, denominado SLS he inventado por Carl Deckard en 1986, se basa en sinterizar polvos en forma selectiva para construir una pieza. Consta de dos plataformas, una de alimentación de polvo y la otra de formación de la pieza. Un sistema de rodillo se encarga de depositar sobre la plataforma de formación el polvo. El sinterizador consiste en un rayo láser infrarrojo automatizado que cubre la sección que resultara sólida. La cámara está sellada y se mantiene a una temperatura justo por debajo del punto de fusión del polvo. Luego el resto del polvo sobrante debe ser extraído y puede reutilizarse. La pieza debe dejarse enfriar en la máquina y si se trata de grandes dimensiones, esta etapa puede durar hasta dos días.</p> |  <p>The diagram illustrates the SLS process within a sealed chamber. A scanner system (F) directs a laser beam onto a fabrication powder bed (A). A roller (B) moves powder from a powder delivery system (E) onto the bed. A fabrication piston (D) moves up and down within a build cylinder (C) to form an object being fabricated. Powder delivery pistons are also shown at the base of the powder delivery system.</p> |
| <p>Sinterizado con aglutinante – Impresión 3D</p> | <p>Este proceso fue desarrollado en el MIT. Consiste en distribuir un polvo sobre una superficie y luego aplicar selectivamente un adhesivo para endurecer la sección deseada. Esto se realiza secuencialmente moviendo los pistones, hasta que la pieza se completa. Una ventaja de este proceso es que las piezas pueden colorearse durante el proceso, mediante tinturas. Además, el polvo sin endurecer funciona como soportes y elimina la necesidad de usar soportes externos. El nombre de este proceso, en el mercado, es impresión 3D, o 3DP y actualmente es desarrollado por varias compañías como Z Corp., Soligen, ProMetal y Therics.</p> |  <p>The diagram shows the 3DP process. A multi-channel inkjet head (A) deposits liquid adhesive from a supply onto a fabrication powder bed (B). A roller (D) moves powder from a powder delivery system (E) onto the bed. A fabrication piston (C) moves up and down within a build cylinder to form an object being fabricated. Powder delivery pistons are also shown at the base of the powder delivery system.</p> |

| | | |
|--|--|--|
| <p>Manufactura con partículas balísticas</p> | <p>Este proceso, desarrollado por BPM Technology, se asemeja en mucho a una impresora de chorro de tinta. Uno o varios cabezales arrojan un chorro de material plástico, cerámico, metal o cera, hacia una superficie. Las gotitas son del orden de $50\mu\text{m}$ y se lanzan con una frecuencia de 10.000 Hz. Los cabezales están automatizados y se mueven en dos ejes mientras que un elevador mueve la pieza verticalmente. Luego de completada una sección otro cabezal uniformiza el ancho.</p> | |
| <p>Fabricación de objetos laminados (LOM)</p> | <p>Fue desarrollado por Michael Feygin en 1985 y llevado al mercado por Helisys. Estos procesos consisten en pegar sucesivamente capas de papel o plástico con un pegamento térmico en el medio. Luego las formas deseadas se queman con un láser. Debido a los materiales utilizados, son procesos económicos, orientados al prototipado de escritorio, y no se prestan a operaciones de manufactura posterior.</p> | |

Fuente: SELLS, E.A., *Towards a Self-Manufacturing Rapid Prototyping Machine*, in *A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy*. University of Bath: Department of Mechanical Engineering. 2009. 307 p.

2.5 PARÁMETROS DE SELECCIÓN DE SISTEMAS DE PROTOTIPADO RÁPIDO

Además del objetivo, coste y rapidez en la producción de una pieza, existen una serie de parámetros⁹ a tener en cuenta a la hora de elegir una tecnología y material adecuado. A continuación se presentan los parámetros tecnológicos más importantes a tener en cuenta y que pueden ser los que determinen la selección del proceso apropiado:

- Precisión en las dimensiones

Una cualidad lograda por casi todas las tecnologías es la precisión, la correspondencia de las medidas obtenidas en el prototipo rápido se corresponden fielmente con las del modelo virtual. Hace unos años un problema era la estabilidad de estos prototipos, algunos materiales con el tiempo se deformaban, esto ha quedado prácticamente eliminado.

- Prototipos rápidos en color

Con termoplásticos se obtienen piezas de colores. Empleando otra tecnología se pueden mezclar 2 resinas en diferentes proporciones, en el mismo proceso de fabricación, obteniendo una gama de combinaciones de colores y propiedades mecánicas, con los dos materiales básicos.

- Reproducción de los finos detalles

Este es un punto importante a la hora de elegir el prototipo rápido, hay que considerar 2 variables: la altura de capa y los dpi (dots per inch), estos parámetros determinan el acabado superficial del prototipo.

- Resistencia a temperatura.

Cuando se quiere someter el prototipo a pruebas con cierto nivel de temperatura, se tiene que tomar una decisión con el material de aporte, para ello es necesario contemplar sus propiedades térmicas de dilatación y fusión.

⁹ MARTÍN, Rafael Infante. Procesos de conformado de materiales poliméricos por prototipado rápido. [Online] 2012. <http://tfmrimuned.wordpress.com/>.

- Prototipos rápidos transparentes.

Se puede diferenciar prototipos totalmente transparentes y traslucidos para ello se debe utilizar una tecnología con la resina adecuada.

- Elasticidad, flexibilidad, dureza.

Para la obtención de prototipos con estas características se debe considerar el material a utilizar, el proceso de fabricación y el post procesamiento requerido.

- Aspecto visual.

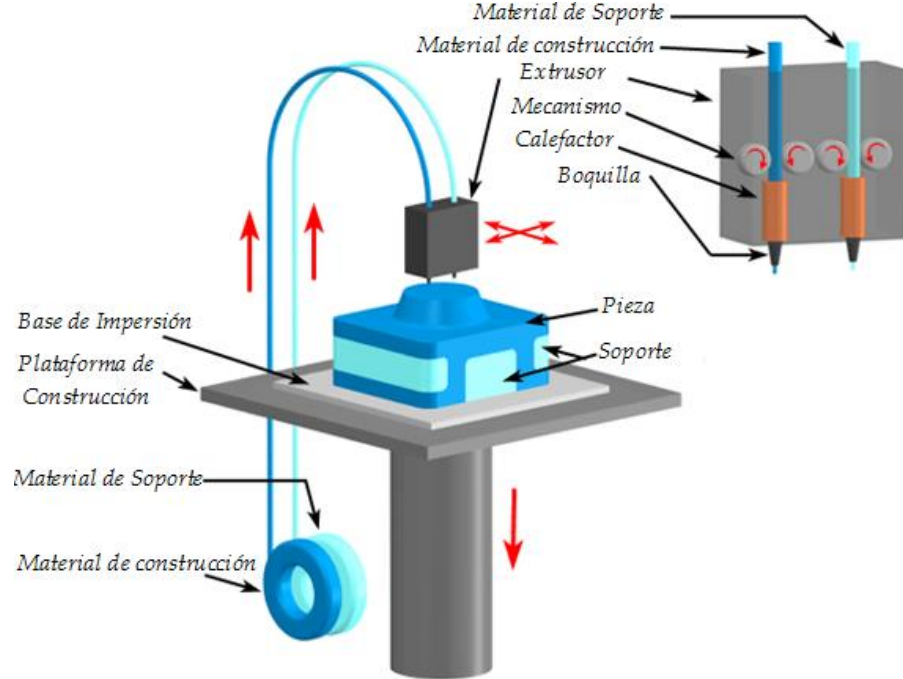
Cada tecnología tiene sus limitaciones y conocerlas puede hacer que la elección sea la adecuada. No todos los prototipos se pueden fabricar en todas las tecnologías, o por lo menos no de la misma calidad. Una de las cuestiones que definirán el aspecto visual de una pieza, será la altura de capa a la que pueden trabajar los sistemas. Desde una altura de capa muy fina como en estereolitografía, desde 0,0016 micras en algunos sistemas hasta alturas de capa de 0,33 mm en algunas máquinas FDM.

2.6 TECNOLOGÍA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)

En la técnica de prototipado rápido modelado por deposición fundida se parte del modelamiento de la pieza a construir en un software CAD, la conversión de dicho modelo a lenguaje de máquina y el gobierno de una planta para que un filamento plástico se desenvuelva de un rollo y alimente una boquilla de extrusión. La boquilla se calienta para fundir el plástico hasta alcanzar el estado de transición vítreo y mediante un mecanismo de dosificación se controla el flujo del material fundido¹⁰. La boquilla se monta sobre un sistema de posicionamiento tridimensional que ubica las coordenadas X, Y y Z determinadas por la discretización de la pieza y deposita un cordón o gota de plástico para formar cada capa del modelo. La Figura 2-4 ilustra la técnica FDM.

¹⁰ ZOU, G. Analysis on Influence Factors of Extrusion Filament Process of FDM. Manufacturing technology & Machine Tool. 2002. Vol 10 No 4, 32-34.

Figura 2-4. Descripción Gráfica de la tecnología Modelado por Deposición Fundida FDM.



Fuente: GRAYBILL, B., Development of a Predictive Model for the Design of Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling, in A thesis submitted for the degree of Master of Science. 2010, University of Missouri-Columbia.

Algunas características importantes de modelado por deposición fundida FDM a destacar se enuncian a continuación¹¹:

Aplicaciones:

- Prototipos creados para conceptualización y presentación. Debido a que el prototipo creado con esta tecnología se puede pintar, lijar, perforar,... se puede presentar terminado casi como el producto real.
- Prototipos para pruebas funcionales. Los creados con ABS pueden llegar a presentar un 85% de la resistencia del producto real, haciéndolos muy recomendables para productos de consumo.

Ventajas:

- Realiza piezas que tienen una alta precisión, reflejando fielmente el diseño, tanto en tolerancias de forma, como dimensionales. Campos de tolerancia máxima de 0,1 mm en 400mm de longitud.

¹¹ MARTÍN, Rafael Infante. Procesos de conformado de materiales poliméricos por prototipado rápido. [Online] 2012. <http://tfmrimuned.wordpress.com/>.

- Los prototipos creados no se deforman, son estables dimensionalmente y con muy buenas características mecánicas, para realizar ensayos funcionales, montajes, etc.
- Se realiza con materiales con excelentes resistencias a la temperatura desde 85 °C hasta 220 °C
- Aptos para pintar, cromar, mecanizar.
- Las piezas son menos pesadas respecto a las producidas por estereolitografía.
- Su velocidad relativa y bajo coste, permite hacer pequeñas series.

Limitaciones:

- Acabado superficial no demasiado bueno, aspecto granulado.
- Necesidad de soportes.
- Presenta escasa consistencia vertical.
- Tiene una exactitud restringida debido al tamaño de las capas con el que se trabaja.
- En general la velocidad de generación no es elevada. Cuando se trata de piezas grandes o gruesas se hace un proceso muy lento.
- Se pueden generar tensiones dentro del modelo debido al calentamiento y rápido enfriamiento que sufre el material en la deposición. Esto puede provocar distorsiones en el producto final.

2.7 ESTADO DEL ARTE

2.7.1 Impresoras industriales.

La empresa Stratasys Ltda, inventó su tecnología FDM (Fused Deposition Modeling) de prototipado rápido patentada en 1988, además posee más de 180 patentes a la actualidad, otorgadas o en trámite, para la fabricación de prototipos para la industria aeroespacial, defensa, automóvil, medicina, equipamiento industrial, educación, arquitectura y productos de consumo. A través del tiempo la compañía ha crecido y actualmente ofrece diversos tipos de impresoras 3D como: Dimensión, sistemas de producción Fortus 3D, desarrolladas para la fabricación digital directa y el prototipado rápido de precisión, e impresoras más pequeñas de fabricación personal llamadas Mojo¹², finalmente la compañía también facilita el sistema "Redeye On Demand", de fabricación digital de prototipos a pedido. Stratasys es la principal compañía productora de impresoras industriales 3D FDM sin embargo otras empresas como ExOneTM y 3D Systems se encuentran en el mercado. En la figura 2-5 se aprecian algunos modelos de las impresoras 3D comercializadas por Stratasys.

¹²Stratasys Inc.©. Material Safety Data Sheet. P400 ABS Model. [Online] http://www.redeyeondemand.com/MSDS/msdsModMat_P400ABS_0904.pdf. 2012.

Figura 2-5. Impresoras industriales Stratasy Ltd. © de izquierda a derecha a. Fortus b. Mojo c. Dimensión



Fuente: <http://www.stratasy.com/>

2.7.1 La impresión 3D y la manufactura personal

Según el crecimiento del mercado de impresoras 3D se estima que en pocos años, millones de hogares de todo el mundo dispongan de su propia impresora 3D así como actualmente disponen de una 2D. No será necesario ir a comprar una pieza dada, simplemente se descargará el modelo de Internet y se imprimirá en casa. Ya se pueden descargar infinidad de objetos como zapatos, ropa, instrumentos musicales, armas, obras de arte, prótesis, lámparas, entre muchos otros. Un ejemplo de impresora 3D personal se evidencia en la Figura 2-6.

En el año 2000 el concepto, de “fabricación digital”, hacía referencia a las máquinas capaces de convertir los datos digitales en productos físicos. Sin embargo, los precios de las impresoras tridimensionales eran prohibitivos, oscilaban entre los 48 000 y los 800.000 dólares. Entre 1988 y el año 2000 se vendieron unas 5.500 impresoras en todo el mundo, para uso industrial y científico. En los primeros años del siglo XXI (entre 2006 y 2007) coincidieron y convergieron una serie de avances tecnológicos que, a día de hoy, son los que están propiciando nuevos y apasionantes retos para la humanidad. Se están sentando las bases para la transición desde un modelo de producción industrial a un modelo de manufactura personal. Vivimos ya en plena cultura “Maker”, el “hazlo tú mismo”¹³.

¹³ PANIAGUA, Soraya. *De RepRap a Makerbot: la impresión 3D y la manufactura personal*. <http://www.sorayapaniagua.com/2013/02/18/de-reprap-a-makerbot-la-impresion-3d-y-la-manufactura-personal/>

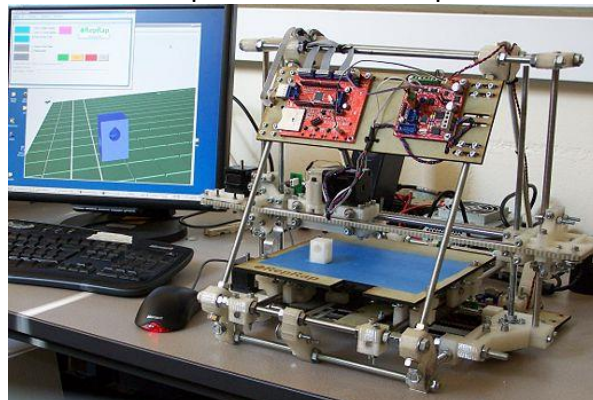
Figura 2-6. Impresora 3D personal, en la imagen se evidencia su tamaño relativo.



Fuente:<http://www.sorayapaniagua.com/2013/02/18/de-reprap-a-makerbot-la-impresion-3d-y-la-manufactura-personal/>

En 2005 el profesor Adrian Bowyer puso en marcha el proyecto RepRap, en la universidad inglesa de Bath, con el objetivo de crear una impresora 3D de bajo coste que, además, fuese auto replicante de forma que pudiera imprimir sus propios componentes para crear otra impresora igual. Paralelamente, en Italia, surgía el proyecto Arduino, una plataforma de desarrollo basada en microcontroladores ATMELE y un entorno de desarrollo compatible con cualquier sistema operativo. Inmediatamente RepRap incorporó Arduino. En 2006 se prueba el primer prototipo y en 2008 se lanza RepRap 1.0 "Darwin". RepRap es un proyecto abierto y colaborativo. Actualmente es la impresora 3D más utilizada entre los miembros globales de la Comunidad Maker. La comunidad RepRap dispone de varios modelos impresoras 3D como: Prusa Mendel, Huxley, Mendel y Darwin. En la Figura 2-7 se aprecia el modelo Mendel de la comunidad.

Figura 2-7. Modelo "MENDEL" de impresora 3D auto replicante de la comunidad RepRap



Fuente: <http://reprap.org/wiki/Mendel>

2.7.2 Impresoras Personales Comerciales Con Licencia Restringida

En término de impresoras personales se distinguen dos grupos importantes: las impresoras 3D comerciales con licencia para su comercialización y las impresoras 3D de fuente abierta o de diseño abierto. Entre el primer grupo se encuentran diversos nombres como: Replicator 2¹⁴ de industrias makerbot, Cube printer¹⁵ de 3D Systems o Creatr¹⁶ de Leapfrog, esta última ilustrada en la Figura 2-8

Figura 2-8. Impresora 3d personal comercial Leapfrog Creatr.



Fuente: <http://www.lpfrg.com/>

2.7.3 Impresoras Personales de Código Abierto.

A partir de octubre 2011, la impresora 3d Ultimaker de origen holandés parece ser la favorita de diseño en fuente abierta¹⁷. Es rápida, puede imprimir un volumen considerablemente grande y se construye sin muchas complicaciones. Ultimaker se centra en una rápida impresión a partir de sus características de movimiento incluyendo aceleración en los ejes y espesores de capa variables. En la figura 2-9 se muestra el modelo de la impresora Ultimaker.

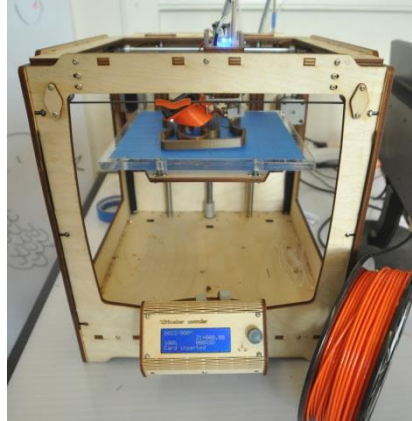
¹⁴ The Replicator™2 Desktop 3D Printer. [Online] <https://store.makerbot.com/replicator2.html>. 2012.

¹⁵ Cube® Creativity reimagined. [Online] <http://cubify.com/cube/>. 2012

¹⁶ Leapfrog-Creatr. [Online] <http://www.lpfrg.com/product/creatr/>. 2012.

¹⁷ 3D printing. EduTech Wiki. [Online] http://edutechwiki.unige.ch/en/3D_printing. 2012.

Figura 2-9. Impresora 3D Ultimaker de código abierto



Fuente: <http://www.tweetonig.nl/site/de-ultimaker/>

Son muchas las impresoras 3D personales de código abierto que han sido creadas desde que su pionera REPRAP apareciera. En la tabla 2-2 se detallan algunas impresoras personales y sus características, importantes en el proceso de impresión:

Tabla 2-2. Cuadro Comparativo de algunas impresoras 3D

| Nombre de la Impresora | Tipo Licenciado/ Abierto | Volumen de impresión X Y Z (pulgadas ") | Resolución Eje X-Y (mm) | Esesor de Capa Eje Z (mm) |
|------------------------|--------------------------|---|-------------------------|---------------------------|
| Ultimaker | Abierto | 8.3"x8.3"x8.3" | 0.0125 | 0.01 |
| Leapfrog creatr | Licenciado | 10.2"x7.8"x7.8" | 0.05 | 0.1 |
| Prusa Mendel | Abierto | 10.2"x7.8"x7.8" | 0.1 | 0.3 |
| Cube 3D Printer | Licenciado | 5½"x5½"x5½" | 0.25 | 0.7 |
| botmill-glider | Abierto | 8"x8"x8" | 0.1 | 0.3 |
| Printrbot LC | Licenciado | 6"x6"x6" | 0.1 | 0.25 |
| Makerbot Replicator 2 | Licenciado | 11.2"x6"x6.1" | 0.1 | 0.37 |
| Robotfactory | Licenciado | 9"x10"x7" | 0.3 | 0.01 |

| | | | | |
|---------------|------------|------------------|-------|------|
| FelixPrinter | Licenciado | 7.3"×10.75"×7.9" | 0.1 | 0.05 |
| Fab@Home | Abierto | 8"×10"×8" | 0.025 | 0.2 |
| seemecnc H1.1 | Licenciado | 6"×6"×6" | 0.2 | 0.3 |

Fuente: Información recopilada por los autores de los sitios web de cada impresora

Se observa de los datos recopilados en la Tabla 2-2 que el volumen de impresión máximo se encuentra alrededor de las 620 pulgadas cúbicas, además de unas dimensiones que por comodidad y el ánimo de que sea de escritorio, no superan las 12 pulgadas de longitud en una dirección. En términos de precisión el posible acabado de las piezas impresas con un estándar de espesor de capa de 0.1 mm es competitivo respecto al que ofrece la empresa Stratasys con sus máquinas las cuales son muy costosas.

2.8 MATERIALES UTILIZADOS PARA FDM

En la técnica de Modelado por Deposición Fundida (FDM), los materiales comúnmente utilizados son termoplásticos, tales como: ABS, policarbonato, Poli-Ácido Láctico (PLA) y una variedad de mezclas, sin embargo, como campo de investigación se están estudiando el uso de cerámica, materiales metálicos y compuestos de polímero y metal en menor proporción, todos ellos usados en el sector aeroespacial, médico, automotriz, electrónico entre otros¹⁸. En la figura 2 -10 se enuncian diversos termoplásticos usados en impresión 3D.

Figura 2-10. Diferentes tipos de Termoplásticos utilizados en impresión 3D FDM



Fuente: <http://www.stratasys.com/Resources/White-Papers/Thermoplastics-the-Best-Choice-for-3D-Printing.aspx>

¹⁸FISCHER, Fred. Thermoplastics - The Best Choice for 3D Printing. [Online] <http://www.stratasys.com/Resources/White-Papers/Thermoplastics-the-Best-Choice-for-3D-Printing.aspx>.

Usando los mismos tipos de materias primas que se encuentran en las instalaciones de moldeo por inyección de todo el mundo, la tecnología FDM materializa piezas de plástico con propiedades adecuadas para aplicaciones de modelado mediante el desarrollo y fabricación del producto. Al igual que con las piezas moldeadas, hay una variedad de opciones de materiales, cada uno con características únicas diseñadas para satisfacer las necesidades de la aplicación.

2.8.1 Selección de un Termoplástico

En los productos terminados, la estabilidad del material y rendimiento a largo plazo es fundamental. Así pues, se debe tener en cuenta las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, químicas y los cambios que resultan de envejecimiento o la exposición ambiental de las piezas fabricadas incluyendo prototipos funcionales, modelos, herramientas y material de fabricación. Tres aspectos son fundamentales para tener en cuenta en el momento de la fabricación:

- Las características del material principal
- Características de la máquina
- Necesidad de material soporte

Al revisar las opciones de material principal de fabricación, se tendrán diversas opciones sin embargo esta en el diseñador el criterio de selección que puede obedecer desde una norma de rendimiento crítico por ejemplo inercia química hasta preferencia personal como no necesitar post procesamiento. Cada material es similar en términos de la carga que puede soportar y la construcción de las piezas además son lo suficientemente seguros para manejarlos sin ningún equipo de protección. A continuación se listan algunos de los termoplásticos utilizados en impresión 3D FDM y se describen sus características y aplicaciones¹⁹:

- El ABS es un termoplástico, fuerte y duradero, utilizado en muchas industrias. Es un material ideal para diseño conceptual a través del diseño de prototipos. Los colores en los que se presenta el material son: blanco, azul, rojo, negro, amarillo, verde y gris. Las características del ABS permiten que sea usado para imprimir piezas grandes ya que

¹⁹ MARTÍN, Rafael Infante. Procesos de conformado de materiales poliméricos por prototipado rápido. [Online] 2012. <http://tfmrimuned.wordpress.com/>.

permite realizar modelos huecos (en donde solo se imprime el perímetro sin relleno) de tal forma que se ahorra material. Además, es un material que permite hacer grandes piezas en trozos y pegarlas entre sí. Resiste temperaturas hasta 85 °C y tiene unas propiedades mecánicas que permiten utilizar prototipos en muchas pruebas y ensayos funcionales para los sectores de automoción, eléctrico o electrodoméstico, los cuales son grandes consumidores de este termoplástico. Una de las características más interesantes de este material es que se le pueden aplicar diferentes acabados para obtener piezas de gran calidad superficial, por ejemplo se pueden pulir y pintar e incluso cromar ya que el plástico ABS es conductor de la electricidad.

- El policarbonato (PC) es un material termoplástico utilizado en una amplia gama de sectores industrias; automoción, aeronáutica, medicina, bienes de consumo, etc. Es un material muy apreciado porque ofrece una buena durabilidad y estabilidad junto con sus excelentes características de resistencia a la temperatura (160°C). Ofrece unas características de resistencia y fiabilidad a las que no llega ningún otro material de prototipado. Asimismo, el policarbonato ofrece mejores prestaciones que el resto de materiales fabricados con la misma tecnología de impresión 3D como el ABS o el PC-ABS.
- El PC-ABS es uno de los materiales más utilizados en la industria de los termoplásticos. Este material ofrece la mayoría de las propiedades deseables de los dos materiales de los que se compone (PC y ABS), respecto de las propiedades mecánicas y la resistencia térmica. Es utilizado en la industria de automoción, electrónica y aplicaciones de telecomunicaciones. En prototipado rápido, la única tecnología que ofrece este material es la tecnología FDM. Resiste temperaturas de 125°C, lo que le hace ser muy usado en aplicaciones como automoción) o iluminación.
- Poliamida. Es muy usada en los sistemas de prototipado por sinterizado láser (SLS). Se trabaja con diferentes materiales que aportan una amplia gama de soluciones, compuestos principalmente por polvo de poliamida, muy utilizado en múltiples sectores industriales, junto con cargas de polvo de vidrio, de carbono, de aluminio, o simplemente poliamida natural. Los prototipos realizados mediante sinterizado de poliamida tienen buenas características mecánicas para realizar ensayos funcionales en montajes, zonas de clipajes, esfuerzos de impacto, etc. Asimismo, son piezas que tienen buenas resistencias a productos químicos y una buena resistencia a la temperatura.
- Resinas Watershed. Resina totalmente transparente con propiedades mecánicas similares al ABS y una resistencia a la temperatura de 42-46 °C, que puede mejorarse con un curado posterior. Algunas de las aplicaciones de esta resina son: los lentes para automoción, botellas, equipamientos para fluidos, tubos, entre otras. Su característica

más llamativa es su transparencia sin ningún tono de color. Como en el resto de resinas, se debe tener en cuenta que pese a que el material es transparente, siempre existen marcas en las piezas por el contacto con estructuras de soporte o propiamente de las capas de construcción, esto se puede solucionar mediante un pulido y la aplicación de un barniz especial.

- PLA (poliácido láctico). El PLA no se deforma como el ABS, es ecológico, pero frágil. EL ABS es muy sólido, no ecológico y requeriría una superficie constantemente caliente para grandes impresiones. En cambio el PLA debido a sus características biodegradables representa ventajas en sus propiedades térmicas.

En general, los materiales FDM comparten muchas características que los hacen muy adecuados para el modelado, así como la fabricación de bajo volumen. Sin embargo, cada uno tiene propiedades únicas que los distinguen de los otros, como: la transparencia, la biocompatibilidad, resistencia química, resistencia térmica y resistencia mecánica, haciendo que la elección dependa en gran medida de la aplicación en donde se pretende usar el prototipo construido

2.9 SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO 3D

Dentro del volumen de construcción, una impresora 3D debe ser capaz de posicionar el extremo caliente de plástico fundido en cualquier punto en el espacio de trabajo, para poder extruir material dentro de la capa que se está imprimiendo. Sin embargo, el movimiento no tiene que ser limitado por la herramienta extrusora. Existen diversos métodos de posicionamiento mecánico aplicables a la técnica FDM²⁰, a continuación se listan algunos de ellos:

2.9.1 Gantry

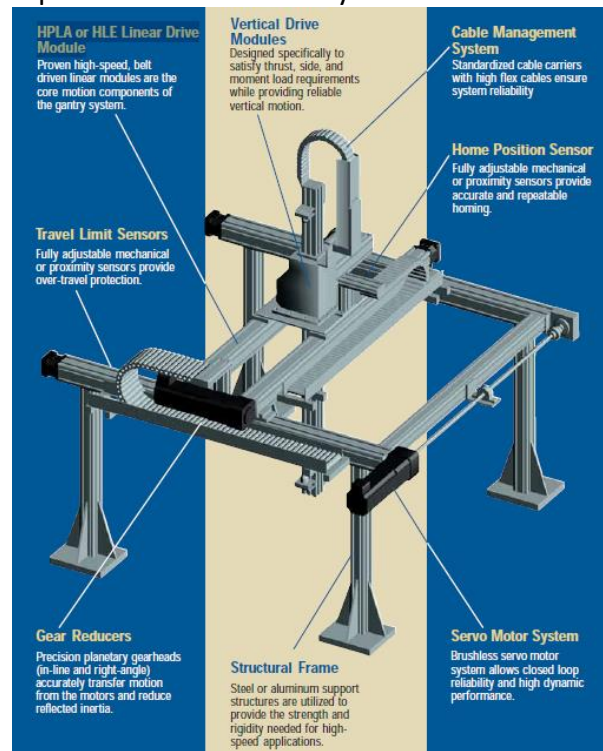
Este estilo de configuración mueve el extrusor de la impresora en el eje x y en el eje y, mientras que la plataforma de impresión sólo se mueve en el eje z. En la figura 2-11 se puede observar un ejemplo de robot ofrecido por la empresa Parker²¹ detallando cada una de sus partes dos controladores lineales horizontales un controlador lineal vertical,

²⁰ O'Reilly Make Ultimate Guide to 3D Printing. Sebastopol. Noviembre, 2012, ISSN 1556-2336

²¹ Parker Hannifin Corporation, Electromechanical Automation Division, Gantry Systems. [Online] http://www.parkermotion.com/literature/precision_cd/CD-EM/daedal/cat/english/Gantry%20Systems.pdf

sensores de posición en el inicio y final de cada eje, un componente flexible para transportar cable al cabezal, reductores mecánicos que transmiten adecuadamente el movimiento disminuyendo el efecto de inercia, servomotores en cada eje con sistema de control a lazo cerrado para aumentar la confiabilidad y rendimiento.

Figura 2-11. Sistema de posicionamiento Gantry

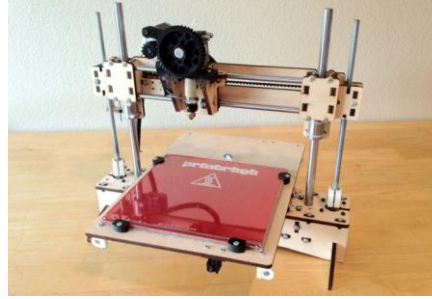


Tomado de: Parker Hannifin Corporation, Electromechanical Automation Division, Gantry Systems. [Online] http://www.parkermotion.com/literature/precision_cd/CD-EM/daedal_cat/english/Gantry%20Systems.pdf

2.9.2 Cama Movable

En lugar de mover el cabezal de impresión en los ejes x-y, uno de los ejes se cambia moviendo la cama en sí. Por lo general, una impresora de lecho móvil moverá el cabezal de impresión en el eje Z, es un diseño mecánicamente más simple en la que el eje X y el eje Y se gestionan de forma independiente mediante un movimiento totalmente lineal. Tiene la desventaja de que la impresora requiere más potencia para mover el peso de la base. Este sistema es más lento, pero a su vez es más simple. El equipo comercial Printrbot es un ejemplo de impresora con velocidad de impresión suficiente, de bajo costo y facilidad de mantenimiento, evidenciado en la figura 2-12.

Figura 2-12. Sistema de posicionamiento cama movable

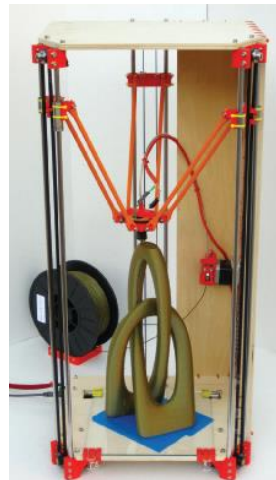


Tomado de: <http://printrbot.com/>

2.9.3 Deltabot

Esta configuración basada en un robot paralelo y llamada Rostock 3D printer²² tiene tres barras de control conectadas al cabezal herramienta, estas barras se pueden mover para controlar la posición del extrusor. Recientemente, Johann Rocholl ha adaptado esta tecnología a la impresión 3D logrando la creación Rostock mostrado en la Figura 2-13. Las impresoras Rostock utilizan una funda para separar el extremo caliente del extrusor, permitiendo un movimiento muy rápido y preciso con relativa simplicidad mecánica. El inconveniente es una mayor complejidad en el driver controlador y la programación; el posicionamiento final del extrusor no es un conjunto lineal de pasos debido a la no linealidad del movimiento entre el eje vertical y el posicionamiento planar del extremo caliente, recordando que para mover a cualquier dirección la herramienta se deben mover las tres barras simultáneamente de tal forma que se compensen entre sí.

Figura 2-13. Robot paralelo, impresora 3D FDM



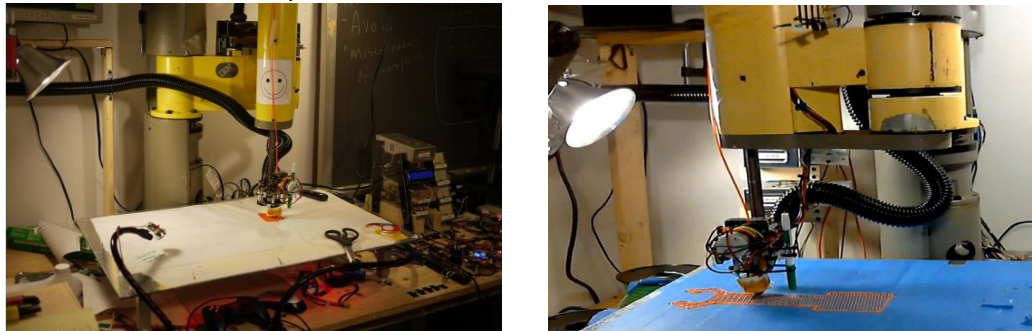
Tomado de: <http://billdrostock3d.blogspot.com/>

²² KOSSEL. Delta robot 3D printer prototype. [Online] <http://deltabot.tumblr.com/>.

2.9.4 Robot Scara

Dane Kouttron, un coleccionista gustoso del bricolaje, con ayuda del software Linux CNC: EMC de código abierto, logró adaptar un brazo de robot SCARA, con unidades de servomotores , y un extrusor de plástico ABS como cabezal de impresión; el proyecto²³ documenta como un Brazo Robot SCARA de 1980 IBM 7575, es convertido en una impresora 3D funcional. Unas de las características a destacar es el uso de un controlador PID en los controladores de los motores para mejorar la precisión del movimiento, además de la construcción de un área de trabajo climatizada y un simulador para evidenciar paso a paso virtualmente la construcción de la pieza 3D. El enorme alcance del robot 7575, permite imprimir objetos de gran tamaño, aproximadamente 25 "x 12" x 6.5 " máximo. En la figura 2-14 se muestra la con figuración física:

Figura 2-14. Robot SCARA, impresora 3D FDM.



Tomado de: <http://transistor-man.com/3dprintbot.html>

2.9.5 Hexapodo

Un robot de 6 patas fue programado por Matt Denton ²⁴; en el que a través de la conversión de archivos .DXF en comandos de traducción para controlar un pequeño router CNC que ubica la herramienta en la pequeña cabeza de “la araña”, está posee una resolución de trabajo baja, entre 7 y 8 bits, con cerca de 0,5 mm de repetición, por lo que tiene muy baja precisión. Las trayectorias son seguidas y discretizadas a través de pequeños segmentos de recta, convirtiendo arcos y círculos en segmentos. Esta

²³ KOUTTRON, Dane. 3D Print-ARM. [Online] <http://transistor-man.com/3dprintbot.html>. 2012.

²⁴MATT, Denton. Hexapod Robot CNC router. [Online] <http://www.hexapodrobot.com/forum/viewtopic.php?f=14&t=12>.

configuración no ha sido probada para impresión 3d pero tiene un uso potencial. En la figura 2-15 se puede apreciar una parte del mecanizado en espuma densa.

Figura 2-15. Robot hexápodo realizando operaciones de mecanizado



Tomado de: <http://www.hexapodrobot.com/forum/viewtopic.php?f=14&t=12>

2.10 ESTRATEGIAS DE CONTROL

Dentro del diseño de la impresora se contemplan algunas estrategias de control conducentes a supervisar el sistema, de tal forma que se aseguren algunos parámetros de seguridad y funcionamiento correcto de la misma. Algunas de ellas son:

- Control a lazo abierto

En esta estrategia de control no existe retroalimentación por parte de la planta hacia una tarjeta de control, solo esta última ejerce su función sobre los actuadores pero no se mide la respuesta final de acción.

- Control a lazo cerrado

En esta estrategia de control existe una retroalimentación hacia la controladora de tal forma que se compara la señal de actuación medida a través de sensores con una señal base o señal de referencia, para establecer las acciones de control con base en la señal de error para que tienda a ser iguales y así se minimicen posibles errores.

Control Proporcional Integral Derivativo (PID)

Un controlador PID (Proporcional Integrativo Derivativo) es un mecanismo de control genérico sobre una realimentación de bucle cerrado, ampliamente usado en la industria para el control de sistemas. El PID es un sistema al que le entra un **error** calculado a partir de la salida deseada menos la salida obtenida y su salida es utilizada como entrada en el

sistema que se quiere controlar. El controlador intenta minimizar el error ajustando la entrada del sistema:

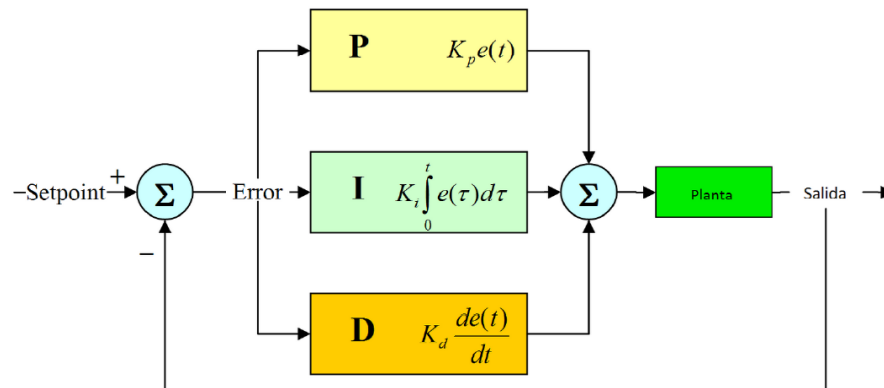
Se puede destacar la siguiente ecuación de la estrategia de control PID, en ella se muestra el modelo de la salida del controlador que servirá como señal de entrada de control al proceso. El proceso se ilustra en la figura 2-16.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Dónde:

- $e(t)$ es el error de la señal.
- $u(t)$ salida del controlador y entrada de control al proceso.
- K_p es la ganancia proporcional.
- K_i es la ganancia de tiempo integral.
- K_d es la ganancia de tiempo derivativa.

Figura 2-16. Diagrama de control PID



Fuente:<http://brettbeauregard.com/blog/wp-content/uploads/2012/07/Gu%C3%ADa-de-uso-PID-para-Arduino.pdf>

Del diagrama de flujo se determina lo siguiente:

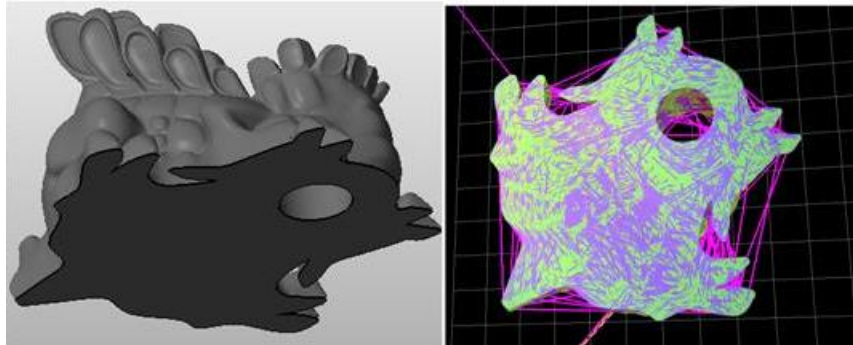
- El primer bloque de control (*proporcional*) consiste en el producto entre la señal de error y la constante proporcional, quedando un error en estado estacionario casi nulo.

- El segundo bloque de control (*integral*) tiene como propósito disminuir y eliminar el error en estado estacionario, provocado por el modo proporcional. El control integral actúa cuando hay una desviación entre la variable y el punto de consigna, integrando esta desviación en el tiempo y sumándola a la acción proporcional.
- El tercer bloque de control (*Derivativo*) considera la tendencia del error y permite una repercusión rápida de la variable después de presentarse una perturbación en el proceso.

2.11 ANÁLISIS DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE SOFTWARE PARA EL DISEÑO.

A partir del Diseño geométrico de una pieza en un software CAD como puede ser Solid Edge, SolidWorks, Autodesk Inventor, entre otros; el modelo es exportado a un formato estándar de prototipado rápido o de estereolitografía con extensión .STL, este formato corresponde a la definición de la superficie que delimita exteriormente al modelo tridimensional y a la discretización de la pieza de forma triangularizada y en consecuencia adaptada a ella. Cada triángulo es descrito en un sistema referencial cartesiano, por una dirección normal y tres puntos que representan los vértices del triángulo. Estos datos son utilizados por un algoritmo seccionador por capas que determina las secciones transversales de la pieza. El anterior proceso se realiza por la conversión del archivo .STL²⁵ a código de máquina o código G, que determina las coordenadas de posición para la impresión en 3D, la velocidad de movimiento, distancia entre capas y la actividad del extrusor de material. La Fig. 2-17 muestra una pieza en las diferentes etapas del proceso.

Figura 2-17. Modelo CAD y Formato .STL de un modelo creado

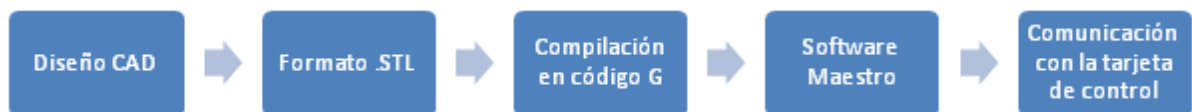


Fuente: los autores

²⁵ KUMAR, V. y DUTTA, D.. An assessment of data formats for layered manufacturing. *Advances in Engineering Software*. 1997. Vol 28 No 3, 151–164.

Finalmente un software maestro, que integra el código G, configura diversas variables como el tiempo de inicio para puesta a punto, la temperatura de la herramienta de extrusión de material²⁶, el avance y retroceso de cada eje, el inicio y las paradas de emergencia²⁷; la figura 2-18 muestra el diagrama de flujo de información.

Figura 2-18. Diagrama de flujo de información para el control del sistema.



Fuente: los autores

2.12 MECANISMOS DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO LINEAL

2.12.1 Efecto de backlash en sistemas mecánicos

El backlash es el juego entre las partes móviles adyacentes al sistema motriz de un mecanismo y está presente en todos los sistemas mecánicos en los que un elemento de accionamiento (motor) no está conectado directamente con el elemento accionado (carga).

El backlash es una de las no linealidades más importantes que limitan el rendimiento en el control de velocidad y posición de actuadores en diversos sectores como: industrial, robótica, automotriz, automatización entre otros.

Teóricamente, El backlash debería ser cero, pero en la práctica algún backlash debe permitirse para evitar atascamientos. Es inevitable para casi todos los acoplamientos de marcha atrás mecánicos, aunque sus efectos pueden ser disminuidos. En algunas ocasiones el efecto de backlash es requerido por ejemplo para permitir lubricación, fabricación de errores, deflexiones bajo carga o expansión térmica.

²⁶ VARGAS, H. Estudio de la Calidad Superficial en el Prototipado Rápido, Proceso FDM. Extraído el 15 de mayo, 2012, de http://www.postmat.unal.edu.co/resumen_inspeccion_fdm.pdf.

²⁷ MONTERO, M, *et al.* Material Characterization of Fused Deposition Modeling (FDM) ABS by Designed Experiments. 2001. Extraído el 5 de abril, 2012, de http://everandever.com/dan/publications/sme_rp_2001.pdf.

2.12.2 Husillos a bolas o tornillos de bolas

Un tornillo de bolas ilustrado en la figura 2-19 es un actuador lineal que transmite una fuerza o movimiento con fricción mínima, la ranura tiene un ángulo de hélice que se ajusta con el ángulo de la hélice de la tuerca y de las bolas²⁸.

Figura 2-19. Husillo a bolas



Fuente: <http://www.americanballscrewrepairs.com/images/pages/ballscrewjuly2.jpg>

Cuando el tornillo y la tuerca tienen movimientos relativos uno respecto del otro, las bolillas son apartadas de un extremo de la tuerca de bolas y son llevadas a través de la guías hasta el extremo opuesto de la tuerca, tal recirculación permite que la tuerca viaje sin restricciones con respecto al tornillo. Las pérdidas de fricción entonces son mínimas por dicho rodamiento. Esta característica es una de las ventajas más importantes que los tornillos de bolas tienen sobre los de rosca, es posible tener eficiencias de 90% o mayores en una gama muy amplia de ángulos de hélice.

Ventajas:

- Eficiencia alta (90% o mayor).
- Vida esperada predecible.
- Posicionamiento preciso y repetitividad de posición.
- No hay tendencia de “pegarse-deslizarse” como en los otros tornillos.
- La expansión térmica debido a la fricción es despreciable.
- Facilidad de precargarse para eliminar holguras sin aumento apreciable de rozamiento.
- Se pueden usar motores relativamente pequeños por tener bajo par de arranque.
- Movimiento suave y control en todo el recorrido.

²⁸CHANGOLUISA, C.E. y HERRERA, X.V. Diseño y Construcción de un Prototipo de Torno Automático Mediante Control Numérico Computarizado CNC, Proyecto de grado para la obtención del Título de Ingeniero Electromecánico. 2007. Escuela Superior Politécnica Del Ejército Sede-Latacunga.

Desventajas:

- Requiere de buena lubricación
- Debido a la alta eficiencia, su carga tiende a bajar por sí misma en aplicaciones verticales, por tanto si se requiere de sistema autobloqueado será necesario instalar un freno externo.
- La inclusión de basura o materias extrañas pueden reducir o terminar con la vida del tornillo.
- Alto Costo.

Debido a que la capacidad de transportar carga de un tornillo de bolas es mayor que en la de un tornillo de potencia de tamaño equivalente, este no es tan rígido como un tornillo de potencia común por lo que la deflexión y la velocidad crítica pueden ser factores muy importantes a tener en cuenta.

2.12.3 Polea-correa dentada

Las correas dentadas son unidades sincrónicas que constituyen una importante categoría de mecanismos de transmisión de movimiento. Estas unidades emplean el acoplamiento positivo de dos conjuntos de dientes engranados; buscando, que no se resbalen y no haya movimiento relativo entre los dos elementos que lo conforman. En la figura 2-20 se ilustra el mecanismo de polea- correa dentada.

Figura 2-20. Polea-Correa dentada



Fuente: http://img.directindustry.com/images_di/photo-m2/113-200-t-belt-gt2-3-20206-2544071.jpg

Las diferentes partes del mecanismo mantendrán una relación de velocidad constante, incluso una posición relativa permanente, aspecto importante en aplicaciones como máquinas automáticas en las que participa una secuencia de movimiento definido²⁹.

²⁹ Handbook of timing belts and pulleys [Online] <http://www.sdp-si.com/D265/HTML/D265T003.html>

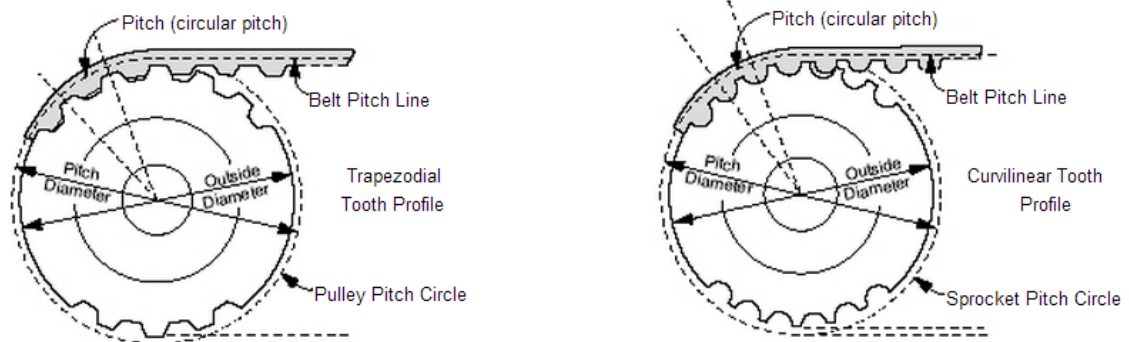
Estos mecanismos son capaces de transmitir pares de gran magnitud y soportar grandes aceleraciones, además las correas de transmisión son particularmente útiles en aplicaciones donde la flexibilidad de diseño es importante.

Las correas de distribución son, correas planas con una serie de dientes espaciados de manera uniforme sobre la circunferencia interior, combinando así las ventajas de la correa plana con las características de agarre de las cadenas y los engranajes.

La tensión requerida de la correa es baja, por lo tanto, la producción de cargas de apoyo es muy pequeña, no hay deslizamiento o fricción así, las correas no se estiran y no requieren lubricación. La velocidad se transmite uniformemente.

El perfil de los dientes de la mayoría de las correas síncronas es de forma trapezoidal, con lados que son líneas rectas que generan una involuta similar, a la de un diente de engranaje recto. Como resultado, el perfil de los dientes de la polea es envolvente. A diferencia de la rueda dentada recta, sin embargo, el diámetro exterior de una polea de distribución es menor que su diámetro de paso, creando así un diámetro de paso imaginario que es más grande que la propia polea. Esto se ilustra en la figura 2-21. El juego entre dientes de la polea y la correa es insignificante.

Figura 2-21. Geometría mecanismo de polea- correa dentada



Fuente: <http://www.sdp-si.com/D265/HTML/D265T003.html>

El cinturón de forma trapezoidal puede ser reemplazado por un perfil de dientes curvilíneo que exhibe algunas cualidades superiores. Las ventajas de este tipo de unidad son las siguientes:

- Diente proporcionalmente más profundo, por lo que la pérdida de posición relativa es menos probable.
- Una construcción más ligera, con una pérdida centrífuga menor.

- Menor presión de la unidad sobre el diente ya que el área de contacto es mayor
- La tensión de instalación es pequeña, por lo tanto, las cargas en los rodamientos son más suaves.

Existen una variación de las correas síncronas típicas, estas son llamadas correas de precisión entre ellas se encuentran las del tipo GT2 a continuación sus ventajas:

Ventajas:

- Mayor vida útil de la correa

Se considera una vida útil mayor debido a que proporcionan la flexibilidad necesaria para soportar fuerte tracción, además, debido a una mayor profundidad, el perfil del diente proporciona una fuerza de carga superior y reduce el trinquete cuando se utiliza con poleas.

- Funcionamiento más silencioso

La correa GT2 está especialmente diseñada con dientes que engranan limpiamente con ranuras de poleas, esto para reducir el ruido y la vibración; el resultado es la reducción del ancho de la cinta y la reducción de ruido significativa en comparación con las correas trapezoidales.

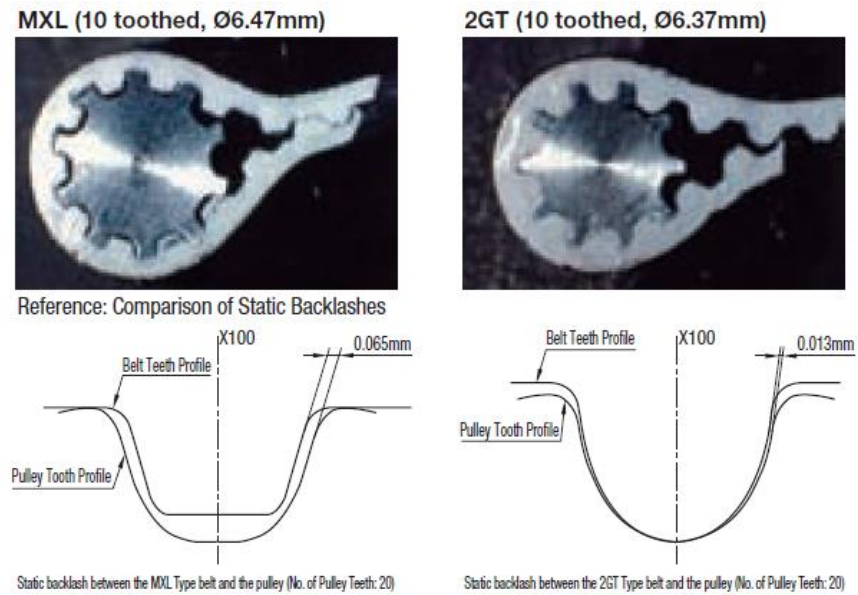
- Posicionamiento preciso

Las correas GT2 están diseñadas específicamente para aplicaciones donde la precisión es fundamental, como impresoras y plotters informáticos, equipos de laboratorio y máquinas herramientas, debido a la disminución que ofrecen en el efecto backlash generado en por el ir y venir de los mecanismos.

Particularmente en el mecanismo polea-correa dentada al respecto del efecto backlash existente en el juego de contacto presentado entre el piñón y la correa, se encuentra que existen algunas correas de especial construcción que reducen su efecto, aumentando así la precisión en el movimiento.

En la figura 2-22 se ilustra el contacto existente entre los dientes de un piñón y las cavidades de una correa, entregando una favorabilidad para las correas 2GT en lo concerniente a disminución de backlash y aumento de agarre.

Figura 2-22. Contacto existente entre los dientes de un piñón y cavidades de una correa dentada



Fuente: <http://www.designworldonline.com/backlash-vs-stiffness-what-the-difference-is-and-why-you-should-care/>

2.12.4 Tornillo de avance-husillo

Un tornillo de avance, también conocido como un tornillo de potencia ilustrado en la figura 2-23, es un tornillo diseñado para traducir movimiento giratorio en movimiento lineal. Una tuerca de husillo es compañera del tornillo, y en consecuencia tienen una fricción relativamente alta en comparación con la fricción estática y las partes mecánicas que se acoplan con las superficies de rodadura y los rodamientos. El valor de la eficiencia de un husillo se encuentra típicamente entre 25 y 70%.

Figura 2-23. Tornillo de avance-husillo



Fuente: <http://image.made-in-china.com/2f0j00cKETFegqZQom/316-Stainless-Lead-Screw-Threaded-Rod-With-Brass-Nut.jpg>

La alta fricción interna deduce que los sistemas de husillo no suelen ser utilizados para operación continua a alta velocidad, ya que se sobrecalientan, además, el tornillo típicamente es auto-bloqueante y se utiliza en aplicaciones donde el retroceso es inaceptable, como sostener cargas verticales.

Ventajas

- Gran capacidad de transporte de carga
- Compacto
- Fácil de diseñar
- Fácil de fabricar; no se necesita maquinaria especializada
- Movimiento lineal preciso y exacto
- Suave, silencioso y de bajo mantenimiento
- Número mínimo de piezas
- La mayoría son de cierre automático

Desventaja

- Debido a que poseen baja eficiencia, no pueden ser utilizados en aplicaciones continuas de transmisión de potencia. También tienen un alto grado de fricción en la rosca, lo que las puede desgatar rápidamente. Para roscas cuadradas, la tuerca debe ser sustituida periódicamente; para roscas trapezoidales, una tuerca dividida puede usarse para compensar el desgaste³⁰.

2.13 PROCESO DE EXTRUSIÓN DE POLÍMEROS EN LA TECNOLOGÍA FDM

En la tecnología de extrusión de polímeros³¹, el material contenido en un depósito es forzado a salir a través de una boquilla cuando es fundido y se le aplica presión. Si la presión permanece constante, el material extruido como cordón fluye a una velocidad uniforme, manteniendo una sección transversal de diámetro. Este diámetro se mantiene constante si el desplazamiento de la boquilla a través de una superficie donde se deposita el material también se mantiene a una velocidad de constante.

El material debe estar en estado fundido cuando sale de la boquilla y solidificar completamente después de la extrusión. Además, el material de unión depositado

³⁰ KELLY, J.F. y HOOD P. Printing in Plastic: Build Your Own 3D Printer. New York. Apress. 2011. 446 p. ISBN 9781430234449

³¹ GIBSON, I., ROSEN D.W. y STUCKER B. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Springer. 2010.

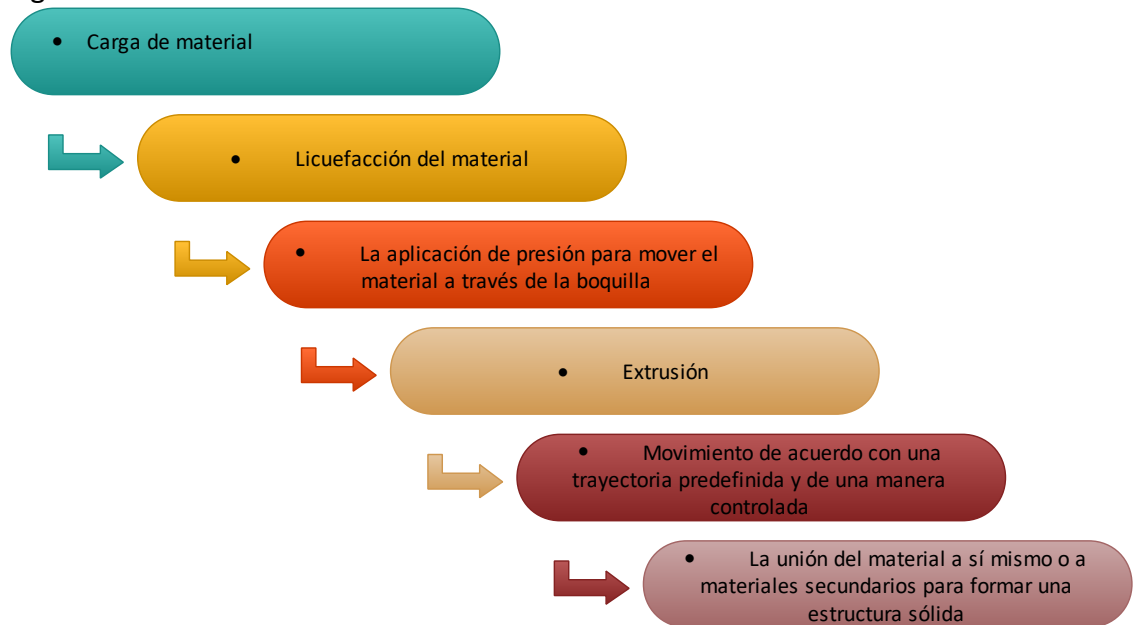
previamente al material que ya ha sido extruido debe solidificar para que al final, resulte una estructura sólida.

La máquina debe poseer la capacidad de mover una herramienta en un plano horizontal tanto como para iniciar, como para detener el flujo de material. Una vez que una capa se ha imprimido, la plataforma de impresión debe moverse hacia arriba, o mover hacia abajo la pieza, para que una capa adicional pueda ser producida.

Hay dos enfoques principales cuando se utiliza un proceso de extrusión. El método que más se emplea es el uso de temperatura como una forma de controlar el estado del material. El material fundido se licua dentro de un depósito de modo que pueda fluir a través la boquilla y a través del enlace con el material adyacente antes de solidificarse. Este enfoque es similar a los procesos convencionales de extrusión de polímero, excepto que la herramienta extrusora es verticalmente montada en un sistema de trazado en lugar de permanecer en una posición fija horizontal.

En la figura 2-24 se ilustran serie de características que son comunes a cualquier sistema de extrusión como:

Figura 2-24. Características comunes de un sistema de extrusión



Fuente: Los autores

Una comprensión matemática o física basada en procesos de extrusión puede resultar muy compleja, ya que puede involucrar muchos términos no lineales. El proceso implica la extrusión de materiales altamente viscosos a través de una boquilla. Es razonable suponer que el material fluye como un fluido newtoniano en la mayoría de los casos.

2.13.1 Cargar material

Se debe asegurar un suministro continuo de material en el calefactor. Los métodos más adecuados de suministro son en cartuchos, forma de polvo o cuando el material se alimenta como un filamento continuo; este último mostrado en la figura 2-25. La cámara calefactora es la ubicación principal para el proceso de fundición del polímero. En el extrusor diseñado una ruda dentada empuja un filamento continuo de material a través de la base del depósito, lo cual es suficiente para generar la presión necesaria de salida a través de la boquilla.

Figura 2-25. Carrete de filamento de ABS, material suministrado a la máquina.

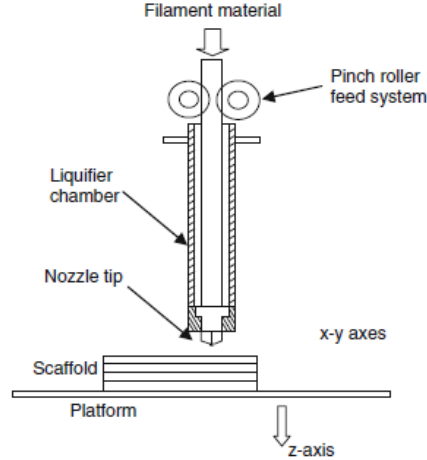


Fuente: <http://store.makerbot.com/filament>

2.13.2 Fundición

El método de extrusión funciona sobre el principio de que lo que se encuentre en la cámara se convierta en un líquido y puede ser expulsado a través de la boquilla. El calor aplicado a la cámara se aplica por una bobina envuelta alrededor de esta y debe conducir el calor para mantener una temperatura constante en la masa fundida. Entre más grande sea la cámara, la licuefacción puede convertirse en un problema por numerosas razones relacionadas con la transferencia de calor, como la existencia de corrientes térmicas dentro de la masa fundida, el cambio en el estado físico del material fundido, la ubicación de sensores de temperatura, entre otras. La figura 2-26 muestra una configuración típica de una herramienta extrusora.

Figura 2-26. Configuración general de un sistema de extrusión



Fuente: GIBSON, I., ROSEN D.W. y STUCKER B. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Springer. 2010.

El material dentro de la cámara debe mantenerse en un estado fundido, pero deben tomarse medidas para mantenerlo a una temperatura adecuada, ya que algunos polímeros se degradan rápidamente a temperaturas más altas y podrían quemarse, además de dejar residuos en el interior de la cámara que serían difíciles de eliminar y que contaminasen mientras se derrite. También a mayor temperatura dentro de la cámara se requiere enfriamiento adicional después de la extrusión.

2.13.3 Extrusión

La boquilla de extrusión determina la forma y el tamaño del filamento extruido. Un mayor diámetro de la boquilla permitirá que el material fluya más rápidamente, pero daría lugar a una parte con menor precisión en comparación con el dibujo original CAD. El diámetro de la boquilla también determina el tamaño mínimo de filamento que se puede crear, además se debe tener cuidado con esto ya que al configurar el software es mejor colocar un diámetro mayor al de la boquilla para los cordones de material para así estar seguro de la simulación generada en el slicer y reproducir fielmente la pieza. Basados en procesos de extrusión existentes se dice que para piezas más grandes que los cordones deben poseer características y espesores de pared de al menos dos veces el diámetro nominal de la boquilla de extrusión utilizada. El Material que fluirá a través de la boquilla está controlado por la caída de presión entre la cámara y la atmósfera circundante, la geometría de la boquilla y la viscosidad del material, la cual es función de la temperatura.

2.13.4 Solidificación

Una vez que el material se extruye, idealmente debería seguir siendo de la misma forma y tamaño. La gravedad y la tensión superficial, sin embargo, pueden provocar que el material cambie de forma, mientras que el tamaño puede variar de acuerdo a los efectos de enfriamiento y secado. Si el material se extruye en un estado fundido, también puede encoger al enfriarse. El enfriamiento también es muy probable que no sea lineal. Si este efecto no lineal es significativo, entonces es posible la pieza resultante se deforme tras el enfriamiento. Esto puede minimizarse garantizando el diferencial de temperatura entre la cámara y la atmósfera circundante manteniéndolo a un mínimo con un perfil gradual y lento.

Es razonable suponer que un sistema de extrusión basado en AM se extruirá desde una gran cámara a una pequeña boquilla a través del uso de una interface cónica. Como mencionado antes, la masa fundida se adhiere a las paredes de la licuador y la boquilla con una velocidad cero en estos límites, sometiendo el material a deformación por cizallamiento durante el flujo del mismo.

2.13.5 Control Posicional

Debido a la configuración mecánica de la máquina, la herramienta extrusora está montada sobre el eje x, este a su vez esta sostenido por el eje z, que al final es el que realiza el movimiento en dirección vertical para permitir la formación de las capas individuales. El cabezal de extrusión realiza un sistema de trazado que permite el movimiento horizontal. Este trazado debe coordinarse con la velocidad de extrusión para asegurar una deposición consistente.

Puesto que el filamento trazado representa una masa, contiene un elemento inercial cuando se mueve en una dirección específica, cualquier cambio en la dirección debe resultar en una desaceleración seguido por una aceleración. La correspondiente velocidad de flujo de material debe coincidir con este cambio en la velocidad, porque si no se realiza el camino de material quedará demasiado o, muy poco depositado en una región particular.

El mecanismo más apropiado a utilizar debe poderse mover en un plano estándar. Esto implica mover dos ejes ortogonalmente montados (X e Y) de movimiento lineal como la transmisiones por correa dentada propuesta. Estas unidades deben ser de gran alcance, suficiente para mover la cámara de extrusión a la velocidad requerida y permitir cambios rápidos de dirección sin efectos de holgura. El sistema también debe ser suficientemente fiable para permitir el movimiento constante a lo largo de muchas horas sin ninguna

pérdida en la calibración. Los sistemas más económicos, a menudo hacen uso de ejes accionados por motores paso a paso, el aumento en los costes de otros sistemas se ve reflejado en el uso de servomotores con husillos de bolas acoplados como tecnología transmisora de movimiento.

Puesto que los cambios rápidos de dirección pueden hacer que sea difícil controlar el flujo de material, una estrategia común para dibujar el contorno de una pieza a ser construida, es utilizar una velocidad más lenta en el movimiento para asegurar que el flujo de material se mantenga a una velocidad constante.

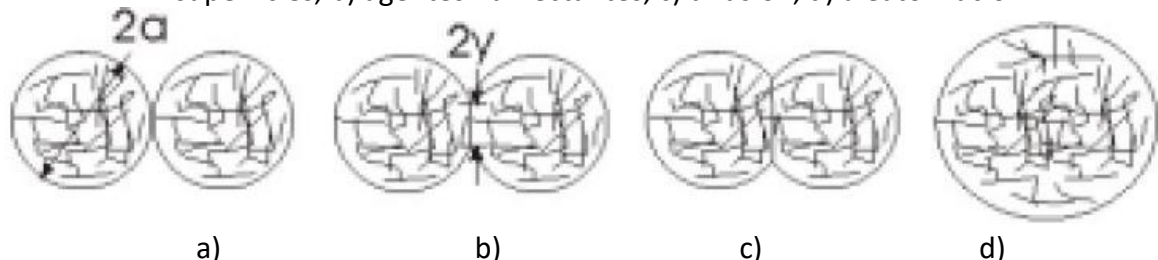
2.13.6 Proceso de sinterizado de material

La sinterización de polímeros es un fenómeno encontrado en diversas aplicaciones industriales. La Sinterización se inicia por la adhesión de partículas a diferentes densidades que posteriormente forman un sistema homogéneo debido a la acción de la tensión superficial. La Sinterización es uno de los mecanismos de unión dominantes en el modelado de deposición fundida FDM.

El proceso de sinterización se esquematiza en la Figura 4-9, las secciones transversales de los filamentos están idealizadas como círculos. El primer paso del proceso es la creación de un contacto interfacial molecular por humectación. Las moléculas luego se someten a movimientos hacia la periferia para alcanzar el equilibrio de adsorción. Entonces las moléculas se difunden a través de la interfaz, en donde reaccionan para formar enlaces químicos primarios.

La magnitud del cuello formado entre los filamentos da una indicación parcial de la calidad de la unión. El crecimiento del cuello resultante de la Sinterización se calcula como la relación de mástil (Y) con un radio del cilindro (a), como se indica en la Figura 2-27 a) y b).

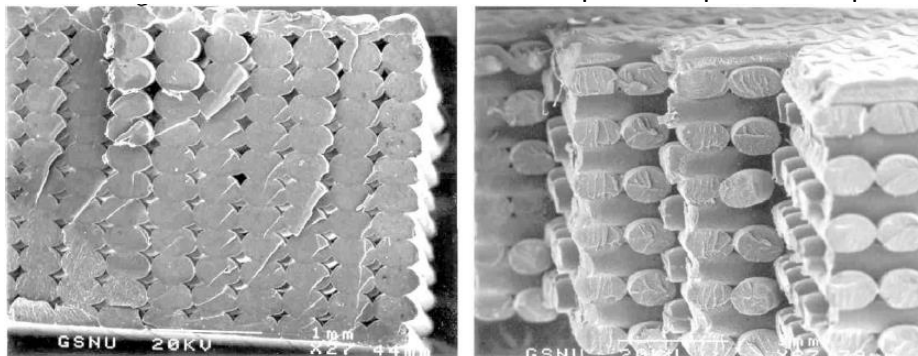
Figura 2-27. Proceso de sinterizado entre dos filamentos adyacentes a) contacto de superficies, b) agentes humectantes, c) difusión, d) aleatorización



Fuente: ROXAS, Mark y JU, Stephen. Fluid Dynamics Analysis of Desktop-based Fused Deposition Modeling Rapid Prototyping, in a thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Applied Science. 2008, University of Toronto: Department of Mechanical and Industrial Engineering.

En la tecnología FDM debe haber una energía suministrada al material por el cabezal de extrusión, tal que genere un calor residual para activar las superficies de las regiones adyacentes entre capas y causar unión. Si no hay suficiente energía, las regiones pueden adherirse, pero habría una frontera clara entre el material nuevo y el depositado previamente. Esto puede representar una superficie de fractura en la que el material puede ser fácilmente separado. Demasiada energía puede hacer que el material depositado previamente se funda afectando el acabado de la pieza. Una vez que el material ha sido extruido, debe solidificar y enlazarse con el material adyacente. En la figura 2-28 se detalla una pieza impresa con la configuración transversal de los cordones que la conforman.

Figura 2-28. Detalle de la acumulación de cordones impresos capa sobre capa.



Fuente: AHN, Sung-Hoon. et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. Rapid Prototyping Journal. Emerald, 2002, Vol. 8. No 4. ISSN 1355-2546.

2.14 PARÁMETROS DE CONTROL DE PROCESO FDM

A continuación se identifican los parámetros de control de proceso que pueden afectar las propiedades de las piezas impresas por la tecnología FDM^{32 33}:

- **Anchura del filamento:** La anchura del cordón impreso es el espesor la carretera depositada por la boquilla de FDM en el proceso de impresión. Puede variar de 0,3 mm (0,012 de pulgada) hasta 1 mm (0,0396 pulgadas).
- **Air Gap:** es el espacio de aire existente entre los filamentos de material FDM. El valor por defecto es cero, lo que significa que los filamentos sólo se tocan. Puede ser Modificado para dejar un hueco positivo, lo que significa que los cordones de material

³² GIBSON, I., ROSEN D.W. y STUCKER B. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Springer. 2010.

³³ AHN, Sung-Hoon. et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. Rapid Prototyping Journal. Emerald, 2002, Vol. 8. No 4. ISSN 1355-2546.

no se tocan. El resultado de establecer un valor positivo se ve reflejado en una pieza holgada de poca densidad que se fabrica rápidamente. En cambio al dejar un valor negativo, lo que significa que dos filamentos ocupan parcialmente el mismo espacio. Esto resulta en una estructura densa, que requiere un largo tiempo de construcción.

- Temperatura de construcción del modelo: este parámetro se refiere a la temperatura de la calefacción del material modelado. De esta forma se controla la viscosidad del material fundido que se extruye de la boquilla.
- Orientación de la trama: se refiere a la dirección de los caminos de material en relación con la carga de la pieza.
- Presión de entrada: Esta variable se cambia regularmente durante cada impresión ya que está ligada fuertemente con otros parámetros, en general el cambio de la presión de entrada o la fuerza aplicada al material resulta en un cambio en la tasa de flujo de salida correspondiente.

Otros parámetros importantes de proceso FDM que están relacionados con los anteriores son:

- Temperatura Ambiente: la temperatura del aire alrededor de la parte. La temperatura envolvente parece tener un efecto significativo en las partes impresas. El control preciso de esta también puede variar según la localización del volumen de construcción, y así aumentar la dificultad del control.
- Espesor de la capa: que es similar a la anchura del cordón en la dirección vertical. La variación de la altura es probable que tenga el mismo efecto que la variación de la anchura del cordón del plástico ABS. Dado que un cordón del material es homogéneo, variando la geometría del cordón en una dimensión debe tener el mismo efecto que la modificación en la otra dimensión, causando una redundancia entre este parámetro y la anchura del cordón. Un factor que podría afectar esta suposición es el hecho de que el material es probable que se enfríe más entre capas que entre cordones, afectando potencialmente la fusión del plástico.
- Diámetro de la boquilla: el ancho del agujero a través del cual el material es extruido.

La geometría de la unión esta alterada a través del ancho del filamento, que se controla por la velocidad de flujo de material a través de la boquilla, alterar el diámetro de la boquilla complica la solución del problema ya que requiere una transferencia física y re-calibración para cada cambio, así que para evitar esto el parámetro es fácilmente modificable en el software.

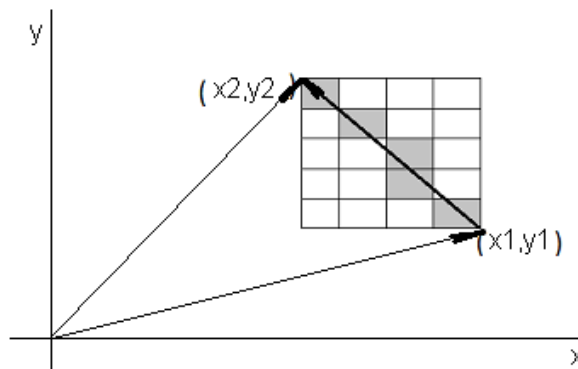
3. DISEÑO MECÁNICO DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO

El diseño toma como base el uso de un sistema referencial cartesiano tridimensional, con movimiento en cada eje gobernado de forma independiente, teniendo en cuenta que la deposición de material se hace sobre el plano horizontal X, Y y que el desplazamiento vertical Z obedece al espesor de la capa del material depuesto.

3.1 ALGORITMO DE POSICIONAMIENTO

El diseño del sistema de posicionamiento utiliza para su desplazamiento el algoritmo de Bresenham³⁴, a partir del cual se garantiza el seguimiento de trayectorias y la minimización del error. Este algoritmo considera para el movimiento entre dos puntos del plano XY, una línea que va desde el punto inicial (x_1, y_1) hasta el punto (x_2, y_2) , como se muestra en la figura 3-1. A partir de estos puntos se calcula $\Delta Px = x_2 - x_1$ y $\Delta Py = y_2 - y_1$, cuyos resultados se comparan para establecer el eje de movimiento; si $|\Delta Px| \geq |\Delta Py|$ se toma X como el eje conductor de lo contrario es el eje Y el conductor.

Figura 3-1. Movimiento establecido según algoritmo de Bresenham



Fuente: los autores

Para determinar el movimiento en el plano XY, se parte de los números reales entregados por el código G, se utilizan coordenadas absolutas a partir de las cuales se define la posición inicial P1 y final P2 del extrusor y se discretiza para determinar las características del desplazamiento; dentro del lazo principal del algoritmo la coordenada correspondiente al eje conductor es incrementada en una unidad y en el otro eje,

³⁴ KENNETH, I. Bresenham's Algorithm . Visualization and Graphics Research Group. [Extraído el 15 de mayo, 2012] <http://graphics.idav.ucdavis.edu/education/GraphicsNotes/Bresenhams-Algorithm.pdf>.

usualmente conocido como eje pasivo, es únicamente incrementada según la necesidad atendiendo al siguiente procedimiento:

Se calcula la pendiente m de la línea, la cual está dada por:

$$m = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (3-1)$$

Se calcula el error inicial, dado por:

$$\epsilon = -[1 - y_1 - m(1 - x_1)] \quad (3-2)$$

Donde x_1 y y_1 corresponden a las posiciones iniciales en los ejes coordenados.

Con estos resultados, se define el inicio del movimiento desde el punto (x_1, y_1) , y se comienza avanzando una unidad en el eje de movimiento, se le suma la pendiente al error inicial y se establece si el nuevo valor es mayor que 0, si no es así se continua avanzando en el eje de movimiento y se vuelve a sumar la pendiente, hasta cuando dicha suma llegue a ser mayor que 0, en ese momento se incrementa una unidad en el otro eje y el error se disminuye en una unidad, volviendo a iniciar el proceso hasta encontrar el punto de llegada (x_2, y_2) .

El movimiento en los ejes X y está descrito por ΔP_x y ΔP_y de acuerdo con el algoritmo anterior; en el eje Z el movimiento está definido de acuerdo al espesor de la capa de material depuesto.

3.2 CRITERIOS DE DISEÑO

El diseño propuesto tiene en cuenta las recomendaciones hechas por Tien-Chien chang, et al³⁵, según los cuales los objetivos de diseño de un producto tiene que ver con que este sea fácil y económicamente manufacturado, para ello se establece una serie de recomendaciones tales como: minimizar el número de partes, desarrollar un diseño modular, usar componentes estándar, establecer componentes multifuncionales, seleccionar materiales y procesos de manufactura óptimos, establecer una ruta de ensamble de las piezas y asumir tolerancias apropiadas.

A partir de estas recomendaciones se seleccionan materiales y procesos de manufactura existentes en la región, que permitan un bajo costo y la certeza de que sea posible la implementación del prototipo, con esto el sistema de posicionamiento se compone de cuatro partes principales que son, la estructura soporte y tres mecanismos que controlan el movimiento en las direcciones X Y Z.

³⁵ CHANG, T., WYSK, A., y WANG, H. Computer-Aided Manufacturing. New Jersey: Second Edition, Prentice Hall. 1998.

Como criterios de diseño se asume la implementación de un sistema con bajo peso, robusto y estético. Por estas razones se elige lámina de madera MDF y materiales estándar para la transmisión de movimiento. Así mismo se asumen una restricción para el volumen de trabajo de 20 x 20 x 20 cm igual a 8000cm³.

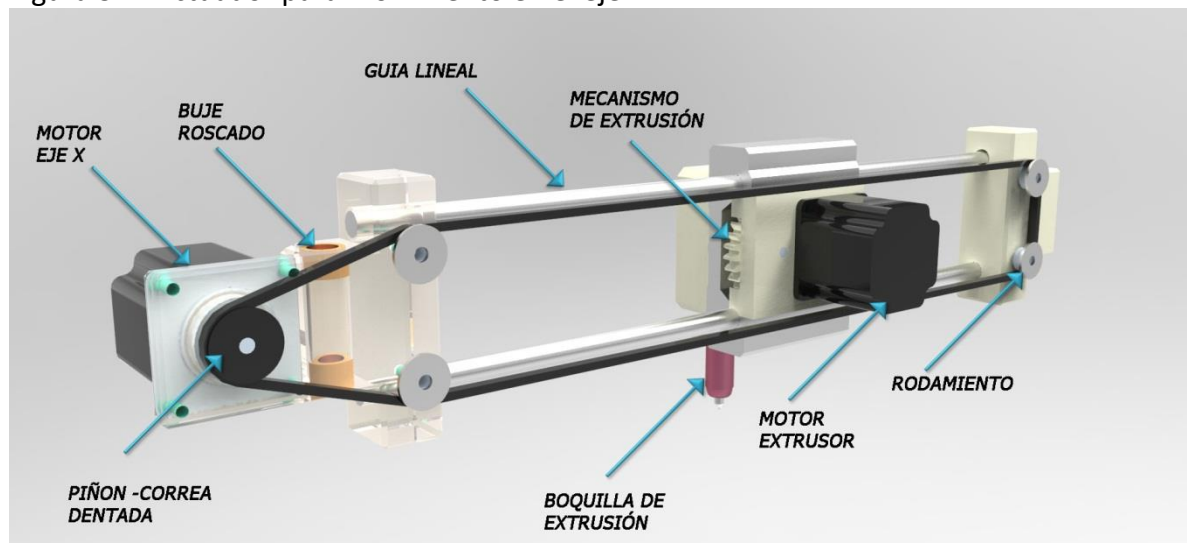
3.3 MECANISMOS DE TRASMISIÓN DE MOVIMIENTO

3.3.1 Movimiento en el eje X

El mecanismo seleccionado corresponde a un sistema de transmisión de movimiento por piñón-correa dentada, soportado por rodamientos, configurado como se muestra en la figura 3-2 y detallado en los planos de diseño presentados en el anexo D.

Este movimiento está gobernado por un motor y un mecanismo piñón-correa dentada, que mueve una masa determinada por la suma de los componentes de la herramienta extrusora de material y su estructura soporte, el movimiento esta guiado por rodamientos que se desplazan sobre guías longitudinales, como se muestra en la figura 3-2.

Figura 3-2. Actuador para movimiento en el eje x



Fuente: los autores

El desplazamiento ΔP_x está determinado por el número de pasos por vuelta del motor y la relación de transmisión dada por el número de dientes del piñón y al paso de la correa, la velocidad lineal es función de la velocidad angular del motor, y del radio del piñón; la potencia del actuador depende de la inercia, y las pérdidas por rozamiento. Los modelos matemáticos para determinar los valores anteriores se describen a continuación.

$$\Delta P_x = \frac{N_x P_c}{P_m} n \quad (3-3)$$

Dónde:

N_x = Número de dientes del piñón para el eje

P_c = Paso de la correa

P_m = Número de pasos por vuelta del motor

n = Pasos para el movimiento determinado

Velocidad lineal del eje X

$$v_x = \omega_{mx} r_{px} \quad (3-4)$$

Dónde:

v_x = Velocidad lineal del eje x

r_{px} = Radio del piñón eje x

ω_{mx} = Velocidad angular del motor del eje x

Se calcula la fuerza necesaria para mover el eje x de la siguiente manera:

$$F_{cx} = \frac{W}{\mu} \quad (3-5)$$

Dónde:

F_{cx} = Fuerza necesaria para mover el eje x

W = Peso total carro eje x

μ = Coeficiente de fricción

El par total del motor X T_{cx} necesario para mover la carga a velocidad constante es:

$$T_{cx} = F_{cx} * r_{px} \quad (3-6)$$

El par necesario para mover la carga aceleradamente es mayor que el que se requiere para mover la carga a velocidad constante, debido a los efectos inerciales y se calcula de la siguiente manera:

La Inercia de la carga J_a tiene en cuenta la maza del carro X y se modela de la siguiente forma:

$$J_a = \frac{D^2 M}{4} \quad (3-7)$$

Dónde:

D = Diámetro del piñón acoplado al motor X

M = Masa a mover del eje X

La inercia J_b de los rodamientos, propios del eje en donde se desliza la correa se modela como un cilindro macizo así:

$$J_b = \frac{\pi \rho D^4 L}{32} \quad (3-8)$$

Dónde:

ρ =Densidad del material del rodamiento

D=Diámetro del rodamiento

L= Espesor del rodamiento

La inercia total es las sumatoria de todas las involucradas

$$J_T = \sum J_i \quad (3-9)$$

La aceleración lineal α existente en el momento de arrancar o frenar el mecanismo está dada por:

$$\alpha = \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (3-10)$$

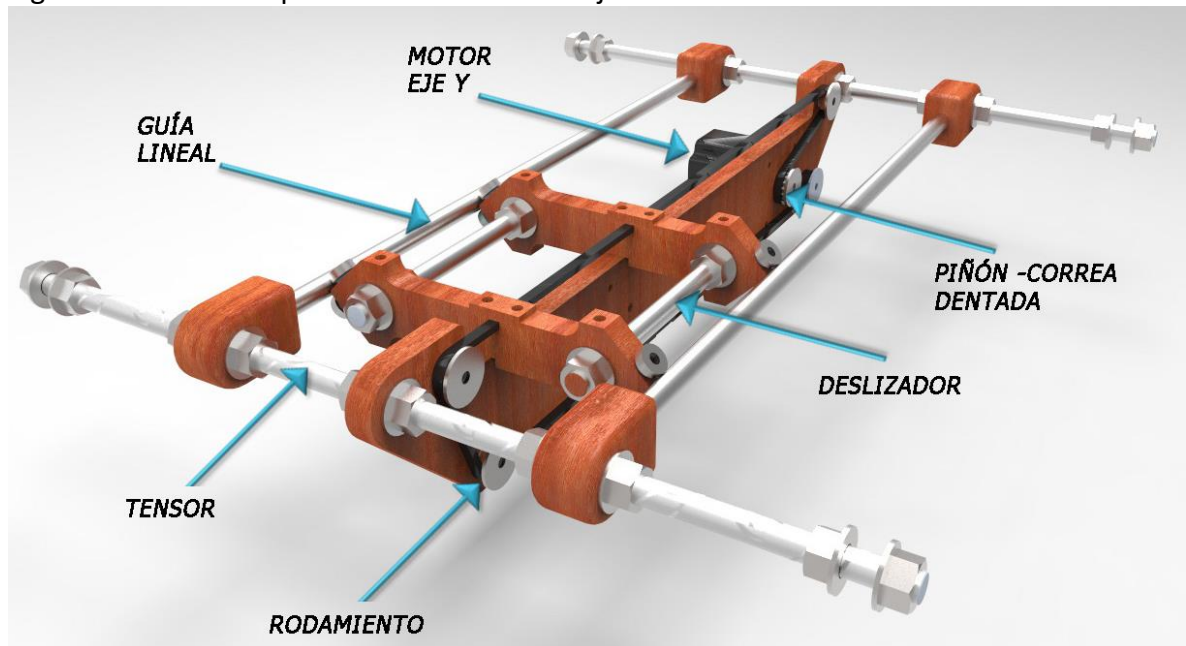
El torque total T_{Tx} necesario en el motor X es entonces:

$$T_{Tx} = T_{cxv} + J_T \frac{\partial \omega}{\partial t} \quad (3-11)$$

3.3.2 Movimiento en el eje Y

El eje Y responde al mismo tipo de modelamiento paramétrico definido para el mecanismo de transmisión de movimiento del eje X, ya que poseen el mismo mecanismo de transmisión con polea-correa dentada. La configuración del eje Y se muestra en la Figura 3-3.

Figura 3-3. Actuador para movimiento en el eje Y

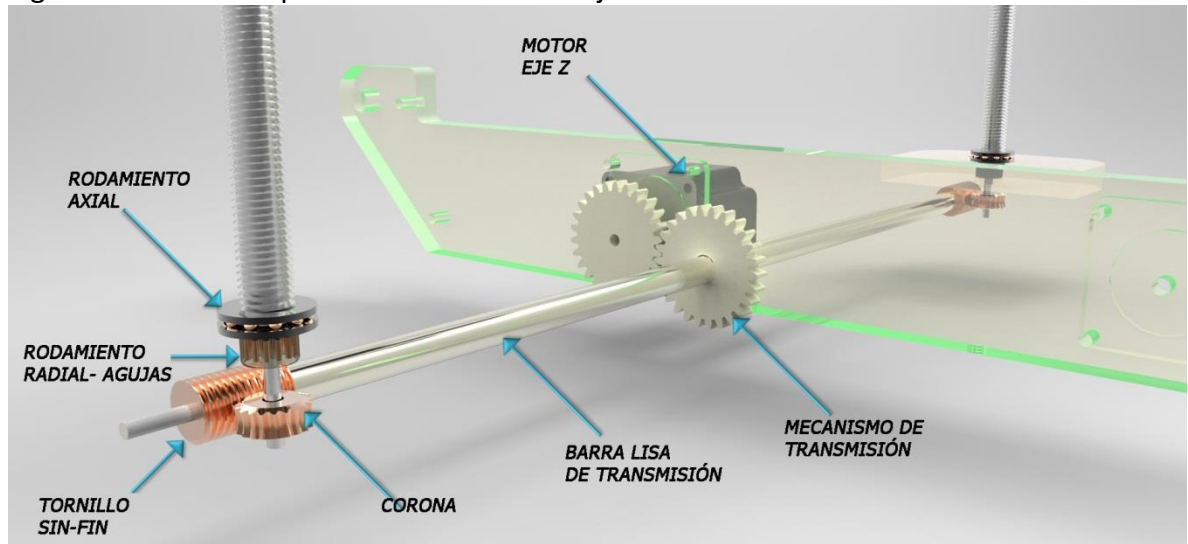


Fuente: los autores

3.3.3 Movimiento en el eje Z

Este movimiento está gobernado por un motor paso a paso, un sistema de transmisión de movimiento integrado por dos ruedas dentadas que proporcionan movimiento rotacional a un eje transversal, y este a través de dos mecanismos de tornillo sinfín-corona, ubicados a los extremos del prototipo, proporciona el movimiento a dos varillas roscadas verticales que transmiten el movimiento en la dirección Z al eje X acoplado. La configuración del eje Z se muestra en la Figura 3-4:

Figura 3-4. Actuador para movimiento en el eje



Fuente: los autores

En esta dirección el cambio de posición ΔP_z está determinado por el estado de las coordenadas entregadas por el código G, las cuales varían según las características del espesor de la capa fundida. El desplazamiento y velocidad está depende del número de pasos por vuelta del motor, la relación de transmisión de los engranes y el paso de la rosca de la varilla vertical, de la siguiente forma:

$$\Delta P_z = \frac{P_t}{P_m N_z} n \quad (3-12)$$

Dónde:

N_z = Número de dientes de la corona

P_t = Paso de la rosca de la varilla vertical

P_m = Número de pasos del motor por vuelta

n = Número de pasos para el movimiento determinado

Velocidad lineal del eje Z

$$V_z = \frac{1}{2\pi} \frac{\omega_{mz}}{N_z} P_t \quad (3-13)$$

Dónde:

V_z = Velocidad lineal del eje z

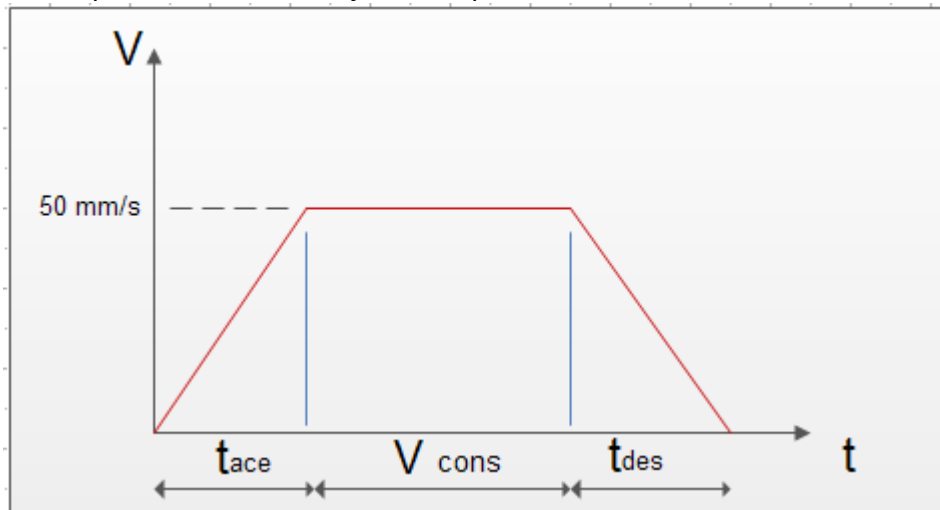
ω_{mz} = Velocidad angular del motor del eje z

3.4 CÁLCULOS DE LOS PARÁMETROS DE MOVIMIENTO EN LOS TRES EJES

Perfil de movimiento

Tomando como referencia las curvas estándar de un motor paso a paso, se establecen unas condiciones de tiempo para vencer la inercia del sistema y tomar la velocidad lineal máxima permisible a la que puede viajar un eje. El tiempo de aceleración t_{ace} y desaceleración t_{des} son de 0.1 segundos, de esta forma la aceleración lineal máxima es de 500 mm/s^2 y se usara para calcular el torque máximo requerido en cada eje para movilizarlo. En la figura 3-5 se muestra la rampa de movimiento ejecutada por los actuadores.

Figura 3-5. Rampa de movimiento ejecutada por los actuadores.



Fuente: los autores

De acuerdo al modelamiento matemático realizado...en la sección 3.3... a continuación se calculan las posiciones, velocidades y el torque necesario para mover cada eje.

Movimiento en el eje X

La selección de componentes en el eje x se realiza teniendo en cuenta el volumen de impresión, el tamaño máximo del eje, la configuración permisible de los mecanismos y la consecución de elementos estándares comerciales.

EL desplazamiento en el eje X se calcula de acuerdo a la ecuación 3-3

N_x = Número de dientes del piñón para el eje=16

P_c = Paso de la correa=5mm

P_m = Número de pasos por vuelta del motor =200

n = Pasos para el movimiento determinado

$$\Delta P_x = \frac{16 * 5}{200} * n \text{ (mm)}$$

$$\Delta P_x = 0.4 * n \text{ (mm)}$$

La velocidad en el eje X se determina a partir de la ecuación 3-4

$$v_x = 11.25 * \omega_{mx} \text{ (mm/s)}$$

r_{px} =Radio del piñón eje x= 11.25mm

ω_{mx} = Velocidad angular del motor del eje x(rad/s)

La velocidad lineal constante del eje debe estar entre un rango adecuado para la impresión... en la sección 4.4.6... se establece que la velocidad de los ejes en la máquina se relaciona entre cada uno para que la deposición de material sea uniforme en la impresión, con las características de velocidad de deposición establecidas en el capítulo 4 los ejes de posicionamiento bidimensional X e Y se mueven a 33.75 mm/s para ello la velocidad angular es igual a $\omega_{mx}=3 \text{ rad/s} = 28,6 \text{ rpm}$.

El par total del motor necesario para mover la carga a velocidad constante es:

Teniendo en cuenta los componentes que debe mover el motor X, en donde el componente más pesado es el motor del extrusor que pesa 0.7kg, y teniendo en cuenta los demás componentes el peso total a mover será de 1kg. Considerando la fricción entre el patín de rodamientos y el tubo liso con un coeficiente de fricción de 0.4, la fuerza se calcula por medio de la ecuación 3-5:

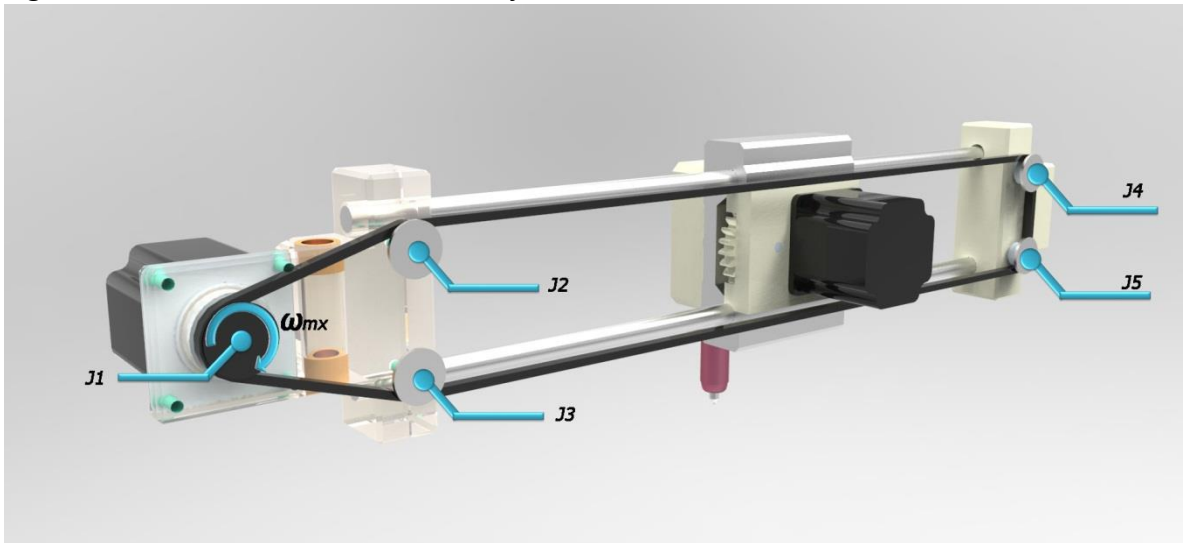
$$F_{cx} = \frac{W}{\mu} = \frac{1Kg * 9.81m/s^2}{0.4} = 24.525N$$

Como la polea del mecanismo está acoplada directamente al motor X el par necesario para realizar esta fuerza utilizando la ecuación 3-6:

$$T_{cx} = F_{cx} * r = 24.525N * 1.125cm = 27.59N * cm$$

El par necesario para mover la carga aceleradamente es mayor que el de mover la carga a velocidad constante, sin embargo estimando una aceleración de $500mm/s^2$ se deben considerar los efectos inerciales mostrados en la figura 3-6, de la siguiente forma:

Figura 3-6. Inercias establecidas en el eje x



Fuente: Los autores

El cálculo de las inercias se realiza a partir de la ecuación 3-8

Inercia de la polea

$$J_1 = \frac{\pi \rho D^4 L}{32} = \frac{\pi * (1.4g/cm^3) * (2.25cm)^4 * (0.7cm)}{32} = 0.002461Kg * cm^2$$

Inercia del rodamiento

$$J_{2,3,4,5} = \frac{\pi \rho D^4 L}{32} = \frac{\pi * (0.0026Kg/cm^3) * (1.6cm)^4 * (0.5cm)}{32} = 0.0008679Kg * cm^2$$

La inercia de la correa se desprecia debido al poco peso.

Incluyendo la inercia de la carga, calculada mediante la ecuación 3-7; además de la inercia del motor, la inercia total será por la ecuación 3-9:

$$J_T = \frac{D^2 M}{4} + 4 * J_{2,3,4,5} * \left(\frac{D_1}{D_2}\right) + J_{motor} + J_1$$

$$J_T = \frac{(2.25\text{cm})^2 * 1\text{Kg}}{4} + 4 * 0.0008679 * \left(\frac{2.25}{1.6}\right) + 0.22 + 0.002461[\text{Kg} * \text{cm}^2]$$

$$J_T = 1.4949 \text{ Kg} * \text{cm}^2$$

El torque total es la suma del torque a velocidad constante más el componente inercial por la aceleración angular, así con las ecuaciones 3-10 y 3-11:

$$\alpha = \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{a}{r} = \frac{500\text{mm}/\text{s}^2}{11.25\text{mm}} = 44.4 \text{ rad}/\text{s}^2$$

$$T_{TX} = 27.59\text{N} * \text{cm} + 1.4949 \text{ Kg} * \text{cm}^2 * 44.4 \text{ rad}/\text{s}^2$$

$$T_{TX} = 28.25\text{N} * \text{cm}$$

El valor del torque total T_{TX} se utiliza en la selección del motor que comandará el eje X

Movimiento en el eje Y

El eje Y se modela de la misma forma que el mecanismo del eje X. En este caso rpy es de 11.25 mm.

$$\Delta P_y = \frac{N_y P_c}{P_m} n = 0.4 * n \text{ (mm)}$$

$$v_y = 11.25 * \omega_{my} \text{ (mm/s)}$$

Se estima inicialmente una velocidad lineal constante de 33.75 mm/s para ello la velocidad angular es igual a $\omega_{my}=3 \text{ rad/s}= 28,6 \text{ rpm}$.

El par total del motor necesario para mover la carga a velocidad constante se calcula teniendo en cuenta los componentes que hacen parte del carro Y, como la plataforma de impresión, otros componentes y la pieza impresa, que conjuntamente alcanzan un peso máximo de 1.5kg. Considerando la fricción entre el patín de rodamientos y el tubo liso con un coeficiente de fricción de 0.4, la fuerza es:

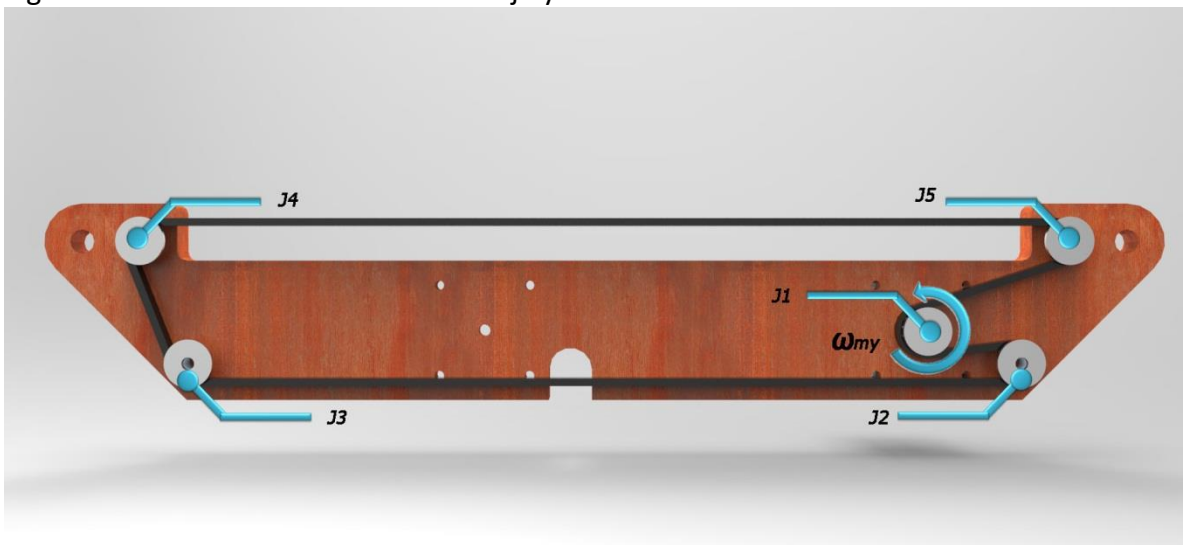
$$F_{cy} = \frac{W}{\mu} = \frac{1.5\text{Kg} * 9.81\text{m}/\text{s}^2}{0.4} = 36.787\text{N}$$

Como la polea de este mecanismo está acoplada directamente al motor Y, el par necesario para realizar esta fuerza es:

$$T_{cy} = F_{cy} * r = 36.787N * 1.125cm = 41.385N * cm$$

El par necesario para mover la carga aceleradamente es mayor que el de mover la carga a velocidad constante, de la revisión literaria la empresa makerbot³⁶ [31] enuncia una aceleración de $500mm/s^2$ como preferente para una calidad de impresión aceptable en donde no se acumula ni hace falta material; de esta manera se deben considerar los efectos inerciales mostrados en la figura 3-7 de la siguiente forma:

Figura 3-7. Inercias establecidas en el eje y



Fuente: Los autores

Inercia de la polea

$$J_1 = \frac{\pi \rho D^4 L}{32} = \frac{\pi * (1.4g/cm^3) * (2.25cm)^4 * (0.7cm)}{32} = 0.002461Kg * cm^2$$

Inercia del rodamiento

$$J_{2,3,4,5} = \frac{\pi \rho D^4 L}{32} = \frac{\pi * (0.0026Kg/cm^3) * (1.6cm)^4 * (0.5cm)}{32} = 0.0008679Kg * cm^2$$

La inercia de la correa se desprecia debido al poco peso.

Incluyendo la inercia de la plataforma de impresión y la del motor la inercia total será la suma de todas:

³⁶ Sailfish Firmware – Tuning Acceleration. [Online] <http://www.makerbot.com/sailfish/tuning/>

$$J_T = \frac{D^2 M}{4} + 4 * J_{2,3,4,5} * \left(\frac{D_1}{D_2}\right) + J_{motor} + J_1$$

$$J_T = \frac{(2.25\text{cm})^2 * 1.5\text{Kg}}{4} + 4 * 0.0008679 * \left(\frac{2.25}{1.6}\right) + 0.22 + 0.002461[\text{Kg} * \text{cm}^2]$$

$$J_T = 2.127 \text{ Kg} * \text{cm}^2$$

El torque total es la suma del torque a velocidad constante más el componente inercial por la aceleración angular:

$$T_{TY} = T_{cy} + J_T \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

Calculo de la aceleración angular

$$\alpha = \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{a}{r} = \frac{500\text{mm}/\text{s}^2}{11.25\text{mm}} = 44.4\text{rad}/\text{s}^2$$

$$T_{TY} = 41.385\text{N} * \text{cm} + 2.127 \text{ Kg} * \text{cm}^2 * 44.4\text{rad}/\text{s}^2$$

$$T_{TY} = 42.329\text{N} * \text{cm}$$

El valor del torque T_{TY} servirá para la selección del motor que comandará el eje Y

Movimiento en el eje Z

El desplazamiento por número de pasos en el eje z se calcula a partir de la ecuación 3-12

$$\Delta P_z = 0.0003797 * n(\text{mm})$$

n= Número de pasos para el movimiento determinado

La reducción de velocidad entre los engranajes acoplados al motor y a la varilla es de 3:1, posteriormente entre el tornillo sin fin y la corona es 10:1, por ende la reducción total en el eje Z será de 30:1

$$v_z = \frac{1}{30} * \omega_{mz} * r_{pz}$$

El par total del motor necesario para mover la carga a velocidad constante, se calcula teniendo en cuenta los componentes que hacen parte del eje Z, como la carga total a levantar en el eje Z, los motores del eje X y extrusor que sumados ya pesan 1.4Kg, e

integrando todo el peso final a mover será de 2kg. Considerando la fricción entre el patín de rodamientos y el tubo liso con un coeficiente de fricción de 0.4, la fuerza es:

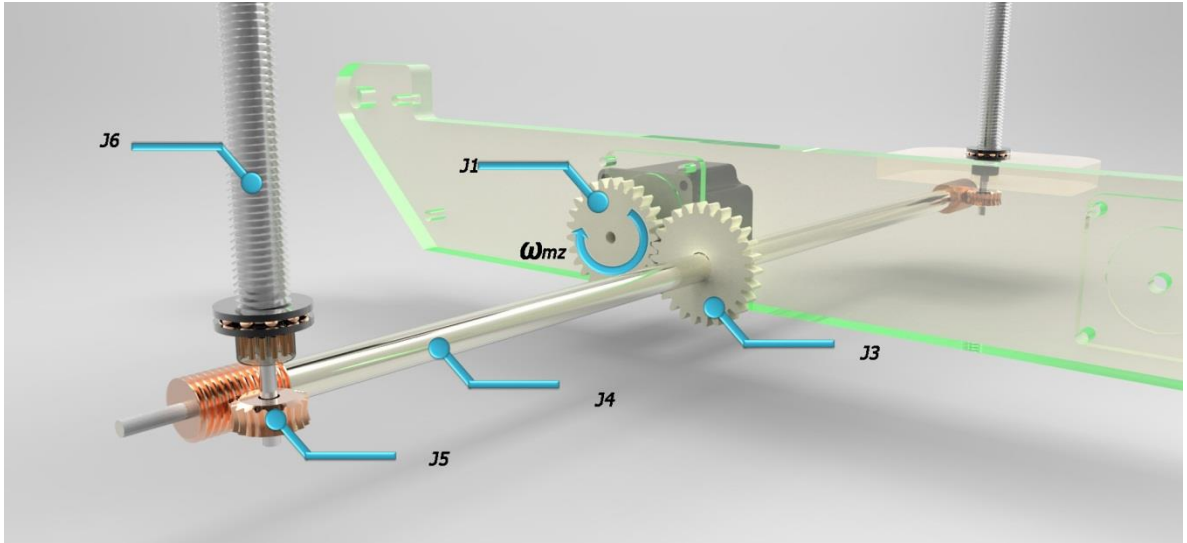
$$T_{cz} = F_L * \frac{P}{2\pi\eta} = \left(2\text{Kg} * \frac{9.81\text{m}}{\text{s}^2} \right) \frac{0.23\text{cm}}{2\pi * 0.58} = 1.2431\text{N} * \text{cm}$$

Debido a la reducción de velocidad entre los engranajes acoplados al motor, además del mecanismo sinfín corona la reducción total en el eje Z será de 30:1 induciendo a un aumento de torque proporcional:

$$T_{czv} = 30 * 1.2431\text{N} * \text{cm} = 37.295\text{N} * \text{cm}$$

El par necesario para mover la carga aceleradamente es mayor que el de mover la carga a velocidad constante, sin embargo estimando una aceleración de 500mm/s^2 se deben considerar los efectos inerciales mostrados en la figura 3-8 de la siguiente forma:

Figura 3-8. Inercias establecidas en el eje z



Los autores

Inercia del piñón acoplado al motor y del piñón conductor

$$J_{1,2} = \frac{\pi\rho D^4 L}{32} = \frac{\pi * \left(\frac{1.4\text{g}}{\text{cm}^3}\right) * (2.4\text{cm})^4 * (1.2\text{cm})}{32} = 0.00547\text{Kg} * \text{cm}^2$$

Inercia de la rueda acoplada a la varilla-tornillo sin fin

$$J_3 = \frac{\pi\rho D^4 L}{32} = \frac{\pi * (1.4\text{g}/\text{cm}^3) * (4.8\text{cm})^4 * (1.2\text{cm})}{32} = 0.0875\text{Kg} * \text{cm}^2$$

Inercia de la varilla-tornillo sin fin

$$J_4 = \frac{\pi \rho D^4 L}{32} = \frac{\pi * (8.89g/cm^3) * (1.27cm)^4 * (50cm)}{32} = 0.1135Kg * cm^2$$

Inercia de la corona

$$J_5 = \frac{\pi \rho D^4 L}{32} = \frac{\pi * \left(\frac{1.4g}{cm^3}\right) * (2.05cm)^4 * (1.27cm)}{32} = 0.00308Kg * cm^2$$

Inercia de la varilla roscada

$$J_6 = \frac{\pi \rho D^4 L}{32} = \frac{\pi * \left(\frac{0.0026Kg}{cm^3}\right) * (1.6cm)^4 * (40cm)}{32} = 0.066 * 2 = 0.133Kg * cm^2$$

Inercia de la carga

$$J_7 = M\left(\frac{P}{2\pi}\right)^2 = 2Kg\left(\frac{0.23cm}{2\pi}\right)^2 = 0.00267Kg * cm^2$$

Incluyendo la inercia de la carga y la del motor la inercia total será la suma de todas, multiplicando en los casos que sea necesario por la relación de transmisión:

$$J_T = \sum J_i$$

$$J_T = 15.915Kg * cm^2$$

El torque total es la suma del torque a velocidad constante más el componente inercial por la aceleración angular:

$$T_{TZ} = T_{czv} + J_T \frac{\partial \omega}{\partial t}$$

Calculo de la aceleración angular

$$\alpha = \frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{a}{r} = \frac{500mm/s^2}{11.25mm} = 44.4rad/s^2$$

$$T_{TZ} = 37.295N * cm + 15.915 Kg * cm^2 * 44.4rad/s^2$$

$$T_{TZ} = 44.361N * cm$$

El valor del torque T_{TZ} servirá para la selección del motor que comandará el eje Z

3.5 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

La estructura que soporta los 3 ejes de transmisión de movimiento, más la herramienta extrusora de polímero es la mostrada en la figura 3-9. Se diseña de acuerdo a criterios de portabilidad, volumen, anclaje, y rigidez final. Permitiendo el movimiento libre de los ejes y en concreto la firmeza de los ejes Y y Z, debido a que el primero esta atornillado a las paredes laterales de la estructura y para el segundo la estructura soporta las varillas en unos rodamientos en pequeñas aletas laterales. Los agujeros mostrados en las paredes laterales sirven para que el eje x se deslice verticalmente.

Figura 3-9. Estructura base de la impresora 3D

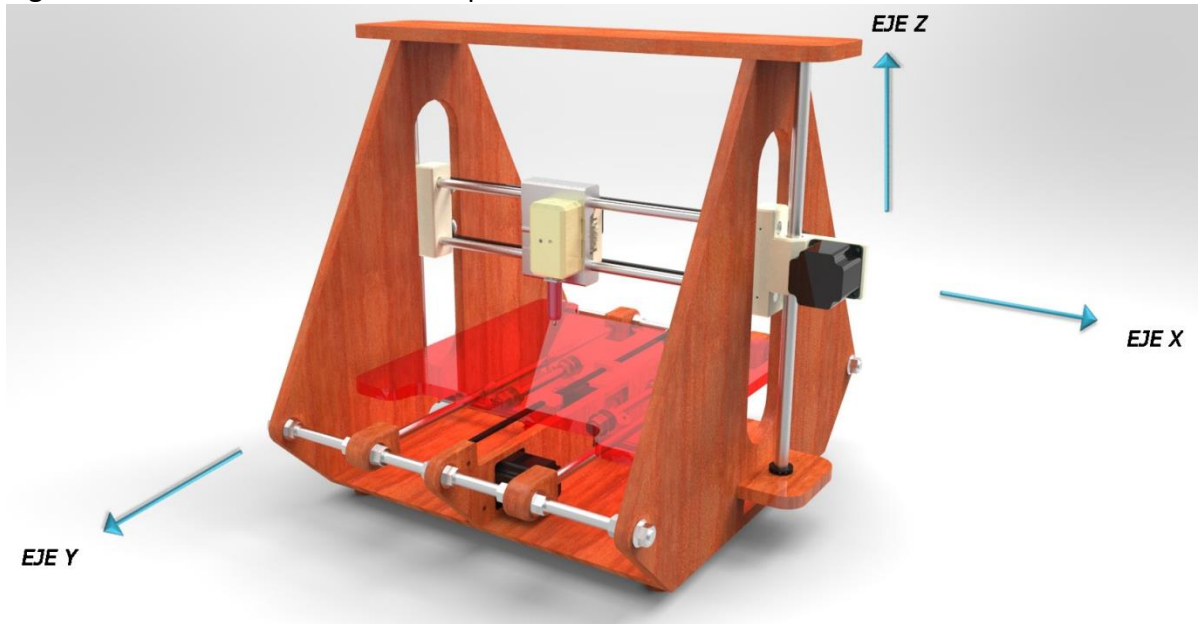


Fuente: Los autores

La figura 3-10 muestra un renderizado del ensamblaje final de la máquina. Se observa como sobre el eje Y se encuentra la plataforma de impresión y como la herramienta de extrusión está montada sobre el eje X, estos dos ejes en movimiento simultáneo realizan la geometría de una capa de modelo impreso, además el eje X montado sobre las varillas

roscadas del eje Z, se mueve en dirección vertical permitiendo el cambio de capa para seguir construyendo la pieza hacia arriba.

Figura 3-10. Ensamble final de la impresora 3D FDM



Fuente: Los autores

4. SISTEMA DE EXTRUSIÓN DE PLÁSTICO

4.1 MODELAMIENTO MATEMÁTICO DEL PROCESO FDM

El modelamiento matemático aplicado al diseño del extrusor toma como referente los estudios realizados por Graybill³⁷ y Bellehumeur³⁸, para el proceso de modelado por deposición fundida FDM en donde se destacan varios aspectos de interés descritos a continuación:

4.1.1 Geometría Del Filamento

La importancia de la geometría del filamento en la impresora 3D FDM, se deriva del hecho de que la transferencia de calor por convección es altamente dependiente de la forma y la superficie expuesta de la masa térmica. Por lo tanto, el área y el perímetro son definiciones importantes para el modelo de enfriamiento de los cordones de material impreso, que posteriormente van a determinar la firmeza y propiedades mecánicas de pieza construida; en un principio el área y perímetro del filamento extruido se dan por:

$$A = \pi ab \quad (4-1)$$

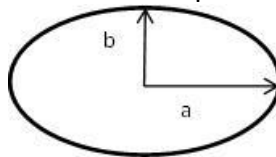
$$P = \pi(a + b) \left(\frac{64 - 3\lambda^4}{64 - 16\lambda^2} \right) \quad (4-2)$$

Donde λ está definido como:

$$\lambda = \frac{a-b}{a+b} \quad (4-3)$$

Donde a y b son el eje mayor y menor respectivamente de la forma elíptica del cordón depositado como se muestra en la figura 4-1.

Figura 4-1. Representación gráfica de la forma elíptica del cordón depositado de material



Fuente: BELLEHUMEUR, C, *et al.* Modeling of Bond Formation Between Filaments in the Fused Deposition Modeling Process, *Journal of Manufacturing Processes*. 2004. Vol. 6, p 170-178.

³⁷ GRAYBILL, B. Development of a Predictive Model for the Design of Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling, in A thesis submitted for the degree of Master of Science. 2010, University of Missouri-Columbia.

³⁸ BELLEHUMEUR, C, *et al.* Modeling of Bond Formation Between Filaments in the Fused Deposition Modeling Process, *Journal of Manufacturing Processes*. 2004. Vol. 6, p 170-178.

La herramienta extrusora debe asegurar un correcto deslizamiento por parte del material fundido a través de la parte calefactora que se encarga de fundirlo para que pueda fluir y depositarse para crear las piezas; el diámetro de la boquilla y la velocidad de deposición influyen drásticamente en el ancho del cordón, finalmente la unión de estos conformarán la pieza impresa.

4.1.2 Enfriamiento Del Material

La ecuación utilizada para calcular el perfil de enfriamiento de un filamento de FDM es una vista simplificada a un modelo unidimensional de transferencia de calor, la cual se basa en la suposición de que el comportamiento de la superficie de sección transversal de un filamento puede ser modelado con un comportamiento exponencial de acuerdo a:

$$T = T_{\infty} + (T_0 - T_{\infty})e^{-mt} \quad (4-4)$$

En donde T es la temperatura del filamento, T_{∞} es la temperatura del ambiente, T_0 es la temperatura de extrusión, t es el tiempo, y m se describe adicionalmente por

$$m = \frac{\sqrt{1+4\alpha\beta}-1}{2\alpha} \quad (4-5)$$

Donde α y β son parámetros en función de las propiedades del material y de la geometría del filamento. Estos parámetros se definen como

$$\alpha = \frac{k}{\rho C} \quad (4-6)$$

$$\beta = \frac{hP}{\rho CA} \quad (4-7)$$

Donde k es la conductividad térmica, ρ es la densidad, C es la capacidad térmica de calor, y h es el coeficiente de transferencia de calor por convección. El área y el perímetro (A y P) ya se han establecido. Se ha encontrado que para piezas grandes un ambiente controlado de temperatura asegura una correcta impresión de prototipos, evitando deformaciones, errores geométricos y mal adherencia entre cordones.

4.1.3 Enlace Entre Capas De Material

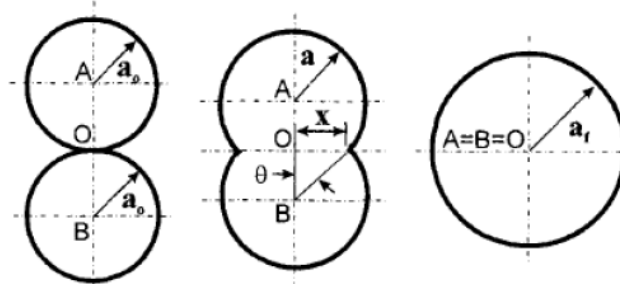
La resistencia mecánica de una parte impresa por FDM se deriva de la fuerza de sus enlaces entre los filamentos, tanto dentro de una capa individual y entre capas. La fuerza de los enlaces individuales se correlaciona directamente con la longitud de la unión entre filamentos participantes. Por lo tanto, con el fin de desarrollar un modelo que predice el comportamiento de una parte impresa, es necesario predecir con la unión que se produce entre los filamentos FDM durante el proceso de fabricación. Las predicciones cuantitativas del grado de unión lograda durante la deposición de filamentos están

basadas en teoría de transferencia de calor y modelos de Sinterización. La predicción de unión entre los filamentos se lleva a cabo utilizando la forma modificada del modelo de Frenkel para la sinterización, así de la obra de Pokluda et al³⁹ se tiene:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\Gamma}{a_0\eta} \frac{2^{-\frac{5}{3}} \cos\theta \sin\theta (2 - \cos\theta)^{1/3}}{(1 - \cos\theta)(1 + \cos\theta)^{1/3}} \quad (4-8)$$

Donde Γ es la tensión superficial de material y η es la viscosidad, que es dependiente de la temperatura. θ y a_0 son parámetros geométricos, siendo θ el ángulo de enlace y a_0 el radio inicial de un filamento cilíndrico representado gráficamente en la figura 4-2. Debido a que los filamentos FDM son elípticos, a_0 se considera que es el radio equivalente de la elipse descrita anteriormente.

Figura 4-2. Parámetros geométricos definidos para el proceso de Sinterización en FDM



Fuente: GRAYBILL, B. Development of a Predictive Model for the Design of Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling, in A thesis submitted for the degree of Master of Science. 2010, University of Missouri-Columbia.

4.2 MATERIAL FUNDENTE UTILIZADO EN LAS PIEZAS FABRICADAS

A partir de un análisis comparativo entre los diferentes materiales que pueden ser utilizados para la impresión 3D, se ha elegido el Acronitrilo Butadieno Estireno-ABS P400 expendido por la empresa makerbot industries, para el uso en la máquina teniendo en cuenta sus propiedades físicas y térmicas, destacando su resistencia al impacto, la capacidad de unión entre filamentos, entre otras características.

Dado que la unión de los componentes termoplásticos en el material es impulsada térmicamente, la interfaz de temperatura juega un papel importante en la determinación de la calidad de la adhesión. La transferencia de calor del proceso es función de las propiedades térmicas del extrusor, la boquilla y materiales de modelado, así como el

³⁹ POKLUDA, O., BELLEHUMEUR C., y VLACHOPOULUS J. Modification of Frenkel's Model for Sintering, *AIChE Journal*. 1997. Vol. 43, p 3253-3256.

diámetro del filamento y la velocidad de flujo volumétrico. Por defecto la temperatura de fundición para el ABS P400 suele ser de 270°C, y la temperatura ambiente sobre 70°C para conservar una atmosfera térmica apropiada y un correcto proceso de enfriamiento.

Cuando el filamento se deposita y está en contacto con el material circundante, la interfaz de temperatura se encuentra alrededor de los 220°C punto de fusión del material que está por encima de la temperatura de transición vítrea T_g de 94°C. Esta condición favorece el rápido desarrollo de las uniones adhesivas. Posteriormente los filamentos enfrían gradualmente hasta la temperatura ambiente.

Para construir el modelo de transferencia de calor, algunas propiedades térmicas y coeficientes son determinados y se muestran a continuación.

4.3 PROPIEDADES DEL MATERIAL ABS P400

El modelado de la transferencia de calor se basa en las propiedades térmicas del ABS P400. Cuando la temperatura varía de 50 a 250 °C, el coeficiente de conductividad térmica k oscila entre 0,15 y 0,19 W/m·°C, y C el calor específico de 1400 a 2400 J/kg ·°C⁴⁰. La densidad (ρ) propia del material ha sido proporcionada por Stratasys Inc.⁴¹ como 1050 kg/m³.

La convección libre del filamento extruido a través del aire envolvente, juega un papel importante durante el enfriamiento del material. El límite superior del coeficiente de convección se obtiene suponiendo que la temperatura del filamento extruido se mantuvo constante y es de aproximadamente 100 W/m² ·°C. El rango de estimación de h fue elegido como $h = 50 \sim 100$ W/m² ·°C. Además de las propiedades térmicas, en el ABS P400 la viscosidad del polímero (μ) y la tensión superficial (Γ) son importantes en la predicción de la evolución del crecimiento del cuello entre filamentos adyacentes o proceso de “bonding”.

Los resultados de la viscosidad documentados para el ABS P400 son 48000, 14000 y 5100 Pa·s en temperaturas de 200, 220 y 240°C respectivamente. Los datos de viscosidad se correlacionan con la temperatura a partir de los datos mostrados en la tabla 4-1 y graficados en la Figura 4-3, de la siguiente forma:

⁴⁰ BELLEHUMEUR, C, *et al.* Modeling of Bond Formation Between Filaments in the Fused Deposition Modeling Process, *Journal of Manufacturing Processes*. 2004. Vol. 6, p 170-178.

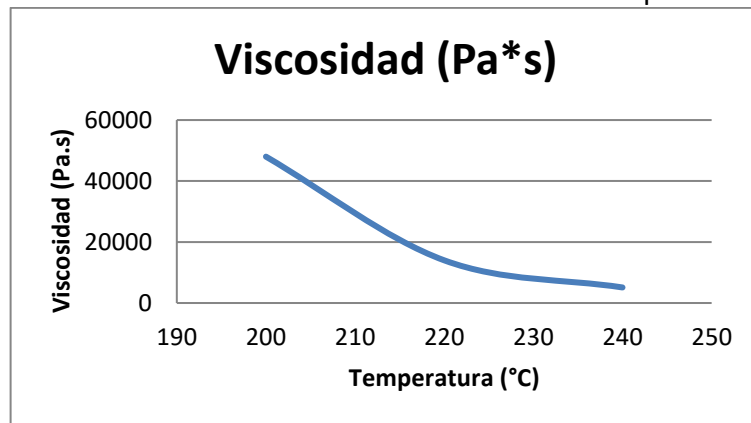
⁴¹ Stratasys Inc.©. Material Safety Data Sheet. P400 ABS Model. [Online] http://www.redeyedemand.com/MSDS/msdsModMat_P400ABS_0904.pdf. 2012.

Tabla 4-1. Valores de viscosidad a diferentes temperaturas para e ABS P400

| Temperatura (°C) | Viscosidad (Pa*s) |
|------------------|-------------------|
| 200 | 48000 |
| 220 | 14000 |
| 240 | 5100 |

Fuente: Datos encontrados en BELLEHUMEUR, C, *et al*

Figura 4-3. Relación del cambio de la viscosidad del ABS-P400 respecto de la temperatura



Fuente: Gráfica por parte de los autores de los datos encontrados en BELLEHUMEUR, C, *et al*

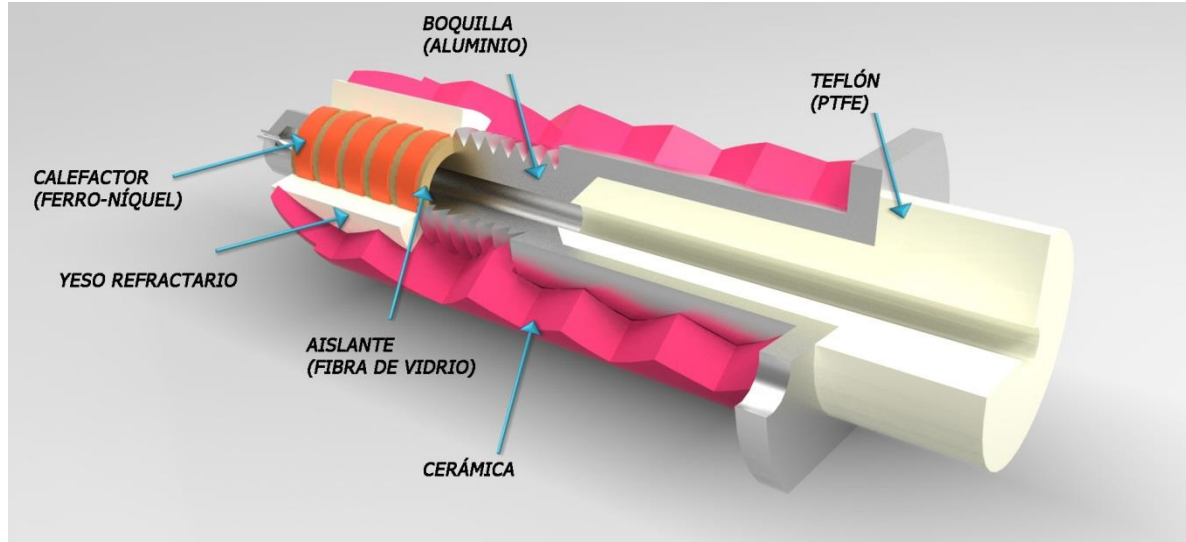
Los anteriores datos son usados en el modelamiento por elementos finitos del comportamiento térmico-fluídico del material y el extrusor, además a partir de ellos se determina la temperatura objetivo a la cual el extrusor deberá funcionar y mantenerse.

4.4 DISEÑO MECÁNICO DE LA HERRAMIENTA EXTRUSORA

El extrusor como herramienta del sistema, aprovecha las propiedades de un polímero termoplástico para fundirlo y depositarlo capa sobre capa de forma que se logre la impresión tridimensional; éste propósito se obtiene a través de transformaciones de energía eléctrica a térmica, con el fin de llevar el polímero a las condiciones óptimas de trabajo, considerando variables de velocidad de deposición y cantidad de material.

El diseño del extrusor se hace teniendo en cuenta criterios de baja inercia, buena conductividad y aislamiento térmico, por lo que a partir de un análisis de materiales y geometrías se opta por la configuración mostrada en la Figura 4-4:

Figura 4-4. Configuración de la herramienta extrusora



Fuente: Los autores

4.4.1 Diseño térmico

Como calefactor se utiliza una fuente térmica de 40 W constituida por un alambre desnudo de ferrocromo enrollado sobre un tubo de aluminio y protegido por cinta especial de fibra de vidrio que soporta alrededor de 300°C esto para aislamiento eléctrico; además, se implementa un aislamiento térmico de yeso refractario que recubre dicho alambre, finalmente se encapsula el extrusor dentro de un material cerámico a base de alúmina que soporta la temperatura al mismo tiempo que aísla y protege el conjunto. Las características de los materiales usados se muestran en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2 Características de los materiales que componen el extrusor

| Material | Densidad (kg/m ³) | Calor específico (J/(kg·K)) | Conductividad térmica (W/(m·K)) |
|------------------|-------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
| Cerámico-Alúmina | 3750 | 775 | 30 |
| Fibra de Vidrio | 220 | 795 | 0,035 |
| Teflón(PTFE) | 2115 | 1046.7 | 0.25 |
| Yeso refractario | 1900 | 840 | 1 |
| Aluminio | 2690 | 900 | 237 |
| Ferrocromo | 8400 | 450 | 11.3 |

Fuente: Búsqueda de los diferentes datos en la web por los autores

El espesor del aislamiento se hace teniendo en cuenta la ecuación de Newton de transferencia de calor, y asumiendo, por criterios de diseño, unas pérdidas no mayores del 10% de la potencia entregada por la fuente térmica se tiene:

$$\dot{Q} = \frac{-KA\Delta T}{e} \quad (4-9)$$

Dónde:

K = Coeficiente de conductividad térmica

A = Área de recubrimiento del aislante

ΔT = Diferencia de temperatura ambiente y de fusión

e = espesor del aislamiento

\dot{Q} = Velocidad de transferencia de calor

De esta forma

$$e = \frac{-KA\Delta T}{\dot{Q}} \quad (4-10)$$

4.4.2 Cálculo de tiempo de puesta en marcha del extrusor

Asumiendo unas pérdidas del orden del 10% en el calor entregado, se obtiene un flujo de calor de 36 W hacia los componentes del sistema extrusor, con lo cual se realizan los cálculos para determinar el tiempo necesario para que el polímero esté en condiciones de uso.

La energía necesaria para llevar el disipador a la temperatura deseada, T_d , asumiendo una temperatura del medio ambiente de T_a ,

$$Q = mc_p\Delta T = mc_p(T_d - T_a) \quad (4-11)$$

Dónde:

m = masa de polímero a fundir

c_p = calor específico

ΔT = diferencial de temperatura

Q = Transferencia de calor requerida

Teniendo en cuenta la energía suministrada por el disipador \dot{Q} , el tiempo requerido para poner a punto el extrusor t está dado por

$$t = \frac{Q}{\dot{Q}} \quad (4-12)$$

4.4.3 Cálculo de flujo de material

A partir de las características de flujo de material, se considera un sistema que se encuentra en estado estable y flujo estable, la ecuación de conservación de la masa está dada por:

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m} \quad (4-13)$$

Dónde:

\dot{m} = flujo másico

\dot{m}_e = flujo másico de entrada

\dot{m}_s = flujo másico de salida

Y la ecuación de conservación de la energía, teniendo en cuenta que la potencia $\dot{W} = 0$ y despreciando las pérdidas de energía cinética y potencial, viene dada por:

$$\dot{Q} = \dot{m}\Delta h \quad (4-14)$$

Además

$$\Delta h = c_p\Delta T \quad (4-15)$$

Dónde:

Δh = Cambio de entalpía

c_p = Calor específico a presión constante

Siendo ΔT la diferencia entre las temperaturas entre el ambiente y la de fusión.

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p\Delta T \quad (4-16)$$

Entonces

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{c_p\Delta T} \quad (4-17)$$

De las ecuaciones anteriores se obtiene un flujo másico el cual sirve para calcular el caudal Q^*

$$Q^* = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (4-18)$$

Dónde:

ρ = Densidad del material

Teniendo en cuenta que para un flujo en régimen permanente la ecuación de continuidad

$$Q^* = v_d * a \quad (4-19)$$

Dónde:

a = Área de la boquilla del extrusor

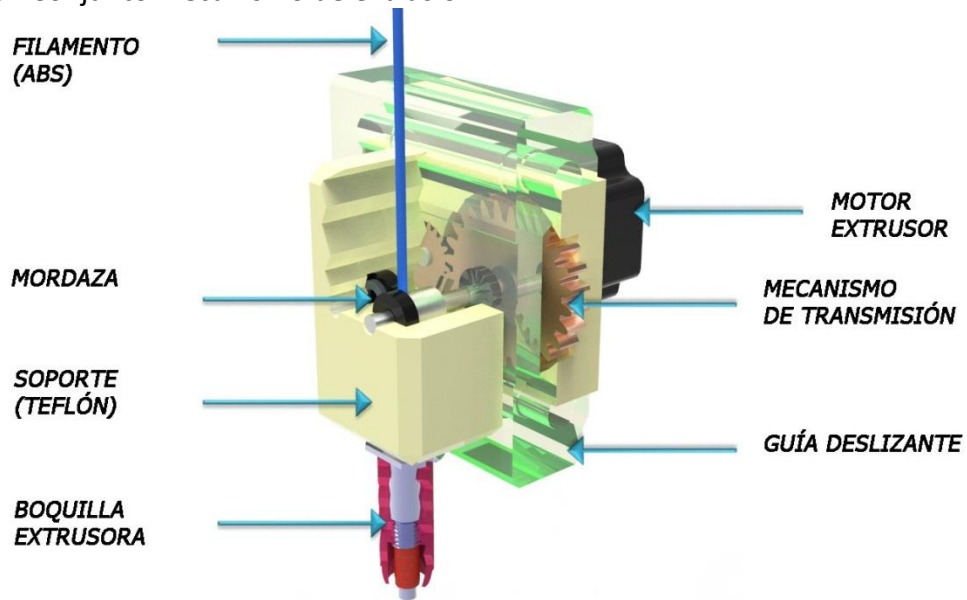
La velocidad de flujo de deposición v_d se encuentra a partir de

$$v_d = \frac{Q^*}{a} \quad (4-20)$$

4.4.4 Mecanismo de extrusión de material

El mecanismo de extrusión ilustrado en la figura 4-5 está compuesto por: el motor del extrusor con un piñón acoplado al eje conductor y una rueda dentada acoplada a un eje soportado por dos rodamientos y que a la vez conduce una pequeña rueda dentada que entra en contacto con el filamento de material, permitiendo así el suministro del material al calefactor.

Figura 4-5. Conjunto mecanismo de extrusión

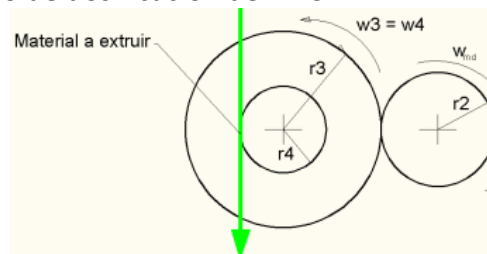


Fuente: Los autores

4.4.5 Longitud de avance de material por paso del motor

La Figura 4-6 muestra el sistema mecánico de dosificación del ABS. La rueda dentada con radio r_2 está montada sobre el eje del motor, y las ruedas 3 y 4 permiten la reducción de velocidad y la dosificación del material a la cámara de fundición del extrusor.

Figura 4-6. Sistema mecánico de dosificación del ABS.



Fuente: Los autores

La dosificación del material por paso del motor está relacionada según la figura 4-7 de la siguiente forma:

$$r_3 = 2r_2 \quad (4-21)$$

De la relación entre el radio y el perímetro de las ruedas dentadas

$$\frac{l_3}{l_4} = \frac{r_3}{r_4} \quad (4-22)$$

Donde l_2 , l_3 y l_4 corresponden al perímetro de las ruedas dentadas mostradas en la figura 4-7

Para una vuelta completa de las ecuaciones 4-21 y 4-22

$$l_4 = (2l_2) \frac{r_4}{r_3}$$

Para 200 pasos por vuelta

$$\Delta l_4 = \frac{2}{200} l_2 \frac{r_4}{r_3} = \frac{1}{100} l_2 \frac{r_4}{r_3} \quad (4-23)$$

Sustituyendo los perímetros

$$\Delta l_4 = \frac{2\pi}{100} r_2 \frac{r_4}{r_3} = \frac{\pi}{50} r_2 \frac{r_4}{r_3} \quad (4-24)$$

Para un flujo incompresible el volumen se conserva, luego con el área de la boquilla a la salida:

$$V_e = V_s$$

$$\Delta l_4 A = \Delta l_d a \quad (4-25)$$

Donde A y a son las áreas interna y de la boquilla del extrusor respectivamente Finalmente el avance de la deposición por paso del motor del extrusor será:

$$\Delta l_d = \frac{\pi A}{50a} \frac{r_2 r_4}{r_3} \quad (4-26)$$

Para el cálculo de la velocidad de deposición se tienen en cuenta los parámetros dados en la figura 4-17, de donde la relación entre la velocidad angular del motor del extrusor y la velocidad de extrusión es:

$$v_p = \omega_2 r_2 = \omega_3 r_3 \quad (4-27)$$

$$v_q = \omega_3 r_4$$

$$v_q = \frac{r_2 r_4}{r_3} \omega_2 = v_e \quad (4-28)$$

Donde

v_p = Velocidad lineal existente en el contacto de las ruedas 2 y 3

v_q = Velocidad lineal existente en el perímetro as ruedas 4

Con la conservación del caudal y teniendo en cuenta el cambio de áreas entre el filamento y la boquilla:

$$Q_e = Q_s$$

$$v_e A = v_s a$$

$$v_s = \frac{A}{a} \frac{r_2 r_4}{r_3} \omega_2 \quad (4-29)$$

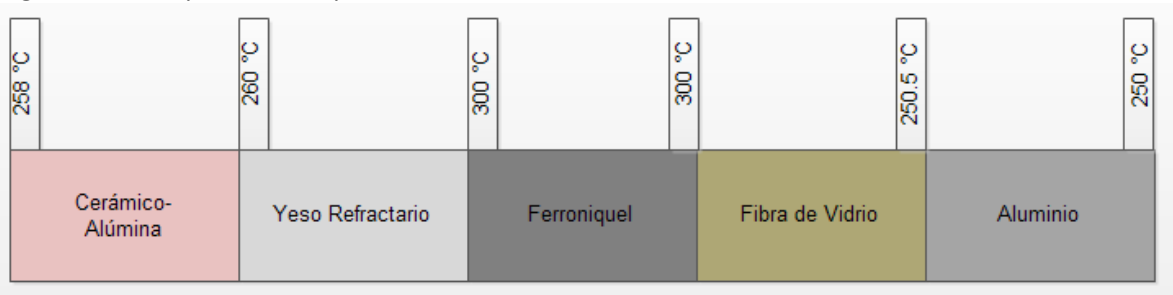
Con referencia a la figura anterior, el análisis de velocidad de deposición v_d está dada por la ecuación 4-30, la cual es coherente con la mostrada en la Ecuación 4-20,

$$v_d = \frac{50}{\pi} \Delta l_d \omega_2 \quad (4-30)$$

4.4.6 Cálculo de los parámetros del extrusor

El cálculo del espesor de cada material que conforma la cámara de extrusión, se hace teniendo en cuenta la ecuación de Newton de transferencia de calor, y asumiendo, por criterios de diseño, unas pérdidas no mayores al 10% de la potencia entregada por la fuente térmica, se tiene entonces $\dot{Q} = 36w$; en la figura 4-7 se muestran las temperaturas deseadas entre cada material de la herramienta extrusora:

Figura 4-7. Temperaturas esperadas en las fronteras de cada material del extrusor



Fuente: los autores

De acuerdo a la ecuación 4-10 los diferentes espesores mínimos para cumplir las condiciones de temperatura son:

Espesor de la cerámica alúmina

$$e_1 = \frac{(30w/mK)(\pi * 0.02m * 0.015m)(260 - 258)}{36w} = 1.57mm$$

Espesor del yeso refractario

$$e_2 = \frac{(1w/mK)(\pi * 0.02m * 0.015m)(300 - 260)}{36w} = 1.04mm$$

Espesor de la fibra de vidrio

$$e_3 = \frac{(0.035w/mK)(\pi * 0.02m * 0.015m)(300 - 250.5)}{36w} = 0.04mm$$

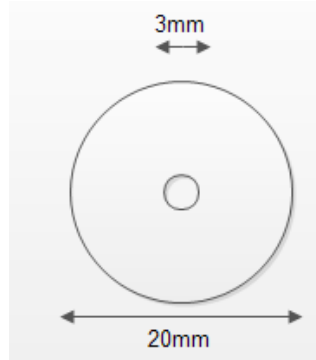
Espesor del Aluminio

$$e_4 = \frac{(237w/mK)(\pi * 0.02m * 0.07m)(250.5 - 250)}{36w} = 14.4mm$$

Cálculo de tiempo de puesta en marcha del extrusor

Asumiendo unas pérdidas del orden del 10% en el calor entregado, se obtiene un flujo de calor de 36 W hacia los componentes de sistema extrusor, con lo cual se realizan los cálculos para determinar el tiempo en el cual el polímero estará en condiciones óptimas para fluir. En la figura 4-8 se esquematiza la base de un modelo aproximado del extrusor que se toma con 7cm de profundidad formando un cilindro hueco y además reúne las características de los diferentes materiales utilizados en uno solo, con un calor específico aproximado de 800J/Kg°K y densidad de 2000Kg/m³.

Figura 4-8. Diámetros externo e interno del extrusor en la zona del calefactor



Fuente: los autores

El volumen del cilindro es:

$$V = \frac{\pi(D_e^2 - D_i^2) * L}{4} = \frac{\pi(0.02^2 - 0.003^2) * 0.07}{4} = 2.149 * 10^{-5} m^3$$

$$m = \rho V = \frac{2000Kg}{m^3} * 2.149 * 10^{-5} m^3 = 0.042Kg$$

La energía necesaria para llevar el disipador a la temperatura deseada, $T_d=250^\circ C$, asumiendo una temperatura del medio ambiente de $T_a=20^\circ C$ y utilizando la ecuación 4-11 se tiene:

$$Q = 0.042Kg * \frac{800J}{Kg^\circ K} * 230^\circ K = 7910 J$$

Teniendo en cuenta que la energía suministrada por el disipador $\dot{Q} = 36w$, el tiempo requerido para poner a punto el extrusor está dado por

$$t = \frac{Q}{\dot{Q}} = \frac{7910 J}{36w} = 219.72s = 3.66min$$

Cálculo de flujo de material

A través de la ecuación 4-35 se calcula el flujo másico de material

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{c_p \Delta T} = \frac{36w}{(1100J/Kg^\circ K) * (523^\circ K - 293^\circ K)} = 0.142g/s$$

De igual forma para calcular el caudal Q^* con la ecuación 4-36,

$$Q^* = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{0.142g/s}{1.05g/cm^3} = 0.135cm^3/s$$

Longitud de avance de material por paso del motor

De acuerdo a la ecuación 4-24 se tiene una dosificación del material por paso del motor del extrusor relacionado por:

$$\Delta l_4 = \frac{\pi}{50} r_2 \frac{r_4}{r_3} = \frac{\pi}{50} * \frac{13*4}{26} (mm) = 0.1256mm$$

Con el área de la boquilla a la salida el volumen se conserva y para un diámetro $D=3\text{mm}$ de la cámara de extrusión respecto al otro diámetro $d=0.5\text{mm}$ de la boquilla, el avance de la deposición por paso del motor del extrusor será de acuerdo a la ecuación 4-26:

$$\Delta l_d = \frac{\pi A}{50a} \frac{r_2 r_4}{r_3} = \frac{\pi(3^2)}{50(0.5^2)} * \frac{13*4}{26} (mm) = 4.523mm$$

La velocidad de deposición se establece de acuerdo a la relación con la velocidad de los ejes X e Y, en donde esta debe ser un poco mayor debido al efecto de transferencia de calor y al tener que retraer el material de extrusión en una impresión cuando se necesita dejar de depositar material por ejemplo en un cambio de capa. Así pues, dicha velocidad V_d se estima en 45mm/s y con la ecuación 4-30 se determina la velocidad angular necesaria por parte del motor del extrusor:

$$\omega_2 = \frac{V_d \pi}{\Delta l_d * 50} = \frac{45\text{mm/s} * \pi}{4.523\text{mm} * 50} = 0.625 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 5.969 \text{ rev/min}$$

Y con la ecuación 4-28 se calcula la velocidad lineal de entrada de material a la cámara fundente:

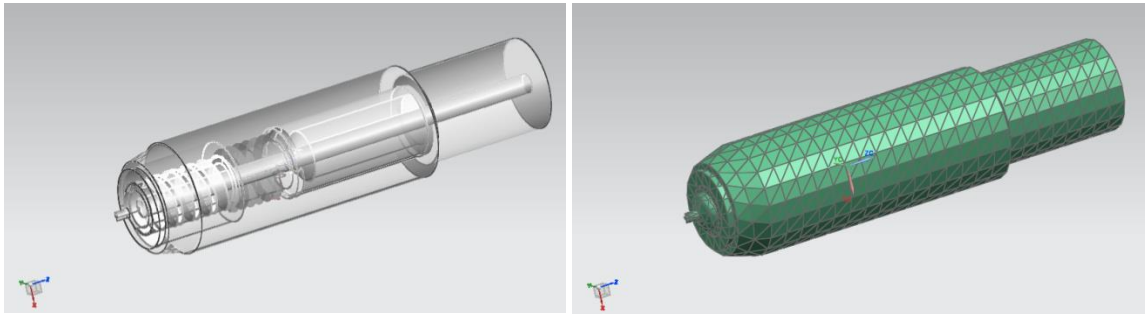
$$v_e = \frac{r_2 r_4}{r_3} \omega_2 = \frac{13*4}{26} * \frac{0.625\text{rad}}{\text{s}} = 1.25\text{mm/s}$$

4.5 SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE EXTRUSIÓN A PARTIR DEL USO DE UN SOFTWARE CAE.

El software Siemens PLM NX 7.5 fue elegido para realizar la simulación del comportamiento de flujo de material a través del uso de elementos finitos en un análisis numérico 3D. El software fue elegido teniendo en cuenta que la universidad cuenta con las licencias necesarias para su uso y que éste permite la integración CAD-CAE en una misma plataforma, lo que quiere decir que la herramienta permite modelar la geometría del objeto y posteriormente cargar e idealizar el modelo para analizar su comportamiento.

Por criterios de diseño, la geometría del extrusor debe permitir el ingreso de filamento ABS de 3mm de diámetro para que se funda y salga a través de una boquilla de diámetro 0.5mm para asegurar una geometría de cordón adecuada al igual que un buen acabado de la pieza impresa. En la figura 4-9 se muestra el extrusor modelado.

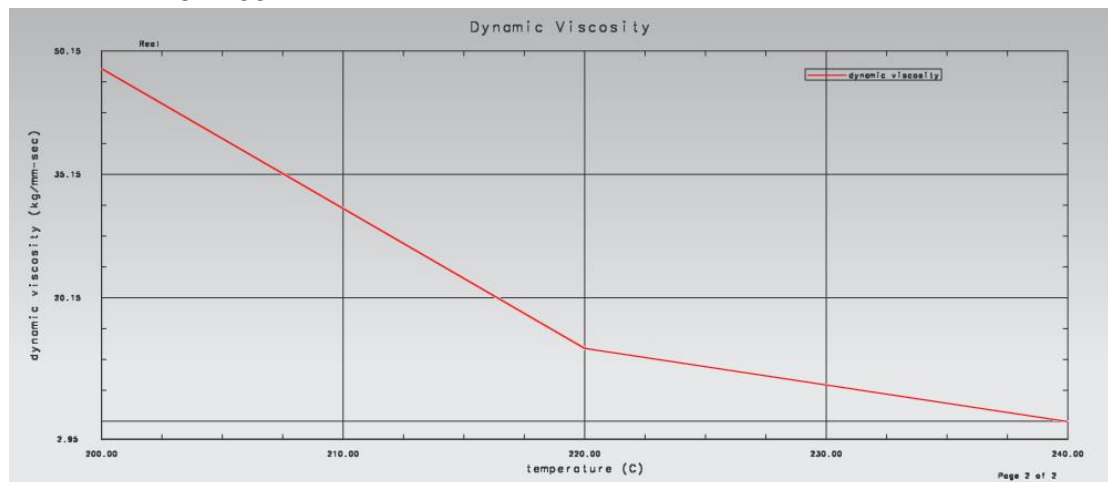
Figura 4-9. Modelo CAD del extrusor y mallado del mismo.



Fuente: Los autores

El material del extrusor es aluminio el cual se encuentra dentro de la biblioteca del software NX 7.5, sin embargo el ABS-P400 no se puede seleccionar así que fue creado un nuevo material en el software, ajustado a las características establecidas ...en la sección 4.5... con parámetros relevantes en el estudio como temperatura de fusión, cambio de viscosidad con la temperatura, las constantes de densidad y flujo de calor por conducción y convección entre otras, la relación viscosidad temperatura se encuentra en la figura 4-10.

Figura 4-10. Parámetros configurados en el software NX 7.5 correspondientes al material ABS-P400



Fuente: Los autores

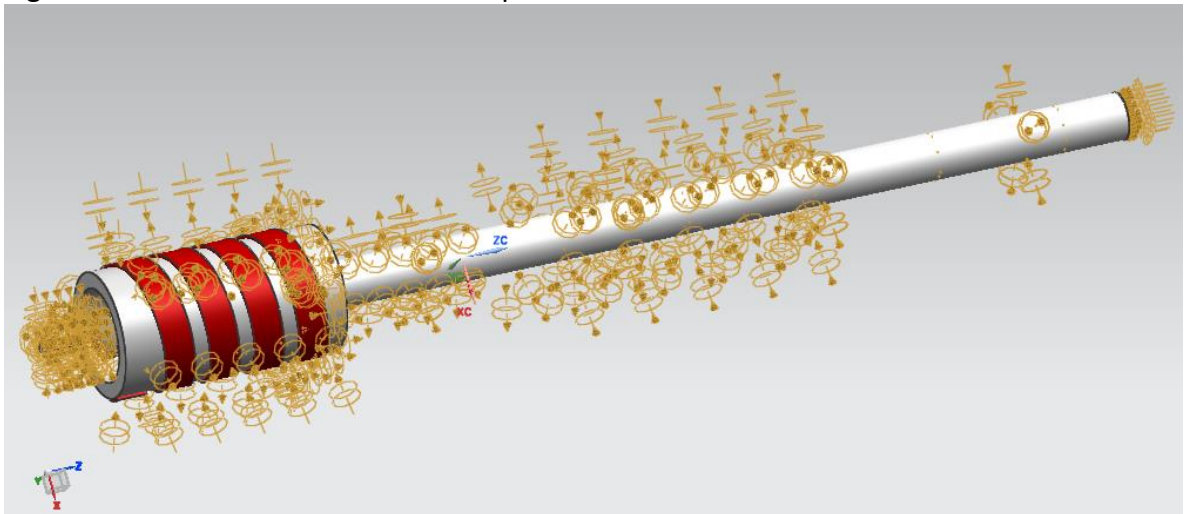
Se modela el proceso FDM, a partir de una serie de suposiciones que contribuyen a las condiciones de frontera establecidas en el software de simulación NX 7.5, estas son:

- Flujo de estado estable: no hay cambios transitorios en el flujo en cualquier punto en el canal

- Movimiento lento de flujo: las fuerzas de inercia deberían ser insignificantes en comparación con las fuerzas de rozamiento, el flujo es laminar, así que posee un número de Reynolds bajo.
- La velocidad del fluido en las paredes es 0 (no deslizante como condición de frontera)
- Flujo hidrodinámicamente completamente desarrollado
- Fluido incompresible: la densidad es constante
- El efecto de la gravedad se desprecia
- No hay fuerzas externas.

Para el análisis se establecen cinco objetos de simulación y una carga térmica de 30 W que refleja el efecto del calefactor, tales objetos refieren dos condiciones de frontera de flujo en donde se especifica una velocidad de entrada de 4mm/s, una temperatura ambiente de 20°C, la dirección de entrada y salida de material entre otras. Finalmente, 8 uniones térmicas indican el contacto existente entre el calefactor y las partes del extrusor, en la figura 4-11 aparecen reunidas dichas condiciones de frontera.

Figura 4-11. Condiciones de frontera aplicadas al extrusor en la simulación.

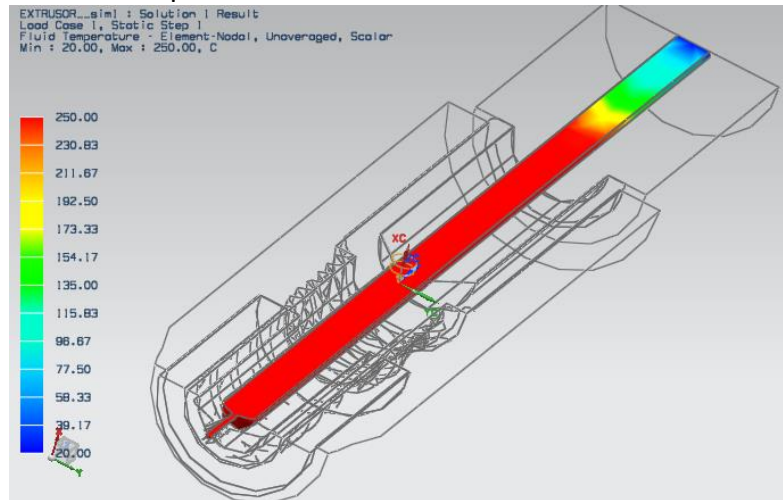


Fuente: Los autores

Como resultado del análisis se determina la distribución de temperatura por el canal de flujo derretido, el cual se muestra en las figuras 4-12 y 4-13. El Filamento sólido de ABS P400 con temperatura ambiente de 20°C entra en el calefactor durante un tiempo de estancia corto, y debido a la conductividad térmica de la pared de aluminio, el filamento se calienta por encima de su temperatura de transición vítrea asegurando un avance de material completamente fundido a 250 °C hasta la boquilla. EL análisis confirma que ese

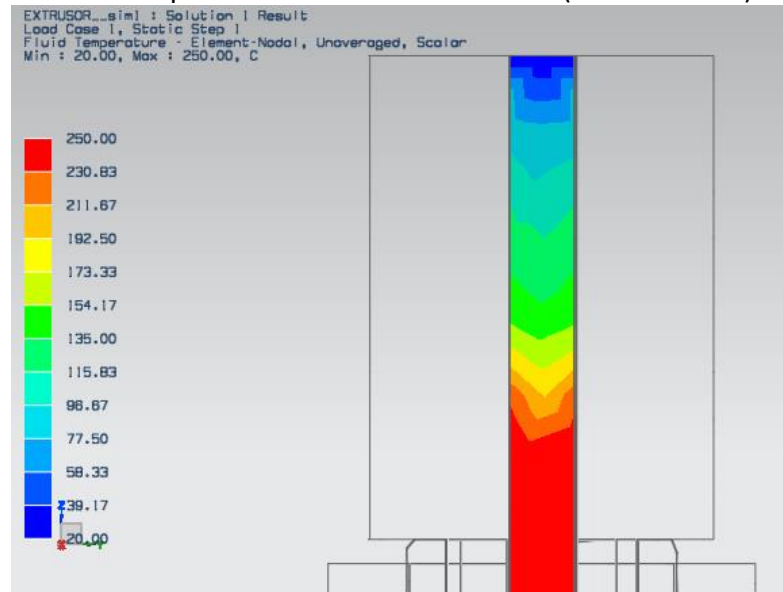
filamento estará bien fundido antes de llegar a la punta de la boquilla y así asegurar un flujo uniforme durante la deposición.

Figura 4-12. Perfiles de temperatura del material fundido



Fuente: Los autores

Figura 4-13. Perfiles de temperatura del material fundido (Continuación)

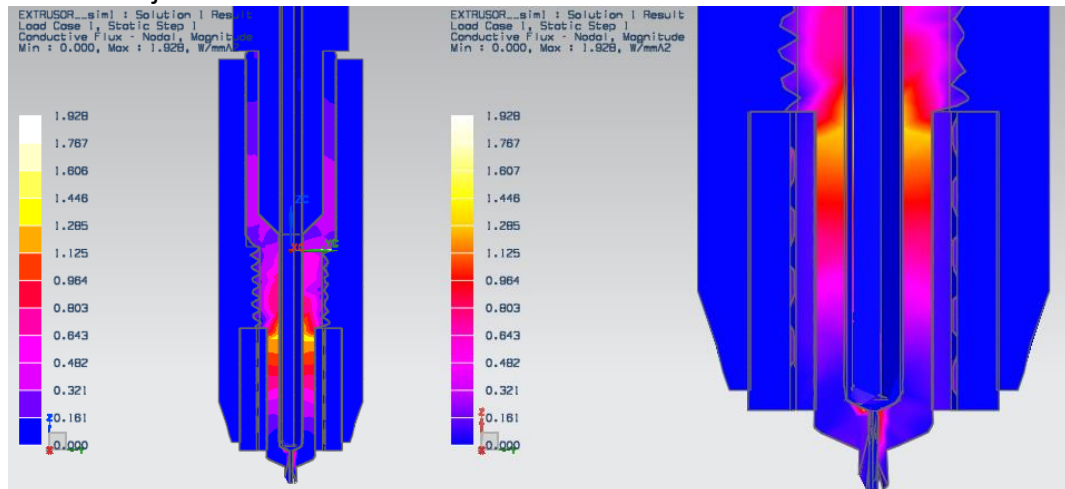


Fuente: Los autores

En la figura 4-14 se aprecia la existencia de una correcta transferencia de calor desde la resistencia eléctrica calefactora de la herramienta extrusora, hacia el material a fundir en este caso ABS P 400, el cual cuando entra contacto con aluminio a la adecuada

temperatura fluye con la viscosidad deseada. Las pérdidas de flujo de calor se minimizan a través de la configuración de los diversos materiales que integran el calefactor, siendo el aluminio el mayor conductor.

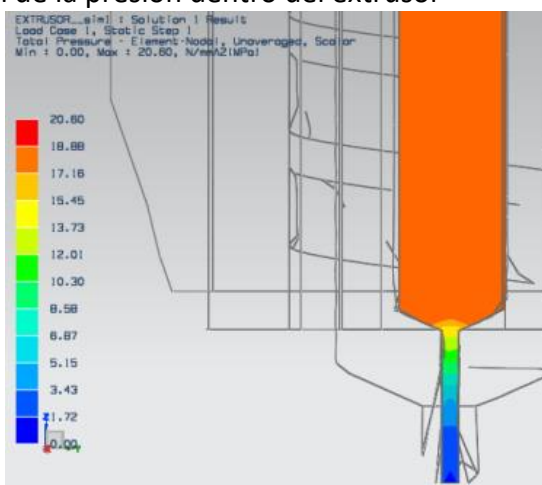
Figura 4-14. Flujo de Calor a través de la herramienta extrusora



Fuente: Los autores

Los resultados del análisis de caída de presión durante la deposición de ABS se presentan en la figura 4-15. Se muestra que al inicio existe alta presión del flujo del filamento, aplicado por el motor paso a paso que dirige la herramienta, la presión se mantiene durante el flujo hasta que este llegue a la punta de la boquilla. En esta etapa, debido a los rápidos cambios del área de sección transversal (cambio de 3 mm a 0,5 mm de diámetro), hay una caída de presión de 18 MPa, además de que fuera del extrusor se encuentra un ambiente a presión atmosférica.

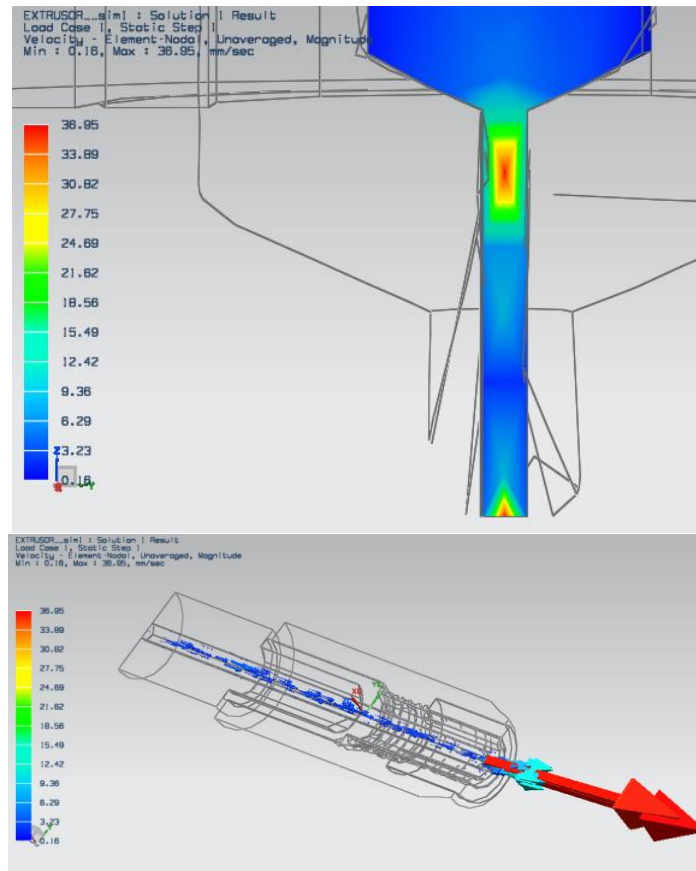
Figura 4-15. Distribucion de la presion dentro del extrusor



Fuente: Los autores

En la Figuras 4-16 se presentan los resultados del análisis de velocidad. Se observa que una velocidad de entrada del filamento de 1.25 mm/s se mantiene a lo largo del tubo hasta que llega a la punta de la boquilla, donde una vez más, como resultado del cambio en el diámetro del canal, se muestran los vectores de campo arrojando una velocidad máxima de 36.95 mm/s. En la Figura 4-25 se muestra la distribución de velocidad en la boquilla, particularmente en la sección transversal de la punta. La velocidad del flujo en el centro es la más alta, mientras cae en la pared debido a la condición antideslizante establecida en donde la velocidad en la pared es cero. Entre los parámetros de flujo a evaluar, se incluyen la caída de presión, temperatura y velocidad de salida del material en la herramienta extrusora

Figura 4-16. Perfil de velocidad de salida del material fundido



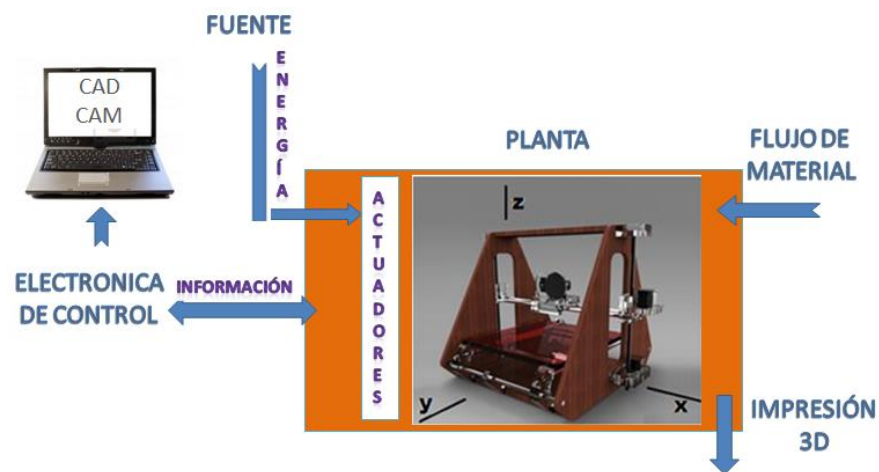
Fuente: Los autores

Los resultados del análisis por elementos finitos validan los cálculos obtenidos a partir de los modelos teóricos presentados en los primeros apartados de este capítulo.

5. SELECCIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO

El sistema de control que gobierna el sistema mecánico está basado en un sistema informático que a través de un software maestro envía información a una tarjeta de control, la cual se encarga de interpretarla y emitir señales de salida a los circuitos de amplificación de potencia para el control de los actuadores; finalmente unos sensores hacen retroalimentación a la tarjeta de control para verificar el cumplimiento del algoritmo de control.

Figura 5-1. Sistema de control para la planta



Fuente: Los autores

El sistema se compone de los siguientes elementos básicos: el controlador, amplificador, actuador y los sensores. Se adopta la tecnología de control de movimiento programable (*Programmable motion control* PMC) la cual, se define como la aplicación de software y hardware programable en conjunto con dispositivos de entrada sensoriales, actuadores y otros dispositivos de realimentación para el control de uno o más movimientos lineales o rotativos.

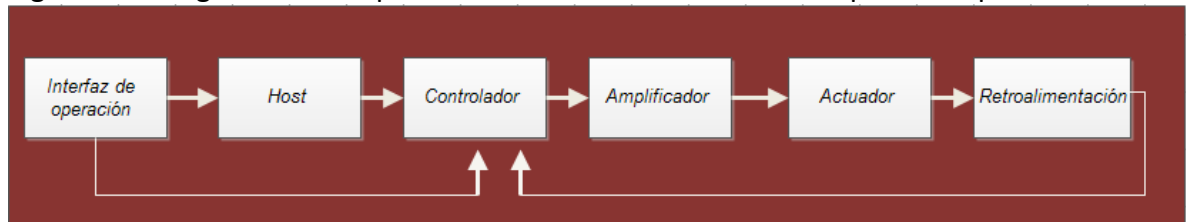
El controlador incluye un medio para ingresar un conjunto de instrucciones o código en su memoria, que luego se traducen en una serie de impulsos eléctricos y una salida a un amplificador para el control de algún tipo de actuador. El amplificador recibe las señales desde el controlador y aumenta o amplifica a niveles apropiados para el funcionamiento del actuador.

Los actuadores permiten el movimiento físico real y están estrechamente acoplados a las características de diseño del amplificador. El conjunto amplificador/actuador puede ser

cualquiera de varias clasificaciones de diseño diferentes, en este caso se adopta la forma de un amplificador electrónico y un motor eléctrico pasó a paso.

Aprovechando las ventajas del uso de un sistema de control maestro esclavo, donde un computador se comunica con una tarjeta controladora externa para vincular y coordinar la función de control de movimiento con otras funciones, se plantea el sistema de control de movimiento integrado que aparece en la figura 5-2.

Figura 5-2. Diagrama de bloques del sistema de control asumido para la impresora.



Fuente: Los autores

5.1 CONTROLADOR PRINCIPAL

El sistema electrónico está gobernado por la plataforma Arduino basado en software y hardware libre, flexible para la programación e integración de componentes; propiamente se seleccionó la tarjeta controladora Arduino Mega R3 para su implementación en la máquina, la cual es programada para la interpretación del código G, el manejo de la comunicación entre el computador, la recepción de las señales de los sensores y la emisión de las señales de actuación.

5.1.1 Variables del sistema

Una relación de las variables involucradas en el sistema se relaciona en la tabla 5-1.

Tabla 5-1. Variables del sistema

| Ítem | Nombre | Tipo | Condición |
|------|------------------------------------|-------------|-----------|
| 1 | Posición de referencia en el eje x | Digital | Entrada |
| 2 | Posición máxima en el eje x | Digital | Entrada |
| 3 | Posición de referencia en el eje y | Digital | Entrada |
| 4 | Posición máxima en el eje y | Digital | Entrada |
| 5 | Posición de referencia en el eje z | Digital | Entrada |
| 6 | Posición máxima en el eje z | Digital | Entrada |
| 7 | Habilitación motor X | Digital | Salida |
| 8 | Dirección motor eje X | Digital | Salida |
| 9 | Paso motor eje X | Digital PWM | Salida |

| | | | |
|----|------------------------------|-------------|---------|
| 10 | Habilitación motor eje Y | Digital | Salida |
| 11 | Dirección motor eje Y | Digital | Salida |
| 12 | paso motor eje Y | Digital PWM | Salida |
| 13 | Habilitación motor eje Z | Digital | Salida |
| 14 | Dirección motor eje Z | Digital | Salida |
| 15 | Paso motor eje Z | Digital PWM | Salida |
| 16 | Habilitación motor Extrusión | Digital | Salida |
| 17 | Dirección motor Extrusión | Digital | Salida |
| 18 | Paso motor Extrusión | Digital PWM | Salida |
| 19 | Temperatura material | Análogo | Entrada |
| 20 | Calefactor del Extrusor | Digital PWM | Salida |

Fuente: los autores

El número de variables su tipo y la condición de las mismas permite establecer las características del sistema de control.

5.1.2 Tarjeta Arduino

La tarjeta Arduino mega basada en el microcontrolador ATMEGA 2560 trabaja como cerebro del sistema manejándolo a través de las entradas y salidas analógicas y digitales, una velocidad de procesamiento para el trabajo en tiempo real, buena confiabilidad en comunicación vía USB, entre otras características, a partir de ello se implementan de acuerdo a las configuraciones dadas en arduino.cc⁴². El modelo de la tarjeta, que permite manejar las entradas/salidas tanto análogas como digitales, se muestra en la figura 5-3.

Figura 5-3. Tarjeta Arduino Mega R3 seleccionada



Fuente: http://www.gsm-gprs-modem.com/photo/pl467102-arduino_mega_2560_r3_board_atmega2560_datasheet.jpg

⁴² BANZI, M, *et al.* Arduino Mega 2560. [Online] [Cited: Agosto 12, 2012.] <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>.

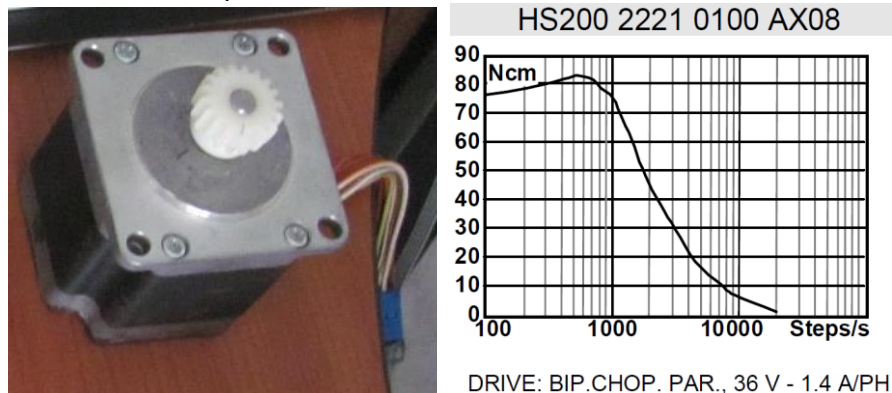
5.1.3 Comunicación

La Comunicación entre la tarjeta Arduino y el computador o entre tarjetas, es implementada por comunicación serie UART TTL a través de los pines (RX) y (TX) del micro-controlador ATMEGA. Y mediante un chip Atmega 16U2 integrado a la placa, se convierte la comunicación Serie en USB. La programación de la tarjeta controladora requiere instalar en el computador el software Arduino y seleccionar el puerto COM virtual de comunicación que permite el enlace con el computador.

5.2 ACTUADORES

Los actuadores seleccionados para el comando de los ejes son motores paso a paso híbridos (unipolares-bipolares) de referencia HS 200 2221 de 200 pasos por vuelta, con un par motor de 75 N*cm, suficiente para vencer el par de carga que incluye las pérdidas por rozamiento y la inercia del sistema. En la...sección 3.4... se establecieron los torques máximos en cada eje, siendo el de mayor valor el del eje Z con 44,3 N-cm. En la figura 5-4 se observa el motor seleccionado y la curva característica de par-velocidad, donde se observa que entre 100 y 1000 pasos por segundo el par motor está por arriba de los 75 N-cm.

Figura 5-4. Motor pasó a paso seleccionado como actuador para la impresora y la curva característica torque-velocidad.



Fuente: Los autores y anexo E

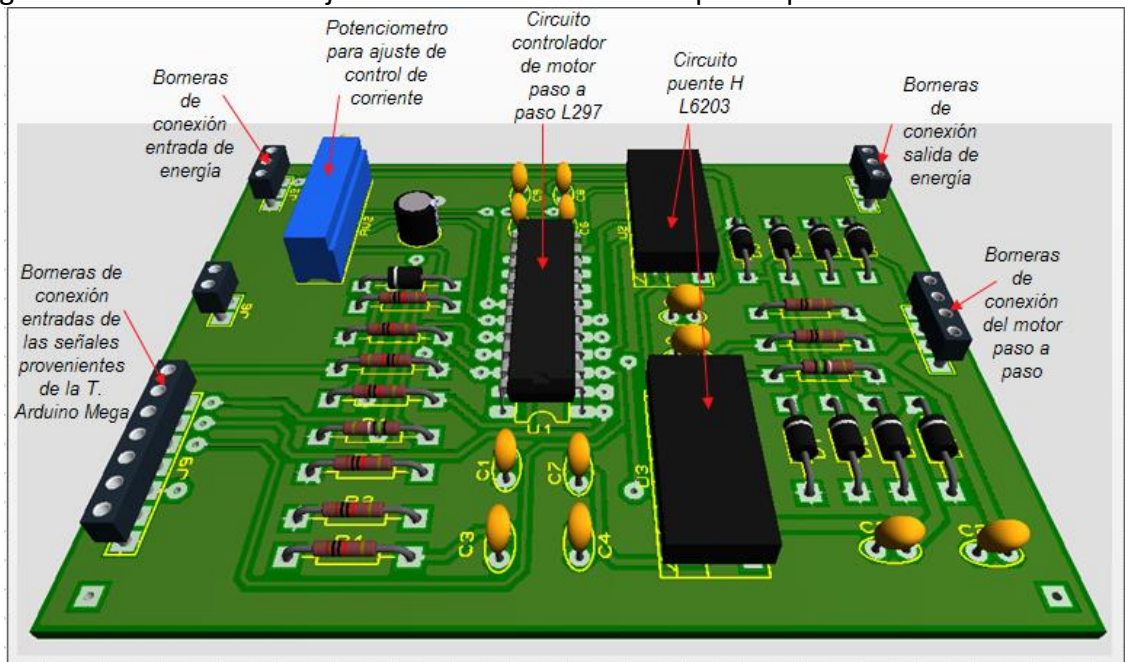
Otras características del motor seleccionado pueden ser consultadas en el anexo.

Otro de los actuadores seleccionado es el calefactor del extrusor consistente en una resistencia de alambre plano de ferroníquel, que posee un área de contacto mayor a la de un alambre cilíndrico. Este actuador posee una longitud de 10 cm, y proporciona una disipación de calor de 40 W cuando se conecta a una fuente de 12 V.

5.3 CIRCUITOS CONTROLADORES PARA LOS ACTUADORES.

Las señales generadas por la tarjeta de control son enviadas a cuatro tarjetas electrónicas que codifican dicha señal y manejan la potencia de cada uno de los motores paso a paso. El driver de cada motor está compuesto por el circuito integrado controlador de motor paso a paso L297 que permite controlar la corriente existente en los motores, trabajar con una señal de medio paso para aumentar la precisión de los motores a 400 pasos por vuelta y recibir el flujo de información enviado por la tarjeta de control, consistente en tres señales que definen la dirección, el paso y la habilitación de cada motor; la información de salida del circuito integrado L297 alimenta a dos circuitos integrados puente H L6203 de tecnología MOSFET, que se encargan de manejar la corriente necesaria para activar las bobinas del motor. En la Figura 5-5 se muestra la vista 3D del diseño simulado de una tarjeta controladora de motor. En el anexo B se puede consultar los diagramas esquemáticos de los circuitos diseñados en el capítulo 5.

Figura 5-5. Diseño de la tarjeta controladora de motor pasó a paso



Fuente: Los autores

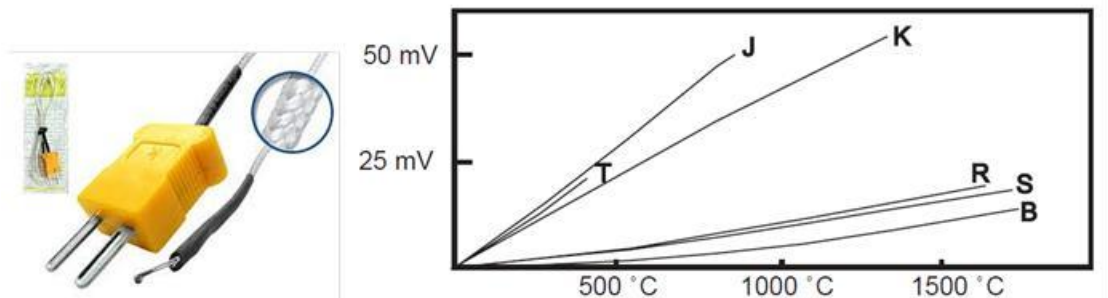
5.4 SENSORES DE TEMPERATURA Y MECÁNICOS.

Los sensores implementados corresponden a las necesidades de posicionamiento para determinar la ubicación máxima y mínima de cada eje, para la posición se utilizan sensores fin de curso óptico de barrera, quienes determinan la posición de referencia inicial y el alcance del máximo en cada coordenada; por otra parte para el control de temperatura del polímero se utiliza una termocupla tipo K como sensor de temperatura.

5.4.1 Señal de temperatura

El sensor ubicado dentro de la máquina es una termocupla tipo k, la cual posee un rango de medición entre $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1370\text{ }^{\circ}\text{C}$, acorde para medir el rango de temperatura en el extrusor cuyo valor máximo permisible es de $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. La señal arrojada por la termocupla se encuentra en el orden de -5.991 mV hasta 50.633 mV pasando por 0 y la relación temperatura voltaje es lineal, tal como se muestra en la figura 5-6.

Figura 5-6. Termopar tipo k físico y relación temperatura-voltaje

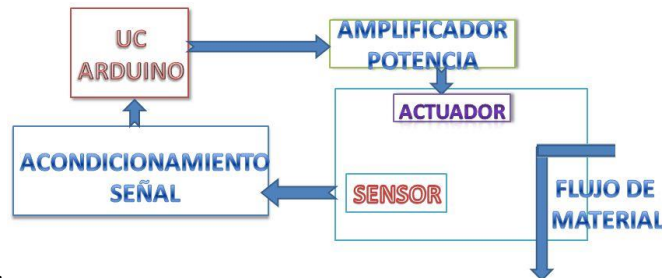


Fuente: <http://proton.ucting.udg.mx/dpto/maestros/mateos/clase/imagenes/termopar.jpg>

5.4.2 Circuito acondicionador de señal térmica

La tarjeta de control permite implementar una etapa de sensado de temperatura de fusión del material, la señal enviada por una termocupla tipo K ubicada en el extrusor es acondicionada por el amplificador de instrumentación AD 595 el cual permite obtener una salida analógica de $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ que posteriormente es entregada a la tarjeta de control, donde es procesada mediante un algoritmo, para emitir la señal de control del calefactor, la Figura 5-7 muestra el proceso de control de temperatura en el extrusor.

Figura 5-7. Sistema de control de temperatura en la extrusión.

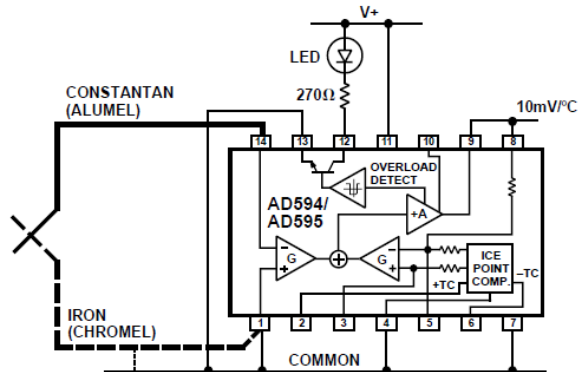


Fuente: Los autores

El acondicionador de señal se implementa porque los valores de voltaje que entrega la termocupla son pequeños, del orden de los mV, comparados con los que puede reconocer la tarjeta Arduino los cuales están entre 0 y 5V. El amplificador de instrumentación permite obtener una señal de $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ lo que facilita el patronamiento y la programación

de la adquisición de la señal de temperatura. El fabricante “ANALOG DEVICES” facilita la relación de conversión en la hoja de especificaciones del instrumento y la forma de conexión del circuito integrado sin fuente dual, como se muestra en la figura 5-8.

Figura 5-8. Conexión del circuito integrado AD 595 para el acondicionamiento de la señal



Fuente Datasheet anexo E

En el diagrama esquemático de la figura anterior se puede observar que los pines 14 y 1 corresponden a los positivo y negativo de la termocupla respectivamente. El circuito integrado posee un circuito detector de termocupla abierta, el cual fue utilizado para encender un led indicativo ante la no presencia de termocupla o ruptura de la misma, esto se ve en el pin 12 del circuito integrado donde se observa un diodo led de aviso.

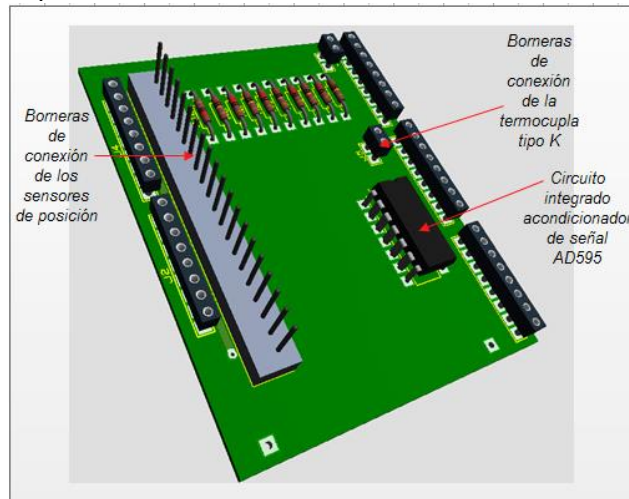
Como la temperatura de trabajo es siempre positiva y alcanza un valor máximo de 300 °C, se selecciona un voltaje de polarización de 5 V, valor razonable si se tiene en cuenta que el valor máximo de tensión entregado por el acondicionador es igual al de la fuente de alimentación y que para una respuesta del acondicionamiento de 10mV/°C se pueden medir hasta 500 °C.

La ventaja del circuito acondicionador AD595 es que tiene una ganancia lineal, esto significa que convertir la lectura analógica de la termocupla a una señal de voltaje requiere solo de multiplicación por un factor.

La señal de salida del AD595 alimenta una entrada de conversión análogo-digital de la tarjeta de control. Este conversor tiene una resolución de 10 bits, lo que es igual a 1024 valores en los que se puede medir una temperatura de 0 a 500°C, con una resolución de +0.48 °C. El firmware utilizado permite seleccionar esta configuración basada en un termopar tipo K y acondicionada con el circuito AD595 .

Para facilitar la conexión de los sensores a la tarjeta de control se diseñó una tarjeta complementaria de la Arduino mega que se ensambla justo encima de ésta; el diseño de la tarjeta complementaria se muestra en la figura 5-9.

Figura 5-9. Tarjeta complementaria



Fuente: Los autores

El control de temperatura está basado en un sistema Proporcional-Integral-Derivativo-PID, donde el valor de sus constantes K_p , K_i y K_d están descritos en...la sección 6.1... Este control mide la señal de entrada enviada por la termocupla y la compara con unos valores de referencia establecidos, con el propósito de obtener una señal de salida PWM por parte de la tarjeta controladora hacia el calefactor.

5.4.3 Sensado de posicionamiento

Para la controlar la posición se utilizan sensores fin de curso óptico de barrera, quienes determinan la posición de referencia inicial y el alcance del máximo en cada coordenada. La presentación del sensor se muestra en la figura 5-10 y sus características se pueden consultar en el anexo.

Figura 5-10. Sensor óptico de barrera

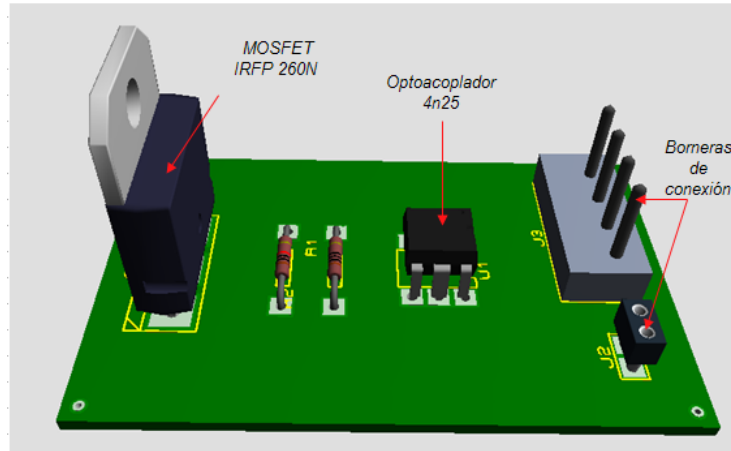


Fuente: <http://media.digikey.com/photos/Fairchild%20Semi%20Photos/QVA11134.jpg>

5.5 CIRCUITO DE POTENCIA DEL EXTRUSOR.

La salida del controlador al calefactor del extrusor es una Modulada por Ancho de Pulso - PWM, la cual va hacia una etapa de potencia, opto acoplada a la puerta de un MOSFET IRFP 260N, que se encarga de suministrar la energía necesaria al alambre de ferroníquel, para que éste otorgue el calor necesario para la fundición del material. En la figura 5-11 se observa el diseño de este amplificador de potencia.

Figura 5-11. Circuito amplificador de potencia para el extrusor.



Fuente: Los autores

El amplificador está compuesto por el integrado MOSFET IRFP 260N, que soporte una tensión máxima entre puerta y fuente de 20 V y una corriente de drenaje de 50 A, las características específicas de pueden consultar en el anexo E.

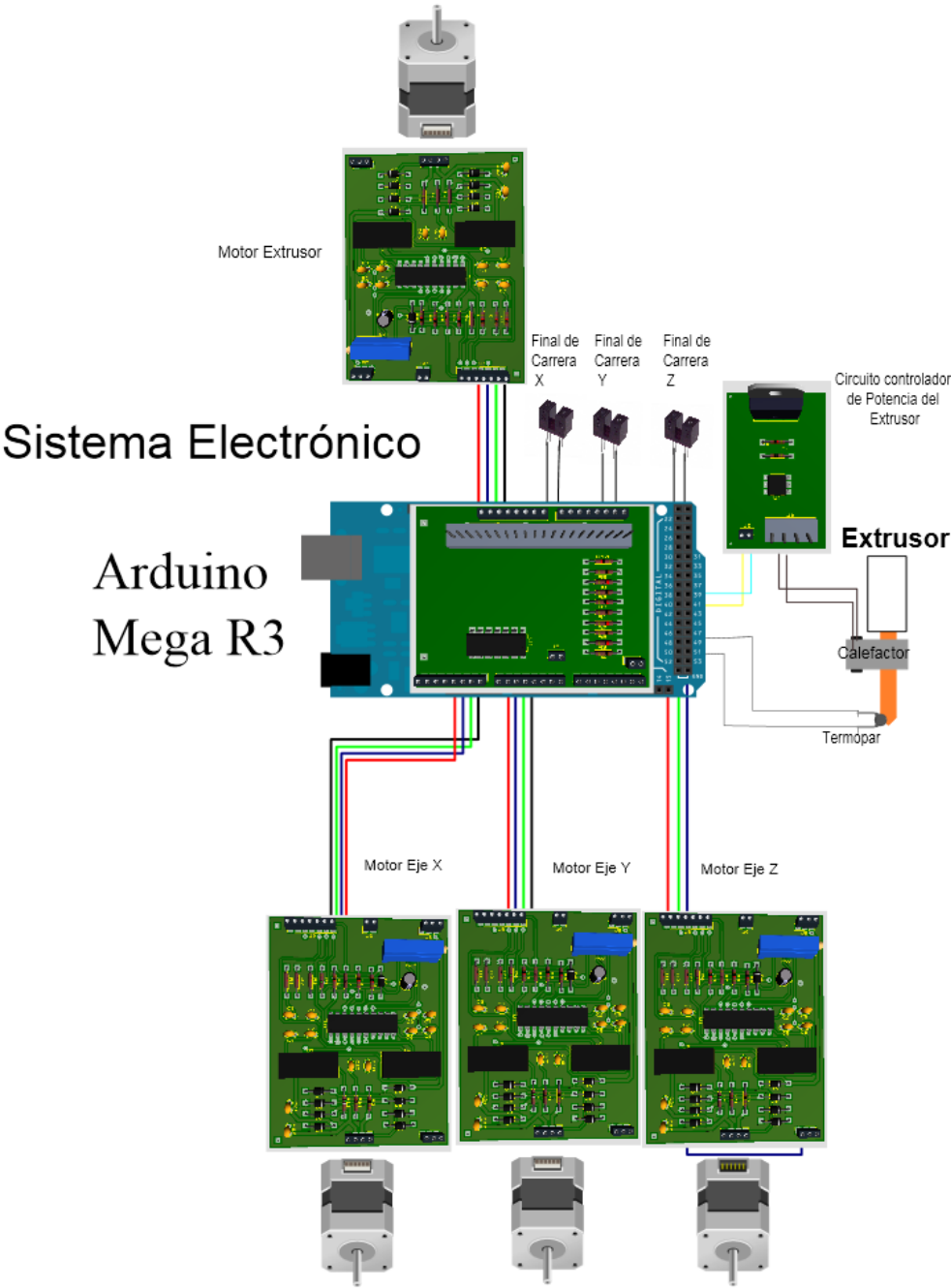
Fuente de potencia seleccionada

La fuente de alimentación seleccionada para su uso en la máquina corresponde a una fuente de poder DC de 10 Amperios, que suministra valores de 5 voltios para los circuitos de control y 12 voltios a los circuitos de potencia.

5.6 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS CIRCUITOS ELECTRÓNICOS

Para concluir el sistema electrónico de la impresora de prototipado rápido está compuesto por diversos componentes entre los que se encuentran los actuadores, sensores y controladores anteriormente descritos. El conexionado de los mismos puede ser consultado en el anexo C. La figura 5-12 muestra la disposición general de los circuitos de los componentes electrónicos de la impresora.

Figura 5-12. Disposición general de los circuitos de los componentes electrónicos de la impresora.



Fuente: los autores

6. SELECCIÓN Y USO DE HERRAMIENTAS SOFTWARE PARA EL GOBIERNO DE LA IMPRESORA

Por medio de un sistema informático la máquina interpreta la geometría de la pieza a fabricar, que en un principio es modelada en un software CAD. Este diseño se discretiza en un número finito de elementos, para “rebanar” por capas el modelo original, por cada capa se generan las trayectorias a seguir por el extrusor en la construcción del modelo.

El prototipo diseñado utiliza el siguiente flujo de información para completar una impresión: el software CAD guarda el archivo en una extensión estándar de prototipado rápido .STL. Al convertir a este formato se genera una malla de pequeños triángulos sobre las superficies para definir la forma del objeto. Posteriormente el archivo .STL es cargado por un software “rebanador” que permite la conversión del archivo .STL a código G o código de máquina, éste ubica los nodos de cada triángulo en coordenadas en el espacio, y genera un código especial para la impresión en 3D, que divide la pieza en capas y da órdenes de salida para el gobierno de los tres ejes de movimiento X Y Z y la herramienta de extrusión E, además configura otras variables como coordenadas absolutas y distancias a recorrer, finalmente un software “host” gobernante del proceso establece la temperatura del extrusor, avance y retroceso de cada eje, posición de finales de curso mínimos (0,0,0) “homing”, entre otras variables; el software host utiliza una interfaz de comunicación serial mediante la conversión de protocolo USB a RS232 que enlaza el PC con la tarjeta de control Arduino MEGA 2560. La Figura 6-1 muestra el proceso a seguir para completar una impresión.

Figura 6-1. Diagrama de flujo de información para el control del sistema.



Fuente: los autores

A continuación se realiza una descripción de los diferentes criterios de selección y uso de las diferentes herramientas software involucradas en el control.

6.1 FIRMWARE

Para que el software se comuniquen con la impresora, esta deberá llevar un código llamado firmware programado en la tarjeta Arduino, el cual gestiona y traduce la información del código G proveniente del software host.

Los dos firmwares más famosos y estables son *Sprinter* y *Marlin*⁴³. Particularmente *Marlin*⁴⁴ es el más actualizado y soluciona algunas carencias del firmware *sprinter*, fue creado por los autores Camiel Gubbels y Erik van der Zalm. Este programa que es software libre puede ser redistribuido o modificado bajo los términos de la Licencia Pública General-GNU, la cual es publicada por la Free Software Foundation, de la versión 3 de la Licencia, o cualquier versión posterior. Este programa se distribuye sin ninguna garantía, incluso sin la garantía implícita de comercialización o idoneidad para un propósito particular, por lo que fue evaluado y elegido para ser aplicado en el control de la impresora.

El firmware *Marlin* ofrece las siguientes características:

- Interrupción basada en el movimiento con aceleración lineal real.
- Alto intervalo de pasos
- Observa hacia dónde va, y mantiene una velocidad alta cuando es posible. Alta velocidad en curvas.
- Interrupción por protección de temperatura.
- Soporte completo para endstop
- Tarjeta SD
- Carpetas en tarjeta SD (para pronterface)
- Soporte para autoinicio desde tarjeta SD.
- Soporte para display LCD (ideal 20x4)
- Menú para impresión autónoma desde display LCD a través de clics en un encoder rotatorio.
- Almacenamiento en EEPROM de ej... max-velocidad, max-aceleracion, y variables similares.
- Soporte para arcos
- Sobremuestreo de temperatura
- Selección de temperatura dinámica o “Auto Temperatura”

⁴³MURILLO, Pablo. CURA–Software para Impresión 3D – Sprinter Vs Marlin. [Online] <http://www.arduteka.com/2012/12/software-cura-para-impresion-3d-sprinter-vs-marlin/>. 2012.

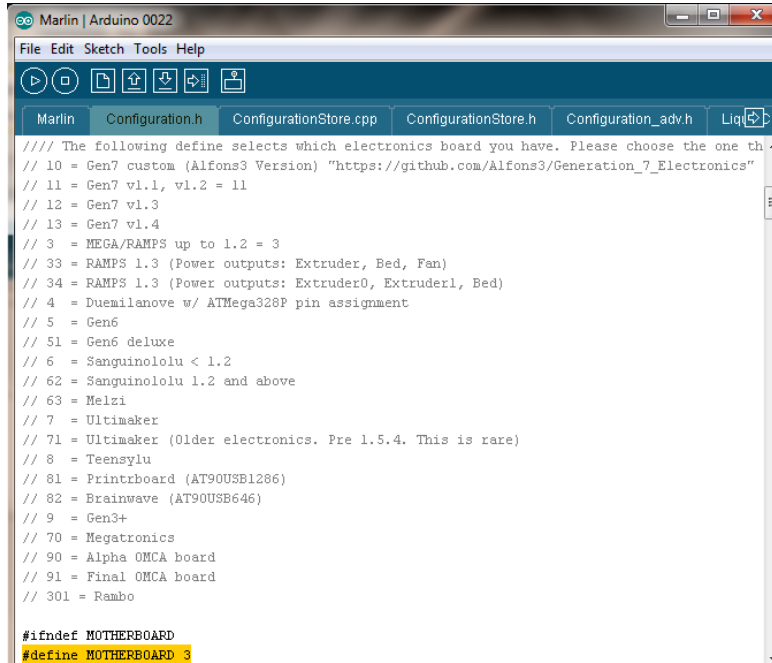
⁴⁴ Marlin 3d printer firmware [Online] <https://github.com/ErikZalm/Marlin>

- Control de finales de carrera.
- Aviso de sobrettemperatura. Útil para la monitorización PID.
- Ajuste PID de la temperatura del calefactor en el extrusor.
- Puerto serie configurable para soportar adaptadores inalámbricos.

6.1.1 Configuración del firmware *MARLIN*

Para quemar el firmware a la placa Arduino Mega, se usa el software Arduino 0.22. Una vez instalado el software, se abre el archivo Marlin.pde, posteriormente se selecciona la pestaña configuration.h, en este apartado de configuración se realizan todos los cambios para poner a punto la máquina. La primera variable a configurar es “baudrate” que es la velocidad a la cual se comunica la tarjeta con el software host, usar 115200 bps. Ahora se elige la placa con la que se controla la impresora 3D. En este caso, como la placa elegida es una Arduino MEGA, se selecciona ramps 1.2 y un extrusor simple, como se puede ver en las líneas comentadas en la figura 6-2, a cada modelo de placa se le ha asignado un número, que se debe introducir detrás de la instrucción #define MOTHERBOARD, en el caso particular, “3”, pero si se tuviera otra placa por ejemplo, una Megatronics, se debe introducir el 70.

Figura 6-2. Proceso de selección de board en el firmware Marlin



```

Marlin | Arduino 0022
File Edit Sketch Tools Help
Marlin Configuration.h ConfigurationStore.cpp ConfigurationStore.h Configuration_adv.h LiquidCrystal

// The following define selects which electronics board you have. Please choose the one that
// 10 = Gen7 custom (Alfons3 Version) "https://github.com/Alfons3/Generation_7_Electronics"
// 11 = Gen7 v1.1, v1.2 = 11
// 12 = Gen7 v1.3
// 13 = Gen7 v1.4
// 3 = MEGA/RAMPS up to 1.2 = 3
// 33 = RAMPS 1.3 (Power outputs: Extruder, Bed, Fan)
// 34 = RAMPS 1.3 (Power outputs: Extruder0, Extruder1, Bed)
// 4 = Duemilanove w/ ATmega328P pin assignment
// 5 = Gen6
// 51 = Gen6 deluxe
// 6 = Sanguinololu < 1.2
// 62 = Sanguinololu 1.2 and above
// 63 = Melzi
// 7 = Ultimaker
// 71 = Ultimaker (Older electronics. Pre 1.5.4. This is rare)
// 8 = Teensylu
// 81 = Printboard (AT90USB1286)
// 82 = Brainwave (AT90USB646)
// 9 = Gen3+
// 70 = Megatronics
// 90 = Alpha OMCA board
// 91 = Final OMCA board
// 301 = Rambo

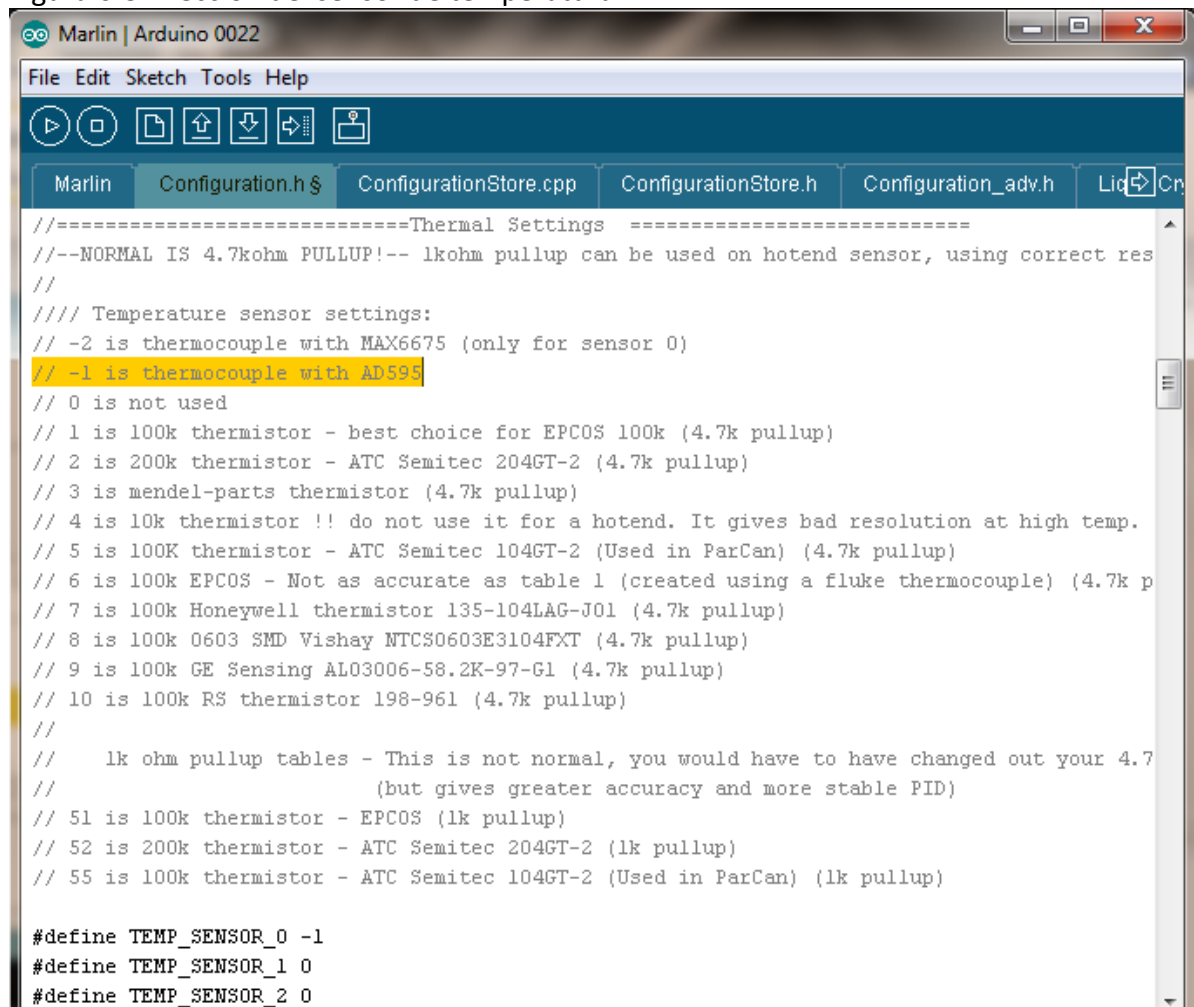
#ifdef MOTHERBOARD
#define MOTHERBOARD 3

```

Fuente: Los autores

El firmware permite seleccionar diferentes sensores de temperatura, en este caso se elige para el sensor 0 la opción -1(#define TEMP_SENSOR_0 -1), ya que solo se usa un sensor ubicado en el extrusor a base de una termocupla tipo K y el amplificador de instrumentación AD595. La figura 6-3 describe el proceso de elección del sensor.

Figura 6-3. Elección del sensor de temperatura



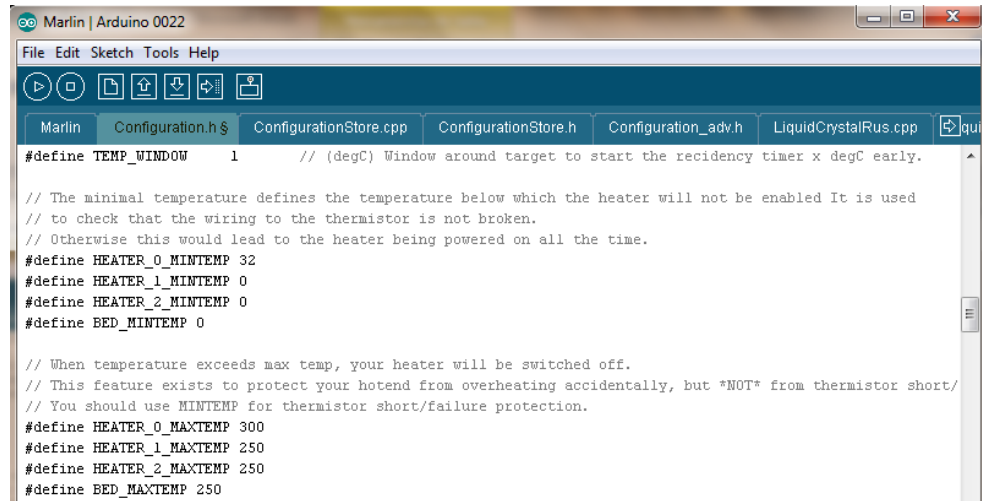
```
Marlin | Arduino 0022
File Edit Sketch Tools Help
Marlin Configuration.h $ ConfigurationStore.cpp ConfigurationStore.h Configuration_adv.h Liq Ch
//=====Thermal Settings =====
//--NORMAL IS 4.7kohm PULLUP!-- 1kohm pullup can be used on hotend sensor, using correct res
//
//// Temperature sensor settings:
// -2 is thermocouple with MAX6675 (only for sensor 0)
// -1 is thermocouple with AD595
// 0 is not used
// 1 is 100k thermistor - best choice for EPCOS 100k (4.7k pullup)
// 2 is 200k thermistor - ATC Semitec 204GT-2 (4.7k pullup)
// 3 is mendel-parts thermistor (4.7k pullup)
// 4 is 10k thermistor !! do not use it for a hotend. It gives bad resolution at high temp.
// 5 is 100k thermistor - ATC Semitec 104GT-2 (Used in ParCan) (4.7k pullup)
// 6 is 100k EPCOS - Not as accurate as table 1 (created using a fluke thermocouple) (4.7k p
// 7 is 100k Honeywell thermistor 135-104LAG-J01 (4.7k pullup)
// 8 is 100k 0603 SMD Vishay NTCS0603E3104FXT (4.7k pullup)
// 9 is 100k GE Sensing AL03006-58.2K-97-G1 (4.7k pullup)
// 10 is 100k RS thermistor 198-961 (4.7k pullup)
//
// 1k ohm pullup tables - This is not normal, you would have to have changed out your 4.7
// (but gives greater accuracy and more stable PID)
// 51 is 100k thermistor - EPCOS (1k pullup)
// 52 is 200k thermistor - ATC Semitec 204GT-2 (1k pullup)
// 55 is 100k thermistor - ATC Semitec 104GT-2 (Used in ParCan) (1k pullup)

#define TEMP_SENSOR_0 -1
#define TEMP_SENSOR_1 0
#define TEMP_SENSOR_2 0
```

Fuente: Los autores

A partir de allí el firmware Marlin permite configurar una serie de parámetros relacionados con el control de temperatura, en primer lugar en la figura 6-4 se aprecia la variable HEATER_0_MINTEMP que establece la temperatura por debajo de la que el calefactor no se habilitará y permite verificar que el cableado de la termocupla no está roto. A su vez la opción HEATER_0_MAXTEMP establece la temperatura máxima de trabajo, la cual al ser detectada apaga el sistema calefactor.

Figura 6-4. Parámetros del firmware para controlar máxima y mínima temperatura del extrusor.



```
Marlin | Arduino 0022
File Edit Sketch Tools Help
Marlin Configuration.h $ ConfigurationStore.cpp ConfigurationStore.h Configuration_adv.h LiquidCrystalRus.cpp
#define TEMP_WINDOW 1 // (degC) Window around target to start the recidency timer x degC early.

// The minimal temperature defines the temperature below which the heater will not be enabled It is used
// to check that the wiring to the thermistor is not broken.
// Otherwise this would lead to the heater being powered on all the time.
#define HEATER_0_MINTEMP 32
#define HEATER_1_MINTEMP 0
#define HEATER_2_MINTEMP 0
#define BED_MINTEMP 0

// When temperature exceeds max temp, your heater will be switched off.
// This feature exists to protect your hotend from overheating accidentally, but *NOT* from thermistor short/
// You should use MINTEMP for thermistor short/failure protection.
#define HEATER_0_MAXTEMP 300
#define HEATER_1_MAXTEMP 250
#define HEATER_2_MAXTEMP 250
#define BED_MAXTEMP 250
```

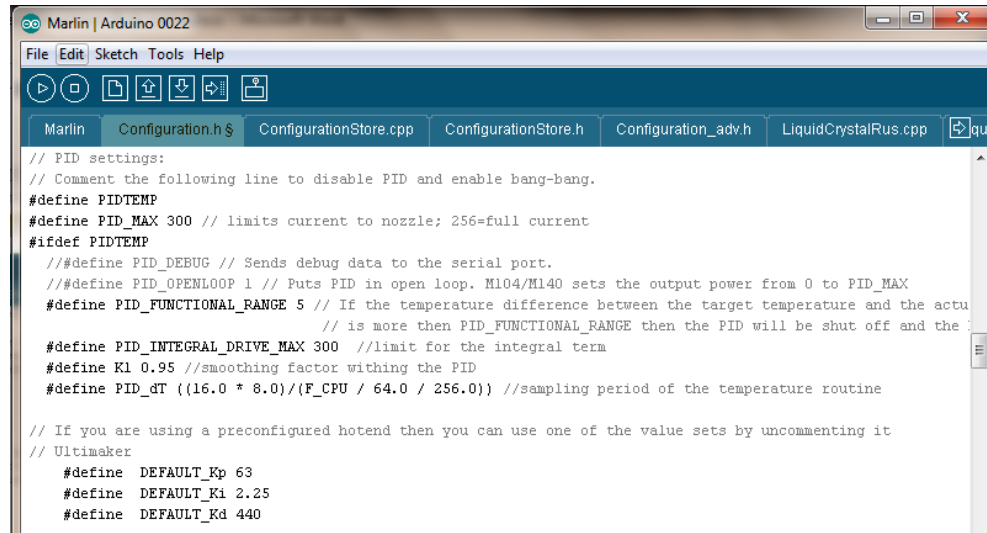
Fuente: Los autores

El firmware dispone de un control PID de temperatura, por el cual se controla la misma, de acuerdo a la lectura analógica recibida desde el transductor AD595 y con unos parámetros configurables como la temperatura máxima y un rango funcional en donde el sistema se apaga si la temperatura está cerca al valor de setpoint establecido en el software host, las ganancias del control PID Kp, Ki y Kd, se sintonizan de forma experimental con un procedimiento de prueba y ajuste ejercido sobre el extrusor independiente del sistema de posicionamiento, posteriormente al integrar con el sistema de posicionamiento en movimiento se comprobó que el sistema no presenta inconsistencias o variaciones en el control de temperatura.

Se comprobó que las constantes funcionaron de acuerdo al requerimiento de tiempo de estabilización calculado en... la sección 4.4.6... y su valor tiene en cuenta el tiempo de muestreo de la tarjeta controladora dado por el oscilador de 16 MHz que posee, finalmente los valores seleccionados de trabajo para las constantes Kp, Ki y Kd son: 63, 2.25 y 440 en su orden.

La tarjeta controladora calcula una señal de salida PWM entregada a la compuerta del Mosfet IRFP 260 de forma opto acoplada en el circuito controlador de potencia del extrusor. Los diversos parámetros a configurar se muestran en la Figura 6-5.

Figura 6-5. Parámetros del firmware que establecen el control PID de temperatura en el extrusor.



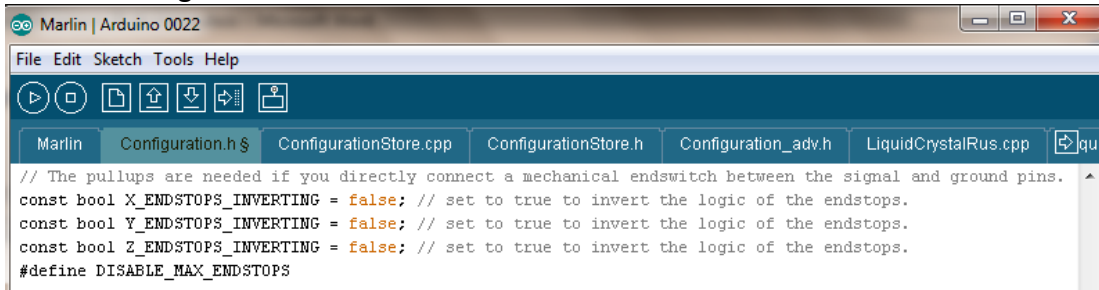
```
Marlin | Arduino 0022
File Edit Sketch Tools Help
Marlin Configuration.h$ ConfigurationStore.cpp ConfigurationStore.h Configuration_adv.h LiquidCrystalRus.cpp
// PID settings:
// Comment the following line to disable PID and enable bang-bang.
#define PIDTEMP
#define PID_MAX 300 // limits current to nozzle; 256=full current
#ifndef PIDTEMP
  // #define PID_DEBUG // Sends debug data to the serial port.
  // #define PID_OPENLOOP 1 // Puts PID in open loop. M104/M140 sets the output power from 0 to PID_MAX
  #define PID_FUNCTIONAL_RANGE 5 // If the temperature difference between the target temperature and the actual
  // is more then PID_FUNCTIONAL_RANGE then the PID will be shut off and the heater will be set to power up
  #define PID_INTEGRAL_DRIVE_MAX 300 //limit for the integral term
  #define K1 0.95 //smoothing factor withing the PID
  #define PID_dT ((16.0 * 8.0)/(F_CPU / 64.0 / 256.0)) //sampling period of the temperature routine

  // If you are using a preconfigured hotend then you can use one of the value sets by uncommenting it
  // Ultimaker
  #define DEFAULT_Kp 63
  #define DEFAULT_Ki 2.25
  #define DEFAULT_Kd 440
```

Fuente: Los autores

La configuración mecánica de la máquina se inicia por los finales de carrera, si se necesita invertir la lógica de los finales de carrera, se puede cambiar de true a false o viceversa esto sobre todo cuando el sensor usado se activa con señal en alto (1) o en bajo (0). como se evidencia en la figura 6-6.

Figura 6-6. Configuración de activación de los finales de carrera



```
Marlin | Arduino 0022
File Edit Sketch Tools Help
Marlin Configuration.h$ ConfigurationStore.cpp ConfigurationStore.h Configuration_adv.h LiquidCrystalRus.cpp
// The pullups are needed if you directly connect a mechanical endswitch between the signal and ground pins.
const bool X_ENDSTOPS_INVERTING = false; // set to true to invert the logic of the endstops.
const bool Y_ENDSTOPS_INVERTING = false; // set to true to invert the logic of the endstops.
const bool Z_ENDSTOPS_INVERTING = false; // set to true to invert the logic of the endstops.
#define DISABLE_MAX_ENDSTOPS
```

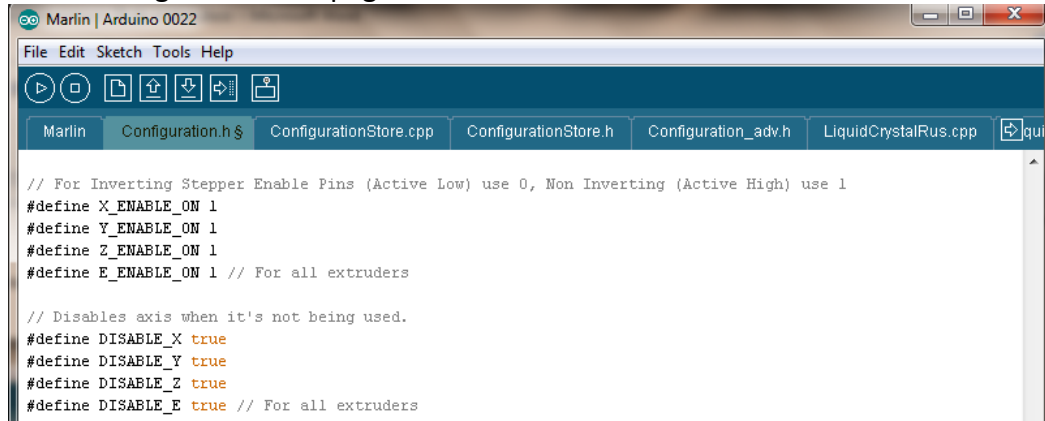
Fuente: Los autores

Se dispone a la salida de la tarjeta controladora unos pines especiales para habilitar los 4 motores de la máquina, en las primeras líneas de la figura 6-7 se evidencia como se establece la configuración de este pin en alto o en bajo, en este caso el CI L297 tiene su pin de enable encendido en alto.

Para desactivar un motor, se coloca true en las líneas #define DISABLE_ como se muestra en la figura 6-7, esto es imprescindible en la máquina y fue uno de los aspectos más importantes a tratar en la puesta a punto, y causal de usar las tarjetas controladoras de motores, dado que al permanecer estático un motor y el habilitador del CI L297

permanece en alto se consume una cantidad de corriente muy grande poniendo en peligro los CI L6203 e inclusive los mismo motores, esto se comprobó midiendo la temperatura de los dispositivos, así que se ajusta true en los 4 motores para que solo se muevan cuando sea necesario.

Figura 6-7. Configuración de apagado de los motores cuando no están en uso



```
Marlin | Arduino 0022
File Edit Sketch Tools Help
Configuration.h $ ConfigurationStore.cpp ConfigurationStore.h Configuration_adv.h LiquidCrystalRus.cpp

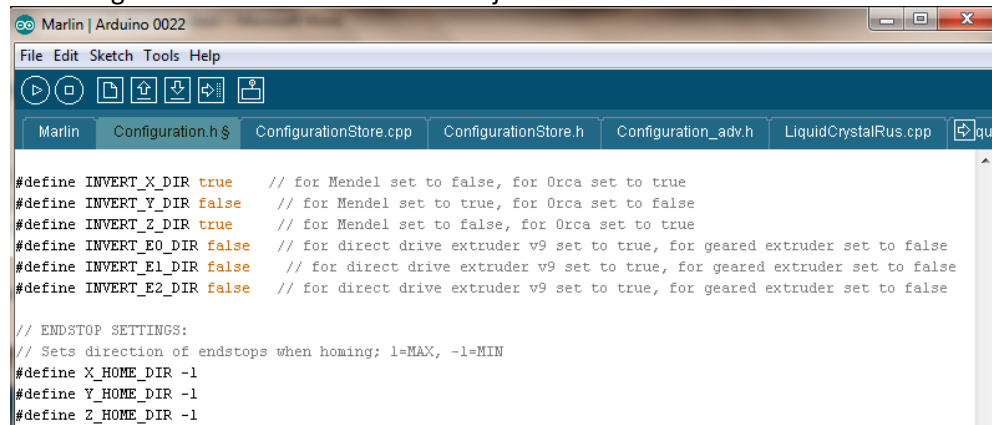
// For Inverting Stepper Enable Pins (Active Low) use 0, Non Inverting (Active High) use 1
#define X_ENABLE_ON 1
#define Y_ENABLE_ON 1
#define Z_ENABLE_ON 1
#define E_ENABLE_ON 1 // For all extruders

// Disables axis when it's not being used.
#define DISABLE_X true
#define DISABLE_Y true
#define DISABLE_Z true
#define DISABLE_E true // For all extruders
```

Fuente: Los autores

Si se necesita invertir la dirección de algún eje, se puede hacer desde las variables mostradas en la figura 6-8, con esta configuración se debe conseguir que cuando se realice una orden de ir al punto (0,0,0) “homing” de los ejes, estos vayan hacia los finales de carrera adecuados, o en caso contrario, chocarán con el otro extremo; además la variable #define X_HOME_DIR y sus homologas indican la dirección que debe adaptar el movimiento de los ejes cuando se le indique una orden de homing.

Figura 6-8. Configuración de la dirección de los ejes



```
Marlin | Arduino 0022
File Edit Sketch Tools Help
Configuration.h $ ConfigurationStore.cpp ConfigurationStore.h Configuration_adv.h LiquidCrystalRus.cpp

#define INVERT_X_DIR true // for Mendel set to false, for Orca set to true
#define INVERT_Y_DIR false // for Mendel set to true, for Orca set to false
#define INVERT_Z_DIR true // for Mendel set to false, for Orca set to true
#define INVERT_E0_DIR false // for direct drive extruder v9 set to true, for geared extruder set to false
#define INVERT_E1_DIR false // for direct drive extruder v9 set to true, for geared extruder set to false
#define INVERT_E2_DIR false // for direct drive extruder v9 set to true, for geared extruder set to false

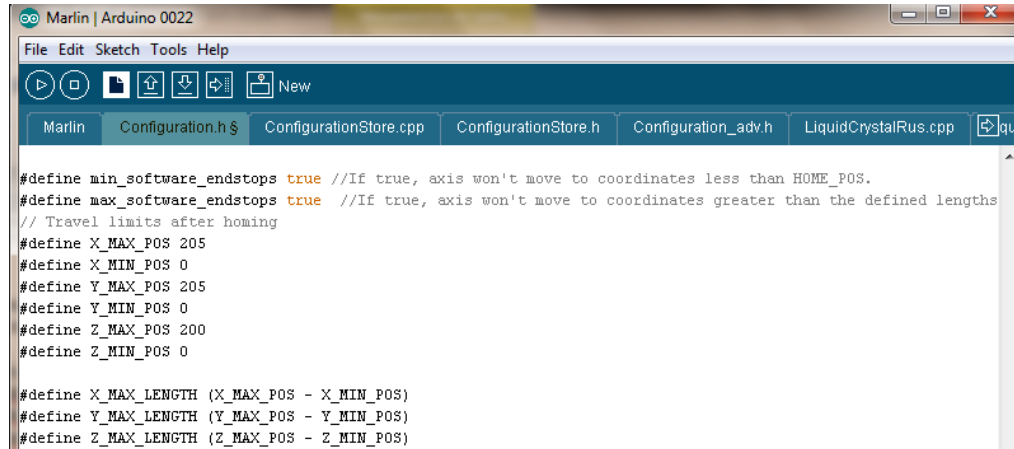
// ENDSTOP SETTINGS:
// Sets direction of endstops when homing; 1=MAX, -1=MIN
#define X_HOME_DIR -1
#define Y_HOME_DIR -1
#define Z_HOME_DIR -1
```

Fuente: Los autores

Posteriormente se tienen las dimensiones máximas de la impresora configuradas como se muestra en la figura 6-9, de manera que se evite exceder los límites establecidos por los finales de carrera (dimensiones en mm), se define por ejemplo para el eje x la posición

máxima=205 y mínima=0, así de su resta 205-0=205, la máquina no recorrerá más de 205 mm inclusive si se le ordenan recorrer desde el software host. La mejor manera de conocer los límites, es hacer un homing, y a continuación, avanzar cada 10mm, contar las veces y establecer el máximo avance, eso para cada eje.

Figura 6-9. Dimensiones máximas de restricción de movimiento

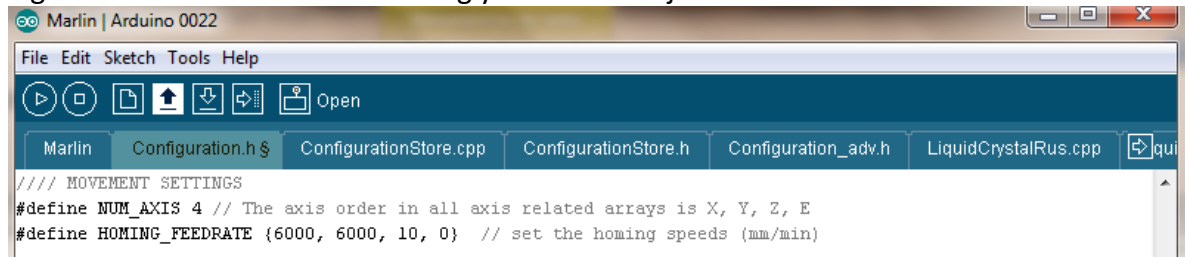


```
Marlin | Arduino 0022
File Edit Sketch Tools Help
Marlin Configuration.h $ ConfigurationStore.cpp ConfigurationStore.h Configuration_adv.h LiquidCrystalRus.cpp
#define min_software_endstops true //If true, axis won't move to coordinates less than HOME_POS.
#define max_software_endstops true //If true, axis won't move to coordinates greater than the defined lengths
// Travel limits after homing
#define X_MAX_POS 205
#define X_MIN_POS 0
#define Y_MAX_POS 205
#define Y_MIN_POS 0
#define Z_MAX_POS 200
#define Z_MIN_POS 0
#define X_MAX_LENGTH (X_MAX_POS - X_MIN_POS)
#define Y_MAX_LENGTH (Y_MAX_POS - Y_MIN_POS)
#define Z_MAX_LENGTH (Z_MAX_POS - Z_MIN_POS)
```

Fuente: Los autores

La configuración más importante del sistema mecánico, imprescindible para que éste responda como se quiere ante una orden de posición velocidad y aceleración se hace primero definiendo el número de ejes usados en la máquina, en este caso 4: X Y Z y E si se cuenta el extrusor (E) como el cuarto, después se configura la velocidad de homing en mm/min, por la cual la máquina se moverá hacia los finales de carrera punto (0,0,0) independiente de la velocidad que venga desde el código G; esto ilustrado en la figura 6-10

Figura 6-10. Velocidades de homing y número de ejes usados



```
Marlin | Arduino 0022
File Edit Sketch Tools Help
Marlin Configuration.h $ ConfigurationStore.cpp ConfigurationStore.h Configuration_adv.h LiquidCrystalRus.cpp
//// MOVEMENT SETTINGS
#define NUM_AXIS 4 // The axis order in all axis related arrays is X, Y, Z, E
#define HOMING_FEEDRATE {6000, 6000, 10, 0} // set the homing speeds (mm/min)
```

Fuente: Los autores

La variable que permite calibrar la máquina correctamente los desplazamientos, a partir del conocimiento de la relación de pasos por vuelta y la distancia que a recorrer es #define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT, que es un arreglo separado por comas de valores correspondientes a pasos del motor/mm de los ejes X, Y, Z y E.

En la figura 6-11 se muestran los valores finales establecidos para la máquina, estos fueron determinados en principio de forma teórica y después mejorados con pruebas prácticas, como se describe en el siguiente ejemplo:

Cálculo de parámetros en el eje X

De acuerdo a la ecuación 3-3, y con 400 pasos por vuelta de cada motor debido a que fueron configurados como medio paso a través del CI L297, así para una vuelta:

$$\Delta P_x = 0.2 n = 0.2 * 400 = 80\text{mm}$$

Los pasos por mm son:

$$\frac{\text{Pasos}}{\text{mm}} \text{ en } x = \frac{400\text{pasos}}{80\text{mm}} = 5\text{pasos/mm}$$

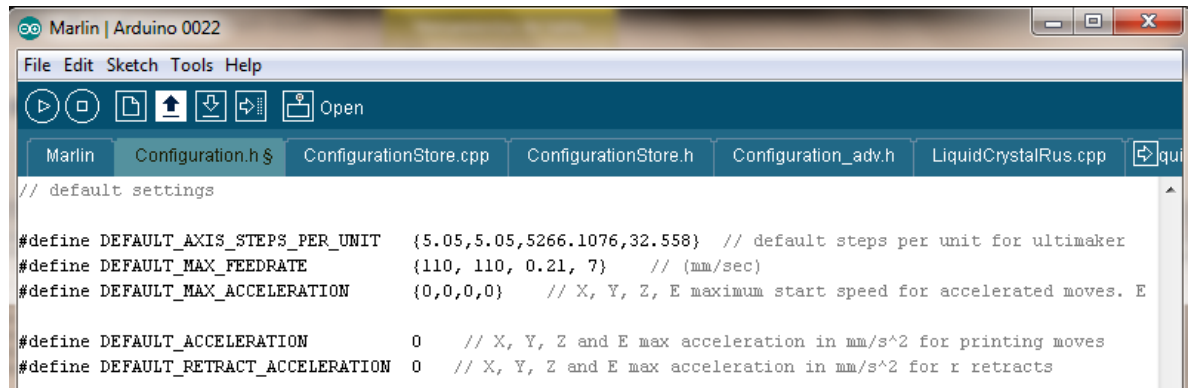
Sin embargo cuando se estableció este parámetro y se midió en la realidad con un calibrador digital, se encontró una desviación de 990 micras lo que permitió corregir el valor a 5.05 pasos/mm como ideal.

En la línea #define DEFAULT_MAX_FEEDRATE se consignan los valores de las velocidades máximas de desplazamiento en los ejes en mm/s, a partir del comportamiento de los motores entregado por el fabricante y consignado en...la figura 5-4...Su calibración se hizo a partir de un generador de impulsos NE 555 configurado como monoestable, el cual entrega un tren de pulsos al circuito integrado (CI) L297, este resultado fue validado a través de la observación en un osciloscopio, donde se pudo constatar que la frecuencia máxima de trabajo es de 400Hz, la cual es considerada como óptima para conducir los motores al torque requerido.

La relación de pasos/mm es igual para los ejes X e Y debido a que poseen el mismo mecanismo, esto es importante a tener en cuenta debido a que al realizar un estudio detallado del código G, la velocidad entregada, por ejemplo F100 mm/s, refiere la velocidad con que van a actuar los ejes X Y y E, entonces el valor de 7 mm/s mostrado en la figura 6-11 como el último separado por comas en la línea #define DEFAULT_MAX_FEEDRATE, restringe al eje del extrusor (eje E) a moverse máximo a 7mm/s.

Durante la impresión la aceleración se reduce a cero, debido a que las impresiones son hechas a velocidad constante, este movimiento está relacionado directamente con la velocidad del flujo del extrusor. Esta programación se muestra en la figura 6-11.

Figura 6-11. Configuración de los pasos por mm en cada eje, máxima velocidad y máxima aceleración en el movimiento.



```
Marlin | Arduino 0022
File Edit Sketch Tools Help
[Icons] Open
Marlin Configuration.h$ ConfigurationStore.cpp ConfigurationStore.h Configuration_adv.h LiquidCrystalRus.cpp [Icon] qui
// default settings

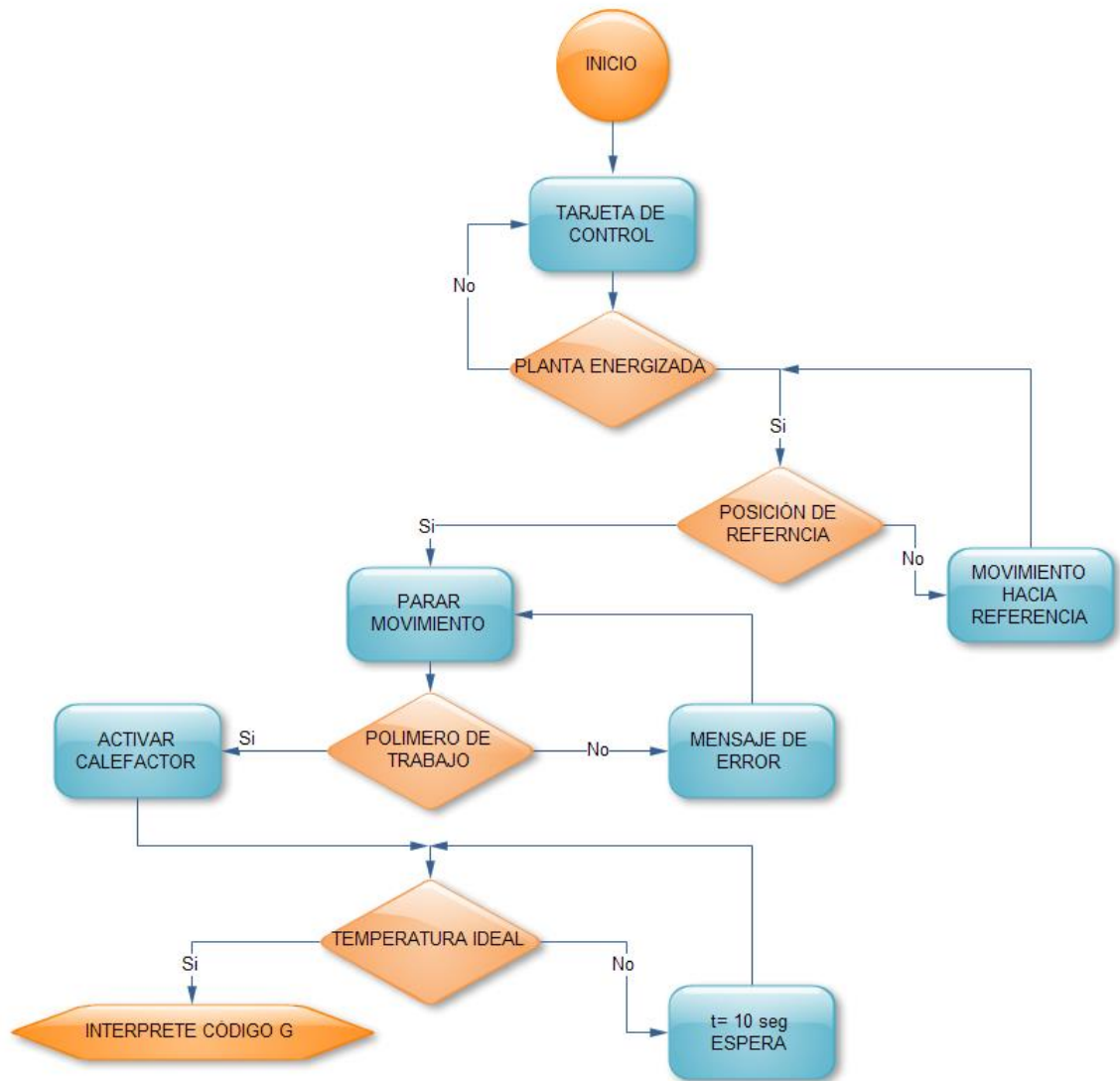
#define DEFAULT_AXIS_STEPS_PER_UNIT {5.05,5.05,5266.1076,32.558} // default steps per unit for ultimaker
#define DEFAULT_MAX_FEEDRATE {110, 110, 0.21, 7} // (mm/sec)
#define DEFAULT_MAX_ACCELERATION {0,0,0,0} // X, Y, Z, E maximum start speed for accelerated moves. E

#define DEFAULT_ACCELERATION 0 // X, Y, Z and E max acceleration in mm/s^2 for printing moves
#define DEFAULT_RETRACT_ACCELERATION 0 // X, Y, Z and E max acceleration in mm/s^2 for r retracts
```

Fuente: Los autores

En la figura 6-12 se muestra el diagrama de flujo del proceso ejecutado por parte del firmware controlador del proceso.

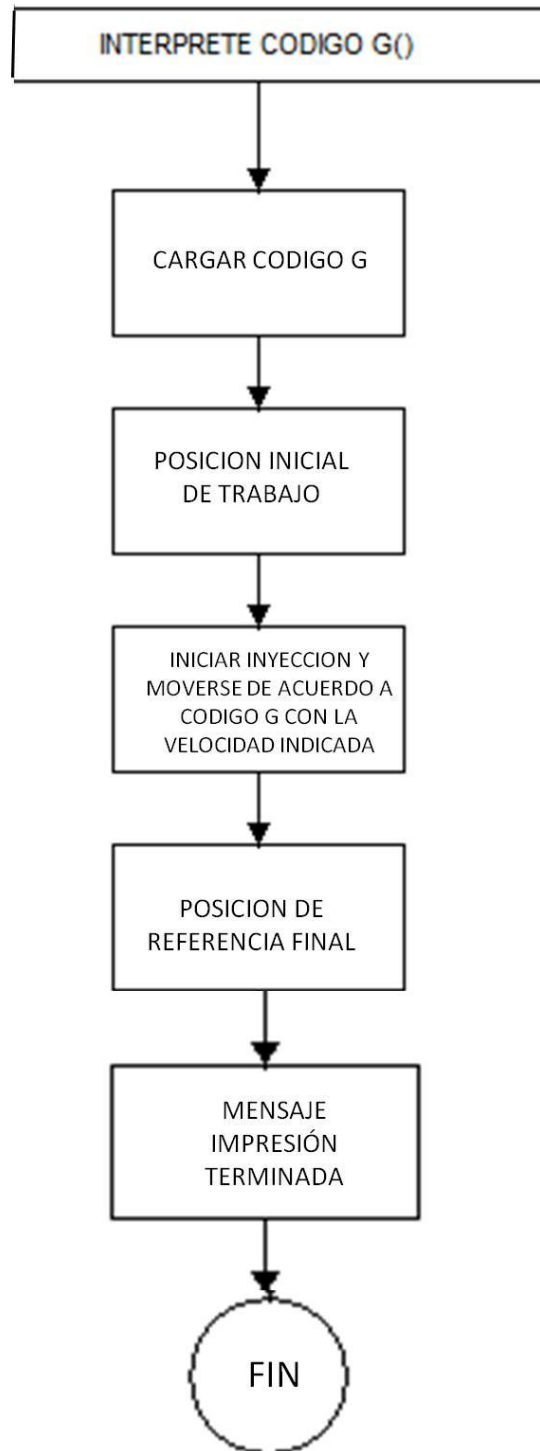
Figura 6-12. Diagramas de flujo del proceso de impresión



Fuente: Los autores

La figura 6-13 muestra la continuación del diagrama de flujo a partir del intérprete del código G.

Figura 6-13. Continuación de la figura 6-12.



Fuente: los autores

El proceso de interpretación de código G se encuentra analizado y descrito en el Anexo A.

6.2 SOFTWARE UTILIZADO

6.2.1 Software CAD

El modelamiento de las piezas puede hacerse en un paquete de software CAD que presente una interfaz amigable al usuario y que permita la exportación del archivo generado en formato reconocible por un software de discretización, para el desarrollo del presente trabajo se utilizó el software SOLID EDGE ST5 ya que es un paquete que cumple con las especificaciones para la compatibilidad de archivos y está licenciado por la universidad.

6.2.2 Lenguaje base de programación python

Python es un lenguaje de programación que hace énfasis en una sintaxis muy limpia y que favorece un código legible. Se trata de un lenguaje multiplataforma de programación que soporta programación orientación a objetos, programación imperativa y en menor medida programación funcional. Es administrado por la Python Software Foundation. Posee una licencia de código abierto, denominada Python Software Foundation License,¹ que es compatible con la Licencia pública general de GNU a partir de la versión 2.1.1, e incompatible en ciertas versiones anteriores.

Este lenguaje es utilizado para la generación de aplicaciones intervinientes en el proceso de impresión 3D como el software conversor de .stl a código G y el software host de comunicación con la planta.

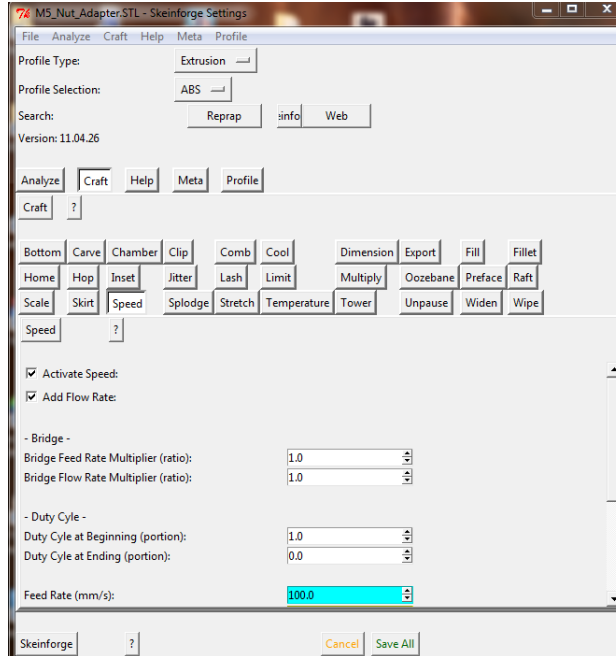
A partir de este lenguaje de programación se han desarrollado alternativas de software rebanadores o seccionadores como Skeinforge y Slic3r, los cuales responden a las necesidades de convertir un archivo .STL en código de máquina o código G.

6.2.3 Alternativas de software de conversión a lenguaje de máquina.

- **Skeinforge**

Skeinforge es una colección de scripts de Python que crea el código G necesario para imprimir un modelo 3D. Skeinforge ha sido utilizado por casi todas las impresoras 3D personales, ya que ofrece el mayor nivel de configurabilidad y personalización. Este conjunto de características es muy extenso y al final resulta complejo, Sin embargo, si se está buscando la mayor cantidad de opciones esta es la herramienta adecuada. En la figura 6-14 se muestra la interfaz de la versión 11.04.26

Figura 6-14. Interfaz de usuario del software Skeinforge



Fuente: Los autores

- **Parámetros CAM en Skeinforge:**

RAFT o Balsa: es una especie de capa base que se coloca debajo del objeto. Se usa cuando no se cuenta con una plataforma climatizada o si la plataforma está golpeada o no está nivelada. Cordones gruesos rellenan agujeros en la plataforma y ayudan a nivelar la base de construcción. También mejora la adherencia, lo que ayuda a prevenir la deformación de impresiones de gran tamaño.

FLOW RATE: se refiere a la velocidad de flujo de material en la herramienta extrusora, se toma de acuerdo a una longitud dada de filamento.

FEED RATE o velocidad de avance: es la rapidez con que la plataforma de construcción se mueve.

THICKNESS: Espesor de la capa.

WIDTH: Ancho de un cordón de plástico. No es el mismo que el ancho de la boquilla o la anchura del plástico que sale de la boquilla (para el ABS, es un poco más ancho que el tamaño de la boquilla).

PERIMETER: Es el número de cordones depositados en el exterior de una capa impresa antes de comenzar el relleno (infill) establecido.

INFILL o Relleno: es todo el material impreso dentro de las líneas perimetrales que sigue diversos patrones establecidos en el software.

MULTPLIER o Multiplicador: un valor proporcional al estándar de extrusión, utilizado si se quiere imprimir más o menos material.

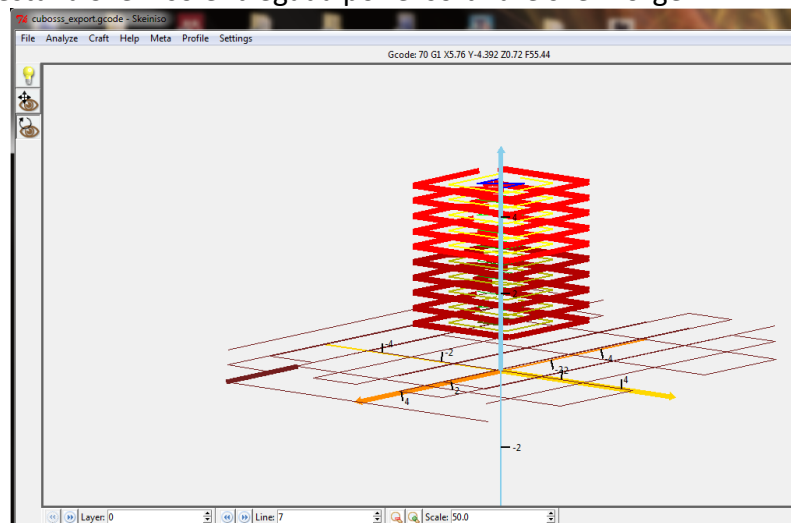
Orbit: A veces Skeinforge necesita perder algo de tiempo sin extruir debido a un cambio de temperatura. Cuando lo hace, realiza "órbitas" alrededor de la impresión. Básicamente, la extrusora se apaga y la plataforma se mueve lentamente a su alrededor.

TRAVEL o Viaje: Referido a cuando Skeinforge necesita detener la impresión y moverse a otro lugar para empezar a imprimir de nuevo.

Después de configurar los parámetros óptimos acordes a la impresora se procede a cargar una pieza .STL, el programa ejecuta su algoritmo y entrega tres pantallas descritas a continuación:

La primera de las pantallas se muestra en la figura 6-15, aquí el software permite ver las capas que integran la pieza y distingue por colores la velocidad de movimiento en cada una de ellas.

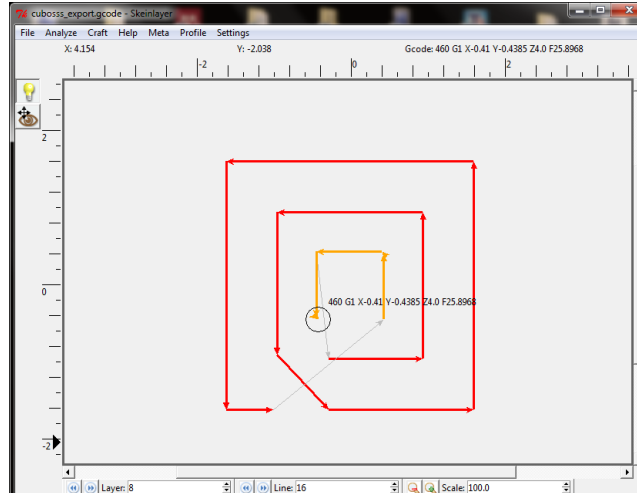
Figura 6-15. Pestaña Skeiniso entregada por el software skeinforge



Fuente: Los autores

La segunda pantalla mostrada en la figura 6-16, detalla en vista de techo la trayectoria seguida por el cabezal extrusor para generar cada capa se puede seguir en cada vértice la línea de código G perteneciente.

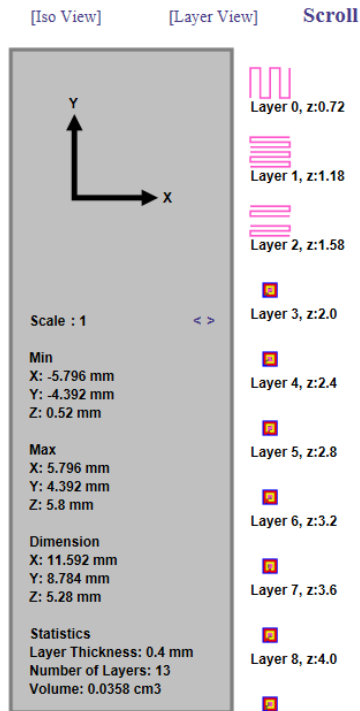
Figura 6-16. Pestaña Skeinlayer entregada por el software skeinforge



Fuente: Los autores

Por último, en un script, abierto generalmente por internet Explorer y mostrado en la figura 6-17, el software skeinforge permite observar la pieza en vista isométrica, capa a capa y generar un resumen con características importantes del modelo a imprimir como sus dimensiones, el espesor de capa, el número de capas y volumen.

Figura 6-17. Resumen del proceso de rebanado entregado por el software skeinforge



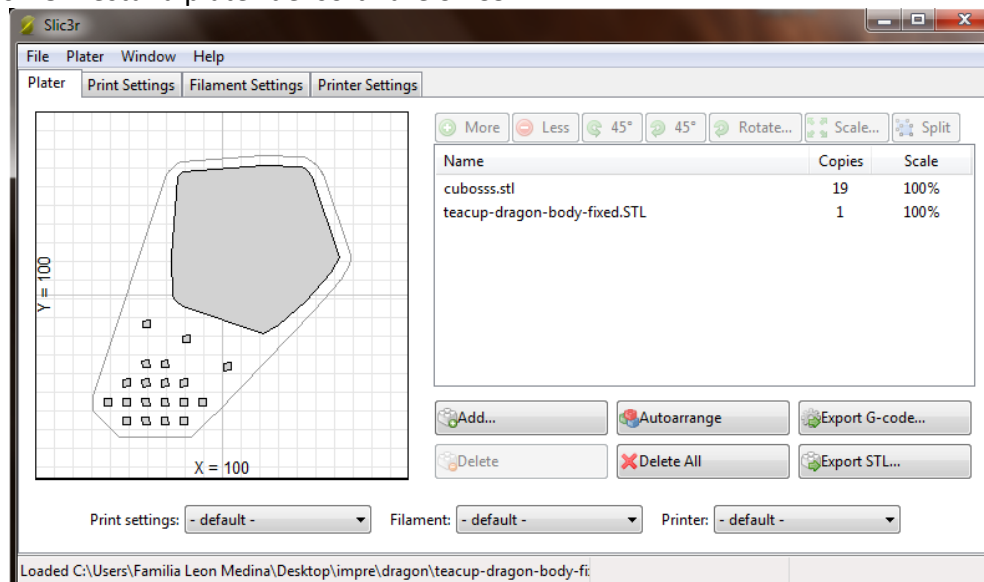
Fuente: Los autores

- **Slic3r**

Slic3r se ha convertido rápidamente en uno de los software rebanadores más populares debido a su facilidad de uso, corto tiempo de generación de código, y buena calidad de impresión. Mientras Skeinforge pide a los usuarios hacer un montón de cálculos sobre la extrusión de filamentos, Slic3r calcula todos estos valores el mismo, después de introducir unos pocos parámetros sobre la impresora, el filamento, y los ajustes de impresión deseados.

La primera ventana presentada en la figura 6-18 por el software SLIC3R, en la pestaña *plater* arroja un panel de vista de techo de la pieza a imprimir, aquí se puede rotar, aumentar tamaño, duplicar, mover, cargar otra pieza entre otras opciones, este aspecto hace que el software sea versátil y muy útil al querer hacer varias impresiones al tiempo. En la parte inferior de la ventana se muestran tres alternativas que permiten seleccionar los perfiles previamente guardados de las configuraciones de impresión, de filamento y de impresora.

Figura 6-18. Pestaña plater del software SLIC3R



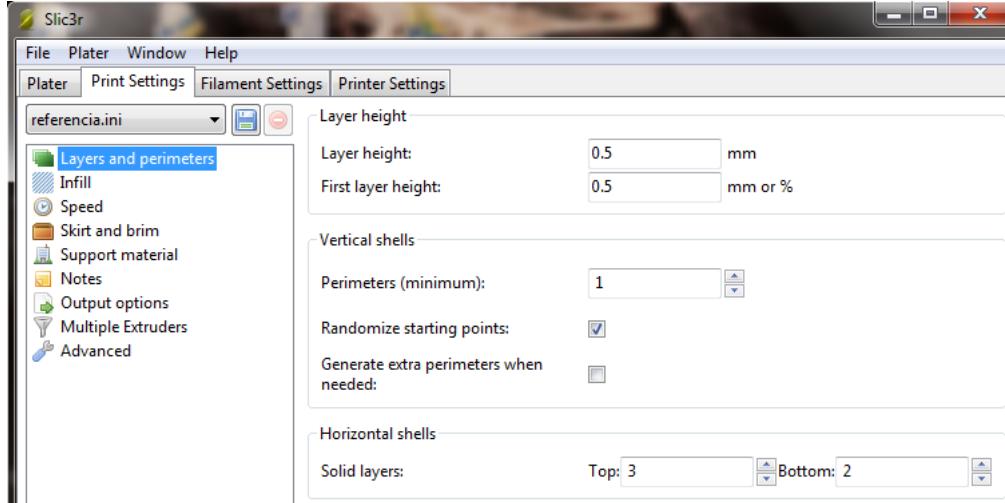
Fuente: Los autores

En la siguiente pestaña *print settings*, el software permite guardar el perfil de configuración de impresión mostrado en la figura 6-19 como *referencia.ini* a continuación se describen los tres principales apartados de esta pestaña:

- *Layers and perimeters*: en la figura 6-19 se muestra este apartado, el cual permite configurar el espesor de capa de toda la pieza y por aparte el de la primera capa, en este caso se configuró como 0.5mm para dejarlo igual al diámetro de la boquilla, permitiendo un cálculo de flujo uniforme por parte del software. Además

en este apartado se configura el número de perímetros que conformarán la pieza y por último las capas sólidas de base ubicadas encima y debajo de la pieza.

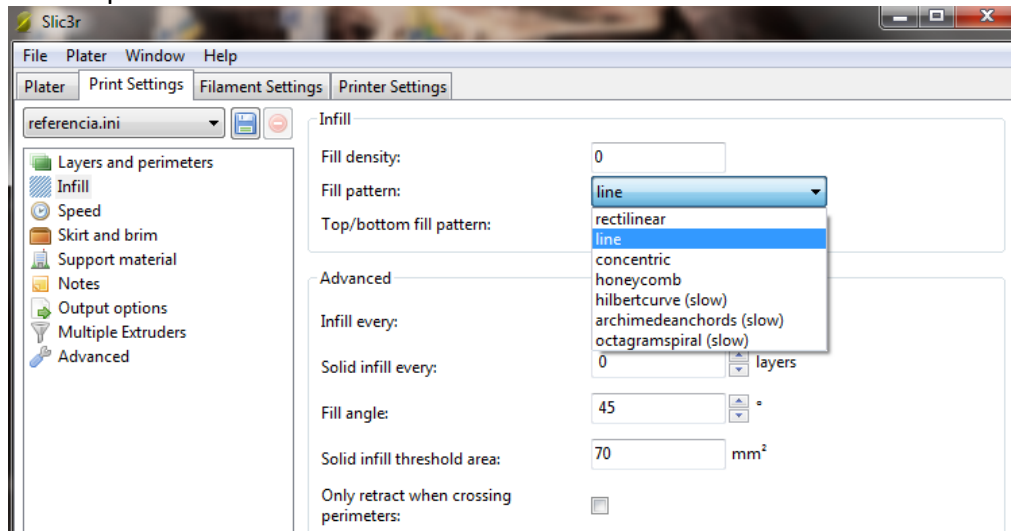
Figura 6-19. Apartado layers and perimeters del software SLIC3R



Fuente: Los autores

- *Infill*: definido anteriormente para el rebanador skeinforge, el apartado infill mostrado en la figura 6-20 hace referencia al relleno de la pieza, la opción fill density permite establecer que tanto relleno se la aplicará a la pieza, así, una pieza hueca tendrá un valor de 0 y una completamente solida de 1...en la sección 4.2.5... fueron mostrados diferentes tipos de fill pattern que hacen referencia a la forma del relleno de la pieza.

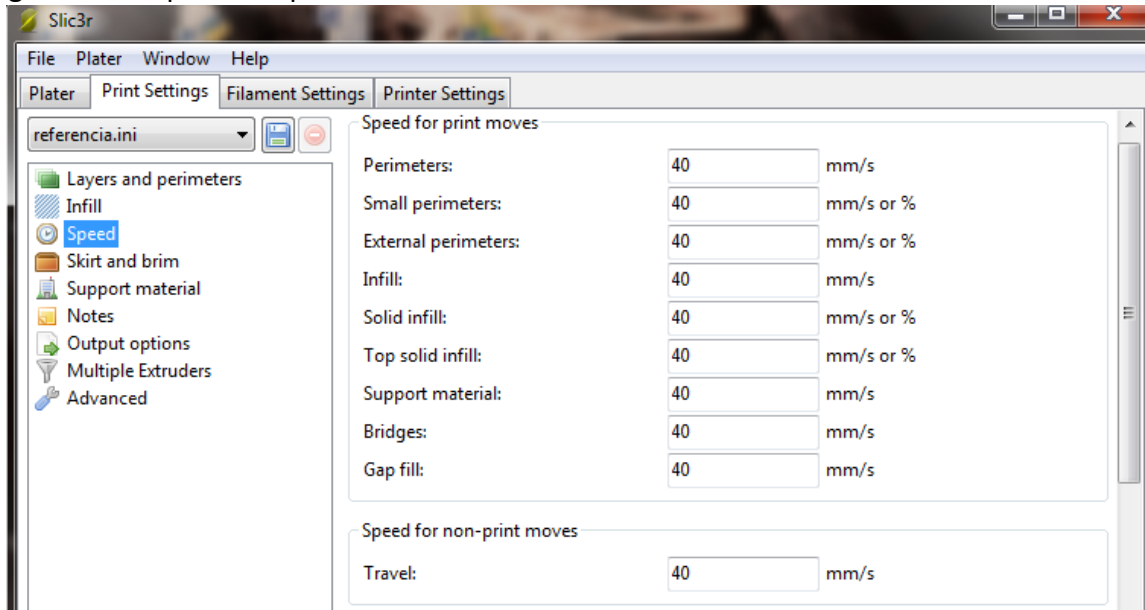
Figura 6-20. Apartado infill del software SLIC3R



Fuente: Los autores

- *Speed*: En esta parte se configuran los valores de velocidad y aceleración deseados para la impresión, se puede evidenciar la versatilidad de los diferentes valores a establecer ya sea en el perímetro de la pieza o en el relleno, las diferentes opciones de velocidades se muestra en la figura 6-21

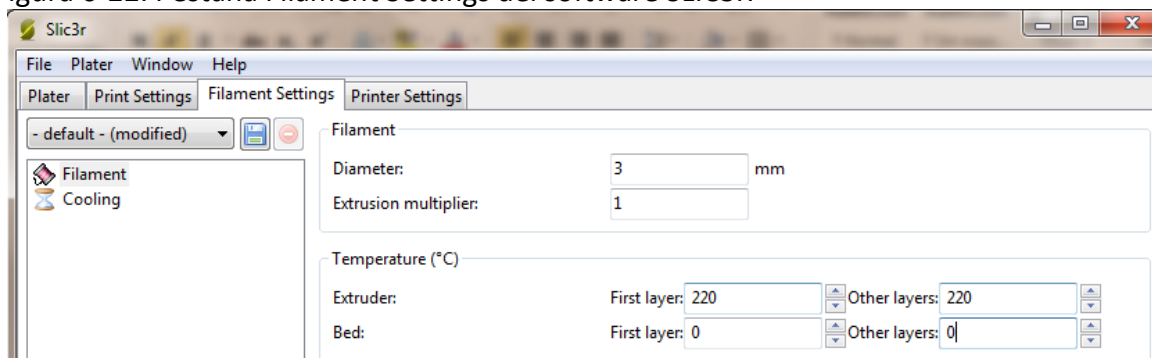
Figura 6-21. Apartado speed del software SLIC3R



Fuente: Los autores

En la pestaña *Filament Settings* se encuentran las configuraciones del material usado, para este caso ABS con 3mm de diámetro y temperatura de trabajo para fundir a 220°C, la opción de multiplier es la que controla la velocidad de flujo, internamente SLIC3R calcula una cantidad de flujo de acuerdo a este valor, la pestaña se muestra a continuación en la figura 6-22.

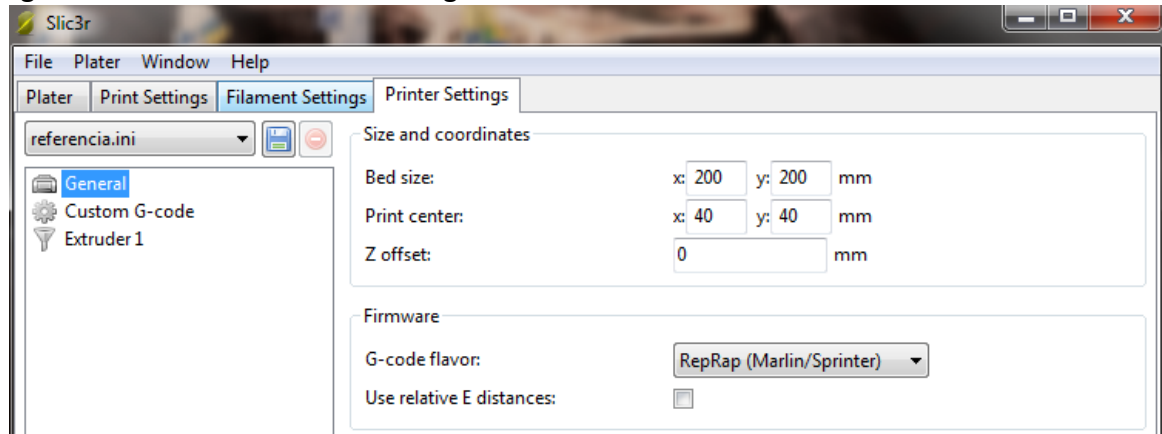
Figura 6-22. Pestaña Filament Settings del software SLIC3R



Fuente: Los autores

La pestaña Printer Settings en su apartado general permite establecer el tamaño de la plataforma de impresión, la posición del centro de la pieza a imprimir, el tipo de firmware usado en este caso marlin, entre otros aspectos mostrados en la figura 6-23.

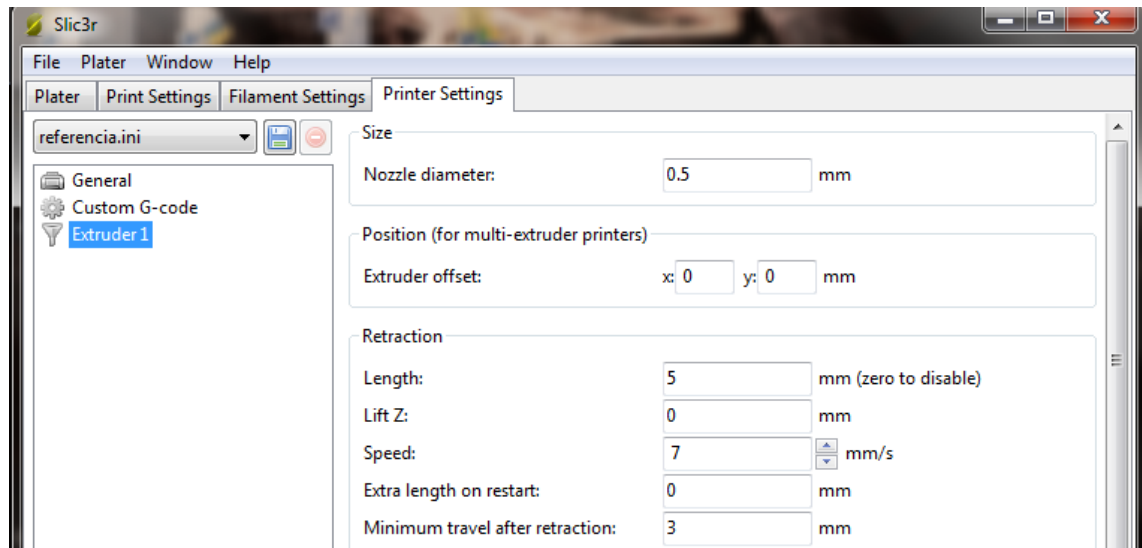
Figura 6-23. Pestaña Printer Settings del software SLIC3R



Fuente: Los autores

Particularmente para el extrusor en el apartado extruder 1 mostrado en la figura 6-24, se encuentran las configuraciones del diámetro de la boquilla y la retracción que debe ejercerse sobre el filamento cuando el extrusor requiera “viajar” sin depositar material, de acuerdo a esto se establece la velocidad con que se devuelve el filamento en 7 mm/s considerablemente más rápida que la normal de deposición y la cantidad de material, retraído por unidad de longitud en este caso 5mm.

Figura 6-24. Configuración parámetros del extrusor en el software SLIC3R



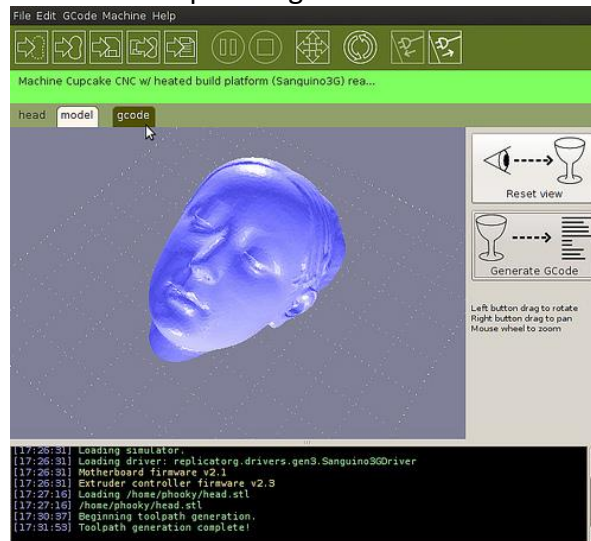
Fuente: Los autores

6.2.4 Alternativas de software host de control

- **Replicatorg**

El software ReplicatorG mostrado en la figura 6-25 es un software libre el cual podrá utilizar con impresoras 3D de tipo CNC tales como la MakerBot, Thing-O-Matic, CupCake, RepRap, etc... Este software soporta archivos del tipo G-Code o STL para trabajar, estos archivos son el standard para el procesamiento de impresiones 3D en cualquier tipo de impresora.

Figura 6-25. Interfaz del software Replicatorg



Fuente: <http://www.flickr.com/photos/makerbot/4710345086/>

Aunque importemos archivos del tipo STL, para imprimir, éste se encarga de procesar dicho archivo para obtener el formato adecuado para enviar a las impresoras. Este formato es un archivo de capas 2D (slices) el cual le indica a la impresora donde tiene que mover la cabeza de impresión y la cantidad de material a soltar. Esto es lo que se denomina G-Code.

El software es multiplataforma disponible para Windows, MAC OSX y Linux, de fácil instalación y está basado en entornos de procesamiento de Arduino. Este software ya ha sido probado y testado con multitud de impresoras y ya ha impreso miles de objetos 3D.

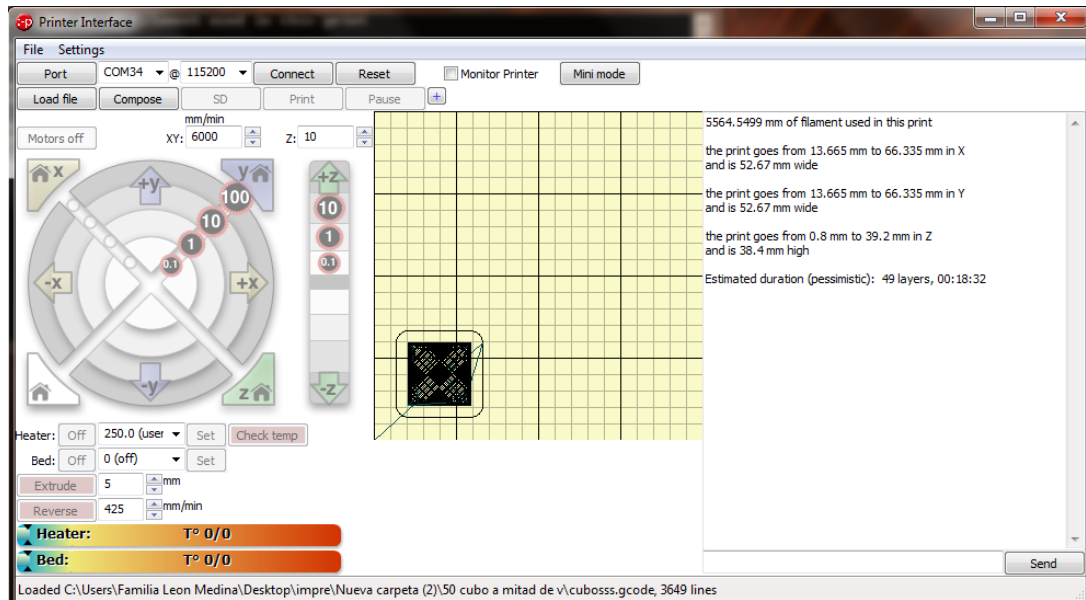
- **Pronterface**

Pronterface forma parte de un conjunto más amplio de aplicaciones denominado printrun que permite la integración de la línea de comandos y otras características avanzadas de python. Al igual que ReplicatorG, se utiliza el panel de control de Pronterface para conectar con una impresora, mover sus ejes, establecer y controlar la temperatura, y abrir modelos de código G. Pronterface tiene la característica útil de visualizar el resultado en

código G, particularmente la trayectoria capa por capa, de modo que se puede ver cómo la impresión se realizará, evidencia de ello se muestra en la figura 6-26.

Aunque no es tan completo como ReplicatorG, Pronterface (<https://github.com/kliment/Printrun>), ha logrado convertirse en el control de impresoras 3D por excelencia en un tiempo muy corto sobre todo en máquinas RepRap. Funciona igual de bien con otras impresoras que utilizan componentes electrónicos compatibles.

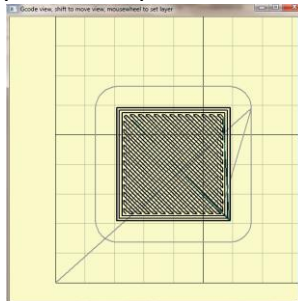
Figura 6-26. Interfaz del software Pronterface



Fuente: los autores

Debido a su arquitectura abierta, Pronterface puede ser configurado para funcionar con cualquiera de las aplicaciones *slicer (rebanadoras)* disponibles en la actualidad. Es particularmente compatible con slic3r, aunque se puede instalar skeinforge en su directorio para abrirlo desde el menú y así cargar una pieza .STL directamente, generar el código G y simular su construcción capa por capa como se muestra en la figura 6-27.

Figura 6-27. Simulación de una capa de una pieza rebanada.

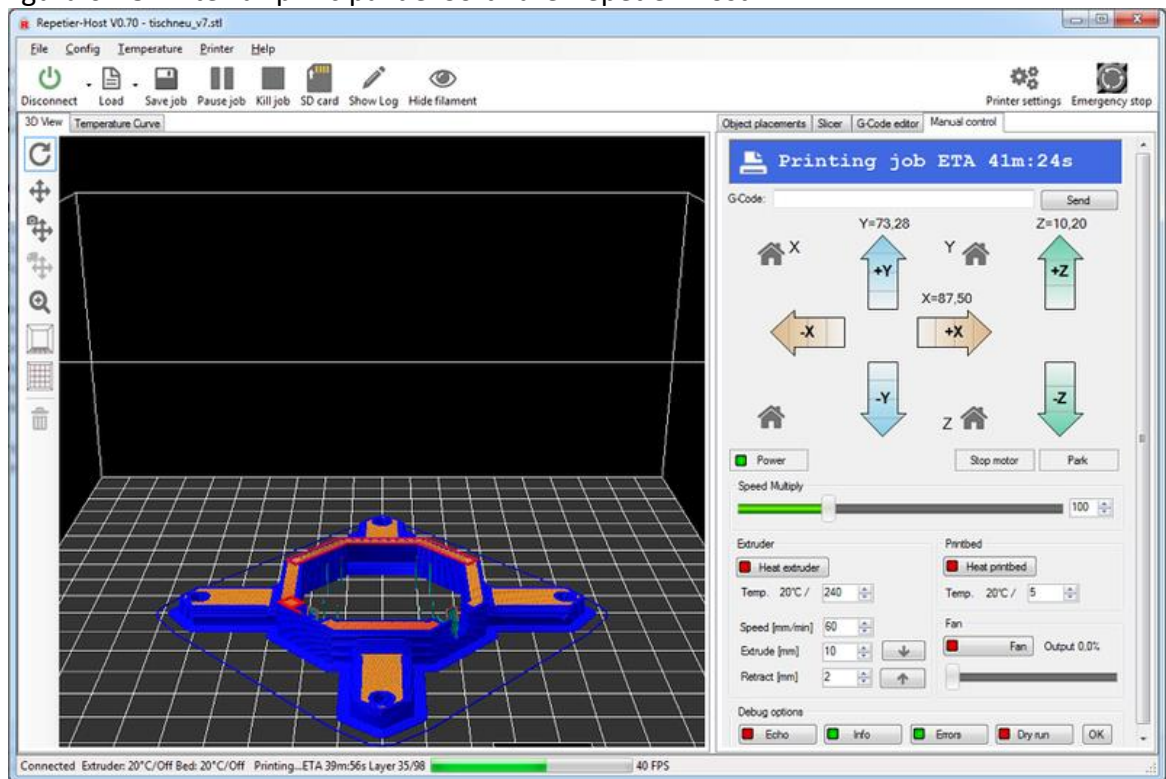


Fuente: Los autores

- **Repetier Host**

El Software Repetier-Host es simple de utilizar, es compatible con la mayoría de firmwares existentes. Puede agregar y colocar los archivos STL en la plataforma de impresión y simular el objeto 3d además de cortarlo en capas para generar el código G. Para rebanar se puede utilizar la máquina de cortar incorporada Slic3r o utilizar Skeinforge. Sólo se tiene que dar clic en "Slice & Load" y que el programa ejecute su algoritmo y delegué a la máquina rebanadora, mostrando su salida en la ventana de registro. En el editor de código G se puede cambiar o analizar el código. El host se ejecuta en Windows XP o superior, Linux y Mac OS X. La interfaz principal se muestra en la figura 6-28.

Figura 6-28. Interfaz principal del Software Repetier-Host



Fuente: <http://www.reprap.org/wiki/Repetier-Host>

- **CURA**

Cura es un software host de control para máquinas FDM que permite convertir los archivos STL, en piezas físicas en un solo entorno de trabajo. Originalmente, Cura se llamaba SkeinPyPy. Este nombre proviene de la combinación de Skeinforge con PyPy. Skeinforge está hecho en lenguaje Python, así que lo combinaron con el complemento PyPy el cual lo hacía correr más rápido, la combinación de los dos dieron lugar a "SkeinforgePyPy" que más tarde se llamó "SkeinPyPy".

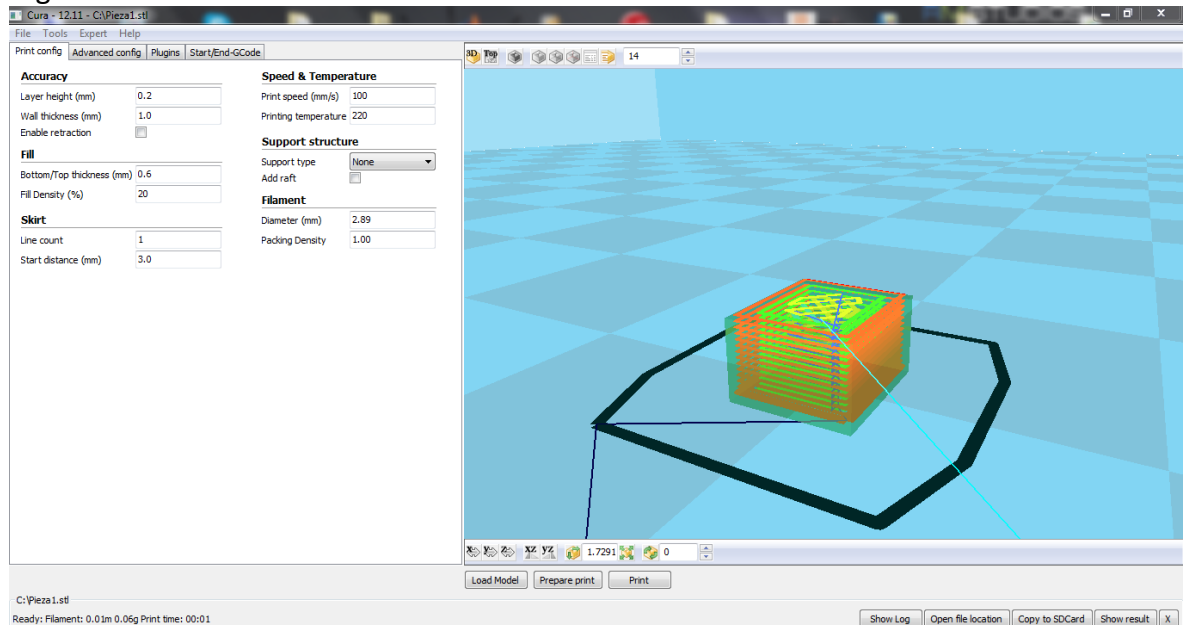
SkeinPyPy no era más que un paquete que combinaba Skeinforge con PyPy y algunos parches para hacerlo más fácil de usar. El paquete venía preparado para ejecutarlo directamente, sin instalar ningún otro complemento, incluyendo PrintRun para la comunicación con una impresora.

Pero todavía Skeinforge y su interfaz de usuario, con 260 opciones de configuración, es difícil de usar, muchas de las opciones no se aplican a la impresión 3D y los cambios de configuración no son fáciles.

Así, que se inició un proyecto nuevo, en el cual se creó una interfaz fácil y sencilla de usar. En este punto, SkeinPyPy comenzó a evolucionar para hacer Skeinforge más rápido y conseguir un todo en uno, fácil de usar en un solo paquete. Estos paquetes son las versiones Beta del proyecto CURA.

En este punto, se decidió cambiar el nombre del paquete de SkeinPyPy por CURA, debido a que superó el objetivo inicial de "Skeinforge con PyPy", el nombre de CURA se eligió dentro de la comunidad Ultimaker. En la figura 6-29 se observa la interfaz de usuario para Windows.

Figura 6-29. Interfaz del software Cura



Fuente: Los autores

Finalmente, en octubre de 2012, Ultimaker contrató al creador de este software para evolucionarlo y hacer otros proyectos relacionados con el software de impresión en 3D. Su autor garantiza que CURA seguirá siendo gratuito, de código abierto y que apoyará a las máquinas RepRap así como a Ultimaker.

7. IMPLEMENTACIÓN

El proceso de implementación de la impresora, se realiza con base en los diseños establecidos en los capítulos 3, 4 y 5 en lo referente a los componentes mecánicos, de la herramienta de extrusión y electrónicos, para posteriormente integrarlos y validar su funcionamiento a través de impresiones de piezas en tercera dimensión.

En la puesta a punto de la máquina se realizan pruebas para verificar el comportamiento de los componentes, es el caso del funcionamiento de los motores paso a paso, la comunicación entre la tarjeta controladora y el computador, la correcta correspondencia entre la longitud ordenada y la ejecutada por los actuadores, el control de temperatura, entre otros, que principalmente dependerán de la configuración hecha en el firmware y del código G obtenido de la pieza CAD diseñada.

7.1 SISTEMA MECÁNICO IMPLEMENTADO

Para la construcción de la estructura de la impresora y de diversos componentes que integran los ejes se utilizó láminas de madera MDF de 15 mm de espesor. Cortadas en sin fin y caladora de carpintería. En el comercio se adquirieron diversos componentes como tornillos, rodamientos, resinas, varillas roscadas entre otros. Además se adquirieron componentes de los mecanismos como los piñones, correas, motores.

Basados en la filosofía de “hazlo tú mismo” (DIY-Do It Yourself) en donde a través del bricolaje se solucionan de forma manual problemas presentados en actividades como la electrónica, carpintería o mecánica, se ensambla la impresora por medios propios, es así que a través de herramientas y procesos de fabricación relacionados con el tratamiento de madera para su corte, torneado y fresado de componentes metálicos, entre otros se llega a comprender aún más el funcionamiento del prototipo de impresora 3D. La figura 7-1 muestra las primeras etapas de fabricación de la impresora.

Figura 7-1. Fabricación del sistema mecánico



Fuente: Los autores

La construcción de los ejes e integración de los mismos con la estructura se realizó en un taller personal, en donde se fabricaron algunos componentes y se ensamblaron junto con los adquiridos para conformar los ejes y la estructura. Se utilizaron herramientas como taladro, caladora, pulidora, mototool para darle el acabado y forma final deseada a las piezas. Para sujetar los elementos se utilizó resina epóxica, tornillos golosos, sistema tornillo-tuerca y adhesivo industrial para madera. En la figura 7-2 se ilustra el trabajo de la construcción de la máquina en el taller.

Figura 7-2. Trabajo de construcción de la impresora 3D



Fuente: Los autores

El ensamble de la máquina se detalla en el anexo D donde se presentan los planos describiendo conjuntos y subconjuntos. El sistema está diseñado para ser construido aproximadamente en 6 horas por dos personas, según se disponga de todos los componentes y solo se requiera “armarlo”. El contraste entre el modelo diseñado en

software CAD y renderizado en Keyshot 3 contra la máquina construida se muestra en la figura 7-3. De la experiencia obtenida se dice que el planeamiento de la fabricación durante la etapa de diseño disminuye el tiempo de implementación del modelo final.

Figura 7-3. Abajo el sistema mecánico diseñado renderizado en Keyshot 3 y Arriba la impresora construida.



Fuente: Los autores

Teniendo en cuenta los lineamientos establecidos en el ítem ... 3.2 diseño para manufactura... se han establecido las especificaciones técnicas que determinan los resultados consignados en la tabla 7-1, donde la masa a mover en cada uno de los ejes se calcula de acuerdo con el número de componentes y sus especificaciones técnicas; las velocidades de movimiento se establecen a partir de la velocidad de deposición del extrusor y las características propias del elemento motriz; la frecuencia de trabajo de los actuadores se selecciona teniendo en cuenta que se usa un motor paso a paso, cuya frecuencia de activación fija su velocidad angular y la aceleración del movimiento; los pares de carga tienen en cuenta los efectos de fricción e inercia del sistema presentados de acuerdo con el análisis mecánico realizado.

Tabla 7-1. Especificaciones generales del sistema de posicionamiento diseñado

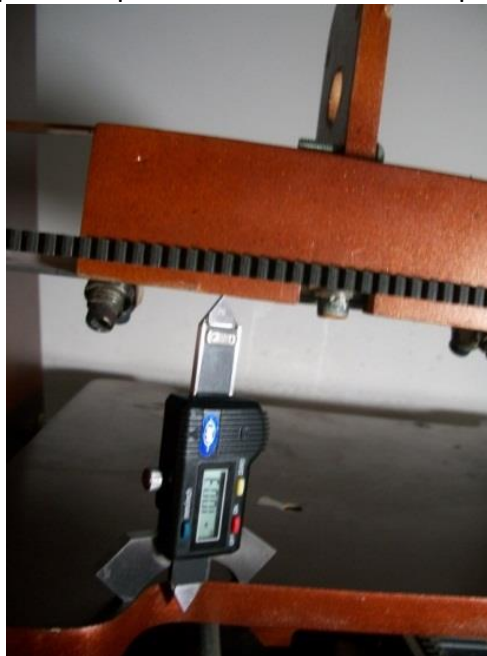
| CARACTERÍSTICA | VALOR |
|--|-------------|
| Masa a mover en el eje X | 1 Kg |
| Masa a mover en el eje Y | 1,5 Kg |
| Masa a mover en el eje Z | 2 Kg |
| Velocidad lineal del eje X | 33,75 mm/s |
| Velocidad lineal del eje Y | 33,75 mm/s |
| Velocidad lineal del eje Z | 2,5 mm/s |
| Frecuencia f estándar de señal de paso | 400 Hz |
| Par motor en el eje X | 28,25 N*cm |
| Par motor en el eje Y | 42,329 N*cm |
| Par motor en el eje Z | 44,361 N*cm |

Fuente: Los autores

7.1.1 Pruebas al sistema de posicionamiento

Con el uso de un medidor de espesor de pintura de 10 μm de precisión mostrado en la figura 7-4, se realizan pruebas al sistema de posicionamiento implementado, en las cuales se movieron los ejes X e Y 10 cm en sentido positivo y se regresaron para saber la histéresis de los mismos y el error de posición existente, se realizaron 3 ensayos arrojando como resultado los datos consignados en la tabla 7-2.

Figura 7-4. Medidor de espesor de pintura utilizado en la máquina



Fuente: Los autores

Tabla 7-2. Datos de histéresis de los ejes y error de posición existente

| Eje | Ensayo 1 (mm) | Ensayo 2 (mm) | Ensayo 3 (mm) |
|-----|---------------|---------------|---------------|
| X | 0.24 | 0.14 | 0.03 |
| Y | 0.75 | 0.03 | 0.30 |
| Z | 0.30 | 0.23 | 0.40 |

Fuente: Los autores

La implementación del prototipo y la medición de su actuación permiten obtener la precisión del movimiento en cada eje, por paso del motor, cuyos resultados se presentan en la tabla 7-3. Se observa que en los ejes de movimiento en el plano X e Y la precisión del prototipo es del orden de las décimas de milímetro lo que establece el acercamiento a la geometría diseñada en el software CAD, además en el eje Z, debido a la relación de transmisión existen entre los mecanismos, se tiene una precisión del orden de las micras, llegando con esto a valores de espesor de capa reconfigurados para mejor desempeño de las piezas impresas.

Tabla 7-3 Especificaciones calculadas y medidas del movimiento de la herramienta de extrusión.

| DESCRIPCIÓN | ESPECIFICACIÓN TÉCNICA CALCULADA (mm/paso) | ESPECIFICACIÓN TÉCNICA MEDIDA (mm/paso) |
|------------------------|--|---|
| Movimiento en el eje x | 0,400 | 0,415 |
| Movimiento en el eje y | 0,400 | 0,400 |
| Movimiento en el eje z | $0,379 \times 10^{-3}$ | $0,390 \times 10^{-3}$ |

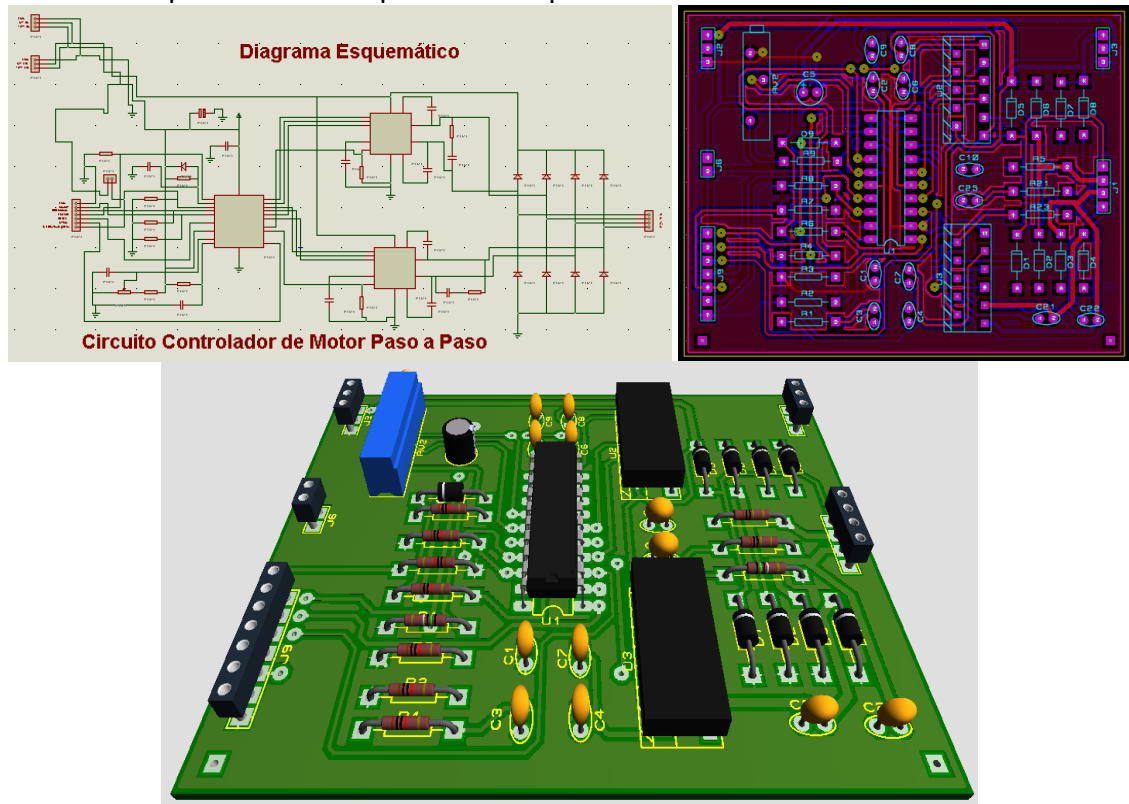
Fuente: Los autores

7.2 ENSAMBLE DEL SISTEMA ELECTRÓNICO

Del capítulo 5 y particularmente de... la sección 5.6... en donde se detallan los componentes que hacen parte del sistema electrónico que comanda la impresora, se analizan los componentes de cada actuador, controlador, sensor, etapa de potencia y acondicionamiento de señales. Para comenzar se adquiere la tarjeta Arduino Mega R3 de forma online.

El diseño de las tarjetas controladoras de motor paso a paso se realiza en el software Proteus ISIS y con la ayuda del paquete ARES de Proteus, se generan los diagramas de las pistas de conexionado de los elementos, finalmente a través del diseño 3D se evalúa la disposición de los elementos en la tarjeta. Las etapas del proceso de diseño son ilustradas en la figura 7-5.

Figura 7-5. Etapas del proceso de diseño: diagrama esquemático, diseño de la tarjeta y disposición de componentes respectivamente.

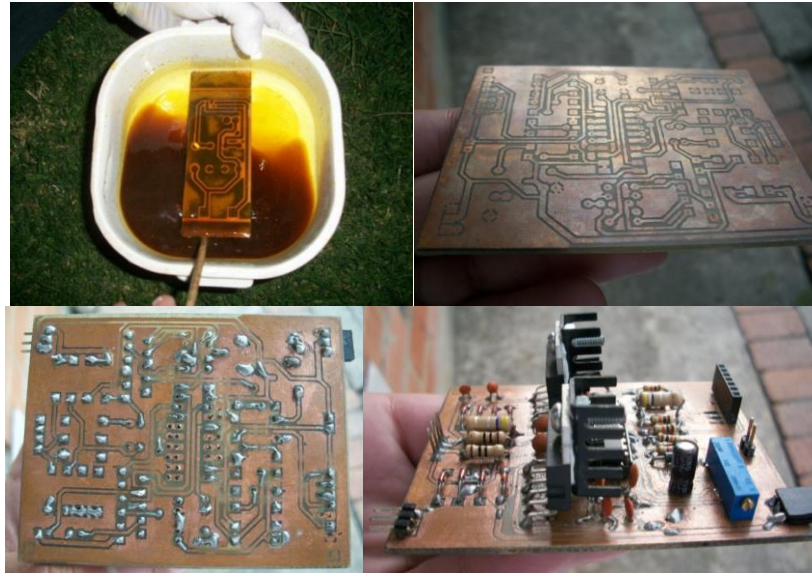


Fuente: Los autores

Para la construcción de las tarjetas controladoras de motor se compran los componentes en tiendas electrónicas, en circuito impreso no superficial. Siguiendo el proceso de toner transfer para la copia de las pistas en baquelita virgen, de modo que a partir de la impresión en papel propalcote de los modelos de las pistas generado en ARES, se planchan sobre las baquelitas para copiar las pistas. Posteriormente, los circuitos impresos se sumergen en ácido para retirar el cobre sobrante, con taladro se perforan los huecos necesarios y finalmente se ensamblan los componentes por soldadura. Este proceso se muestra en la figura 7-6.

Particularmente para las tarjetas controladoras de motor paso a paso se implementaron baquelitas doble capa, las cuales permiten la integración de componentes por ambas caras de la superficie logrando reducir considerablemente el espacio ocupado por las pistas de conexionado.

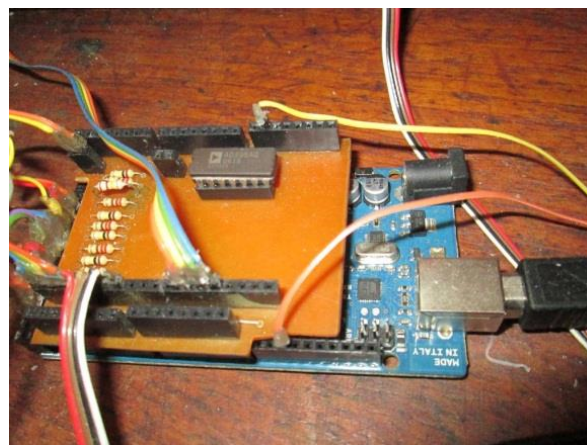
Figura 7-6. Proceso de construcción de las tarjetas de potencia de los motores.



Fuente: Los autores

El proceso de construcción de la tarjeta acoplada para el sensado a la controladora Arduino Mega y el circuito controlador de potencia para el extrusor siguen el mismo proceso de diseño en el software y construcción de circuito impreso anterior, esta vez en baquelita de una sola capa. La figura 7-7 muestra la tarjeta complementaria construida acoplada a la tarjeta controladora Arduino Mega

Figura 7-7. Tarjeta complementaria construida acoplada a la tarjeta controladora Arduino Mega

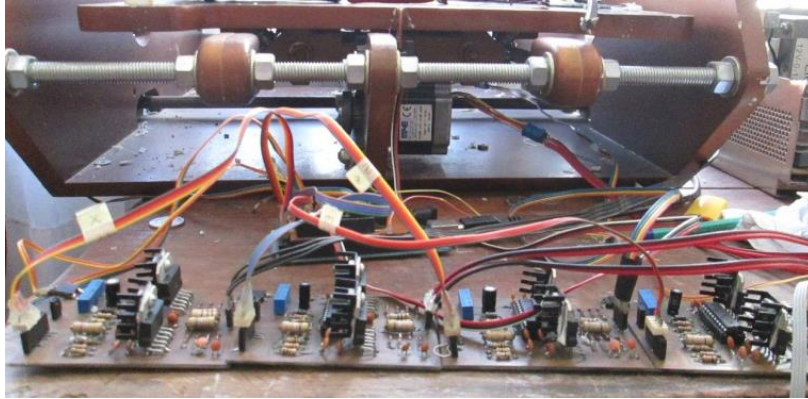


Fuente: Los autores

El diseño de las tarjetas de potencia de los motores se realizó para que fuera modular y una a una se pudiera conectar comunicando sus borneras de conexión de la fuente de

energía. El cableado utilizado para conectar las señales se realizó con cinta ribbon, una muestra de ello se puede evidenciar en la figura 7-8.

Figura 7-8. Acople entre las tarjetas de potencia de Iso motores y conexas con la tarjeta de control



Fuente: Los autores

7.3 PROCESO DE CONSTRUCCIÓN DEL EXTRUSOR

Tomando el diseño de la herramienta extrusora de material desarrollado...en la sección 4.4... se construye el calefactor a partir del torneado de algunos de sus componentes y la adquisición de otros. En la figura 7-9 se muestra una sesión en el taller de mecanizado.

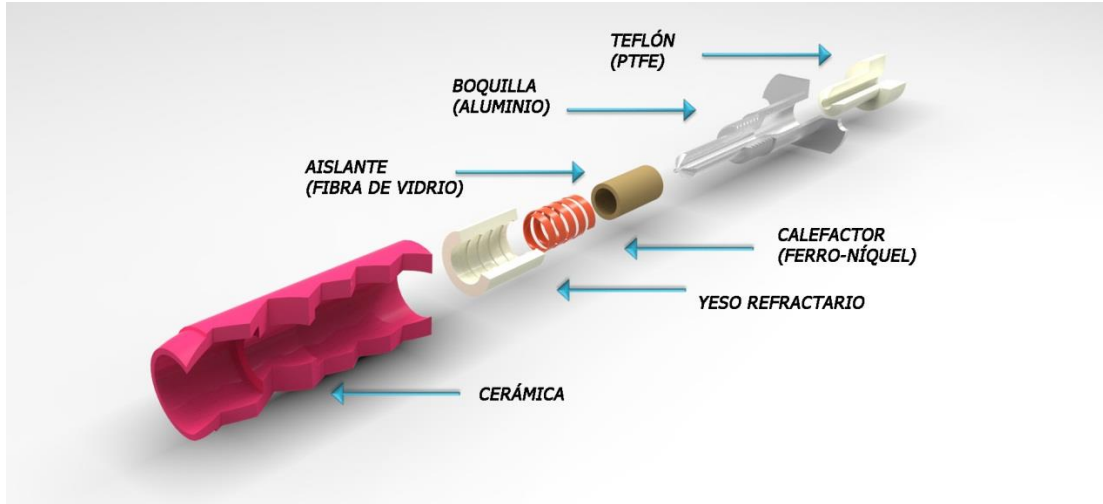
Figura 7-9. Sesión de torneado de piezas en el taller de mecanizado.



Fuente: Los autores

El ensamble de las piezas del extrusor se hace en el orden que se observa en la figura 7-10; una vez ensamblada la boquilla de aluminio en el cerámico se dispone a instalar la resistencia calefactora (ferroníquel) teniendo en cuenta que debe mantener un aislamiento eléctrico entre el ferroníquel y la boquilla se utiliza cinta de fibra de vidrio para altas temperaturas.

Figura 7-10. Ensamble de la boquilla calefactora de extrusión de material.



Fuente: Los autores

Los componentes del calefactor se sellan con el uso de yeso refractario para garantizar que la conducción de calor sea mayor en la boquilla y además ayuda a que los terminales del alambre de ferroníquel queden fijos para su conexión a la fuente de alimentación eléctrica. En la figura 7-11 se observan los componentes reales nombrados en la figura 7-10 y el extrusor construido.

Figura 7-11. Componentes reales de la herramienta extrusora de material y modelo construido

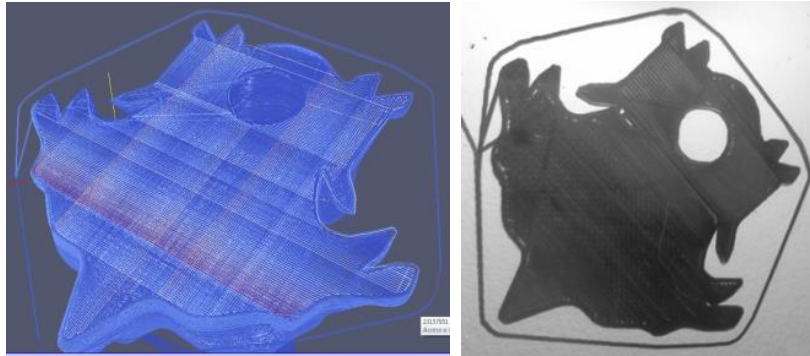


Fuente: Los autores

7.4 PRUEBA INICIAL EN DOS DIMENSIONES

Se realizó una prueba de impresión en dos dimensiones para analizar el comportamiento de la máquina al imprimir la primera capa de una pieza, es así como se seleccionó una pieza que contiene curvas y geometría compleja. En la parte izquierda de la figura 7-12 se muestra la pieza modelada en Solid Edge ST5, la cual ha sido convertida en formato .STL y llevada a código G e interpretada por el software de control de la impresora; como resultado se han obtenido, como pruebas preliminares, dos capas de impresión hechas con tinta por el sistema construido las cuales se muestran en la parte derecha de la figura 7-11, donde se aprecia la concordancia entre el modelo diseñado y el producto impreso.

Figura 7-12. A la izquierda la pieza: STL idealizada y a la derecha la impresión de dos capas de la pieza de prueba



Fuente: Los autores

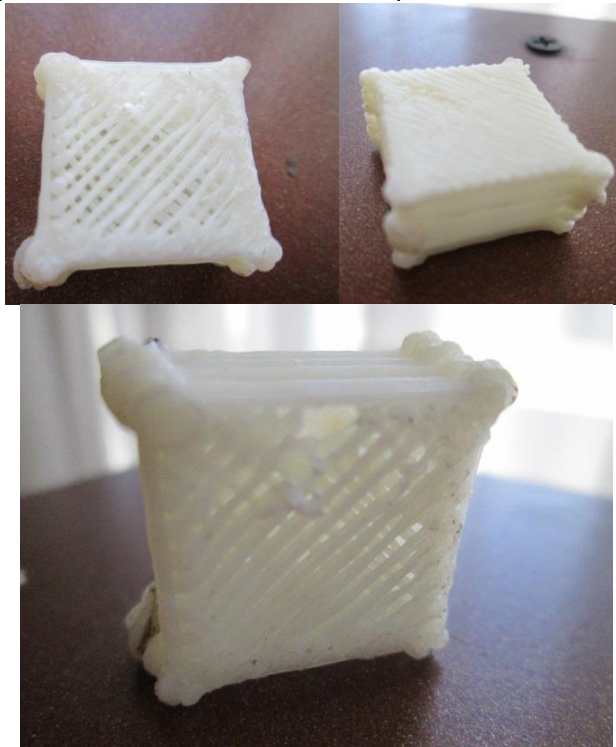
7.5 RESULTADOS DE PIEZAS IMPRESAS EN 3D

Para validar la implementación de la impresora se realizan 3 pruebas de construcción de prototipos usando la configuración de impresión dada...en la sección 6.2.3... del software slic3r. En software CAD se modeló un cubo de 2cm de lado y se discretizó para generar un código G diferente para cada prueba. Posteriormente se cargó el código en el software pronterface y se estableció la comunicación con la tarjeta controladora. La selección de los software anteriormente nombrados se realizó de acuerdo a pruebas experimentales en donde se corroboró la correcta comunicación entre el software host-pronterface y la tarjeta controladora con el movimiento de los ejes en su dirección y magnitud. La selección del software slic3r se obtuvo a partir del valor de la velocidad F entregada en las líneas de código G, la cual permanece constante para toda la pieza y no cambia como si lo hace el software skeinforge a medida que se asciende en la impresión, generando errores de movimiento en los ejes coordenados. A continuación se detallan los 3 ensayos realizados.

7.5.1 Impresión 3D hueca con tapa

El primer ensayo muestra en la figura 7-13 la construcción de un cubo hueco de tres capas de base y tres capas de sellado en la tapa. La geometría de formación de las tapas del cupo es lineal, generando una cuadrícula diagonal. Se detalla la consistencia de la capa base y como al construir la capa de tapa en un principio los cordones se curvan ya que no se tiene nada debajo, sin embargo con la apilación de dos capas más, la tapa comienza a tener cimientos para cerrarse completamente.

Figura 7-13. Pieza impresa de un cubo hueco con tapa.

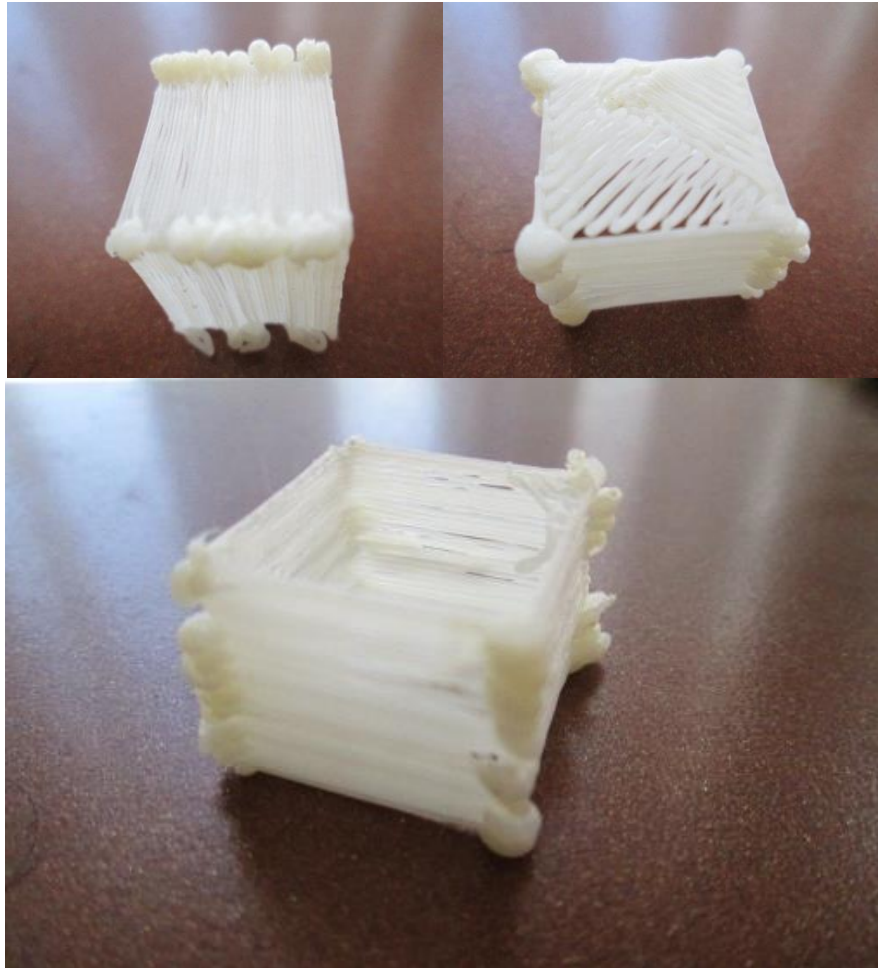


Fuente: Los autores

7.5.2 Impresión 3D hueca sin tapa

El detalle de construcción de una pieza hueca se muestra en la figura 7-14, en ella se evidencia la unión entre los cordones que conforman el perímetro generando las paredes laterales, en la configuración para generar el código G se especifica una densidad de relleno de cero y se usa una sola capa base.

Figura 7-14 Pieza impresa de un cubo hueco sin tapa.

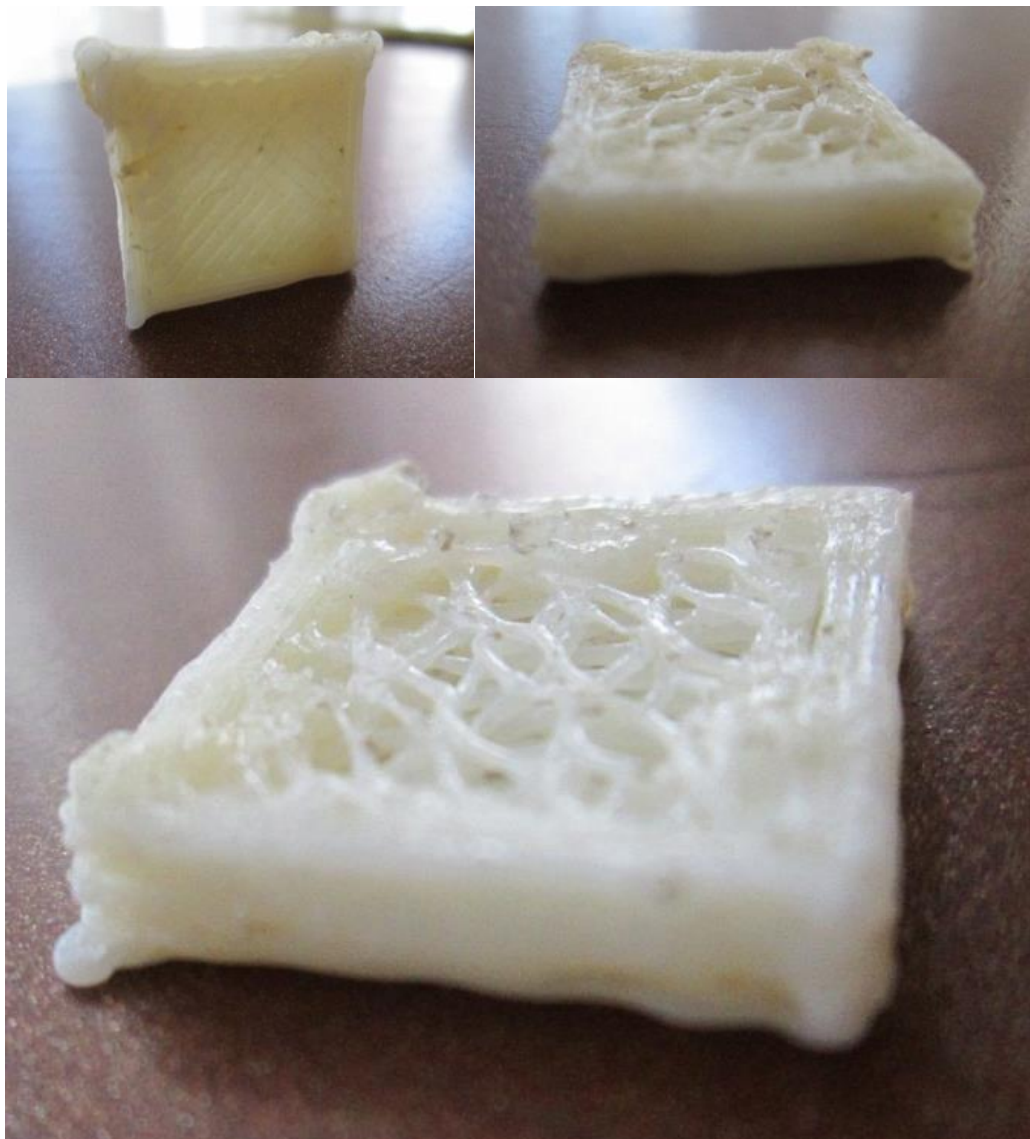


Fuente: Los autores

7.5.3 Impresión 3D maciza con infill honey comb

En este ensayo se comprobó el comportamiento de la impresora en la construcción de una pieza maciza, para ello se configuro una densidad de relleno de 0.4 y un patrón de relleno llamado honey comb o panal de abejas. En la figura 7-15 se observa la geometría correspondiente del relleno y en la prueba se evidencio el cambio en el tiempo de fabricación aumentado respecto de las piezas huecas, sin embargo el uso de una densidad de relleno menor a 0.5 respondió a las expectativas de precisión en la máquina y velocidad de fabricación.

Figura 7-15. Pieza impresa de un cubo macizo.



Fuente: Los autores

7.5.4 Impresión 3D de piezas con geometría compleja

Figura 7-16. Diseños CAD STL de 2 piezas con geometría compleja a imprimir

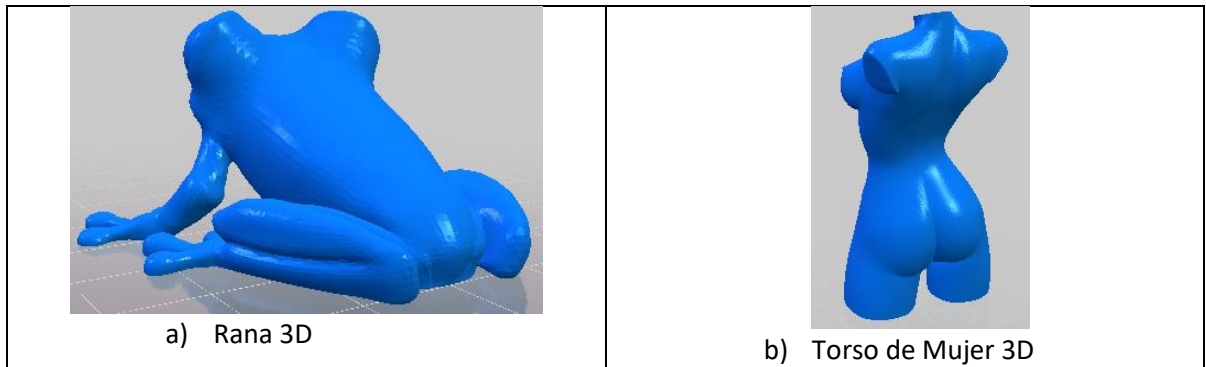


Figura 7-17. Pieza Impresa de modelo de a) rana en 3D



Figura 7-18. Pieza Impresa de modelo de b) un torso de mujer



1



4



2



5



3



6

CONCLUSIONES

A partir de la revisión bibliográfica se estableció que entre las técnicas de prototipado rápido la técnica de modelado por deposición fundida-FDM asumida para el desarrollo de este proyecto, corresponde a uno de los procesos con más ventajas para la obtención de prototipos para pruebas funcionales, piezas de alta precisión y con propiedades mecánicas ideales para su implantación.

Se diseñó e implementó un sistema de posicionamiento correspondiente a un mecanismo de tres grados de libertad, con una precisión que se ajusta a los criterios de diseño definidos en cuanto a posicionamiento tridimensional y capacidad de extrusión de material, para la impresión 3D modelado por deposición fundida.

Se diseñó e implementó una herramienta de extrusión de plástico ABS que cumple con los requerimientos del proceso FDM con lo referente a temperatura de extrusión, velocidad de deposición de material, acoplamiento con la estructura en general y aislamiento térmico.

La selección de componentes electrónicos y su implementación hizo posible el control del prototipo, en sus componentes de actuación, sensado y control. Respondiendo adecuadamente a las señales enviadas por un computador para el comando de la impresión.

El estudio de diferentes alternativas informáticas para el control del proceso FDM permitió la selección del software de control, sin embargo solo hasta la integración de componentes, se pudo establecer la compatibilidad del procesamiento y flujo de información y la validez de la selección de las herramientas informáticas al imprimir una pieza.

El diseño del prototipo y su implementación se convierten en un punto de partida para la construcción de un equipo de aplicación industrial que considere mejoras tanto del sistema mecánico como del sistema de control, además se convierte en referencia para el diseño de otros sistemas de posicionamiento lineal como el de recubrimiento por spray térmico iniciado como proyectos de investigación por otros compañeros de la escuela de Ingeniería Electromecánica.

El sistema desarrollado responde a los requerimientos planteados de impresión en 3D y con la comprensión y apropiación de tecnología relacionada con este tipo de procesos, permite abordar temáticas relacionadas como el control numérico computarizado para el desarrollo de otras necesidades en fabricación digital, es el caso del corte de láminas, mecanizado de piezas, soldadura, entre otros.

RECOMENDACIONES

- Se debe monitorear la temperatura de los drivers de los motores paso a paso y de los mismos motores en la puesta a punto, con el potenciómetro existente en los drivers configurar la máxima corriente permisible.
- A la hora de imprimir, la temperatura debe estar rondando la temperatura óptima de fundición del polímero (230°C) la cual se debe corroborar para que en el momento en que se alcance se dé la orden de impresión.
- Se debe tener cuidado con el parámetro “retract” para el extrusor, ya que en el cambio de capa, la impresora debe dejar de depositar material, de esta forma los valores correctos de configuración evitarán acumulaciones de material excesivas en la pieza.
- Es necesario revisar la correcta correspondencia entre el movimiento ejecutado y el ordenado, con las herramientas disponibles en el software pronterface para verificación de posicionamiento, dirección y distancia de movimiento en los ejes.
- Algunos problemas de dirección de los ejes pueden estar relacionados con los sensores finales de carrera, su correcto funcionamiento de 5v en estado activo, conectados correctamente en la tarjeta controladora.
- Se debe asegurar un correcto suministro de energía, para suplir la demanda de corriente de los actuadores, en pruebas se evidencio la perdida de pasos por parte de los motores debido a que la fuente de alimentación no entregaba suficiente corriente.
- Posibles trabajos futuros a desarrollar en la impresora están relacionados con la optimización del proceso de impresión, la implementación del sistema de posicionamiento en otro proceso de fabricación digital, la integración de una interfaz para imprimir desde internet, entre otros.

LOGROS

Las actividades realizadas por los estudiantes, semilleros de investigación, autores del presente trabajo: Jersson Xavier León Medina y Edwin Torres Díaz, en el período comprendido entre febrero de 2011 a julio de 2013, se enumeran a continuación:

1. Jersson y Edwin trabajaron en el proyecto de investigación “DISEÑO DE UN SISTEMA DE POSICIONAMIENTO TRIDIMENSIONAL APLICADO A LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA” que posteriormente se convirtió en “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.” Presentado ante la dirección de investigaciones de la UPTC-DIN con código SGI 1005.
2. Los estudiantes tuvieron la oportunidad de salir del país y exponer el proyecto titulado: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D APLICANDO LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA”** en el tercer congreso Argentino de Ingeniería Mecánica III CAIM 2012, desarrollado en la ciudad de Buenos Aires, Argentina. Este trabajo fue publicado en las memorias del congreso con ISBN: 978-987-1063-94-9.
3. La Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación RIDI, indexada categoría C, en su volumen 3 de Julio-Diciembre de 2012, con ISSN: 2027-8306 publicó el artículo titulado: **“SISTEMA DE POSICIONAMIENTO APLICADO A LA TÉCNICA DE IMPRESIÓN 3D MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA”**, los estudiantes son coautores de este trabajo con el Ingeniero Edgar Torres Barahona.
4. Los estudiantes presentaron, además del diseño mecánico, electrónico y de control, el artículo DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D APLICANDO LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA, este artículo se encuentra publicado en las memorias del Tercer Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica desarrollado en octubre de 2011 en la universidad autónoma de Bucaramanga con **ISSN 2145-812X**, página Web:
<http://revistas.unab.edu.co/index.php?journal=mecatronica&page=article&op=view&path%5B%5D=1413>)

5. Ponencias realizadas por Jersson y Edwin:
- 5.1. Evento: 3er Congreso Internacional de Ingeniería Mecatrónica-UNAB-BUCARAMANGA
Título: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D APLICANDO LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.
Publicado en las memorias del evento con ISSN 2145-812X.
- 5.2. Evento: 9 Encuentro regional semilleros de investigación REDCOLSI nodo Boyacá
Título: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D APLICANDO LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.
Resultado: Calificación de 87/100 puntos, aceptación al XIV Nacional y VIII internacional encuentro semilleros de investigación REDCOLSI desarrollado en la ciudad de Neiva.
Publicado en las memorias del evento con ISSN 2145-9223.
- 5.3. Evento: XIV Nacional y VIII internacional encuentro semilleros de investigación REDCOLSI CORHUILA-NEIVA
Título: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D APLICANDO LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.
Resultado: Calificación de 90-95 puntos, que lo catalogan como proyecto sobresaliente.
- 5.4. Evento: : XV Jornada de la Investigación-UPTC
Título: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D APLICANDO LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.
- 5.5. Evento: 10 Encuentro regional semilleros de investigación REDCOLSI nodo Boyacá
Título: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN LABORATORIO DE FABRICACIÓN DIGITAL ORIENTADO AL USO DE SOFTWARE Y HARDWARE LIBRE.
Aceptación al XV Nacional y IX internacional encuentro semilleros de investigación REDCOLSI desarrollado en la ciudad de Bucaramanga.
- 5.6. Evento: XV Nacional y IX internacional encuentro semilleros de investigación REDCOLSI
Título: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN LABORATORIO DE FABRICACIÓN DIGITAL ORIENTADO AL USO DE SOFTWARE Y HARDWARE LIBRE."
Resultado: Calificación de 90-95 puntos, que lo catalogan como proyecto sobresaliente.
6. Además, los estudiantes participaron en el CONCURSO TOMASINO DE DISEÑO Y MODELAMIENTO DE SISTEMAS MECÁNICOS realizado en la Universidad Santo Tomás

Seccional Tunja en septiembre de 2011, ocupando el primer puesto en la categoría de expertos modelamiento y análisis por elementos Finitos. , con el proyecto titulado **DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN TANQUE HORIZONTAL DE ALMACENAMIENTO PARA HIDROCARBUROS CON CAPACIDAD PARA 500 BARRILES.**

7. También, los estudiantes participaron al interior del semillero de investigación con la socialización de los proyectos de **DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN TANQUE HORIZONTAL DE ALMACENAMIENTO PARA HIDROCARBUROS CON CAPACIDAD PARA 500 BARRILES** y **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D APLICANDO LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA** como motivación a la comunidad académica para integrarse como semilleros pertenecientes al grupo GENTE.
8. Los estudiantes también ofrecieron un servicio de asesoría para estructurar un nuevo proyecto relacionado con el diseño y construcción de un sistema de posicionamiento bidimensional para corte automático de láminas de metal por plasma, que se plantea desarrollar en el semillero de investigación SIDMAC, por otros integrantes del semillero.
9. Actualmente los estudiantes apoyan el desarrollo de un sistema de adquisición datos de temperatura en el equipo de condensación tipo gota y película del laboratorio de transferencia de calor de la U.P.T.C. seccional Duitama.
10. Los estudiantes obtuvieron (cada uno) beca por investigación durante el primer y segundo semestre de 2012; distinción entregada por la UPTC por el trabajo realizado dentro del grupo de investigación GENTE.
11. Para destacar Jersson fue seleccionado por Colciencias para ser el primer joven investigador en la escuela de Ingeniería Electromecánica en el año 2013, lo que significa un estímulo al trabajo realizado y un apoyo significativo para el grupo GENTE.

BIBLIOGRAFÍA

3D printing. EduTech Wiki. [Online] http://edutechwiki.unige.ch/en/3D_printing. 2012.

AHN, Sung-Hoon. et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*. Emerald, 2002, Vol. 8. No 4. ISSN 1355-2546.

ANGELES, J. *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods and Algorithms*. New York: Springer Science Business Media. 2007.

ARDILA, Juan G. *Manufactura por capas: prototipado rápido*. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. 2007.

BANZI, M, *et al.* Arduino Mega 2560. [Online] [Cited: Agosto 12, 2012.] <http://arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardMega2560>.

BELLEHUMEUR, C, *et al.* Modeling of Bond Formation Between Filaments in the Fused Deposition Modeling Process, *Journal of Manufacturing Processes*. 2004. Vol. 6, p 170-178.

BLANTHER J.E. "Manufacture of Contour Relief Maps ", US Patent #473,901, 1892.

BOGART, M. In art the ends don't always justify means. *Smithsonian*, 1979 pp. 104-110.

CARNEVALE, Federico J., *Rapid Prototyping*. Ingeniería Mecánica , Instituto Balseiro, Universidad Nacional de Cuyo ,Mayo 2008.

CHANG, T., WYSK, A., y WANG, H. *Computer-Aided Manufacturing*. New Jersey: Second Edition, Prentice Hall. 1998.

CHANGOLUISA, C.E. y HERRERA, X.V. *Diseño y Construcción de un Prototipo de Torno Automático Mediante Control Numérico Computarizado CNC*, Proyecto de grado para la obtención del Título de Ingeniero Electromecánico. 2007. Escuela Superior Politécnica Del Ejército Sede-Latacunga.

Cube® Creativity reimaged. [Online] <http://cubify.com/cube/>. 2012

EVANS, Brian. *Practical 3D printers: The Science and Art of 3D Printing*. 1 ed. Apress, 2012. 332 p. ISBN 1430243929.

FISCHER, Fred. Thermoplastics - The Best Choice for 3D Printing. [Online] <http://www.stratasys.com/Resources/White-Papers/Thermoplastics-the-Best-Choice-for-3D-Printing.aspx>.

GIBSON, I., ROSEN D.W. y STUCKER B. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Springer. 2010.

GRAYBILL, B. Development of a Predictive Model for the Design of Parts Fabricated by Fused Deposition Modeling, in A thesis submitted for the degree of Master of Science. 2010, University of Missouri-Columbia.

Handbook of timing belts and pulleys [Online] <http://www.sdp-si.com/D265/HTML/D265T003.html>

KOSSEL. Delta robot 3D printer prototype. [Online] <http://deltabot.tumblr.com/>.

KELLY, J.F. y HOOD P. Printing in Plastic: Build Your Own 3D Printer. New York. Apress. 2011. 446 p. ISBN 9781430234449

KENNETH, I. Bresenham's Algorithm . Visualization and Graphics Research Group. [Extraído el 15 de mayo, 2012] <http://graphics.idav.ucdavis.edu/education/GraphicsNotes/Bresenhams-Algorithm.pdf>.

KODAMA, H. Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer. Rev. Sci. Instrum. 1981. pp. 1770-73.

KOUTTRON, Dane. 3D Print-ARM. [Online] <http://transistor-man.com/3dprintbot.html>. 2012.

KUMAR, V. y DUTTA, D.. An assessment of data formats for layered manufacturing. Advances in Engineering Software. 1997. Vol 28 No 3, 151–164.

Leapfrog-Creatr. [Online] <http://www.lpfrg.com/product/creatr/>. 2012.

Marlin 3d printer firmware [Online] <https://github.com/ErikZalm/Marlin>

MARTÍN, Rafael Infante. Procesos de conformado de materiales poliméricos por prototipado rápido. [Online] 2012. <http://tfmrimuned.wordpress.com/>.

MATT, Denton. Hexapod Robot CNC router. [Online] <http://www.hexapodrobot.com/forum/viewtopic.php?f=14&t=12>.

MONTERO, M, *et al.* Material Characterization of Fused Deposition Modeling (FDM) ABS by Designed Experiments. 2001. Extraído el 5 de abril, 2012, de http://everandever.com/dan/publications/sme_rp_2001.pdf.

MURILLO, Pablo. CURA–Software para Impresión 3D – Sprinter Vs Marlin. [Online] <http://www.arduteka.com/2012/12/software-cura-para-impresion-3d-sprinter-vs-marlin/>. 2012.

Oreilly Make Ultimate Guide to 3D Printing. Sebastopol. Noviembre, 2012, ISSN 1556-2336

Parker Hannifin Corporation, Electromechanical Automation Division, Gantry Systems. [Online] http://www.parkermotion.com/literature/precision_cd/CD-EM/daedal/cat/english/Gantry%20Systems.pdf

POKLUDA, O., BELLEHUMEUR C., y VLACHOPOULUS J. Modification of Frenkel’s Model for Sintering, *AIChE Journal*. 1997. Vol. 43, p 3253-3256.

PRINZ, Friedrich B. *et al.* Rapid Prototyping in Europe and Japan VOLUME I. ANALYTICAL CHAPTERS. Japanese Technology Evaluation Center/World Technology Evaluation Center. 1997. p. 21-31.

RICHRAP. Reprap development and further adventures in DIY 3D printing. [Online] [Cited: Diciembre 15, 2012.] <http://richrap.blogspot.com/2012/01/slic3r-is-nicer-part-1-settings-and.html>.

ROXAS, Mark y JU, Stephen. Fluid Dynamics Analysis of Desktop-based Fused Deposition Modeling Rapid Prototyping, in a thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Bachelor of Applied Science. 2008, University of Toronto: Department of Mechanical and Industrial Engineering.

Sailfish Firmware – Tuning Acceleration. [Online] <http://www.makerbot.com/sailfish/tuning/>

SELLS, E.A. *Towards a Self-Manufacturing Rapid Prototyping Machine*, in *A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy*. University of Bath: Department of Mechanical Engineering. 2009. 307 p.

Stratasys Inc.©. Material Safety Data Sheet. P400 ABS Model. [Online] http://www.redeyeondemand.com/MSDS/msdsModMat_P400ABS_0904.pdf. 2012.

The Replicator™2 Desktop 3D Printer. [Online] <https://store.makerbot.com/replicator2.html>. 2012.

VARGAS, H. Estudio de la Calidad Superficial en el Prototipado Rápido, Proceso FDM. Extraído el 15 de mayo, 2012, de http://www.postmat.unal.edu.co/resumen_inspeccion_fdm.pdf.

ZOU, G. Analysis on Influence Factors of Extrusion Filament Process of FDM. Manufacturing technology & Machine Tool. 2002. Vol 10 No 4, 32-34.

ANEXO A

DESCRIPCIÓN DE LA INTERPRETACIÓN DE CÓDIGO G POR PARTE DEL FIRMWARE SPRINTER
EMBEBIDO EN UNA TARJETA ARDUINO MEGA VERSIÓN RAMPS 1.2

FRAGMENTO INICIAL DE UN CODIGO G:

```
G92 E0
G1 F1200 E3
G1 E2
G92 E0
G1 Z1.0 F3000
G92 E0
G90
G21
G92 E0
; S67.0
G1 X51.631 Y96.035 Z0.2 F4020.0
G1 F900.0
G1 E1.0
G1 F4020.0
G92 E0
G1 X55.562 Y138.251 Z0.2 E1.3669
G1 X55.988 Y140.64 E1.4451
G1 X57.819 Y142.839 E1.5374
```

❖ Como se observa el primer comando es G92 E0 el cual esta descrito como:

Case 92: // G92

```
for(int i=0; i < NUM_AXIS; i++) {
    if(code_seen(axis_codes[i])) current_position[i] = code_value();
}
```

Establece la posición actual a coordenadas dadas, tiene que ver mucho con la función code_value. Permite la programación del punto cero absoluto, resetea la posición actual a los valores especificados. En este caso devuelve el extrusor (E) a cero.

El comando G92 solo devuelve todos los ejes a cero

- ❖ La segunda línea activa G1 F1200 E3, aquí se extruye un poco de plástico(E3) y se define una velocidad con F1200 .
- ❖ Con G1 Z1.0 F3000 se mueve el eje z
- ❖ G90 – usa Coordenadas absolutas
- ❖ G21-usa unidades en milímetros

Fragmento característico al terminar una capa:

```
G1 X121.632 Y81.826 E0.0402
G1 X137.755 Y98.636 E0.0514
G1 X137.311 Y98.92 E0.0517
G1 X136.574 Y99.636 E0.0522
G1 F900.0
G1 E0.0
G1 F4020.0
G1 X139.073 Y98.5 Z2.6
G1 F900.0
G1 E0.0522
G1 F4020.0
G92 E0
G1 X138.306 Y98.46 Z2.6 E0.0004
```

- ❖ Se observa como después de venir con el movimiento controlado de G1 en X Y y E, disminuye la velocidad a F900, extruye, aumenta de nuevo F4020 cambia el valor de Z (en este caso Z 2.6) disminuye a F900 extruye, y selecciona la velocidad definitiva para la nueva capa F4020, activa G92 E0 i comienza el movimiento controlado de G1.

EXPLICACIÓN DEL COMANDO PRINCIPAL G1 DE MOVIMIENTO CONTROLADO

Ejemplo: G1 X90.6 Y13.8 E22.4

Ir en una línea recta desde un punto anterior (X1, Y1) hasta el punto (90,6, 13,8); para el extrusor de material, el movimiento pasa de la longitud actual extruida a una longitud nueva de 22,4 mm.

❖ Movimiento sutil y constante:

G1 F1500

G1 X90.6 Y13.8 E22.4

Se establece (preset) un avance con una velocidad F de 1500 mm/min, y luego se hace el movimiento descrito anteriormente.

❖ Movimiento Acelerado

G1 F1500

G1 X90.6 Y13.8 E22.4 F3000

Se establece un avance con una velocidad F de 1500 mm/min, para luego hacer el movimiento descrito anteriormente acelerando a una segunda velocidad de avance de 3000 mm/min y cuando lo haga. La extrusión se acelerará, junto con los ejes X, Y por lo que todo el movimiento está sincronizado. Por lo tanto la velocidad F se trata como otra variable (X, Y, Z y E) que se interpola linealmente.

Esto proporciona un control completo sobre las aceleraciones y desaceleraciones de una manera que garantiza que todo se mueva sincronizado y un volumen adecuado de material sea extruido en todos los puntos.

❖ Acelerar y desacelerar

G1 F1500

G1 X90.6 Y13.8 E22.4 F3000

G1 X80 Y20 F1500 E36

Va a hacer el primer movimiento acelerado como antes, y el segundo la desaceleración de 3000 mm/min de vuelta a 1500 mm/min.

❖ Retracción del extrusor

Para invertir la extrusora por una cantidad dada (por ejemplo, para reducir su presión interna, evitando un movimiento provocado por el aire, de modo que no se hace gotear material) basta con utilizar G1 y enviar un valor de E que sea menor que la longitud anterior de extrusión.



MAIN SPRINTER



#include "pins.h"

Aquí se encuentran las diferentes opciones de board y se indican sus pines



#include "fastio.h"

Se establece la concordancia de entradas-salidas y su relación con la configuración de pines asignados a las diferentes boards.



```
#include "Configuration.h"
```

En la librería configuration.h se definen una serie de parámetros como el tipo de board el sensor de temperatura en el extrusor.. Pero sobre todo para el movimiento:

- ❖ Pasos por milímetro

```
float axis_steps_per_unit[] = {80, 80, 3200/1.25,700};
```

En donde se especifican los pasos por milímetros en los ejes {X,Y,Z,E}

- ❖ Máxima zona de trabajo

```
const bool max_software_endstops = true;
```

```
//If true, los ejes no se moverán en coordenadas mayores a las definidas a continuación:
```

```
const int X_MAX_LENGTH = 200;
```

```
const int Y_MAX_LENGTH = 200;
```

```
const int Z_MAX_LENGTH = 100;
```

- ❖ Configuraciones de movimiento

- ```
const int NUM_AXIS = 4; // The axis order in all axis related arrays is X, Y, Z, E
```

```
//El numero y orden de los ejes en todos los arreglos
```

- ```
float max_feedrate[] = {200000, 200000, 240, 500000};
```

```
//Máxima velocidad en cada uno de los ejes
```

- ```
float homing_feedrate[] = {1500,1500,120};
```

```
//Configuración de la velocidad de home de cada uno de los ejes
```

- ❖ Además de algunas configuraciones del control de temperatura



```
#include "Sprinter.h"
```

- ❖ Algunas configuraciones del control de temperatura

- ❖ Pines de habilitación de los motores ENABLE

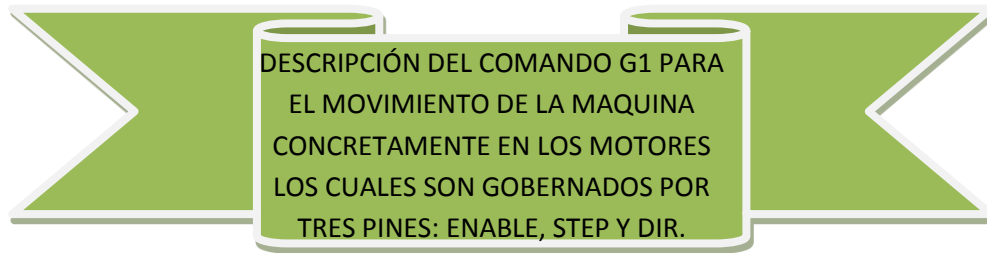
Funciones importantes:

```
void get_coordinates();
```

```
void prepare_move();
```

```
void linear_move(unsigned long steps_remaining[]);
```

```
void do_step(int axis);
```



Primero se definen muchas variables

Después se tratan temas de aceleración, SD todo en if

Se comienza el puerto serial.begin y se hace la conexión a un baudrate determinada

Initialize Dir Pins, Enable Pins, Step Pins los configure como salidas

Se define code\_value y code\_seen, esta parte es fundamental ya que es la que “busca”.

```
inline float code_value() { return (strtod(&cmdbuffer[bufindr][strchr_pointer -
cmdbuffer[bufindr] + 1], NULL)); }
```

```
inline long code_value_long() { return (strtol(&cmdbuffer[bufindr][strchr_pointer -
cmdbuffer[bufindr] + 1], NULL, 10)); }
```

```
inline bool code_seen(char code_string[]) { return (strstr(cmdbuffer[bufindr],
code_string) != NULL); } //Return True if the string was found
//devuelve verdadero si la cadena fue encontrada
```

```
inline bool code_seen(char code)
{
 strchr_pointer = strchr(cmdbuffer[bufindr], code);
 return (strchr_pointer != NULL);
}
// Devuelve verdadero si el carácter fue encontrado
```

Se comienzan a procesar los comandos, F, G, M.....

```
inline void process_commands()
{
 unsigned long codenum; //throw away variable
 char *starpos = NULL;

 if(code_seen('G'))
```

```

{
 switch((int)code_value())
 {
 case 0: // G0 -> G1
 case 1: // G1
 #if(defined DISABLE_CHECK_DURING_ACC) || (defined
DISABLE_CHECK_DURING_MOVE) || (defined DISABLE_CHECK_DURING_TRAVEL)
 manage_heater();
 #endif
 get_coordinates(); // For X Y Z E F
 prepare_move();
 previous_millis_cmd = millis();
 return;
 }
}

```

Como vemos después de activar el algoritmo de búsqueda code\_seen y encontrar G Se activa la sentencia switch case aquí el caso que queremos evaluar es el 1

- ❖ La primera función a describir es  
`manage_heater(); //línea 1488`

Aquí se hace la relación entre el sensor de temperatura y una temperatura previamente configurada, si la temperatura real esta por debajo de la ventana se activa el calefactor con un parámetro de corriente `pwm??,(255)` así:

```

if(current_raw >= target_raw)
{
 WRITE(HEATER_0_PIN,LOW);
 analogWrite(HEATER_0_PIN, 0);
 #if LED_PIN>-1
 WRITE(LED_PIN,LOW);
 #endif
}
else
{
 WRITE(HEATER_0_PIN,HIGH);
 analogWrite(HEATER_0_PIN, HEATER_CURRENT);
}

```

- ❖ Posteriormente  
`get_coordinates();//línea 1025`

```

inline void get_coordinates()
{
 for(int i=0; i < NUM_AXIS; i++) {
 if(code_seen(axis_codes[i])) destination[i] = (float)code_value() +
(axis_relative_modes[i] || relative_mode)*current_position[i];
 else destination[i] = current_position[i];
 //Are these else lines really needed?
 }
 if(code_seen('F')) {
 next_feedrate = code_value();
 if(next_feedrate > 0.0) feedrate = next_feedrate;
 }
}

```

En la primera parte se habla de la posición actual y su destino, se establece destination[i] como la nueva posición y current\_position como la actual.

En la segunda parte se escanea la velocidad con la letra F y se dice que cada vez que haya un Nuevo valor lo guarde en next\_feedrate. Aquí se puede apreciar perfectamente el algoritmo de búsqueda con code\_seen y code\_value como el valor que sucede a F.

❖ Ahora

```
prepare_move(); // línea 1037
```

- //Para encontrar la dirección del movimiento se evalúa si la nueva posición es mayor a la actual si si move\_direction[i] =1 y si no move\_direction[i] =0.

```

for(int i=0; i < NUM_AXIS; i++) {
 if(destination[i] >= current_position[i]) move_direction[i] = 1;
 else move_direction[i] = 0;
}

```

- De nuevo se establece el rango de la zona de trabajo y se restringe para que no los sobrepase:

```

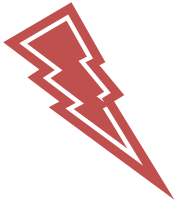
if (min_software_endstops) {
 if (destination[0] < 0) destination[0] = 0.0;
 if (destination[1] < 0) destination[1] = 0.0;
 if (destination[2] < 0) destination[2] = 0.0;
}

```

```

if (max_software_endstops) {
 if (destination[0] > X_MAX_LENGTH) destination[0] = X_MAX_LENGTH;
 if (destination[1] > Y_MAX_LENGTH) destination[1] = Y_MAX_LENGTH;
 if (destination[2] > Z_MAX_LENGTH) destination[2] = Z_MAX_LENGTH;
}

```



- ESTABLECIMIENTO DE UN SISTEMA DE COORDENADAS COMPATIBLE CON CUALQUIER TIPO DE MAQUINA EN DONDE SE DEFINA LA RELACION DE PASOS POR MILIMETRO EN MOTORES PASO A PASO CON LOS MECANISMOS

```

for(int i=0; i < NUM_AXIS; i++) {
 axis_diff[i] = destination[i] - current_position[i];
 move_steps_to_take[i] = abs(axis_diff[i]) * axis_steps_per_unit[i];
}

```

Importante la definición del  $\Delta$   $axis\_diff[i] = destination[i] - current\_position[i]$ ; -> i en cada eje.  
 Para después obtener la cantidad de pasos a partir del anterior  $\Delta$  en mm por la relación pasos por mm:

$$\# \text{ de pasos} = \Delta \text{ de posición} \left( \frac{mm}{\cancel{mm}} \right) * \text{relación} \frac{\text{pasos}}{\cancel{mm}}$$

- Calculo de la velocidad basado en la distancia xyz de viaje.  
`float xy_d; //variable de plano xy`
- Comprobación para casos donde solo un eje se está moviendo(Se manejan sin raíz cuadrada)

```

if(abs(axis_diff[0]) > 0 && abs(axis_diff[1]) == 0 && abs(axis_diff[2])==0)
 d=abs(axis_diff[0]);
else if(abs(axis_diff[0]) == 0 && abs(axis_diff[1]) > 0 && abs(axis_diff[2])==0)
 d=abs(axis_diff[1]);
else if(abs(axis_diff[0]) == 0 && abs(axis_diff[1]) == 0 && abs(axis_diff[2])>0)
 d=abs(axis_diff[2]);

```

- // dos ejes en movimiento "Generalmente esto sucede"
- //Cambio de capa

```
//o tres ejes en movimiento - if so interpolate that too
```

```
else if(abs(axis_diff[0]) > 0 || abs(axis_diff[1]) > 0) { //X o Y o ambos
```

```
xy_d = sqrt(axis_diff[0] * axis_diff[0] + axis_diff[1] * axis_diff[1]);
```

```
d = (abs(axis_diff[2])>0)?sqrt(xy_d * xy_d + axis_diff[2] * axis_diff[2]):xy_d;
```

- Para el extrusor:

```
else if(abs(axis_diff[3]) > 0)
```

```
d = abs(axis_diff[3]);
```

- Calculo del tiempo del  $\Delta$  a través de

$$t = \frac{x}{v}$$

```
time_for_move = (d / (feedrate / 60000000.0));
```

Recordemos que el valor feedrate es el que sucede a F en el código

El valor 60.000.000 hace referencia a la conversión necesaria para pasar el tiempo que está en minutos a microsegundos ejemplo:

$\Delta X=15\text{mm}$

$\Delta Y=20\text{mm}$

no hubo  $\Delta$  en Z ni en E

d se calcula con:

```
d = (abs(axis_diff[2])>0)?sqrt(xy_d * xy_d + axis_diff[2] * axis_diff[2]):xy_d;
```

Pero para hallar d se necesita

```
xy_d = sqrt(axis_diff[0] * axis_diff[0] + axis_diff[1] * axis_diff[1]);
```

Entonces

```
xy_d= 25mm
```

Como axis\_diff[2]>0, entonces -> xy\_d=d

```
d=25mm
```

Para el tiempo en  $\mu\text{s}$  supongamos velocidad de  $F=1500$  esta está en  $\text{mm}/\text{min}$

$$t = \frac{x}{v}$$

`time_for_move = (d / (feedrate / 60000000.0));`

$$\text{time for move} = \frac{25\text{mm}}{1500\text{ mm}/\text{min}} \frac{60\text{ s}}{1\text{ min}} \frac{1.000.000\ \mu\text{s}}{1\text{ s}}$$

$$\text{time for move} = 10.000.000\ \mu\text{s}$$

- // comprobar que la máxima velocidad para cada eje no es violada, actualizar tiempo si es necesario.

```
for(int i = 0; i < NUM_AXIS; i++) {
 if(move_steps_to_take[i] && abs(axis_diff[i]) / (time_for_move / 60000000.0) >
 max_feedrate[i]) {
 time_for_move = time_for_move / max_feedrate[i] * (abs(axis_diff[i]) /
(time_for_move / 60000000.0));
```

- Calculo del intervalo de velocidad de paso para cada eje.  
RECORDEMOS QUE EL NUM\_AXIS ES UN ARREGLO=[X,Y,Z,E]

```
for(int i=0; i < NUM_AXIS; i++) {
 if(move_steps_to_take[i]) axis_interval[i] = time_for_move /
 move_steps_to_take[i] * 100;
```

Se define `axis_interval` -> Relacion: tiempo/ pasos

Porque las unidades??:.....:  $\mu\text{s}/\text{pasos} * 100$

- Finalmente:

```
unsigned long move_steps[NUM_AXIS];
for(int i=0; i < NUM_AXIS; i++)
 move_steps[i] = move_steps_to_take[i];
linear_move(move_steps); // make the move
```

El `move_steps_to_take` se pasa a `move_steps` en `[i]` o sea todos los ejes y de este valor depende la función "Linear Move".

❖ Finalmente

```
inline void linear_move(unsigned long axis_steps_remaining[])
//línea 1120
```

```
// Realiza el movimiento linear a la velocidad y destinos calculadas, ver G0 y G1
```

```
axis_steps_remaining= move_steps //de la pasada funcion
```

- De Nuevo se configura la dirección según  $\Delta$  positivo o negativo en cada eje
- Habilitar eje que están en uso:

```
if(axis_steps_remaining[0]) enable_x();
if(axis_steps_remaining[1]) enable_y();
if(axis_steps_remaining[2]) enable_z();
if(axis_steps_remaining[3]) enable_e();
```

- Definición de variables necesarias para realizar el algoritmo Bresenham:

```
Delta[]= axis_steps_remaining[]= move_steps[] // recordar que es arreglo
```

```
long axis_error[NUM_AXIS]; // arreglo de error
```

- Definición del eje principal de movimiento

```
int primary_axis;
if(delta[1] > delta[0] && delta[1] > delta[2] && delta[1] > delta[3])
primary_axis = 1;
else if (delta[0] >= delta[1] && delta[0] > delta[2] && delta[0] > delta[3])
primary_axis = 0;
else if (delta[2] >= delta[0] && delta[2] >= delta[1] && delta[2] > delta[3])
primary_axis = 2;
else primary_axis = 3;
```

- Para el error se divide por 2 el delta

```
for(int i=0; i < NUM_AXIS; i++){
if(i != primary_axis) axis_error[i] = delta[primary_axis] / 2;
```



```
 steps_taken[i]=0;
}
```

- Intervalo de velocidad eje principal  
interval = axis\_interval[primary\_axis];
- bool is\_print\_move = delta[3] > 0;                    ????????
- Activar funcion micros:

```
unsigned long start_move_micros = micros();
for(int i = 0; i < NUM_AXIS; i++) {
 axis_previous_micros[i] = start_move_micros * 100;
```

- Definicion de que si está viajando o imprimiendo

En configuration .h -> enable -> DISABLE\_CHECK\_DURING\_TRAVEL

//si el movimiento es mayor que el establecido en disable check during travel, considerar movimiento de impresion y activar extrusor

```
if(time_for_move / 1000 > DISABLE_CHECK_DURING_TRAVEL) is_print_move = true;
```

```
//else, si el movimiento es una retraccion, considerar movimiento de viaje
```

```
else if(delta[3]>0 && delta[0] + delta[1] + delta[2] == 0) is_print_move = false;
```

- Mover hasta que no haya más pasos restantes  
// se hace uso de la sentencia while

```
while(axis_steps_remaining[0] + axis_steps_remaining[1] + axis_steps_remaining[2] + axis_steps_remaining[3] > 0) {
```

- Ejecutar algoritmo Bresenham para X y Y

```
if(axis_steps_remaining[primary_axis]) {
```

- Se protégé de los finales de carrera
- Calculo de tiempo (timediff)

```
timediff = micros() * 100 - axis_previous_micros[primary_axis];
if(timediff<0){ //comprobar si sobrepasa
 axis_previous_micros[primary_axis]=micros()*100;
```

```
timediff=interval/2; //aproximación a la mitad del intervalo
```

- Uso de la sentencia while de nuevo

```
while(((unsigned long)timediff) >= interval && axis_steps_remaining[primary_axis] > 0) {
```

```
//mientras timediff sea mayor que intervalo y falten pasos por dar se ejecuta lo siguiente:
```

```
steps_done++;
```

```
steps_remaining--;
```

```
axis_steps_remaining[primary_axis]--; timediff -= interval;
```

```
do_step(primary_axis);
```

```
axis_previous_micros[primary_axis] += interval;
```

- Algoritmo y error

```
for(int i=0; i < NUM_AXIS; i++) if(i != primary_axis && axis_steps_remaining[i] > 0) {
 axis_error[i] = axis_error[i] - delta[i];
 if(axis_error[i] < 0) {
 do_step(i); axis_steps_remaining[i]--;
 axis_error[i] = axis_error[i] + delta[primary_axis];
 }
}
```

- Según sea el eje activo se ejecuta la función:

❖ Do\_step

```
void do_step(int axis) {
 switch(axis){ // sentencia switch case
 case 0:
 WRITE(X_STEP_PIN, HIGH);
 break;
 case 1:
 WRITE(Y_STEP_PIN, HIGH);
 break;
 case 2:
 WRITE(Z_STEP_PIN, HIGH);
 break;
 case 3:
 WRITE(E_STEP_PIN, HIGH);
 break;
 }
}
```

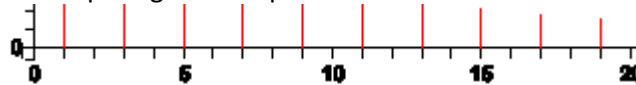
```

steps_taken[axis]+=1;
WRITE(X_STEP_PIN, LOW);
WRITE(Y_STEP_PIN, LOW);
WRITE(Z_STEP_PIN, LOW);
WRITE(E_STEP_PIN, LOW);
}

```

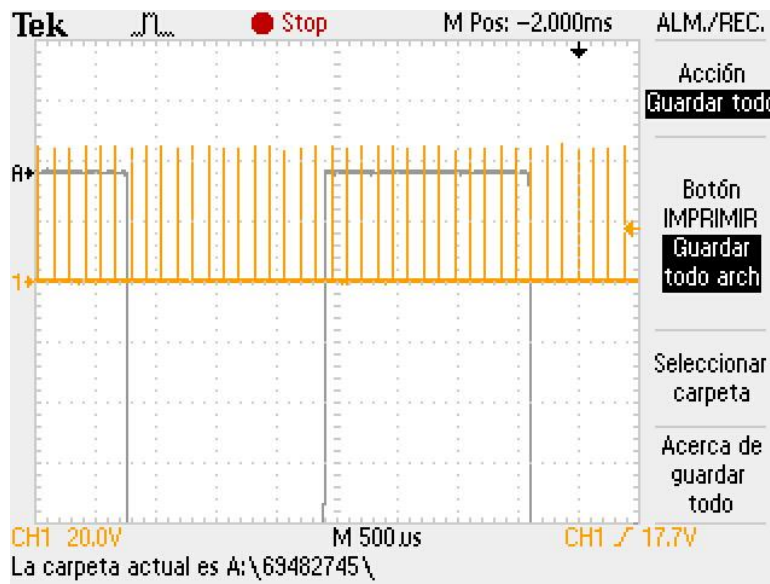
Sobre todo se mantiene en 0 y se activa según número de pasos en un intervalo de tiempo determinado

Figura Teórica de la señal de paso generada para los motores



Fuente: los autores

Figura Medida en el osciloscopio de la señal de paso generada para los motores

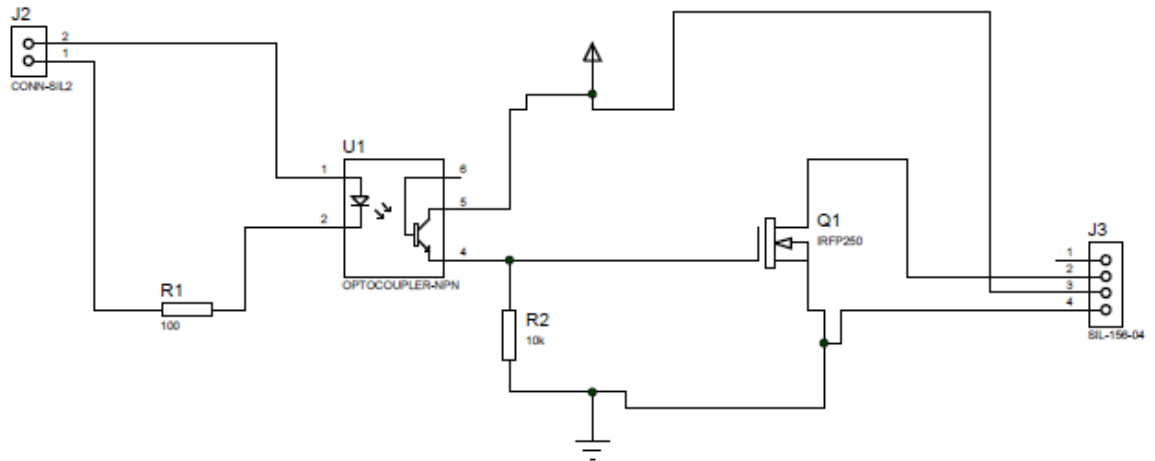


Fuente: los autores

# Anexo B

## CIRCUITOS ESQUEMÁTICOS DE LAS TARJETAS ELECTRÓNICAS DISEÑADAS

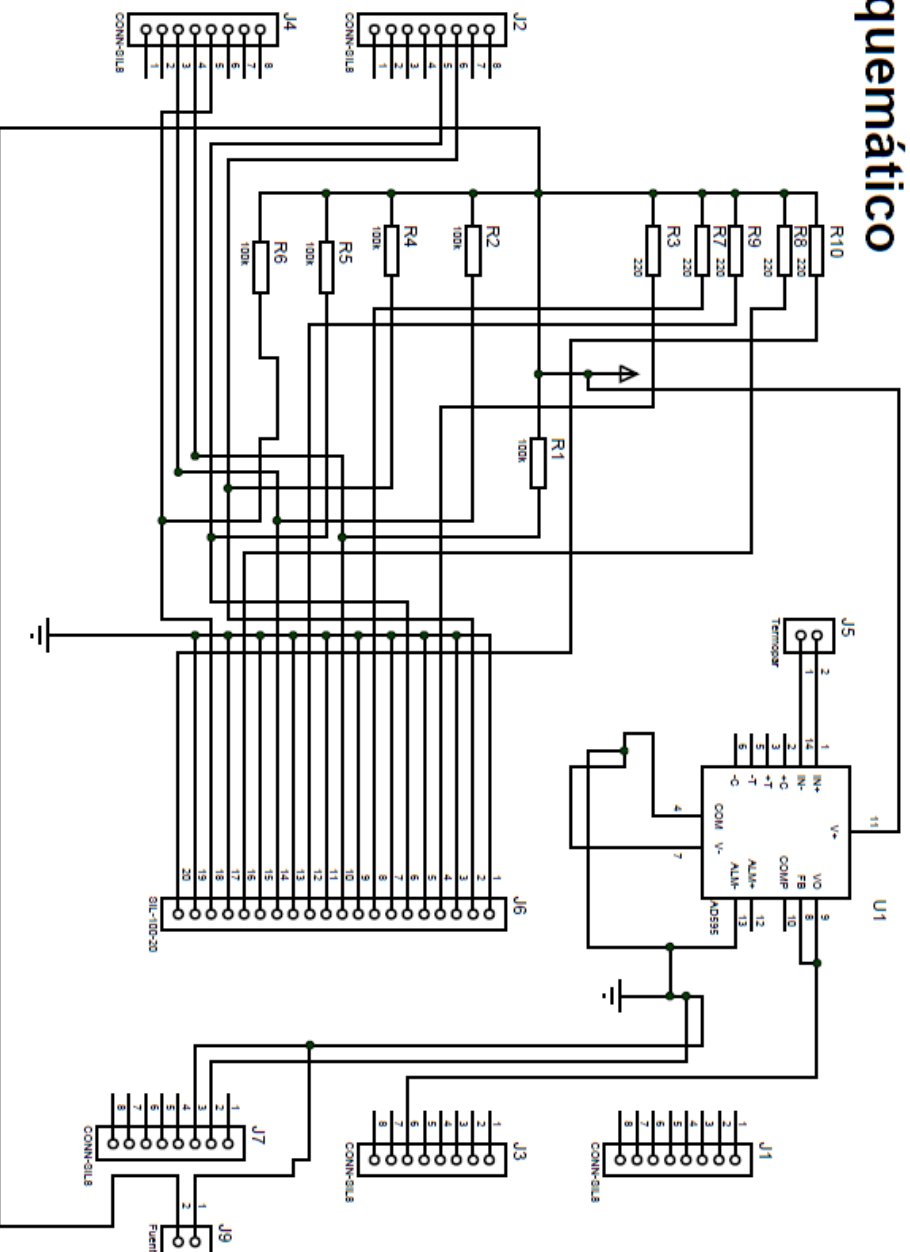
### Diagrama Esquemático



### Circuito de Potencia para el Extrusor

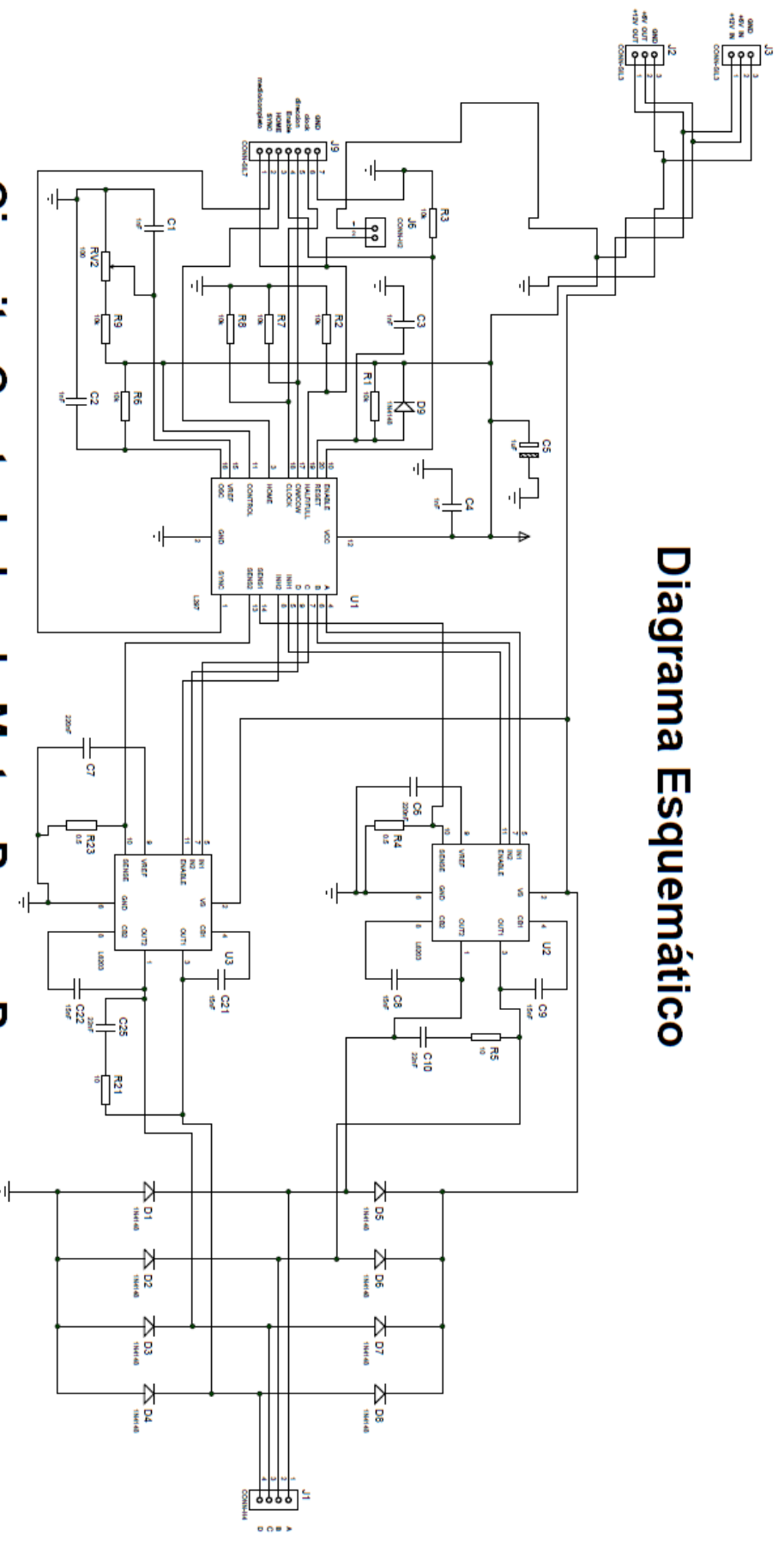
# Diagrama Esquemático

## Shield



## Sensores de Posición y Acondicionador AD 595

# Diagrama Esquemático



# Circuito Controlador de Motor Paso a Paso

# Anexo C

## CONEXIONADO DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DE CONTROL DE LA IMPRESORA 3D

A partir de la información suministrada en la pestaña pins.h del firmware MARLIN se conecta el sistema electrónico para el correcto control de la impresora 3D.

Los pines de la tarjeta controladora Arduino MEGA 2560 establecidos son:

```
// RAMPS_V_1_1 or RAMPS_V_1_2 as default (MOTHERBOARD == 3)

#define X_STEP_PIN 26
#define X_DIR_PIN 28
#define X_ENABLE_PIN 24
#define X_MIN_PIN 3
#define X_MAX_PIN -1 //2

#define Y_STEP_PIN 38
#define Y_DIR_PIN 40
#define Y_ENABLE_PIN 36
#define Y_MIN_PIN 16
#define Y_MAX_PIN -1 //17

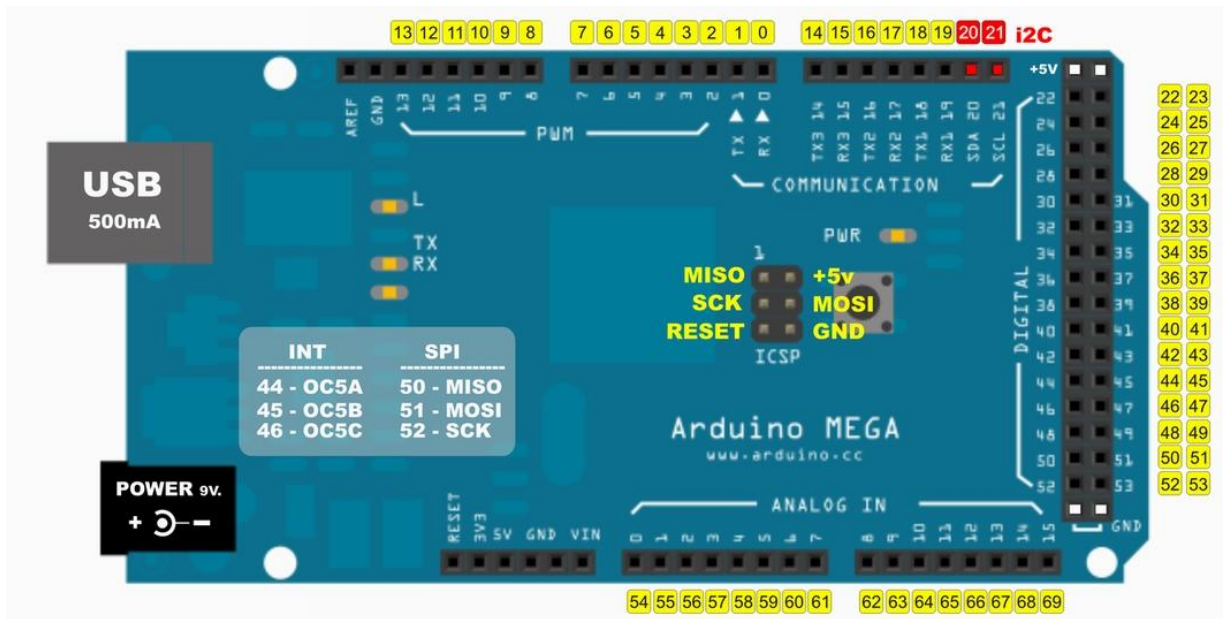
#define Z_STEP_PIN 44
#define Z_DIR_PIN 46
#define Z_ENABLE_PIN 42
#define Z_MIN_PIN 18
#define Z_MAX_PIN -1 //19

#define E0_STEP_PIN 32
#define E0_DIR_PIN 34
#define E0_ENABLE_PIN 30

#define SDPOWER 48
#define SDSS 53
#define LED_PIN 13
#define PS_ON_PIN -1
#define KILL_PIN -1

#ifdef RAMPS_V_1_0 // RAMPS_V_1_0
#define HEATER_0_PIN 12 // RAMPS 1.0
#define HEATER_BED_PIN -1 // RAMPS 1.0
#define FAN_PIN 11 // RAMPS 1.0
#else // RAMPS_V_1_1 or RAMPS_V_1_2
#define HEATER_0_PIN 10 // RAMPS 1.1
#define HEATER_BED_PIN 8 // RAMPS 1.1
#define FAN_PIN 9 // RAMPS 1.1
#endif
#define HEATER_1_PIN -1
#define HEATER_2_PIN -1
#define TEMP_0_PIN 2 // MUST USE ANALOG INPUT NUMBERING NOT DIGITAL
#define TEMP_1_PIN -1
#define TEMP_2_PIN -1
#define TEMP_BED_PIN 1 // MUST USE ANALOG INPUT NUMBERING NOT DIGITAL
#endif // MOTHERBOARD == 33 || MOTHERBOARD == 34
```

## Numeración de pines en la tarjeta controladora Arduino MEGA R3



Fuente: <http://img827.imageshack.us/img827/4055/arduinomegaquickreferen.jpg>



1 2 3 4 5 6 7 8

A

B

C

D

E

F

A

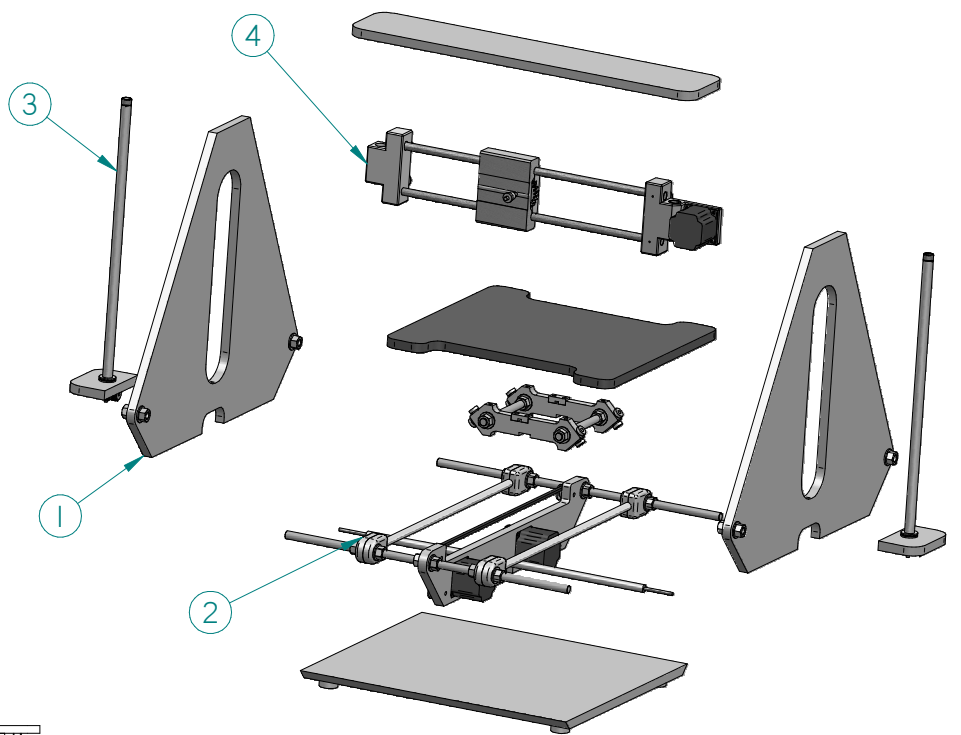
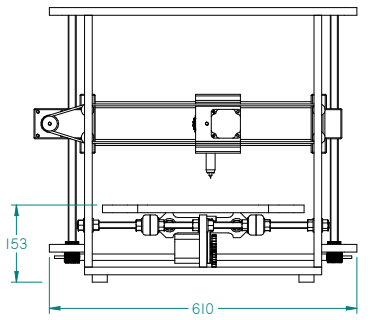
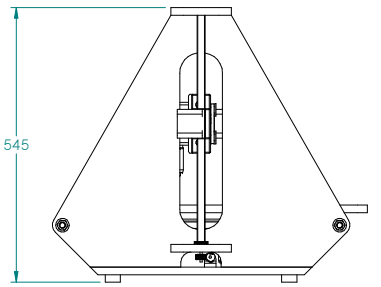
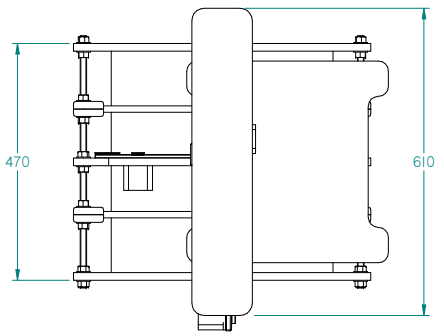
B

C

D

E

F



Listado de Conjuntos Impresora 3D

| Item | Cantidad | Título             | Plano N° | Material   |
|------|----------|--------------------|----------|------------|
| 1    | 1        | Estructura Soporte | 2        | Ver Planos |
| 2    | 1        | Eje Y              | 4        | Ver Plano  |
| 3    | 1        | Eje Z              | 12       | Ver Plano  |
| 4    | 1        | Eje X              | 15       | Ver Planos |

Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias ±0,5 y ±1°

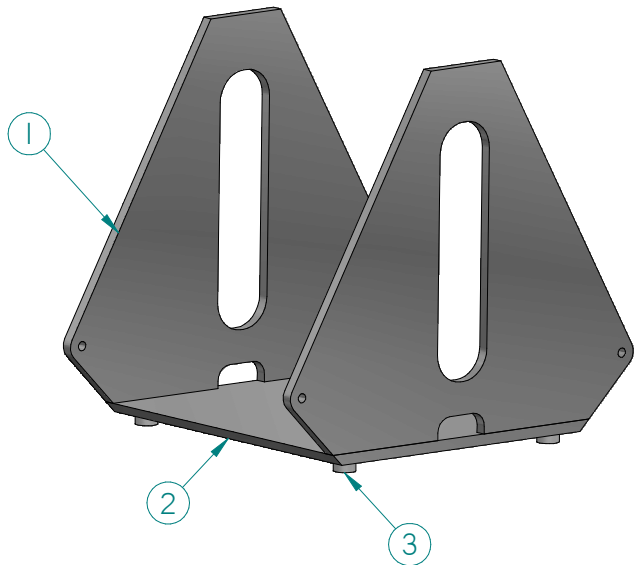
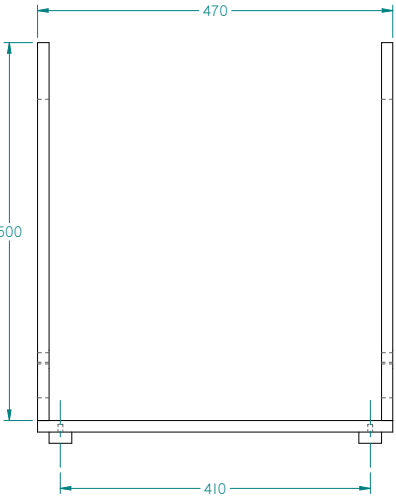
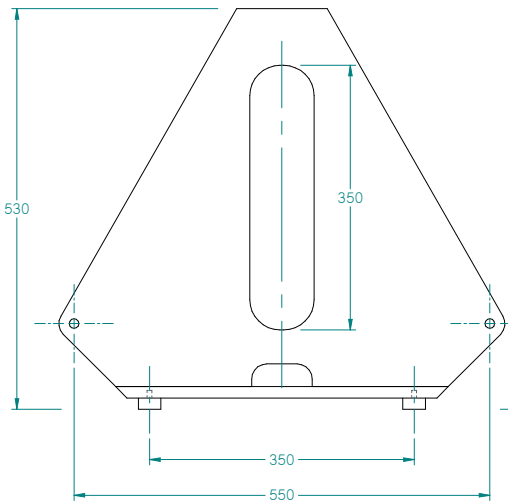
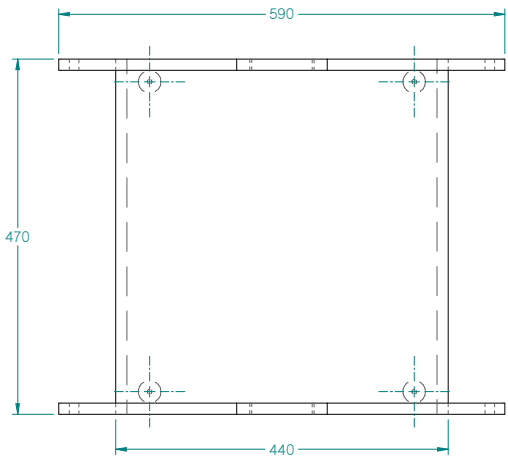
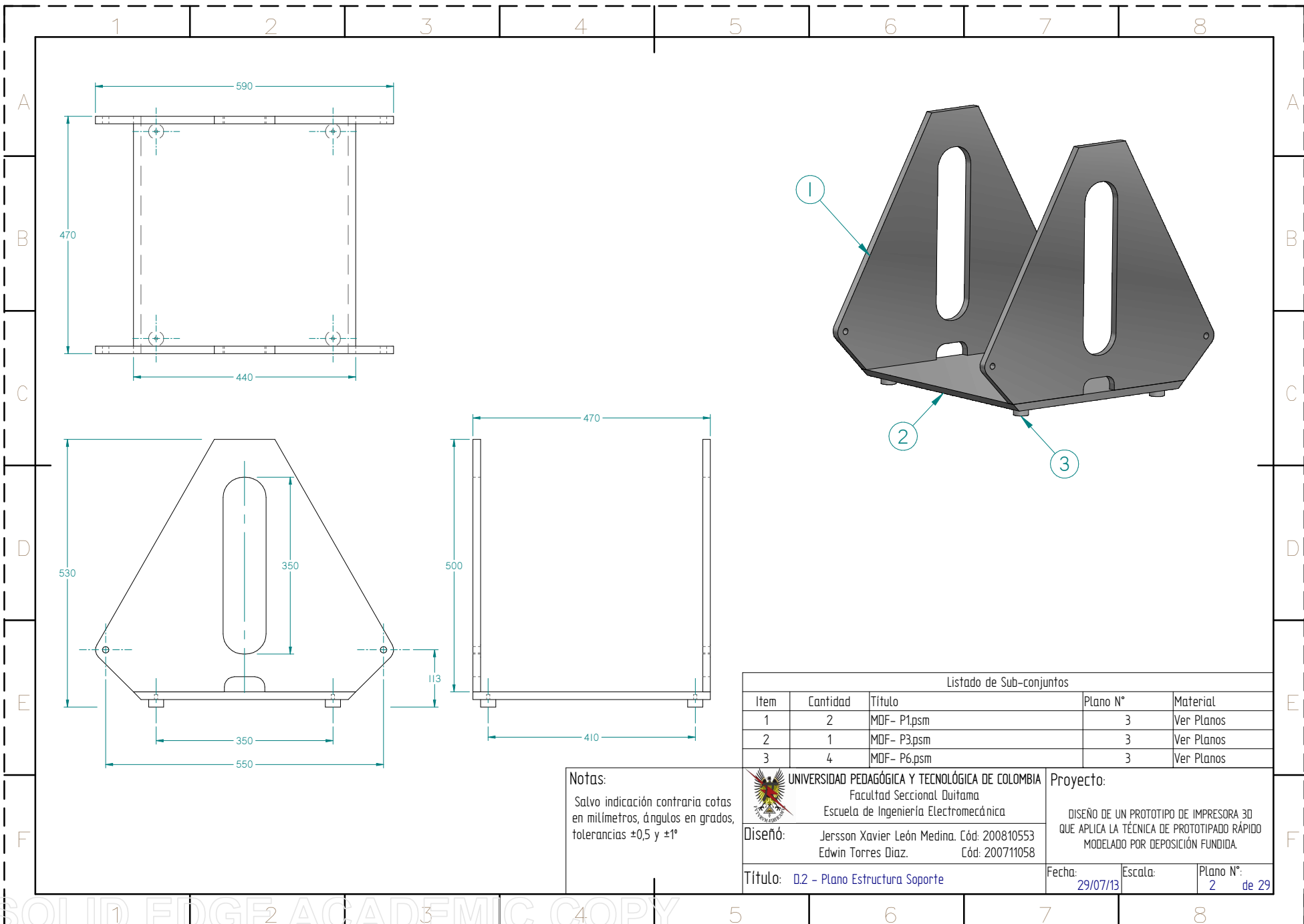
UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

Proyecto:  
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

Título: D.1 - Plano General  
Fecha: 29/07/13  
Escala:  
Plano N°: 1 de 29

1 2 3 4 5 6 7 8



| Listado de Sub-conjuntos |          |             |          |            |
|--------------------------|----------|-------------|----------|------------|
| Item                     | Cantidad | Título      | Plano N° | Material   |
| 1                        | 2        | MDF- P1.psm | 3        | Ver Planos |
| 2                        | 1        | MDF- P3.psm | 3        | Ver Planos |
| 3                        | 4        | MDF- P6.psm | 3        | Ver Planos |

Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$

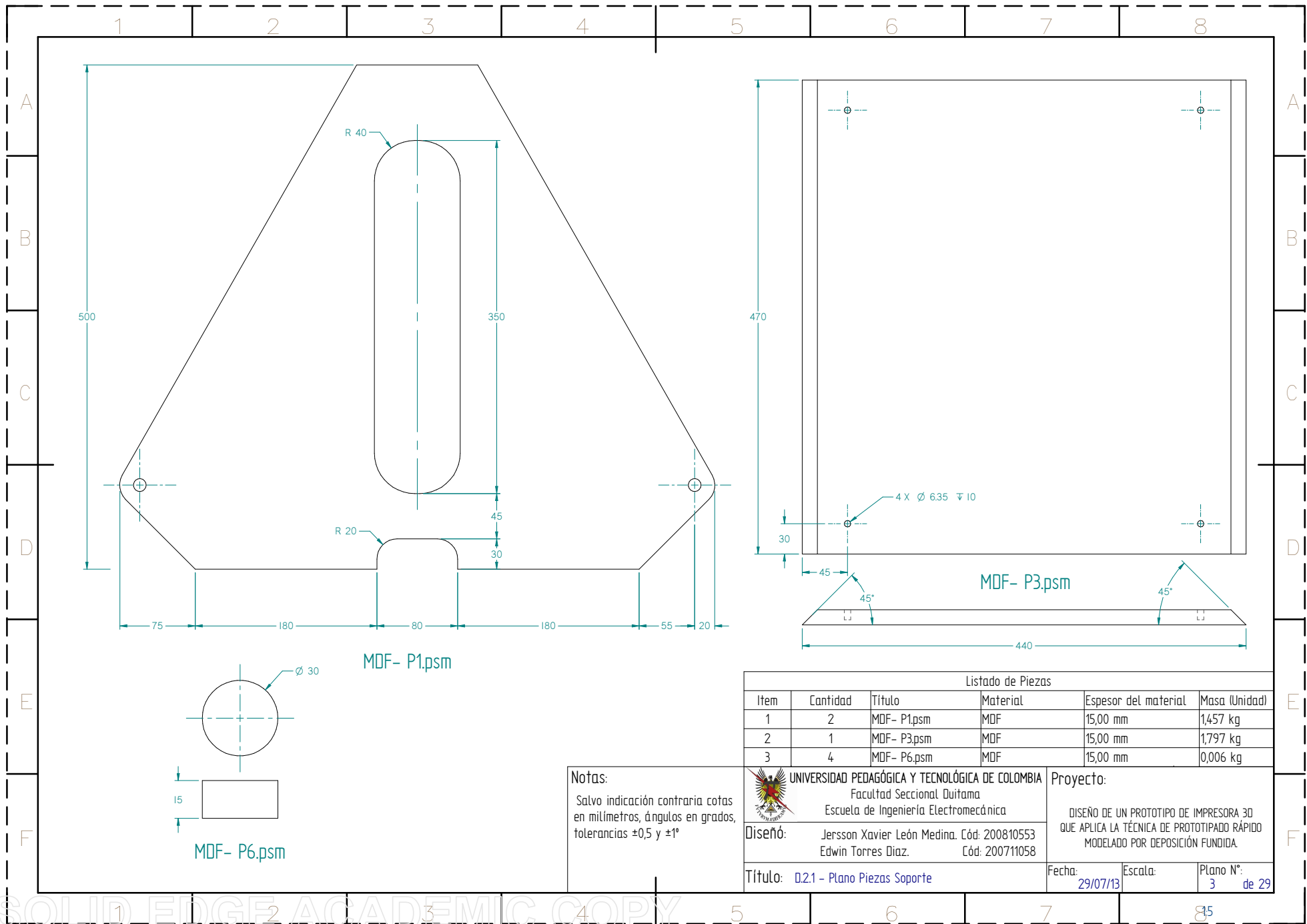
UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

Título: **D2 - Plano Estructura Soporte**

Proyecto:  
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

Fecha: 29/07/13 Escala: Plano N°: 2 de 29



| Listado de Piezas |          |             |          |                      |               |
|-------------------|----------|-------------|----------|----------------------|---------------|
| Item              | Cantidad | Título      | Material | Espesor del material | Masa (Unidad) |
| 1                 | 2        | MDF- P1.psm | MDF      | 15,00 mm             | 1,457 kg      |
| 2                 | 1        | MDF- P3.psm | MDF      | 15,00 mm             | 1,797 kg      |
| 3                 | 4        | MDF- P6.psm | MDF      | 15,00 mm             | 0,006 kg      |

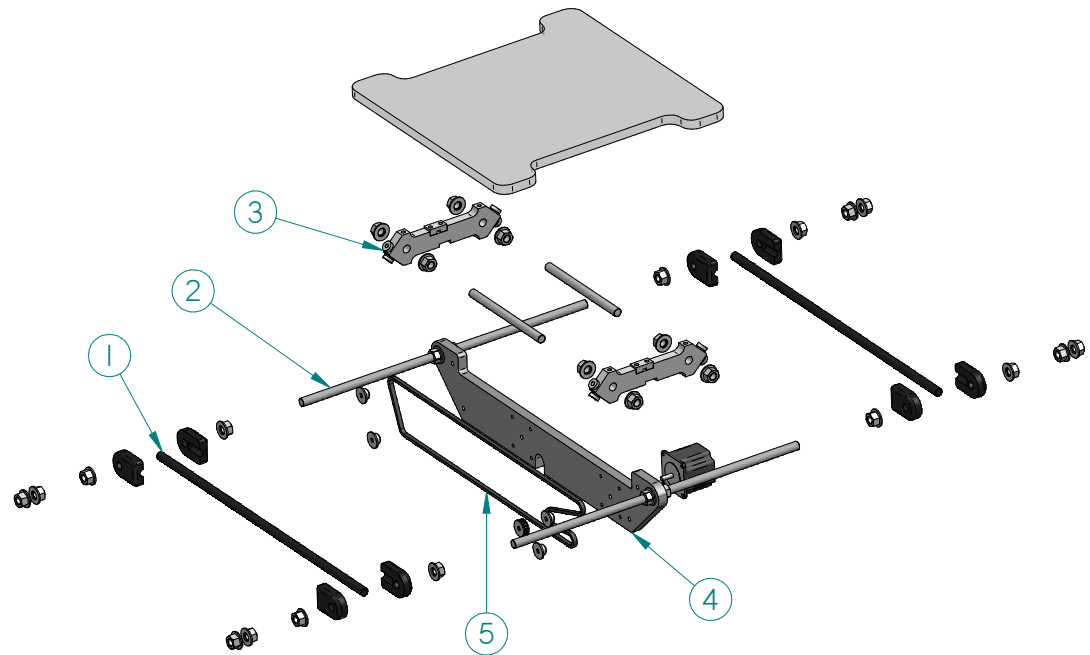
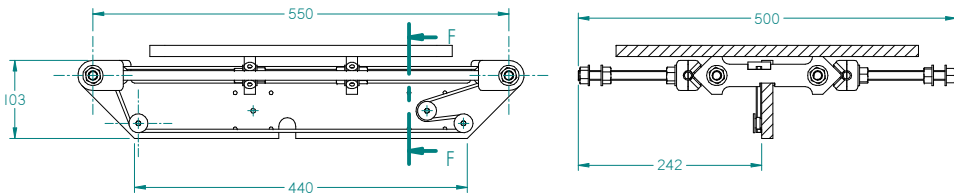
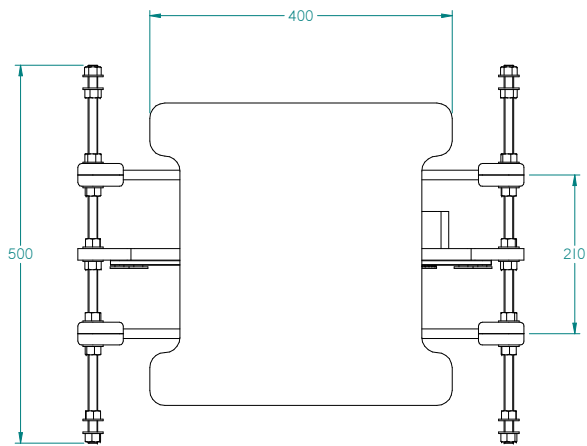
Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias ±0,5 y ±1°

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

Proyecto:  
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

Título: 0.2.1 - Plano Piezas Soporte  
Fecha: 29/07/13  
Escala:  
Plano N°: 3 de 29



| Listado de Sub-conjuntos |          |                      |          |            |
|--------------------------|----------|----------------------|----------|------------|
| Item                     | Cantidad | Título               | Plano N° | Material   |
| 1                        | 2        | Soporte Eje Guia     | 5        | Ver Planos |
| 2                        | 2        | Tensor               | 6        | Ver Planos |
| 3                        | 1        | Carro Eje Y          | 7        | Ver Planos |
| 4                        | 1        | Bastidor Transmisión | 11       | Ver Planos |
| 5                        | 1        | Correa Dentada       | 11       | Ver Planos |

Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

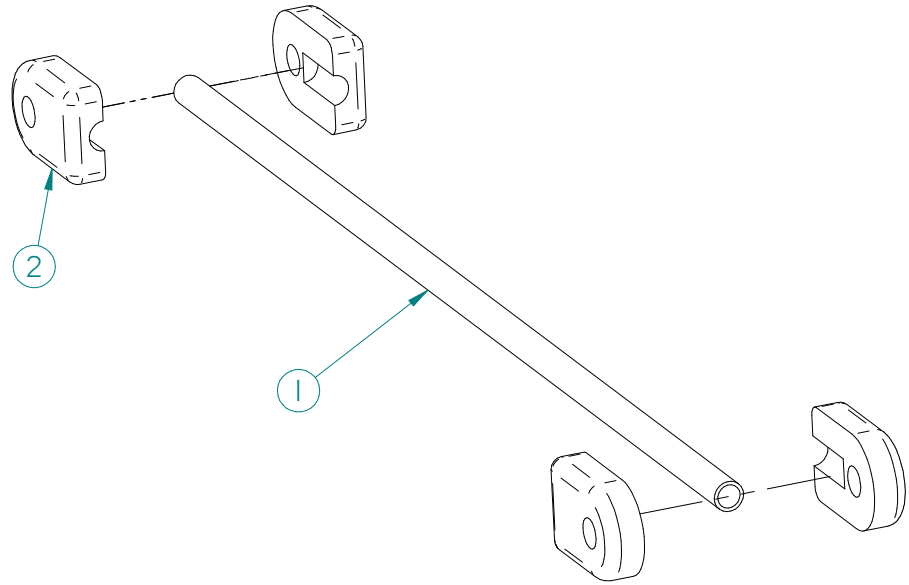
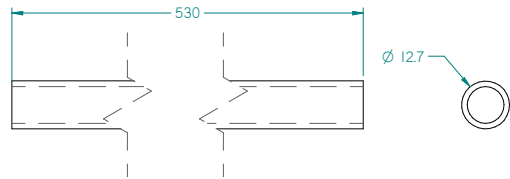
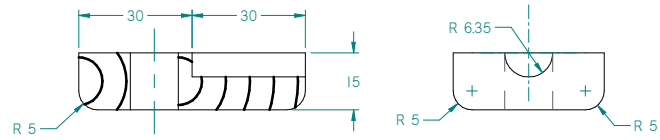
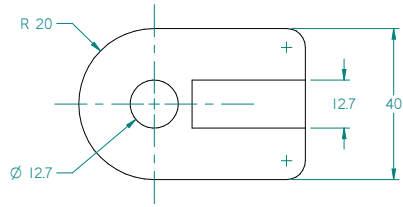
Proyecto:  
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

Título: D3 - Plano Eje Y

Fecha: 29/07/13

Escala:

Plano N°: 4 de 29



| Listado de Piezas |          |            |          |                      |               |
|-------------------|----------|------------|----------|----------------------|---------------|
| Item              | Cantidad | Título     | Material | Espesor del Material | Masa (Unidad) |
| 1                 | 1        | tubo eje Y | Aluminio | 1,50 mm              | 0,076 kg      |
| 2                 | 4        | MDF- Y1    | MDF      | 15,00 mm             | 0,017 kg      |

Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

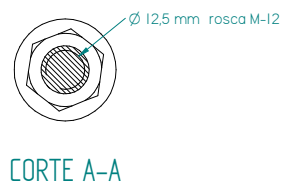
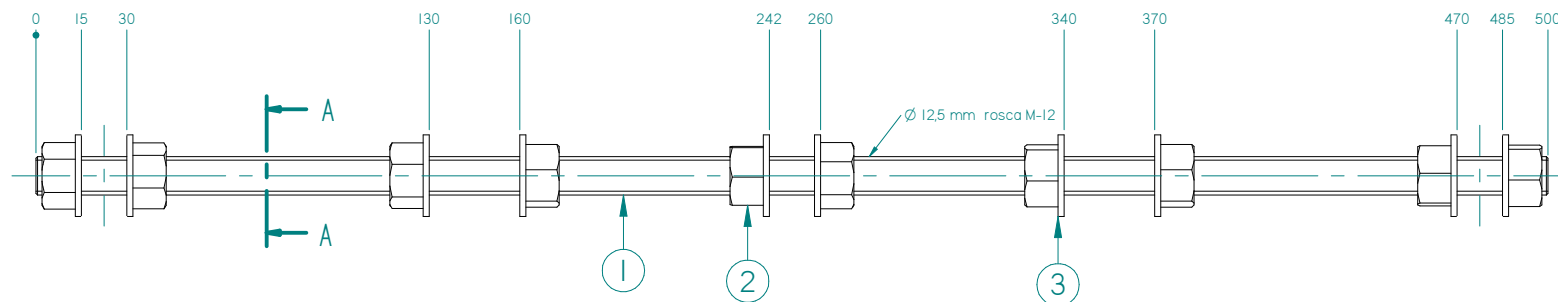
Proyecto:  
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

Título: 0.3.1 - Soporte Eje Guia

Fecha: 29/07/13

Escala:

Plano N°: 5 de 29



| Listado de Piezas |          |                                                   |             |               |
|-------------------|----------|---------------------------------------------------|-------------|---------------|
| Item              | Cantidad | Título                                            | Material    | Masa (unidad) |
| 1                 | 1        | Varilla roscada - 12.5- M12                       | Acero 10-60 | 0,491 kg      |
| 2                 | 10       | Tuerca_ASME_B18.2.2_R1999_03A2_UNC_0.5000in_v8.95 | Grado 2     | 0,019 kg      |
| 3                 | 10       | Arandela_ANSI_B18.22_1_A2_112_v8.95               | Acero 10-60 | 0,007 kg      |

Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

Título: 0.32 - Tensor

Proyecto:  
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

Fecha: 29/07/13 Escala: Plano N°: 6 de 29

1 2 3 4 5 6 7 8

A

A

B

B

C

C

D

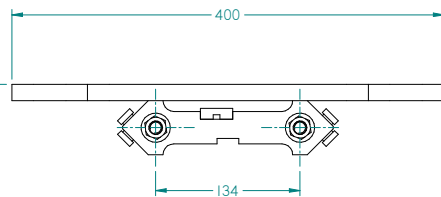
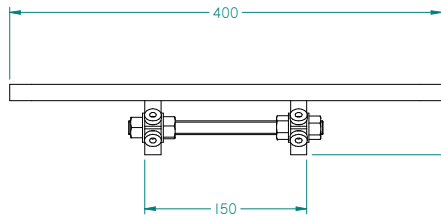
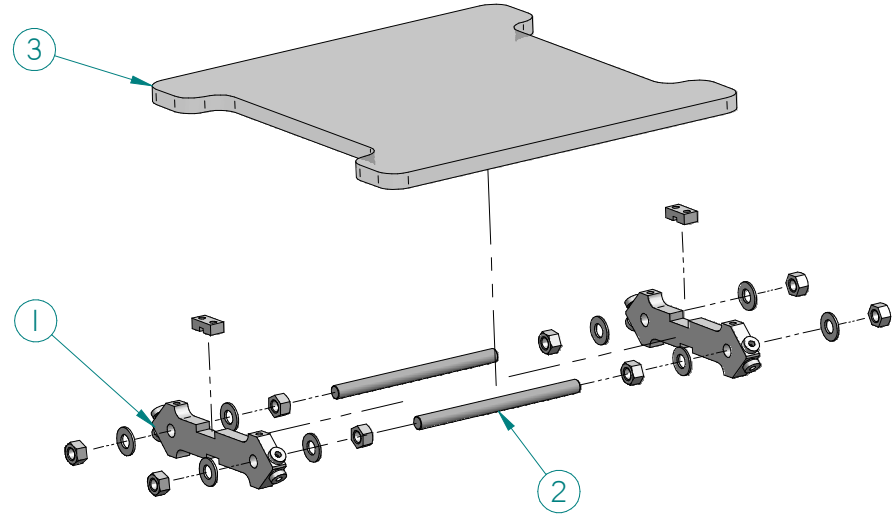
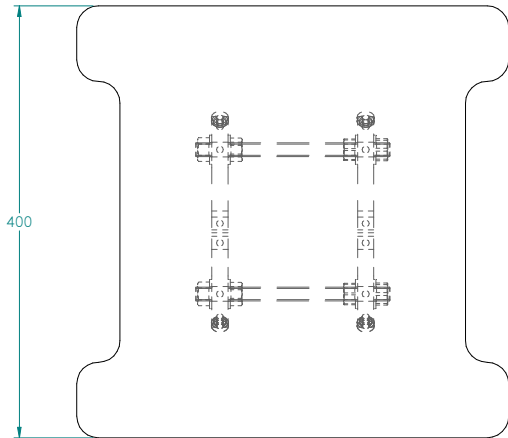
D

E

E

F

F



| Listado de Sub-conjuntos |          |                    |          |            |
|--------------------------|----------|--------------------|----------|------------|
| Item                     | Cantidad | Título             | Plano N° | Material   |
| 1                        | 2        | Guia Carro Y       | 8        | Ver planos |
| 2                        | 2        | Tensor Carro eje Y | 9        | Ver Planos |
| 3                        | 1        | Base de impresion  | 10       | Ver Planos |

Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

Proyecto:  
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

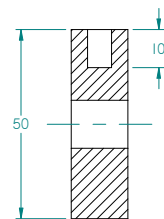
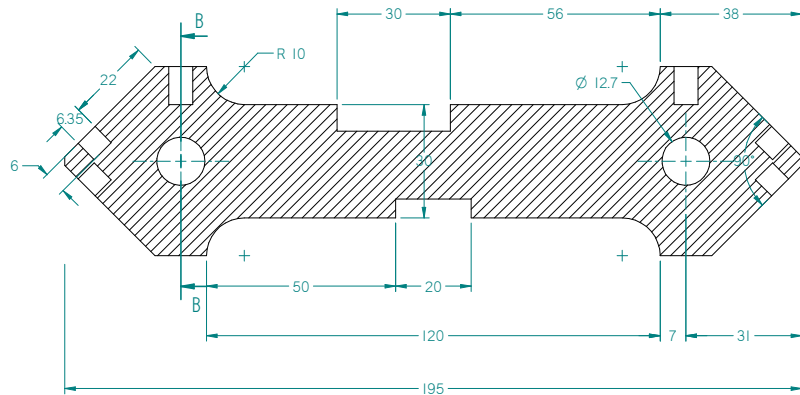
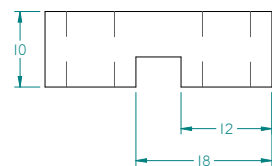
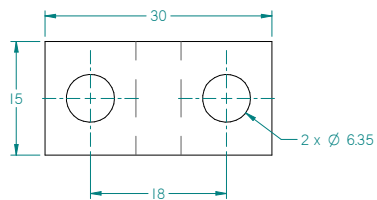
Título: 0.33 - Carro Eje Y

Fecha: 29/07/13

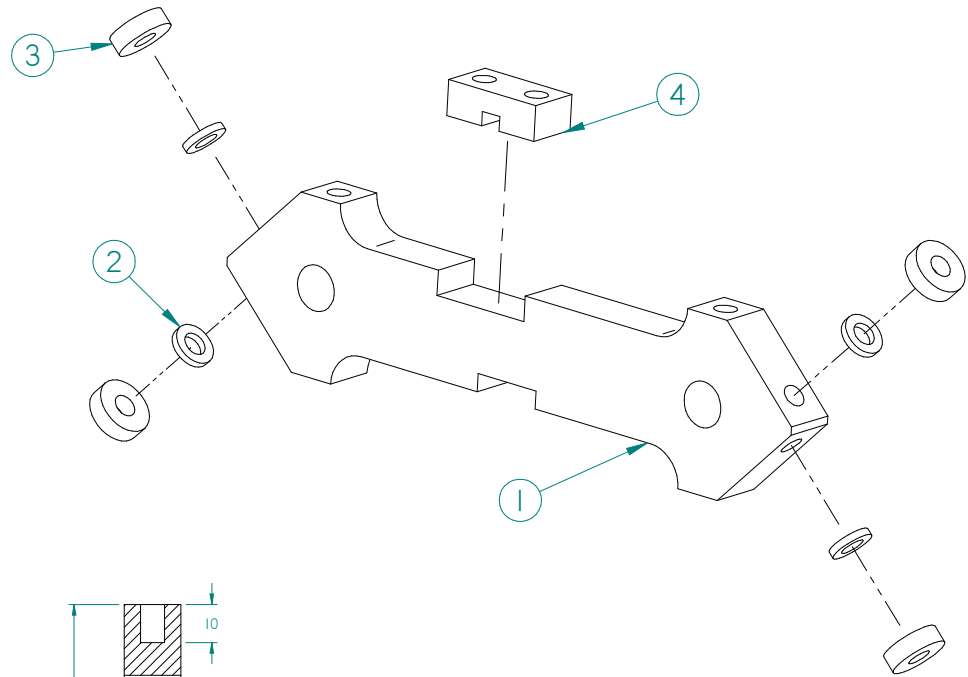
Escala:

Plano N°: 7 de 29

1 2 3 4 5 6 7 8



CORTE B-B



Listado de Piezas

| Item | Cantidad | Título                         | Material    | Espesor del Material | Masa (Unidad) |
|------|----------|--------------------------------|-------------|----------------------|---------------|
| 1    | 1        | MDF- P7.par                    | MDF         | 15,00 mm             | 0,051 kg      |
| 2    | 4        | Arandela DIN EN ISO 7091 - 6mm | Acero 10-60 | 1,5 mm               | 0,001 kg      |
| 3    | 4        | Rodamiento 0.5 inch            | GBL         |                      | 0,007 kg      |
| 4    | 1        | MDF-PRICIONERO.par             | MDF         | 15,00 mm             | 0,002 kg      |

Notas:

Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

Proyecto:

DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D  
QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO  
MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

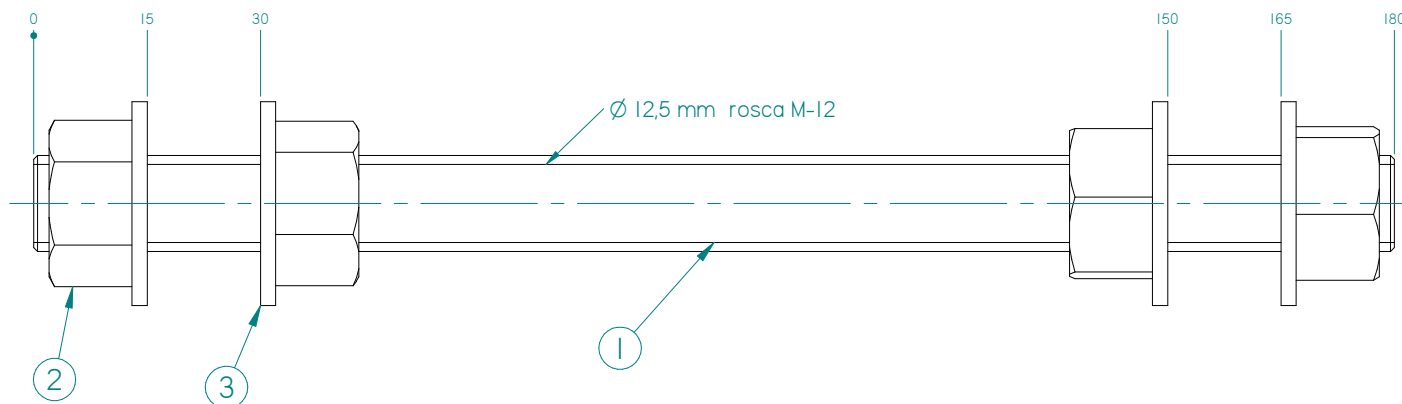
Título: 0.33.1 - Guía Carro Y

Fecha: 29/07/13

Escala:

Plano N°: 8 de 29





| Listado de Piezas |          |                                                   |             |               |
|-------------------|----------|---------------------------------------------------|-------------|---------------|
| Item              | Cantidad | Nombre archivo (sin extensión)                    | Material    | Masa (Unidad) |
| 1                 | 1        | Varilla roscada - 125- M12- S                     | Acero 10-60 | 0,177 kg      |
| 2                 | 4        | Tuerca_ASME_B18.2.2_R1999_03A2_UNC_0.5000in_v8.95 | Grado 2     | 0,077 kg      |
| 3                 | 4        | Arandela_ANSI_B18.22_1_A2_112_v8.95               | Grado 2     | 0,027 kg      |

Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$



UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Proyecto:  
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

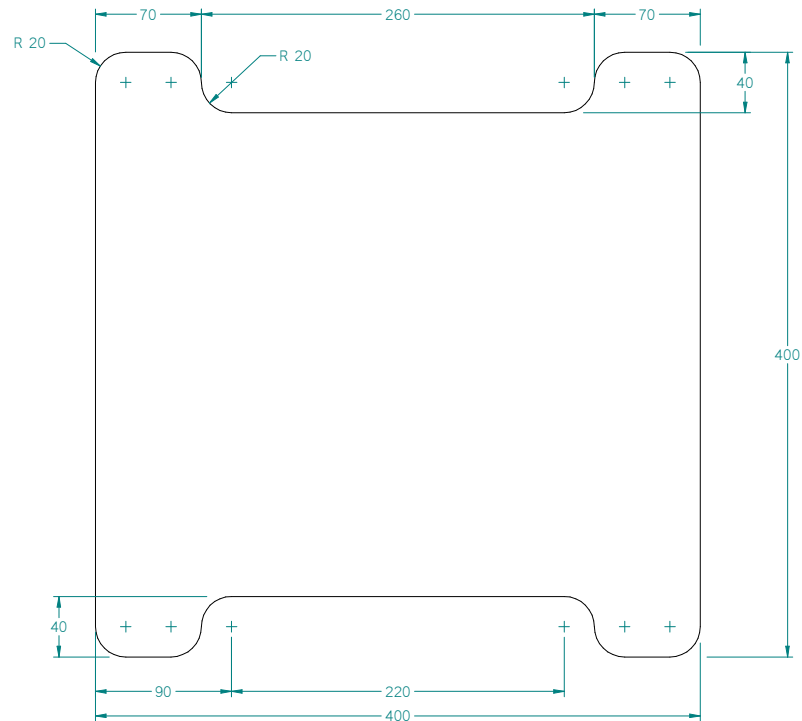
Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

Título: 0.332 - Tensor Carro Eje Y

Fecha: 29/07/13

Escala:


Plano N°: 9 de 29



Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$

| Listado de Piezas |          |                |          |                      |               |
|-------------------|----------|----------------|----------|----------------------|---------------|
| Item              | Cantidad | Titulo         | Material | Espesor del Material | Masa (Unidad) |
| 1*                | 1        | Base Impresion | MDF      | 15,00 mm             | 1,250 kg      |

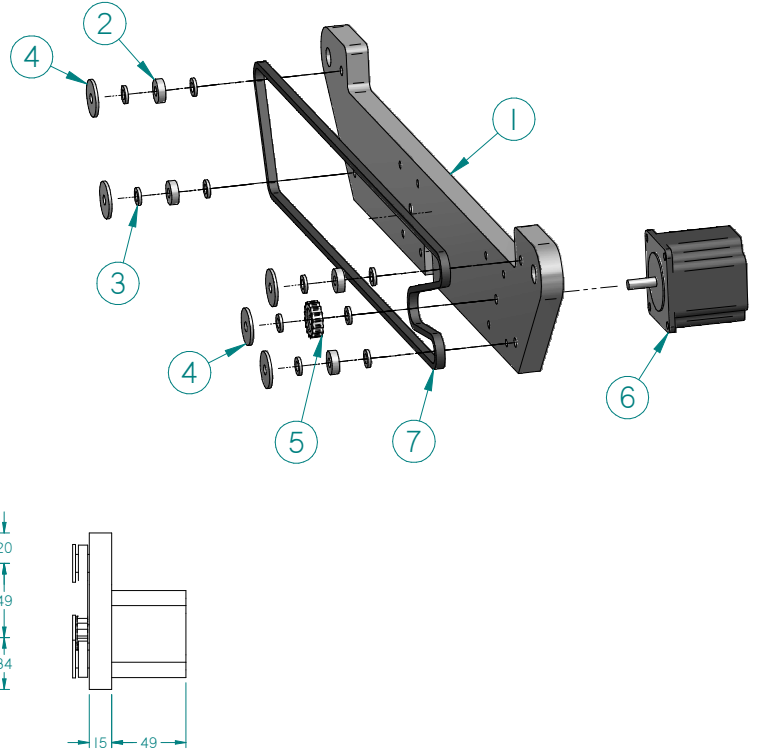
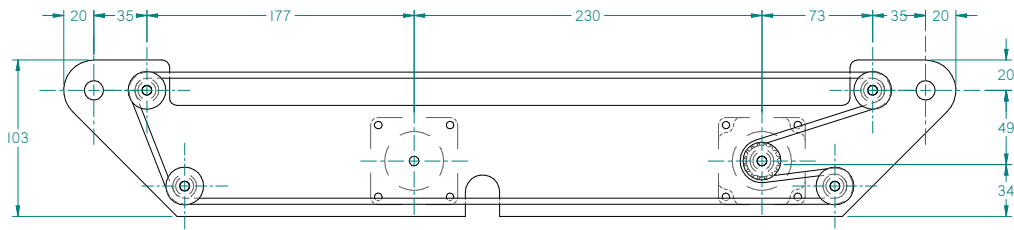
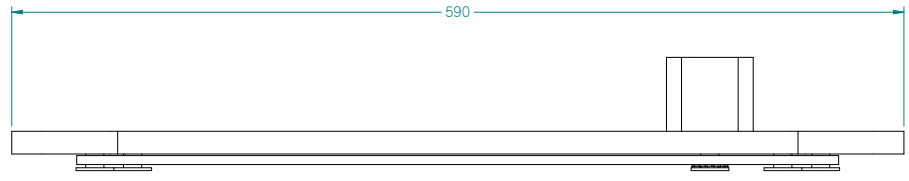
  

|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                     |                                   |                        |                |                           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|----------------|---------------------------|
|  <b>UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA</b><br>Facultad Seccional Duitama<br>Escuela de Ingeniería Electromecánica | <b>Proyecto:</b>                                                                                                    |                                   |                        |                |                           |
|                                                                                                                                                                                                                      | DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA. |                                   |                        |                |                           |
| <b>Diseño:</b>                                                                                                                                                                                                       | Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553                                                                          | Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058 | <b>Fecha:</b> 29/07/13 | <b>Escala:</b> | <b>Plano N°:</b> 10 de 29 |
| <b>Título:</b>                                                                                                                                                                                                       | 0.333 - Base Impresion                                                                                              |                                   |                        |                |                           |

1 2 3 4 5 6 7 8

A  
B  
C  
D  
E  
F

A  
B  
C  
D  
E  
F



Listado de Sub-conjuntos

| Item | Cantidad | Título                                | Plano N° | Material           |
|------|----------|---------------------------------------|----------|--------------------|
| 1    | 1        | MDF- P9                               | 12       | Ver Planos         |
| 2    | 5        | rodamiento 0.25                       | 13       | Acero, estructural |
| 3    | 10       | arandela_DIN_EN_ISO_7091_2000_6_v8.95 | 13       | Acero              |
| 4    | 5        | arandela_rodamiento                   | 13       | Acero              |
| 5    | 1        | Rueda Dentada                         | 13       | Aluminio, 1060     |
| 6    | 1        | Motor paso a paso                     |          | Ref. HS 200 2221   |
| 7    | 1        | Correa dentada (Paso 5mm) x 7mm       | 12       | Ver Planos         |

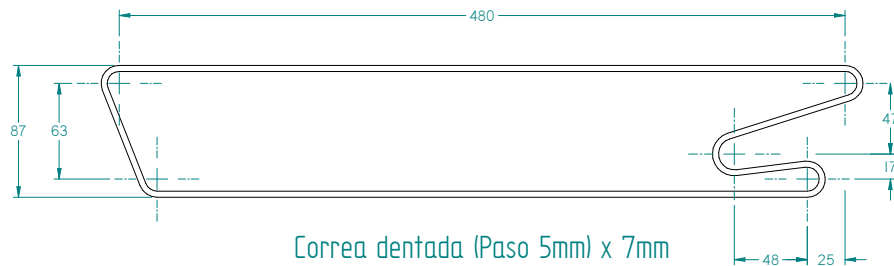
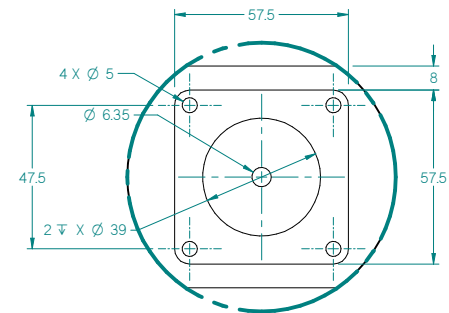
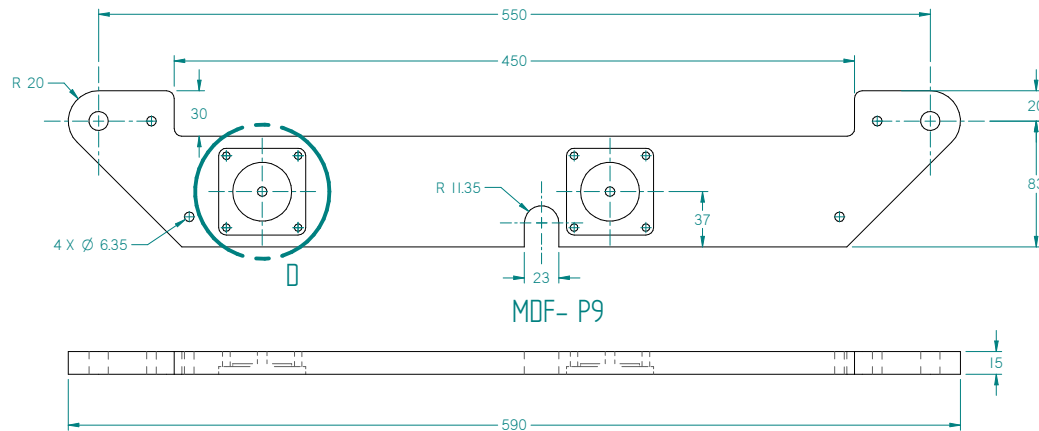
Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias ±0,5 y ±1°

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica  
Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

Proyecto:  
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

Título: 0.34 - Bastidor Trasmisión  
Fecha: 29/07/13  
Escala:  
Plano N°: 11 de 29

1 2 3 4 5 6 7 8



| Listado de Piezas |          |                            |          |                      |               |
|-------------------|----------|----------------------------|----------|----------------------|---------------|
| Item              | Cantidad | Título                     | Material | Espesor del material | Masa (Unidad) |
| 1                 | 1        | MDF- P9                    | MDF      | 15,00 mm             | 0,343 kg      |
| 7                 | 1        | Correa dent (P- 5mm) x 7mm |          | 7 mm                 | 0,030 kg      |

Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

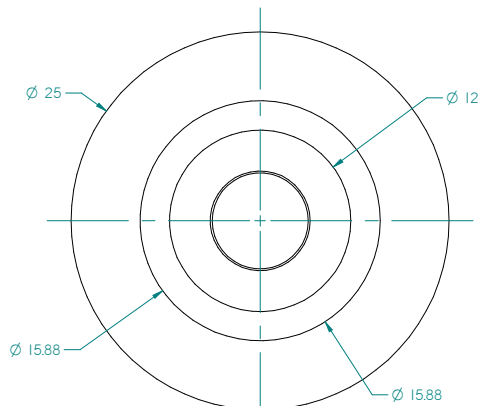
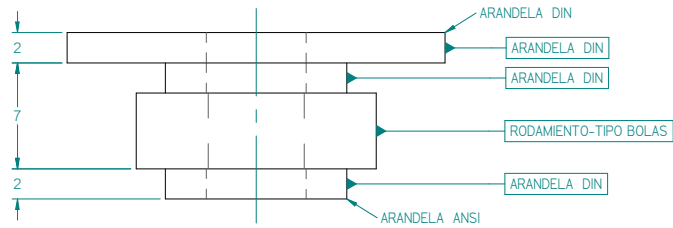
Proyecto:  
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

Título: 0.34.1 Detalle Partes Bastidor

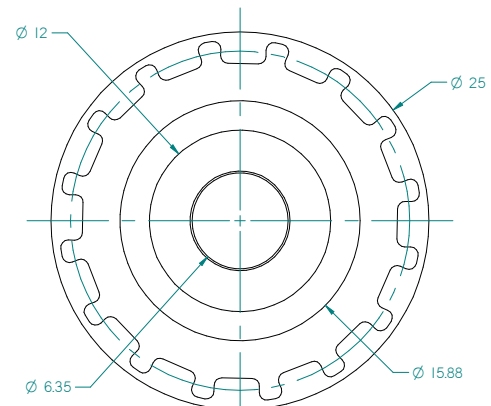
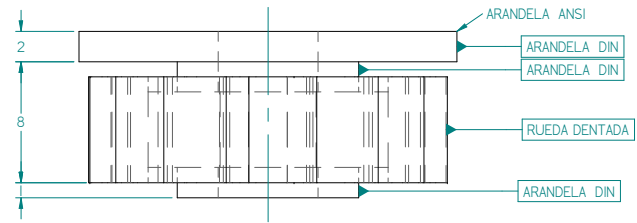
Fecha: 29/07/13

Escala:

Plano N°: 12 de 29



RODAMIENTO



RUEDA DENTADA

| DATOS DEL PIÑÓN-CORREA |          |
|------------------------|----------|
| Numero de dientes      | 16       |
| Diametro primitivo     | 44,86 mm |
| Angulo de presion      | 20       |
| Ancho de cara          | 7 mm     |
| Espesor del diente     | 2,95 mm  |
| Paso                   | 8,81 mm  |

| Listado de Piezas |          |                     |                |                      |               |
|-------------------|----------|---------------------|----------------|----------------------|---------------|
| Item              | Cantidad | Título              | Material       | Espesor del material | Masa (Unidad) |
| 2                 | 5        | rodamiento 0.25     |                |                      | 0,007 kg      |
| 3                 | 10       | arandela_DIN_EN_ISO | Acero          | 2mm                  | 0,001 kg      |
| 4                 | 5        | arandela_rodamiento | Acero          | 2 mm                 | 0,007 kg      |
| 5                 | 1        | Rueda Dentada       | Aluminio, 1060 |                      | 0,003 kg      |

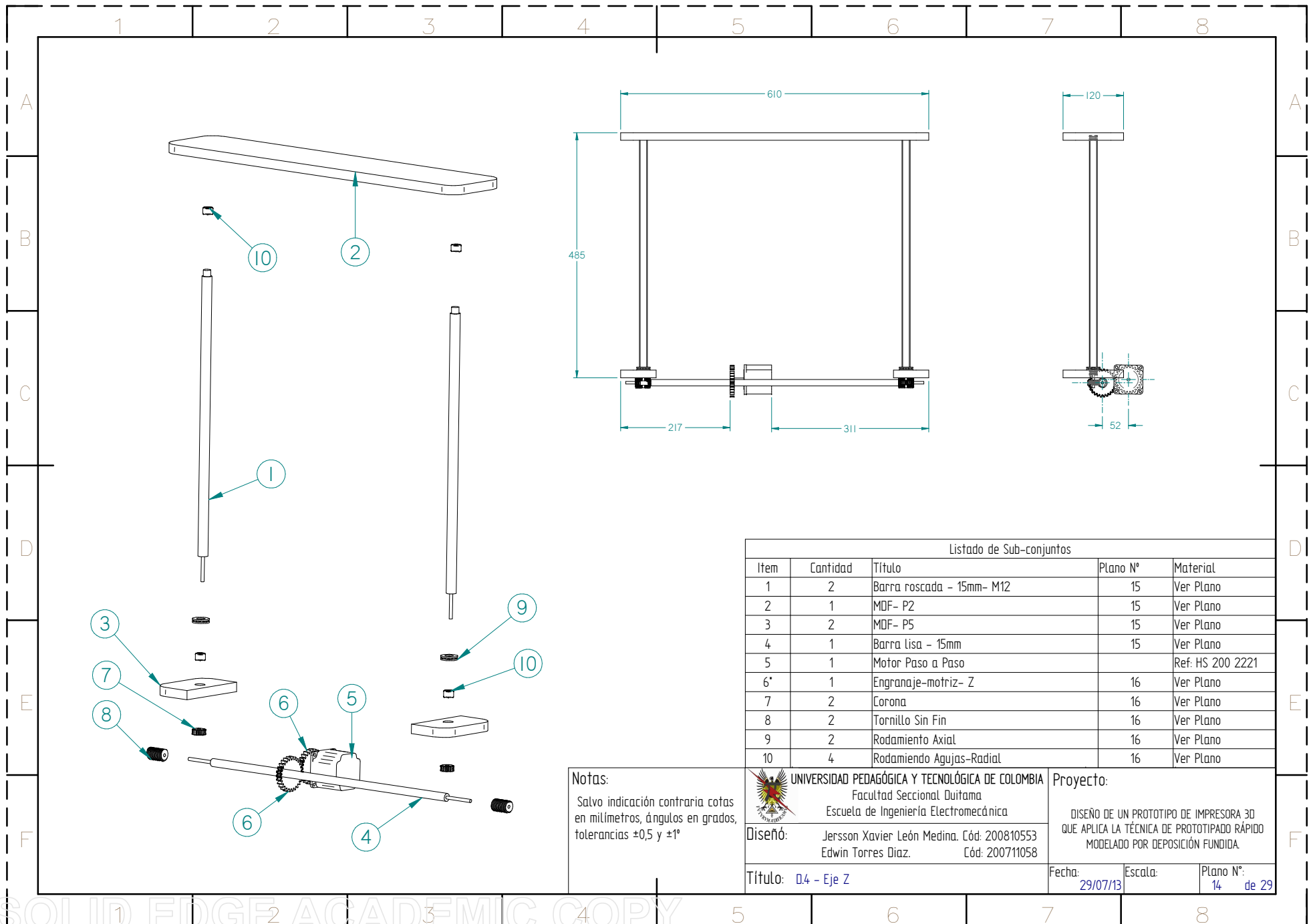
Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058


Proyecto:  
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

Título: 0.3.4.2 - Detalle Piñon / Polea  
Fecha: 29/07/13  
Escala:  
Plano N°: 13 de 29

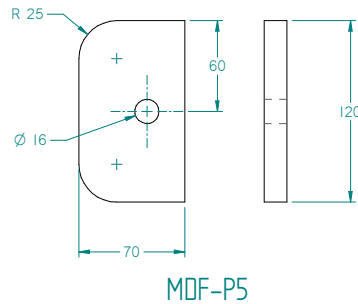
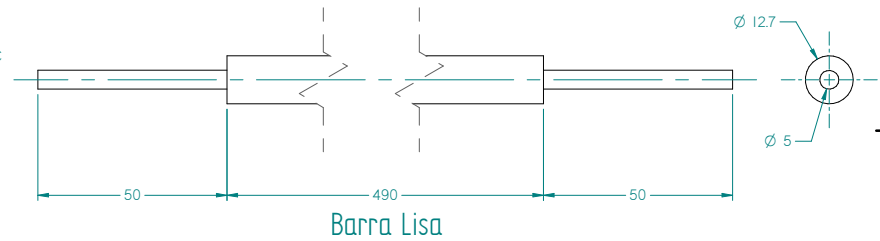
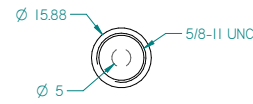
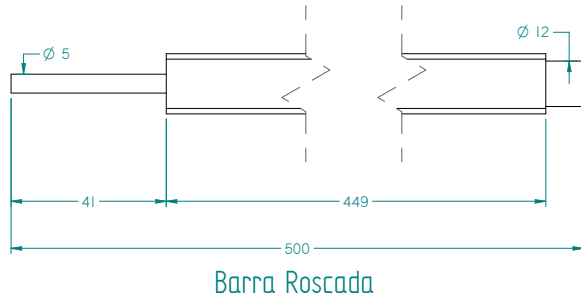


| Listado de Sub-conjuntos |          |                           |          |                  |
|--------------------------|----------|---------------------------|----------|------------------|
| Item                     | Cantidad | Título                    | Plano N° | Material         |
| 1                        | 2        | Barra roscada - 15mm- M12 | 15       | Ver Plano        |
| 2                        | 1        | MDF- P2                   | 15       | Ver Plano        |
| 3                        | 2        | MDF- P5                   | 15       | Ver Plano        |
| 4                        | 1        | Barra Lisa - 15mm         | 15       | Ver Plano        |
| 5                        | 1        | Motor Paso a Paso         |          | Ref: HS 200 2221 |
| 6*                       | 1        | Engranaje-motriz- Z       | 16       | Ver Plano        |
| 7                        | 2        | Corona                    | 16       | Ver Plano        |
| 8                        | 2        | Tornillo Sin Fin          | 16       | Ver Plano        |
| 9                        | 2        | Rodamiento Axial          | 16       | Ver Plano        |
| 10                       | 4        | Rodamiento Agujas-Radial  | 16       | Ver Plano        |

Notas:  
 Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$


**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA**  
 Facultad Seccional Duitama  
 Escuela de Ingeniería Electromecánica  
 Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
 Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058  
 Título: **04 - Eje Z**

Proyecto:  
 DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.  
 Fecha: 29/07/13 Escala: Plano N°: 14 de 29



| Listado de Piezas |          |                           |             |                      |               |
|-------------------|----------|---------------------------|-------------|----------------------|---------------|
| Item              | Cantidad | Título                    | Material    | Espesor del material | Masa (Unidad) |
| 1                 | 2        | Barra roscada - 15mm- M12 | Acero 10-60 | 15,88 mm             | 0,711 kg      |
| 2                 | 1        | MDF- P2                   | MDF         | 15,00 mm             | 0,652 kg      |
| 3                 | 2        | MDF- P5                   | MDF         | 15,00 mm             | 0,071 kg      |
| 4                 | 1        | Barra lisa - 15mm         | Acero 10-60 | 12,70 mm             | 0,502 kg      |

Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

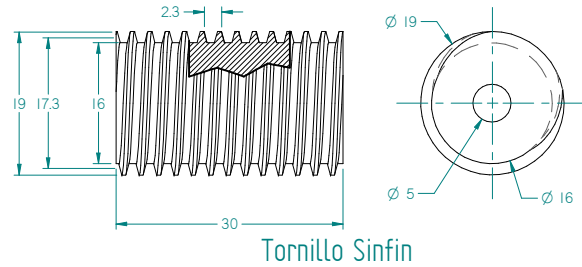
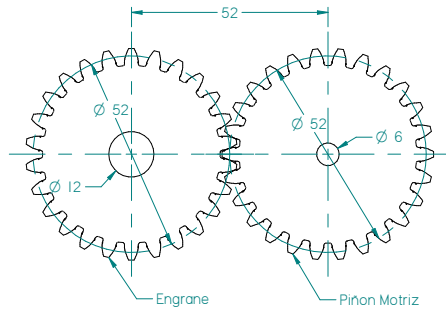
Proyecto:  
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

Título: 0.4.1 - Detalle Partes EJE Z

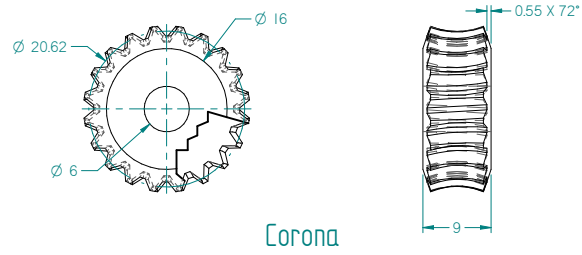
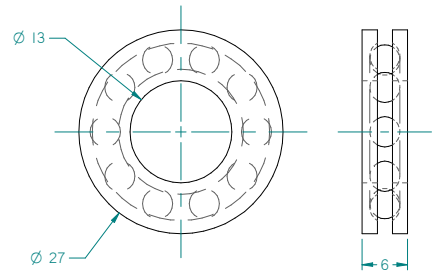
Fecha: 29/07/13

Escala:

Plano N°: 15 de 29



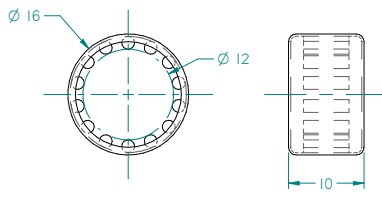
| DATOS SIN-FIN CORONA |          |
|----------------------|----------|
| Corona               |          |
| Numero de dientes    | 26       |
| Diametro primitivo   | 20,62 mm |
| Angulo de presion    | 20       |
| Ancho de cara        | 9        |
| Espesor del diente   | 1,2mm    |
| Paso                 | 2,30 mm  |
| Tornillo Sinfin      |          |
| Diametro mayor       | 19,00 mm |
| Diametro menor       | 16,00 mm |
| Diametro medio       | 17,03 mm |
| Espesor del diente   | 1,01 mm  |
| paso                 | 2,30 mm  |



| DATOS DEL ENGRANAJE MOTRIZ - Z |          |
|--------------------------------|----------|
| Numero de dientes              | 26       |
| Diametro primitivo             | 52,00 mm |
| Angulo de presion              | 20       |
| Ancho de cara                  | 8,00 mm  |
| Espesor del diente             | 1,56 mm  |
| Paso                           | 3,14 mm  |

Rodamiento Axial

Corona



Rodamiento Radial Agujas

| Listado de Piezas |          |                         |             |                      |               |
|-------------------|----------|-------------------------|-------------|----------------------|---------------|
| Item              | Cantidad | Título                  | Material    | Espesor del material | Masa (Unidad) |
| 6*                | 1        | Engranaje-Motriz - Z    | Teflon      | 8,00 mm              | 0,033 kg      |
| 7                 | 2        | Corona                  | Teflon      | 9,00 mm              | 0,019 kg      |
| 8                 | 2        | Tornillo Sin Fin        | Acero 10-60 |                      | 0,050 kg      |
| 9                 | 2        | Rodamiento Axial        |             |                      | 0,014 kg      |
| 10                | 4        | Rodamiento Aguja-Radial |             |                      | 0,003 kg      |

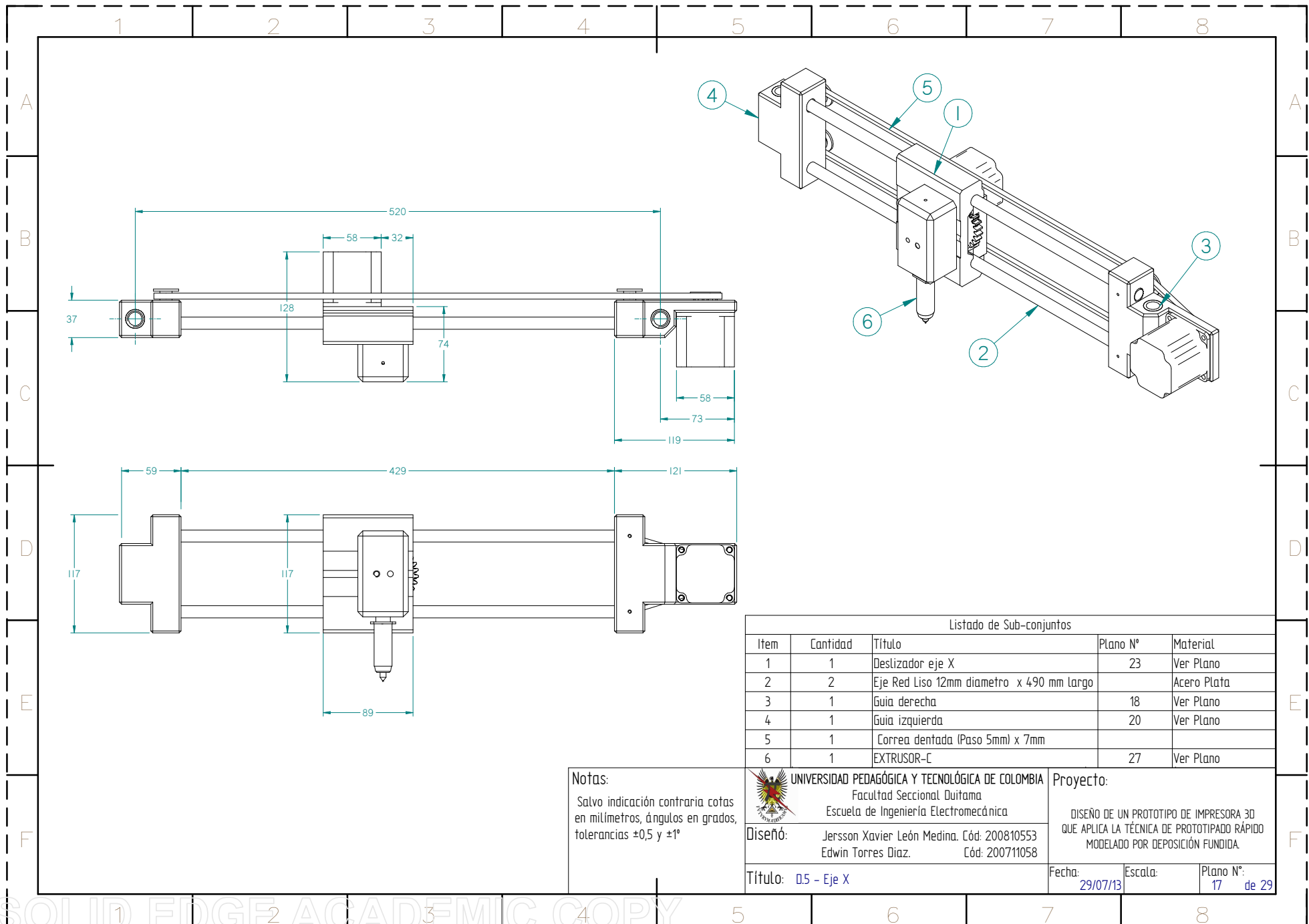
Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias ±0,5 y ±1°

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica  
Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Diaz. Cód: 200711058

Proyecto:  
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

Título: 0.4.2 - Elementos de transmisión  
Fecha: 29/07/13  
Escala: 16  
Plano N°: de 29





| Listado de Sub-conjuntos |          |                                           |          |             |
|--------------------------|----------|-------------------------------------------|----------|-------------|
| Item                     | Cantidad | Título                                    | Plano N° | Material    |
| 1                        | 1        | Deslizador eje X                          | 23       | Ver Plano   |
| 2                        | 2        | Eje Red Liso 12mm diametro x 490 mm largo |          | Acero Plata |
| 3                        | 1        | Guia derecha                              | 18       | Ver Plano   |
| 4                        | 1        | Guia izquierda                            | 20       | Ver Plano   |
| 5                        | 1        | Correa dentada (Paso 5mm) x 7mm           |          |             |
| 6                        | 1        | EXTRUSOR-C                                | 27       | Ver Plano   |

Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

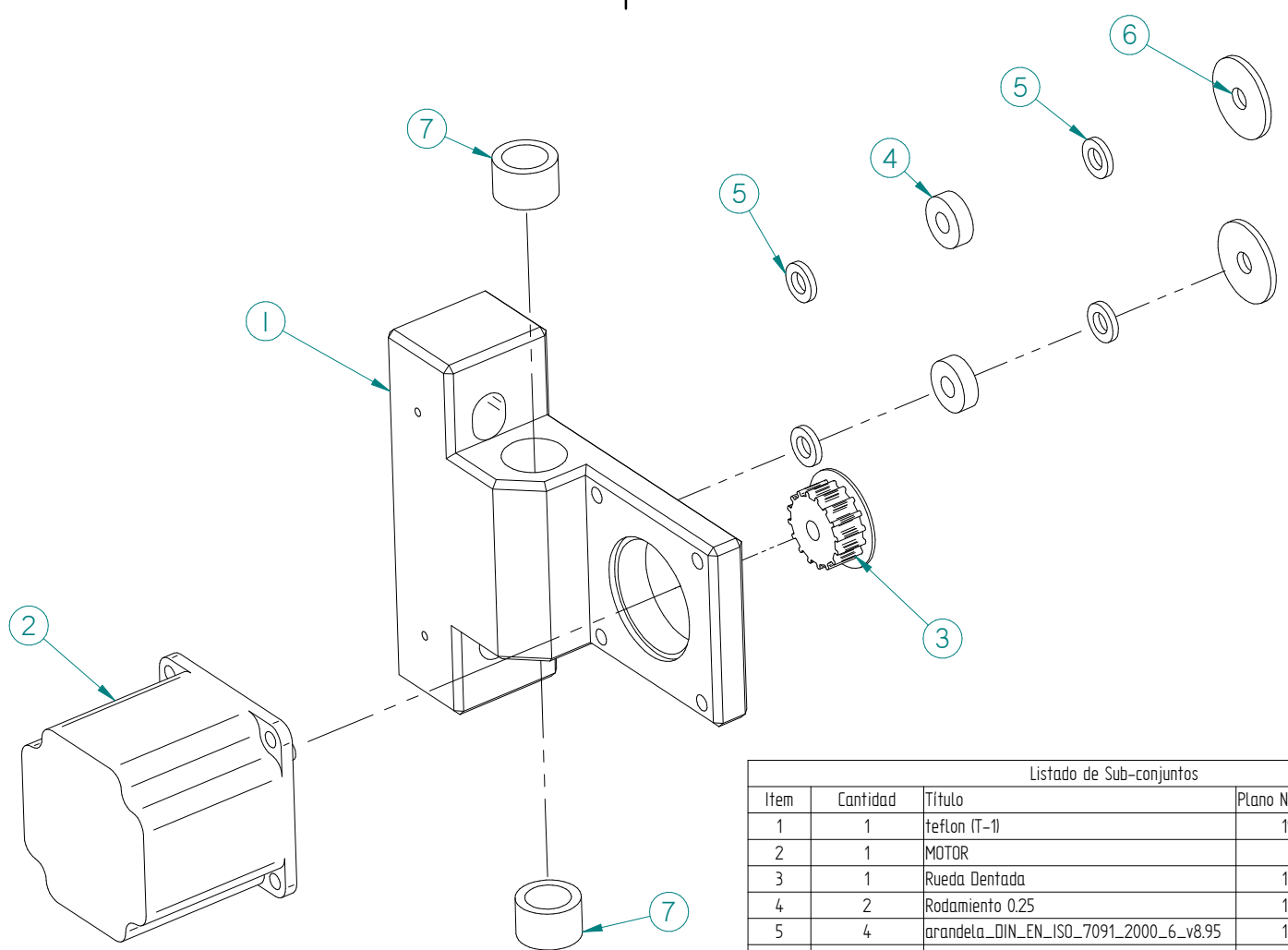
Proyecto:  
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

Título: 05 - Eje X

Fecha: 29/07/13

Escala:

Plano N°: 17 de 29



| Listado de Sub-conjuntos |          |                                       |          |           |
|--------------------------|----------|---------------------------------------|----------|-----------|
| Item                     | Cantidad | Título                                | Plano N° | Material  |
| 1                        | 1        | teflon (T-1)                          | 19       | Ver Plano |
| 2                        | 1        | MOTOR                                 |          |           |
| 3                        | 1        | Rueda Dentada                         | 13       | Ver Plano |
| 4                        | 2        | Rodamiento 0.25                       | 13       | Ver Plano |
| 5                        | 4        | arandela_DIN_EN_ISO_7091_2000_6_v8.95 | 13       | Ver Plano |
| 6                        | 2        | arandela_rodamiento                   | 13       | Ver Plano |
| 7                        | 2        | Tuerca Bronce                         | 22       | Ver Plano |

Notas:  
 Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$

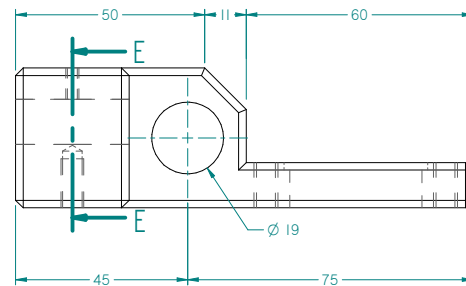
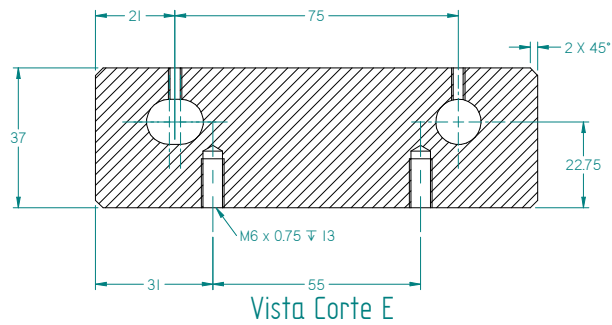
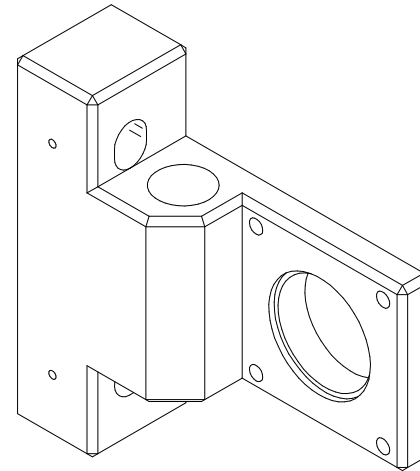
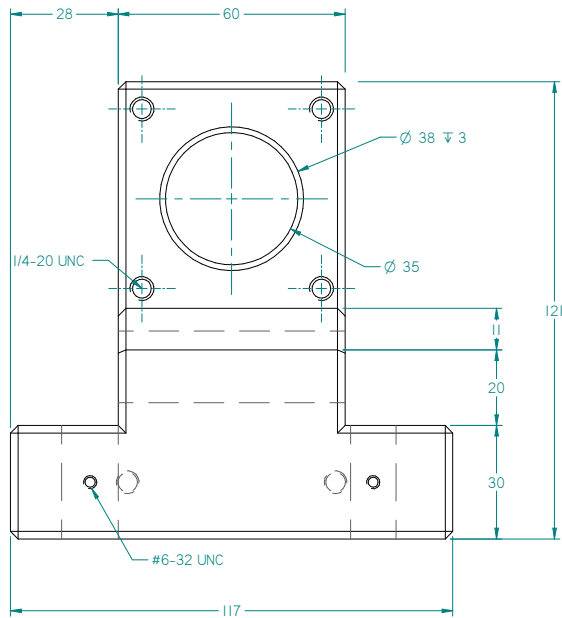
UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
 Facultad Seccional Duitama  
 Escuela de Ingeniería Electromecánica

Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
 Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

Título: 0.5.1 - Soporte Guía Derecha

Proyecto:  
 DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.


Fecha: 29/07/13 Escala: Plano N°: 18 de 29

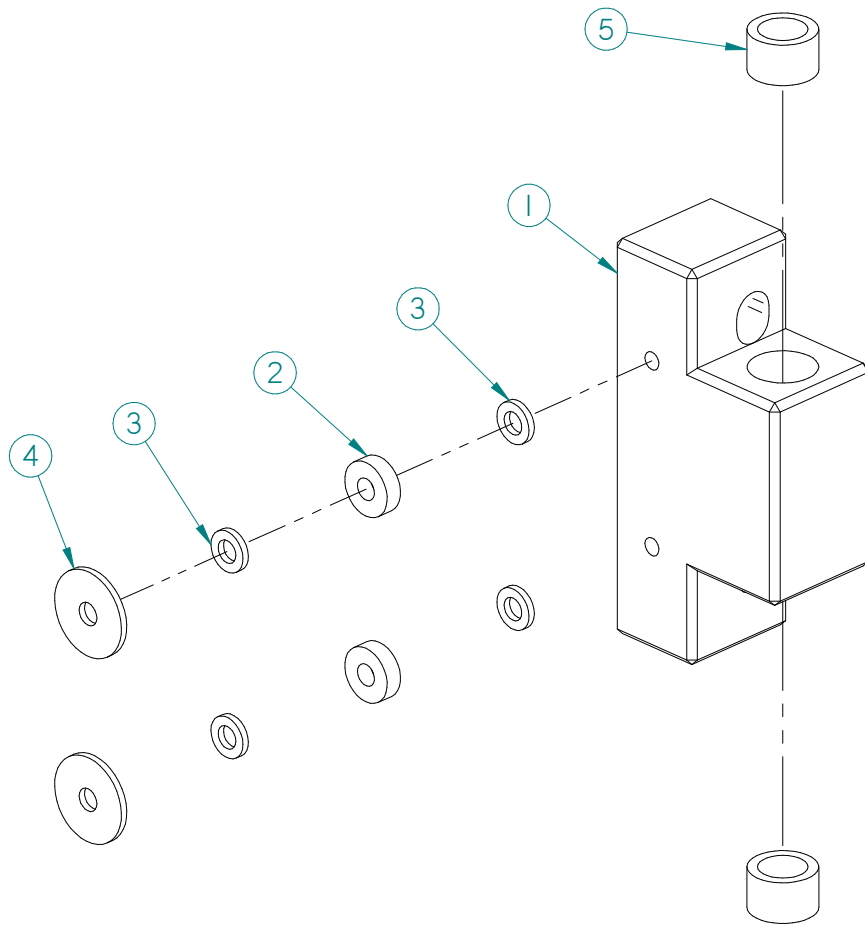


Vista Corte E

| Listado de Piezas |          |              |          |                      |               |
|-------------------|----------|--------------|----------|----------------------|---------------|
| Item              | Cantidad | Título       | Material | Espesor del material | Masa (Unidad) |
| 1*                | 1        | teflon (T-1) | Teflon   | 37,00 mm             | 0,241 kg      |

|                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Notas:</p> <p>Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias <math>\pm 0,5</math> y <math>\pm 1^\circ</math></p> |  <p>UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA<br/>Facultad Seccional Duitama<br/>Escuela de Ingeniería Electromecánica</p> | <p>Proyecto:</p> <p>DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.</p> |
|                                                                                                                                                     | <p>Diseño:</p> <p>Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553<br/>Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058</p>                                                                                                                 | <p>Fecha:</p> <p>29/07/13</p>                                                                                                               |
|                                                                                                                                                     | <p>Título:</p> <p>0.5.1.1- SOPORTE TEFLON DER</p>                                                                                                                                                                      | <p>Escala:</p> <p>19 de 29</p>                                                                                                              |



| Listado de Sub-conjuntos |          |                                       |          |           |
|--------------------------|----------|---------------------------------------|----------|-----------|
| Item                     | Cantidad | Título                                | Plano N° | Material  |
| 1                        | 1        | teflon (T-2)                          | 21       | Ver Plano |
| 2                        | 2        | rodamiento 0.25                       | 13       | Ver Plano |
| 3                        | 4        | arandela_DIN_EN_ISO_7091_2000_6_v8.95 | 13       | Ver Plano |
| 4                        | 2        | arandela_rodamiento                   | 13       | Ver Plano |
| 5                        | 2        | Tuerca Bronce                         | 22       | Ver Plano |

Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

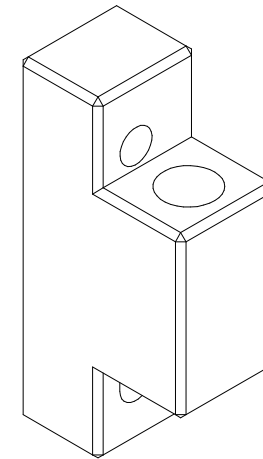
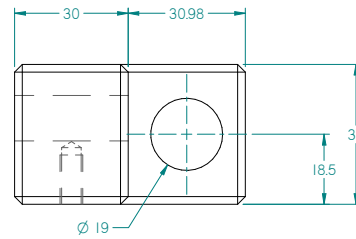
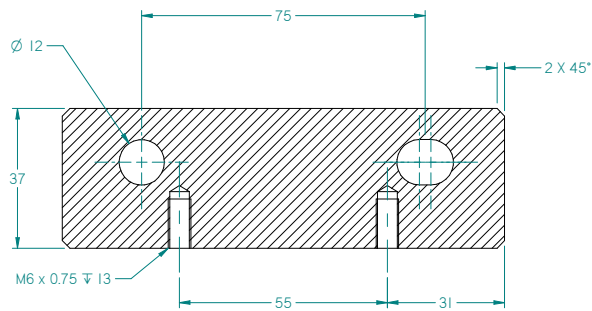
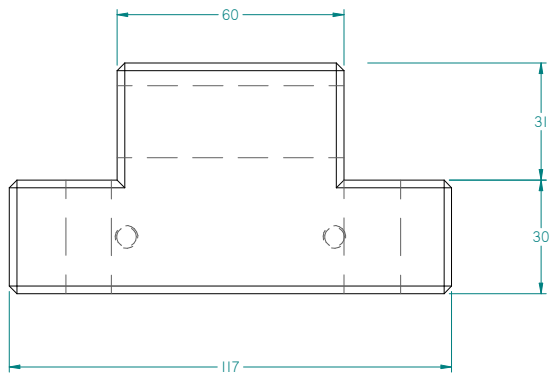
Proyecto:  
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

Título: 0.5.2 - Soporte Izquierdo

Fecha: 29/07/13

Escala:

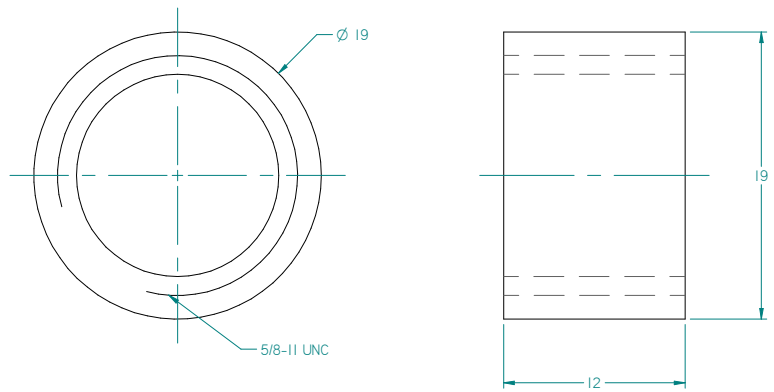
Plano N°: 20 de 29



| Listado de Piezas |          |              |          |                      |               |
|-------------------|----------|--------------|----------|----------------------|---------------|
| Item              | Cantidad | Título       | Material | Espesor del Material | Masa (Unidad) |
| 1*                | 1        | teflon (T-2) | Teflon   | 37                   | 0,209 kg      |

|                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Notas:</b><br>Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$ |  <b>UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA</b><br>Facultad Seccional Duitama<br>Escuela de Ingeniería Electromecánica | <b>Proyecto:</b><br>DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA. |
|                                                                                                                           | <b>Diseño:</b> Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553<br>Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058                                                                                                                       |                                                                                                                                         |
|                                                                                                                           | <b>Título:</b> 0.5.21- SOPORTE TEFLON IZQ                                                                                                                                                                            | Fecha: 29/07/13<br>Escala:<br>Plano N°: 21 de 29                                                                                        |



| Listado de Piezas |          |               |             |                      |               |
|-------------------|----------|---------------|-------------|----------------------|---------------|
| Item              | Cantidad | Título        | Material    | Espesor del material | Masa (Unidad) |
| 1*                | 4        | Tuerca Bronce | Bronce, 90% |                      | 0,015 kg      |

Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$

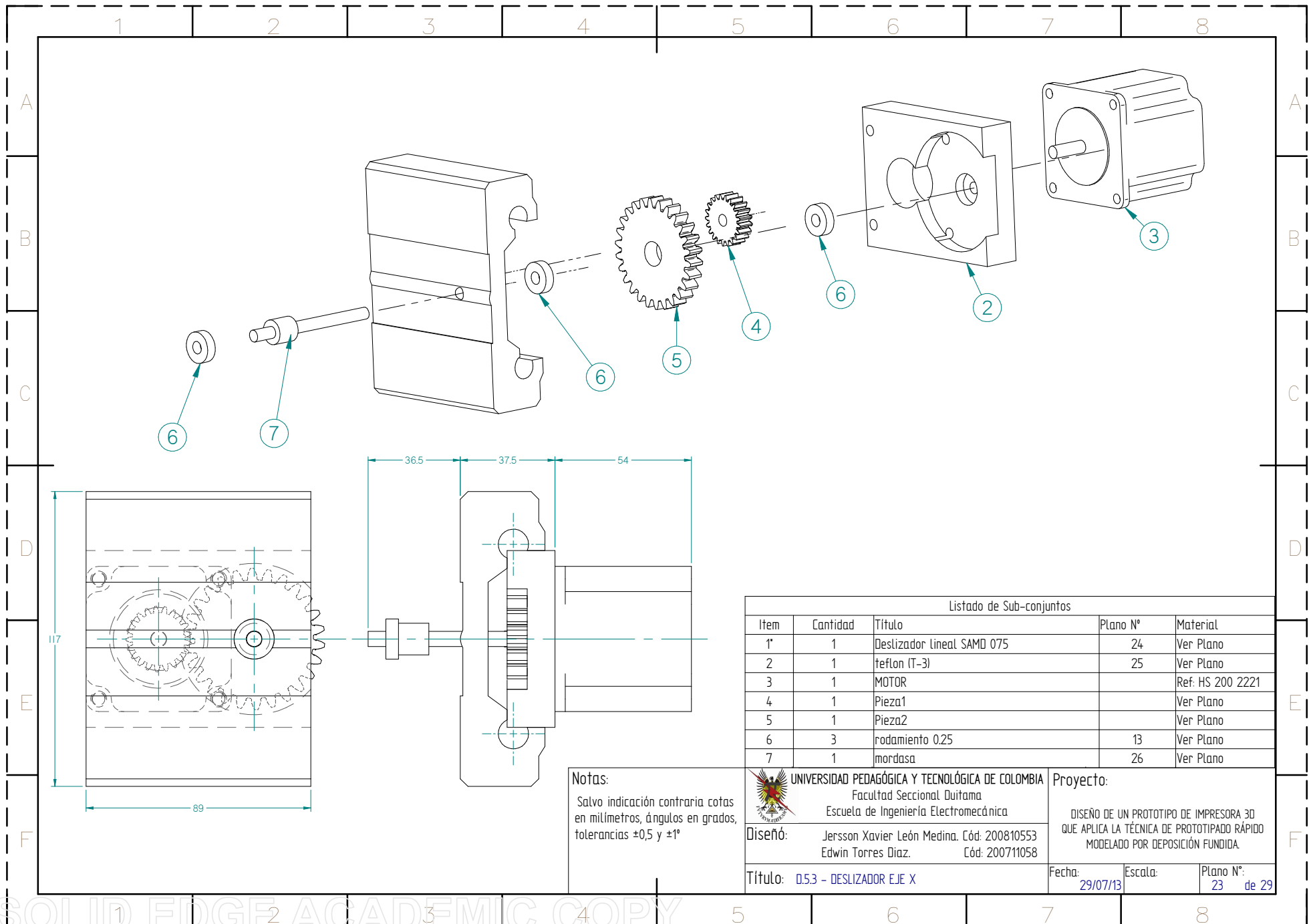
UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

Título: 5.2.2 - Tuerca Bronce

Proyecto:  
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

Fecha: 29/07/13 Escala: Plano N°: 22 de 29



| Listado de Sub-conjuntos |          |                            |          |                  |
|--------------------------|----------|----------------------------|----------|------------------|
| Item                     | Cantidad | Título                     | Plano N° | Material         |
| 1*                       | 1        | Deslizador Lineal SAMD 075 | 24       | Ver Plano        |
| 2                        | 1        | teflon (T-3)               | 25       | Ver Plano        |
| 3                        | 1        | MOTOR                      |          | Ref: HS 200 2221 |
| 4                        | 1        | Pieza1                     |          | Ver Plano        |
| 5                        | 1        | Pieza2                     |          | Ver Plano        |
| 6                        | 3        | rodamiento 0.25            | 13       | Ver Plano        |
| 7                        | 1        | mordasa                    | 26       | Ver Plano        |

Notas:  
 Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$

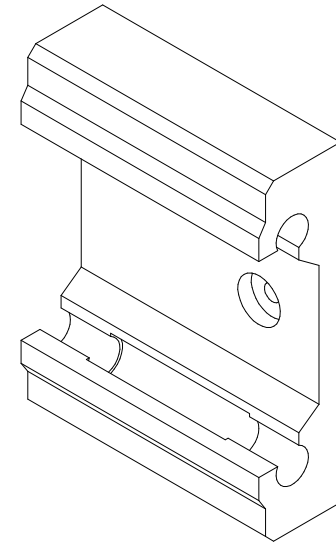
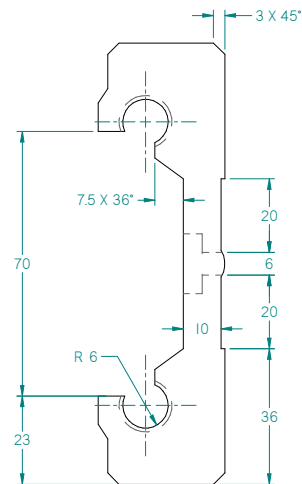
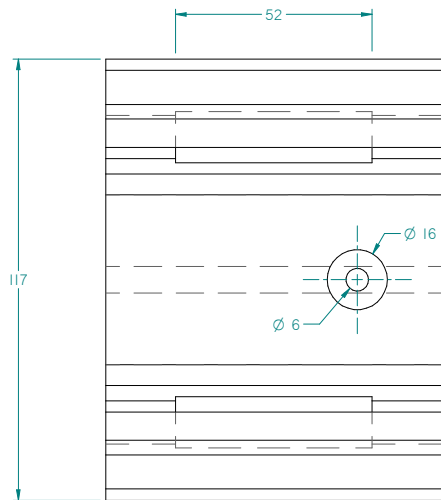
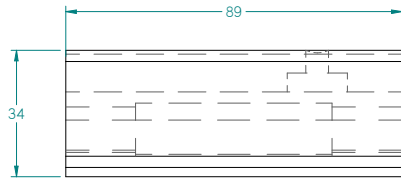
UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
 Facultad Seccional Duitama  
 Escuela de Ingeniería Electromecánica

Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
 Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

Título: 0.53 - DESLIZADOR EJE X

Proyecto:  
 DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

Fecha: 29/07/13 Escala: Plano N°: 23 de 29

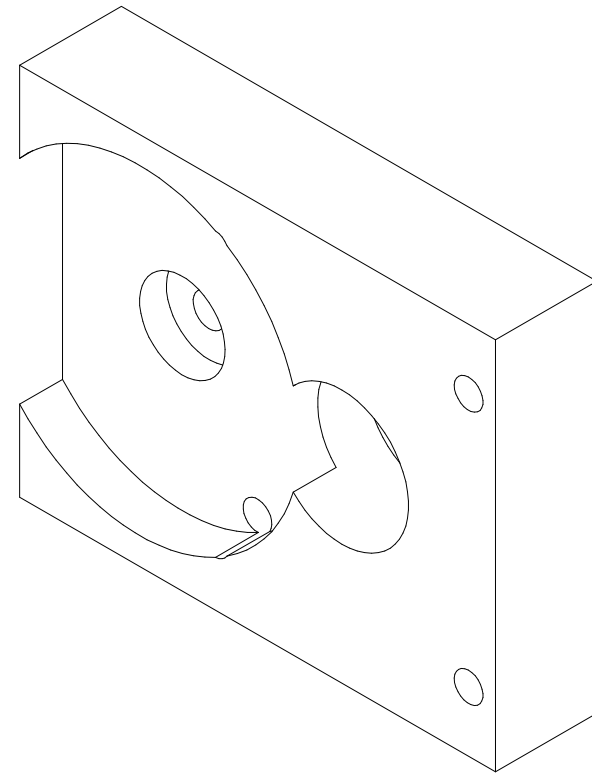
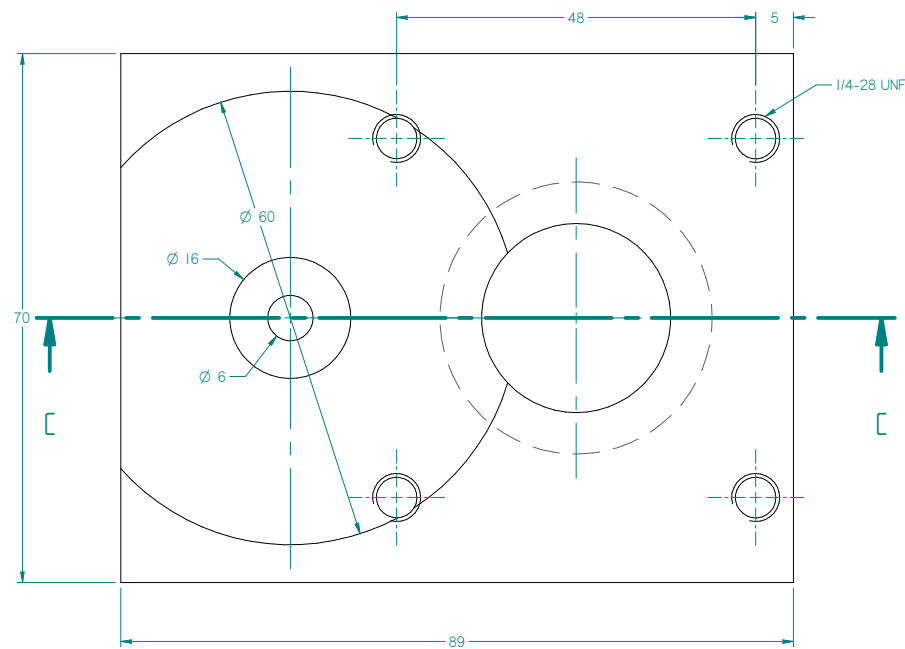
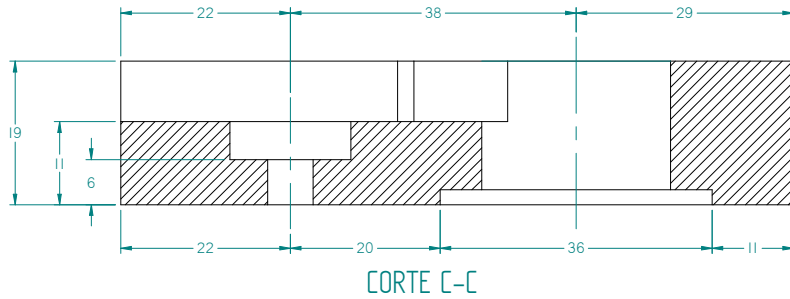


| Listado de Piezas |          |                            |                |                      |               |
|-------------------|----------|----------------------------|----------------|----------------------|---------------|
| Item              | Cantidad | Título                     | Material       | Espesor del material | Masa (Unidad) |
| 1*                | 1        | Deslizador lineal SAMD 075 | Aluminio, 1060 |                      | 0,513 kg      |

|                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                     |                        |                |                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|----------------|---------------------------|
| <b>Notas:</b><br>Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$ |  <b>UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA</b><br>Facultad Seccional Duitama<br>Escuela de Ingeniería Electromecánica | <b>Proyecto:</b>                                                                                                    |                        |                |                           |
|                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                      | DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA. |                        |                |                           |
| <b>Diseño:</b> Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553<br>Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058                            |                                                                                                                                                                                                                      | <b>Título:</b> 0.5.3.1- DESLIZADOR LINEAL                                                                           | <b>Fecha:</b> 29/07/13 | <b>Escala:</b> | <b>Plano N°:</b> 24 de 29 |



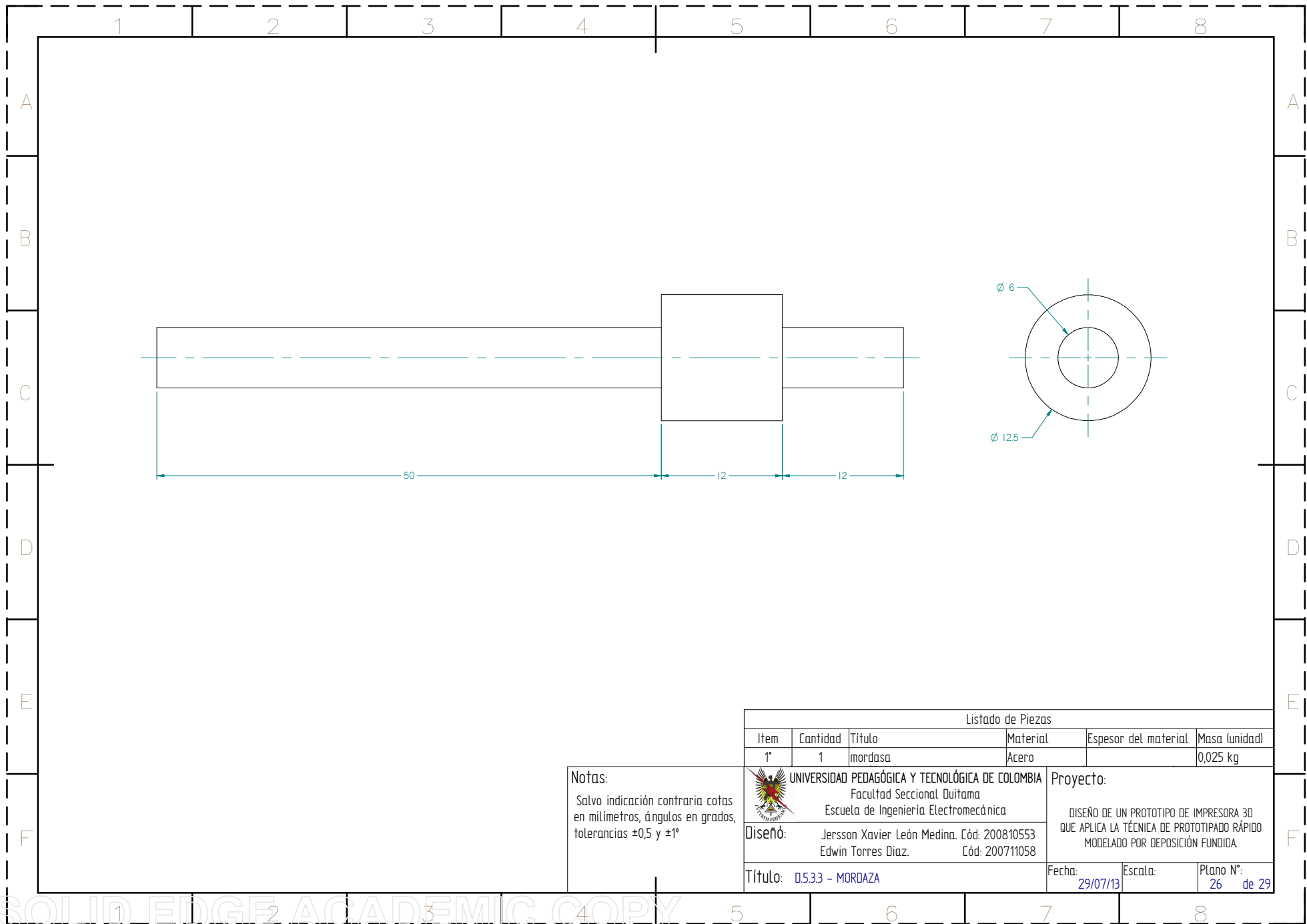


Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$

| Listado de Piezas |          |              |          |                      |               |
|-------------------|----------|--------------|----------|----------------------|---------------|
| Item              | Cantidad | Título       | Material | Espesor del material | Masa (Unidad) |
| 1*                | 1        | teflon (T-3) | Teflon   | 19,00 mm             | 0,104 kg      |


|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                                         |                                     |                        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|------------------------|
|  <b>UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA</b><br>Facultad Seccional Duitama<br>Escuela de Ingeniería Electromecánica | <b>Proyecto:</b><br>DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA. |                                     |                        |
|                                                                                                                                                                                                                      | <b>Diseño:</b><br>Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553<br>Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058                                       | <b>Título:</b> 0.5.3.2 - BASE MOTOR | <b>Fecha:</b> 29/07/13 |

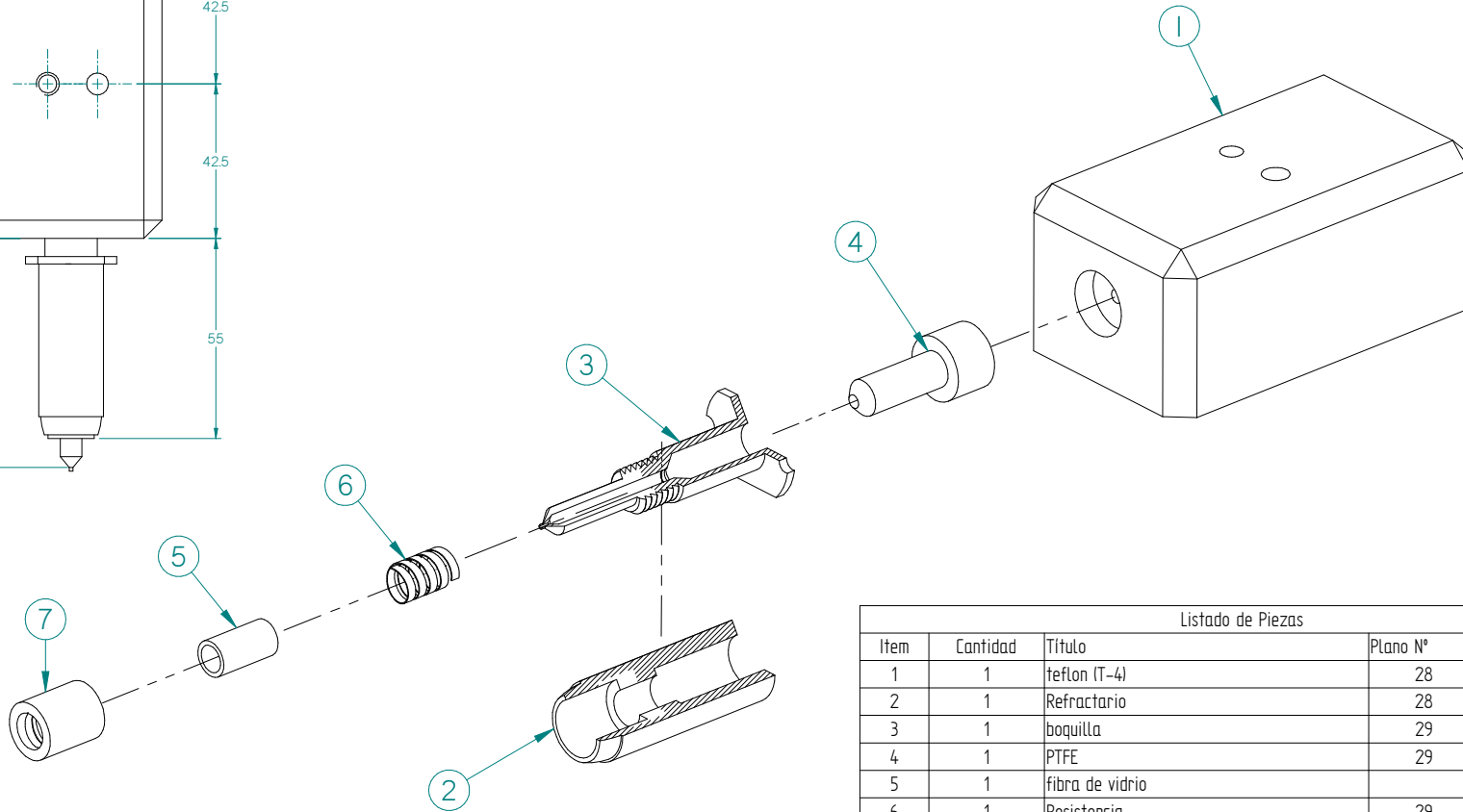
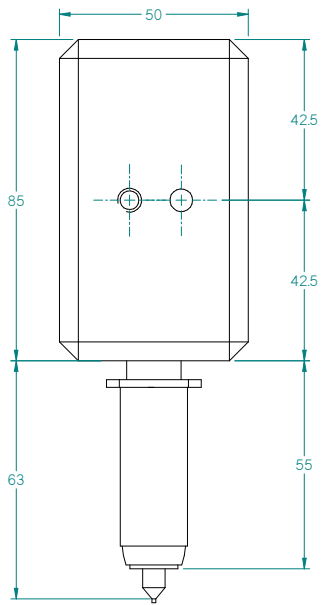


Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$

| Listado de Piezas |          |         |          |                      |               |
|-------------------|----------|---------|----------|----------------------|---------------|
| Item              | Cantidad | Título  | Material | Espesor del material | Masa (unidad) |
| 1*                | 1        | mordaza | Acero    |                      | 0,025 kg      |

|                                                                                                                                                                                                                      |                                                                                                                     |                           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
|  <b>UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA</b><br>Facultad Seccional Duitama<br>Escuela de Ingeniería Electromecánica | <b>Proyecto:</b>                                                                                                    |                           |
|                                                                                                                                                                                                                      | DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA. |                           |
|                                                                                                                                                                                                                      | <b>Diseño:</b> Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553<br>Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058                      | <b>Fecha:</b> 29/07/13    |
| <b>Título:</b> 0.533 - MORDAZA                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                     | <b>Plano N°:</b> 26 de 29 |



| Listado de Piezas |          |                      |          |                  |
|-------------------|----------|----------------------|----------|------------------|
| Item              | Cantidad | Título               | Plano N° | Material         |
| 1                 | 1        | teflon (T-4)         | 28       | Ver Plano        |
| 2                 | 1        | Refractario          | 28       | Ver Plano        |
| 3                 | 1        | boquilla             | 29       | Ver Plano        |
| 4                 | 1        | PTFE                 | 29       | Ver Plano        |
| 5                 | 1        | fibra de vidrio      |          | Fibra de vidrio  |
| 6                 | 1        | Resistencia          | 29       | Ver Plano        |
| 7                 | 1        | yeso refractario     |          | Yeso refractario |
| 8*                | 2        | arandela_DIN_EN_ISO_ | 13       | Ver Plano        |
| 9*                | 1        | rodamiento 0.25      | 13       | Ver Plano        |

Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

Título: 0.56 - EXTRUSOR

Proyecto:  
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

Fecha: 29/07/13 Escala: Plano N°: 27 de 29

1 2 3 4 5 6 7 8

A

B

C

D

E

F

A

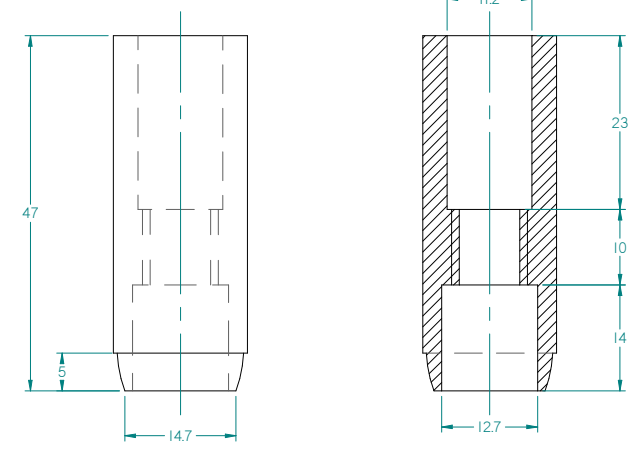
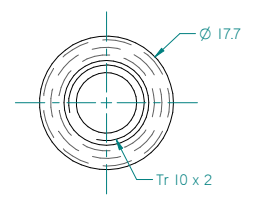
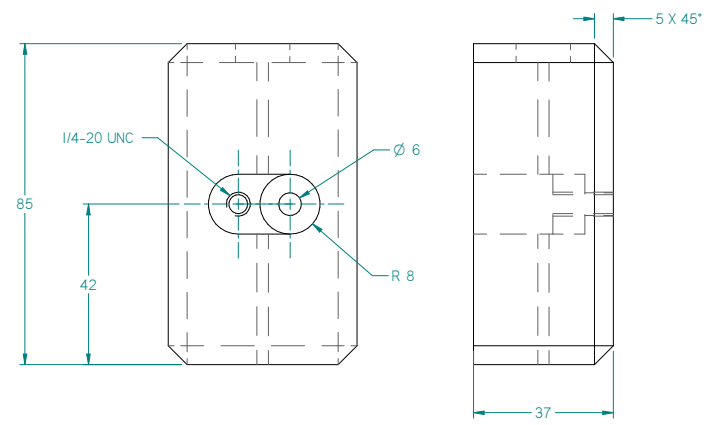
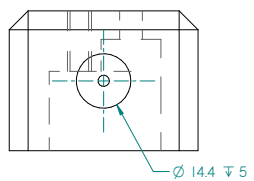
B

C

D

E

F



| Listado de Piezas |          |              |          |                      |               |
|-------------------|----------|--------------|----------|----------------------|---------------|
| Item              | Cantidad | Título       | Material | Espesor del Material | Masa (Unidad) |
| 1                 | 1        | teflon (T-4) | teflon   |                      | 0,171 kg      |
| 2                 | 1        | Refractario  | Ceramico |                      | 0,009 kg      |

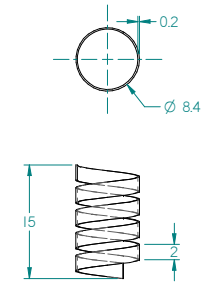
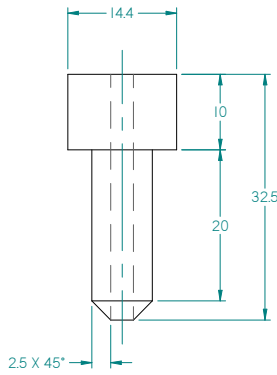
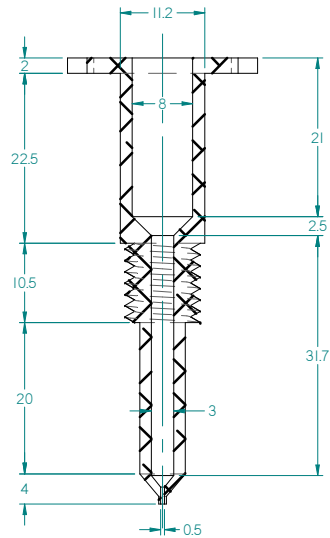
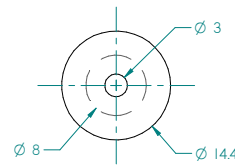
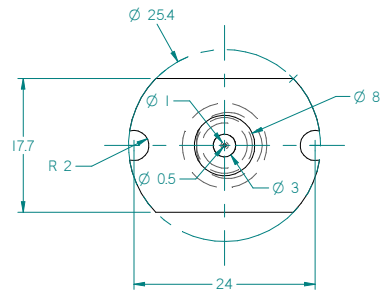
Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias ±0,5 y ±1°

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica  
Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

Proyecto:  
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

Título: 0.6.1 - PARTES EXTRUSOR  
Fecha: 29/07/13  
Escala:  
Plano N°: 28 de 29

1 2 3 4 5 6 7 8



| Listado de Piezas |          |             |           |                      |               |
|-------------------|----------|-------------|-----------|----------------------|---------------|
| Item              | Cantidad | Título      | Material  | Espesor del Material | Masa (Unidad) |
| 3                 | 1        | boquilla    | Aluminio  |                      | 0,008 kg      |
| 4                 | 1        | PTFE        | PTFE      |                      | 0,003 kg      |
| 6                 | 1        | Resistencia | Ver Plano | 0,20 mm              | 0,000 kg      |

Notas:  
Salvo indicación contraria cotas en milímetros, ángulos en grados, tolerancias  $\pm 0,5$  y  $\pm 1^\circ$

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
Facultad Seccional Duitama  
Escuela de Ingeniería Electromecánica

Diseño: Jersson Xavier León Medina. Cód: 200810553  
Edwin Torres Díaz. Cód: 200711058

Proyecto:  
DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE IMPRESORA 3D QUE APLICA LA TÉCNICA DE PROTOTIPADO RÁPIDO MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA.

Título: 0.6.2 - PARTES BOQUILLA  
Fecha: 29/07/13  
Escala:  
Plano N°: 29 de 29