UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA: INGENIERÍA ELECTRÓNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de: INGENIEROS ELECTRÓNICOS

TEMA:
"IMPLEMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA DE PROTOTIPADO RÁPIDO DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA DE BAJO COSTO BASADA EN EL PROYECTO REPLICANT RAPID PROTOTYPER (REPRAP) PARA EL LABORATORIO DE FABRICACIÓN DE LA UPS SEDE QUITO - CAMPUS SUR"

AUTORES:
JORGE WLADIMIR PASTUÑA GUANOLUISA
EDWIN GEOVANNY JARAMILLO SUÁREZ

DIRECTOR:

HAMILTON LEONARDO NÚÑEZ VERDEZOTO

Quito, mayo de 2015

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD Y AUTORIZACIÓN DE USO DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, autorizamos a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro.

Además, declaramos que los conceptos, análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Quito, mayo de 2015

Jorge Wladimir Pastuña Guanoluisa	Edwin Geovanny Jaramillo Suárez
CC: 0503503252	CC: 1720273752

DEDICATORIA

Primero a Dios, por cada minuto de existencia y bendiciones que he recibido a lo largo de la vida, a mi padre Agustín, mi madre Luz por todo el esfuerzo y sacrificio que han realizado día a día, por sus consejos y comprensión, por darme el apoyo en cada etapa de mi vida.

Jorge W. Pastuña G.

Primero a Dios, por cada minuto de existencia y bendiciones que he recibido a lo largo de la vida, a mis padres Olga y Juan por todo el esfuerzo que han hecho por mí para culminar esta etapa de mi vida con satisfacción.

Edwin G. Jaramillo S.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Universidad Politécnica Salesiana por apoyar este trabajo de investigación, proporcionando los equipos y materiales necesarios para la realización del mismo y a los docentes por los conocimientos impartidos en nuestra formación académica.

A nuestro tutor el Ing. Hamilton Leonardo Núñez Verdezoto que a lo largo de este proceso ha sabido guiarnos de forma concisa para la culminación de este trabajo, gracias por el apoyo y confianza durante el desarrollo de este proyecto.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN **1**

CAPÍTULO 1 ..... **2**

ANTECEDENTES **2**

1.1 Planteamiento del problema 2

1.2 Objetivos 2

1.2.1 Objetivo general. 2

1.2.2 Objetivos específicos 2

1.3 Justificación del proyecto 3

1.4 Alcance 3

CAPÍTULO 2 ..... **4**

ESTADO EL ARTE **4**

2.1 Sistema de coordenadas de dos ejes 4

2.1.1 Sistema de coordenadas y control de movimientos en el control numérico 5

2.2 Control numérico computacional (CNC) 6

2.2.1 Precisión de mecanizado en CNC 6

2.2.2 Programación para CNC 7

2.3 Procesos de manufactura para prototipado rápido 8

2.3.1 Modelado por deposición fundida (FDM) 8

2.3.2 Estereolitografia (SLA) 9

2.3.3 Sinterizado selectivo con láser (SLS) 10

2.3.4 Fabricación de objetos laminados (LOM) 10

2.4 Diseño asistido por computadora (CAD) 11

2.5 Manufactura asistida por computadora (CAM) 12

2.6 Manufactura integrada por la computadora (CIM) 13

2.7 Herramientas para el diseño 14

2.7.1 Diseño para la fabricación (DFM) 14
2.7.2 Diseño para el montaje (DFA) 15
2.7.3 Diseño para la calidad (DFQ)..... 15
2.7.4 Diseño para el entorno (DFE) 15
CAPÍTULO 3..... 17
IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA 17
3.1 Características funcionales 17
3.2 A Estructura y ejes de movimiento 19
3.2.1 Componentes imprimibles..... 19
3.2.2 Componentes no imprimibles..... 20
3.2.3 Sistema de movimientos..... 21
3.2.4 Carcasa.. 22
3.3 B Mecanismos de transmisión..... 22
3.3.1 Sistema transmisión en el eje X 23
3.3.1.1 Correa de sincronización y poleas..... 23
3.3.2 Sistema de transmisión guiada del eje Y por rodamientos 24
3.3.3 Sistema transmisión en el eje Z por tornillo-tuerca 26
3.3.4 Pre-actuador drivers 27
3.3.5 Motor a pasos 28
3.3.5.1 Conexionado de motores a pasos para Ramp 1.4..... 28
3.3.6 Sensores de posición (ZE)..... 29
3.4 C Sistema extrusor 30
3.4.1 Filamento ABS 31
3.4.2 Sensor de temperatura PT-100 31
3.5 D Cama caliente Mki2 32
3.5.1 NTC SMD-1206..... 32

3.6 E Electrónica Arduino Mega-Ramps 1.4 33
3.6.1 Fuente de alimentación 36
3.7 F Flujo grama del montaje 36
3.8 Despiece sistema de máquina de prototipado rápido 38
3.9 Sistema informático 40
3.9.1 Arduino 5.1 40
3.9.1.1 Interfaz de comunicación 40
3.9.2 Marlin Rev. 1.1 41
3.9.3 Repetier-Host 43
3.9.3.1 Formato .stl (Stereo Lithography) 44
3.9.3.2 Código G 44
3.9.3.3 Slicer…. 49
3.10 Diagramas de flujo 51
CAPÍTULO 4 55
APLICACIÓN 55
4.1 Consideraciones para una óptima impresión 55
4.1.1 Cambio de material de trabajo 55
4.1.2 Configuración de PID de cama caliente y extrusora 56
4.1.3 Prevención del pandeo 58
4.2 Prueba de elongación en la impresión de prueba 58
4.2.1 Diagrama esfuerzo deformación 61
4.3 Proceso CAD/CAM 63
4.3.1 Encendido y apagado de la máquina 66
4.3.2 Prueba de Homing de los ejes 67
4.3.3 Ortogonabilidad de ejes X, Y 67
4.3.4 Nivelación de la base de la cama caliente 68

4.3.5 Altura del Eje Z 69
4.3.6 Manufactura de la carcasa del cargador portátil 70
4.3.8 Pruebas de geometría 71
4.3.9 Microscopia 74
4.4 Análisis de costos 79
4.5 Procedimiento de mantenimiento 82
4.5.1 Mantenimiento preventivo 82
4.5.1.1 Procedimiento de limpieza de la impresora 3D 82
4.5.1.2 Procedimiento de limpieza de los componentes principales 82
4.5.1.3 Ensamblaje del equipo 83
4.5.2 Mantenimiento correctivo 83
4.5.2.1 Procedimientos para verificar fallas en la fuente de poder 83
4.5.2.3 Procedimientos para verificar averías en la Ramp y el Arduino. 84
CONCLUSIONES 85
RECOMENDACIONES 86
LISTA DE REFERENCIAS 87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Plano de trabajo en el torno. 4

Figura 2. Plano de coordenadas 3D. 5

Figura 3. Sistema de posicionamiento CN. 5

Figura 4. Componentes de un sistema CNC moderno. 6

Figura 5. Diferencia entre precisión y repetibilidad. 7

Figura 6. Elementos del sistema. 9

Figura 7. Partes del proceso de estereolitografía. 9

Figura 8. Proceso SLS. 10

Figura 9. Partes del Proceso LOM. 11

Figura 10. Vistas de referencia. 12

Figura 11. CAM y PLM. 13

Figura 12. Niveles de integración contra la evolución CIM. 13

Figura 13. Principales elementos CIM. 14

Figura 14. Ejemplo de evolución de estrategias de mantenimiento a batidora. 16

Figura 15. Máquina de prototipado rápido implementada. 17

Figura 16. Dimensiones del soporte acrílico. 19

Figura 17. Componentes imprimibles. 20

Figura 18. Componentes no imprimibles. 20

Figura 19. Ejes de movimiento de máquina de prototipado rápido. 21

Figura 20. Coordenadas seguidas por el código. 22

Figura 21. Vista isométrica de la carcasa. 22

Figura 22. Dimensiones del sistema de transmisión eje X. 23

Figura 23. Sistema de transmisión eje X 24

Figura 24. Vista constructiva del sistema guiado del eje Y. 25

Figura 25. Sistema de transmisión eje Y. 26

Figura 26. Sistema de transmisión tornillo-tuerca 26
Figura 27. Vista constructiva sistema de transmisión eje Z 27
Figura 28. Driver A4988 28
Figura 29. Diagrama de conexionado motores a paso 29
Figura 30. Finales de carrera montados en ejes X, Y, Z 30
Figura 31. Cama caliente Dual ubicación NTC 32
Figura 32. Arduino Mega descripción de pines 33
Figura 33. Ubicación de elementos en la Ramps 1.4. 34
Figura 34. Montaje de la electrónica Arduino-Ramp. 34
Figura 35. Diagrama de conexionado Ramp 1.4 35
Figura 36. Fuente de poder. 36
Figura 37. Diagrama de flujo de montaje 38
Figura 38. Descripción de la máquina de prototipado rápido 39
Figura 39. Selección de Arduino Mega 2560 40
Figura 40. Interface de comunicación PC-Arduino 41
Figura 41. Sketch de configuración general 42
Figura 42. Configuración de diversas marcas de elementos 42
Figura 43. Ventana principal del programa Repetier-Host 43
Figura 44. Objeto 3D en formato stl 44
Figura 45. Cargando archivo stl. 46
Figura 46. Ventana principal del Repetier-Host. 46
Figura 47. Visualización previa de la impresión 47
Figura 48. Generación de código G. 47
Figura 49. Control manual 48
Figura 50. Configuración de impresora 48
Figura 51. Parámetros de impresión Slicer 49

Figura 52. Parámetros de filamento..... 50
Figura 53. Parámetros de la máquina de prototipado rápido..... 51
Figura 54. Diagrama de flujo principal 52
Figura 55. Diagrama de flujo subrutina comunicación 52
Figura 56. Subrutina del movimiento de mecanismos en forma manual 53
Figura 57. Diagrama de flujo subrutina manual. 54
Figura 58. Diagrama de flujo subrutina en modo automático 54
Figura 59. Configuración del PID para la temperatura 56
Figura 60. Configuración PID software Marlin 57
Figura 61. Pandeo del modelo impreso 58
Figura 62. Segmentos de la probeta. 59
Figura 63. Probetas impresas. 59
Figura 64. Prueba de elongación a la probeta. 61
Figura 65. Diagrama de Esfuerzo - Deformación. 62
Figura 66. Curvas típicas de polímeros de alta y baja densidad. 63
*Figura 67.*Modelo de una caja acotada en AutoCAD 63
*Figura 68.*Importación del sólido al software Repetier Host 64
Figura 69. Modelo 3D visualizada en capas. 64
*Figura 70.*Código G1 X28.833 Y71.850 E1.09624 F900.000 66
*Figura 71.*Código G1 X98.495 Y69.193 E3.35269 66
*Figura 72.*Ventana de control del Repetier host 67
*Figura 73.*Prueba de los movimientos X, Y 67
Figura 74. Nivelación de la cama caliente. 68
Figura 75. Calibración de la cama caliente. 68
Figura 76. Nivelación de la cama caliente del eje Z. 69
Figura 77. Ventana de curva de temperatura y de control manual. 70

Figura 78. Cama caliente con cinta térmica. 70

Figura 79. Impresión de una caja. 71

Figura 80. Carcasa con empotramiento y hueco. 72

Figura 81. Medición del error de extrusión de la caja. 73

Figura 82. Medición del error de extrusión de la tapa. 74

*Figura 83.*Microscopio portátil. 74

Figura 84. Vista en Microscopio de las capas. 75

Figura 85. Surcos formados entre la carcasa-tapa. 75

Figura 86. Vista en Microscopio de las capas de la tapa 76

Figura 87. Deformación de capa lineal. 77

Figura 88. Rugosidad en las caras de la carcasa. 77

Figura 89. Variación de la altura de las piezas. 78

Figura 90. Corte transversal de la tapa de la carcasa. 78

Figura 91. Impresora 3D Hephestos 81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Organización de los procesos 8
Tabla 2. Puntos de interés en requerimientos de calidad. 15
Tabla 3. Descripción de parámetros del sistema 18
Tabla 4. Elementos para sincronización 24
Tabla 5. Características de rodamientos 25
Tabla 6. Ventajas y desventajas de sistema tornillo-tuerca 27
Tabla 7. Propiedades físicas mecánicas ABS 28
Tabla 8. Características del extrusor 30
Tabla 9. Propiedades físicas mecánicas ABS 31
Tabla 10. Características del PT100 31
Tabla 11. Características de la cama caliente 32
Tabla 12. Características Arduino Mega 2560 33
Tabla 13. Características de la Ramp 1.4 35
Tabla 14. Conexión de jumpers 36
Tabla 15. Actividades de montaje 37
Tabla 16. Simbología. 38
Tabla 17. Lista de elementos principales 39
Tabla 18. Lista de elementos principales 45
Tabla 19. Dimensiones de la probeta 59
Tabla 20. Tolerancias de dimensiones de la probeta 60
Tabla 21. Datos tomados de cada probeta en el ensayo 60
Tabla 22. Resultados para las pruebas de esfuerzo-deformación 62
Tabla 23. Códigos G de inicio para la máquina de prototipado rápido 65
Tabla 24. Dimensiones de la carcasa 72
Tabla 25. Dimensiones de la tapa 73

Tabla 26. Costos de insumos. 79

Tabla 27. Costo de mano de obra. 80

Tabla 28. Costo final del proyecto. 80

Tabla 29. Impresora 3D Hephestos de venta en el mercado. 81

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Diagrama de conexiones del Arduino Mega 2560 90

Anexo 2. Diagrama de conexiones de la Ramp 1.4 91

Anexo 3. Ventanas de configuración principal del firmware 92

Anexo 4. Ventana de pre visualización y configuración del Repetier Host..... 93

Anexo 5. Ventanas de configuración del Slicer 94

Anexo 6. Montaje del Motor del eje Y, polea tensa correa T2.5 y marco 95

Anexo 7. Montaje del "belt holder" o soporte de correa T 2.5 95

Anexo 8. Vista de montaje eje X y Z 95

Anexo 9. Ubicación de la cama caliente 96

Anexo 10. Ubicación de finales de carrera 96

Anexo 11. Integración de sistemas y actuadores de la máquina 97

RESUMEN

Teniendo en cuenta que una de las múltiples áreas en la ejecución de diferentes tipos de prácticas de diseño concurrente para los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electrónica corresponde al prototipado rápido que crea modelos tridimensionales como artículos terminados, se plantea la implementación de un sistema mecatrónico en el laboratorio de fabricación de la UPSQ-SUR, que integra diversas áreas de la ingeniería mecánica, electrónica, de control e informática, formando una sinergia que conduce a una máquina automatizada que responde a las necesidades técnicas y requerimientos de prototipado rápido que aplica la técnica de modelado por deposición fundida, la cual fabrica una pieza diseñada en el ordenador a escala real por medio de extrusión de polímero ABS por capas y el posicionamiento de una herramienta (extrusor) en tres dimensiones.

La metodología planteada contempla el proceso de análisis e implementación de la impresora, teniendo en cuenta las variables y técnicas necesarias para la respuesta de la máquina en el acabado superficial de la pieza, tiempo de impresión, paradas de emergencia, entre otras para obtener y cumplir así con los objetivos planteados en este proyecto.

Las metas alcanzadas responden a la implementación del sistema de posicionamiento tridimensional, un componente para la extrusión del material, la selección de sensores y actuadores y la determinación del sistema de control, satisfaciendo las características de movimiento determinado por la respuesta que entrega el software de modelamiento a través de la conversión del modelo CAD a código de estereolitografía (STL) y finalmente a código G, a partir del cual se responde a las coordenadas de posición y a las características de dosificación. El extrusor se analiza y selecciona teniendo en cuenta las propiedades de un polímero termoplástico para fundirlo y depositarlo capa sobre capa durante la manufactura del prototipo. El sistema es gobernado por una plataforma Arduino para la programación e integración de componentes. La máquina implementada ha permitido evaluar el cumplimiento de las especificaciones de funcionamiento y determinar las características del posicionamiento tridimensional integrado con la herramienta de extrusión.

ABSTRACT

Considering that one of the many areas in the implementation of different types of concurrent design practices for students in the career of Electronic Engineering corresponds to the rapid prototyping to create three-dimensional models as finished goods, the implementation of a mechatronic system in laboratory manufacturing UPSQ-SUR, which integrates several areas of mechanical engineering, electronics, control and information, forming a synergy leading to an automated machine that meets the technical needs and requirements of a rapid prototyping machine that technique applies fused deposition modeling, which manufactures a computer piece designed in full scale by extrusion ABS polymer layers and positioning a tool (extruder) in three dimensions.

The proposed methodology includes the analysis process and implementation of the printer, taking into account the variables and techniques necessary for machine response regarding the surface finish of the piece, print time, emergency stops, including for and thus fulfill the objectives of this project.

The goals achieved respond to the implementation of three-dimensional positioning system, a component for the extrusion of the material, the selection of sensors and actuators and the determination of the control system, meeting the specific characteristics of movement for delivering software response modeling through conversion of the CAD model code stereo lithography (STL) and finally G code, from which it responds to the position coordinates and dosing characteristics. The extruder is analyzed and selected in consideration of the properties of a thermoplastic polymer to melt and deposit layer to layer during manufacture of the prototype. The system is governed by an Arduino platform for programming and integration of components. The implemented machine has allowed assessing compliance with performance specifications and determine the characteristics of integrated extrusion tool dimensional positioning.

INTRODUCCIÓN

La máquina de prototipado rápido se ha desarrollado desde hace varios años atrás al observar la necesidad de una tecnología que permita fabricar prototipos de piezas, entre las más conocidas por sus bajos costos están las impresoras 3D de modelado por deposición fundida pudiendo usar materiales termoplásticos Poliácido Láctico (PLA) y Acridonitrilo Butadieno Estireno (ABS) en la creación de piezas tridimensionales beneficiando el desarrollo de sinergia en diversas áreas de la ingeniería y atenuar las limitaciones de construcción con tecnología de manufactura por capas en el laboratorio de fabricación de la UPSQ-SUR.

El presente proyecto se enmarca dentro del análisis e implementación del sistema de posicionamiento tridimensional y la aplicación, de un algoritmo de control, utilizando herramientas de automatización, de posicionamiento mecánico, de informática y de electrónica. Para la manufactura de los prototipos que ayudarán a la experimentación, aprendizaje, pruebas y evaluación de los conceptos de diseño consolidando la formación académica de los estudiantes en el desarrollo de prototipos para investigación y didácticos.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 Planteamiento del problema

Hoy en día en el sector manufacturero ecuatoriano la tecnología de prototipado rápido es poco difundida a pesar de que varias compañías se benefician de este método de fabricación, éste proceso pasa desapercibido en la industria ecuatoriana debido a varios factores como: escaso desarrollo de tecnología propia, poco uso de la maquinaría computer-aided-manufacturing (CAM) en la industria nacional, escasas fuentes de inversión nacional y costos excesivos lo que genera baja competitividad a nivel internacional.

En la actualidad el laboratorio de fabricación de la UPSQ-SUR no cuenta con una máquina de prototipado que permita atenuar las limitaciones de construcción con tecnología de manufactura por capas y acceder a la creación de prototipos que ayuden a la experimentación, aprendizaje, pruebas y evaluación de los conceptos de diseño dados en la carrera, viéndose afectados los estudiantes en su formación académica además de no desarrollar prototipos para investigación haciendo uso de los recursos existentes dentro del laboratorio de fabricación.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general.

Implementar una máquina de prototipado rápido de modelado por deposición fundida de bajo costo basado en el hardware mecánico del proyecto RepRap mediante la programación y desarrollo de los sistemas electrónicos de control en el laboratorio de fabricación de la UPSQ-SUR.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Analizar el hardware y el software para comprender el principio de funcionamiento de las máquinas de prototipado rápido del proyecto RepRap.
- Desarrollar el control electrónico para el movimiento cartesiano de los motores a pasos integrados en el hardware mecánico a fin de mitigar errores de precisión.

- Programar el controlador electrónico mediante firmware para la interacción con el hardware de los sistemas electrónicos y de control.
- Comprobar el funcionamiento de la máquina de prototipado rápido para realizar una evaluación de precisión en base a las existentes en el mercado ecuatoriano.

1.3 Justificación del proyecto

La máquina de prototipado rápido formará parte del inventario de la Universidad Politécnica Salesiana contribuyendo a la ejecución de diferentes tipos de prácticas de diseño concurrente. Docentes y estudiantes de la carrera de Ingeniería Electrónica se beneficiarán directamente de la máquina, ya que podrán realizar creaciones propias tridimensionales a partir de un archivo CAD atenuando la limitación de diseñar y crear prototipos de acuerdo a las necesidades que se presentan en la elaboración de los diferentes proyectos técnicos e introduciendo a los estudiantes a una nueva tecnología de manufactura escalable con diversas líneas de investigación y gran sinergia de conocimientos.

1.4 Alcance

El proyecto pretende la implementación de una máquina de prototipado rápido que por medio del modelado por deposición fundida se pueda obtener prototipos plásticos mediante la programación en software libre de la placa madre basada en un micro controlador que procesará los datos adquiridos de los diferentes sensores de los sistemas de control y determinará el control de los motores a pasos por medio de las placas electrónicas del control (drivers) logrando la automatización del proceso de la creación de piezas tridimensionales plásticas, todo esto ensamblada en la estructura mecánica del proyecto RepRap.

CAPÍTULO 2

ESTADO EL ARTE

2.1 Sistema de coordenadas de dos ejes

Un sistema de coordenadas se utiliza para especificar ubicaciones en concreto ya sea en un plano o en el espacio con dos o tres coordenadas respectivamente.

En Control Numérico (CN) se utilizan dos tipos fundamentales de coordenadas:

- Coordenadas cartesianas o rectangulares.
- Coordenadas polares.

Dentro de las coordenadas cartesianas existen dos tipos:

- Coordenadas 2D (en un plano).
- Coordenadas 3D (en el espacio).

Las coordenadas 2D se utilizan fundamentalmente en el torno, pues dispone solo de un plano de trabajo en el que mueve la herramienta o en la fresadora cuando el desplazamiento se realice exclusivamente a lo largo de cualquier plano de los tres que dispone ver figura 1.

Torno

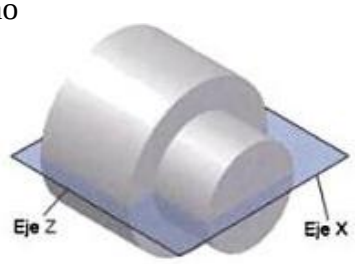


Figura 1. Plano de trabajo en el torno.
Fuente: (Teruel, 2005)

"Las coordenadas 3D quedan exclusivamente para máquinas con más de dos ejes y trabajos simultáneos, como es el caso de la fresadora siempre que el movimiento se realice en los tres ejes" (Teruel, 2005). Ver figura 2.

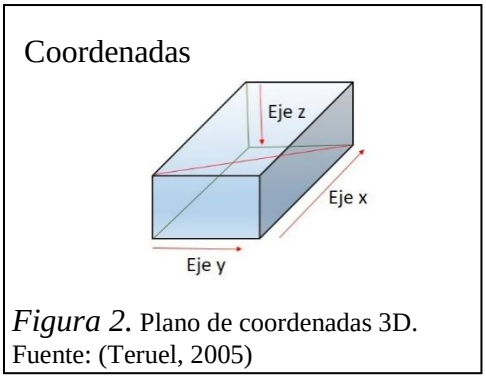


Figura 2. Plano de coordenadas 3D.
Fuente: (Teruel, 2005)

Las coordenadas polares definen el punto utilizando la apertura de un ángulo con centro en el origen y la longitud de un radio que parte del mismo punto, es decir el cruce entre el ángulo (arco) y la línea de radio, determina el punto que no es diferente a las rectangulares, sino que definen el mismo punto utilizando otros datos.

2.1.1 Sistema de coordenadas y control de movimientos en el control numérico

Para especificar las posiciones en el control numérico se usa un sistema de ejes de coordenadas cartesianas (X, Y, Z), además de tres ejes rotatorios (a, b, c) como se muestra en la figura 3. Los ejes rotatorios se presentan para que la parte de trabajo gire y presente diferentes superficies durante el maquinado, o para orientar la herramienta o cabezal de sujeción en relación con la parte de trabajo. Los sistemas de control numérico sencillos son sistemas de posicionamiento cuyas ubicaciones se definen en un plano x-y. (Groover, 1997)

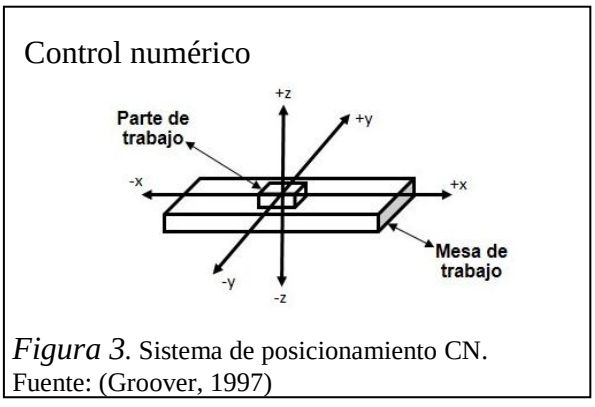


Figura 3. Sistema de posicionamiento CN.
Fuente: (Groover, 1997)

2.2 Control numérico computacional (CNC)

Una máquina CNC (Computer Numerical Control) ver figura 4 es una NC con la característica adicional de un ordenador, el cual se convierte en la unidad de control de la máquina (MCU) o de otra manera "softwired" lo que significa que las funciones de máquina son codificadas dentro de la misma al momento de la manufactura y no se borraran al apagar la máquina, dependiendo del lugar de almacenamiento ROM o RAM. Esto no se da en las máquinas NC las cuales son "hardwired" donde las funciones de máquina son controladas por elementos electrónicos físicos constituidos en un controlador. (Bollinger, 1988)

CNC moderno

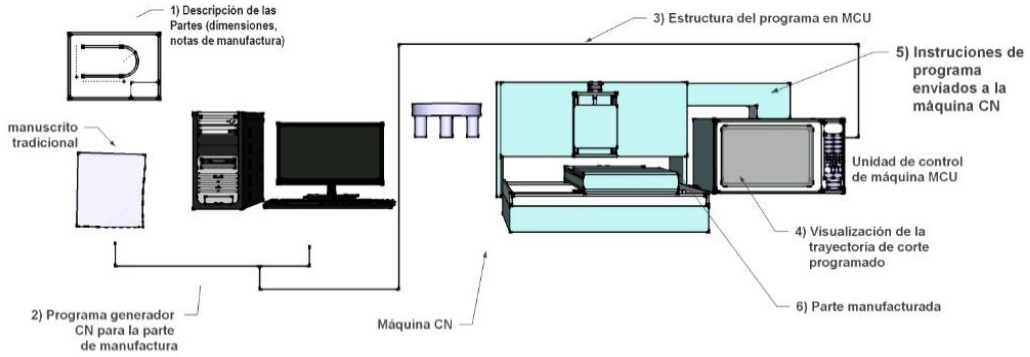


Figura 4. Componentes de un sistema CNC moderno.
Fuente: (Bollinger, 1988)

2.2.1 Precisión de mecanizado en CNC

La combinación de características de la máquina herramienta y el control determina la precisión de posicionamiento, donde existen tres medidas:

- Control de Resolución
- Control de Exactitud
- Control de Repetibilidad

Control de resolución (BLU): "es la distancia de separación entre dos puntos adyacentes en el eje de movimiento es decir el cambio de posición más pequeño" (Groover, 1997).

Por ejemplo el ángulo de paso en los motores a pasos (lazo abierto) o el ángulo entre las ranuras en el encoder (lazo cerrado).

Control de exactitud: “depende de la resolución, los algoritmos de control por computadora y de las inexactitudes de la máquina” (Groover, 1997)

Control de repetibilidad: es la capacidad de un sistema de posicionamiento para volver a un punto programado, se mide en términos de los errores asociados con el punto programado. La repetibilidad es siempre mejor que la exactitud. La inexactitud mecánica puede ser considerada como la repetibilidad. La figura 5 muestra la diferencia entre la precisión y la repetibilidad. (Groover, 1997)

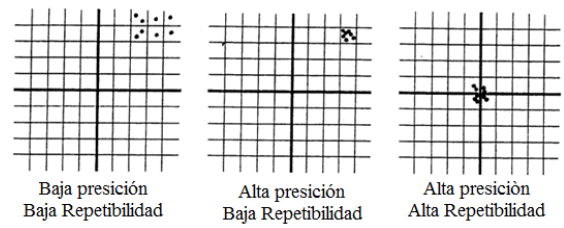


Figura 5. Diferencia entre precisión y repetibilidad. Fuente: (Groover, 1997)

2.2.2 Programación para CNC

La programación CNC, o control numérico computacional, es una serie de comandos que le indica qué hacer a la máquina CNC. Parecido a las oraciones, cada línea tiene una serie de comandos que permiten cortar y dar forma a una serie de materiales, incluyendo metal, madera y plástico. El código G es un lenguaje de programación CNC universal que funciona en todas las máquinas CNC, pero muchos fabricantes también disponen de un lenguaje de propietario que por lo general es más fácil de usar y entender. Esta programación conversacional luego es convertida por la máquina al código G (Groover, 1997).

2.3 Procesos de manufactura para prototipado rápido

Los procesos de manufactura son actividades y operaciones relacionadas, ordenadas y consecutivas, a través del uso de máquinas-herramientas o equipos, con el fin de transformar materiales para la obtención de un producto industrial. En la tabla 1, se presenta una propuesta general de clasificación de los procesos de manufactura, organizada por categorías (Alberto, 2013).

Tabla 1.

Organización de los procesos

	1ª CATEGORÍA	2ª CATEGORÍA
PROCESOS DE MANUFACTURA	CONFORMACIÓN POR DESPRENDIMIENTO DE MATERIAL	MAQUINADO
	CONFORMACIÓN FORZADA	CONFORMACIÓN PLÁSTICA MECÁNICA
		PULVIMETALURGIA
		CONFORMACIÓN TÉRMICA
		MATERIALES SINTÉTICOS
	COMPLEMENTARIOS	DUREZA
		ACABADOS
		ENSAMBLES

Nota. (Alberto, 2013)

En la actualidad existen varias formas para realizar prototipos funcionales en un lapso de tiempo que determina el proceso aditivo, el cual forma el prototipo capa por capa, la diferencia entre cada proceso es el método que se realiza en el corte de cada capa.

2.3.1 Modelado por deposición fundida (FDM)

En este proceso, una cabeza extrusora controlada por un autómata colgado en un puente se mueve en dos direcciones principales sobre la mesa como se observa en la figura 6. La mesa se puede subir o bajar lo necesario. Se extruye un filamento de material termoplástico por el pequeño orificio de un dado calentado.

La capa inicial se deposita sobre una base de espuma, extruyendo el filamento a velocidad constante mientras la cabeza del extrusor sigue una trayectoria

predeterminada. Cuando se termina la primera capa, la mesa baja para que se pueda sobreponer las capas siguientes.

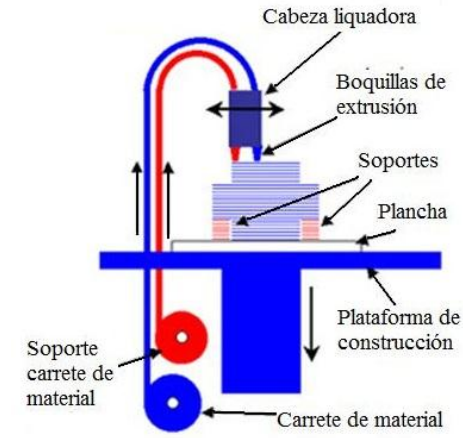


Figura 6. Elementos del sistema.
Fuente: (Kalpakjian, 2002)

2.3.2 Estereolitografia (SLA)

"Este proceso se basa en el principio de curar un fotopolímero líquido moldeado en forma esférica" (Kalpakjian, 2002). Un depósito que contiene un mecanismo para bajar o subir una plataforma, se llena con un polímero líquido de acrilato foto curable. En la figura 7 se aprecia un láser en forma de un rayo ultravioleta que se enfoca en cierta superficie seleccionada del fotopolímero, el haz cura esa parte del fotopolímero y con ello se produce un cuerpo sólido.

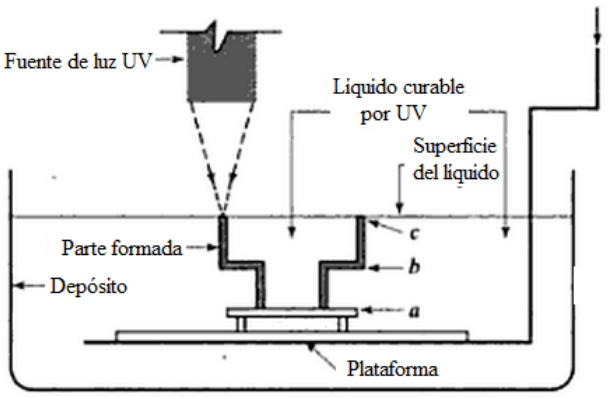


Figura 7. Partes del proceso de estereolitografía.
Fuente: (Kalpakjian, 2002)

2.3.3 Sinterizado selectivo con láser (SLS)

La figura 8 muestra el proceso de sinterizado por polvos no metálicos depositados en capas de unas décimas de milímetro, en una cuba que se ha calentado a una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión del polvo. Seguidamente un láser CO2 sinteriza el polvo en los puntos seleccionados (causando que las partículas se fusionen y solidifiquen).

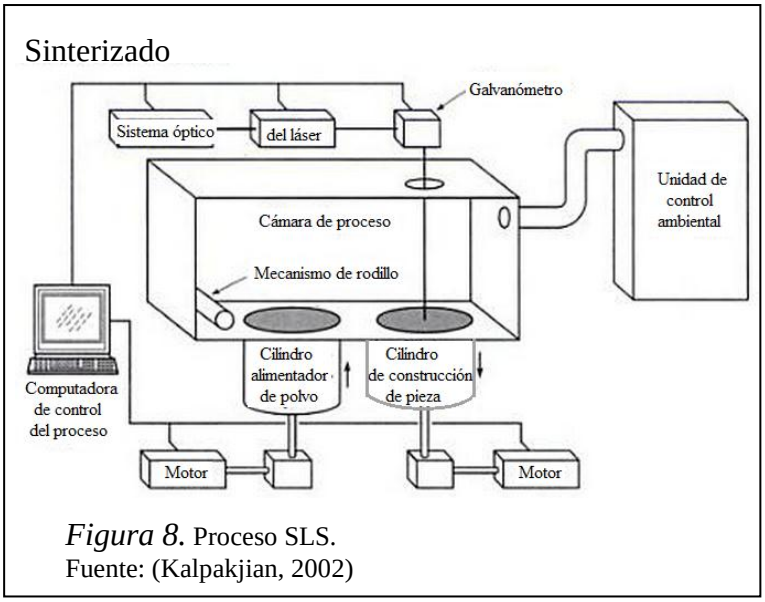


Figura 8. Proceso SLS.
Fuente: (Kalpakjian, 2002)

2.3.4 Fabricación de objetos laminados (LOM)

Esta técnica consiste en recortar sobre láminas, las secciones transversales del objeto a reproducir. Los perfiles son cortados en papel u otro material por medio de un láser o cuchillas de corte como se aprecia en la figura 9.

> El papel se desenrolla de una bobina, que primero se une a la capa anterior por medio de un rodillo calefaccionado que funde un adhesivo plástico. Los perfiles son trazados con láser por medio de un sistema de ópticas que se mueve en el plano X-Y (Kalpakjian, 2002).

Laminación de objetos

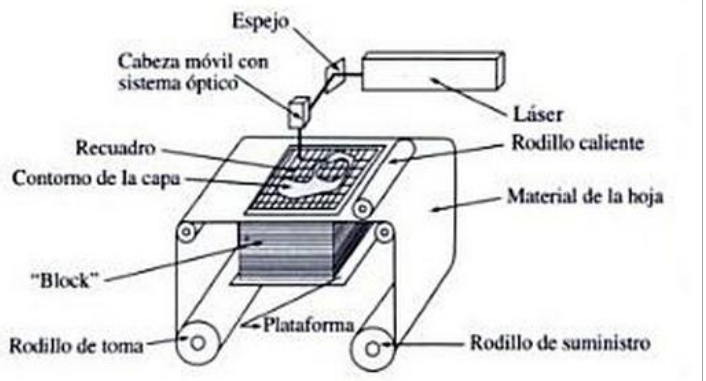


Figura 9. Partes del Proceso LOM.
Fuente: (Kalpakjian, 2002)

2.4 Diseño asistido por computadora (CAD)

"Computer Aiden Design (CAD) ha ayudado de forma impresionante en el desarrollo y modelamiento de tecnología asistida por computadora al poder crear códigos de programas para generar formas geométricas, ya sean en 2D o 3D" (Shih, 2013). Ver figura 10.

CAD 2D puede dibujar sólo objetos de dos dimensiones y es mejor para dibujar proyecciones ortográficas tradicionales. Pueden realizarse dibujos de tres dimensiones con CAD 2D utilizando técnicas de perspectiva tradicionales. CAD 3D permite que el diseñador modele objetos y produzca varias vistas de un diseño simplemente rotando el modelo. Las proyecciones ortográficas pueden realizarse con cámaras especiales y planos fotográficos. Todas las computadoras son capaces de utilizar software CAD, sin embargo deben verificarse las especificaciones de la computadora sobre el uso de un programa particular CAD 3D.

El CAD 3D generalmente ofrece más funciones al diseñador. Estas funciones incluyen matrices de tres dimensiones y vistas de referencia especiales ver figura 10. Pero puede que no necesites todas las funciones de la aplicación tridimensional y que las dos dimensiones se ajusten a tus necesidades.

"Para la mayoría de la gente, las funciones básicas, como capas, tipos y grosores de líneas, es suficiente y muchos jamás utilizan las funciones y características de tres dimensiones" (eHow en Español).

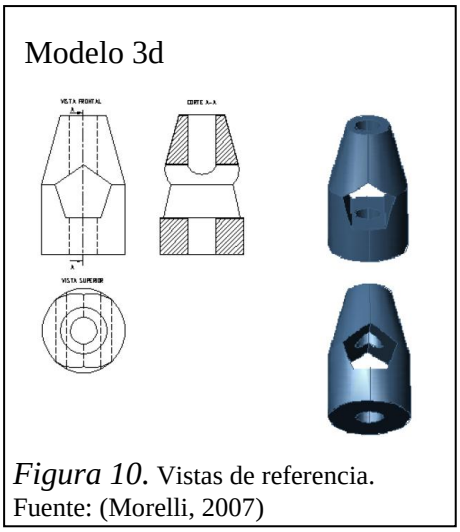


Figura 10. Vistas de referencia.
Fuente: (Morelli, 2007)

2.5 Manufactura asistida por computadora (CAM)

"Computer Aidded Manufacturing (Manufactura Asistida por Computadora) es un paso posterior al CAD, en ámbitos como la mecánica, y se caracteriza por la generación de códigos específicos interpretables por máquinas de control numérico utilizadas en la fabricación de piezas" (Informática-Hoy)

Los fabricantes de diferentes industrias dependen de las capacidades de las CAM para producir partes de alta calidad, incluye el uso de aplicaciones computacionales para definir proyectos de manufactura para el diseño de herramientas, diseño asistido por computadora (CAD) para la preparación de modelos, programación NC, programación de la inspección de la máquina de medición (CMM), simulación de máquinas de herramientas o post-procesamiento.

"El plan es entonces ejecutado en un ambiente de producción, como control numérico directo (DNC), administración de herramientas, maquinado CNC, o ejecución de CCM incluyendo un plan de manufactura correctamente definido que genera los resultados de producción esperados" (Siemens).

Los sistemas CAM avanzados, integrados con la administración del ciclo de vida del producto (PLM) ver figura 11 proveen planeación de manufactura y personal de producción con datos y administración de procesos para asegurar el uso correcto de datos y recursos estándar, pueden integrarse con sistemas DNC para entrega y administración de archivos a máquinas de CNC en el piso de producción.

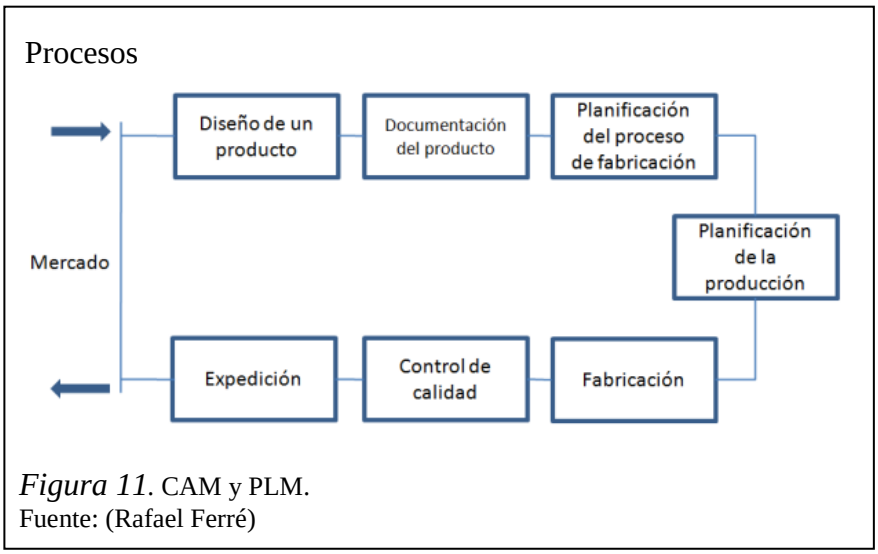


Figura 11. CAM y PLM.
Fuente: (Rafael Ferré)

2.6 Manufactura integrada por la computadora (CIM)

La Manufactura Integrada por Computadora es un método de manufactura en el cual la producción es controlada por una computadora, depende de procesos de control de lazo cerrado, basados en entradas en tiempo real desde sensores. Se considera una evolución natural de la tecnología de CAD-CAM que lleva a la integración de la empresa de fabricación la figura 12 indica los diferentes niveles de esta integración que se ve dentro de una industria (P. Radhakrishnan, 2008)

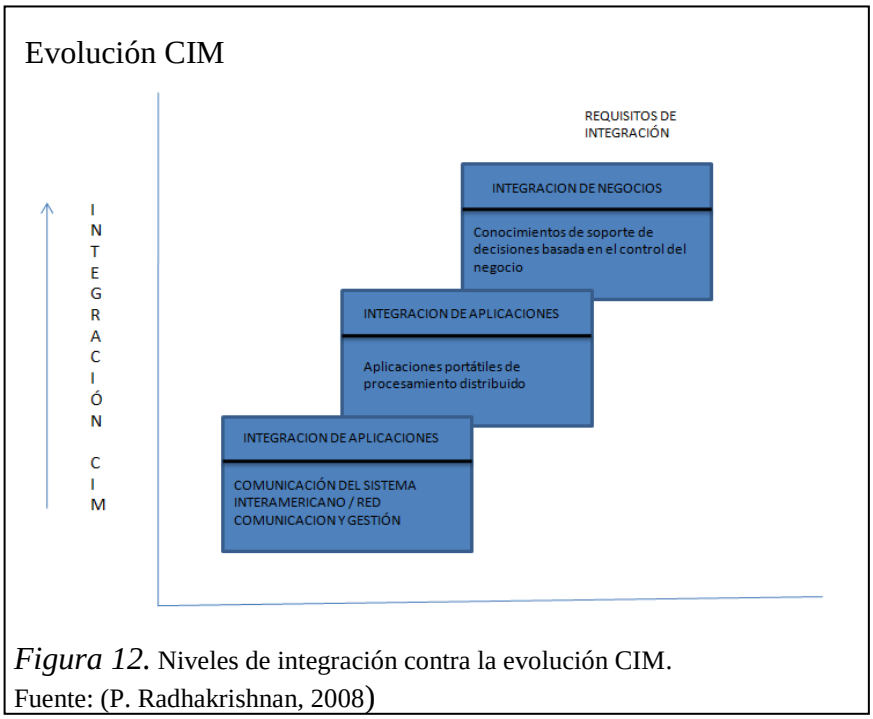


Figura 12. Niveles de integración contra la evolución CIM.
Fuente: (P. Radhakrishnan, 2008)

CIM abarca varios tipos de sistemas, no todos utilizados en las diferentes clases de industrias. Incluyen las que se han clasificado como: aplicaciones de negocios o en sistemas de administración de la información. De éstas se concluye los nueve elementos principales mostradas en la figura 13.

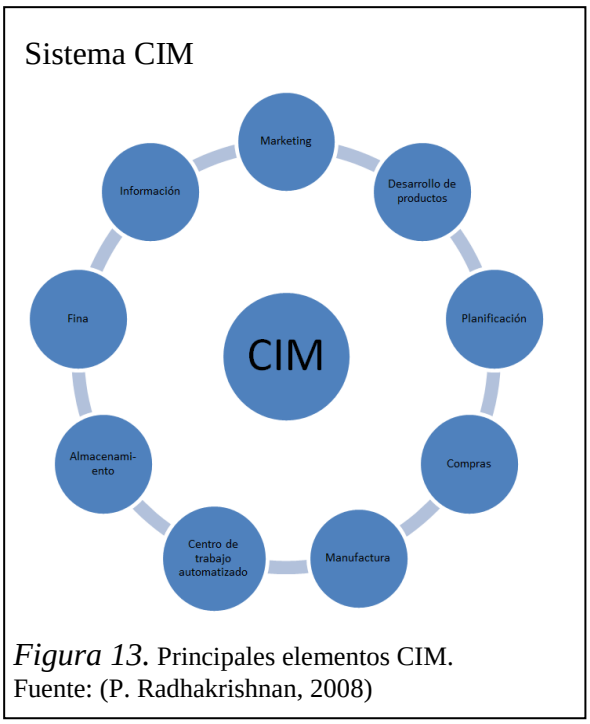


Figura 13. Principales elementos CIM.
Fuente: (P. Radhakrishnan, 2008)

2.7 Herramientas para el diseño

La ingeniería concurrente es la unión de varios procedimientos que sirven para reducir los tiempos que se utilizan en el desarrollo de proyectos, teniendo en cuenta la calidad del producto, considerando desde el principio todos los elementos del ciclo de vida de un producto con ayuda de las herramientas descritas a continuación (Riba, 2002)

2.7.1 Diseño para la fabricación (DFM)

El Diseño para la fabricación es el primer paso en el camino hacia la ingeniería concurrente a lo largo del proceso de desarrollo del producto. Un buen DFM se traduce en una reducción de los costes de producción sin sacrificar la calidad del producto (Riba, 2002)

2.7.2 Diseño para el montaje (DFA)

El montaje de un producto consiste en la manipulación y composición de diversas piezas y componentes, la unión entre ellas, su ajuste, la puesta a punto y la verificación de un conjunto para que el mismo adquiera la funcionalidad para la cual ha sido concebido (Riba, 2002)

2.7.3 Diseño para la calidad (DFQ)

Esta es una nueva perspectiva de la ingeniería concurrente que incorpora la consideración de los requerimientos de calidad desde la etapa de diseño hasta la etapa de fabricación ver tabla 2.

Tabla 2.

Puntos de interés en requerimientos de calidad

1	Asegura que el producto o servicio responda a los requerimientos y necesidades de los usuarios.
2	Establece criterios, parámetros y tolerancias adecuados para una fabricación y un funcionamiento robusto del producto (poco sensibles a perturbaciones).
3	Concibe los productos para que los procesos de fabricación y montaje faciliten una producción sin errores y con los mínimos costes e incidencias.
4	Asegura que el producto o servicio funcione sin fallos durante su utilización o, en caso necesario, que su mantenimiento y reparación sean los adecuados. Si un diseño no tiene en cuenta los objetivos de la calidad, es difícil que en etapas posteriores (fabricación, comercialización, utilización) se pueda corregir eficazmente sus consecuencias negativas.

Nota. (Riba, 2002)

2.7.4 Diseño para el entorno (DFE)

"Cada día aumenta el número de circunstancias alrededor de los productos, máquinas y sistemas que inciden y condicionan su diseño desde numerosos puntos de vista, tendencia que probablemente no hará más que ir en aumento" (Riba, 2002).

• La disponibilidad de los productos y sistemas

• La relación hombre-máquina

• La seguridad de las máquinas

• El ahorro energético y los impactos ambientales

• La problemática del fin de vida de los productos

Debido a las tendencias ya sea de mercado o de clientes el producto debe mantenerse en constante evolución como se aprecia en el ejemplo de la figura 14

Evolución del producto

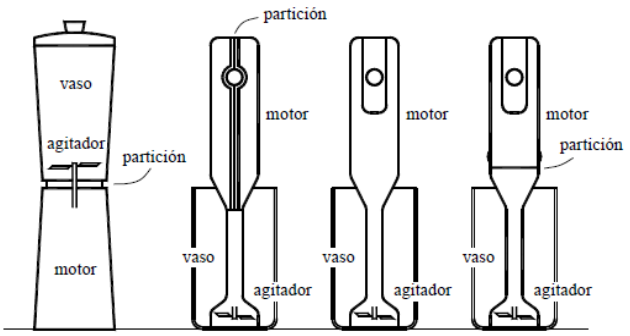


Figura 14. Ejemplo de evolución de estrategias de mantenimiento a batidora. Fuente: (Riba, 2002)

CAPÍTULO 3

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA

3.1 Características funcionales

Las funciones que se enlistan a continuación indican el trabajo que debe realizar la máquina de prototipado rápido de la figura 15 y en la tabla 3 sus parámetros principales:

- Transmitir movimiento lineal hacia los ejes cartesianos con posicionamiento manual y automático.
- Transmitir potencia a un mecanismo que permita mover linealmente el filamento sólido de polímero hacia el fundidor de la máquina.
- Calentar el polímero hasta llevarlo a una temperatura de fundición y velocidad configurable para extruir polímeros PLA y ABS.
- Calentar la base de deposición hasta la temperatura adecuada para cada material.

Máquina

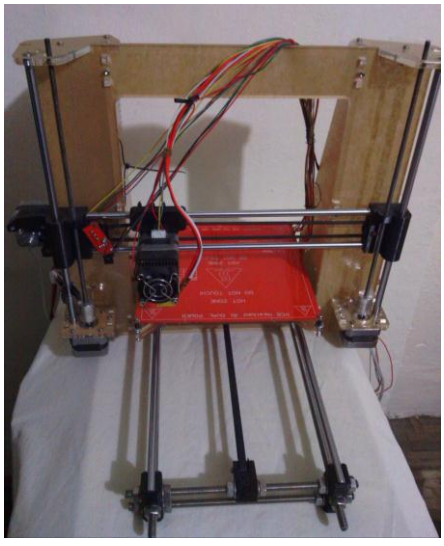


Figura 15. Máquina de prototipado rápido implementada.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

Tabla 3.
Descripción de parámetros del sistema

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Accionamiento	Eléctrico a 110 VAC
Tamaño estimado	Altura=50(cm), Ancho=(60cm), Alto=(60cm)
Peso estimado	10 Kg.
Estructura mecánica	Estructura rígida liviana, que permita la estabilidad total pese a vibraciones.
Material de extrusión y espesor de capa	Filamento plástico estandarizados ABS ø1.75mm, 0.25 (mm) por capa.
Medidas máximas del modelo impreso	(200x200x200) mm^3, porque es el volumen que se ajusta a las dimensiones máximas de la máquina.
Temperatura de trabajo	Materiales y componentes adecuados para trabajar con temperaturas de alrededor de 240ºC (según la temperatura de extrusores comerciales).
Tipo de software	Open-Source

Nota. Parámetros para la implementación de la máquina de prototipado rápido.
Elaborado por: Jorge Pastuña

En base a esto se describe la estructuración de la Prusa i3:

A. Estructura y ejes de movimiento
B. Mecanismos de transmisión
C. Extrusor
D. Base de Deposición
E. Electrónica
F. Sistema de control software e interfaces

3.2 A Estructura y ejes de movimiento

La estructura de soporte de los ejes de la Prusa Mendel i3 RepRap consiste en un marco o frame de metacrilato sobre el cual van montados los componentes móviles y estáticos para mantenerlos correctamente alineados en el tiempo, su ensamblaje se describe en el anexo 5. En la figura 16 se aprecia el plano del soporte ya ensamblado con sus vistas respectivas.

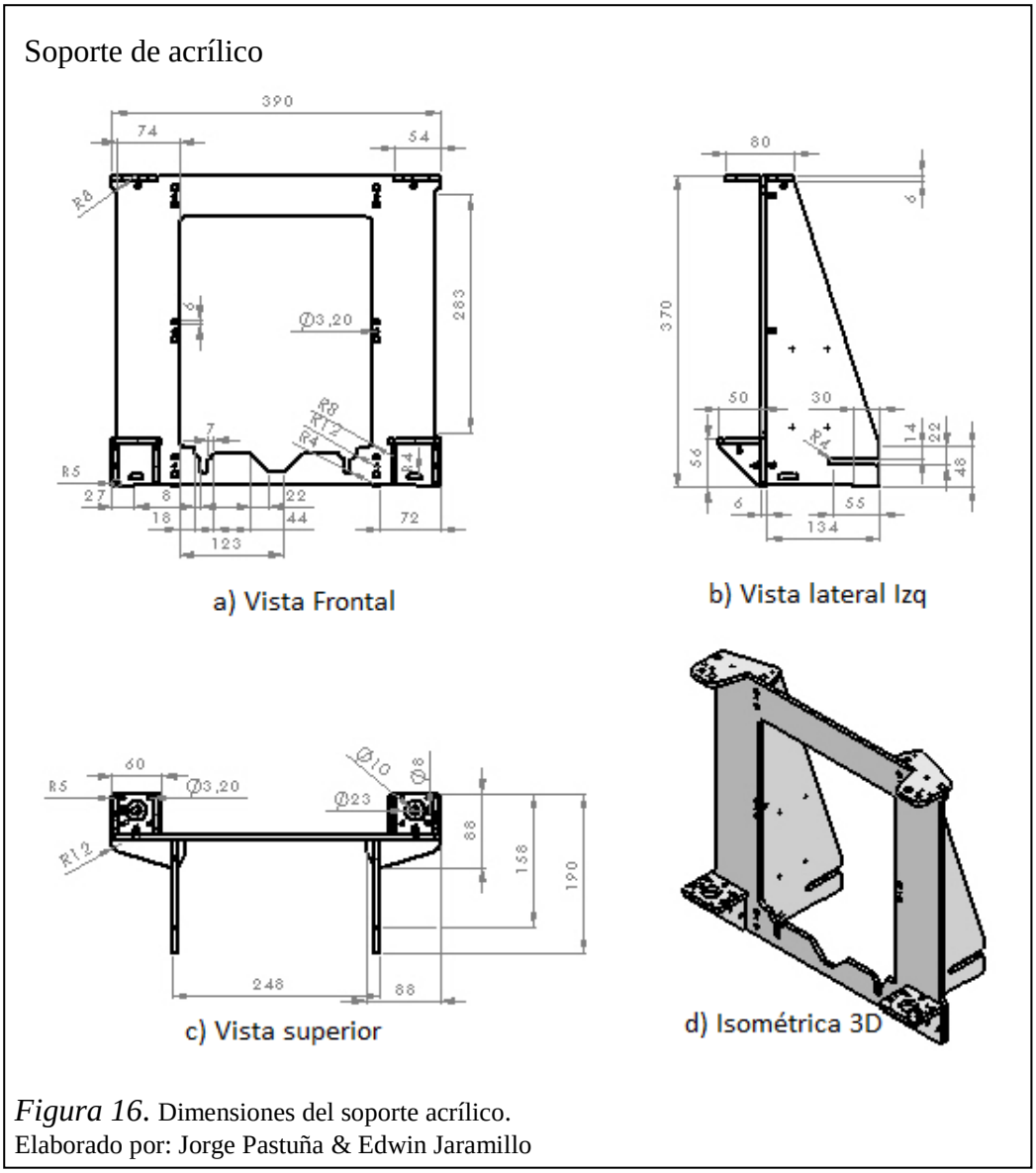


Figura 16. Dimensiones del soporte acrílico.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

3.2.1 Componentes imprimibles

Los componentes imprimibles son las piezas necesarias que sostienen y forman la estructura de la impresora se las puede descargar de la web en formato .stl de la página de RepRap. En la figura 17 quedan desglosadas estas piezas y descrito el

nombre de la pieza, la cantidad necesaria de cada tipo y un breve detalle de la sección de montaje en la estructura.

Figura 17. Componentes imprimibles.
Adaptado desde: (RepRap)

3.2.2 Componentes no imprimibles

Este grupo de componentes engloba material de ferretería y demás componentes auxiliares presentes en la figura 18 descritos con su nombre y la cantidad necesaria de cada uno.

Figura 18. Componentes no imprimibles.
Adaptado desde: (RepRap)

3.2.3 Sistema de movimientos

Este sistema consta de un extrusor, una base de impresión y ejes cartesianos. El mecanismo extrusor se desliza sobre el eje X, el mismo que se desplaza a lo largo del eje Z, mientras que la base de deposición se traslada a lo largo del eje Y. En la figura 19 se indica el esquema estructural de la máquina con sus sistemas de movimiento.

Dirección de ejes

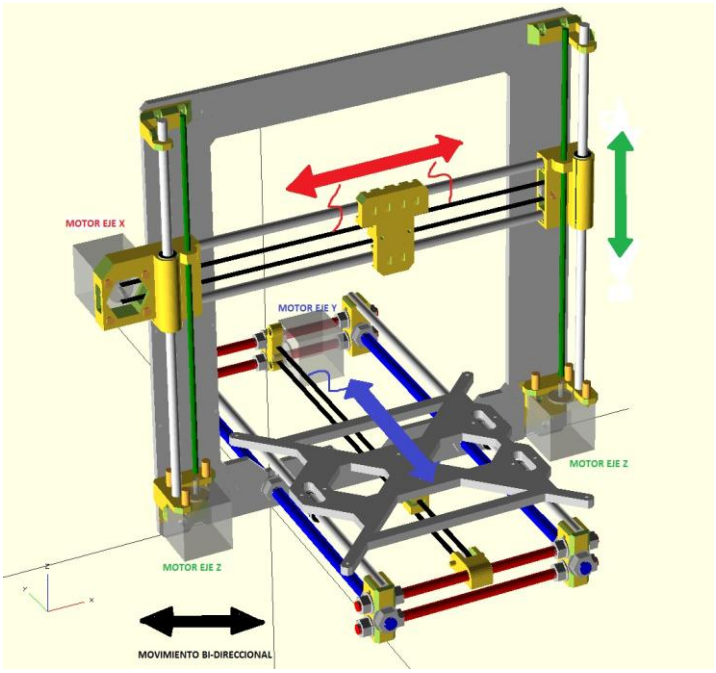
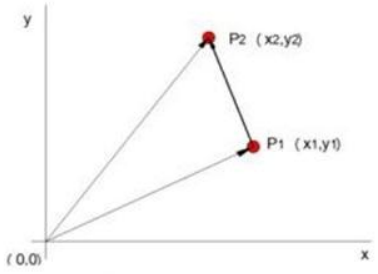


Figura 19. Ejes de movimiento de máquina de prototipado rápido. Adaptado desde: (RepRap)

El funcionamiento mecánico toma como base el uso de motores paso a paso, teniendo en cuenta que el movimiento para la deposición se hace sobre el plano horizontal y que el desplazamiento vertical obedece al espesor de la capa del material depuesto.

El modelamiento que establece las características de movimiento en el plano xy está determinado por la respuesta que entrega el software de modelamiento a través de la conversión del modelo CAD a código de Estereolitografia (.STL) y finalmente a código G, de donde se obtiene unas coordenadas que permiten el desplazamiento del extrusor. En la figura 20 se aprecia las coordenadas entregadas por el código G para determinar el movimiento en el plano XY, se utilizan coordenadas absolutas, a partir de las cuales se define la posición inicial P1 y final P2 del extrusor.

Coordenadas



$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad (1)$$

$$\Delta P = (x_2 - x_1, y_2 - y_1) \quad (2)$$

$$\Delta P_x = x_2 - x_1 \quad (3)$$

$$\Delta P_y = y_2 - y_1 \quad (4)$$

Figura 20. Coordenadas seguidas por el código.
Fuente: (Torres, 2013)

3.2.4 Carcasa

Se utilizó MDF de 18 milímetros para aislar el calor de la máquina de prototipado rápido, también para una visualización de la pieza a fabricar una sección de la cubierta es de metacrilato transparente como se muestra en la figura 21.

Carcasa de MDF

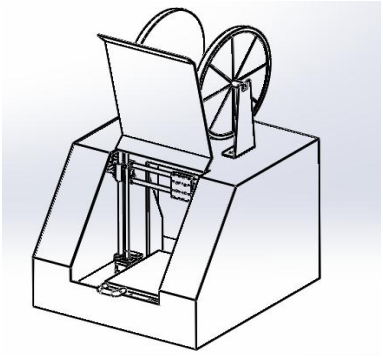


Figura 21. Vista isométrica de la carcasa.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

3.3 B Mecanismos de transmisión

Los mecanismos que rigen el movimiento de la máquina se utilizan para la transmisión y transformación de movimiento requerido para cada subsistema que se describe más adelante.

3.3.1 Sistema transmisión en el eje X

Las transmisiones adecuadas para este sistema se las realizan con actuadores lineales, debido a las cargas bajas que se manejan en el sistema en la figura 22 se aprecia las dimensiones del ensamblado del Eje X.

Plano referencial

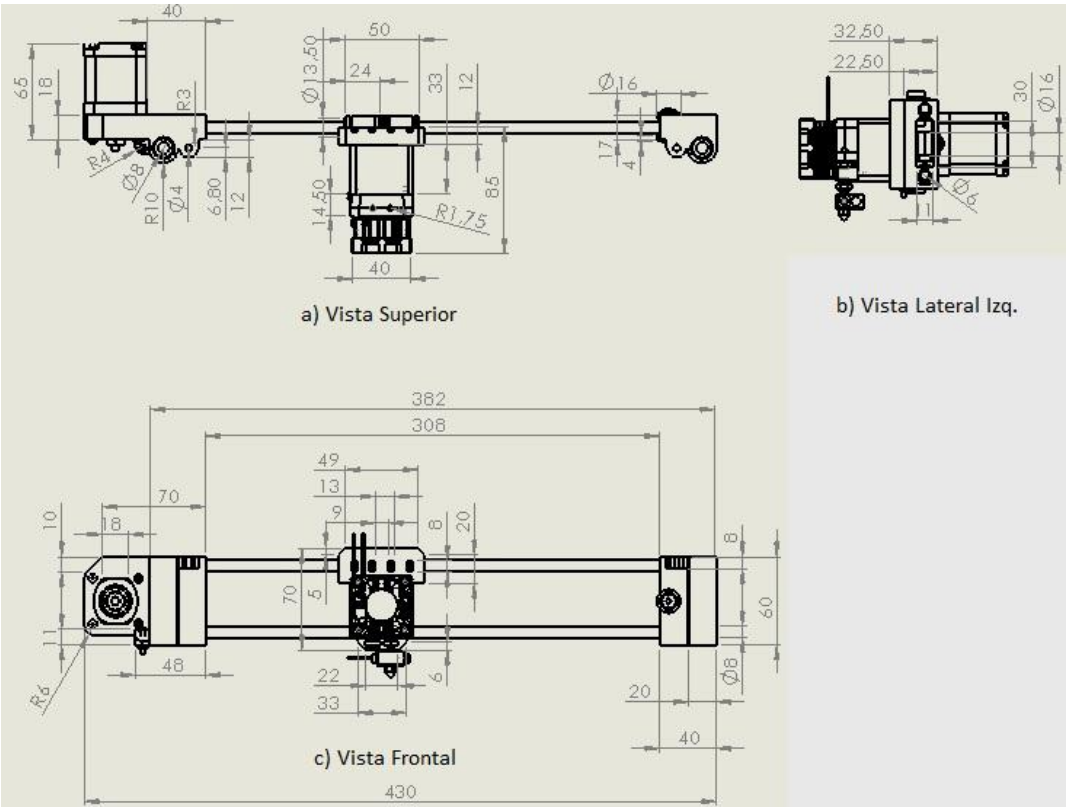


Figura 22. Dimensiones del sistema de transmisión eje X.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

3.3.1.1 Correa de sincronización y poleas

Este mecanismo transmite el movimiento rotatorio de una polea dentada a través de una banda de sincronización, dichos elementos son presentados en la tabla 4. Gracias a la fricción producida entre la polea y la banda, se acopla tanto al eje X como al eje Y ver figura 23.

Tabla 4.
Elementos para sincronización

CORREA T2.5 DE POLIURETANO	POLEA T2.5 ALUMINIO

Nota. (RepRap)

Ubicación de elementos

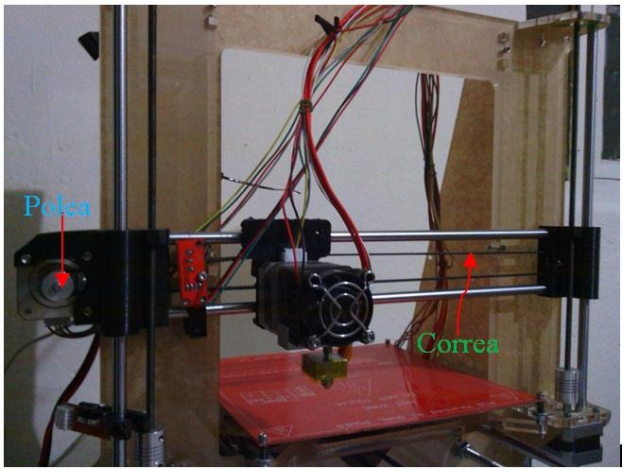


Figura 23. Sistema de transmisión eje X
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

3.3.2 Sistema de transmisión guiada del eje Y por rodamientos

Estos elementos mecánicos cuyas características son descritas en la tabla 5, ayudan a reducir la fricción entre el eje y las piezas conectadas a éste por medio de una rodadura que le sirve de apoyo y facilita su desplazamiento. El elemento rotativo a emplearse en la fabricación del rodamiento, pueden ser: de bolas, de rodillos o de agujas, en la figura 24 y 25 se aprecia la estructura del sistema de transmisión.

Tabla 5
Características de rodamientos

TIPO	CARACTERISTICAS
Rodamiento Lineal	Son piezas económicas debido a sus reducidas dimensiones, tiene una larga duración, también brindan una fricción mínima, alta precisión, elevadas velocidades de traslación
Rodamiento de bolas	El uso de estos rodamientos tiende a disminuir el rozamiento y por tanto a incrementar la eficiencia. Para el dimensionamiento de este tipo de rodamiento solo se considera el diámetro del tornillo de los reguladores de tensión.

Nota. (Arduino)

Plano referencial

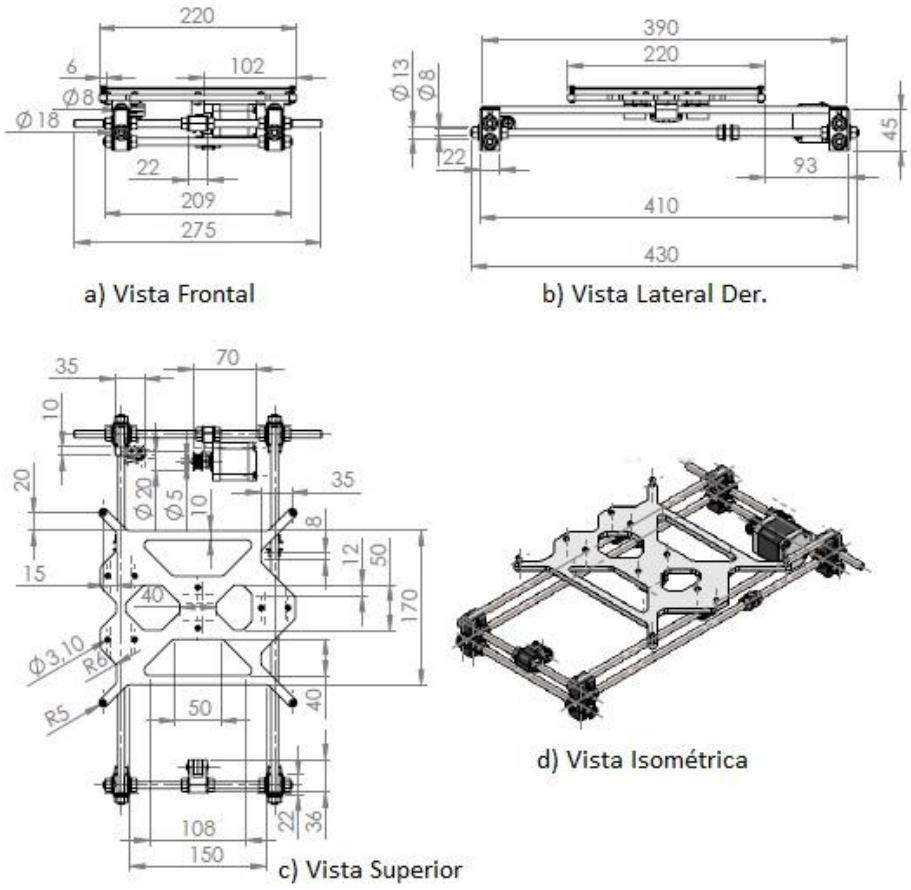


Figura 24. Vista constructiva del sistema guiado del eje Y.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Vista superior

Figura 25. Sistema de transmisión eje Y.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

3.3.3 Sistema transmisión en el eje Z por tornillo-tuerca

Se lo conoce también como Tornillo de Potencia, es un sistema que convierte el movimiento giratorio producido por el tornillo dispuesto fijamente, en movimiento lineal de la tuerca que se desplaza longitudinalmente a lo largo del tornillo.

El avance de la tuerca dependerá del paso y número de hilos de entrada de la rosca como se aprecia en el detalle A de la figura 26.

Es el sistema a implementarse para el movimiento del eje Z que consta de 2 motores a pasos tipo NEMA 17 que permitirán el movimiento lineal de la tuerca a lo largo de la varilla roscada M8 ver figura 26, en su montaje es prioridad que el sistema de movimiento del eje X este previamente construido como se aprecia en la figura 27.

Sistema de transmisión

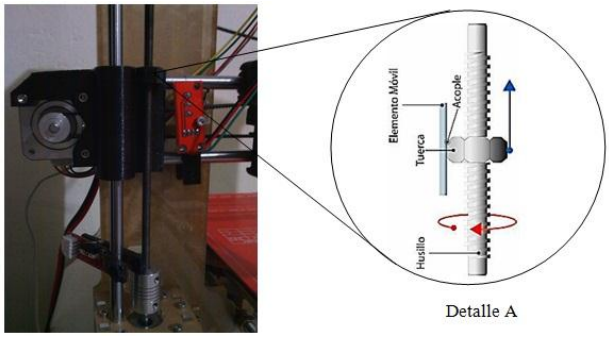


Figura 26. Sistema de transmisión tornillo-tuerca
Adaptado desde: (Calvete, 2013)

Tabla 6.
Ventajas y desventajas de sistema tornillo-tuerca

TIPO DE ROSCA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
	- Ajuste sencillo comparado con el de los tornillos cuadrados. - Mayor resistencia -Diseño muy propicio para desplazamientos.	Existe un juego mínimo entre el tornillo y la tuerca

Nota. (RepRap)

Plano referencial

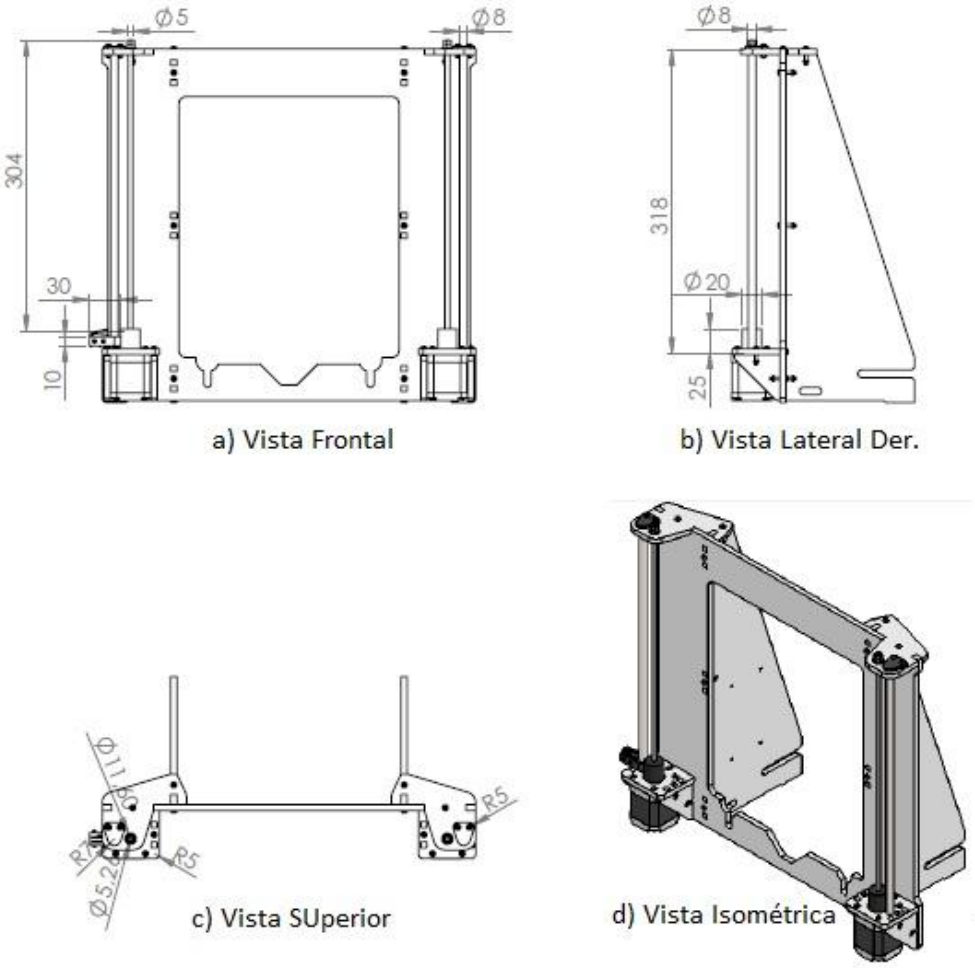


Figura 27. Vista constructiva sistema de transmisión eje Z
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

3.3.4 Pre-actuador drivers

Los drivers son unos micro controladores (ver figura 28), más pequeños, que conectamos a la placa electrónica Ramps (en el caso de Arduino + Ramps), cuya función es ordenar el movimiento de los motores paso a paso, a través de impulsos

eléctricos. La magnitud del movimiento la determinará el usuario a través del ordenador, mientras no se esté imprimiendo; o, el propio Software de control mientras se ejecuta una impresión.

Pre-actuador

Figura 28. Driver A4988
Fuente: (Pololu)

3.3.5 Motor a pasos

Son considerados como actuadores electromecánicos de alta precisión en su movimiento (ver tabla 7) convirtiendo impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, con lo cual el movimiento del eje es controlado mediante un tren de pulsos eléctricos que se suceden con una secuencia y frecuencia determinada por el programador.

Tabla 7.
Propiedades físicas mecánicas ABS

MOTOR APASOS NEMA 17	CARACTERISTICA
	• Número de fases: 2 • Diámetro del eje de salida: 5mm • Par nominal: 5.5 kg.cm • Voltaje: 4.2 V • Corriente: 1.5 A

Nota. (Arduino)

3.3.5.1 Conexionado de motores a pasos para Ramp 1.4

En la figura 29 se aprecia las conexiones eléctricas y electrónicas implementadas para la Ramps 1.4 y Arduino MEGA Rev3, al ser tecnología escalable facilita la comprensión del cableado a realizar y/o su posterior ampliación.

Conexión eléctrica electrónica de motores a pasos

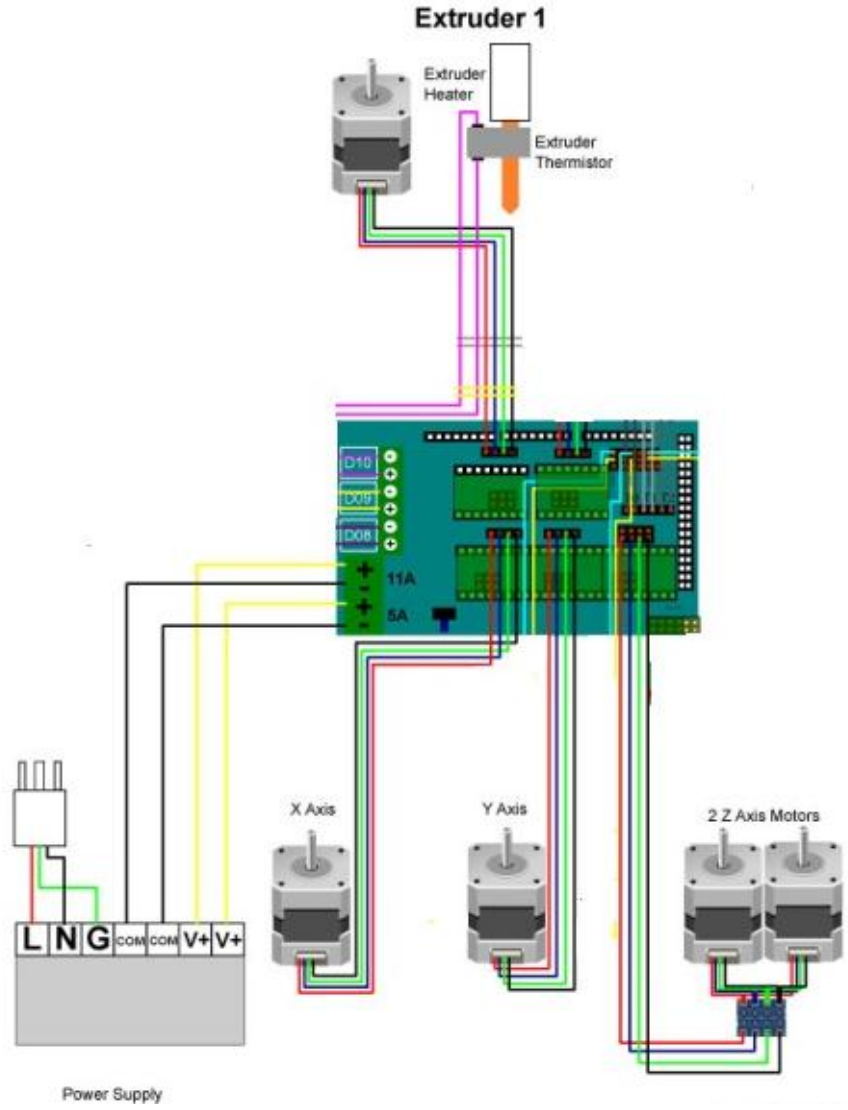


Figura 29. Diagrama de conexionado motores a paso
Adaptado de: (Abellán, 2013)

3.3.6 Sensores de posición (ZE)

De tipo electromecánico (finales de carrera), están normalmente situados al final del recorrido de los sistemas de movimiento (X, Y, Z) y cuyo objetivo es enviar señales de información sobre su presencia o paso para así limitar el desplazamiento de elementos móviles que puedan modificar el estado de parada de la Prusa i3.

Ubicación de sensores

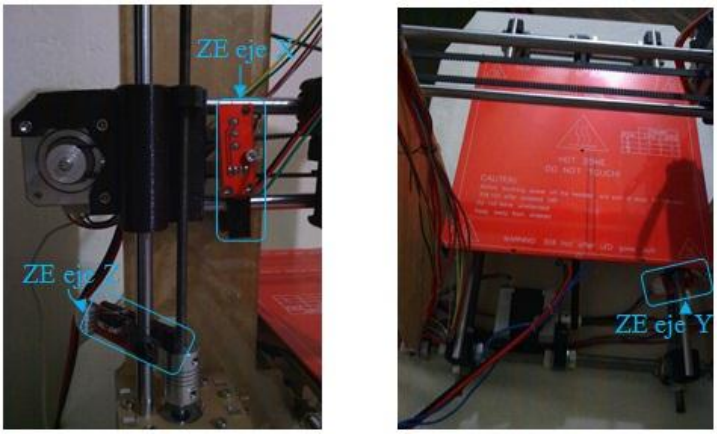
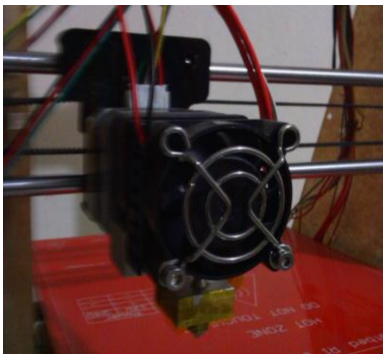


Figura 30. Finales de carrera montados en ejes X, Y, Z
Elaborado por: Jorge Pastuña

3.4 C Sistema extrusor

El engranaje del sistema reductor (conductor) es movido por la acción de un motor, el cual al girar provoca también la acción giratoria del husillo acoplado al engranaje que fuerza al polímero a pasar a través de la boquilla o dado, por medio del empuje generado por el husillo que gira concéntricamente en una cámara donde el filamento de polímero es conducido hacia una boquilla o dado, donde se funde el material y se lo deposita en la base de extrusión, las características se describen en la tabla 8.

Tabla 8.
Características del extrusor

Mk7 Extrusor	**Características**	
	Boquilla de aluminio	0.4mm
	Diámetro de filamento de trabajo	1.75/ 3mm
	Resistencia calefactora	5.6 - 6.8 Ω
	Termistor	100k
	Revestimiento	PTFE
	Bloque de aluminio	(17x23x8.3) mm
	Temperatura de operación	250ºC
	Ventilador	(40x40x10)mm

Nota. Características a considerar al selleccionar el extrusor.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

3.4.1 Filamento ABS

Acridonitrilo Butadieno Estireno (ABS) termoplástico amorfo de gran tenacidad, incluso a baja temperatura (sigue siendo tenaz a -40 °C), muy resistente al impacto (golpes) utilizado en automoción y otros usos tanto industriales como domésticos la tabla 9 muestra sus características. Se le llama plástico de ingeniería, debido a que su elaboración y procesamiento es más complejo que los plásticos comunes.

Tabla 9.
Propiedades físicas mecánicas ABS

Alargamiento a la rotura (%)	45
Coeficiente de fricción	0,5
Módulo de tracción (GPa)	2,1-2,4
Resistencia a la tracción (MPa)	41-45
Resistencia al impacto (J m-1)	200-400
Absorción de agua- en 24 hrs (%)	0,3-0,7
Densidad (g cm-3)	1,05
Resistencia a la radiación	Aceptable
Resistencia a los ultravioletas	Mala

Nota. Características para selección.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

3.4.2 Sensor de temperatura PT-100

Es un detector resistivo basado en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura sus características están en la tabla 10. Consiste usualmente en un arrollamiento de hilo muy fino del conductor adecuado bobinado entre capas de material aislante y protegido con un revestimiento de vidrio o cerámica.

Tabla 10.
Características del PT100

	CARACTERISTICAS	VENTAJAS
	+/- 0.1º C	Fácil de acondicionar
	30 m	Respuesta lineal
	Resistencia cerámica 12V/40W	Mejor estabilidad
	Temperatura máxima de trabajo 280º	Ideal para bajas temperaturas

Nota. (RepRap)

3.5 D Cama caliente Mki2

Es la superficie sobre la cual el extrusor deposita el ABS, ésta al ser calentada uniformemente ayuda a mejorar la calidad del elemento impreso evitando deformaciones producidas por la contracción del polímero al solidificarse manteniendo una temperatura alta del elemento durante el proceso de impresión.

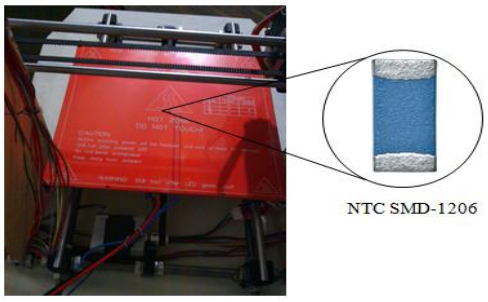


Figura 31. Cama caliente Dual ubicación NTC
Adaptado desde: (RepRap)

Tabla 11.
Características de la cama caliente

CARACTERÍSTICAS
Está bañada de cobre en el cual se dibujan las pistas para que circule la corriente eléctrica.
Es una placa muy delgada y ligera.
Es suficientemente rígida y fácil de taladrar.
Su coeficiente de expansión térmica es bajo para que no se rompa.
Es capaz de soportar el calor en la soldadura.
Es capaz de soportar diferentes ciclos de temperatura por lo que disipa bien el calor.
Puede trabajar a 12v o 24 v DC.
Termistor, leds y resistencias de montaje superficial.

Nota. Para cama dual revisar correctamente la polaridad.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

3.5.1 NTC SMD-1206

Es un sensor resistivo de temperatura del tipo NTC (Negative Temperature Coefficient), al aumentar la temperatura la resistencia disminuye y es de montaje superficial tipo chip, estará montada sobre la cama caliente permitiendo optimizar el uso de materiales durante su montaje ver figura 31.

3.6 E Electrónica Arduino Mega-Ramps 1.4

Posee un Microcontrolador ATmega2560 (ver anexo 1) con 256 KB de memoria flash para almacenar código, 8 KB de SRAM y 4 KB de EEPROM. Dispone de 54 entradas/salidas digitales, 14 de las cuales se pueden utilizar como salidas PWM (modulación de anchura de pulso), emplea un microcontrolador Atmega8U2 programado como actuar convertidor USB a serie todo esto mejor representado en la figura 32 y la tabla 12.

Tarjeta de control

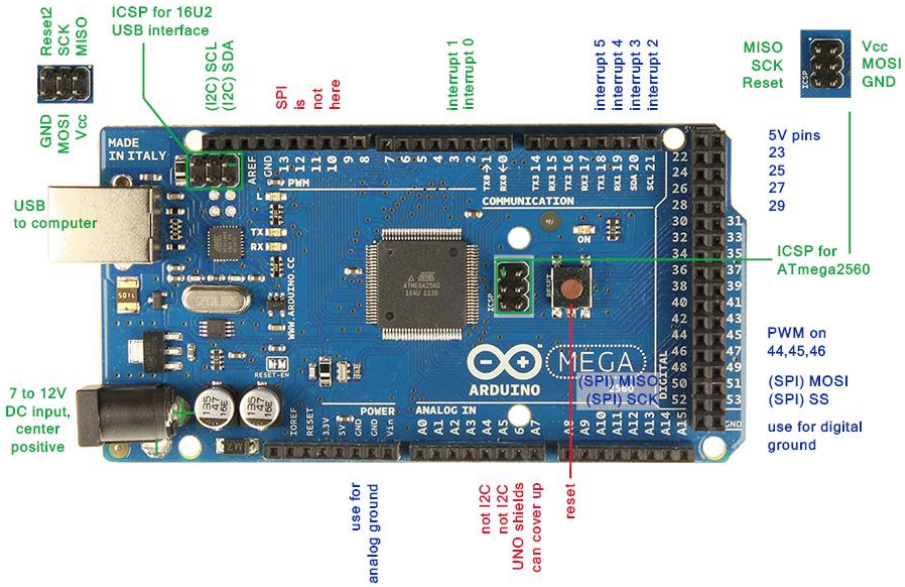


Figura 32. Arduino Mega descripción de pines
Modificado desde: (Arduino)

Tabla 12.
Características Arduino Mega 2560

Controlador	ATMEL AVR ATMEGA2560
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12 V
Voltaje de entrada (Min-Max)	6-20Volts
I/O Digitales	54 (incluyendo 15 salidas PWM)
Entradas analógicas	16
Corriente DC para pines I/O	40 mA
Corriente DC para pines 3.3V	50 mA
Memoria Flash	256 KB, 8 KB utilizado por el arranque
EEPROM	8KB
Velocidad del reloj	16MHZ

Nota. Considerar Arduino original.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

El microcontrolador se programa mediante el lenguaje de programación Arduino (basado en Wiring) y el entorno de desarrollo Arduino. Los proyectos hechos con Arduino pueden ejecutarse sin necesidad de conectar a un ordenador. Ramps 1.4 (ver anexo 2) es un shield para Arduino, su estructura tiene la forma que se muestra en la figura 33 y permite poner hasta 5 controladores de motores paso a paso como muestra el diagrama de conexionado en la figura 35, lleva conexiones para tres Mosfet (tipo canal N), para calentar la cama caliente y el extrusor, en la figura 34 muestra la ubicación de la electrónica montada.

Ramps 1.4

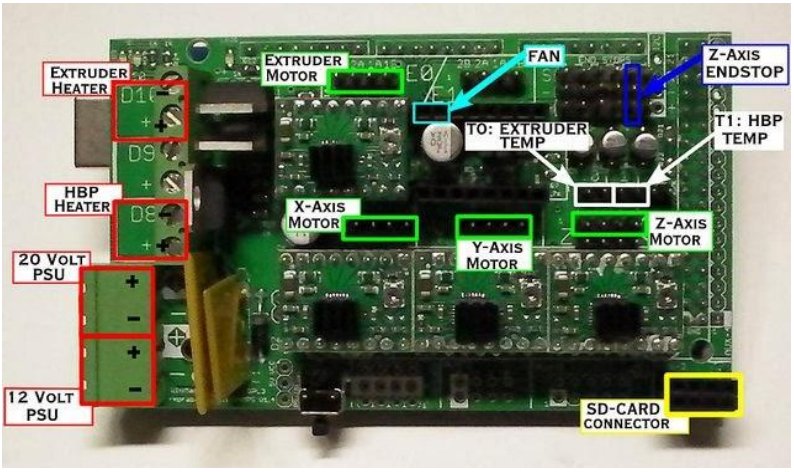


Figura 33. Ubicación de elementos en la Ramps 1.4.
Fuente: (Arduino)

Cableado

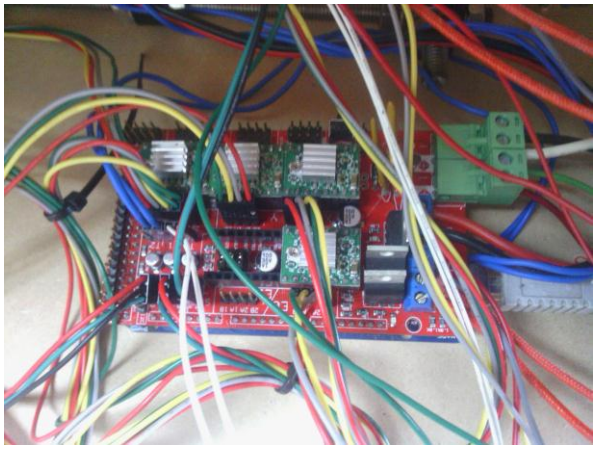


Figura 34. Montaje de la electrónica Arduino-Ramp.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Conexiones de Ramps 1.4

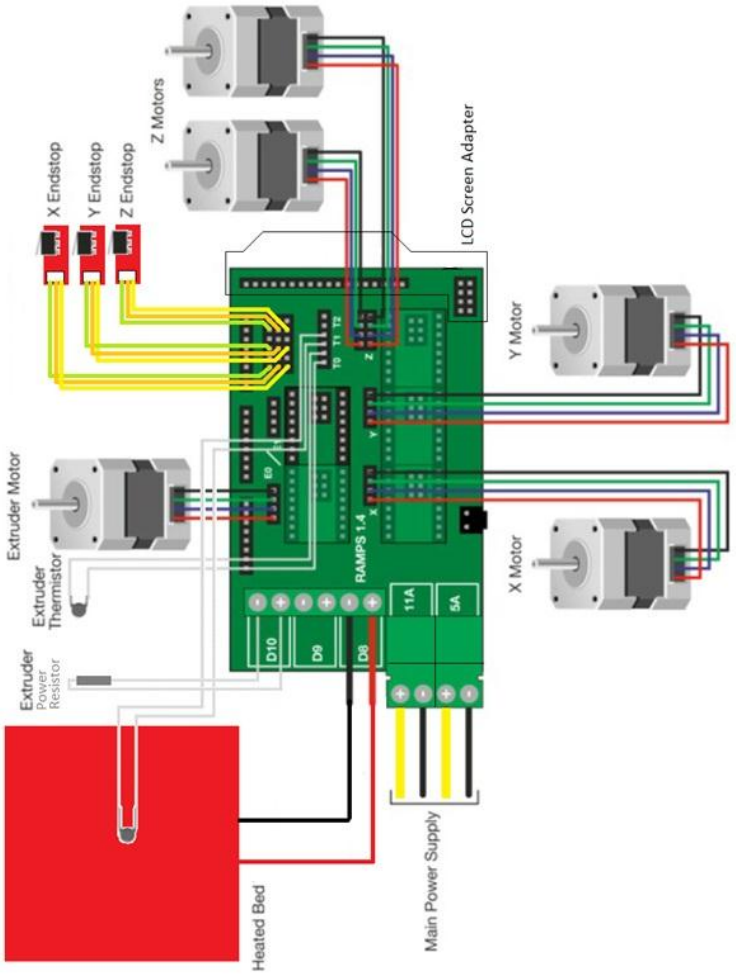


Figura 35. Diagrama de conexionado Ramp 1.4
Fuente: (Arduino)

Tabla 13.
Características de la Ramp 1.4

CARACTERISTICAS	
3 Mosfet para las salidas de potencia.	3 conectores para sensores de temperatura.
Fusible de 5A para seguridad.	Control de calefactor con fusible a 11A.
5 controladores de motores a pasos.	6 conjuntos de pines digitales con VCC y GND
Pines extra para: PWM, UART1 (RX y TX), I2C (SDA y SCL), SPI (MOSI, MISO, SCK), I/O digital y analógico.	Todos los Mosfet están enganchados en los pines PWM para una mayor versatilidad.
Posee sockets de conexión para actuadores y otros dispositivos.	Tiene expansiones para: tarjeta SD, servos o ventiladores

Nota. Considerar elemento de disipación de calor para Mosfet de cama caliente.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

La Tabla 14 describe la disposición de los jumpers sobre la Ramp para mejorar la precisión en el control de movimiento del motor.

Tabla 14.
Conexión de jumpers

1	2	3	
NO	NO	NO	Paso completo
SI	NO	NO	Medio paso
NO	SI	NO	¼ paso
SI	SI	NO	1/8 paso
SI	SI	SI	1/16 paso

Nota. Configuraciones para velocidad.
Elaborado por: Jorge Pastuña

3.6.1 Fuente de alimentación

Debe dar 12 V DC y unos 16 A, pues se necesitan entre 11 y 12 amperios para la cama caliente, 2.5 A para el extrusor y aproximadamente unos 250 mA por motor para el movimiento de los ejes y del filamento de plástico por el extrusor. Esto significa que la fuente debe ser como mínimo de 200 W ver figura 36.

Cableado

Figura 36. Fuente de poder.
Fuente: (RepRap)

3.7 F Flujo grama del montaje

Una vez seleccionados los elementos necesarios para el montaje de la máquina de prototipado rápido se ejecuta las actividades descritas en la tabla 15, cada actividad esta codificada para poder representarlas en el diagrama de flujo de la figura 37.

Tabla 15.
Actividades de montaje

Código	Actividad	Herramientas
M1	Preparación de herramientas	
M2	Preparación de elementos	
M3	Ensamblaje de estructura	Llave 9/16
M4	Instalación de interfaz de Control	Des. estrella
M5	Instalación de estructura base	Llave 6 mm
M6	Instalación de elementos electrónicos en la base	Des. estrella
M7	Ensamblaje mecanismo X	Allen. Des.
M8	Instalación mecanismo X en el mecanismo Z	Destornillador
M9	Ensamblaje mecanismo Y	Allen. Des.
M10	Instalación del mecanismo Y en la estructura	Destornillador
M11	Ensamblaje mecanismo Z	Allen. Des.
M12	Instalación del mecanismo Z en la estructura	Allen. Des.
M13	Ensamblaje del extrusor	Allen. Des.
M14	Instalación del extrusor en el mecanismo X	
M15	Conexión de cableado dentro de la máquina	
M16	Nivelación base-extrusor	Allen-Nivel
M17	Ensamblaje de carcasa	Destornillador
M18	Colocación de ABS	
M19	Instalación de carcasa	Destornillador
M20	Estética de la carcasa	Pintura
M21	Aceitar	Aceite 3 en 1
M22	Engrasar	Grasa
M23	Limpieza	Wiphes
M24	Conexión eléctrica	
M25	Puesta en marcha	

Nota. Grasa especial para varilla cromada.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Para llevar a cabo el ensamblado y puesta en marcha se sigue el proceso señalado en base a la simbología siguiente:

Tabla 16.
Simbología

Actividad	Símbolo
Inicio	
Operación	
Verificación	
Fin	

Nota. Secuencia simple
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

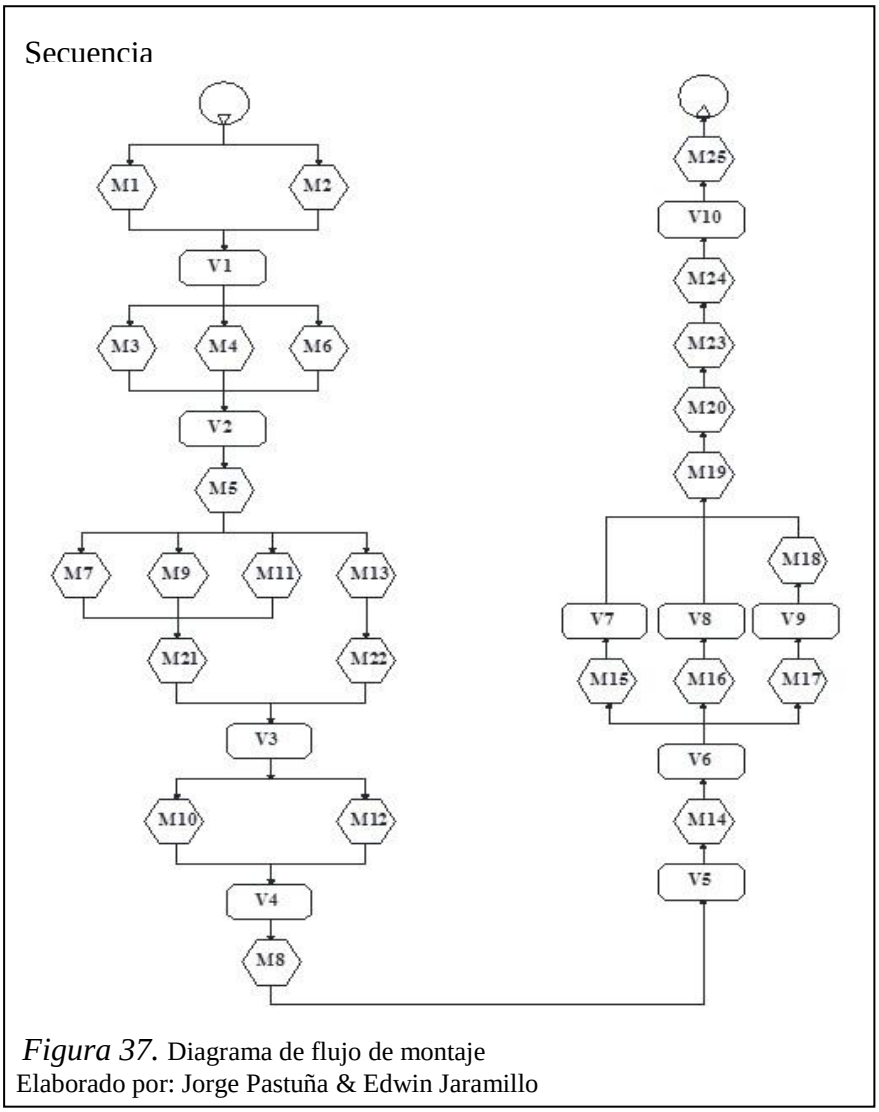


Figura 37. Diagrama de flujo de montaje
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

3.8 Despiece sistema de máquina de prototipado rápido

La figura 34 muestra la vista explosionada (despiece) de los componentes guías principales de la máquina de prototipado rápido para una mejor referencia al instante de realizar el montaje de los sistemas que la conforman, además la tabla 17 muestra la descripción de los principales elementos con sus respectivas numeraciones.

Vista explosionada

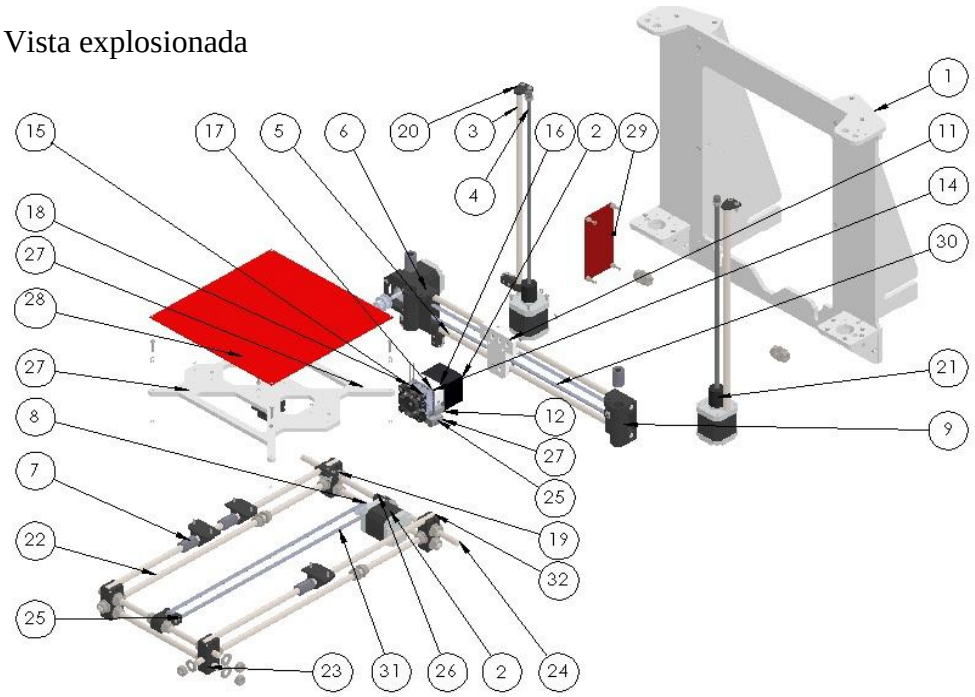


Figura 38. Descripción de la máquina de prototipado rápido
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Tabla 17.
Lista de elementos principales

N.º	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	C/U	N.º	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	C/U
1	Prusa i3, Frame	Soporte de acrílico	1	**17**	Junta motor	Junta del extrusor	1
2	Motor a pasos	NEMA 17, 1.6A	5	**18**	Rodamiento	Rodamiento del extrusor	2
3	Varilla lisa M8	Acero cromado 8x320 mm.	2	**19**	Final de carrera	Montado en el eje X,Y, Z	3
4	Varilla roscada M5	Hierro 5x310 mm.	2	**20**	Limitador de ejes	Montado en el eje Z	2
5	Varilla eje X	Acero cromado 8x320	2	**21**	Acoplador	Unión entre el motor y eje Z	2
6	Junta motor X	Pieza imprimible	1	**22**	Varilla Eje Y	Varilla roscada 430, 209 mm	2
7	Rodamiento lineal	LM8MUU	13	**23**	Esquina Y	Elemento imprimible	4
8	Polea dentada	Aluminio GT 2.5	2	**24**	Varilla Eje Y	Varilla roscada 270 mm, M8	1
9	Junta final X	Pieza imprimible	1	**25**	Polea de correa Y	Polea para tensar la correa	1
10	Rodamiento bola	5x16x5 mm	4	**26**	Soporte motor Y	Sujeta el motor al eje Y	1
11	Carrete X	Pieza imprimible	1	**27**	Base cama caliente	Base de Acrílico	1
12	MK7-Base	Base de soporte extrusor	1	**28**	Cama caliente	Funcionamiento Dual	1
13	MK7-extrusor	0.4 mm	1	**29**	Controlador	Arduino	1
14	Disipador	Disipador del extrusor	1	**31**	Correa Prusa i3	Eje X	1
15	Ventilador	40x40x10	1	**30**	Correa Prusa i3 Y	Eje Y	1
16	Soporte de correa Y	Porta correa y fijación	2	**32**	Varilla Eje Y	Varilla lisa 430mm, M8	5

Nota. Principales elementos de la máquina de prototipado.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

3.9 Sistema informático

Por medio del sistema informático se realiza la traducción de la pieza 3D archivo .stl diseñado en un software CAD en archivos que contienen código G que es el lenguaje que la máquina interpreta y traduce en pasos de motores manejando así físicamente al hardware de la RAMPS 1.4, necesario para realizar impresiones. El software está desarrollado en código abierto, por lo que puede encontrarse con facilidad en la red. De entre las muchas opciones existentes se ha optado por las siguientes:

3.9.1 Arduino 5.1

Software necesario para programar la placa Arduino Mega 2560 encargada de la comunicación con el PC y con la placa Ramps 1.4, la cual a su vez controla los motores y las temperaturas del extrusor y de la base caliente por medio de la librería de código abierto denominada Marlin en su versión 1.1. Se debe realizar la configuración adecuada del tipo de placa y su puerto de comunicación ver figura 39.

Ventana de configuración

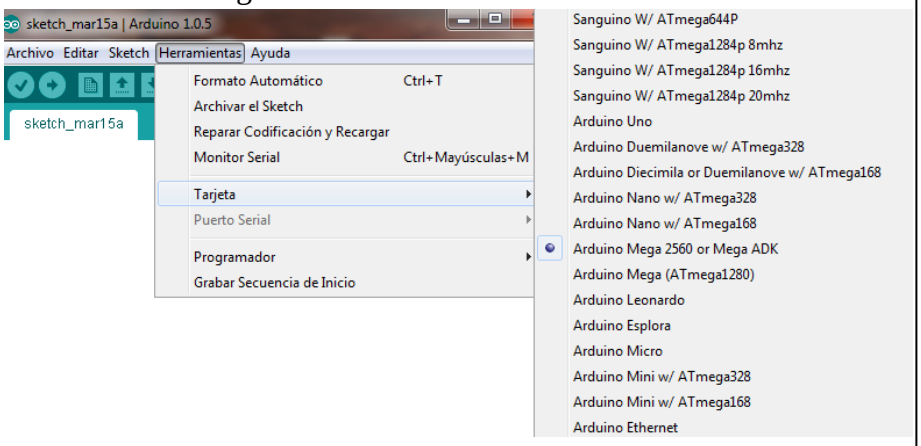


Figura 39. Selección de Arduino Mega 2560
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

3.9.1.1 Interfaz de comunicación

La interfaz de comunicación entre la máquina de prototipado rápido y la PC se la realiza mediante un Bus Serial Universal (USB) ver figura 40, donde la placa Arduino (tarjeta de control) cuenta con un convertidor de USB a Serial para enlazarse con la PC.

Comunicación

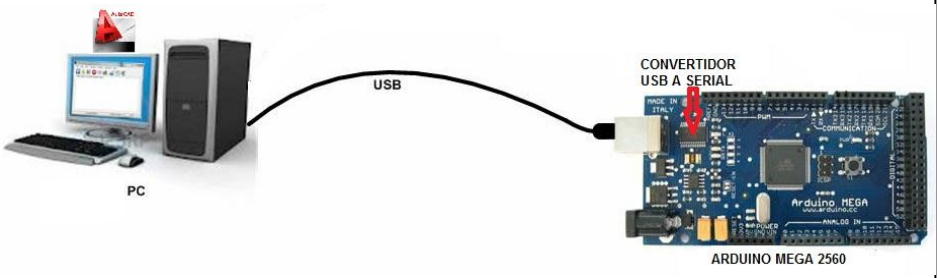


Figura 40. Interface de comunicación PC-Arduino
Adaptado desde: (Arduino)

3.9.2 Marlin Rev. 1.1

Programa de código abierto en lenguaje C que es ejecutado por la placa Arduino Mega permite realizar varias configuraciones personalizadas, cumple con las siguientes funciones:

- Transformar en acciones sobre la máquina de prototipado rápido los comandos en código G recibidos por el bus serial.
- Realizar el control en lazo cerrado de las temperaturas de la máquina.

Este programa consta de varias librerías dependientes del archivo Marlin principal los mismo que son llamados o declarados en el archivo de nombre configuración.h que es donde en caso de requerirlo se realizaran las configuraciones necesarias para la correcta interpretación del archivo .stl, transformado a un archivo de código G por medio del software de control, enviado a la máquina por medio de la comunicación USB con la PC.

La configuración para motores respecto a los pasos por milímetro de cada eje, su velocidad de avance, la velocidad máxima para acelerar los movimientos de los ejes, la aceleración en mm/s^2 de los movimientos de impresión y la aceleración de retracción se la realiza en la ventana mostrada en la figura 41 a más de la configuración de la velocidad de movimiento de los ejes cuando se hace el Homing es decir enviar a los ejes a la coordenada (0, 0, 0).

Configuración de pasos

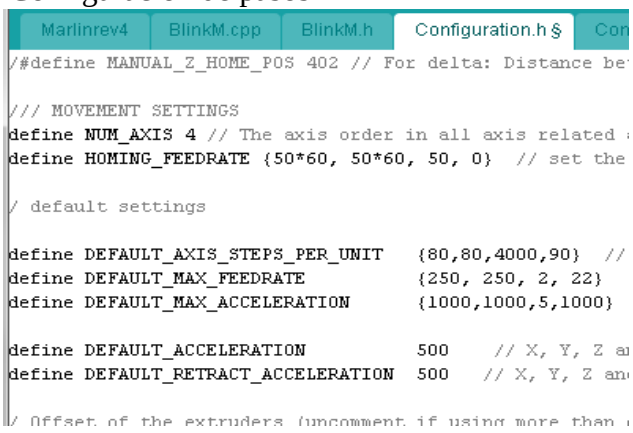


Figura 41. Sketch de configuración general
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

El programa permite la configuración de diversas marcas de elementos electrónicos relacionados con la implementación de la máquina de prototipado rápido tales así como placas de control, sensores, tipo de fuente de alimentación e incluso la cantidad de extrusores con la que trabajará la máquina esto mejor detallado en los anexos 3 mientras que la figura 42 muestra la declaración de las librerías con sus sets correspondientes.

Variables de temperatura

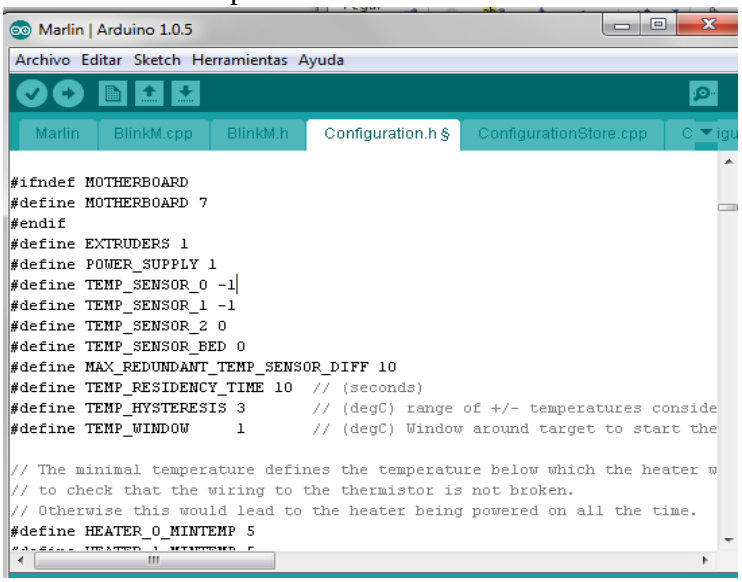


Figura 42. Configuración de diversas marcas de elementos
Elaborado por Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

El parámetro "#define HEATER_MINTEMP", nos da un error en el software CAM que dirá “ERROR MIN” debido a que se intenta calentar tanto el extrusor como la cama caliente cuando el sensor registra una temperatura inferior.

Si seguimos bajando, nos vamos a encontrar otro parámetro que nos va a definir la temperatura mínima de extrusión, "#define EXTRUDE_MINTEMP", este es un parámetro de seguridad, que va a impedir que extruyamos filamento si el extrusor no está a la temperatura que se indica, esto se hace para proteger el extrusor e impedir extruir en frio.

3.9.3 Repetier-Host

Programa para PC que realiza la comunicación con la placa Arduino Mega 2560 es capaz de:

- Laminar un archivo stl (con la extensión Slic3r) y crear un archivo G-Code apto para ser ejecutado por Marlin.
- Enviar comandos G-Code específicos a la impresora por teclado o en secuencias.
- Servir de entorno gráfico para mover los diferentes ejes de la impresora y el extrusor, o para configurar un determinado valor de la temperatura del extrusor o la base caliente.

Descripción de ventana

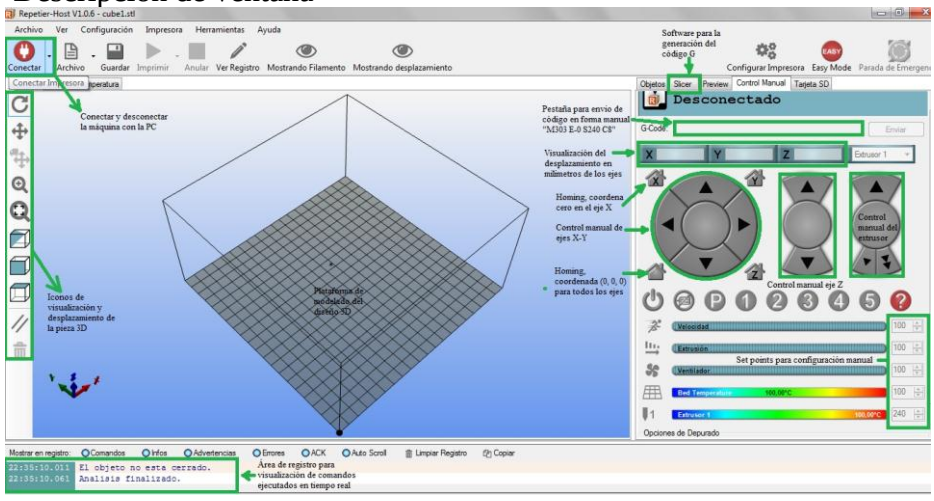


Figura 43. Ventana principal del programa Repetier-Host
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

3.9.3.1 Formato .stl (Stereo Lithography)

Es un formato de diseño CAD que define la geometría de un objeto 3D puede ser generado a partir de varios software CAD 3D. En la figura 40 se aprecia que el formato utiliza una malla de triángulos cerrada para definir la forma del objeto 3D, la resolución del archivo y su tamaño es proporcional al tamaño de los triángulos, es decir, a mayor número de triángulos mayor resolución y mayor peso.

Esferas

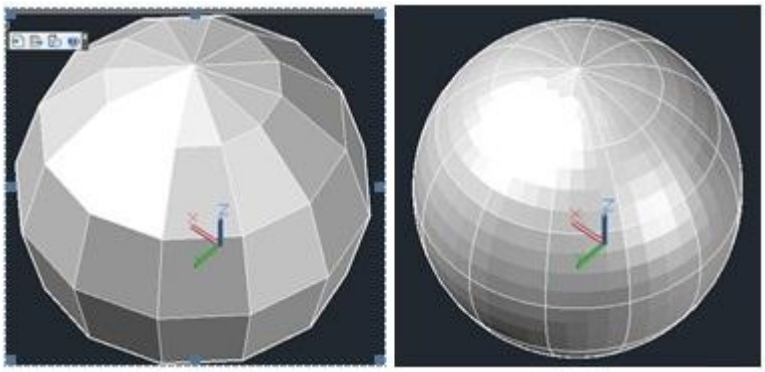


Figura 44. Objeto 3D en formato stl
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

3.9.3.2 Código G

Es el lenguaje de descripción de operaciones para máquinas de control numérico por ordenador (CNC) generado por el software Slicer, se almacena en formato texto y puede ser visualizado y editado en el mismo software Repetier Host que es procesado por el firmware en el Arduino.

El código G describe el movimiento y las diferentes operaciones que la máquina de prototipado rápido debe realizar para la fabricación del diseño 3D, en la tabla 18 se describen los códigos más relevantes para que se pueda editar el código en caso de requerirlo.

G: es la dirección correspondiente a funciones preparatorias, como la forma de la trayectoria, parada temporizada, ciclos automáticos, etc.

X, Y, Z: representan las direcciones correspondientes a los ejes X, Y, Z de la máquina de prototipado rápido.

M: corresponde a las funciones auxiliares o complementarias.

F: representa a la velocidad de avance en mm/min.

E: representa a la velocidad de avance del filamento en el extrusor en mm/min.

Tabla 18.
Lista de elementos principales

Códigos que soporta Marlin	
G0	Movimiento rápido
G1	Movimiento coordinado X Y Z E
G2	CW Interpolación circular o arcos
G3	CCW Interpolación circular o arcos en sentido reverso
G10	Retrae el filamento de acuerdo a lo configurado desde M207
G11	Retrae el filamento de acuerdo a lo configurado desde M208
G28	Ejes en 0, 0, 0
G90	Uso de coordenadas absolutas
G91	Uso de coordenadas relativas
G92	Establecer posición actual a coordenadas dadas
M17	Habilitar fuente y motores
M18	Deshabilitar motores a paso similar al M84
M42	Cambio de status del pin vía código G
M80	Encender fuente de poder
M81	Apagar fuente de poder
M84	Apagar motores
M92	Iniciar el extrusor a cero
M140	Establecer temperatura de la cama caliente
M200	Configurar el diámetro del filamento
M301	Set PID parameters P I and D
M302	Permitir enfriamiento del extrusor
M400	Finalizar todo movimiento

Nota. Códigos G más utilizados.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Una vez realizado el objeto geométrico 3D en un software CAD se importar el archivo .stl al Repetier Host donde al hacer clic en el icono *archivo* aparece la ventana mostrada en la figura 45 donde se puede seleccionar el fichero .stl y se representa tal y como está en la figura 46.

Ventana importar

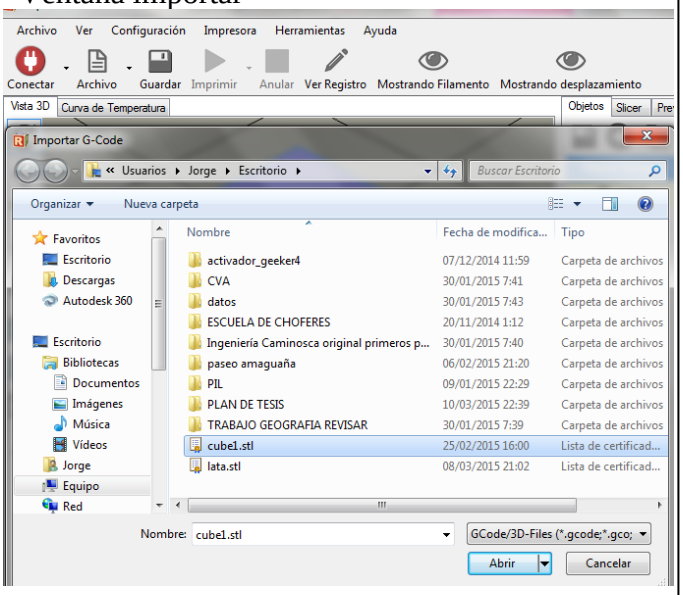


Figura 45. Cargando archivo stl.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Visualización del objeto

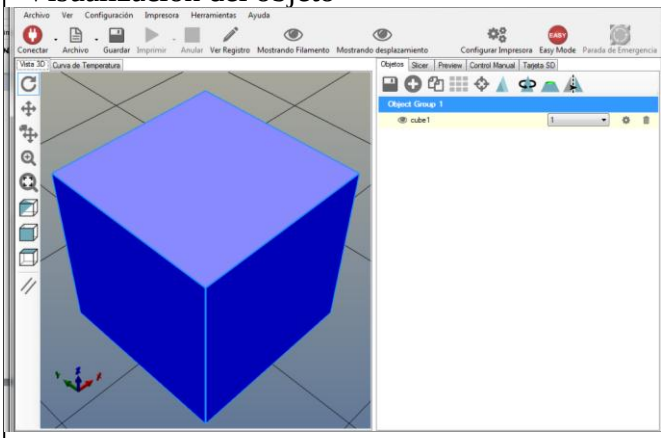


Figura 46. Ventana principal del Repetier-Host.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Este software cuenta con una interfaz amigable de configuraciones sea automática o manual, siendo automática el instante que ya se ha fileteado en capas el diseño geométrico 3D con el software integrado Slicer y presionado el botón imprimir ubicado en la parte superior izquierda de la figura 47 adicional a eso se tiene un detalle de estadística de impresión y configuración de visualización de capas.

Objeto en capas

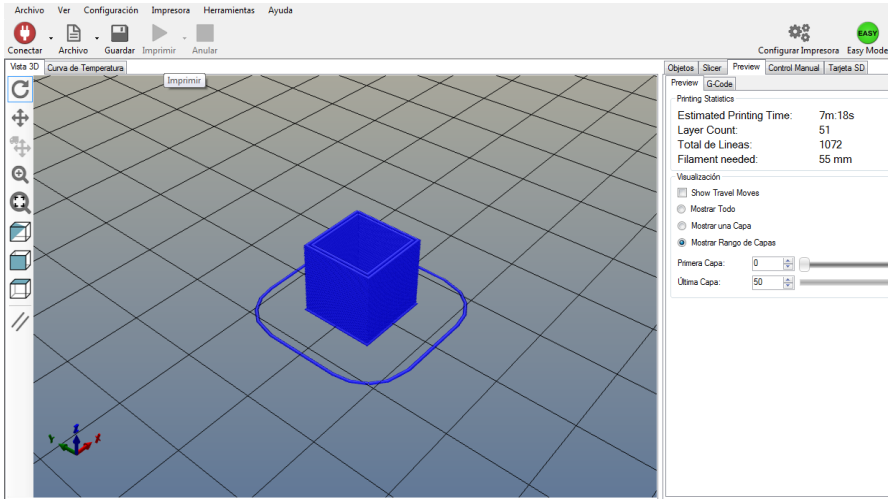


Figura 47. Visualización previa de la impresión
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

En forma manual el software permite el control de los sistemas de movimiento ya sea por comandos en código G o por la interfaz gráfica bien representada de botones mostrada en la figura 48, además tiene opción de control en forma fácil para quienes recién se relacionan con esta tecnología.

Código

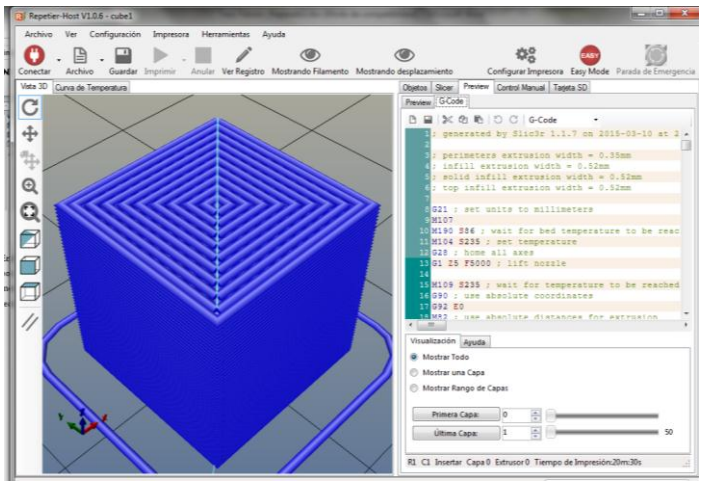


Figura 48. Generación de código G.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Interfaz de control

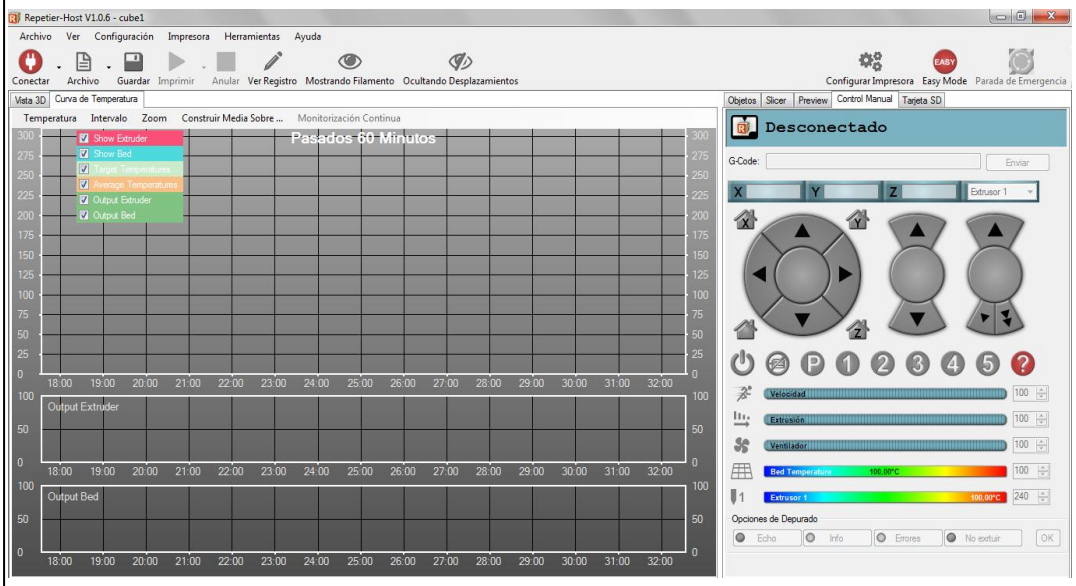


Figura 49. Control manual
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

La configuración de la conexión entre la PC y la máquina, características de la impresora y dimensiones de impresión se despliegan en una ventana como se muestra en la figura 50 al dar clic en el icono configurar impresora.

Comunicación

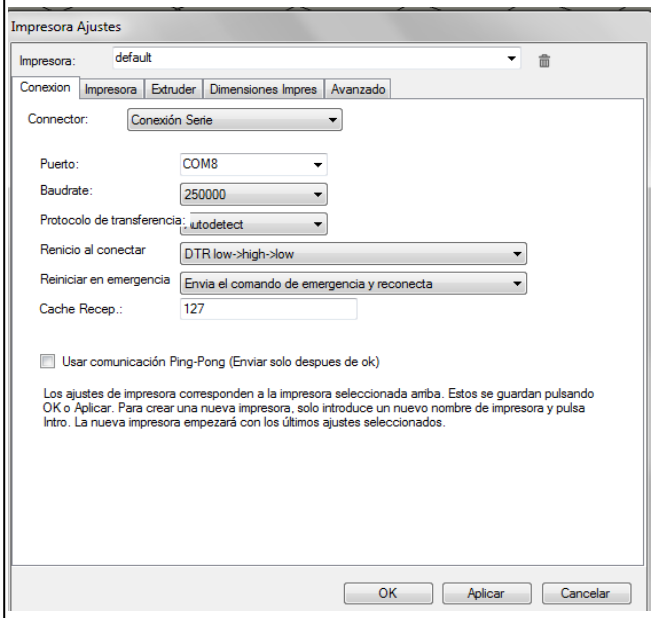


Figura 50. Configuración de impresora
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

3.9.3.3 Slicer

Es el software de laminado que permite generar el código G del diseño geométrico 3D de acuerdo a la configuración establecida, se despliega una ventana con tres pestañas diferentes para la configuración de parámetros de impresión, filamento y de la impresora, los cuales son descritos a continuación.

Dentro de los parámetros de impresión lo más relevante son las capas tanto la inicial como las finales, el rellenado de la pieza con sus diferentes formas y porcentajes, la velocidad de la deposición del filamento sobre la cama caliente en conjunto con la del cabezal del extrusor ya sea en estado activo o en vacío es decir sin extruir filamento y por último los perímetros tanto de soporte como de capas para una mejor adherencia y estabilidad a la hora de imprimir alguna pieza tridimensional como se muestra en la figura 51, seguido se encuentran la descripción de ciertos parámetros relevantes.

Ventana del Slicer

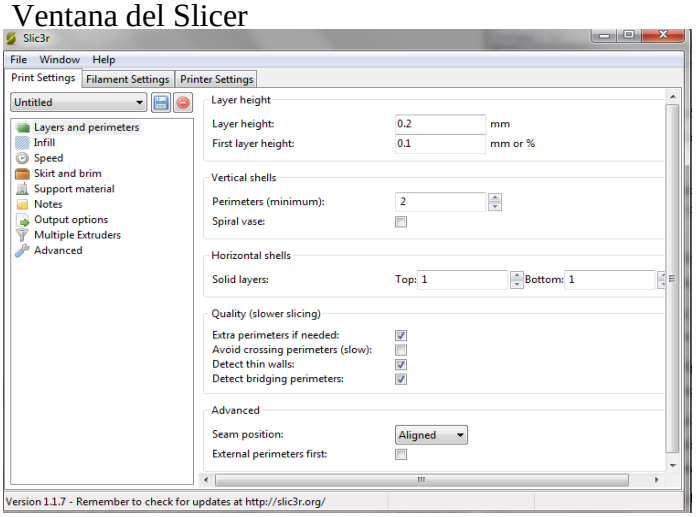


Figura 51. Parámetros de impresión Slicer
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Layer height: Define la altura que tendrán las capas de nuestra pieza a mayor altura existe menos calidad en la impresión pero mayor rapidez.

First layer height: Permite configurar la altura de la primera capa, la cual en ocasiones es menor para mejorar la adherencia de la pieza a la cama caliente.

Solid layers: Configura el número de capas solidas que queremos que tenga nuestra pieza en la parte superior y la inferior.

Fill density: Permite configurar el porcentaje de relleno de una pieza en el rango de 0% a 100% siendo cero una pieza hueca y el al 100% una pieza totalmente sólida siendo en esta última el tiempo de impresión mucho mayor.

Perimeters: Velocidad con que queremos imprimir los parámetros.

Infill: Velocidad de impresión del relleno de las piezas

Travel: Velocidad del extrusor en vacío es decir sin extruir plástico.

Skirt & Birm: Perímetros extra muy útiles para mejorar la adherencia.

La pestaña de parámetros de filamento permite realizar los ajustes de acuerdo al material que se va a utilizar debiéndose tener en cuenta el diámetro del mismo y sus características mecánicas, tales como temperatura de fundición, permite además la configuración de la temperatura de la cama caliente 40 º para PLA y 100º para ABS y los diversos modos de control del sistema de enfriamiento estas opciones se aprecian en la siguiente figura.

Ventana de configuración

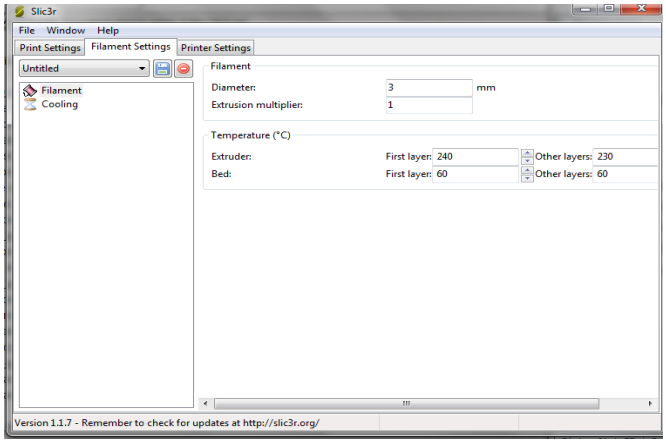


Figura 52. Parámetros de filamento
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

El software funciona en conjunto con Repetier Host para la descomposición del diseño 3D en capas, generar trayectorias de relleno y calcular la cantidad de material necesario.

La pestaña de parámetros de la impresora tiene varias opciones de configuración como muestra la figura 53, se describe los más importantes como por ejemplo:

Z offset: permite hacer la calibración del eje Z mediante software ajustando la altura de la boquilla si detecta que la cama caliente está más alta o más baja.

Vibration limit: Es parámetro experimental para reducir las vibraciones.

Ventana de configuración

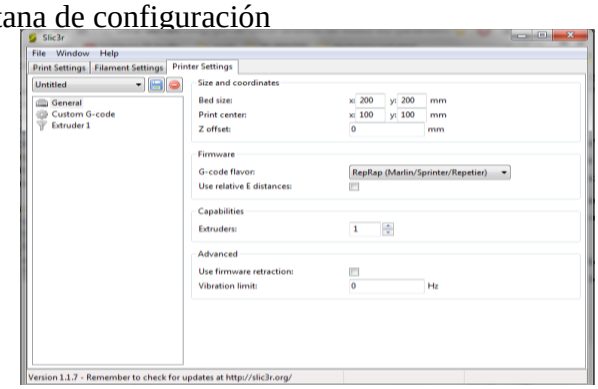


Figura 53. Parámetros de la máquina de prototipado rápido
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

3.10 Diagramas de flujo

Los diagramas de flujo generales de los programas de control de la máquina del programa principal, programa secundario y las diferentes subrutinas se presentan desde la figura 54 a la 58.

Diagrama 01

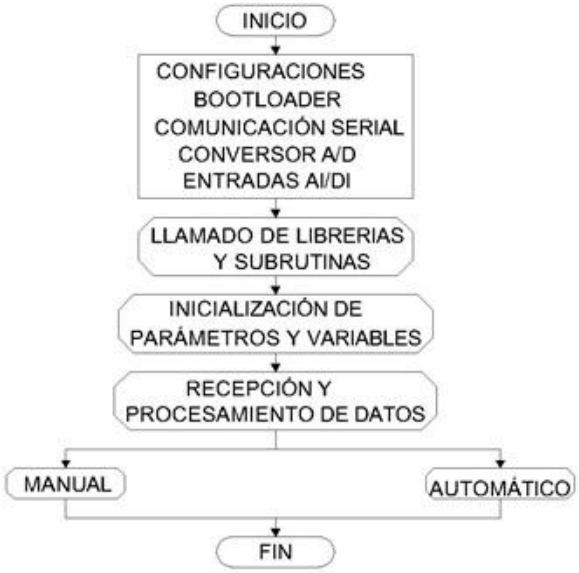


Figura 54. Diagrama de flujo principal
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Diagrama 02

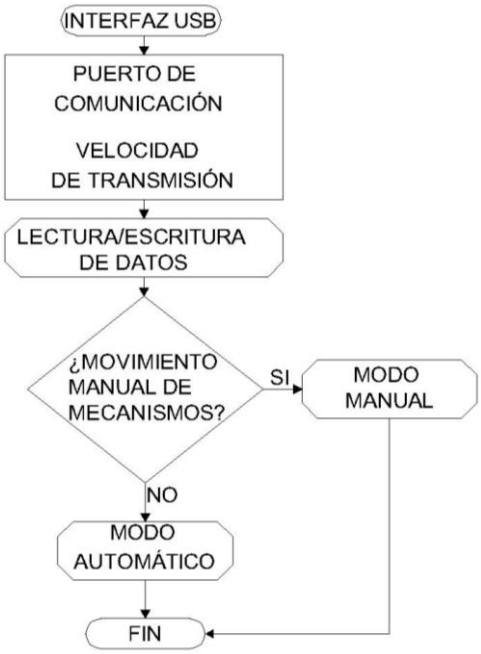


Figura 55. Diagrama de flujo subrutina comunicación
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Diagrama 03

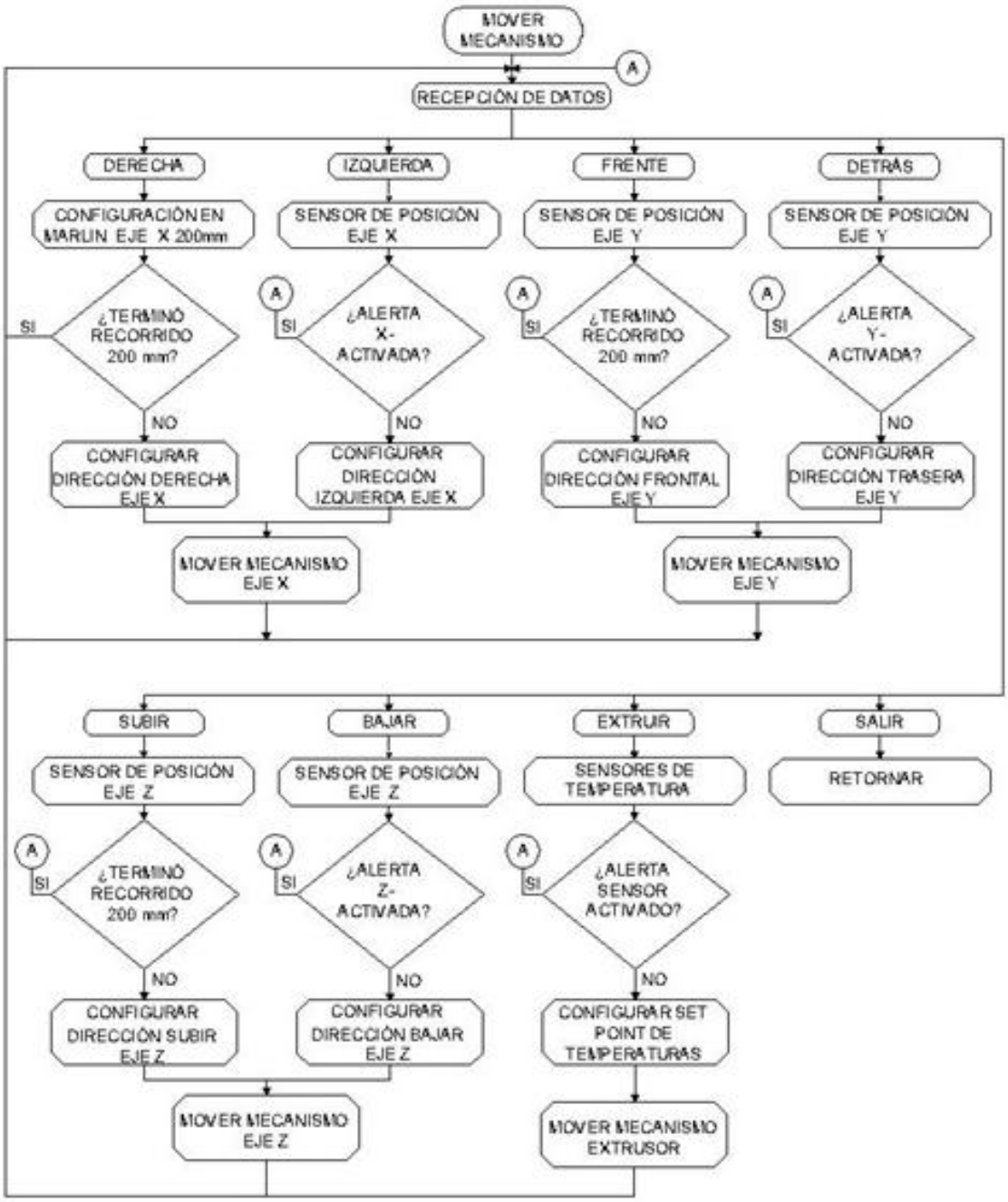


Figura 56. Subrutina del movimiento de mecanismos en forma manual
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Diagrama 03

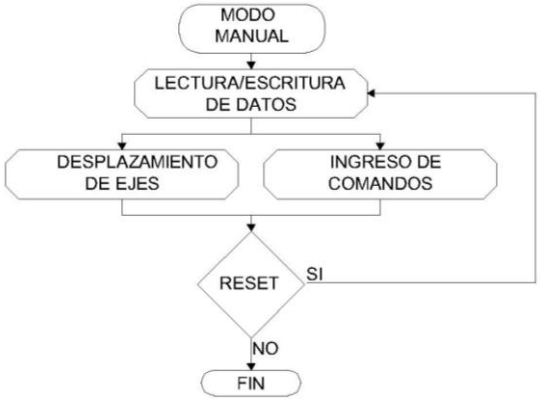


Figura 57. Diagrama de flujo subrutina manual.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Diagrama 04

Figura 58. Diagrama de flujo subrutina en modo automático
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

CAPÍTULO 4

APLICACIÓN

En el presente capítulo se describe el proceso CAD/CAM para la carcasa de un cargador de teléfonos móviles portátil y su posterior manufactura en la máquina de prototipado rápido, esto sin antes realizar una prueba de elongación detallada a continuación.

4.1 Consideraciones para una óptima impresión

Para evitar fallas, inconvenientes y accidentes en las posteriores impresiones se describe ciertas consideraciones que el usuario debe tener presente a la hora de usar la máquina de prototipado rápido

4.1.1 Cambio de material de trabajo

De acuerdo a las necesidades de los usuarios al momento de cambiar de material sea PLA o ABS se debe seguir el proceso detallado para evitar obstrucción del paso de filamento por la parte interna del extrusor.

- Identificar el diámetro correspondiente del filamento (1.75 ó 3) mm. a utilizar.

- El resto del filamento a reemplazar debe estar a una longitud de 40 mm sobre la parte superior del extrusor antes de enviarlo a calentar desde el Repetier Host.

- Cuando el extrusor alcance los 220 ºC enviar el comando de reversa desde la ventana de control manual con una longitud de 50 mm. a 75 mm. y esperar a que el filamento salga por completo para poder retirarlo.

- Introducir el nuevo material hacia el interior del extrusor hasta que llegue a tope y extruir de 5 mm. a 10 mm. hasta que salga el plástico fundido por la punta del extrusor.

4.1.2 Configuración de PID de cama caliente y extrusora

Ya sea que se cambie el tipo de material con el que se va a trabajar (ABS o PLA) o realice el remplazo de un termistor o un mosfet se deberá revisar los parámetros de los controladores PID. Dentro del software Repetier Host existe comandos que sirven para obtener los parámetros Kp, Ki, Kd de manera automática.

Desde la ventana de control principal en el Repetier Host a temperatura ambiente se envía el código G "M303 E-0 S240 C8" para trabajos del extrusor con ABS y para la cama caliente el código G "M303 E-1 S100 C8" uno a la vez, que permite obtener los valores del controlador PID esto tomará su tiempo ya que la señal de temperatura debe estabilizarse como se muestra en la figura 59 y en la parte baja de la ventana mostrará los valores calculados.

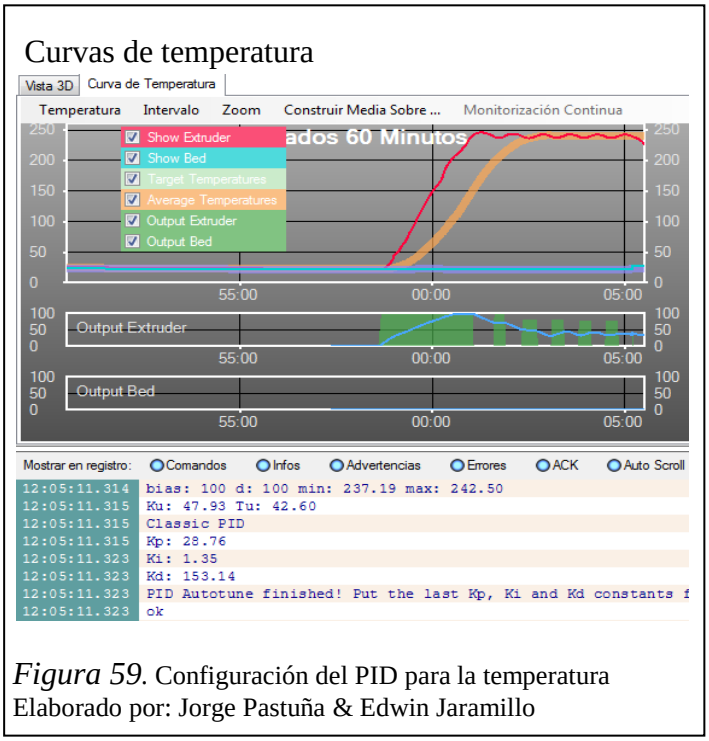


Figura 59. Configuración del PID para la temperatura
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Con los valores finales de Kp, Ki, Kd abrir el software Marlin ir a la pestaña Configuración.h y modificar las líneas de código mostradas en la figura 60.

Comparación de configuraciones

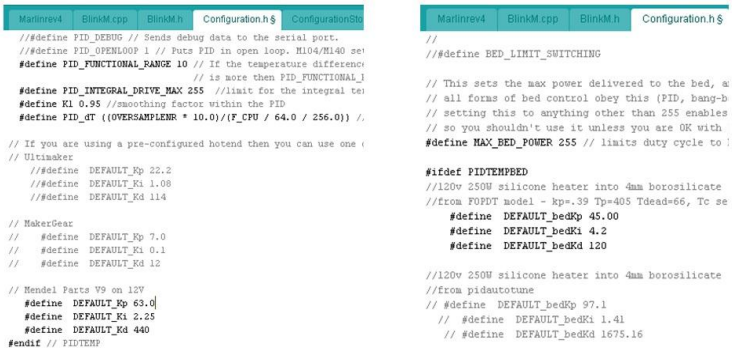


Figura 60. Configuración PID software Marlin
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Para el eje Z, los pasos por milímetro van a depender de los pasos del motor, la resolución de los pololus con los "jumpers" y el paso de rosca de la varilla.

La fórmula que se debe seguir será la siguiente:

Pasos_por_mm = Pasos del motor por vuelta x Micro pasos del pololu / paso varilla

El motor del tipo NEMA 17, obtendrá 200 pasos por vuelta, la resolución del precontrolador o micro pasos con los 4 "jumpers" será de 16 y los pasos de una varilla de métrica 5 es de 0.8 mm, por lo que el resultado de la ecuación es:

Pasos_por_mm = 200 x 16 / 0.8 = 4000

Si la varilla es de métrica 8, entonces el valor será el de 2560.

Para el Eje X e Y, abrir el Repetier Host, se hace mover 100 mm, y se mide la distancia real recorrida, este valor se va a dividir al valor que aparece en la casilla del eje X o Y (esta por defecto en 80) y lo multiplica por el valor que debia moverse, dando como resultado el número que se debe colocar en la configuración de estos ejes en el firmaware.

4.1.3 Prevención del pandeo

A continuación se detalla ciertos pasos para prevenir el pandeo que es cuando la base de la pieza 3D en el momento de su impresión se despega de la cama caliente y provoca que la pieza comience a curvarse como se aprecia en la figura 61.

Tapa de carcasa

Figura 61. Pandeo del modelo impreso
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

- Base de deposición perfectamente nivelada y plana.
- Superficie de la base de deposición limpia y libre de grasa.
- Distancia de 0.1mm entre el fundidor y la base (Eje Z).
- Velocidad de impresión lenta en las paredes del modelo.

4.2 Prueba de elongación en la impresión de prueba

Se llevó a cabo las pruebas de tracción bajo los parámetros indicados por la Norma ASTM D638-10 donde exige la realización de 3 ensayos como mínimo, descartando aquellos donde la fractura se produce fuera de la zona estrecha. Además determina el uso de probetas del Tipo I para polímeros con las siguientes dimensiones en milímetros (Tabla 19 - Figura 62).

Probeta tipo I

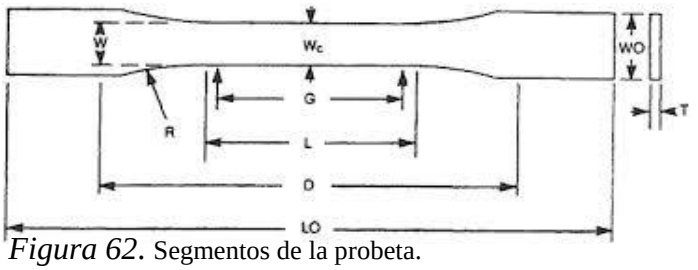


Figura 62. Segmentos de la probeta.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Tabla 19.
Dimensiones de la probeta

Abreviatura	Descripción	Tipo I (mm)
W	Ancho de sección estrecha	13
L	Longitud de sección estrecha	57
Wo	Ancho mínimo	19
Lo	Longitud mínima	165
G	Longitud calibrada	50
D	Distancia entre mordazas	115
R	Radio del filete	76
T	Espesor	3,2

Nota. Referenciarse a la figura62.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

Se procede a realizar la impresión de las probetas de ensayo (figura 63) para conocer la resistencia del polímetro cuando son tensionados utilizando la máquina Universal de pruebas Mecánicas hasta conseguir su ruptura.

Probetas normalizadas

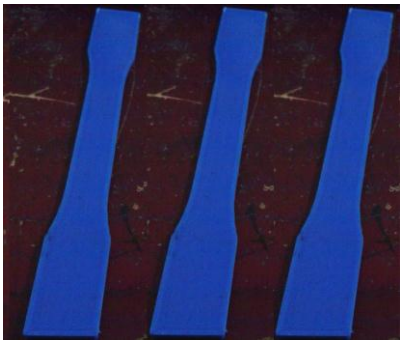


Figura 63. Probetas impresas.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

En la tabla 20 se detalla las tolerancias de cada una de las medidas descritas en la tabla 19 siendo en promedio de 0.4 mm.

Tabla 20.
Tolerancias de dimensiones de la probeta

Abreviatura	Valor real	Valor medido	Tolerancia (mm)
W	13	13,5	0,50
L	57	57,1	0,10
Wo	19	19,3	0,30
Lo	165	164,5	0,50
G	50	49,5	0,50
D	115	115,1	0,10
R	76	76,5	0,50
T	3,2	2,5	0,70
			0,40

Nota. Todas las medidas están en milímetros.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Antes de comenzar el ensayo se mide el ancho (A) y el espesor (E) de cada probeta y así calcular el área transversal (A). La tabla 21 muestra los datos tomados durante el ensayo de tracción a cada una de las probetas normalizadas:

Tabla 21.
Datos tomados de cada probeta en el ensayo

# de Probeta	A (mm)	E(mm)	A (mm^2)	Lo(mm)	Lf(mm)	F(Kgf)	F(N)
1	13	3,36	43,68	50,02	50,3	83,5	799,3
2	12,5	3,1	38,75	49,25	51,05	82,1	818,3
3	12,95	3,05	39,50	49,4	50,75	82	803,65

Nota. Lf constituye el límite en milímetros de elongación.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

El esfuerzo axial de tracción creciente aplicado por la máquina es aplicado hasta que se produzca la rotura de la probeta (figura 64).

Prueba de elongación

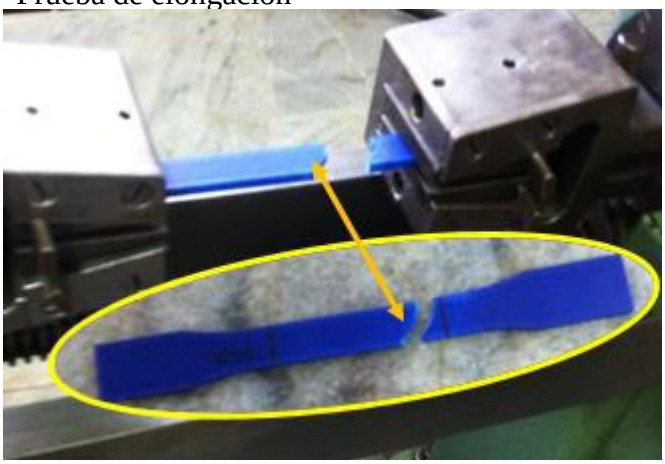


Figura 64. Prueba de elongación a la probeta.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

4.2.1 Diagrama esfuerzo deformación

Para graficar el diagrama esfuerzo-deformación se necesitan las siguientes ecuaciones:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$ Esfuerzo de tracción [1.1]

$$\xi = \frac{Lf - Lo}{Lo}$$ Deformación [1.2]

$$E = \frac{F/A}{\Delta L/L}$$ Módulo de Young [1.3]

Donde:

σ = Esfuerzo axial (Mpa)

F = Fuerza máxima soportada por el material (N)

A = Sección transversal de la probeta (mm^2)

ξ = Deformación convencional

E = Módulo de Young (MPa)

ΔL = Diferencia entre longitud final e inicial

Para obtener los diagramas de esfuerzo se calcula los parámetros mencionados anteriormente y se obtiene los resultados mostrados en la tabla 22.

Tabla 22.

Resultados para las pruebas de esfuerzo-deformación

N# de probeta	σ (Mpa)	ξ	E (Mpa)	ΔL (mm)
1	18,299	0,0256	733,39	1,28
2	21,117	0,0365	598,91	1,8
3	20,347	0,0273	764,89	1,35

Nota. Mpa mega pascales.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

En la figura 65 se puede observar que las curvas de las probetas impresas en la máquina pueden soportar grandes esfuerzos pero no demasiada elongación. Por lo tanto se concluye que este tipo de polímero es muy resistente y dócil.

Diagrama

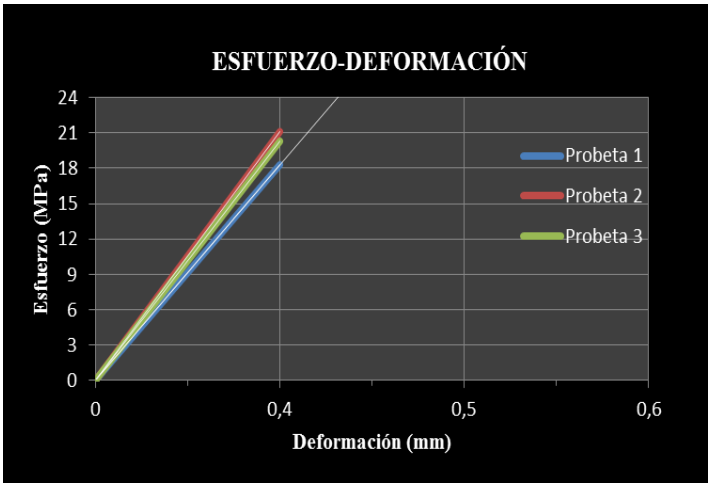


Figura 65. Diagrama de Esfuerzo - Deformación.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Además, la pendiente de la recta es muy pronunciada, lo que significa que debe ejercerse una considerable fuerza para deformarlo, pues con un esfuerzo alrededor de 20,4 MPa apenas se deformara 0,4mm. De modo que resulta sencillo comprobar que este tipo de plástico es rígido ya que tienen módulos de elasticidad muy elevados.

Todo este análisis de las curvas obtenidas en los diagramas Esfuerzo-Deformación, se fundamenta en el comportamiento de las propiedades mecánicas de los polímeros de alta y baja densidad expuestos en la figura 66.

Curva típica

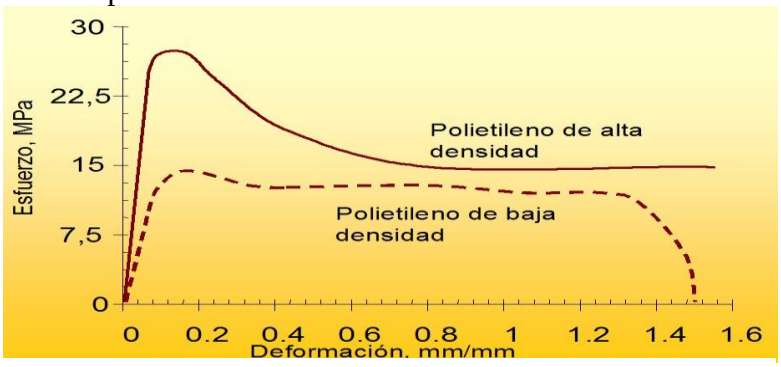


Figura 66. Curvas típicas de polímeros de alta y baja densidad.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

4.3 Proceso CAD/CAM

El diseño asistido por computadora (CAD) de las piezas tridimensionales se lo realiza por medio de cualquier software CAD, en la Universidad Politécnica Salesiana uno de los más conocidos es AUTOCAD (Figura 67), los mismos que deben ser exportados en formato .stl mediante el comando "EXPORT".

Modelo carcasa tapa

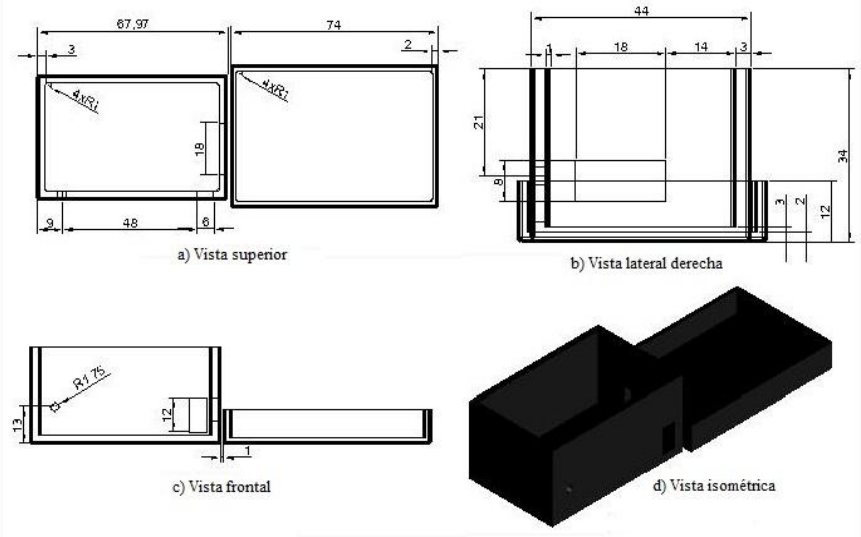


*Figura 67.*Modelo de una caja acotada en AutoCAD
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Una vez obtenido el sólido es momento de ejecutar el software CAM Repetier Host para configurar los parámetros de impresión necesarios y visualizar el número de capas, secuencia, trayectoria y tiempo de impresión estimada. Desde la ventana principal de control del software se realiza la importación de la pieza 3D al seleccionar el icono "Archivo" como se muestra en la figura 68.

Sólido importado

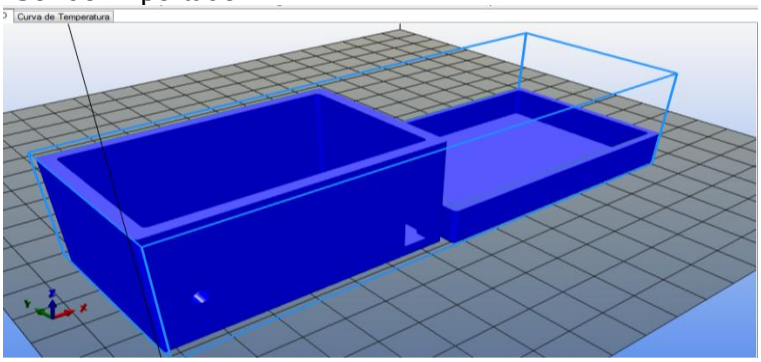


*Figura 68.*Importación del sólido al software Repetier Host
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

En el anexo 4 se describe los parametros necesarios de configuración del software de fileteo Slicer para poder obtener el modelo de la pieza 3D visualizada en capas (figura 69) y su respectivo código G.

Objeto procesado en Slicer

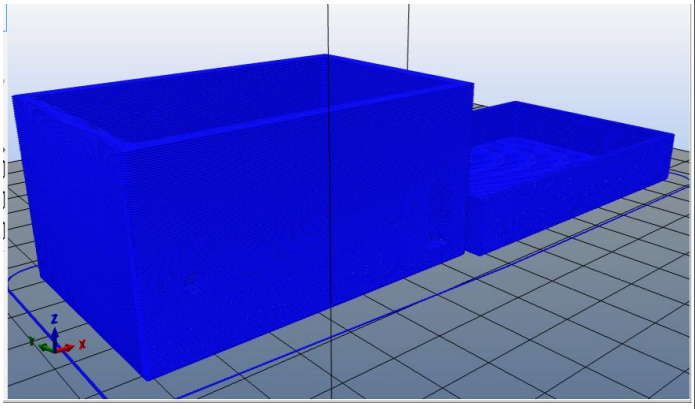


Figura 69. Modelo 3D visualizada en capas.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

Cabe mencionar que en la mayoría de máquinas CNC, los fabricantes han añadido sus propios post-procesadores, que no son más que pequeños cambios en la estructura del Código G; por razones de competencia y de comercialización el proyecto presentado se forma en Código Abierto por lo que no necesita de post-procesadores, ya que los códigos G que se utilizan para movimientos están bajo el estándar "NIST-NGC-RS274G" que son utilizados para procesos de fabricación de FDM lo que implica el rápido y fácil uso de los mismos. En la tabla 23 se describe ciertos códigos G de inicio que utiliza la máquina para realizar la carcasa.

Tabla 23
Códigos G de inicio para la máquina de prototipado rápido

G21	Define a milímetros las unidades
M107	Ventilador off
M190 S105	Esperar a mientras la temperatura de la cama llega a 105 ºC
M104 S230	Configura temperatura del extrusor a 230 ºC
G28	Posición (0,0,0) de los ejes
G1 Z5 F5000	Coordinar los movimientos de los ejes levantar el extrusor 5 milímetros a una velocidad de 5000 mm/min
M109 S230	Esperar a mientras la temperatura del extrusor llega a 230 ºC
G90	Use coordenadas absolutas
G92 E0	Usar distancias absolutas para extrusión
M82	Distancias absolutas al extrusor
G1 F1800.000 E-1.00000	coordinación de ejes a una velocidad de la interpolación para el extrusor - 1mm a una velocidad de 1800mm/min
G92 E0	Nuevo punto cero para extrusor
G1 Z0.200 F7800.000	Coordinación de ejes y movimiento de 0,2 mm del eje Z a 7800 mm/min
G1 X25.970 Y72.652 F7800.000	Coordinación de ejes X e Y a 7800 mm/min
G1 E1.00000 F1800.000	Tracción 1 mm de filamento a 1800 mm/min
G1 X28.833 Y71.850 E1.09624 F900.000	Interpolación de ejes extruye 0,09624 mm a 900 mm/min hasta la coordenada (28,833;71,850)mm
G1 X98.495 Y69.193 E3.35269	Interpolación de ejes extruye 1,384 mm a 900 mm/min hasta la coordenada (98,495;69,193)mm

Nota. Parámetros relevantes en la aplicación.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Los dos códigos al final la tabla 23 serán demostrados en la figura 70-71 para una mejor comprensión de los movimientos por coordenadas absolutas.

Trayectoria 01

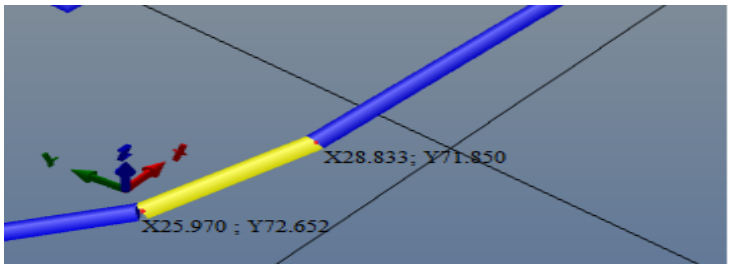


*Figura 70.*Código G1 X28.833 Y71.850 E1.09624 F900.000
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Trayectoria 02

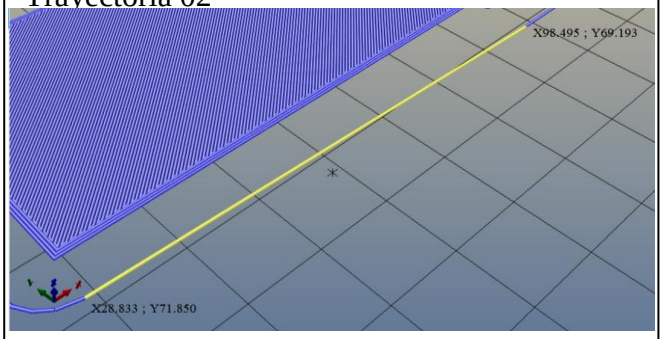


*Figura 71.*Código G1 X98.495 Y69.193 E3.35269
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

4.3.1 Encendido y apagado de la máquina

Antes de manipular la máquina el usuario debe retirar todo objeto que esté obstruyendo el área de impresión y trayectos de los sistemas de movimiento.

Para el encendido de la máquina es necesario realizar primero el enlace Usb serial para realizar la conexión a la red de energía doméstica mediante el switch alojado al extremo superior izquierdo de la máquina posterior a esto se realiza desde la interfaz del software Repetier Host.

Si el usuario desea prescindir del uso de la máquina una vez finalizado el trabajo deberá desconectar la alimentación de la red eléctrica desde el switch, para paso

seguido desconectarse desde el software y por último intervenir en el enlace Usb serial entre la PC y la máquina

4.3.2 Prueba de Homing de los ejes

El Homing o posición cero de los ejes se lo ejecuta desde la ventana de control manual vista en la figura 72, ya sea en forma individual o en forma general todos los ejes al seleccionar los iconos en forma de una casa, esto se lo realiza para que la máquina defina las posiciones absolutas o relativas de la forma en que describe el código G (coordenadas 0, 0, 0).

Control manual

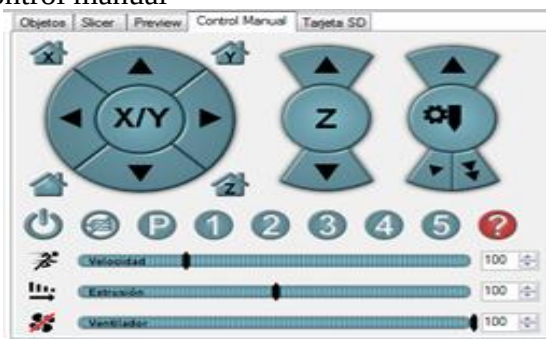


*Figura 72.*Ventana de control del Repetier host
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

4.3.3 Ortogonabilidad de ejes X, Y

Para comprobar que los movimientos de los sistemas de ejes X, Y de la máquina sean ortogonales se procede al uso de un lapicero y papel que estarán ubicados y bien colocados como se aprecia en la figura 73, donde las trayectorias trazadas desde la ventana de control manual de los sistemas de movimiento deben quedar completamente ortogonales en ambos sentidos es decir ida y vuelta.

Desplazamiento ortogonal

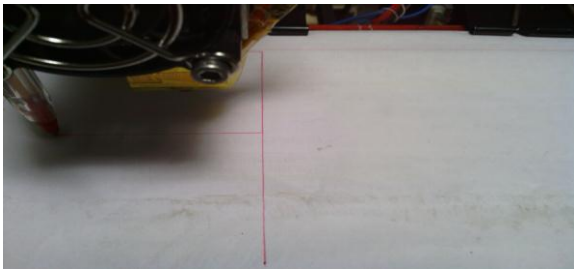


*Figura 73.*Prueba de los movimientos X, Y
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

4.3.4 Nivelación de la base de la cama caliente

La nivelación de la cama caliente es la primera prueba que se debe realizar al sistema mecánico para obtener una mejor calibración del eje Z por lo que con la ayuda de un dispositivo móvil se procede a ajustar o desajustar los tornillos que unen la base de la cama caliente con la misma (figura 74), ubicados en las respectivas esquinas de la base cuadrilátera.

Cama caliente

Figura 74. Nivelación de la cama caliente.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

La base está con un grado de inclinación tomando como referencia el extremo inferior izquierdo por lo que se procede a calibrar hasta obtener la nivelación adecuada como muestra la figura 75.

Base nivelada

Figura 75. Calibración de la cama caliente.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

4.3.5 Altura del Eje Z

Suele suceder que la altura de la punta del extrusor no siempre es la misma al desplazarse el eje X por lo que haciendo uso de un papel (0.1 mm) se pasa el mismo entre la punta del extrusor y la cama caliente debiendo quedar una pequeña fricción al paso del papel ver figura 76.

Altura eje Z

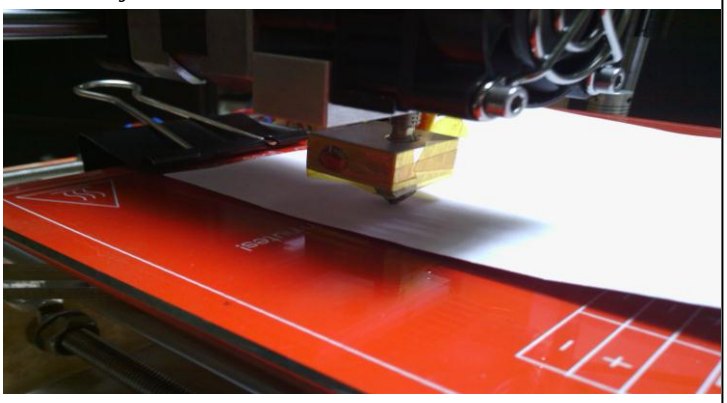


Figura 76. Nivelación de la cama caliente del eje Z.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

En la ventana de control manual se realiza el respectivo control de los ejes, hacer esto mientras desplaza el eje X. En caso de requerirlo, la altura se nivela al girar manualmente una a la vez, las varillas M5 roscadas del eje Z hasta obtener una fricción similar en todo el trayecto del eje X.

Las temperaturas de precalentamiento se determinan de acuerdo al tipo de polímero con el que se va a trabajar, los valores promedio son (240, 100) ºC para el ABS y (180,70) ºC para el PLA extrusor y cama caliente respectivamente, las curvas de temperaturas en la figura 77 permite comprobar el comportamiento de los PID´s.

Ventana de supervisión y control

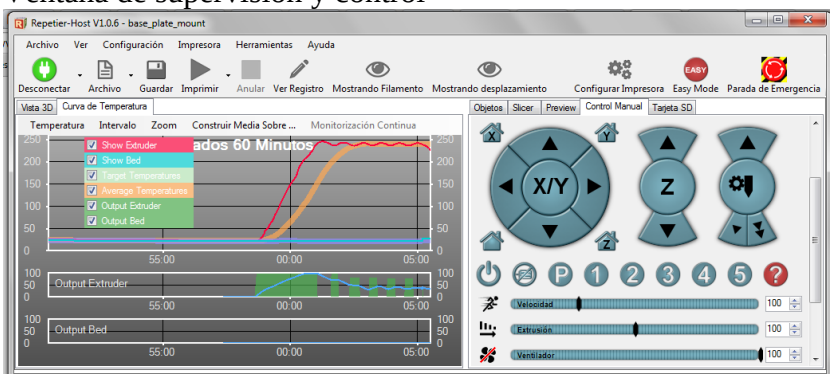


Figura 77. Ventana de curva de temperatura y de control manual.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

4.3.6 Manufactura de la carcasa del cargador portátil

Una vez realizados los procedimientos anteriores (antes de proceder a ejecutar la impresión desde la ventana de control del Repetier Host) cubrir con cinta térmica el área donde se va a imprimir en la cama caliente para una mejor adherencia de la primera capa de impresión, cuyos resultados se reflejan en la figura 78.

Adherencia con cinta térmica

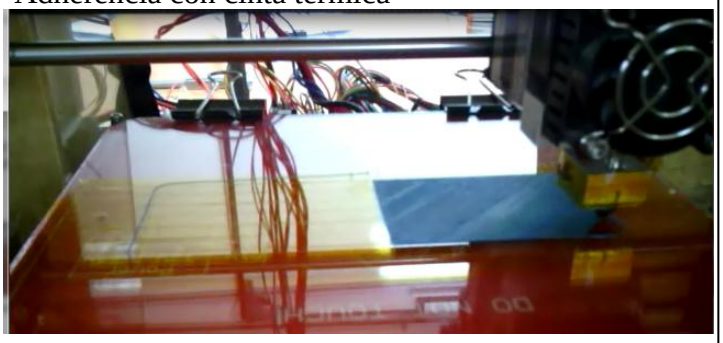


Figura 78. Cama caliente con cinta térmica.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

A continuación se puede apreciar la carcasa en su proceso de impresión y totalmente finalizado.

Resultados inicial y final

Figura 79. Impresión de una caja.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

4.3.8 Pruebas de geometría

De acuerdo a los planos acotados de la carcasa a manufacturar en la figura 67 se toma en cuenta los parámetros más importantes a analizar cómo se presentan en la tabla 24 los valores obtenidos de medir con un calibrador pie de rey, los respectivos cálculos de error y variación porcentual.

Se puede apreciar que todas las medidas están unas décimas de milímetro por encima del valor real. El motivo de este hecho reside en la calibración de la propia máquina. Cuando se monta la máquina hay que calibrarla para que las piezas sean fabricadas con las dimensiones reales con las que son diseñadas. Esta calibración no es exacta y requiere de un margen de tolerancia. Se decidió que este margen fuera superior, y no inferior, al valor real por el siguiente motivo.

Es común la fabricación de piezas en las que se empotran objetos, generalmente metálicos, como en el caso de la carcasa que debe albergar un switch de encendido un led y el puerto USB para una posterior unión de la pieza, se diseñó la misma con dos huecos rectangulares y una hoyo circular para albergar al led ver figura 80.

Facilidades de instalación

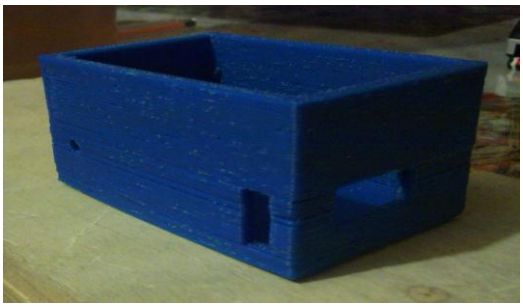


Figura 80. Carcasa con empotramiento y hueco.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

Tabla 24
Dimensiones de la carcasa

Carcasa	**Valor medido (mm)**	**Valor real (mm)**	**Error abs. (mm)**	**Variación (%)**
profundidad	68,95	68	0,95	1,39
ancho	43,92	44	0,08	0,18
alto	33,6	34	0,4	1,17
espesor	3,52	3	0,52	17,33

Nota. Dimensiones con margen de error +/- (0.1 mm).
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

Por lo tanto la carcasa presenta una tolerancia promedio de 0.48 mm al imprimir con la base caliente a 105 ºC, el extrusor a 230 ºC, un porcentaje de llenado de 70 % con estilo de relleno lineal el relleno se lo analiza en el siguiente apartado.

Por otro lado vemos que la variación porcentual en la medida del espesor (17,33%), la medida ligada los ejes X, Y, Z, es el mayor de todos con diferencia. Esto se debe a la dificultad en el ajuste de la distancia inicial del extrusor respecto a la base de impresión esto se debe a que como el extrusor estaba tocando la base de impresión, la compresión de las capas es mayor que si estuviera correctamente posicionado.

Como respuesta, las medidas correspondientes al plano horizontal (profundidad y espesor) son más elevadas, ya que esta compresión vertical, se ve reflejado en un aumento de las dimensiones horizontales.

De estas pruebas de geometría se obtiene la tabla 25 que son los datos de la tapa de la carcasa la que fue impresa con los mimos valores configurados en temperatura etc.

Tabla 25
Dimensiones de la tapa

Tapa	Valor medido (mm)	Valor real (mm)	Error abs (mm)	Variación (%)
profundidad	73,4	74	0,6	0,81
ancho	50	50	0	0,00
alto	11,92	12	0,08	0,67
espesor	2,22	2	0,22	11,00

Nota. Dimensiones con margen de error +/- (0.1 mm).
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

Volviendo a la comparación de la tapa y la carcasa, se ve que el error absoluto de la media de profundidad, ancho, alto y espesor respecto a sus valores reales es de 0,22 mm (figuras 81 y 82). Es decir, cuanto más grande es la medida, más error absoluto hay. Por otro lado, hay que tener en cuenta que, cuanto menor es la medida, mayor es la variación porcentual de la medida real con la programada. A pesar de esto, es importante tener en cuenta el error absoluto, ya que, por ejemplo a la hora de hacer una incrustación, unas pocas décimas de milímetro es un error tolerable (incluso bueno para tener algo de holgura).

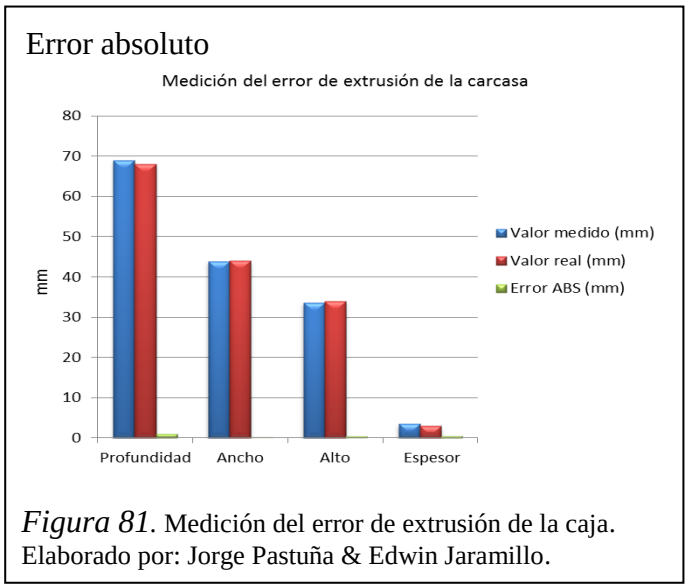


Figura 81. Medición del error de extrusión de la caja.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

Error absoluto

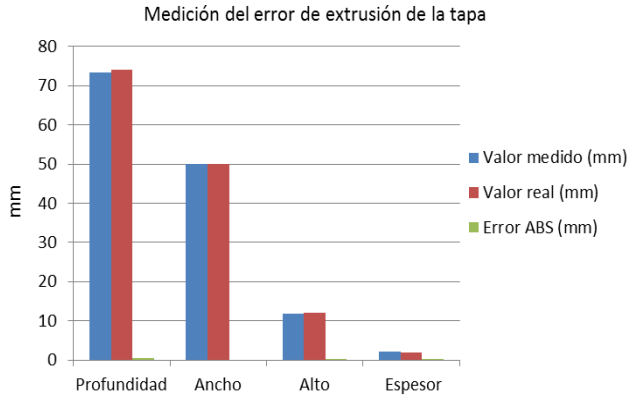


Figura 82. Medición del error de extrusión de la tapa.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

4.3.9 Microscopia

A continuación se presentan capturas de muestras tomadas al microscopio portátil (figura 83) y poder realizar un análisis visual de las capas de polímero ABS.

Microscopio

*Figura 83.*Microscopio portátil.
Fuente: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

En estas dos últimas imágenes se puede ver como las distintas capas están paralelas unas con otras (figura 84). La escala aplicable a todas las imágenes es 0.02 mm ya que todas las capturas se tomaron con el mismo aumento.

Vista lateral izq. carcasa

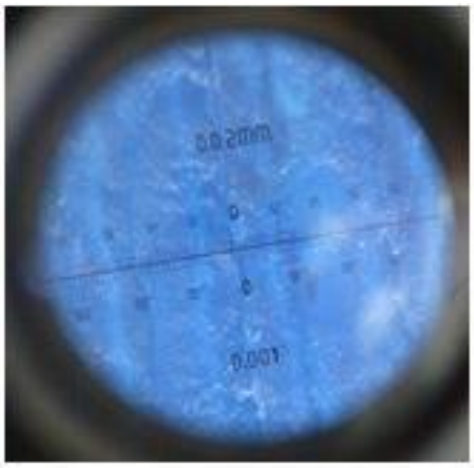


Figura 84. Vista en Microscopio de las capas.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

En las impresiones de estas dos combinaciones carcasa–tapa experimental el extrusor estaba tocando la cama de impresión y se formaron surcos en la primera base que provocaron que las consecutivas capas no fueran completamente lisas y estuvieran bien apiladas (figura 85).

Vista posterior

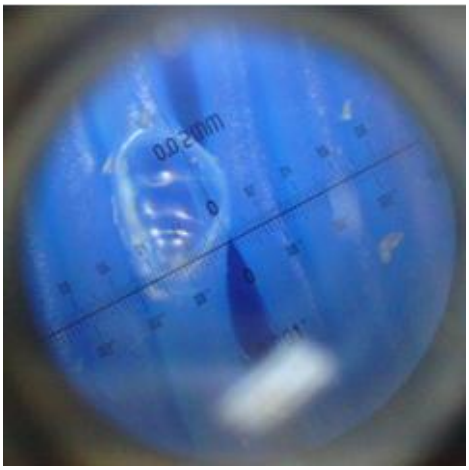


Figura 85. Surcos formados entre la carcasa-tapa.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

Hay que tener en cuenta la tapa de la carcasa tenía una altura de impresión en el eje Z de tan sólo 3 mm a diferencia de la carcasa con sus 34 mm más alta, este efecto sólo se nota en sus primeras capas (figura 86).

También se ve que el efecto se va mitigando a medida que crece la altura de la pieza.

Vista lateral

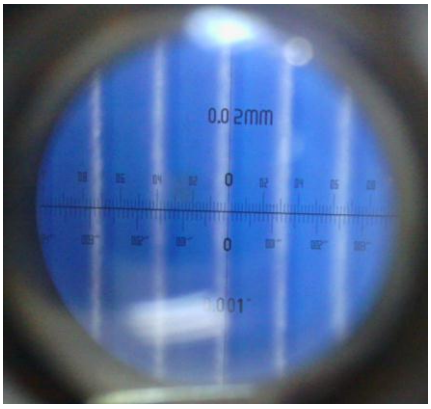


Figura 86. Vista en Microscopio de las capas de la tapa
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

La impresión realizada a 105°C ayuda a que las primeras capas se mantengan cerca de la temperatura de transición vítrea (deformación térmica) del ABS, por lo que esos los surcos que se ve en la figura 86 se "aplastaban" fácilmente por la punta del extrusor al imprimir las capas consecutivas dando como resultado capas 0.2 a 0.25 mm.

La figura 87 demuestra la deformación de las capas lineales, cuando la extrusión del polímero no es constante o es demasiado elevada ocasionando rugosidad en el acabado de la carcasa.

Vista superior del borde de la carcasa

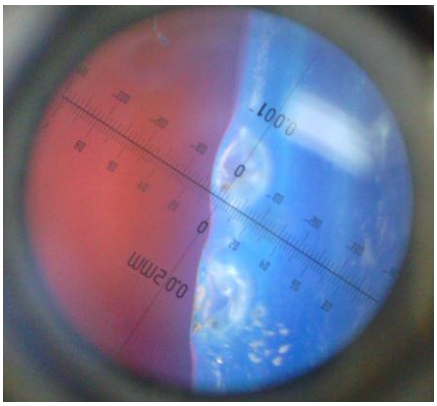


Figura 87. Deformación de capa lineal.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

Se puede apreciar un estimado de 0.1 mm de deformación superficial o rugosidad en las caras de la carcasa ver figura 88.

Sección lateral

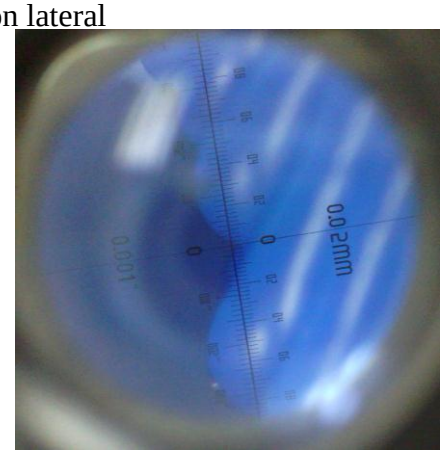


Figura 88. Rugosidad en las caras de la carcasa.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

Se aprecia también en la figura 89 la variación en la altura de las piezas, que se ve afectada por la distancia inicial del extrusor a la base de impresión. Esto ya se comentó en el apartado de dimensiones

Disposición de capas

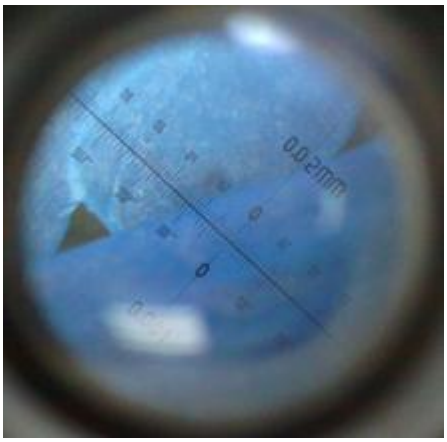


Figura 89. Variación de la altura de las piezas.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

Se realizó un corte transversal de la tapa de la carcasa para visualizar la adhesión entre capas de polímero extruidas siendo las primeras capas las de mejor adherencia por su baja velocidad de deposición y alta temperatura de la cama caliente y las de menor adherencia las capas extruidas con un espesor y velocidad mayor a la extrusión de las primeras capas (Figura 90).

Corte lateral de carcasa

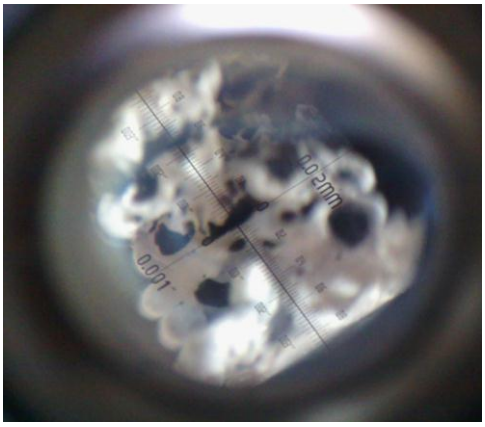


Figura 90. Corte transversal de la tapa de la carcasa.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo.

4.4 Análisis de costos

Se presenta en las tablas 26, 27 y 28 la cantidad de elementos con sus respectivos costos para tener un criterio de inversión estimada a la hora de realizar un proyecto similar.

Tabla 26.
Costos de insumos

CANTIDAD	DETALLE	COSTO UNITARIO USD	COSTO TOTAL USD
1	Extrusor	90.00	90.00
4	Motores a paso Nema	14.00	56.00
1	Arduino Mega 2560	38.00	38.00
1	Ramp 1.4	35.00	35.00
1	Fuente de poder	24.00	24.00
8	Varillas para ejes	9.00	72.00
2	Rollo ABS	61.00	122.00
1	Cama caliente	55.00	55.00
1	Material mecánico	60.00	60.00
		TOTAL	552.00

Nota. Costos incluidos IVA.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Tabla 27.
Costo de mano de obra

Horas	Cantidad de personas	COSTO UNITARIO USD	COSTO TOTAL USD
15	2	10.00	300.00

Nota. Total de horas implementada.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Tabla 28.
Costo final del proyecto

DESCRIPCIÓN	COSTO TOTAL USD
Costo de hardware	552.00
Costo de ingeniería	300.00
	852.00

Nota. Precio final de implementación.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Tomando en cuenta los altos valores de los aranceles al importar productos desde cualquier país a Ecuador una impresora con similares características puede llegar a costar entre 1200 y 1500 dólares. En el mercado Ecuatoriano encontramos una impresora Prusa I3 Hephestos a un valor de 1500 dólares ver figura 91. La cual posee las características presentes en la tabla 29.

Tabla 29.
Impresora 3D Hephestos de venta en el mercado

Estructura	Acrílico
Tamaño de impresión	210*210*180 mm (máximo)
Espesor de impresión	0.1 – 0.4 mm
Materiales de impresión	PLA y ABS
Diámetro material	1.75 mm
Dimensión de la maquina	430*450*370 mm

Nota. Características básicas de máquina de prototipado rápido.
Elaborado por: Jorge Pastuña & Edwin Jaramillo

Máquina comercial

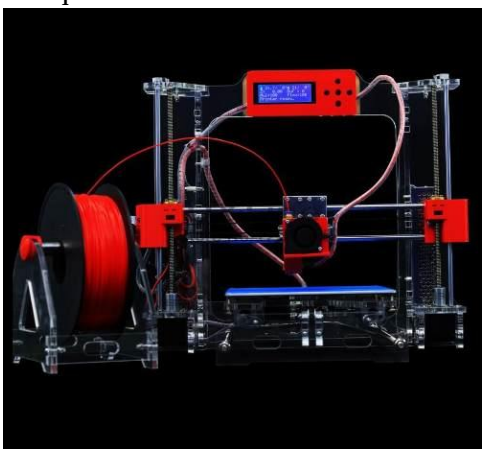


Figura 91. Impresora 3D Hephestos
Fuente: Empresa Ecuador

4.5 Procedimiento de mantenimiento

4.5.1 Mantenimiento preventivo

En el mantenimiento preventivo se realizan actividades de inspección de equipos, tanto de funcionamiento como limpieza y calibración, que se deben realizar en forma periódica en base de un plan. (El propósito de este plan es prevenir fallas, manteniendo la máquina en impecable funcionamiento)

La intención principal de este mantenimiento es la de inspeccionar el equipo y detectar fallas en su parte inicial y realizar sus respectivas correcciones a tiempo.

4.5.1.1 Procedimiento de limpieza de la impresora 3D

- Desconecte la fuente de poder.
- Use una franela y limpie cuidadosamente la cabina de la impresora.
- Levante la tapa de la cabina cuidadosamente.
- Limpie la impresora 3D con una aspiradora para retirar el polvo.
- Limpie los cables con una franela cuidadosamente para que no se desconecten.

4.5.1.2 Procedimiento de limpieza de los componentes principales

- Desconectar la fuente de poder.
- Levantar la tapa de la cabina. Cuando se abra la cabina manipular directamente los circuitos, la descarga electrostática puede dañarlos permanentemente. Para tales manipulaciones debemos descargarnos continuamente sobre una superficie metálica (por ejemplo en el blindaje de la fuente de poder).
- Identificar los componentes principales.
- Hacer un pequeño diagrama de la disposición de la tarjeta o a su vez revisar el proyecto de grado en el cual están los diagramas.
- La tarjeta arduino y la ramp deben ser sopleteadas coa aire comprimido y se debe evitar tocar su superficie.
- La superficie de la cama caliente y los ejes de la impresora 3D deben ser sopleteadas y se debe retirar todas las partículas de polvo que pudiere existir.
- La fuente de poder debe ser limpiada con una aspiradora.

- Luego de retirar el polvo de toda la impresora, principalmente de los ejes y la cama caliente, se debe revisar el movimiento de la cama caliente en el eje y verificar que este sea lo más suave posible de lo contrario proceda a aplicar una pequeña cantidad de grasa o aceite sobre los cojines para suavizar el movimiento.
- Verifique que la cama caliente este horizontal, sin ningún desnivel. Si tuviera debe realizar los arreglos necesarios. Verificando cada uno de las varillas que están debajo de la cama caliente.

4.5.1.3 Ensamblaje del equipo

- Ensamblar de nuevo las partes de la impresora 3D, asegurándose que la tarjeta arduino y la ramp no estén en contacto de algún elemento que pueda causar cortocircuito.
- Verificar que todos los elementos estén secos.
- Encienda el equipo y compruebe su funcionamiento.
- En caso de que no funcione correctamente realice el mantenimiento correctivo.

4.5.2 Mantenimiento correctivo

Cuando el equipo deje de realizar sus funciones de forma correcta, es necesario revisarlo detectar la falla y realizar su respectiva corrección.

La intención de este mantenimiento es recuperar el equipo a costos mínimos.

4.5.2.1 Procedimientos para verificar fallas en la fuente de poder

- Verificar la tensión con un multímetro en la fuente de poder.
- Verificar que los cables estén correctamente conectados.
- Verificar que la fuente reciba corriente.
    - Observando que el ventilador de la fuente gire.
- Verificar que los cables estén en buen estado.
- Con la fuente de poder comprobada verifique si el Arduino encienda (observando que se encienda el led de arranque) o sino verifique si hay voltaje en los pines (+5V y GND).

4.5.2.3 Procedimientos para verificar averías en la Ramp y el Arduino.

- Verificar las conexiones de todos los componentes.
- Desconectar y conectar de nuevo los actuadores y sensores.
- Verificar que se encienda el led de arranque del arduino y en la ramp 1.3.
- Verificar que los driver estén funcionando (verificando que los actuadores que estén conectados en el driver a verificar funcionen).

CONCLUSIONES

- Mediante la manufactura de la carcasa descrita en capítulo 4 la máquina imprimió con un filamento de ABS de diámetro 1.75 mm, permitiendo una tolerancia dimensional media en la aplicación manufactura de carcasa-tapa en los ejes (X, Y, Z) obteniendo un error de precisión de 0.53 milímetros cúbicos.

- La máquina de prototipado rápido es competitiva con las existentes en el mercado ecuatoriano, ya que, es rentable su implementación (850 dólares) frente a los1500 dólares de otra máquina y su sistema de enclosure para la prevención de accidentes por contacto térmico.

- El control de la máquina se basa en dos tarjetas principales, el Arduino Mega 2560 como tarjeta de control y la Shield Ramps 1.4 como tarjeta de interface con sensores on/off para la retroalimentación de los sistemas de posicionamiento con lo cual la resolución de impresión mínima promedio es de 0.4 mm por capa.

- Desde el entorno de desarrollo Arduino por medio de la interfaz USB se programó la placa Arduino con el firmware basado en lenguaje C debidamente configurando los parámetros de velocidad, temperatura para el control de posicionamiento, velocidad de avance por ejes y del sistema de extrusión.

- Programar Arduino mediante firmware basado en lenguaje C permite comprender la configuración de parámetros con los cuales se interpreta el lenguaje de máquina generado desde el Repetier Host.

- Las piezas manufacturadas a velocidad de impresión de 40 mm/s, temperatura de la cama 110 ºC, temperatura del extrusor a 230 ºC y relleno a 100% permite obtener un objeto sólido con resistencia máxima a tracción de 21,11 MPa.

RECOMENDACIONES

- Tener en consideración a la hora de elegir el filamento de 3mm ya que deberá configurar los parámetros para una extrusión por calor en el extrusor lo que requerirá de mayor energía y un orificio de salida del filamento en el extrusor más grande (0.35-0.4) mm, que al usar el filamento de 1.75mm donde el prototipado rápido se da por extrusión mecánica propiamente en el extrusor necesitando menor fuerza para el empuje del filamento pero si más velocidad.

- Un tiempo demasiado prolongado en el calentamiento de la cama suele ser porque no llega la tensión adecuada (12V) de la fuente debido a que los cables son muy finos o porque hay alguna conexión un poco floja y presenta resistencia.

- Si la cama o el extrusor no calienta revisar si en la Ramps 1.4 se encienden los led respectivos lo que demuestra que si está circulando corriente hacia las resistencias de 25W, en caso de no estarlo revisar si los cables de conexión de los sistemas de calentamiento no están rotos o flojos ya que esto reflejará un apagado de emergencia por software de la máquina en el Repetier Host.

- Para imprimir geometrías más complejas se recomienda aumentar un segundo extrusor para que coloque material de soporte.

- El almacenamiento de la máquina debe realizarse en ambientes secos, libres de polvo y a temperatura ambiente, evitando los rayos ultravioletas provenientes del sol.

- No se debe usar el extrusor a 230º C por más de 10 minutos en estado estacionario ya que esto ocasionará que la tracción del polímero disminuya y por ende la deposición no se dé.

LISTA DE REFERENCIAS

Abellán, C. A. (2013). *Implementación de una máquina de prototipado rápido.* Cartagena, 9 de Octubre: I.T.I. Electrónicca.

Alberto, P. (23 de 06 de 2013). *Procesos de Manufactura UNAD*. Recuperado el 09 de 12 de 2014, de http://procemanufactura.blogspot.com/2013/06/clasificacion-de-los-procesos-de.html

Arduino. (s.f.). *Arduino*. Recuperado el 4 de 12 de 2014, de Arduino: http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560

Arian. (s.f.). Recuperado el 18 de Enero de 2015, de http://www.arian.cl/downloads/nt-004.pdf

Bollinger. (1988). *Computer Control of Machines and Processes.* Masachuset: Addison-Wesley Publishing Corp.

Calvete, M. M. (JUnio de 2013). Recuperado el 15 de Enero de 2015

Devictor. (s.f.). Recuperado el 18 de Enero de 2015, de http://devicter.ru/goods/Mechanical-Endstop

eHow en Español. (s.f.). Recuperado el 09 de 10 de 2014, de eHow en Español: http://www.ehowenespanol.com/ventajas-desventajas-2d-frente-3d-hechos_10468/

Groover, M. P. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna.* México: PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA S.A.

Informatica-Hoy. (s.f.). Recuperado el 09 de 10 de 2014, de Informatica-Hoy: http://www.informatica-hoy.com.ar/software-diseno-grafico/Que-es-Autocad.php

Kalpakjian, S. (2002). *Manufactura Ingeniería y Tecnología.* Naulcapan de Juáres, México: PEARSON EDUCACIÓN.

Morelli, R. D. (2007). *Aplicaciones Didacticas de Modelado de Solidos y Vistas Automaticas con AutoCAD.* Curitiba-Brasil: GRAPHICA.

Nacional, E. P. (FEBRERO de 2014). PROYECTO DE DISEÑO. *Proyecto de Diseño de una máquina lazadora de pelotas*. QUITO, PICHINCHA, ECUADOR.

P. Radhakrishnan, S. S. (2008). *CAD/CAM/CIM.* New Delhi: New Age International (P) Limited, Publishers.

Pololu. (s.f.). *Pololu*. Recuperado el 4 de 12 de 2014, de http://www.pololu.com/product/1182

Popolu. (s.f.). Recuperado el 18 de Enero de 2015, de https://www.pololu.com/file/download/a4988_DMOS_microstepping_driver_with_translator.pdf?file_id=0J450

RepRap. (s.f.). *reprap.org*. Recuperado el 15 de Enero de 2015, de http://reprap.org/wiki/Prusa_i3_Rework_Bill_of_materials

Riba, C. R. (2002). *Diseño Concurrente.* Barcelona.

Sánchez, C. (s.f.). Recuperado el 20 de Enero de 2015, de http://www.carlos-sanchez.com/Prusa3/

Sanchez, C. (s.f.). *Carlos Sanchez*. Recuperado el 15 de Enero de 2015, de http://www.carlos-sanchez.com/Prusa3/

Shih, R. (2013). AutoCAD 2014 Tutorial-First Level: 2D Fundamentals. En R. Shih, *AutoCAD 2014 Tutorial-First Level: 2D Fundamentals* (pág. 424). United States: Schroff Development Corporation.

sidewinderinc. (15 de Abril de 1999). *ebay*. Recuperado el 15 de Enero de 2015, de Folder Tech : http://www.ebay.com/itm/Folger-Tech-RepRap-Prusa-i3-Clear-Frame-Full-3D-Printer-Kit-RAMPS-GT2-/231301357105

Siemens. (s.f.). Recuperado el 09 de 10 de 2014, de Siemens: http://www.plm.automation.siemens.com/es_sa/

SIEMENS. (s.f.). Recuperado el 09 de 10 de 2014, de SIEMENS: http://www.plm.automation.siemens.com/es_sa/plm/cam.shtml

Teruel, F. C. (2005). *Control Numérico y Programacion.* España: MARCOMBO S.A.

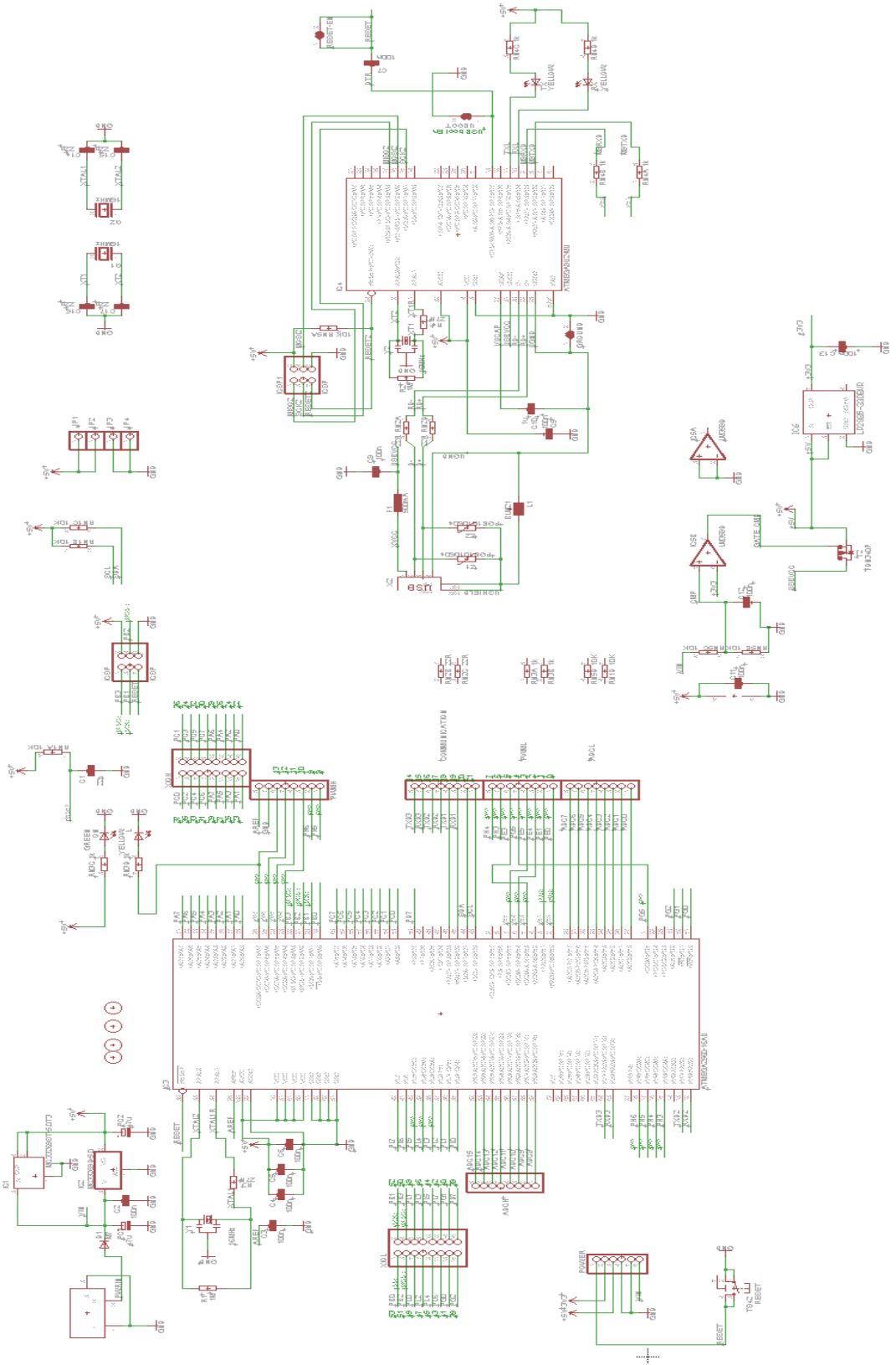
Torres, E. A. (2013). Diseño y construcción de un aimpresora ED aplicadondo la técnica de prototipado rápido modelado por deposicion fundida. *3er Congreso Internacional de Ingenieria Mecatronica* (pág. 6). México: UNAB.

Wikipedia. (s.f.). *Wikipedia*. Recuperado el 4 de 12 de 2014, de http://reprap.org/wiki/PCB_Heatbed

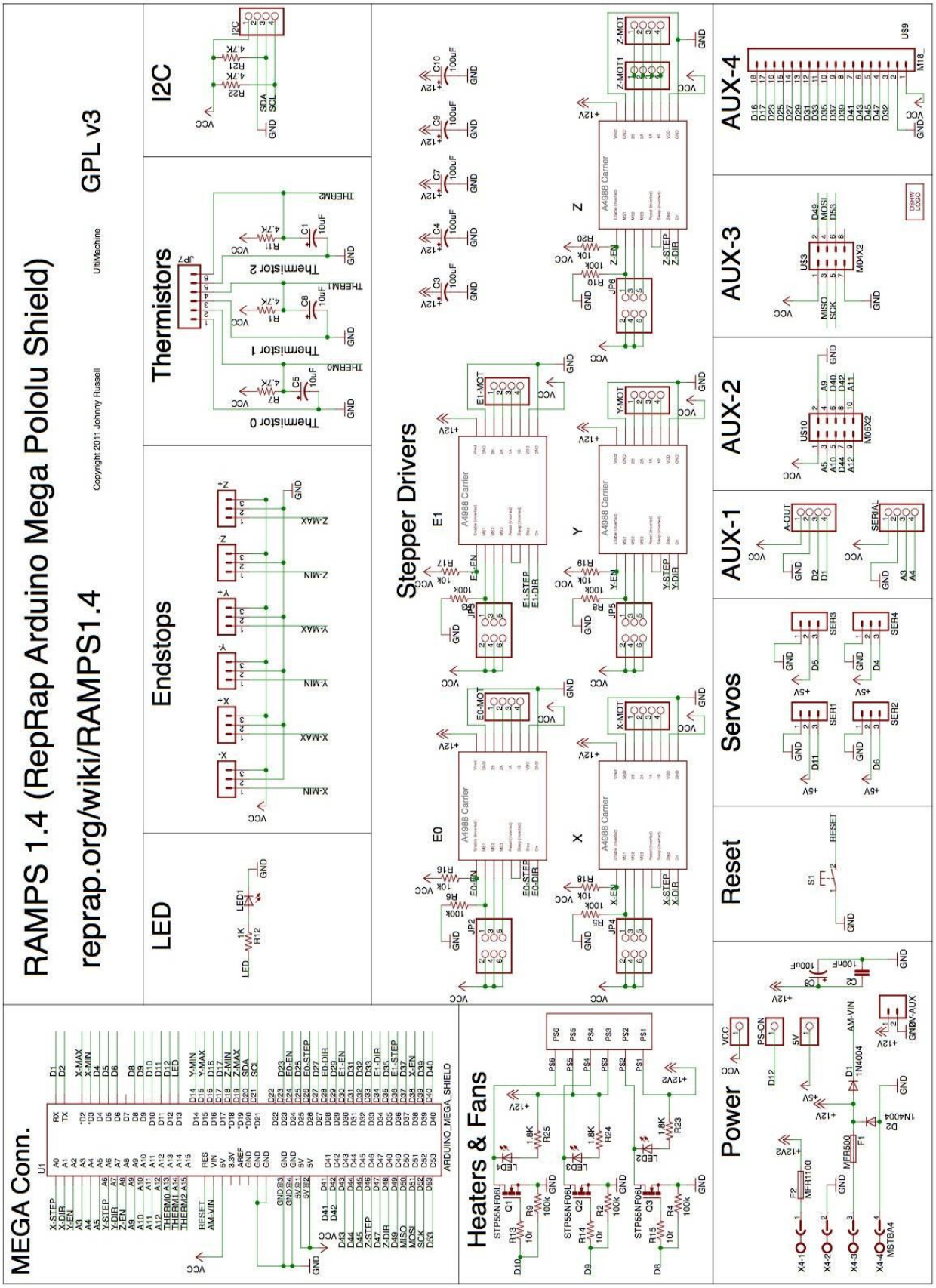
Wikipedia, R. (s.f.). *RepRap Wikipedia*. Recuperado el 4 de 12 de 2014, de http://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4/es

ANEXOS

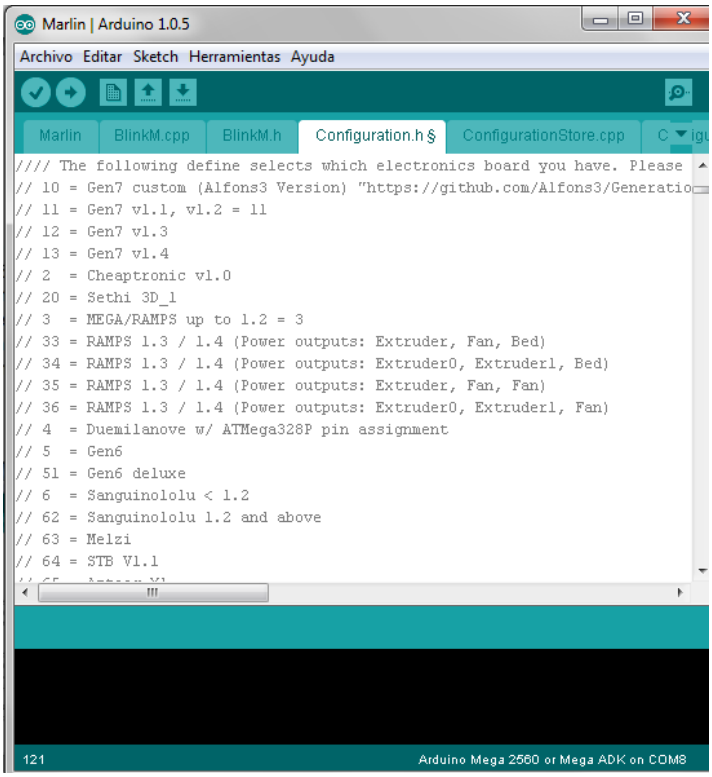
Anexo 1. Diagrama de conexiones del Arduino Mega 2560

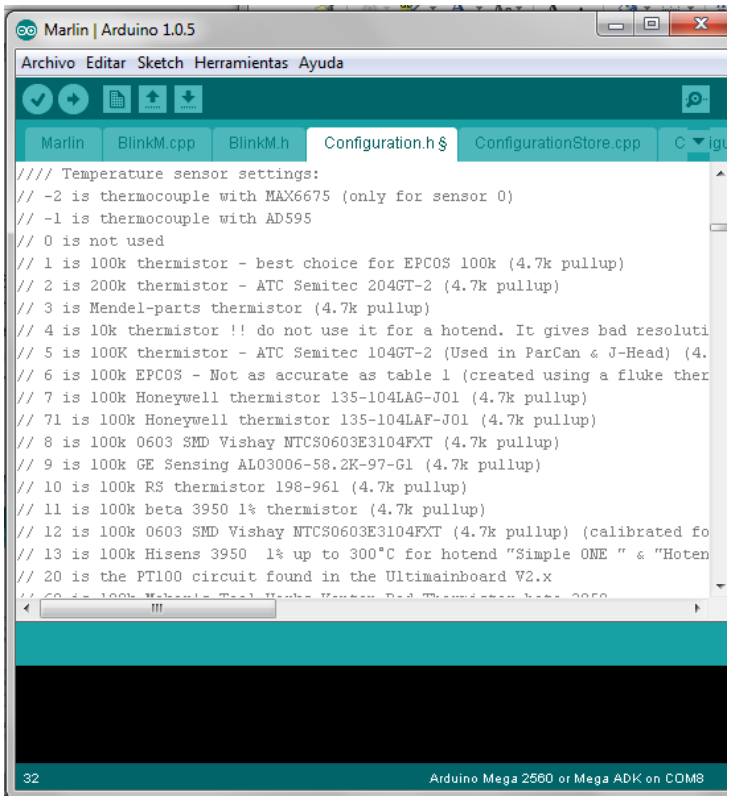


Anexo 2. Diagrama de conexiones de la Ramp 1.4

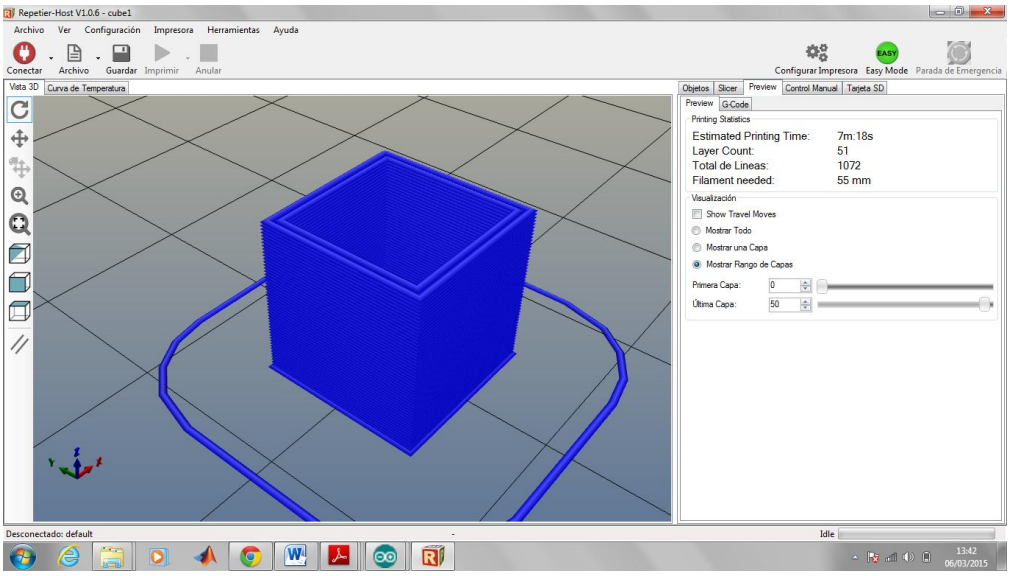


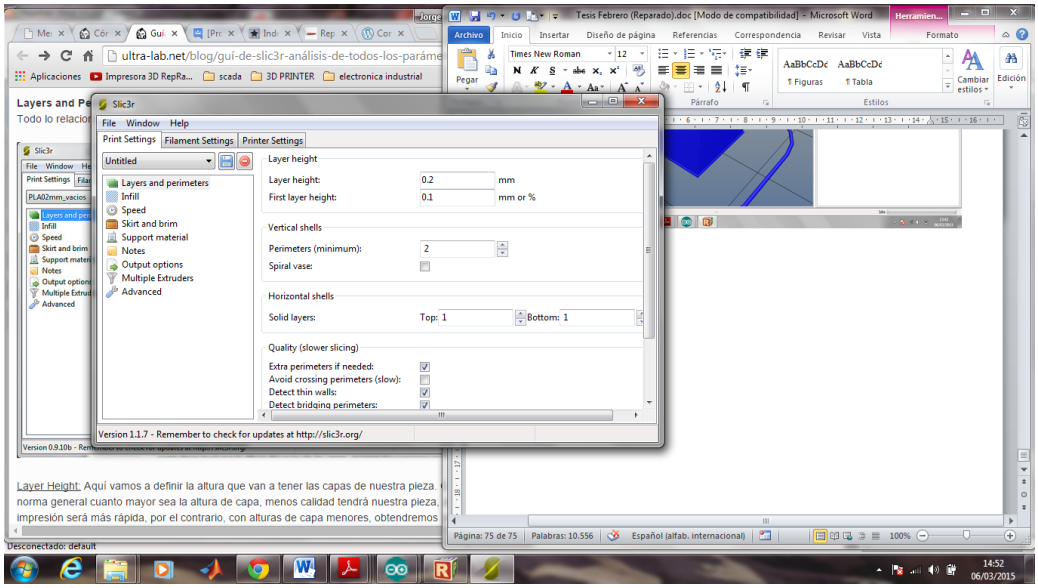
Anexo 3. Ventanas de configuración principal del firmware



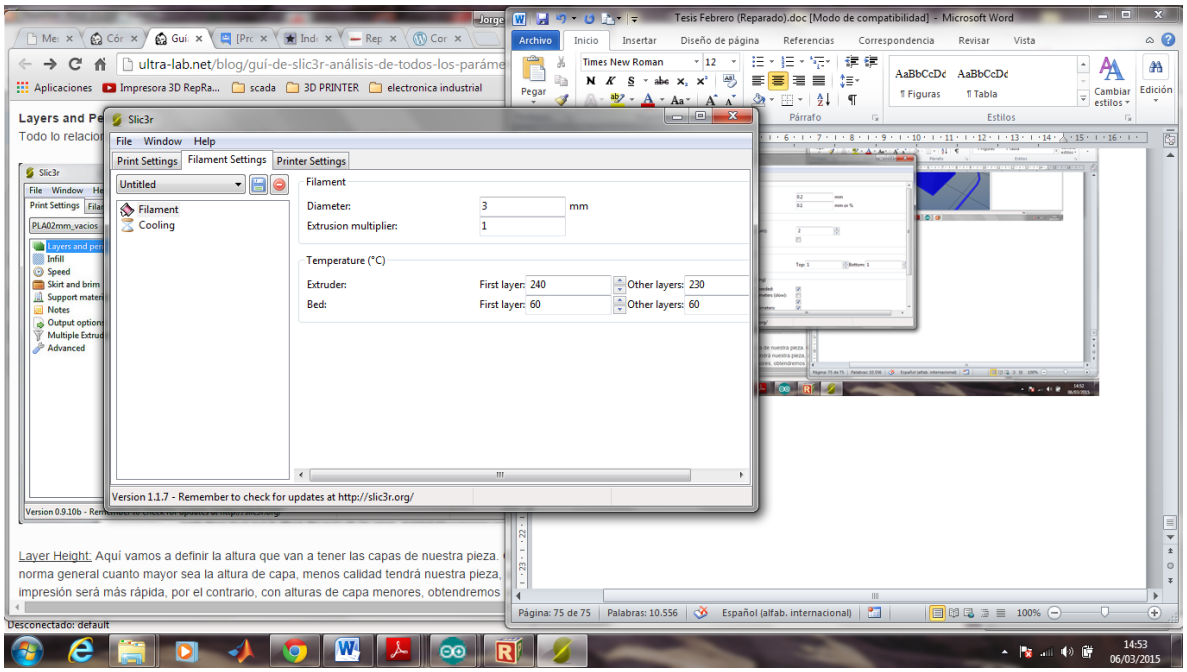


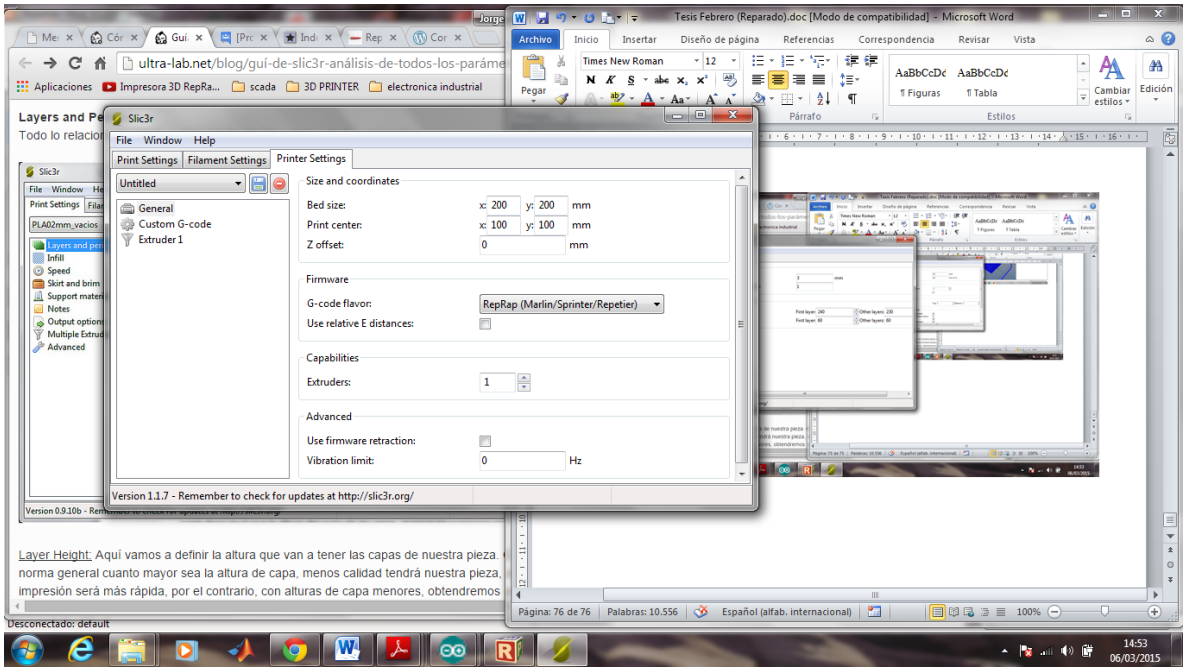
Anexo 4. Ventana de pre visualización y configuración del Repetier Host



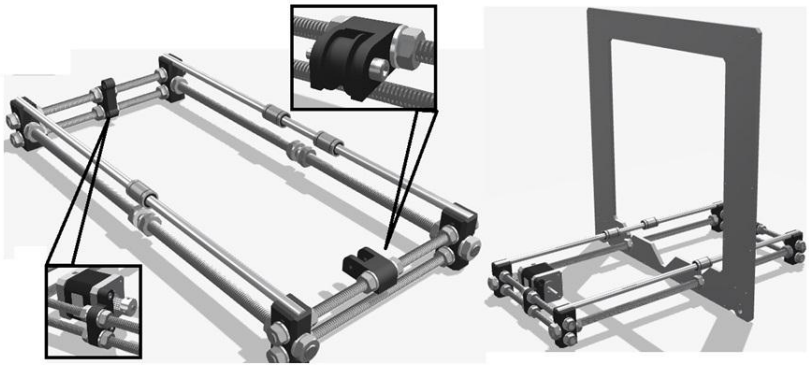


Anexo 5. Ventanas de configuración del Slicer

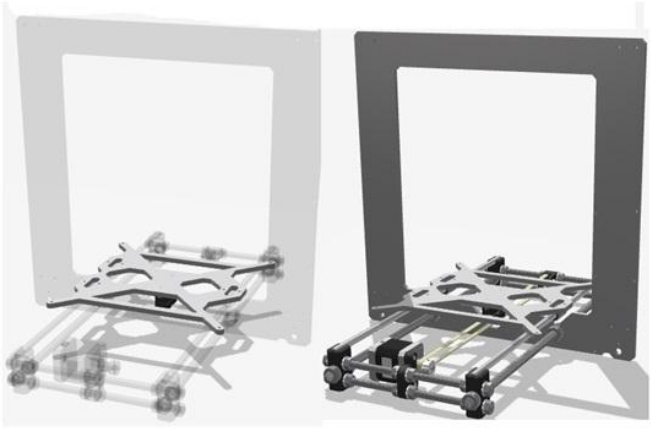




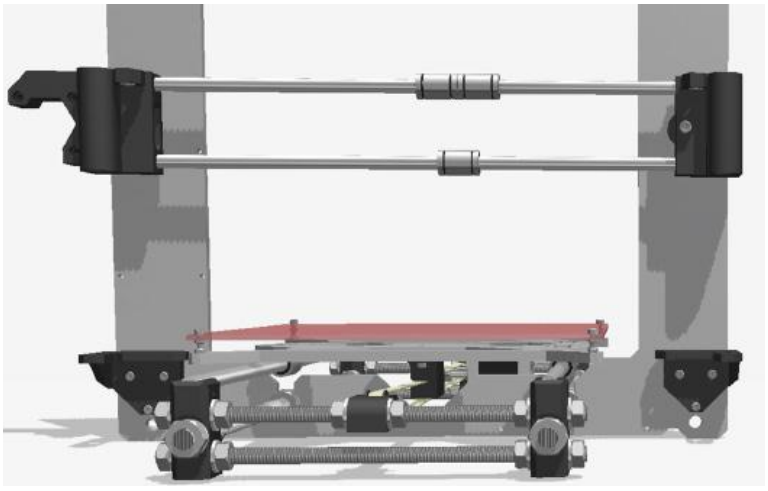
Anexo 6. Montaje del Motor del eje Y, polea tensa correa T2.5 y marco



Anexo 7. Montaje del “belt holder” o soporte de correa T 2.5

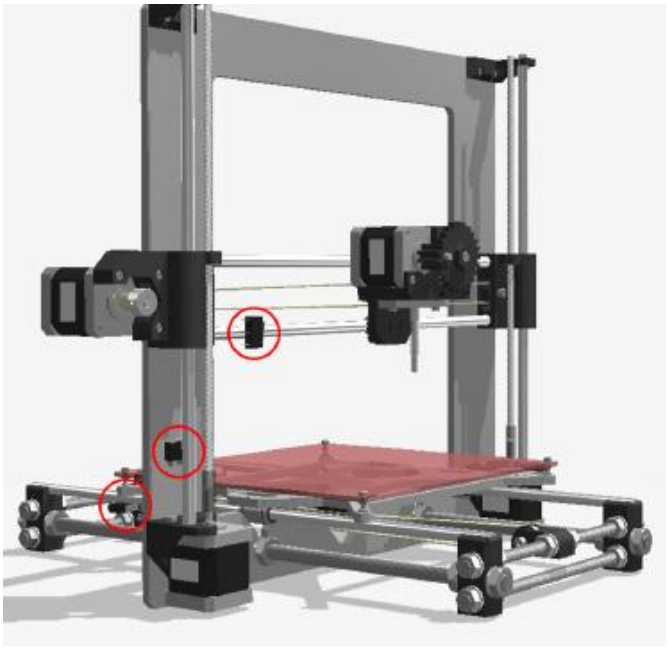
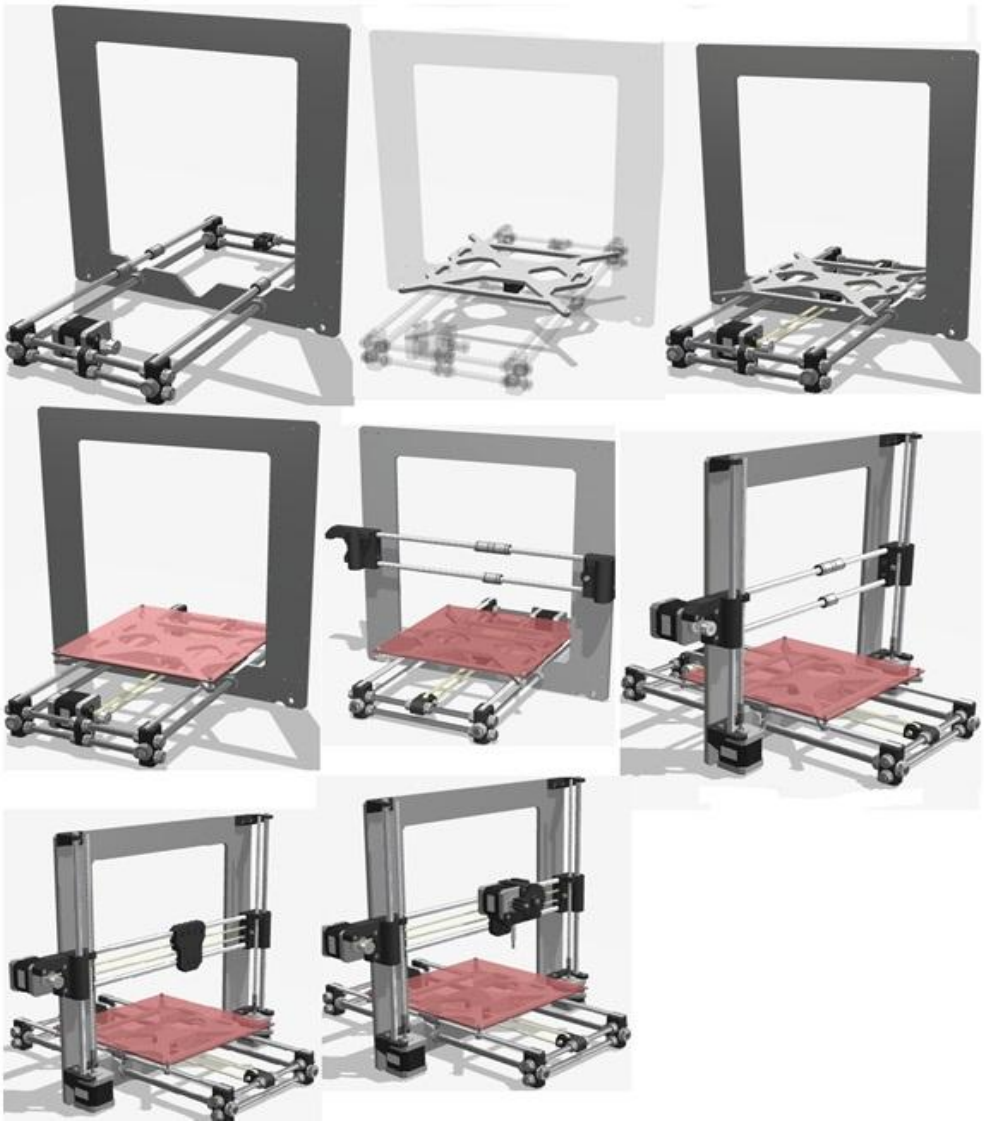


Anexo 8. Vista de montaje eje X y Z



Anexo 9. Ubicación de la cama caliente

Anexo 10. Ubicación de finales de carrera



Anexo 11. Integración de sistemas y actuadores de la máquina