

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D DE GRAN FORMATO
CON TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN CON FILAMENTO FUNDIDO (FFF)
TIPO CORE-XY BASADA EN ARDUINO**



**LUIS CARLOS AYCARDI SALGADO
HUMBERTO JOSÉ TUIRÁN MORENO**

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA, CÓRDOBA

2017

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D DE GRAN FORMATO
CON TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN CON FILAMENTO FUNDIDO (FFF)
TIPO CORE-XY BASADA EN ARDUINO**

LUIS CARLOS AYCARDI SALGADO

HUMBERTO JOSÉ TUIRÁN MORENO

**Trabajo de grado presentado, en la modalidad de trabajo de investigación y
extensión, como parte de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Mecánico.**

Director (s):

YAHIR ENRIQUE GONZÁLEZ DORIA, M.Sc.

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA MECÁNICA

MONTERÍA, CÓRDOBA

2017

La responsabilidad ética, legal y científica de las ideas, conceptos y resultados del
proyecto, serán responsabilidad de los autores.

Artículo 61, acuerdo N° 093 del 26 de noviembre de 2002 del consejo superior.

NOTA DE ACEPTACIÓN

YAHIR ENRIQUE GONZÁLEZ DORIA

Director

LUIS ARMANDO ESPITIA SANJUÁN

Jurado

ELKIN CAMILO MEDELLÍN PÉREZ

Jurado

DEDICATORIA

A Dios sobre todas las cosas, por ser mi guía, mi amigo y mi sustento en este camino hacia mis sueños.

A mi madre Marlen María Moreno Lozano y mi hermano José Carlos Tuirán Moreno por ser mi apoyo incondicional en toda mi formación, por sus buenos consejos, los valores que me inculcaron, y por enseñarme que en la vida debo luchar por mis sueños y nunca desfallecer.

A mi familia por ser el motor de mi vida, creer en mí y cada uno de mis proyectos en todas las etapas de mi vida.

A mis amigos, quienes compartieron conmigo sus conocimientos, alegrías, tristezas, y anécdotas, las cuales llevo como recuerdos únicos.

Humberto José Tuirán Moreno

Agradezco a Dios por permitirme cumplir una meta más en mi vida.

A mi madre por ser siempre mi apoyo incondicional en cada momento de mi vida.

A mi padre por ser un amigo y consejero

A toda mi familia que siempre creyeron en mí y en mis capacidades, a todos ellos va dedicado tanto esfuerzo, sudor y lágrimas.

Luis Carlos Aycardi Salgado

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por siempre darnos las fuerzas para continuar en lo adverso, por guiarnos y brindarnos la sabiduría en los momentos difíciles. A nuestros padres, hermanos y familiares por darnos afecto y apoyo incondicional.

Nuestro más sincero agradecimiento hacía el Ingeniero Mecánico Yahir Enrique González, quien con su conocimiento y sabiduría dirigió este proyecto y al Ingeniero Electrónico Mauricio Manchego quien con sus conocimientos nos brindó asesoría en todo lo concerniente a la parte electrónica de este proyecto.

A todas las personas que conforman el programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Córdoba, jefe de departamento, docentes y compañeros, quienes colaboraron con nuestra formación profesional y humana durante estos años de estudio.

TABLA DE CONTENIDO.

	Pág.
RESUMEN.....	13
ABSTRACT.....	15
INTRODUCCIÓN.....	17
OBJETIVOS.....	19
1. REVISIÓN DE LITERATURA.....	20
1.1 MARCO TEÓRICO.....	20
1.1.1 ¿QUÉ ES LA IMPRESIÓN 3D?.....	20
1.1.2 HISTORIA Y AVANCES DE LA IMPRESIÓN 3D.....	21
1.1.3 DESARROLLO DE LA IMPRESIÓN 3D.....	26
1.1.4 LA IMPRESIÓN 3D COMO NEGOCIO.....	26
1.1.5 VENTAJAS DE LA IMPRESIÓN 3D.....	28
1.1.6 DESVENTAJAS DE LA IMPRESIÓN 3D.....	30
1.1.7 TIPOS DE IMPRESIÓN 3D.....	31
1.1.8 CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE UNA IMPRESORA 3D.....	34
1.1.9 MATERIALES DE IMPRESIÓN.....	40
1.1.10 SOFTWARE.....	42
1.1.11 DEFORMACIÓN DEBIDA A LA FLEXIÓN.....	44
1.1.12 DISEÑO DE TORNILLOS DE POTENCIA.....	46
1.1.13 TORNILLOS DE POTENCIA SOMETIDOS A COMPRESIÓN.....	50
1.1.14 BANDAS DE SINCRONIZACIÓN.....	55
1.2 ESTADO DEL ARTE.....	60
1.2.1 FABRICANTES DE IMPRESORAS 3D TIPO INDUSTRIAL.....	60
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	64

2.1 IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS Y COMPONENTES.....	64
2.2 DISEÑO DE LA MÁQUINA DE IMPRESIÓN 3D.....	65
2.2.1 DISEÑO MECÁNICO.....	65
2.2.2 COMPONENTES ELECTRÓNICOS.....	72
2.3 CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA DE IMPRESIÓN 3D.....	76
2.4 VALIDACIÓN DE LA MÁQUINA DE IMPRESIÓN 3D.....	77
3. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	78
3.1. DISEÑO DE LA MÁQUINA DE IMPRESIÓN 3D.....	78
3.1.1 DISEÑO DE LA CAMA DE IMPRESIÓN.....	78
3.1.2 DISEÑO DE TORNILLOS DE POTENCIA.....	82
3.1.3 DISEÑO DE EJES.....	93
3.1.4 SELECCIÓN DE COJINETES.....	99
3.1.5 DISEÑO DE CORREAS DE TRANSMISIÓN.....	102
3.1.6 CHASIS.....	109
3.1.7 PIEZAS FABRICADAS EN PLA POR IMPRESIÓN 3D.....	110
3.1.8 SELECCIÓN DE LA PLACA CONTROLADORA.....	113
3.1.9 SELECCIÓN DEL EXTRUSOR.....	115
3.1.10 SELECCIÓN DE LA RESISTENCIA CALEFACTORA PARA LA CAMA...116	
3.1.11 SELECCIÓN DE LOS DRIVERS PARA EL CONTROL DE LOS MOTORES PASO A PASO.....	116
3.1.12 SELECCIÓN FINALES DE CARRERA.....	118
3.1.13 SELECCIÓN DE PANTALLA.....	120
3.1.14 SELECCIÓN DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN.....	120
3.1.15 SELECCIÓN DEL FIRMWARE.....	122
3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA DE IMPRESIÓN 3D.....	123
3.3 VALIDACIÓN DE LA MÁQUINA DE IMPRESIÓN 3D.....	130
4. CONCLUSIONES.....	134

5. RECOMENDACIONES.....	135
6. BIBLIOGRAFÍA.	136
7. ANEXOS.....	142
7.1 A1. MANUAL DE OPERACIÓN.....	142
7.2 A2. MANUAL DE MANTENIMIENTO.....	144
7.3 A3. FICHA TÉCNICA.....	145
7.4 A4. COSTO DEL PROYECTO.....	146

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Factores de servicios k sugeridos para transmisión por bandas.....	56
Tabla 2. Valores y criterios de selección de los parámetros iniciales de la máquina de impresión 3D.....	64
Tabla 3. Materiales candidatos para el diseño de la cama de impresión.....	78
Tabla 4. Diseño final de la cama de impresión.....	82
Tabla 5. Coeficientes de fricción f de pares roscados.....	84
Tabla 6. Coeficientes de fricción de collarín de empuje.....	84
Tabla 7. Diseño final tornillos de potencia.....	93
Tabla 8. Diseño final ejes guías.....	93
Tabla 9. Composición química del acero plata, obtenida del certificado de calidad del proveedor.....	94
Tabla 10. Diseño final de los ejes "x" y "y".....	99
Tabla 11. Resultados de la medición para la validación de la máquina.....	131
Tabla 12. Medidas promedio obtenida en cada eje de coordenadas de la impresora 3D.....	132

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ilustración esquema de impresión 3D	21
Figura 2. Ilustración de Piezas con formas de alta complejidad.....	29
Figura 3. Esquema de impresión SLA.....	32
Figura 4. Esquema impresión SLS.....	33
Figura 5. Esquema impresión FFF.....	34
Figura 6. Esquema elementos mecánicos de una impresora 3D tipo Core-XY.....	36
Figura 7. Componentes electrónicos de una impresora 3D.....	37
Figura 8. Extrusor tipo Bowden.....	38
Figura 9. Configuración de extrusor directo.....	39
Figura 10. Configuración de extrusor indirecto.....	39
Figura 11. Rollos de filamentos para impresión 3D.....	40
Figura 12. Placa controladora Arduino Mega 2560 R3.....	44
Figura 13. Viga Simplemente soportada.....	45
Figura 14. Viga con apoyos simple y carga central.....	46
Figura 15. Gato de tornillo sinfín.....	47

Figura 16. Parte de un tornillo de potencia, Diagramas de fuerza. a) al subir la carga; b) al bajar la carga.....	47
Figura 17. Longitud efectiva de la columna según sus condiciones en los extremos.....	52
Figura 18. Constante C para los casos a) Ambos extremos están pivoteados o articulados; b) ambos extremos están empotrados; c) un extremo libre, un extremo empotrado; d) un extremo redondo y articulado, un extremo empotrado.....	53
Figura 19. Columna cargada excéntricamente.....	54
Figura 20. Partes de la polea y de la banda.....	56
Figura 21. Impresora Fortus 900mc.....	61
Figura 22. MakerBot Replicator+.....	62
Figura 23. Ultimaker 3 Extended.....	63
Figura 24. Sistema de elevación de la máquina.....	66
Figura 25. Sistema de transmisión de movimiento tipo Core-XY.....	68
Figura 26. Sistema de movimiento tipo Core-XY.....	70
Figura 27. Simulación de cargas en la cama de impresión de 1/8" de espesor mediante SolidWorks.....	79
Figura 28. Simulación de cargas en la cama de impresión de 3/16" de espesor mediante SolidWorks.....	80
Figura 29. Deformación máxima de la cama de la impresión con 3/16" de espesor obtenido de SolidWorks.....	80
Figura 30. Simulación de cargas en la cama de impresión de 1/4" de espesor mediante SolidWorks.....	81
Figura 31. Deformación máxima de la cama de la impresión con 1/4" de espesor obtenido de SolidWorks.....	82
Figura 32. Ficha técnica motor paso a paso para los tornillos de potencia.....	86
Figura 33. Diagrama de cuerpo libre del tornillo cargado excéntricamente.....	90
Figura 34. Diagrama de cuerpo libre del eje "x".....	94
Figura 35. Análisis de flexión eje "x". Diámetro: 16 mm. Obtenido de SolidWorks.....	96
Figura 36. Diagrama de cuerpo libre del eje "y".....	97
Figura 37. Resultado final del eje "y". dimensión final diámetro: 20 mm.....	98
Figura 38. Factor de dirección de carga.....	100
Figura 39. Catálogo de rodamientos lineales de bolas del proveedor.....	102
Figura 40. Ficha técnica motor NEMA 17 del proveedor.....	103
Figura 41. Diagrama de cuerpo libre sistema de bandas y poleas de la máquina.....	103
Figura 42. Catálogo de bandas de sincronización serie GT del proveedor.....	105
Figura 43. Banda de sincronización GT2 9 mm.....	108
Figura 44. Ficha técnica del perfil 20x20 mm utilizado.....	109
Figura 45. Simulación en SolidWorks de un perfil Bosch Rexroth 20x20 mm con una carga provocada por 20kg de masa.....	110
Figura 46. Soporte del motor eje "Z".....	111
Figura 47. Simulación soportes motor eje "Z" obtenida de SolidWorks.....	111
Figura 48. Piezas fabricadas en PLA por impresión 3D.....	112
Figura 49. Tabla comparativa de placas Arduino.....	113

Figura 50. RAMPS 1.4 SB.....	114
Figura 51. Extrusor E3D V6.....	115
Figura 52. Resistencia Calefactora.....	116
Figura 53. Driver Pololu DVR8825.....	117
Figura 54. Driver Toshiba TB6600.....	118
Figura 55. Sensor Óptico TCST2103.....	119
Figura 56. Sensor Capacitivo LJC18A3-H-Z/BX.....	119
Figura 57. Pantalla RepRap Discount full graphic smart controller.....	120
Figura 58. Fuente Termaltake Smart 600W.....	122
Figura 59. Proceso de roscado de los perfiles del chasis.....	123
Figura 60. Armado de chasis modular.....	124
Figura 61. Tuercas T-Nuts.....	124
Figura 62. Montaje de refuerzos de chasis y soporte de motores eje "Z".....	125
Figura 63. Montaje ejes guías "Z".....	126
Figura 64. Ensamble cama de impresión.....	126
Figura 65. Montaje de la cama de impresión al eje "Z".....	127
Figura 66. Montaje sistema CoreXY.....	128
Figura 67. Montaje de sistema de transmisión de movimiento CoreXY.....	128
Figura 68. Instalación electrónica de la máquina.....	129
Figura 69. Impresora 3D terminada.....	130

RESUMEN

La tecnología de impresión 3D hasta hace algunos años era destinada exclusivamente para uso industrial. Con el desarrollo de esta tecnología se han minimizado los costos y se han diseñado equipos que están al alcance de cualquier empresa. Hay una creciente tendencia de usar la impresión 3D en los mercados de consumo, debido a que estas mejoran considerablemente los tiempos de entrega.

En este trabajo se diseñó y construyó una máquina de impresión 3D tipo CoreXY basada en Arduino con tecnología de fabricación con filamento fundido (FFF) para la empresa *3D design, engineering and architectural models* (3Deam) con sede en Montería. La máquina tiene como fin ser capaz de realizar impresiones con un volumen de hasta $0,16 m^3$ que permita el modelado de maquetas y prototipos con el nivel de precisión y detalle requerido en estos productos.

La máquina se diseñó teniendo en cuenta los requerimientos de la empresa. Partiendo de esto, se seleccionó la tecnología de impresión 3D FFF, se determinó el tipo de extrusor y una resolución de trabajo. Se emplearon criterios de diseño de máquinas para la selección de materiales, diseño de ejes, tornillos de potencia, sistemas de transmisión por bandas y poleas, selección de cojinetes, entre otros. La máquina es controlada por un sistema electrónico manejado por un Arduino Mega 2560.

Mediante el uso del software SolidWorks se realizaron simulaciones de carga a las estructuras y ejes para verificar los esfuerzos a los que están sometidos y otros parámetros importantes para el diseño como la flexión. Los resultados mostraron que los esfuerzos se encontraban por debajo del límite elástico del material utilizado y las deflexiones fueron de $0,068 mm$ que eran los parámetros permitidos establecidos para el

diseño de la máquina. Con el diseño final se obtuvo una máquina con una capacidad de impresión de $0,15 m^3$; capaz de realizar piezas con una tolerancia dimensional de $\pm 0,44 mm$.

Palabras Clave: Arduino, fabricación con filamento fundido, CoreXY

ABSTRACT

3D print technology was exclusively destined to be used in the industrial field many years ago, but now with the development of the technology it has changed and can be reached by any enterprise because there are new designs and the costs have minimized. Besides the 3D print is growing and it is used by the consumer markets every day due to the Improvements in the time deliveries.

In this work 3D print type Core XY machine was designed and built by using Arduino fused filament fabrication technology to be used in design, engineering and architectural model's 3D enterprise placed in Monteria. This machine has as a purpose to print until with a volume of $0,16 m^3$ which enables to model prototypes with the precision and required details of these products.

The enterprise requirements were considered to design this machine and was the point to select the 3D print FFF technology, the type of extruder, the designing criteria to choose the materials and the working resolution as well shaft design, power screws, Belt and pulley transmission systems, bearing selection and fastening screws, were used among others. The machine will be controlled by the Arduino Mega 2560 electronic system.

Some charge simulations to the structures and axes were made by using SolidWorks software in order to verify the efforts and relevant parameters to the flexion designing. It was showed that they were under the flexible limits to the used material and at the same time, the deflections were under $0,068mm$ which allowed to stablish the parameters by the machine designing. The final work got a machine able to print from $0,15 m^3$ and it has the capacity to make pieces with a dimensional tolerance of $\pm 0,44mm$.

Key words: Arduino, fused filament fabrication, CoreXY

INTRODUCCIÓN

La construcción de prototipos y maquetas ha tenido y tiene un componente artesanal muy importante. En la actualidad se cuenta con una variedad de softwares de diseño asistido por computadora (CAD) con los que se pueden obtener diseños de maquetas electrónicas, imágenes fotorrealistas y animaciones virtuales de una construcción (Dominguez, Romero, & Espinosa, 2013).

La empresa *3D design engineering and architectural models* (3Deam), dedicada al diseño de prototipos y construcción de maquetas con funcionamiento en la ciudad de Montería es pionera en el uso de la tecnología de impresión 3D en esta ciudad, actualmente trabaja con la tecnología de fabricación con filamento fundido (FFF) mediante una máquina de impresión 3D para la construcción de maquetas y prototipos. Actualmente la empresa tiene una impresora 3D Anet A8 que cuenta con un volumen de grabado de $0,011 m^3$. Esta máquina no cumple con el volumen de producción y tamaño de impresión requerido debido al número de clientes y las escalas con las que se realizan las maquetas.

Las variables a considerar al momento de escoger una máquina de impresión 3D adecuada se pueden dividir en siete importantes grupos: costo, dimensiones, materiales de trabajo, precisión, velocidad de trabajo, adaptabilidad de complementos y facilidad de manipulación para el usuario (Espinosa & Domínguez, 2007) (Glesner, Kirschbaum, Renner, & Voss, 2002) (Guerrero de Mier & Espinosa, 2013). Teniendo en cuenta que la empresa necesita para el modelado de sus productos un volumen de impresión de $0,16 m^3$, esto situaría a la máquina requerida como una impresora 3D de tipo industrial.

Por supuesto hay que resaltar que el costo de una impresora de este tipo está en un rango de \$7.000-\$400.000 USD más gastos de importación, por esta razón, una alternativa sería la fabricación de una impresora 3D con la capacidad requerida por la empresa, esto reduciría su costo hasta los \$3.000 USD.

El objetivo de este proyecto fue diseñar y construir una impresora 3D con tecnología FFF (fabricación con filamento fundido) tipo Core-XY basada en Arduino con un volumen de impresión de $0,16 m^3$. Para esto se debieron diseñar elementos y sistemas mecánicos basados en la selección de una tecnología de impresión, un tipo de extrusor y una resolución de trabajo deseada. Se seleccionó y programó un sistema electrónico manejado por un Arduino para controlar la máquina; por último, se validó su funcionamiento por medio de pruebas de tolerancias dimensionales realizadas con un calibrador pie de rey a cinco piezas modeladas en la máquina, obteniendo una tolerancia promedio de $\pm 0,44 mm$.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y construir una impresora 3D con tecnología FFF (fabricación con filamento fundido) tipo Core-XY basada en Arduino con un volumen de impresión de $0,16 m^3$.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar los elementos y sistemas mecánicos de la máquina, basado en el análisis de la tecnología de impresión, el tipo de extrusor y tolerancia dimensional requerida.
- Seleccionar los distintos componentes electrónicos y programar el firmware que hará funcionar la máquina.
- Construir y validar la máquina de impresión 3D mediante pruebas de tolerancia dimensional de $\pm 0.5 mm$.

1. REVISIÓN DE LITERATURA

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 ¿Qué es una impresión 3D?

Es importante tener conceptos claros sobre ¿qué es una impresión?, una definición acertada es dejar en el papel u otra materia análoga, por medio de la presión mecánica, una huella o marca de carácter gráfico (The Free Dictionary, 2017). Además de diferenciar entre imprimir e imprimir en 3D; para el segundo caso el producto que se obtiene al final es tridimensional.

Las tecnologías de impresión 3D se basan en las tecnologías de manufactura aditiva o “additive manufacturing” en inglés. Dicho concepto de modelado aditivo describe a todas esas tecnologías en las que el producto final se obtiene mediante una secuencia en donde el objeto se crea mediante capas de material que se superponen entre sí en la dirección z obteniéndose al final un producto tridimensional (A brief history of 3D printing , 2017).

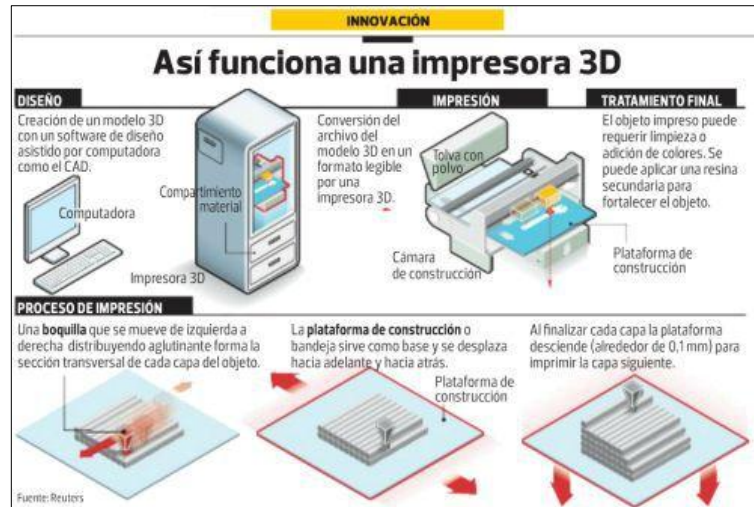


Figura 1. Ilustración esquema de impresión 3D. Tomado de: <https://www.emaze.com>, 2017

El uso de la tecnología de la manufactura aditiva ha representado un cambio radical en la obtención de piezas solidas a partir de un modelo digital, una sola impresora 3D es capaz de realizar infinidad de productos distintos. Gran parte de la manufactura actual, se realiza con máquinas específicas cuya función está limitada y si el producto cambia, la máquina también debe readaptarse o cambiarse, siendo esta quizás la ventaja más grande que impone la impresión 3D sobre las técnicas de mecanizado tradicionales con la que se cuenta actualmente (IMPRESORAS, 2017).

1.1.2 Historia y avances de la impresión 3D

Para realizar un objeto actualmente podríamos usar dos técnicas que son muy diferentes la una de la otra: substractiva y aditiva. El primer referente a lo que conocemos hoy en día como los procesos de arranque de material, haciendo énfasis en las máquinas de

control numérico computarizado (CNC) y la segunda que concierne a los procesos de manufactura aditiva o (AM processes) (Ian Gibson, 2017).

Los procesos de AM también llamados procesos de impresión 3D, desde su aparición en los 1980s tuvo una gran aceptación alrededor del mundo, convirtiéndose en uno de los mercados más atractivos del mundo, estos procesos debido a su gran versatilidad y rapidez fueron llamados procesos de prototipado rápido o (RP), los cuales revolucionaron los procesos de mecanizado de su época convirtiéndose en el método más rápido y con mejor relación costo-beneficio para el desarrollo de productos dentro de la industria (3D printing industry, 2017).

Una vez descrito brevemente las tecnologías que conocemos hoy en día, es importante puntualizar en los datos históricos que permitieron que estas se desarrollaran y establecieran como la gran industria que representan actualmente.

En el año 1981, Hideo Komada profesor del Instituto Municipal de Investigación Industrial de Nagoya publica el primer relato de un sistema de prototipo rápido usando fotopolímeros activos, un modelo sólido se construyó en capas, cada una de estas correspondía a una sección transversal en el modelo.

Tres años más tarde en el año 1984 Charles Hull, también conocido como Chull Hull inventa la estereolitografía (SLA), permitiendo a los diseñadores crear modelos 3D utilizando datos digitales, los cuales a su vez se utilizan para crear un objeto tangible.

La pieza clave para el funcionamiento de la estereolitografía es un tipo de material a base de acrílico conocido como fotopolímero. El funcionamiento de esta radica en una cuba de fotopolímero líquido la cual al ser golpeada con un rayo láser UV, la parte

expuesta a la luz se convierte instantáneamente en una pieza sólida de plástico, la cual se ajusta a la forma del modelo 3D de su respectivo diseño. Con la invención de esta tecnología Hull abre un nuevo mercado para los inventores, los cuales en teoría podrían prototipar y probar sus diseños sin preocuparse por los altos costes de fabricación que estos suponían (Redshift, 2017).

Para el verano de 1981 Carl Deckard, un estudiante de ingeniería mecánica de la universidad de Texas, después de su primer año trabajando para TRW misión, un taller de fabricación en Houston que fabricaba partes para los campos de petróleo. Debido a que el uso de software asistidos por ordenador (CAD) eran bastante novedosos, a pesar que TRW utilizaba programas de 3D CAD para controlar las máquinas herramientas, sin embargo, muchas de las partes sin procesar comenzaban como bastidores y formas de esos bastidores provenían de patrones hechos a manos. Así fue como a Deckard se dio cuenta del mercado potencial que representaba el idear un método automatizado para crear patrones de los bastidores a partir de modelos CAD, fue así como pasó dos años y métodos tratando de desarrollar este método.

Así fue como a finales de 1984, Deckard llegó a la idea de utilizar un haz de energía dirigida para fundir partículas de polvo juntas para para formar una parte, Deckard al notar que podía tomar su investigación como proyecto de escuela de posgrado optó por dirigirse a uno de sus profesores, el Dr. Joe Beaman, el cual aceptó trabajar con Deckard en el proyecto y así para mayo de 1986 Deckard recibe su maestría y en octubre de ese mismo año presenta su patente la tecnología **SLS** (selective Laser Sintering) la cual es aceptada y firmada a finales de 1987 (Cockrell School of engineering, 2017).

En el año 1988 tiene lugar un suceso que daría inicio a uno de los sistemas fundamentales del prototipado 3D, cuando la hija de 2 años de Scott Crump le pedía a su papá una rana de juguete, Crump quien se desempeñaba como ingeniero mecánico quiso experimentar con una máquina que pudiera construir objetos 3D de manera automática, fue así como en su cocina el intentó mezclar cera de vela con polietileno usando una pistola de silicona y se dio cuenta que a partir de tal combinación este podía crear objetos en 3D.

Su idea fue tan brillante que impulsado por su esposa siguió realizando experimentos hasta que pensó que, si esa pistola de pegamento estuviese unida a un sistema de pórtico robótico XYZ, el proceso de modelado podría realizarse de manera automática, así nace la tecnología **FDM** (Fused Deposition Modelling), esta tecnología es ampliamente utilizada con dos tipos de material de filamentos de plásticos: ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y PLA (ácido poliláctico). En 1989 Crump y su esposa patentarían la tecnología FDM y en 1992 fundan la compañía Stratasys (3D printing.com, 2017).

Con el paso de los años siguieron naciendo nuevas tecnologías que fueron revolucionando el mercado, para puntualizar podemos destacar las siguientes:

En 1993 se patenta la fusión por haz de electrones (EBM)

En el año 2004 Mcor Technologies Ltd - una empresa irlandesa - inicia la impresión laminada Paper 3D: una máquina, que superpone hojas de papel e impresiones sobre ellos. El resultado es un método aditivo, que incluye el uso de colores (Bloomberg, 2017).

En 2005, gracias a la tecnología de la Prototyper auto replicante rápida se realiza una impresora 3D que se imprime a sí misma. El Proyecto RepRap (RepRap, 2017) es una abreviatura de Replicating Rapid Prototyper, y apunta a desarrollar una impresora 3D autónoma capaz de crear por sí misma la mayoría de sus componentes, el proyecto RepRap trae consigo una particularidad y es que todos sus productos creados con este proyecto se publican con licencias de código abierto.

Es así como nace la tecnología FFF (Fused Filament Fabrication) equivalente a la tecnología FDM pero que está apoyada por el proyecto RepRap para su uso libre de limitaciones evitando así problemas legales por patentes y la cual está adaptada para su uso libre (Wikipedia, 2017).

En 2008, Bre Pettis, Adam Mayer y Zach "Hoeken" Smith quien fue uno de los miembros fundadores de la investigación RepRap fundan MakerBot Industries. (Wikipedia, 2017), ese mismo año la primera persona camina con una pierna protésica impresa en 3D, con todas las partes - Rodilla, pie, zócalo, etc. - impresos en la misma estructura compleja Sin ningún montaje (3D Systems, 2017).

En 2011 Ingenieros de la Universidad de Southampton diseñan el primer avión en 3D impreso del mundo. Dicha aeronave se diseña para ser no tripulada y es armada en un tiempo récord de una semana. La impresión 3D permite que el avión sea construido con alas elípticas, una característica normalmente costosa que ayuda a mejorar La eficiencia aerodinámica y minimiza la resistencia inducida (Sandglass Patrol, 2017).

En 2012 Médicos e ingenieros en los Países Bajos utilizan una impresora 3D Hecho por LayerWise para imprimir un diseño tridimensional para una prótesis de mandíbula

inferior, que posteriormente se implanta en una mujer de 83 años de edad que padecía de una infección ósea crónica. Esta tecnología se está Explorado para promover el crecimiento de nuevo tejido óseo (Salud180, 2017).

1.1.3 Desarrollo de la impresión 3D

A día de hoy, un gran número de procesos aditivos y comunidades de impresores están disponibles para cualquiera, y debido a las ideas de código abierto y compartido ya mencionadas, dichas comunidades están en continuo desarrollo. A continuación, se enumeran algunos de los ejemplos más relevantes de este tipo de comunidades:

- 3D printing Industry (3D Printing industry, 2017)
- 3D printer hub (Hubs, 2017)
- Thingiverse (Thingiverse, 2017)
- Fab@Home (Fab@Home, 2017)
- Solidforum (Solidforum, 2017)

1.1.4 Impresión 3D como negocio

Es importante diferenciar entre las típicas “impresoras hobbies” y las “impresoras industriales”.

Impresoras hobby

Teniendo en consideración que casi toda la tecnología está basada en código abierto, sería fácil pensar que no existe un mercado activo asociado a estas impresoras 3D, pero la realidad es que sí existe dicho mercado y mueve una gran cantidad de dinero. Esto es

debido a todas las marcas relacionadas con los diferentes componentes y consumibles que usan las mismas, desde las pequeñas ferreterías que suministran tuercas y tornillos hasta marcas que venden kits completos casi listos para el funcionamiento. Es posible encontrar un amplio catálogo de estos proveedores en internet y diversas fuentes. Algunos ejemplos a destacar son:

Impresoras RepRaps preensambladas: 3D Industries Australia, 3dStuffmaker, ac123dc, BilbyCNC.com.au, BotMill, Mendbot Shop, Romsraj, Skb-Kiparis Ltd, The Future Is 3D.

Kits completos RepRap: 3dStuffmaker, Create 3d, RepRap-Austria, ac123dc, BotMill, eMAKER Huxley.

Otros kits: A2APrinter, flemingcnc Isaac, German RepRap Foundation (GRRF).

Impresoras industriales

Empezando desde las típicas impresoras 3D de tipo “hobby” que cualquiera puede construir, hasta diseños más avanzados, cabe destacar un importante mercado emergente.

Un buen ejemplo sería la “Rapid Product Development Association of South Africa”. Esta fue fundada en 1999 para representar a todos los impresores de la industria en Sudáfrica. De acuerdo con dicha asociación, desde los primeros diseños de impresoras 3D, vendidos en 1991, el mercado ha crecido a gran velocidad (The rise of additive manufacturing, 2017).

1.1.5 Ventajas de la impresión 3D

Fabricación económicamente eficiente

Mediante una impresión 3D se necesitan menos recursos humanos participando en las diferentes etapas del producto. Por ejemplo, un único diseñador podría crear un modelo CAD de una pieza, y mediante dicho programa directamente imprimirla en su impresora 3D. Esta pieza puede ser manipulada por cualquiera, lo que le da al diseñador una importante información práctica y le permite redefinir los parámetros necesarios (Tomorrow, 2017).

Producción rápida

Basándose en los mismos principios que el anterior punto, con esta tecnología es posible construir, relativamente rápido, diferentes piezas. Esta puede ser una competencia realmente interesante por ejemplo para una empresa que fabrique pequeñas series de piezas, pero de gran variedad, o para empresas de producción bajo demanda (New Scientist, 2017).

Ahorro de material

Comparando con una fabricación tradicional basada en un mecanizado común, la cantidad de material desechado es mucho menor mediante esta tecnología. Obviamente esto tiene una influencia en el coste final de la pieza producida.

Alta calidad y nuevos perfiles

Mediante la impresión 3D es posible lograr una buena calidad superficial; dependiendo siempre de la calidad de la impresora y de los materiales utilizados. Además, cabe destacar que esta tecnología permite producir piezas con ciertos perfiles que serían imposibles o muy costosas mediante procesos tradicionales.



Figura 2. Ilustración de Piezas con formas de alta complejidad. Tomado de: <https://www.newscientist.com>, 2017.

Economía

Como se ha mencionado anteriormente, en el estudio de las impresoras de tipo hobby. Dichas impresoras son baratas y enfocadas a reducir al máximo los costes. Incluso las impresoras de tipo industrial empiezan a tener un precio muy asequible para cualquier empresa considerando las posibilidades que son capaces de dar (RepRap, 2017).

1.1.6 Desventajas de la impresión 3D

Al igual que con las ventajas, es importante mencionar también las limitaciones que esta tecnología posee. A continuación, se mencionan varias de estas:

Material

Al margen de los avances más recientes o el uso de tecnologías aditivas de tipo láser, las impresoras hobby se ven limitadas respecto al tipo de material que son capaces de utilizar. Dichas impresoras únicamente pueden funcionar con algunos tipos de polímeros. Es cierto que dichos polímeros tienen unas propiedades mecánicas y térmicas bastante razonables, pero aun así pueden ser insuficientes para algunos usos.

Estructura

Es posible afirmar que estas impresoras pueden producir piezas de formas realmente interesantes e innovadoras, además con una precisión muy razonable, pero esto solo se consigue teniendo ciertas consideraciones. En ocasiones la pieza a imprimir debe incluir algunas estructuras de soporte o añadidos capaces de evitar colapsos.

Tamaño del producto impreso

Las impresoras 3D incluyen ciertas limitaciones respecto al tamaño máximo de la pieza a fabricar. Normalmente esto es debido a las estructuras y carriles requeridos para la

máquina, así como en muchos casos limitado por el tamaño de la superficie caliente sobre la que se realiza la impresión. Un tamaño normal de pieza es en torno a $200 \times 200 \times 200 \text{ mm}$. Por supuesto hay excepciones, como algunas impresoras creadas para piezas de gran formato, pero éstas no son habituales.

1.1.7 Tipos de impresión 3D

Existen diferentes tipos de tecnologías en las que se basa la Impresión 3D. En función de la tecnología que usen, se pueden diferenciar entre estos tipos de Impresión 3D:

- Impresión por Estereolitografía (SLA).
- Impresión de Sinterización Selectiva por Láser (SLS).
- Impresión por Inyección.
- Impresión por Fabricación con Filamento Fundido (FFF).

Aunque todas son diferentes entre sí, lo cierto es que tienen una característica en común: que el objeto se imprime capa a capa, empezando siempre por la inferior y acabando en la superior, siguiendo el modelo de archivo. CAD que se haya creado de manera previa en el ordenador.

Impresión SLA

La impresión por Estereolitografía, la primera que se utilizó, consiste en aplicar un láser ultravioleta a una resina sensible a la luz contenida en un cubo.

Ese láser solidifica la resina en diferentes capas, mientras que la base que soporta la estructura se va desplazando hacia abajo para que la luz realice otra vez la misma acción sobre la nueva capa. De esta forma el objeto va tomando forma.

Si destacamos una ventaja y un inconveniente de esa tecnología, la ventaja sería las piezas de alta calidad que se consiguen, frente al inconveniente de que se puede desperdiciar cierta cantidad de material.

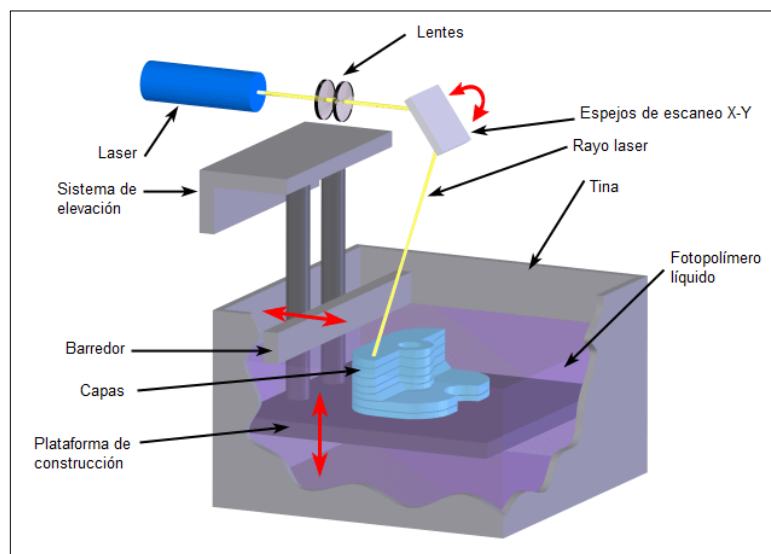


Figura 3. Esquema de impresión SLA. Tomado de: <http://www.3dnatives.com>, 2017

Impresión SLS

Nacida en la década de los 80, la impresión de Sinterización Selectiva por Láser (Selective Laser Sintering en inglés, de ahí sus siglas) compacta el material con el que se va a construir el objeto a través de la aplicación de un láser. La impresión SLS permite el uso de diferentes materiales en polvo, como cerámica, cristal o nylon. Sea cual sea el material usado, el láser impacta en ese polvo, funde el material y lo solidifica.

Una de las grandes ventajas de esta técnica es que el material que no se ha utilizado para la impresión es almacenado en el mismo lugar donde se inició la impresión, por lo que el desperdicio es nulo.

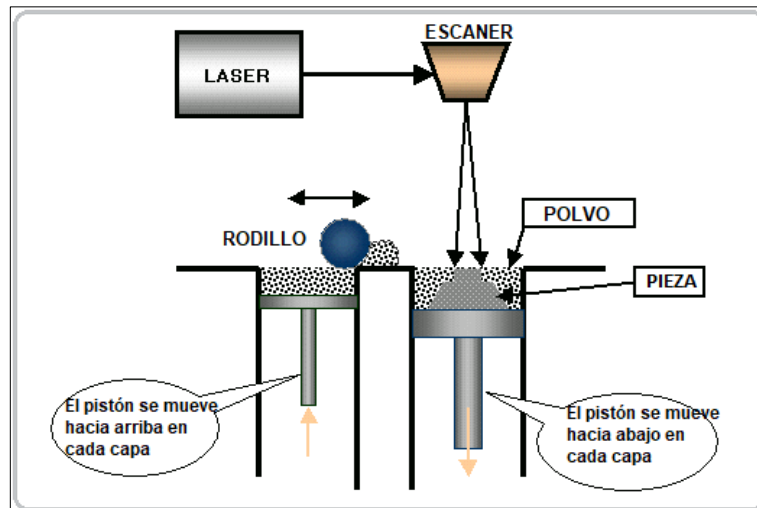


Figura 4. Esquema impresión SLS. Tomado de: <http://badmintonvamos.blogspot.com.co>, 2017

Impresión por inyección

Es parecida a la impresión por láser, pero se diferencia en que la impresión por inyección no emplea un láser para la compactación del material, sino mediante inyección de un aglomerante (tinta). Para que se entienda mejor, es el sistema de impresión 3D que más se parece a una impresora de papel. Una de las ventajas que esta tecnología incluye es que se puede imprimir a color.

Impresión FFF

Por último, la impresión por fabricación con filamento fundido consiste en depositar polímero fundido sobre una base plana. El material se funde y es expulsado en hilos minúsculos que se solidifican nada más caer a la superficie. Cuando una capa se acaba, el expulsor se desplaza verticalmente para comenzar con una nueva capa.

Tecnología patentada por Stratasys, se trata de la técnica más habitual en las impresoras usadas por usuarios particulares (Open future, 2017).

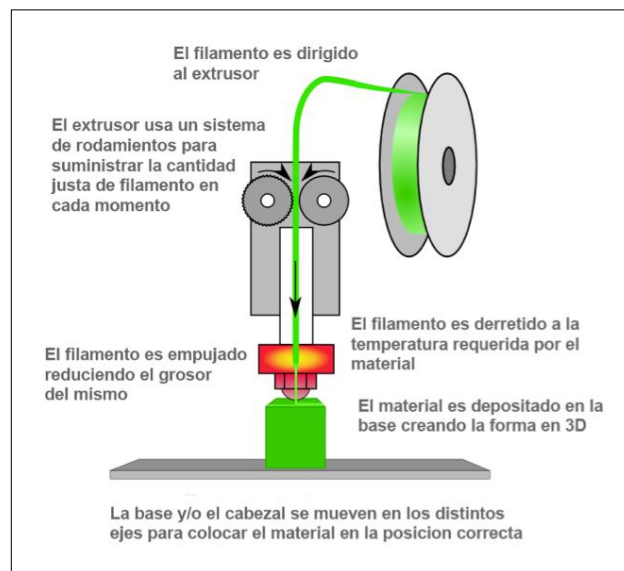


Figura 5. Esquema impresión FFF. Tomado de: <https://felipecarlosrodriguez.wordpress.com>, 2017

1.1.8 Consideraciones generales de una impresora 3D

Las partes principales de una máquina de impresión 3D con tecnología FFF pueden descomponerse en:

- Cuerpo mecánico

- Sistema electrónico
- Extrusor

A continuación, se detallan estos sistemas en una impresora 3D tipo Core-XY con tecnología FFF (Diosdado, 2017).

Cuerpo mecánico

El cuerpo mecánico de la impresora 3D está compuesto por el chasis y los sistemas que permiten el movimiento sobre los ejes X , Y y Z . El movimiento en el eje Z se hace mediante un sistema de elevación por tornillos de potencia, que permite que la cama donde se realiza la impresión se desplace de manera vertical. Por otro lado, el movimiento sobre los ejes X y Y se obtiene mediante un sistema de ejes con rodamientos de lineales que son desplazados por unos motores acoplados a un sistema de transmisión por bandas de sincronización y poleas (Diosdado, 2017).

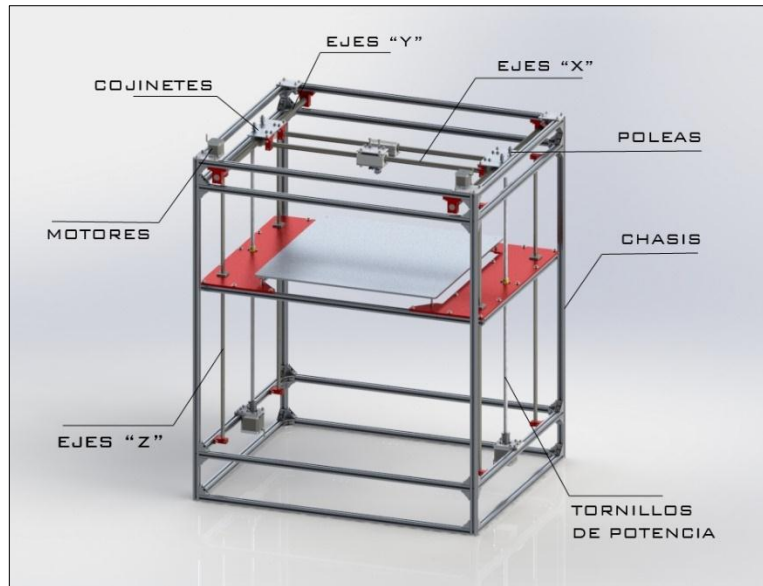


Figura 6. Esquema elementos mecánicos de una impresora 3D tipo Core-XY. Tomado de: <https://www.zonamaker.com>, 2017

Sistema electrónico

El sistema electrónico de una impresora 3D está compuesto por una placa Arduino a la cual va conectado por medio de pines una placa de extensión llamada RAMPS (RepRap Arduino Mega Pololu Shields) donde a su vez, se conectan el extrusor, los termistores, finales de carrera, motores, pantalla y ventilador de capa; todo esto se alimenta mediante una fuente de poder ya sea ATX (PC) o una fuente conmutada que convierta de 110V a 12V.

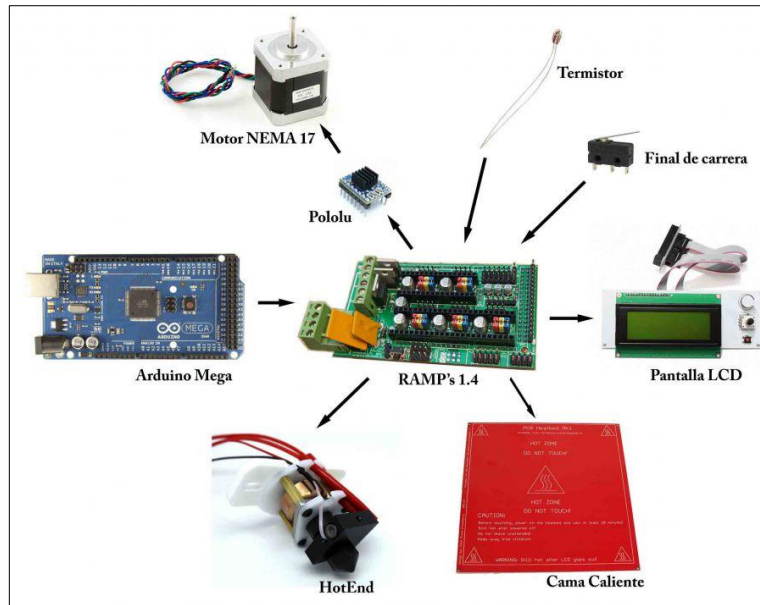


Figura 7. Componentes electrónicos de una impresora 3D. Tomado de: <https://www.zonamaker.com>, 2017

Extrusor

El extrusor es una de las partes importantes de la impresora. La función principal de esta pieza es conseguir guiar correctamente la fibra de filamento desde el “inicio frío” hasta el “final de fundido”, en la boquilla. Además, un buen extrusor debe ser capaz de dosificar con suficiente precisión el filamento. La velocidad del extrusor un factor relevante (Diosdado, 2017).

El grosor de cada capa (o altura de capa) es el parámetro más utilizado para definir la calidad de una impresión, aunque no es el único. Estrictamente, define la calidad de la pieza en el eje Z (vertical) pero no define el nivel de detalle horizontal (ejes “X” e “Y”).

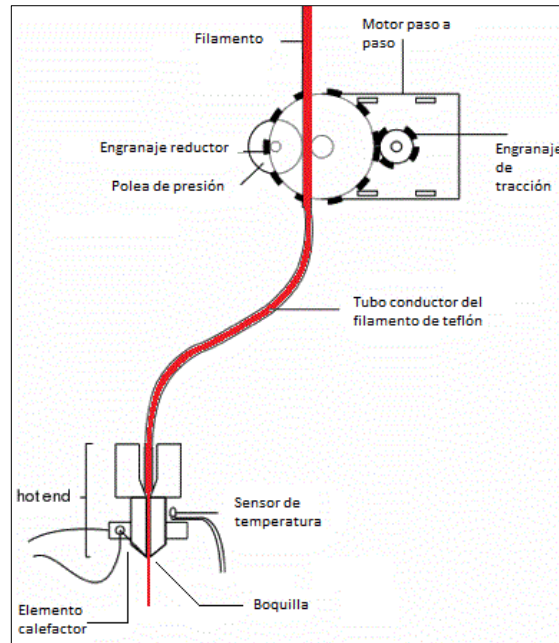


Figura 8. Extrusor tipo Bowden. Tomado de: <http://www.mibqyyo.com>, 2017

Se define como “inicio frío” a la parte inicial del cabezal, donde la menor que la de fusión de la fibra. Sirve como guía de deslizamiento del filamento y debe asegurar que el plástico llega recto y continuadamente al “final de fundido” (Extruder Options, 2017).

Existen dos formas en la que el extrusor empuja el filamento a ser fundido extrusión directa (Figura 9) es decir el motor con el engrane que impulsa el filamento hacia el extrusor va montado juntos en el carro o cabezal de impresión; o extrusión indirecta llamada también Bowden (Figura 10) en la cual el fusor va separado del motor con el engrane que empuja el filamento y se conectan por medio de un tubo de teflón por el cual pasa el filamento.

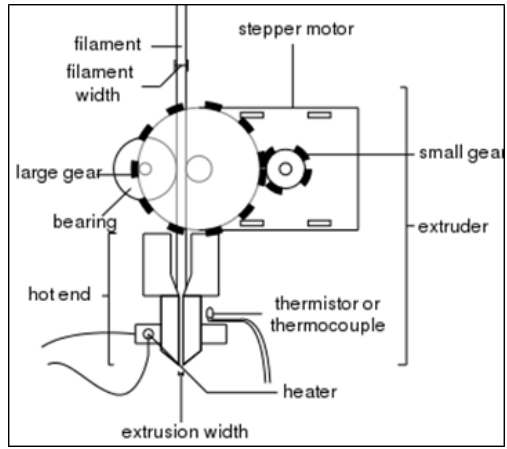


Figura 9. Configuración de extrusor directo Tomado de: <http://frax3d.com/extrusor-bowden>, 2017

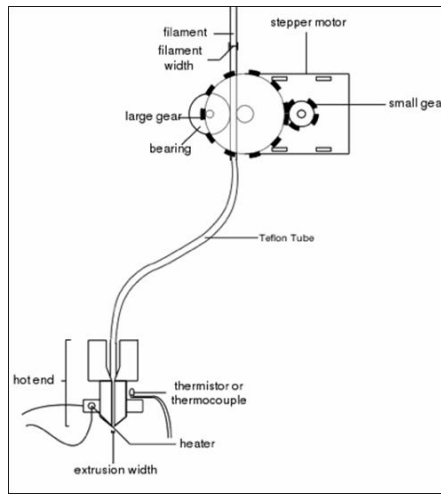


Figura 10. Configuración de extrusor indirecto Tomado de: <http://frax3d.com/extrusor-bowden>, 2017

1.1.9 Materiales de Impresión

El 95 % del mercado de impresoras personales utiliza dos materiales: el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) y el ácido poliláctico (PLA). El ABS se usa extensivamente en los procesos de fabricación actuales: piezas de Lego, carcasas de electrodomésticos, componentes de automóvil. Al tener un punto de fusión alto, se puede utilizar para fabricar contenedores de líquidos calientes, hay que extruirlo a unos 230-260 °C y hay que imprimirlo en impresoras con base de impresión caliente (resistencias que calientan la base dónde se deposita el material).



Figura 11. Rollos de filamentos para impresión 3D. Tomado de: <http://www.impresoras3d3.com>, 2017

Al llegar al punto de fusión el ABS desprende gases que en concentraciones altas pueden ser nocivos. Se puede utilizar sin problemas en casa o en la oficina, pero para evitar las concentraciones altas no se recomienda tener varias impresoras funcionando en un espacio pequeño y sin ventilar.

El ABS se puede mecanizar, pulir, lijar, limar, agujerear, pintar, pegar etc. con extrema facilidad, y el acabado sigue siendo bueno. Además, es extremadamente resistente y

posee un poco de flexibilidad. Todo esto hace que sea el material perfecto para aplicaciones industriales.

El PLA es menos conocido que el ABS, se utiliza comparativamente mucho menos en la industria. Es un producto que se vende como “natural”, pues los componentes básicos son plantas como el maíz. Recientemente, este status ecológico del PLA está siendo muy discutido. Con las nuevas recicladoras que están apareciendo (la más conocida, Filabot) el ABS es mucho más ecológico que el PLA, pues estas recicladoras son cajas donde se pone el ABS sobrante, y a partir de él la recicladora nos hace una bobina nueva. De momento, el PLA no se puede reutilizar.

Actualmente el PLA tiene dos ventajas principales sobre el ABS: no emite gases nocivos (se pueden tener varias impresoras funcionando en un espacio cerrado y no hay problema) y hay un rango más amplio de colores (fluorescente, transparente, semitransparente...). Se puede imprimir con todo tipo de impresoras (no necesita base de impresión caliente) y se puede imprimir sin base.

Sus inconvenientes respecto al ABS son básicamente dos: no resiste las altas temperaturas (se empieza a descomponer a partir de 50-60 grados centígrados) y el postproceso (mecanizar, pintar y, sobre todo, pegar) es mucho más complicado. Se utiliza básicamente en el mercado doméstico.

Los precios de los dos materiales son bastante similares. El mercado de las impresoras 3D personales es muy nuevo y hay dos tendencias opuestas.

Por un lado, están las marcas que intentan copiar el modelo de las impresoras de papel: una vez el cliente ha comprado la impresora, se le cobra el consumible caro, pues ya es cliente cautivo (Impresoras 3D.com, 2017).

Además de los habituales ABS y PLA, podrás encontrar todo un abanico de opciones:

- Acetato de polivinilo (PVA)
- Policarbonato (PC)
- Poliestireno de alto impacto (HIPS)
- Fibra de carbono
- Madera
- Nylon

1.1.10 Software

Todas las impresoras 3D constan en su parte electrónica con un software que ayuda a controlar todos los procesos que la máquina requiere para la construcción de un modelo. El software que emplea la máquina para llevar a cabo los modelos es **ARDUINO**. Arduino es una plataforma de hardware libre, basada en una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo, diseñada para facilitar el uso de la electrónica en proyectos multidisciplinarios, por otro lado, Arduino nos proporciona un software consistente en un entorno de desarrollo (IDE) que implementa el lenguaje de programación de Arduino y el bootloader ejecutado en la placa. La principal característica del software de programación y del lenguaje de programación es su sencillez y facilidad de uso (arduino, 2017).

Según el microcontrolador que utiliza el software existen diversos tipos de Arduino, entre ellos encontramos Arduino Uno, Arduino Mega, Arduino MKR1000 entre otros. El tipo de Arduino que utilizan las impresoras 3D es **Arduino Mega**, el cual cuenta con un microcontrolador **ATMega8U2**. Este tipo de Arduino tiene 54 pines de entradas/salidas digitales (14 de las cuales pueden ser utilizadas como salidas PWM), 16 entradas análogas, 4 UARTs (puertos serial por hardware), cristal oscilador de 16MHz, conexión USB, Jack de alimentación, conector ICSP y botón de reset. Arduino Mega 2560 R3 incorpora todo lo necesario para que el microcontrolador trabaje; simplemente conectándolo al PC por medio de un cable USB o con una fuente de alimentación externa (9 hasta 12VDC). El Arduino Mega es compatible con la mayoría de los shields diseñados para Arduino Duemilanove, diecimila o UNO.

Esta nueva versión del software adicionalmente a todas las características de su sucesor utiliza un microcontrolador ATMega8U2 en vez del circuito integrado FTDI. Esto permite mayores velocidades de transmisión por su puerto USB y no requiere drivers para Linux o MAC (archivo inf es necesario para Windows) además ahora cuenta con la capacidad de ser reconocido por el PC como un teclado, mouse, joystick, etc. (Arduino.cl, 2017).

Características:

- Microcontrolador ATmega2560.
- Voltaje de entrada de – 7-12V.
- 54 pines digitales de Entrada/Salida (14 de ellos son salidas PWM).

- 16 entradas análogas.
- 256k de memoria flash.
- Velocidad del reloj de 16Mhz.

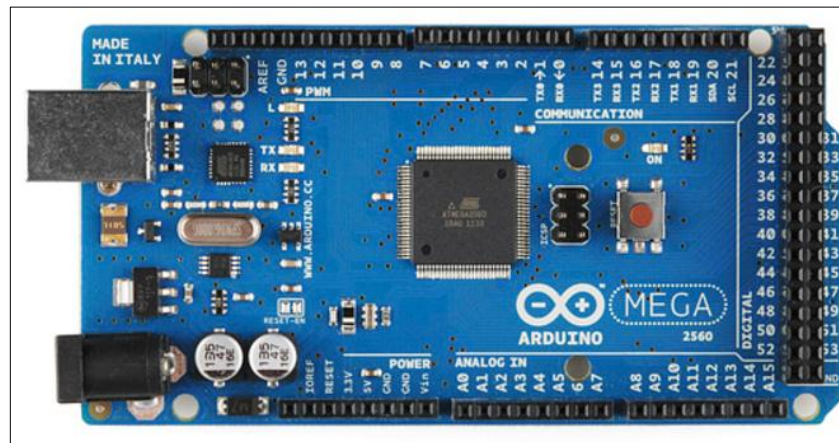


Figura 12. Placa controladora Arduino Mega 2560 R3. Tomado de <http://arduino.cl>, 2017

1.1.11 Deformación debida a la flexión

El problema de la flexión de vigas probablemente ocurre con más frecuencia que cualquier otro problema de carga en el diseño mecánico. Los ejes fijos y los rotatorios, las manivelas, las palancas, las ménsulas y las ruedas, así como muchos otros elementos, a menudo se deben considerar como vigas para el diseño y análisis de estructuras y sistemas mecánicos. La curvatura de una viga sujeta a un momento flector M está dada por:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI} \quad (1)$$

Siendo M el momento flector, E el módulo de elasticidad e I el momento de inercia de la sección transversal con respecto al eje neutro (*Richard G. Budynas, 2012*).

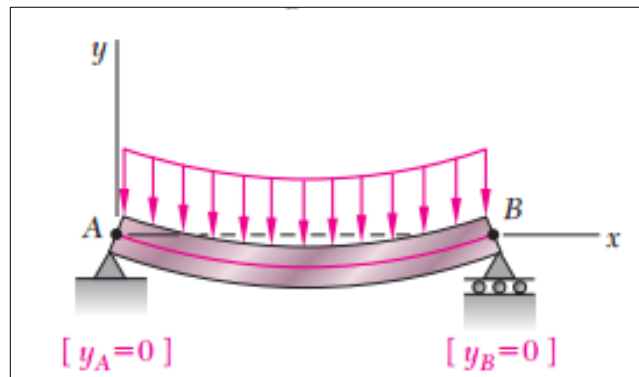


Figura 13. Viga Simplemente soportada. Fuente: Ferdinand P. Beer, E. Russel. Mecánica de Materiales Beer, 2010

Cuando una viga se somete a carga transversal, la ecuación (1) permanece válida. Sin embargo, el momento flector y la curvatura de la superficie neutra variarán en las diversas secciones. Si x es la distancia de la sección al extremo izquierdo de la viga, se tiene (*Beer P. Ferdinand, 2010*):

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M(x)}{EI} \quad (2)$$

Considerando una viga con apoyos simples y una carga central, se puede determinar su deformación máxima de la siguiente manera:

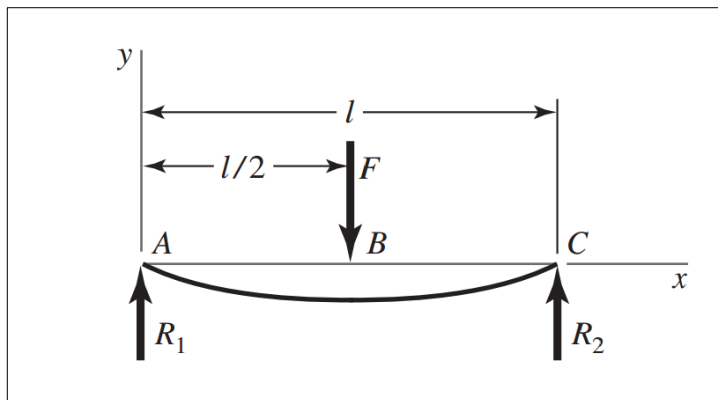


Figura 14. Viga con apoyos simple y carga central. Fuente: Richard G. Budynas, 2012

$$y_{max} = -\frac{Fl^3}{48EI} \quad (3)$$

Donde F es la fuerza aplicada es la distancia $l/2$, E el módulo de elasticidad e I el momento de inercia de la sección transversal (Richard G. Budynas, 2012).

1.1.12 Diseño de tornillos de potencia

Un tornillo de potencia es un dispositivo que se utiliza en maquinaria para cambiar el movimiento angular a movimiento lineal y, por lo general, para transmitir potencia. Entre las aplicaciones familiares se incluyen los tornillos de tornos y los tornillos para prensas de banco, prensas de sujeción y gatos. En la (Figura 15) se muestra una aplicación de los tornillos de transmisión de potencia de un gato accionado manualmente (Richard G. Budynas, 2012) .

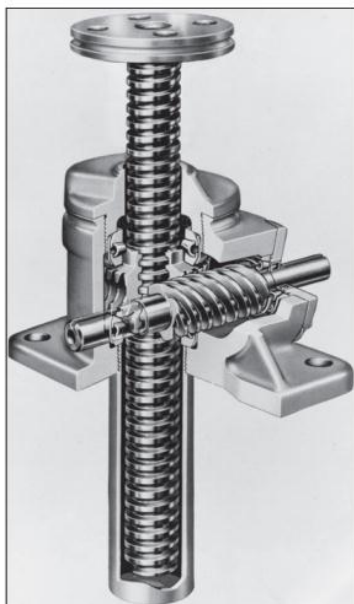


Figura 15. Gato de tornillo sinfín. Fuente: Richard G. Budynas, 2012

En la figura 16 se muestra un tornillo de potencia de rosca cuadrada con rosca simple, un diámetro medio d_m , un paso p , un ángulo de avance λ , y el ángulo de la hélice ψ sometido a una fuerza de compresión axial F . También se muestran las fuerzas que actúan sobre la rosca, asumiendo que esta se desenrolla y forma un triángulo.

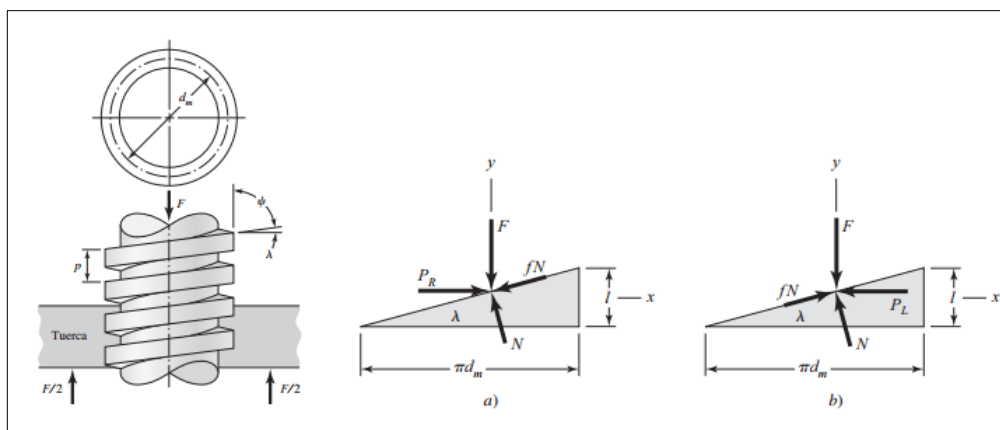


Figura 16. Parte de un tornillo de potencia, Diagramas de fuerza. a) al subir la carga; b) al bajar la carga. Fuente: Richard G. Budynas, 2012

El ángulo λ , en la figura 14, es el ángulo de avance de la rosca. La suma de todas las fuerzas unitarias axiales que actúan sobre el área normal de la rosca se representa por F . Para elevar la carga, una fuerza P_R actúa a la derecha (vea la figura 16 a), y para bajar la carga, P_L actúa hacia la izquierda (vea la figura 16 b). La fuerza de fricción es el producto del coeficiente de fricción f por la fuerza normal N , y actúa oponiéndose al movimiento. El sistema está en equilibrio bajo la acción de estas fuerzas, por lo que, para elevar la carga, se tiene:

$$\sum F_x = P_R - N \operatorname{sen} \lambda - f N \cos \lambda = 0 \quad (4)$$

$$\sum F_y = -F - f N \operatorname{sen} \lambda + N \cos \lambda = 0 \quad (5)$$

De manera similar para bajar la carga:

$$\sum F_x = -P_L - N \operatorname{sen} \lambda + f N \cos \lambda = 0 \quad (6)$$

$$\sum F_y = -F + f N \operatorname{sen} \lambda + N \cos \lambda = 0 \quad (7)$$

De aquí se obtiene la fuerza P necesaria para levantar y bajar la carga:

$$P_R = \frac{F[(l/\pi d_m) + f]}{1 - (fl/\pi d_m)} \quad (8)$$

$$P_L = \frac{F[f - (l/\pi d_m)]}{1 + (fl/\pi d_m)} \quad (9)$$

Por último, si se observa que el par de torsión es el producto de la fuerza P y el radio medio $d_m/2$, para elevar la carga y bajar la carga se puede escribir:

$$T_R = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m}{\pi d_m - f l} \right) \quad (10)$$

$$T_L = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l \pi f d_m - l}{\pi f d_m + f l} \right) \quad (11)$$

Donde T_R y T_L representan los pares de torsión requeridos para elevar y bajar la carga. Cuando se obtiene un par de torsión positivo mediante esta ecuación, se dice que el tornillo es autobloqueante. Así, la condición para el autobloqueo es:

$$\pi f d_m > l \quad (12)$$

El torque necesario para vencer la fricción en el collarín del tornillo de potencia depende del coeficiente de fricción del material del collarín f_c y de su diámetro d_c .

$$T_c = \frac{F f_c d_c}{2} \quad (13)$$

Los esfuerzos en el cuerpo de los tornillos de potencia pueden relacionarse con parámetros de la rosca. el esfuerzo cortante nominal en torsión en el cuerpo del tornillo puede calcularse mediante la ecuación (14)

$$\tau = \frac{16T}{\pi d_r^3} \quad (14)$$

El esfuerzo axial en el cuerpo del tornillo debido a la carga F es:

$$\sigma = \frac{4F}{\pi d_r^2} \quad (15)$$

1.1.13 Tornillos de potencia sometidos a compresión

En el caso de tornillos de potencia esbeltos que se encuentran sometidos a cargas de compresión, además de los efectos anteriores, es necesario realizar un estudio alternativo donde se considere el efecto de la esbeltez del tornillo en la estabilidad del mecanismo.

En estos casos, la falla del tornillo no suele ocurrir por resistencia pura, sino por problemas de pandeo que interfiere en la estabilidad del vástago. En efecto, un tornillo de potencia que sea de vástago largo y sometido a carga de compresión, fallará muy probablemente por problemas de pandeo antes que, por resistencia mecánica de la sección del tornillo, mientras que un tornillo que sea corto fallará posiblemente por falta de resistencia del material.

Para saber si un tornillo se puede considerar corto o largo a efectos de pandeo, y que por tanto puedan surgir problemas de inestabilidad, habrá que analizar el valor de su esbeltez mecánica, término que se analizará en el siguiente apartado.

Además de lo anterior, y cuando la carga de compresión no esté totalmente centrada respecto al eje longitudinal del tornillo, sino que actúa con cierta excentricidad, su efecto es todavía más desfavorable dado que induce a una flexión adicional del vástago del tornillo que hace incrementar su nivel de tensión interna (Ingeniería mecánica, 2017).

Esbeltez mecánica

La esbeltez mecánica (λ) servirá para definir si el vástago o columna de un tornillo de potencia se puede considerar largo o corto a efectos de pandeo.

Habitualmente, si el valor de la esbeltez que se mida del vástago del tornillo resultase inferior a 89 ($\lambda < 89$), entonces el tornillo se considera corto y su falla se producirá muy probablemente por problemas de resistencia mecánica. Por el contrario, para aquellos tornillos cuyo valor de la esbeltez mecánica sea superior a 89 ($\lambda > 89$), entonces se considerarán tornillos de columna esbelta o larga (que serán más esbeltos conforme mayor sea su coeficiente de esbeltez, λ). En estos casos, se recomienda hacer el estudio que a continuación se expone, donde se va a tener en cuenta la estabilidad del tornillo a pandeo, dado que su falla se producirá muy probablemente por este motivo antes que por resistencia mecánica pura a compresión (Ingeniería mecánica, 2017).

La expresión que define la esbeltez mecánica (λ) de la columna o vástago de un tornillo de potencia es la siguiente:

$$\lambda = \frac{L_e}{k} \quad (16)$$

Donde L_e es la longitud efectiva o equivalente de la columna del tornillo y k es el radio de giro de la sección bruta del tornillo. El radio de giro se define por la expresión:

$$k = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (17)$$

Donde I es el momento de inercia de la sección transversal, que se tomará según la dirección cuyo valor resulte más pequeño (que será la dirección más débil) de la

columna del tornillo, y A es el área de su sección transversal, es decir, el área del núcleo del tornillo ($A = \pi \cdot d^2/4$)

En la (Figura 17) se muestran los valores de longitud equivalente (L_e) para distintas condiciones de apoyo de la columna del tornillo

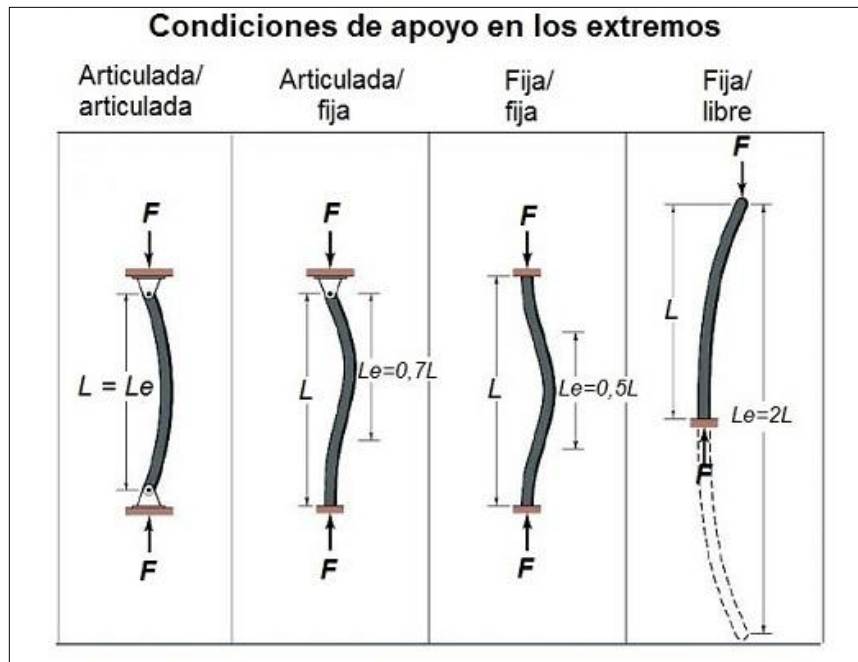


Figura 17. Longitud efectiva de la columna según sus condiciones en los extremos.
Tomado de: <http://ingemecanica.com>, 2017

Carga crítica

La carga crítica de un tornillo depende de, la longitud de la columna del tornillo, su sección transversal, el material y las condiciones en los extremos. Para tornillos de potencia que sean de columna larga, y donde su esbeltez mecánica sea mayor que 89

($\lambda > 89$), el problema de inestabilidad por pandeo condicionará la resistencia final del tornillo.

En este sentido, fue Leonhard Euler quien estableció la siguiente formulación que permite calcular la carga crítica de pandeo para una columna (Richard G. Budynas, 2012).

$$P_{cr} = \frac{C\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (18)$$

Donde E el módulo de elasticidad del material, I el momento de inercia de la sección transversal y L_e la longitud efectiva del tornillo. La constante C depende de las condiciones en los extremos como se muestra en la (Figura 18).

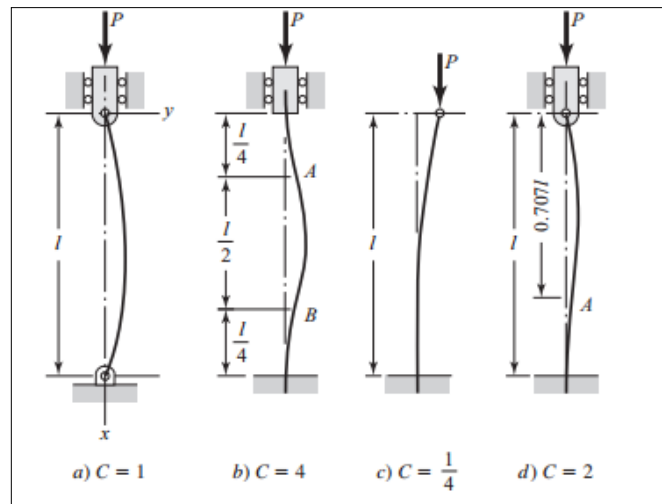


Figura 18. Constante C para los casos a) Ambos extremos están pivoteados o articulados; b) ambos extremos están empotrados; c) un extremo libre, un extremo empotrado; d) un extremo redondo y articulado, un extremo empotrado. Fuente: Richard G. Budynas, 2012

Excentricidad de la carga

En muchas ocasiones, se tiene que la carga de compresión que actúa sobre el extremo del tornillo no se sitúa perfectamente coincidente respecto a su eje longitudinal, sino que su línea de actuación queda algo descentrada (Ingeniería mecánica, 2017).

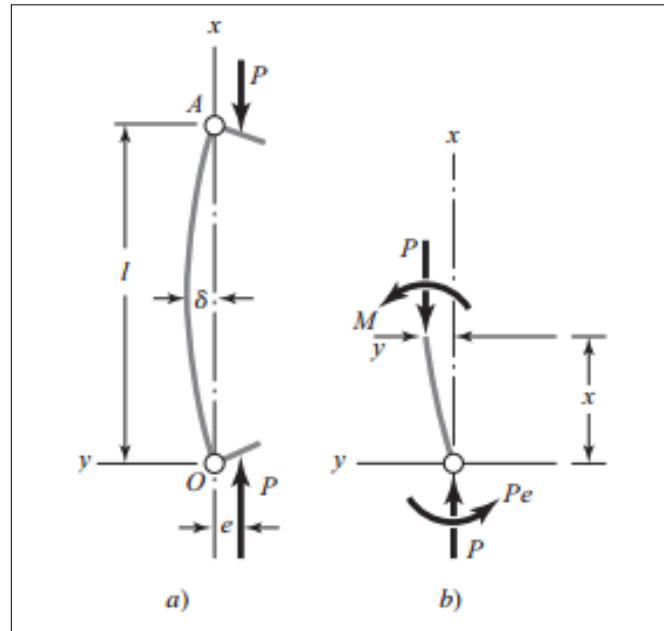


Figura 19. Columna cargada excéntricamente. Fuente: Richard G. Budynas, 2012

Se puede apreciar que la deformación máxima por pandeo en una columna excéntricamente cargada ocurre en la mitad de su longitud $l/2$. Esta deformación se puede calcular por medio de la ecuación (19).

$$\delta = e \left[\sec \left(\sqrt{\frac{P}{EI}} * \frac{l}{2} \right) - 1 \right] \quad (19)$$

Donde e es la excentricidad de la carga (la distancia a la cual se encuentra la carga desde el centro del tornillo). El momento flector máximo también ocurre a la mitad de la longitud y está dado por la ecuación (20), siendo P la carga.

$$M_{m\acute{a}x} = P(e + \delta) = Pe \sec\left(\frac{l}{2} \sqrt{\frac{P}{EI}}\right) \quad (20)$$

La magnitud del esfuerzo de compresi3n maximo a la mitad de la longitud se determina superponiendo la componente axial y la componente de la flexi3n. Esto da (Richard G. Budynas, 2012):

$$\sigma_c = \frac{P}{A} + \frac{M_{m\acute{a}x} * c}{Ak^2} \quad (21)$$

Donde

P : es la carga [N]

A : es el área de la secci3n transversal [m^2]

$M_{m\acute{a}x}$: es el momento maximo [$N \cdot m$]

c : es el radio del tornillo [m]

k : es el radio de giro [m]

1.1.14 Bandas de sincronizaci3n

Una banda de sincronizaci3n se hace con tela ahulada de nailon que internamente tiene un alambre de acero, a fin de resistir la carga de tensi3n. Tiene dientes que entran en ranuras axiales formadas en la periferia de las poleas (Figura 20). Una banda de sincronizaci3n no se estira ni se desliza, y en consecuencia transmite potencia a una relaci3n constante de velocidad angular. Estas bandas pueden operar sobre un intervalo

muy amplio de velocidades, tienen eficiencias en el intervalo de 97% a 99% (Richard G. Budynas, 2012).

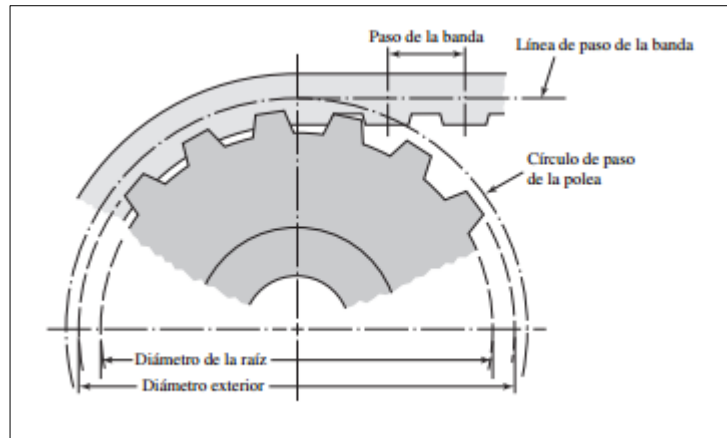


Figura 20. Partes de la polea y de la banda. Fuente: Richard G. Budynas, 2012

Potencia transmitida

En primer lugar, habrá que calcular la potencia de diseño o total de la potencia transmitida sobre la que se diseñará la correa. La potencia que desarrolla el motor conductor (P) es el punto de partida, pero a este valor habrá que afectarlo de un coeficiente corrector en función de diversos factores como son:

- Tipo de motor que se utilice para realizar la transmisión
- Tipo de máquina conducida que se vaya a accionar
- Horas de servicio por día

De esta manera la potencia corregida P_c o total de la potencia transmitida, es la que habrá que utilizar en el diseño, vendrá dada por la siguiente expresión (Ingeniería mecánica, 2017):

$$P_c = P * k \quad (22)$$

Donde:

P_c : es la potencia corregida [W]

P : es la potencia corregida del motor conductor [W]

k : es el factor de corrección de la potencia de acuerdo con la Tabla 1:

Tabla 1. Factores de servicios k sugeridos para transmisión por bandas

Maquinaria impulsada	Fuente de potencia	
	Características del par torsión normal	Par de torsión alto o no uniforme
Uniforme	1,0 a 1,2	1,1 a 1,3
Impacto ligero	1,1 a 1,3	1,2 a 1,4
Impacto medio	1,2 a 1,4	1,4 a 1,6
Impacto pesado	1,3 a 1,5	1,5 a 1,8

Fuente: Richard G. Budynas, 2012

Diámetro de poleas

Generalmente se parte del conocimiento del diámetro de alguna de las poleas, de la mayor o de la menor.

Así, si se parte del diámetro de la polea menor d , el diámetro de la otra polea, la mayor D , se obtendría a partir de la relación de transmisión R (Ingeniería mecánica, 2017).

$$R = \frac{D}{d} \quad (23)$$

Distancia entre ejes

La distancia entre ejes E de las poleas suele estar establecida en la transmisión que debe calcularse. No obstante, puede que en algunos casos este dato no esté decidido, quedando a mejor criterio calcular esta distancia.

De acuerdo a la experiencia de las empresas fabricantes, y con el objetivo de optimizar el rendimiento de la transmisión, la distancia entre ejes de poleas E mínima se puede obtener a partir de las siguientes expresiones (Ingeniería mecánica, 2017):

- Si la relación de transmisión R está comprendida entre 1 y 3:

$$E \geq \frac{(R + 1) * d}{2} + d \quad (24)$$

- Si $R \geq 3$:

Para este caso bastaría que se cumpliera que $E \geq D$

Siendo,

E : la distancia entre ejes de poleas [mm].

R : la relación de transmisión,

d : el diámetro de la polea menor [mm].

D : el diámetro de la polea mayor [mm].

Longitud de la correa

La longitud primitiva de la correa L_p de una transmisión se calcula directamente a partir de la siguiente expresión:

$$L_p = 2E + \frac{\pi}{2}(D + d) + \frac{(D - d)^2}{4E} \quad (25)$$

Donde,

E : es la distancia entre ejes de poleas [mm].

d : es el diámetro de la polea menor [mm].

D : es el diámetro de la polea mayor [mm].

Velocidad lineal de la correa:

Para el cálculo de la velocidad lineal de la correa se emplea la siguiente expresión:

$$V_t = \frac{\pi * d * N}{60 * 1000} \quad (26)$$

Como ya se ha indicado en algún apartado anterior, la velocidad lineal de una correa trapezoidal no debe sobrepasar los 30 m/s , dado que a partir de esta velocidad las fuerzas centrífugas son de una magnitud tal que podría desencajar la correa de la ranura de la polea. Si se necesitasen velocidades superiores a los 30 m/s se deberá utilizar poleas especiales que eviten este inconveniente (Ingeniería mecánica, 2017).

1.2 ESTADO DEL ARTE

1.2.1 FABRICANTES DE IMPRESORAS 3D TIPO INDUSTRIAL

Stratasys

Stratasys, Ltd. es un fabricante de impresoras 3D y sistemas de producción 3D para la creación de prototipos rápidos basados en la oficina y soluciones de fabricación digital directa. Los ingenieros usan sistemas Stratasys para modelar geometrías complejas en una amplia gama de materiales termoplásticos, incluyendo: ABS, polifenilsulfona (PPSF), policarbonato (PC) y ULTEM 9085.

Stratasys fabrica prototipos en oficina y sistemas de fabricación digital directa para fabricantes de automóviles, aeroespaciales, industriales, recreativos, electrónicos, médicos y de consumo (Boik, 2004).

Esta empresa tiene en su catálogo impresoras de tipo industrial como la Fortus 900mc que es capaz de imprimir un volumen de impresión máximo de $914 \times 609 \times 914$ mm.



Figura 21. Impresora Fortus 900mc. Tomado de: <http://www.stratasys.com>, 2017

La Fortus 900mc es el sistema FDM más potente disponible en el mercado en la actualidad, entrega extraordinaria agilidad y precisión. Con 11 opciones termoplásticas reales y una gran estructura externa. Esta máquina está disponible en el mercado por un precio aproximado de \$ 400.000 USD (Engineering, 2017).

MakerBot

MakerBot es una empresa estadounidense fundada en New York City en enero de 2009 por Bre Pettis, Adam Mayer y Zach "Hoeken" Smith para producir impresoras 3D. MakerBot contribuyó al progreso temprano de RepRap Project. Cuenta con aproximadamente 400 empleados. Los productos de Makerbot son liberados al mercado como tecnologías libres tanto en software (GPL) como en hardware (Open Hardware), lo que permite a los compradores y a otras empresas crear sus propias versiones o modificar los productos que compraron (Pearson, 2017).

La impresora más grande comercializada por esta marca es la Replicator+ que cuenta con un volumen de impresión de $0,009492 \text{ m}^3$. Esta máquina se puede comprar a través de su sitio web a un precio de \$ 2.500 USD (MakerBot, 2017).



Figura 22. MakerBot Replicator+. Tomado de: <https://store.makerbot.com>, 2017

Ultimaker

Ultimaker BV es una empresa holandesa de impresoras 3D que fue fundada en 2011 por Martijn Elserman, Erik de Bruijn y Siert Wijnia. Ultimaker comenzó a vender sus productos en mayo de 2011. La fundación de la compañía fue establecida en ProtoSpace Utrecht, donde Siert Wijnia organizó dos talleres para construir la impresora RepRap Darwin 3D. Erik de Bruin y Martijn Elserman asistieron en esos talleres. Frustración de su incapacidad para conseguir el diseño de Darwin para trabajar llevó a la inspiración para crear su propio diseño. En lugar de atenerse al principio RepRap de que su impresora debería ser capaz de imprimir sus propias piezas, diseñaron su impresora para ser construida sobre todo con piezas de madera contrachapada, que podrían producir

órdenes de magnitud más rápidas que las piezas impresas en ese momento. Sus primeros prototipos llevaban el nombre "Ultimaker protobox", pero los nuevos prototipos se titulaban "Ultimaker". Dos talleres Beta se organizaron en ProtoSpace Utrecht a partir de septiembre y diciembre de 2010, cada uno de los cuales consta de 10 tardes de lunes. En marzo de 2011, Ultimaker Ltd. Lanzó su primer producto completo, el "Ultimaker" (renombrado en 2013 a "Ultimaker Original") bajo una licencia Creative Commons BY-NC (Ultimaker B.V, 2017).

La impresora más grande comercializada por esta marca es la Ultimaker 3 Extended que cuenta con un volumen de impresión de $0,014 m^3$. Esta máquina se puede comprar a través de su sitio web a un precio de € 3.695.

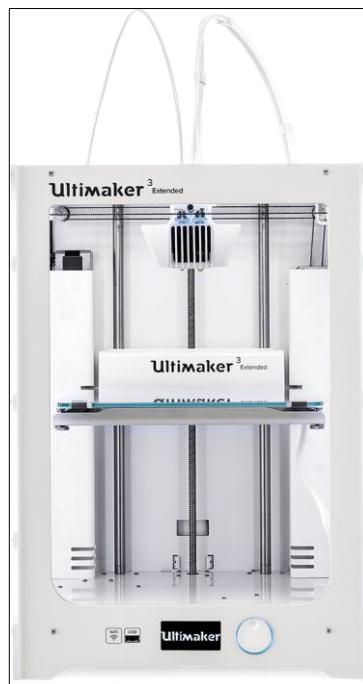


Figura 23. Ultimaker 3 Extended. Tomado de: <https://ultimaker.com>, 2017

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 IDENTIFICACIÓN DE PARÁMETROS Y COMPONENTES

Los parámetros de entrada que se tienen para el diseño de la máquina son los requerimientos del cliente, la empresa 3Deam desea una máquina de impresión 3D que sea capaz de imprimir un volumen de $0,16 m^3$ con una carga máxima de $30 kg$. También se debe determinar una resolución de trabajo adecuada, esto se logra teniendo en cuenta dos factores; el nivel de detalle que se desea obtener en el producto final, y las características técnicas de la tecnología de inyección utilizada en las impresoras 3D. Teniendo en cuenta que la empresa requiere que las maquetas tengan detalles de hasta $1 mm$, y que para obtener buenos acabados superficiales por medio de esta tecnología de impresión se necesitan alturas de capa de por lo menos $0.2 mm$ y de velocidades de impresión no mayores a $100 mm/s$ (Trimaker, 2017) [2], se deberán diseñar los elementos mecánicos de la máquina de tal manera que sea capaz de obtener esta resolución de trabajo. En la Tabla 2 se muestra un resumen de los parámetros de entrada para el diseño de la máquina.

Tabla 2. Valores y criterios de selección de los parámetros iniciales de la máquina de impresión 3D

Parámetro/Componente	Valor	Criterio de selección
Volumen máximo de impresión	0,16 m ³	Requerimiento de la empresa
Máxima carga de operación	30 kg	Requerimiento de la empresa
Resolución de trabajo	0,2 mm	Recomendaciones de literatura, diseñadores
Velocidad de impresión	100 mm/s	Recomendaciones de literatura
Materiales de impresión	PLA	Requerimiento de la empresa
Sistema de transmisión de movimiento	Polea-Correa	Recomendaciones de literatura
Sistema de elevación para el eje "Z"	Tornillos de potencia	Recomendaciones de literatura

Fuente: Autor, 2017

2.2 DISEÑO DE LA MÁQUINA DE IMPRESIÓN 3D

2.2.1 Diseño mecánico

El primer componente diseñado de la máquina fue la cama de impresión, que es donde se deposita el material que se está modelando mientras se imprime. El material para este elemento debe tener buena conductividad térmica, ser ligero y buen acabado superficial. Los parámetros de entrada para el diseño fue su área máxima de impresión (550x550 mm) y su carga máxima (30 kg), se seleccionó un material y con ayuda del software SOLIDWORKS se hizo un análisis de carga para determinar su espesor iterando con medidas comerciales desde 1/8 " hasta un 1/4 ".

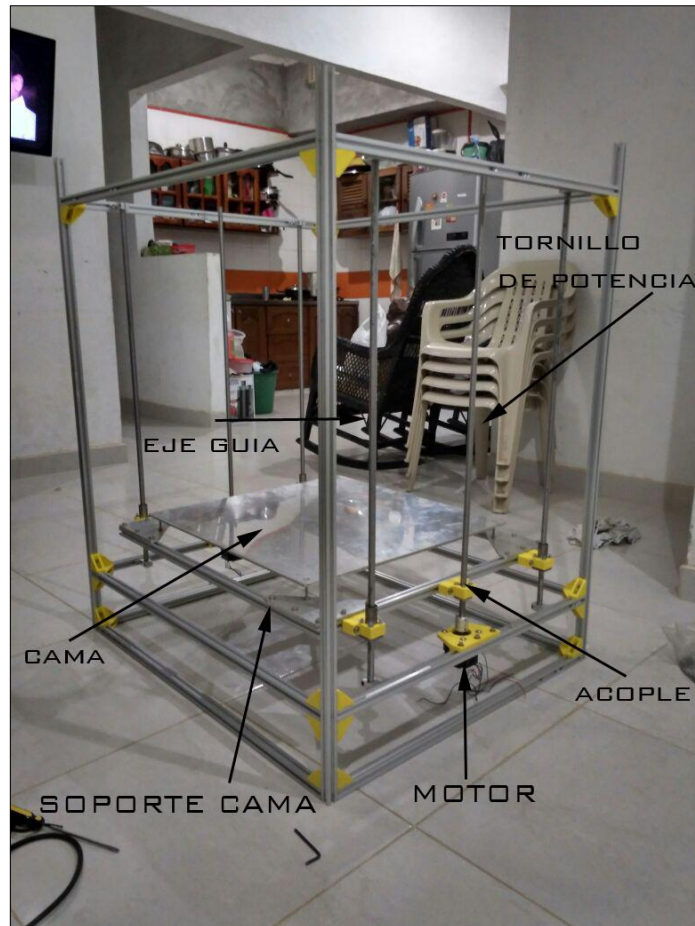


Figura 24. Sistema de elevación de la máquina. Fuente: Autor, 2017

Después de tener el diseño de la cama, fue necesario diseñar un soporte para acoplarla al sistema de elevación por medio de tornillos de potencia (Figura 24), se fabricaron acoples en PLA por medio de impresión 3D por su facilidad de fabricación luego del diseño, se hizo un análisis de carga para verificar que estos soportan los esfuerzos a los cuales están sometidos.

Para el diseño de sistema de elevación de la cama por medio de tornillos de potencia se tuvo en cuenta que la resolución que debe manejar la máquina en este sistema es de $0,2\text{ mm}$ y los motores tienen una precisión de 200 pasos por vuelta. Entonces se calculó

un paso apropiado para el tornillo de potencia con la ecuación (27) para garantizar un movimiento suave de la cama.

$$l = n * p \quad (27)$$

Donde:

l : el avance del tornillo [mm].

n : el número de vueltas (mínimo $\frac{1}{200}$ vueltas)

p : el paso del tornillo [mm].

Luego de tener este, se buscó en catálogos comerciales tornillos de potencia con este paso y se encontraron tornillos de un mismo material y distintas medidas de diámetro. Se programaron las ecuaciones a evaluar en la versión académica del software EES y con cada una de estas medidas de diámetro se hizo el siguiente análisis: con las ecuaciones (10) y (11) se calculó el torque necesario para subir y bajar la carga, usando la ecuación (12) se evaluó la condición de autobloqueo, con las ecuaciones (14) y (15) se hallaron los esfuerzos axiales y cortantes presentes en el tornillo verificando que estuviera por debajo del esfuerzo de fluencia del material. Como el tornillo se comporta como una columna sometida a compresión también fue necesario calcular su carga crítica con la ecuación extendida de la fórmula de Euler; ecuación (18), también se evaluaron los efectos por la excentricidad de la carga; ecuación (19) para su deformación y la ecuación (20) para determinar el momento máximo al cual están sometidos los tornillos; seguidamente con la ecuación (21) se verificó que el esfuerzo normal por efecto de la carga excéntrica no sea mayor que el esfuerzo de fluencia del material del tornillo. Con

el fin de disminuir este esfuerzo debido a la carga excéntrica se incluyó dos ejes o flechas guías acoplados al soporte de la cama, el diámetro de estos se calculó sumando un área en la componente de flexión del esfuerzo normal debido a la carga excéntrica; ecuación (21).

Con el torque necesario para subir y bajar la carga obtenido de las ecuaciones (10) y (11) se seleccionó un motor paso a paso comercial.

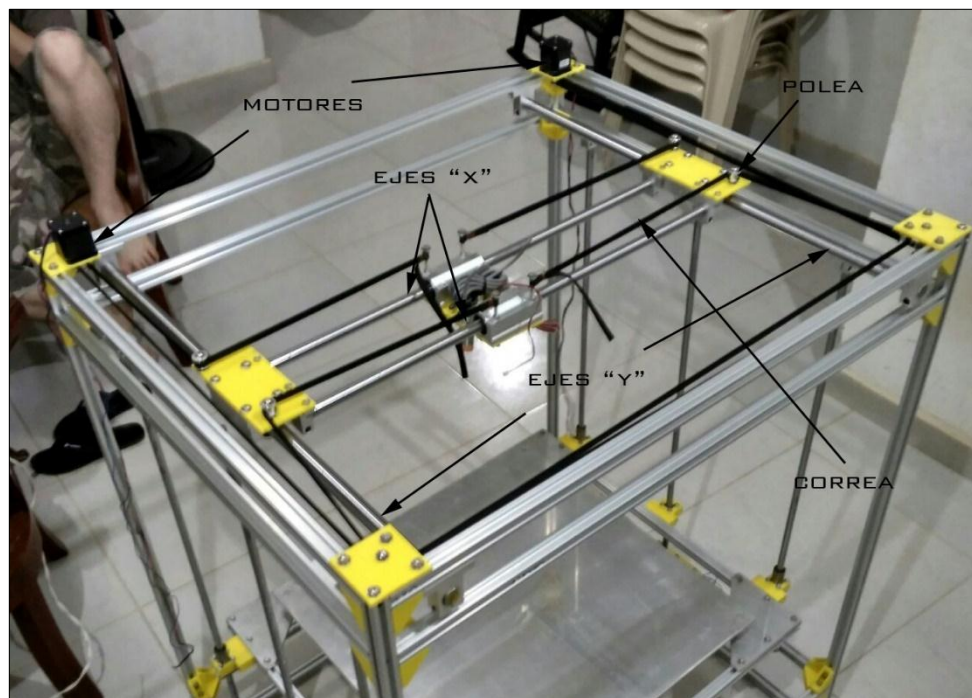


Figura 25. Sistema de transmisión de movimiento tipo Core-XY. Fuente: Autor, 2017

Después de diseñar el sistema de elevación de la máquina se siguió con el diseño del sistema de transmisión de movimiento (Figura 23). Primero se diseñaron los ejes “x” y “y”. Los criterios para la selección del material de estos fueron, la resistencia al desgaste y disponibilidad comercial local. Los ejes tienen una función muy importante ya que

deben garantizar que la flexión en este sistema sea como máximo $0,1 \text{ mm}$ para que la altura de capa de la impresión no se vea afectada alterando así la precisión de la máquina. Luego analizando los ejes como una viga con una carga central con apoyos simples como se mostró en el **capítulo 1.1.11** se calculó su deflexión máxima con la ecuación (3) y con el uso del software SOLIDWORKS se hizo una optimización de las dos medidas obtenidas por resistencia de materiales para encontrar los diámetros para estos ejes.

Se seleccionaron cojinetes lineales de bolas para esta tarea puesto que son los indicados para este tipo de trabajos ya que reducen la fricción y permiten el movimiento suave sobre los ejes. Para calcular la capacidad de carga estática básica C_0 se encontró en catálogos de fabricantes ecuaciones que permiten calcularla (SKF, 2014).

$$C_0 = \frac{S_0 * P_0}{f_{h0} * f_{l0}} \quad (28)$$

Donde:

C_0 : requisito básico de carga estática [N].

P_0 : carga estática equivalente [N].

S_0 : factor de seguridad estático.

f_{h0} : factor de dureza superficial del eje.

f_{l0} : factor de dirección de carga.

Para un funcionamiento suave y sin vibraciones $S_0 = 2$.

La reducción de la capacidad de carga dinámica y estática se puede determinar usando la siguiente ecuación donde HV representa la dureza Vickers del material dado. (SKF, 2014)

$$f_{ho} = \left(\frac{HV}{555} \right) - 0,17 \quad (29)$$

En el sistema CoreXY para realizar la transmisión del movimiento de los motores a los ejes se utiliza un sistema de transmisión por bandas y poleas en una distribución particular, este montaje permite el movimiento programado sobre los ejes X y Y con el uso de dos motores.

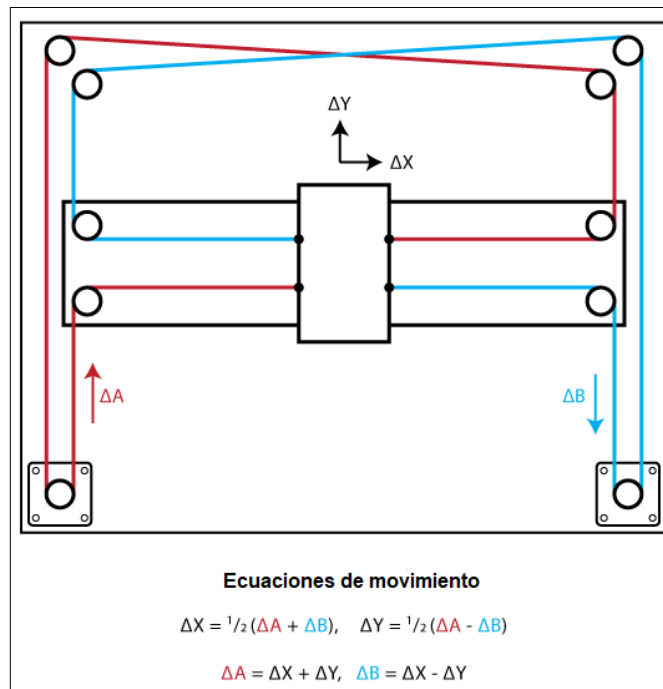


Figura 26. Sistema de movimiento tipo Core-XY Fuente: Ilan E. Moyer (2012) Tomado de: <http://corexy.com>, 2017

Las bandas usadas para este trabajo son las bandas de sincronización debido a estas son capaces de transmitir el movimiento de una manera suave con una precisión entre el 97 % - 99 %. Para el diseño de estas bandas se parte de la selección de los motores paso a paso

que van a mover el sistema. Teniendo en cuenta que para obtener buenos acabados superficiales por medio de esta tecnología de impresión se necesita de velocidades de impresión no mayores a 100 mm/s . Del catálogo del fabricante se tiene que la cantidad de tensión necesaria para esto se denomina tensión mínima (T_{st}). Esta tensión mínima se puede obtener de la siguiente expresión.

$$T_{st} = \frac{1,05 * DQ}{d} + m * S^2 (*) \quad (30)$$

Donde:

DQ : torque suministrado ($lb * in$)

d : diámetro de paso de la polea conductora (in)

m : factor de masa

$$S: \frac{\text{velocidad de banda}}{1000} \left(\frac{ft}{min} \right)$$

Con esta tensión mínima se seleccionó una correa cuyo T_{st} pudiera garantizarse con el torque suministrado con motor paso a paso seleccionado; la potencia del motor fue calculada con la ecuación (22). Por último, se calculó la longitud de las dos bandas de sincronización necesarias para este sistema con la ecuación (25).

Para el chasis de la máquina se necesitaba un perfil con el que se pudiera hacer un marco totalmente modular y que contara con la facilidad de poder montar componentes sobre este sin necesidad de soldar, se usó un perfil Bosch Rexroth $20 \times 20 \text{ mm}$ de aleación de

aluminio 6063-T5; se realizaron simulaciones en el software SOLIDWORKS al perfil
que

soporta la carga más crítica que corresponde al montaje de la cama más su capacidad máxima de impresión, esta carga es generada por 40 *kg* de masa distribuidos entre los dos perfiles que soportan los motores del eje “Z”. Se comprobó que los esfuerzos de Von Mises estuvieran por debajo del límite elástico del material. También se diseñaron y fabricaron piezas en PLA impresas en 3D como esquinas para reforzar el chasis, los soportes de los motores, acoples y placas para el montaje de rodamientos y extrusor, se simularon estas piezas hallando sus esfuerzos de Von Mises y verificando que estuvieran por debajo del esfuerzo de fluencia del material.

2.2.2 Componentes Electrónicos

Una impresión de calidad depende de una relación armónica entre los componentes mecánicos, electrónicos, el firmware y el software que controla todos ellos, por este motivo la selección de componentes electrónicos es una parte fundamental a la hora de diseñar una impresora 3D, para este proyecto la selección de componentes electrónicos se hizo de la siguiente manera:

Placa Controladora

Ya que la impresora fue diseñada para ser utilizada con un fin comercial, este componente debe ser open hardware para no estar expuesto a pago de patentes a terceros por este motivo se seleccionó la plataforma Arduino ya que es una plataforma de prototipos electrónica, de código abierto (open-source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar. Las placas se pueden ensamblar a mano o encargarlas pre-

ensambladas; el software se puede descargar gratuitamente. Los diseños de referencia del hardware (archivos CAD) están disponibles bajo licencia open-source, por lo que se puede adaptar a las necesidades. (Ojeda, 2017)

los criterios de selección de la placa Arduino son los siguientes:

- Ser open hardware
- facilidad de programación
- compatibilidad con otros elementos electrónicos
- modularidad o capacidad de expansión para agregar nuevas características
- Puertos con capacidad PWM, por lo menos 8 puertos

Extrusor

Se seleccionó tomando como criterio principal el tipo de tecnología, modo de extrusión y los materiales con los que trabaja la máquina de manera que este fuese capaz de fundir dichos materiales los cuales cuentan con una temperatura de transición vítrea entre 190 y 250 °C, de este modo se seleccionó un extrusor comercial que cumpliera con los requerimientos antes mencionados.

Resistencia Calefactora

Ya que el tamaño de la cama es de dimensiones no comerciales, esta fue diseñada como una placa de aluminio a la cual se le adhirió una resistencia calefactora en la parte posterior la cual debe calentar la cama por lo menos a una temperatura de 60 °C para lograr una buena adherencia de los materiales a fundir.

Controladores de los motores paso a paso

Este componente electrónico se seleccionó con base en dos criterios

- la compatibilidad con la placa controladora
- la potencia requerida por los motores

de esta manera se seleccionaron controladores comerciales capaces de cumplir con dichas características.

Finales de carrera

Los finales de carrera fueron seleccionados con base en dos criterios: el primero es que fuesen compatibles con la electrónica seleccionada y el segundo es que tuviesen una precisión de censado mayor a 0.1 mm ya que si la máquina sufre un corte de energía eléctrica pueda reanudar el trabajo sin desfasar el origen de la máquina.

También se tuvo en cuenta que se debía realizar una auto nivelación de la cama ya que por sus dimensiones se torna complicado realizar este procedimiento de forma manual.

Pantalla

La pantalla se seleccionó con base a dos criterios:

- Compatibilidad de la placa controladora
- Que contara con puerto SD para imprimir archivos desde ella.
- Capacidad de control desde la misma.

Fuente de alimentación

La fuente de alimentación será una fuente conmutada AC/DC que debe ser capaz de entregar la potencia requerida para todos los componentes electrónicos para ello se calculó la potencia de cada uno de ellos en base a los datos nominales entregados por los fabricantes. Se utilizó la consecuencia energética de la ley de Ohm.

$$P = I \times V \quad (31)$$

Donde:

P : es la potencia eléctrica [W].

I : es la corriente [A].

V : es el voltaje [V].

Firmware

El firmware de la impresora debe ser capaz de controlar las temperaturas tanto del extrusor como de la resistencia calefactora que se usará en la cama, controlar los motores y ser capaz de interpretar instrucciones en código G que son los comandos utilizados normalmente para controlar máquinas de este tipo. Como ya existen firmware Open Source que cumpla con las características mencionadas anteriormente el criterio de selección más importante fue la compatibilidad con los elementos electrónicos y la facilidad de modificación del código fuente de dicho firmware para adaptarlo a las características de esta máquina.

2.3 CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA DE IMPRESIÓN 3D

En la construcción se emplearon procesos de manufactura como corte, taladrado, roscado con machuelo y procesos de manufactura aditiva por medio de impresión 3D. En el proceso de ensamble al ser una máquina diseñada de forma modular todo fue unido mediante tornillos de sujeción.

El proceso de ensamble de los componentes electrónicos fue conectar correctamente cables por medio de bornes o soldadura con estaño teniendo en cuenta la polaridad de los componentes.

2.4 VALIDACIÓN DE LA MÁQUINA DE IMPRESIÓN 3D

Posterior a la construcción de la máquina se realizó una inspección visual a la máquina verificando diferentes puntos de control como alineación, sujeción de los componentes y correcto funcionamiento del sistema electrónico.

Para validar la máquina se imprimieron 5 modelos de calibración en forma de cubo y con un calibrador pie de rey Mitutoyo con resolución de $0,05\text{ mm}$ se tomaron las medias de cada uno de estos por todos sus lados. La tolerancia dimensional máxima que se estableció para que el diseño fuese satisfactorio fue de $\pm 0,5\text{ mm}$.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 DISEÑO DE LA MÁQUINA DE IMPRESIÓN 3D

3.1.1 Diseño de la cama de impresión

Los materiales candidatos encontrados para este componente fueron los expuestos en la Tabla 3.

Tabla 3. Materiales candidatos para el diseño de la cama de impresión

Material	Densidad (kg/m^3)	Conductividad térmica ($W/m * K$)	Fuente
Cobre	8960	385	(William F. Smith, 2006)
Aluminio	2700	205	
Acero	7850	50.2	

Fuente: Autor

Como se puede apreciar en la Tabla 3 el material con mejor conductividad térmica es el cobre, pero también es el más denso, esto aumentaría el peso del montaje de la cama aumentando costos en selección de motores y tornillos de potencia; el acero posee una muy baja conductividad térmica comparado con el cobre y su densidad es el 87,61 % de este. Por otra parte, el aluminio tiene una conductividad térmica igual al 53 % de la conductividad térmica del cobre, pero es un 70 % más ligero que este y un 66 % más ligero que el acero, por esto, el aluminio fue el material escogido para el diseño de la cama; comercialmente se encontró la placa en una aleación de aluminio 6061.

Se realizó el primer análisis de carga para una placa de $590 \times 590 \text{ mm}$ con $1/8''$ de espesor y se encontró que su esfuerzo máximo de Von Mises es de $87,6 \text{ MPa}$ (Figura 27) esto supera el esfuerzo de fluencia del material por lo se siguió buscando otra medida.

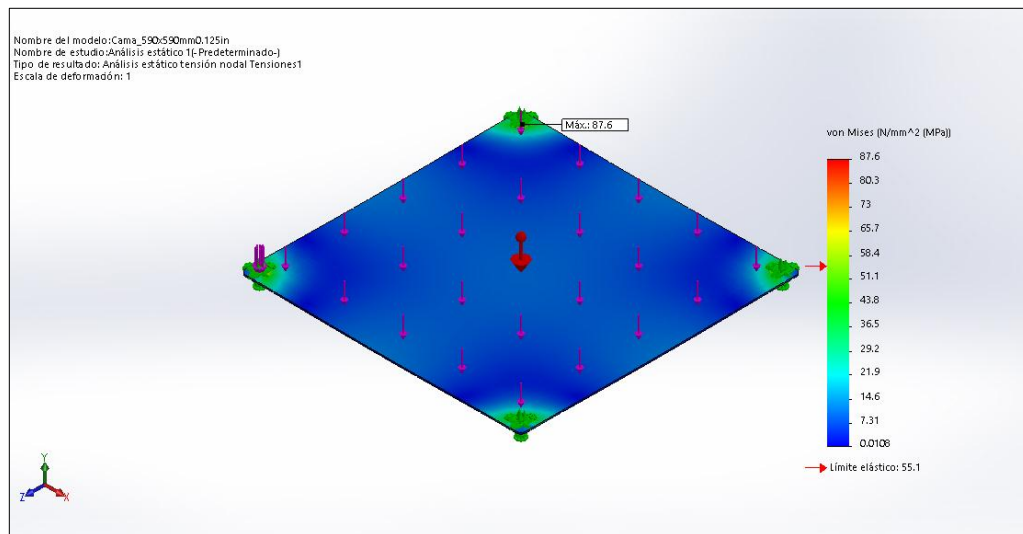


Figura 27. Simulación de cargas en la cama de impresión de $1/8''$ de espesor mediante SolidWorks. Fuente: Autor, 2017

La siguiente medida comercial encontrada fue de $3/16''$ con este espesor se obtuvo un esfuerzo de Von Mises de $41,7 \text{ MPa}$ (Figura 28), este está por debajo del esfuerzo de fluencia del material que es de $55,1 \text{ MPa}$. Por otra parte, el desplazamiento máximo obtenido para este espesor fue de $1,21 \text{ mm}$ (Figura 29) este valor corresponde a más de 6 veces la altura de capa ($0,2 \text{ mm}$) que debe ser la resolución de la máquina, por lo cual, se considera que esto podría afectar dicha resolución.

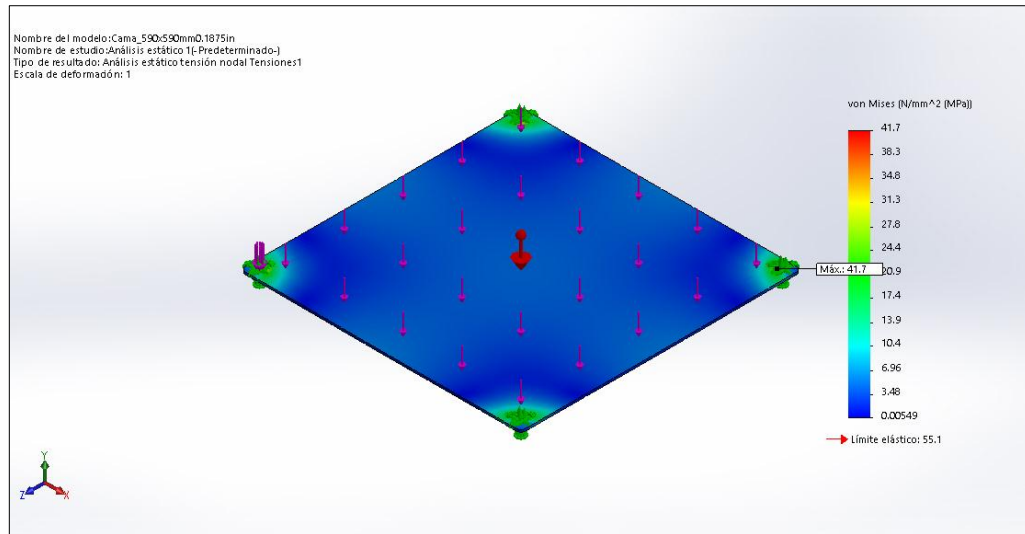


Figura 28. Simulación de cargas en la cama de impresión de 3/16” de espesor mediante SolidWorks. Fuente Autor, 2017

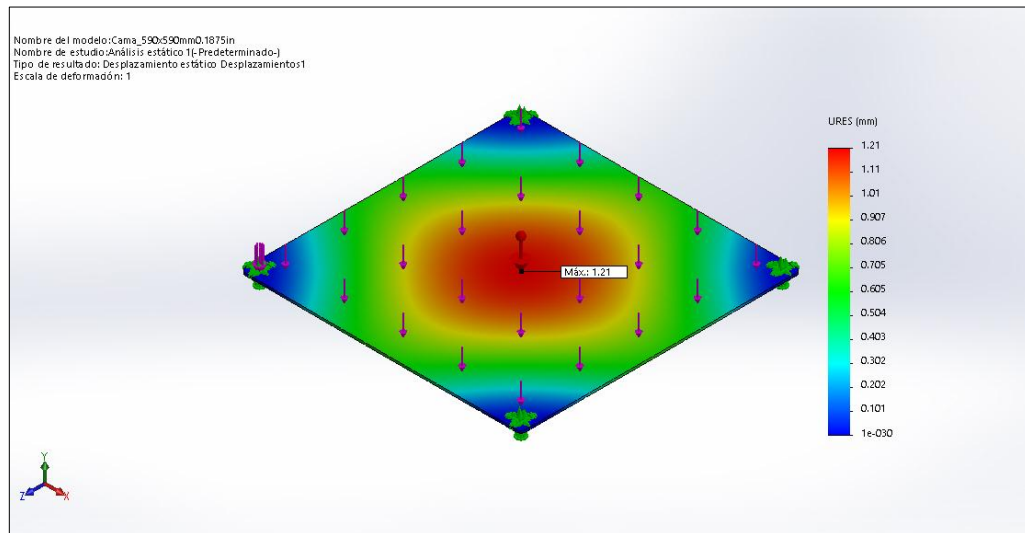


Figura 29. Deformación máxima de la cama de la impresión con 3/16" de espesor obtenido de SolidWorks. Fuente: Autor, 2017

El siguiente espesor comercial encontrado fue de 1/4 ". Como se puede apreciar en la (Figura 30) el esfuerzo de Von Mises máximo generado para este es de 25,3 MPa, este no supera el esfuerzo de fluencia del material

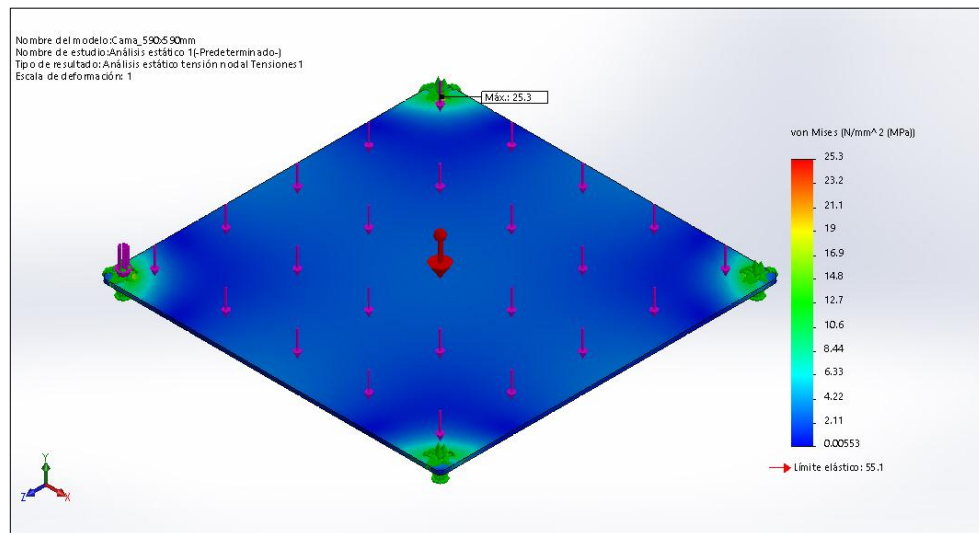


Figura 30. Simulación de cargas en la cama de impresión de 1/4" de espesor mediante SolidWorks. Fuente: Autor, 2017

Así mismo se obtuvo la deformación máxima que tendrá con este espesor, como se muestra en la (Figura 31) la deformación máxima obtenida es de 0,539 mm en el centro de la cama; esta deformación se compensa a través de un sensor autolevel, que censando una matriz de puntos sobre la cama (midiendo la distancia de la cama al extrusor en cada punto) varía la altura de la cama moviendo los tornillos de potencia mientras se imprime. Esto permite compensar inclinaciones en la cama de impresión, por esto, se decidió que este sería el espesor final para este componente. El resumen del diseño final de la cama de impresión lo podemos ver en la Tabla 4.

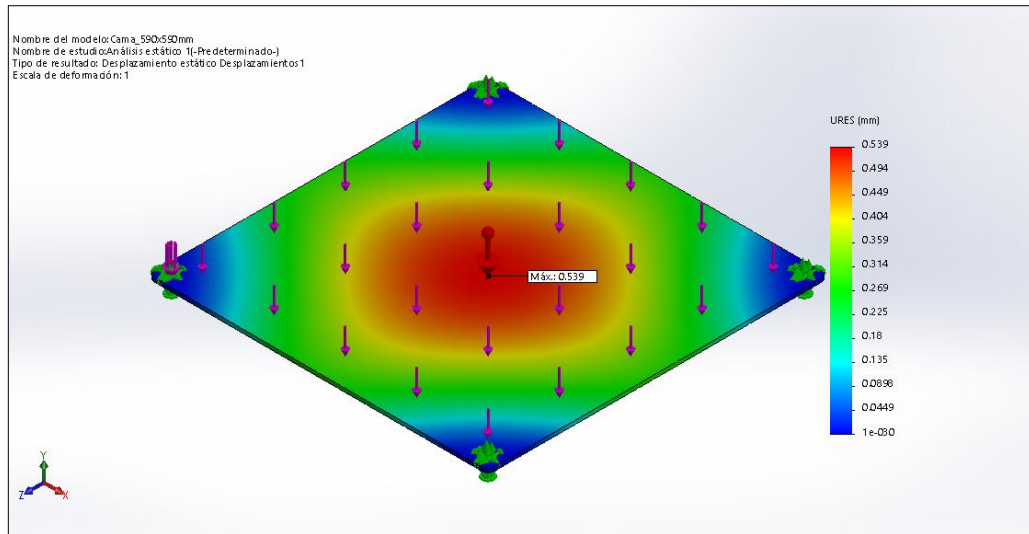


Figura 31. Deformación máxima de la cama de la impresión con 1/4" de espesor obtenido de SolidWorks. Fuente: Autor, 2017

Tabla 4. Diseño final de la cama de impresión

Cama de impresión	Valor
Dimensiones	590x590 mm
Espesor	1/4 in
Material	Aluminio 6061

Fuente: Autor, 2017

3.1.2 Diseño de tornillos de potencia

Debido a que la resolución que debe manejar la máquina en este sistema es de 0,2 mm y los motores tienen una precisión de 200 pasos por vuelta. Se calculó un paso adecuado para los tornillos de potencia que se encargan de subir y bajar la cama de impresión. Usando la ecuación (27) se calculó este paso para un avance por vuelta de 2 mm.

$$l = n * p = 1 * p = 2 \frac{mm}{vuelta}$$

$$\Rightarrow p = 2 \text{ mm}$$

Donde:

l : avance del tornillo

n : numero de hilos

p : paso

Entonces en 20 pasos de vuelta del motor el tornillo subirá:

$$2 \frac{\text{mm}}{\text{vuelta}} * \frac{20}{200} \text{ vueltas} = 0,2 \text{ mm}$$

Comercialmente se pudo encontrar tornillos con este paso en acero inoxidable AISI 304 con diámetros de 8 mm, 10 mm y 12 mm. Con ayuda del software EES (versión académica) se programaron las ecuaciones para hacer iteraciones con cada uno de estos diámetros y las cargas a la cual se encuentra sometido este elemento; se encontró que el diámetro óptimo para el diseño sería 12 mm. El análisis realizado a todas estas medidas de diámetro con ayuda del EES fue el siguiente:

Datos:

$$\text{masa montaje cama} = 8,649 \text{ kg}$$

$$\text{masa tornillos} = 1,43 \text{ kg}$$

$$\text{capacidad de impresión} = 30 \text{ kg}$$

$$d = 12 \text{ mm}$$

$$p = 2 \text{ mm}$$

$$d_m = d - \frac{p}{2} = 12 - \frac{2}{2} = 11 \text{ mm}$$

$$d_r = d - p = 12 - 2 = 10 \text{ mm}$$

$$d_c = 27 \text{ mm} \text{ (diámetro del collarín)}$$

$$n = 1 \text{ (número de hilos de la rosca)}$$

Tabla 5. Coeficientes de fricción f de pares roscados

MATERIAL DEL TORNILLO	MATERIAL DE LA TUERCA		
	Acero	Bronce	Latón
Acero, seco	0,15-0,25	0,15-0,23	0,15-0,19
Acero, aceite para máquina	0,11-0,17	0,10-0,16	0,10-0,15
Bronce	0,08-0,12	0,04-0,06	-

Fuente: Richard G. Budynas, 2012

Tabla 6. Coeficientes de fricción de collarín de empuje

COMBINACIÓN	En operación	Arranque
Acero suave sobre hierro fundido	0,12	0,17
Acero duro sobre hierro fundido	0,09	0,15
Acero suave sobre bronce	0,08	0,10
Acero duro sobre bronce	0,06	0,08

Fuente: Richard G. Budynas, 2012

Los coeficientes de fricción fueron obtenidos mediante las Tablas 5 y 6 las cuales estiman estos dependiendo de los materiales en contacto y las condiciones de trabajo.

$f_t = 0,19$ (coeficiente de fricción del tornillo)

$f_c = 0,08$ (Coeficiente de fricción del collarín)

Se calculó el peso que va a levantar cada motor sumando las masas de todo el sistema:

$$F = \frac{(1,43 + 30 + 8,649) \text{ kg}}{2} * 9,81 \frac{\text{kg} * \text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = 196,2 \text{ N}$$

El torque necesario para levantar la carga vendría dado por la suma de las ecuaciones

(10) y (13)

$$T = T_R + T_c \quad (32)$$

Entonces el torque total necesario sería

$$T = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \pi f d_m}{\pi d_m - f l} \right) + \frac{F f_c d_c}{2} \quad (33)$$

$$\Rightarrow T = \frac{196,2(11)}{2} \left(\frac{2 + \pi(0,19)(11)}{\pi(11) - (0,19)2} \right) + \frac{196,2(0,08)(27)}{2}$$

Reemplazando los valores antes mencionados se obtiene que el torque necesario para

levantar la combinación de carga es $T = 482,4 \text{ N} \cdot \text{mm}$.

Se debe tener en cuenta que los motores trabajaran al 70% de su potencia nominal, así:

$$T_{real} = 1,3T \quad (34)$$

$$T_{real} = 1,3(482,4 \text{ N} \cdot \text{mm}) = 627,1 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Con este torque se buscó un motor paso a paso comercial. El motor que mejor se adapta a las características del diseño se puede apreciar en la (Figura 32):



Figura 32. Ficha técnica motor paso a paso para los tornillos de potencia. Fuente: Autor, 2017

El motor seleccionado cuenta con un torque nominal de 1,2 Nm. Con el valor del torque del motor, se evaluó el diseño de los tornillos de potencia

$$T_{motor} = 1200 * 0,70 = 840 \text{ N.mm}$$

Ahora la fuerza que levanta el tornillo con el torque suministrado por el motor se obtiene despejando el valor de F de la ecuación (33)

$$\Rightarrow 840 \text{ N.mm} = \frac{F(11)}{2} \left(\frac{2 + \pi(0,19)(11)}{\pi(11) - (0,19)2} \right) + \frac{F(0,08)(27)}{2}$$

$$\Rightarrow F = \frac{840}{2,45846} = 341,7 \text{ N}$$

La masa que puede levantar un tornillo es:

$$\frac{341,7 \text{ N}}{9,81 \frac{m}{s^2}} = m$$

$$m = 34,84 \text{ kg}$$

Para el montaje de dos tornillos con dos motores serán capaz de levantar una masa total de 69,68 kg. Este valor está por encima de la capacidad máxima de la máquina que son 30 kg.

El torque necesario para bajar la carga con este peso se calculó usando la ecuación (11):

$$T_L = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l \pi f d_m - l}{\pi f d_m + f l} \right) \quad (11)$$

Reemplazando los respectivos valores en la ecuación se tiene:

$$T_L = 614,6 \text{ N. mm}$$

Luego con la ecuación (12) se evaluó que el tornillo sea auto bloqueante, la condición para el auto bloqueo es:

$$\pi f d_m > l \quad (12)$$

$$\Rightarrow \pi(0,19)(11\text{mm}) > 2 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow 6,56 \text{ mm} > 2 \text{ mm}$$

Como el factor de fricción multiplicado por el diámetro medio del tornillo y por π es mayor que el avance, se cumple la condición de autobloqueo.

los esfuerzos en el cuerpo de los tornillos de potencia pueden relacionarse con parámetros de la rosca. el esfuerzo cortante nominal en torsión en el cuerpo del tornillo puede calcularse mediante la ecuación (14)

$$\tau = \frac{16T}{\pi d_r^3} \quad (14)$$

Así:

$$\Rightarrow \tau = 4,278 \text{ Mpa}$$

ahora el esfuerzo axial en el cuerpo del tornillo debido a la carga F se puede obtener mediante la ecuación (15):

$$\sigma = \frac{4F}{\pi d_r^2} \quad (15)$$

De esta manera:

$$\Rightarrow \sigma = 4,35 \text{ Mpa}$$

Estos esfuerzos están muy por debajo del esfuerzo de fluencia del acero AISI 304 que es

$$S_y = 207 \text{ MPa}.$$

al tornillo comportarse como una columna sometida a compresión fue necesario evaluar los efectos provocados por este fenómeno. Se utilizó la ecuación extendida de la fórmula de Euler; ecuación (18) para determinar su carga crítica.

$$P_{cr} = \frac{C\pi^2 EI}{l^2} \quad (18)$$

Donde E es el módulo de elasticidad, para este caso el tornillo es de material AISI 304, su módulo de elasticidad está en el orden de los 190 GPa . I es el momento de inercia de la sección transversal que se puede calcular con la ecuación (35), l es la longitud efectiva del tornillo y la constante C depende de las condiciones en los extremos como se muestra en la Figura 16.

$$I = \frac{\pi}{64} d_r^4 \quad (35)$$

$$\Rightarrow I = 490,4 \text{ mm}^4$$

Sustituyendo en la ecuación (18):

$$P_{cr} = 1274 \text{ N}$$

La masa que soporta un tornillo bajo esta condición de carga es:

$$m = \frac{1274 \text{ N}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = 129,9 \text{ kg}$$

Mediante la relación

$$I = A * k^2 \quad (36)$$

Donde A es el área y k es el radio de giro, podríamos encontrar este valor de k y relacionarlo con su esbeltez mecánica; ecuación (16).

$$I = 490,9 \text{ mm}^4, A = 78,54 \text{ mm}^2$$

Así:

$$k = \sqrt{\frac{490,9}{78,54}} = 2,5 \text{ mm}$$

la esbeltez mecánica del tornillo para una longitud del tornillo de $L_e = 850 \text{ mm}$,

$$\lambda = \frac{L_e}{k} \quad (16)$$

$$\lambda = \frac{850}{2,5} = 340$$

Para aquellos tornillos cuyo valor de la esbeltez mecánica sea superior a 89 ($\lambda > 89$), entonces se considerarán tornillos de columna esbelta o larga (que serán más esbeltos conforme mayor sea su coeficiente de esbeltez). En este caso se hizo un análisis donde se tuvo en cuenta la estabilidad del tornillo a pandeo, dado que su falla se producirá muy probablemente por este motivo antes que por resistencia mecánica pura a compresión.

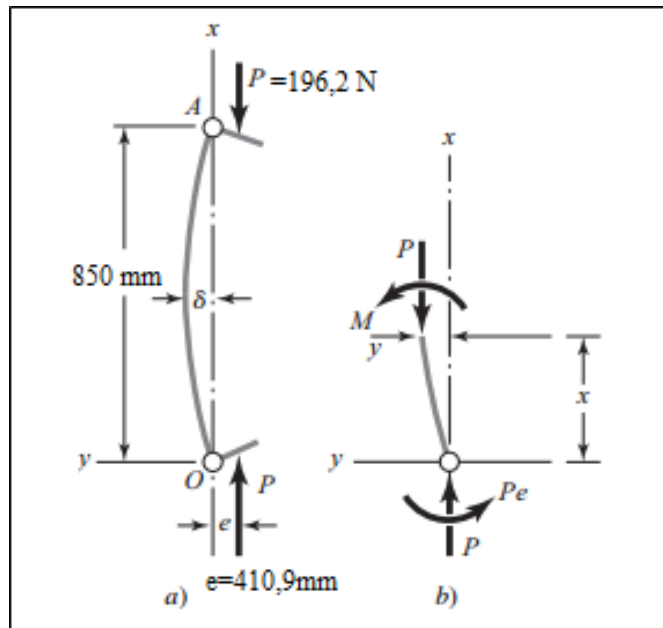


Figura 33. Diagrama de cuerpo libre del tornillo cargado excéntricamente. Fuente: Autor, 2017

Se puede apreciar que la deformación máxima por pandeo en una columna excéntricamente cargada ocurre en la mitad de su longitud $\frac{l}{2}$. Esta deformación se puede calcular por medio de la ecuación (19).

$$\delta = e \left[\sec \left(\sqrt{\frac{P}{EI}} * \frac{l}{2} \right) - 1 \right] \quad (19)$$

Donde

P : es la carga [N].

e : es la excentricidad de la carga [mm].

E : es el módulo de elasticidad del material [MPa].

I : es el momento de inercia de la sección transversal [mm⁴].

l : es la longitud de la columna [mm].

Reemplazando los valores del diagrama de cuerpo libre; (Figura 33). Se obtuvo el valor de esta deformación para el montaje del tornillo.

$$\delta = 410,9 \text{ mm} \left[\sec \left(\sqrt{\frac{196,2 \text{ N}}{190000 \text{ MPa} * 490,9 \text{ mm}^4}} * \frac{850 \text{ mm}}{2} \right) - 1 \right]$$

$$\delta = 0,02378 \text{ mm}$$

El momento flector máximo también ocurre a la mitad de la longitud y está dada por la ecuación (20), siendo P la carga.

$$M_{m\acute{a}x} = P(e + \delta) = Pe \sec \left(\frac{l}{2} \sqrt{\frac{P}{EI}} \right) \quad (20)$$

$$M_{m\acute{a}x} = 80623,24 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

La magnitud del esfuerzo de compresión máximo a la mitad de la longitud se determina

superponiendo la componente axial y la componente de la flexión; ecuación (21)

$$\sigma_c = \frac{P}{A} + \frac{Mc}{Ak^2} \quad (21)$$

Se debieron diseñar dos ejes guías con cojinetes deslizantes que ayudaron a disminuir la componente de este esfuerzo normal debido a la flexión producida por la carga excéntrica. Para hallar el diámetro de estos ejes se sumó el momento de inercia de una sección circular a la componente normal producida por la flexión en la ecuación (21). Véase la ecuación (37).

$$\sigma_c = \frac{P}{A} + \frac{M_{m\acute{a}x} * c}{Ak^2 + 2 * \left(\frac{\pi}{64} d^4\right)} \quad (37)$$

Donde

P : es la carga [N].

A : es el área de la sección transversal del tornillo [mm^2].

$M_{m\acute{a}x}$: es el momento máximo [$N \cdot mm$].

c : es el radio del tornillo [mm].

k : es el radio de giro [mm].

d : es el diámetro de los ejes [mm].

Luego de realizar varias iteraciones para encontrar un valor de d adecuado, se decidió que se usarían dos ejes comerciales con diámetro de 12 mm y se obtuvo un esfuerzo normal:

$$\sigma_c = 162 \text{ MPa}$$

La magnitud de este esfuerzo de compresión máximo debido a las componentes axiales y de flexión se encuentra por debajo del límite elástico del material el cual es $S_y = 207 \text{ Mpa}$. El resumen del diseño final de este sistema se muestra en las Tablas 7 y 8.

Tabla 7. Diseño final tornillos de potencia.

Tornillos	Valor
Material	AISI 304
Paso	2 mm
Diámetro	12 mm
Longitud	850 mm
Número de hilos	1

Fuente: Autor, 2017

Tabla 8. Diseño final ejes guías.

Ejes Guías	Valor
Material	DIN 1.2210
Diámetro	12 mm
Longitud	874 mm

Fuente: Autor, 2017

3.1.3 Diseño de ejes

Los aceros comúnmente empleados para este tipo de elementos de impresoras 3D son: el acero inoxidable AISI 304 y DIN 1.2210 conocido comercialmente como “acero plata”. El empleo de ambos pudo ser satisfactorio puesto que cuentan con una gran resistencia al desgaste bajo estas condiciones de trabajo, esto es fundamental para mantener un buen ajuste antes los ejes y los rodamientos. Un requisito importante para la selección del material de estos elementos fue su calibración, ya que sobre estos van montados unos rodamientos lineales de bolas. En catálogos comerciales se encontró que el tipo de

rodamientos necesarios sólo venía en denominaciones milimétricas entonces fue necesario escoger un material que viniera calibrado en milímetros para los ejes y así ahorrar costos en postprocesos. Comercialmente se encontró que en el acero AISI 304 venía calibrado en pulgadas y el acero plata (DIN 1.2210) calibrado en milímetros, por lo cual se decidió usar acero plata en el diseño de estos.

Tabla 9. Composición química del acero plata, obtenida del certificado de calidad del proveedor

DIN 1.2210	% Carbono	% Silicio	% Manganeso	% Fósforo	% Azufre	% Cromo	% Vanadio
RANGO NOMINAL	1,10 –1,25	0,15-0,30	0,20-0,40	≤0,030	≤0,030	0,50-0,80	0,07-0,12
ACERO EMPLEADO	1,14	0,16	0,39	0,01	0,003	0,61	0,08

Fuente: Autor, 2017

Eje "x"

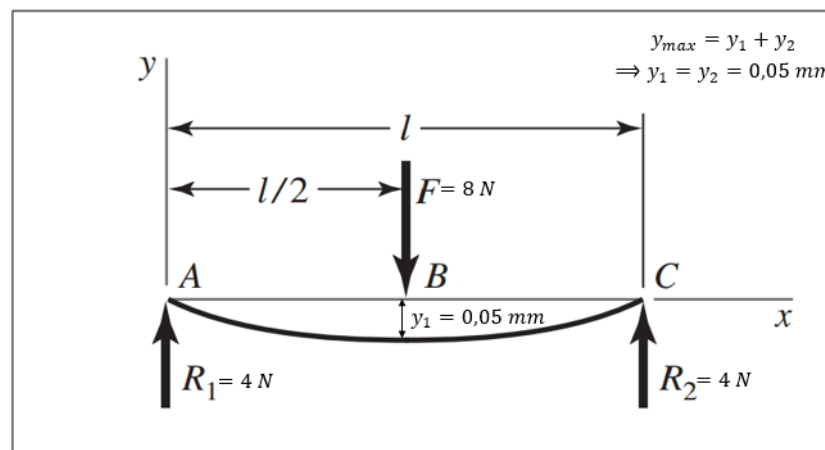


Figura 34. Diagrama de cuerpo libre del eje "x". Fuente: Autor, 2017

Como se planteó anteriormente la flexión del sistema debe ser como máximo 0,1 mm, entonces:

$$\sum y_{m\acute{a}x} = y_1 + y_2 = 0,1 \text{ mm} \quad (38)$$

$$y_1 = y_2 = 0,05 \text{ mm} \quad (39)$$

Datos:

$$\text{Montaje del extrusor} = 8 \text{ N}$$

$$l = 710 \text{ mm}$$

Teniendo en cuenta en el sistema CoreXY se montan dos ejes en “x” entonces el peso que soporta cada eje es iguala 4N.

De la ecuación (3) despejamos el diámetro y sustituyendo la deformación máxima permitida al eje y_1 se obtiene la ecuación (40).

$$y_{m\acute{a}x} = -\frac{Fl^3}{48EI} \quad (3)$$

$$d^4 = -\frac{Fl^3}{48E \frac{\pi}{64} y_1} \quad (40)$$

$$\Rightarrow d^4 = -\frac{4 * (710^3)}{48 * 200 \times 10^3 * \frac{\pi}{64} * 0,05}$$

$$\Rightarrow d^4 = 60760,86 \text{ mm}^4$$

$$\Rightarrow d = 15,70 \text{ mm}$$

Comercialmente se tiene un eje de 16 mm.

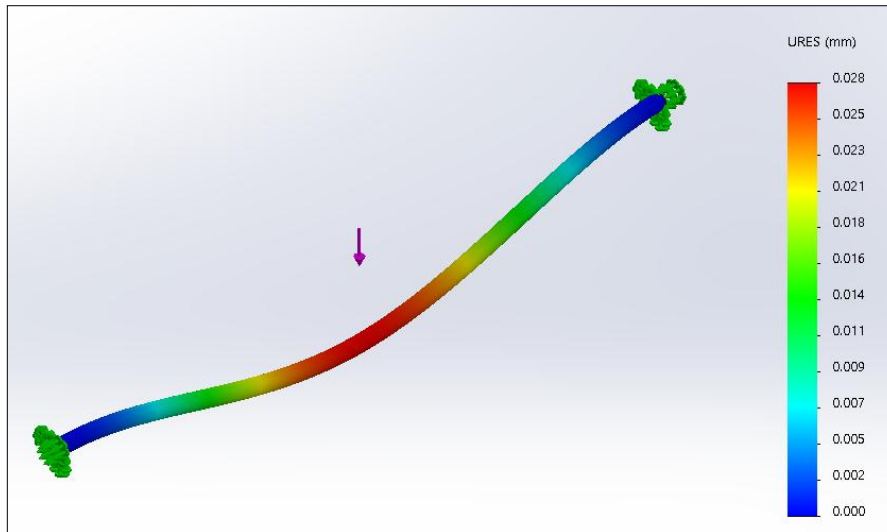


Figura 35. Análisis de flexión eje "x". Diámetro: 16 mm. Obtenido de SolidWorks.
Fuente: Autor, 2017

Haciendo un estudio estático en el software SolidWorks por medio de análisis de elementos finitos (Figura 35) se obtuvo que para este eje comercial de 16 mm su deformación máxima está se da en la mitad de este y es de 0,028 mm, este valor está por debajo de los 0,05 mm esperados.

Eje "y"

En este montaje también se necesitan de dos ejes que sostienen el montaje del eje "x", al ser totalmente simétrico cada eje soportará el peso de la mitad del montaje, entonces:

$$\text{peso ejes } x = 22 \text{ N}$$

$$\text{Montaje del extrusor} = 8 \text{ N}$$

$$\text{Montaje eje } y = 4 \text{ N}$$

$$l = 770 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow F = \frac{22 + 8 + 4}{2} = 17 \text{ N}$$

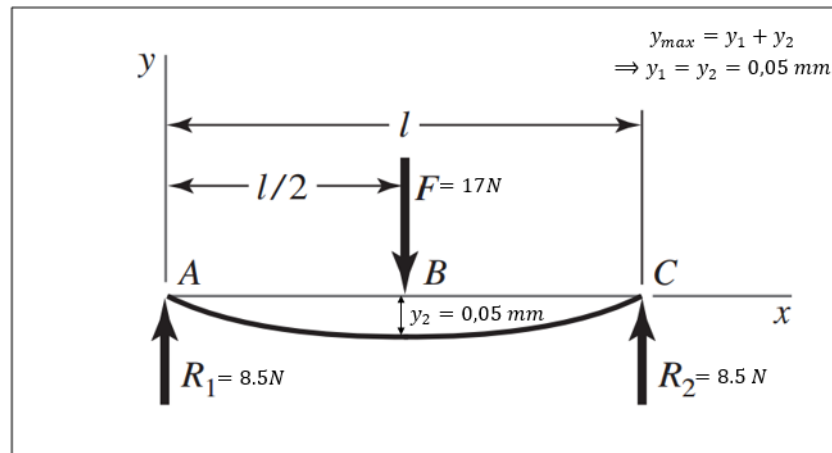


Figura 36. Diagrama de cuerpo libre del eje "y". Fuente: Autor, 2017

De la ecuación (3) despejamos el diámetro sustituyendo la deformación máxima permitida al eje; ecuación (39), se obtiene la ecuación (41)

$$y_{\max} = -\frac{Fl^3}{48EI} \quad (3)$$

$$d^4 = -\frac{Fl^3}{48E \frac{\pi}{64} y_2} \quad (41)$$

$$\Rightarrow d^4 = -\frac{17 * (770^3)}{48 * 200 \times 10^3 * \frac{\pi}{64} * 0,05}$$

$$\Rightarrow d^4 = 329289,66 \text{ mm}^4$$

$$\Rightarrow d = 23,6 \text{ mm}$$

Comercialmente se tendría un eje de 24 mm.

Para verificar este análisis estático se hizo una optimización en el software SolidWorks partiendo del diámetro de los ejes "x", con esto se obtuvo que un eje de 20 mm sería el más óptimo para el sistema.

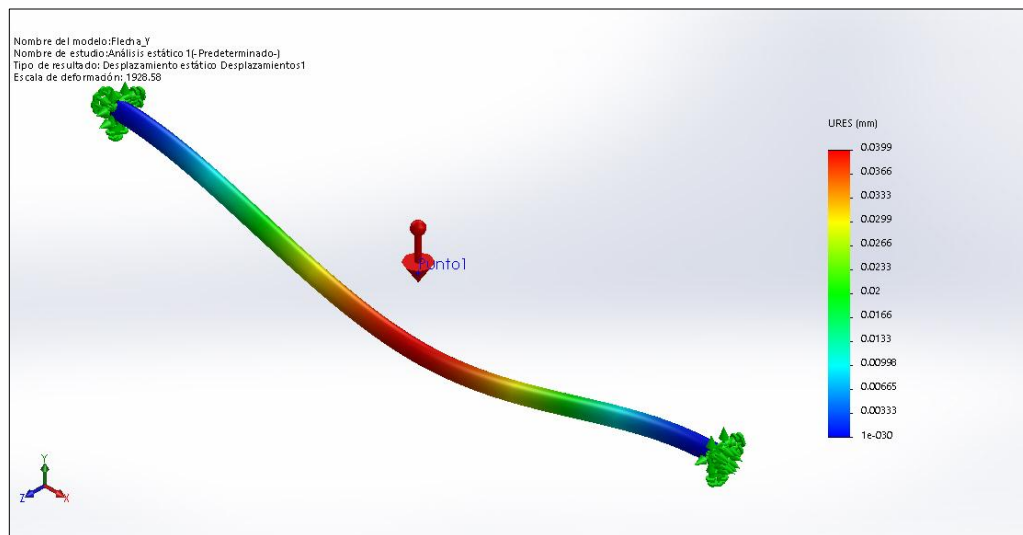


Figura 37. Resultado final del eje " y ". dimensión final diámetro: 20 mm. Fuente: Autor, 2017

Como se puede observar en la (Figura 37) para un diámetro de 20 mm se tiene una deformación máxima de 0,0399, este valor está por debajo de la deformación permitida (0,05 mm). Sumando las deformaciones obtenidas se tiene que:

$$y_1 + y_2 = 0,028 + 0,0399 = 0,0679 \text{ mm}$$

Teniendo en cuenta que la deformación permitida en este sistema planteada era de 0,1 mm, se redujo en un 32,1 % los resultados esperados. En la Tabla 10 se muestra el diseño final de los ejes.

Tabla 10. Diseño final de los ejes "x" y "y"

Ejes	Diámetro	Cantidad	Longitud	Material	E	HB	HV
Eje x	16 mm	2	710 mm	DIN 1.2210	200 GPa	236	248
Eje y	20 mm	2	770 mm	DIN 1.2210	200 GPa	236	248

Fuente: Autor, 2017

3.1.4 Selección de cojinetes

Para determinar la carga básica de catálogo de los cojines se usó la ecuación (28)

$$C_0 = \frac{S_0 * P_0}{f_{h0} * f_{l0}} \quad (28)$$

Donde:

C_0 : requisito básico de carga estática (N)

P_0 : carga estática equivalente (N)

S_0 : factor de seguridad estático

f_{h0} : factor de dureza superficial del eje

f_{l0} : factor de dirección de carga

Para un funcionamiento suave y sin vibraciones $S_0 = 2$. Con la ecuación (28) se calculó el factor de dureza superficial del eje usando el valor de dureza Vickers (HV) expuesto

en la Tabla 10. Este valor de dureza fue obtenido de un certificado de calidad suministrado por el proveedor del material.

$$\Rightarrow f_{ho} = \left(\frac{248}{555} \right) - 0,17 = 0,28$$

Type	f_i	f_o
LBCR 5..8	1,15	1,43
LBBR 3..8	1,16	1,43
LBBR 10..16	1,19	1,47
LBBR 20	1,06	1,28
LBBR 25	0,98	1,15
LBBR 30..40	0,99	1,11
LBBR 50	1,01	1,1

Figura 38. Factor de dirección de carga. Fuente: SKF linear bearing and units, 2014

En la (Figura 38) se muestran los diferentes factores de carga f_{l0} dependiendo del diámetro del eje.

Para los ejes “x”

$$\varnothing_{cojinete} = 16 \text{ mm}$$

$$P_0 = 4 \text{ N}$$

De la Figura 38:

$$f_{l0} = 1,47$$

Entonces la carga básica requerida:

$$C_0 = \frac{2 * 4N}{0,28 * 1,47} = 19,43 N$$

Para los ejes “y”

$$\phi_{cojinete} = 20 mm$$

$$P_0 = 18 N$$

De la Figura 38:

$$f_{i0} = 1,28$$

Entonces la carga básica requerida:

$$C_0 = \frac{2 * 18N}{0,28 * 1,28} = 100,45 N$$

Entonces con estas cargas básicas estáticas de catálogo $C_0 = 19,43 N$ para $\phi = 16mm$ y $C_0 = 100,45 N$ para $\phi = 20mm$ se buscó un rodamiento lineal de bolas con los diámetros especificados.

型号 Model number	球列数 Number of ball rows	主要尺寸 Main dimensions													基本额定载荷		
		内径 Inscribed circle		内径 Outer diameter		长度 Length		外止动槽 Outer locking groove			W	F (mm)	E (mm)	a	径向跳动 Eccentricity (max.)	Basic load rating	
		dr	公差 Tolerance	D	公差 Tolerance	L	公差 Tolerance	B	公差 Tolerance	D ₁						动负荷 Dynamic cn	静负荷 Static cn
LM3UU	4	3		7		10		-	-	-	-	-	-	-	0.008	7	11
LM4UU	4	4	0-0.008	8	0-0.009	12	0-0.012	-	-	-	-	-	-	-		9	13
LM5UU	4	5		10		15		10.2		9.6	1.1	1	-	-		17	21
LM6UU	4	6		12		19		13.5		11.5	1.1	1	-	-		21	27
LM8UU	4	8		15	0-0.011	17		11.5		14.3	1.1	1	-	-		18	23
LM8UU	4	8		15		24		17.5		14.3	1.1	1	-	-		27	41
LM10UU	4	10	0-0.009	19		29	0-0.20	22	0-0.20	18	1.3	1.5	6.8	80°	0.012	38	56
LM12UU	4	12		21	0-0.013	30		23		20	1.3	1.5	8	80°		42	61
LM13UU	4	13		23		32		23		22	1.3	1.5	9	80°		52	79
LM16UU	5	16		28		37		26.5		27	1.6	1.5	11	80°		79	120
LM20UU	5	20		32		42		30.5		30.5	1.6	2	11	60°		88	140
LM25UU	6	25	0-0.010	40	0-0.016	59		41		38	1.95	2.5	12	60°	0.015	100	160
LM30UU	6	30		45		64		44.5		45	1.85	2.5	15	60°		130	220
LM35UU	6	35		52		70	0-0.30	49.5		49	2.1	3	17	60°		170	320
LM40UU	6	40	0-0.012	60	0-0.019	80		60.5	0-0.30	57	2.1	3	20	60°	0.020	220	410
LM50UU	6	50		80		100		74		76.5	2.6	3	25	60°		390	810
LM60UU	6	60		90		110		85		86.5	3.15	3	30	60°		480	1020
LM80UU	6	80	0-0.015	120	0-0.022	140		105.5		116	4.15	3	40	50°	0.025	735	1600
LM100UU	6	100	0-0.020	150	0-0.025	150	0-0.40	125.5		145	4.15	3	50	50°		1410	3480

Figura 39. Catálogo de rodamientos lineales de bolas del proveedor. Tomado de: <https://es.aliexpress.com>, 2017

Del catálogo (Figura 39) se obtuvo que para rodamientos lineales de bolas LM16UU y LM20UU sus cargas de catálogo son de 120 N y 140 N respectivamente, estos valores están por encima de las cargas de catálogo calculadas, $C_0 = 19,43 N$ y $C_0 = 100,45 N$. Por esto los rodamientos LM16UU y LM20UU fueron los seleccionados.

3.1.5 Diseño de correas de transmisión

Los motores paso a paso más sencillos encontrados en el mercado comercial local para máquinas CNC controladas por Arduino son los NEMA17. Puesto que el torque necesario para mover este sistema es pequeño comparado con el torque de este motor, se partió seleccionando este motor (Figura 40).



Figura 40. Ficha técnica motor NEMA 17 del proveedor. Tomado de: <https://www.vistronica.com>, 2017

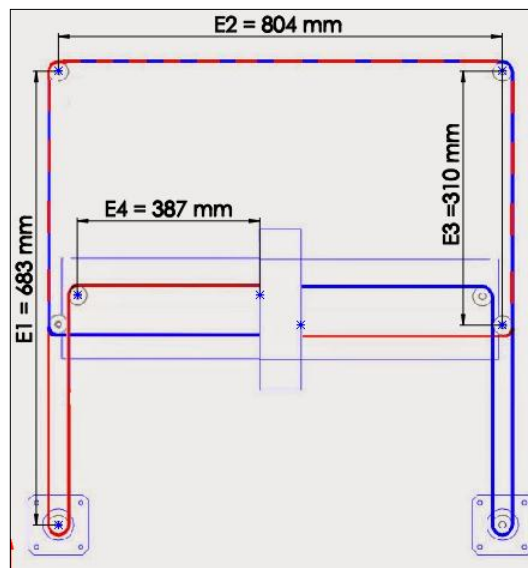


Figura 41. Diagrama de cuerpo libre sistema de bandas y poleas de la máquina. Fuente: Autor, 2017

En la (Figura 41) se muestra cómo van montadas las correas y poleas del sistema CoreXY diseñado para la máquina, este diagrama va acompañado de los siguientes datos:

$$\phi_{polea} = 12,22 \text{ mm}$$

$$V_t = 0,10 \frac{m}{s} \text{ (velocidad de impresión recomendada)}$$

Esta velocidad lineal se calcula con la ecuación (26), de aquí se puede despejar el número de revoluciones por minuto N de la polea teniendo en cuenta su diámetro de paso d .

$$V_t = \frac{\pi d N}{60 * 1000} \quad (26)$$

$$N = \frac{V_t * 60000}{\pi d} \quad (42)$$

$$\Rightarrow N = \frac{0,10 * 60000}{\pi * 12,22} = 156,29 \text{ rpm}$$

Del catálogo del motor (Figura 40) se tiene el torque nominal del motor, teniendo en cuenta que el motor debe trabajar al 70% de su potencia nominal para así evitar picos de corrientes que puedan generar corto circuito los drivers que controlan estos. La potencia a la cual trabaja el motor se calcula con la ecuación (43).

$$\Rightarrow T = 0,056(0,70)kg * m = 0,0392 kg * m$$

$$P = \frac{NT}{973,8} \quad (43)$$

$$\Rightarrow P = \frac{0,0392 * 156,29}{973,8} = 0,00629 \text{ kW}$$

$$\Rightarrow P = 6,29 \text{ W}$$

En la Figura 42 se muestra el catálogo de bandas del proveedor. Se seleccionó una banda de 2 mm de paso puesto que son las que generalmente usan las impresoras 3D comerciales ya que estas permiten una mayor precisión en el movimiento de “x” y “y”.

Belt	Belt Width	<i>m</i>	<i>γ</i>	Minimum T_{st} (lbs) Per Span
2 mm GT2	4 mm	0.026	1.37	1.3
	6 mm	0.039	2.05	2.0
	9 mm	0.058	3.08	3.0
	12 mm	0.077	4.10	4.0
3 mm GT2	6 mm	0.077	3.22	2.2
	9 mm	0.120	4.83	3.3
	12 mm	0.150	6.45	4.4
	15 mm	0.190	8.06	5.5
5 mm GT2	9 mm	0.170	14.9	8.4
	15 mm	0.280	24.9	14.1
	20 mm	0.380	33.2	18.7
	25 mm	0.470	41.5	23.4
3 mm HTD	6 mm	0.068	3.81	2.5
	9 mm	0.102	5.71	4.3
	15 mm	0.170	9.52	7.8
5 mm HTD	9 mm	0.163	14.9	6.3
	15 mm	0.272	24.9	12.0
	25 mm	0.453	41.5	21.3
MXL	1/8"	0.003	1.40	1.0
	3/16"	0.004	2.11	1.7
	1/4"	0.005	2.81	2.3
XL	1/4"	0.010	3.30	3.2
	3/8"	0.015	4.94	5.1
T2.5	4 mm		0.3	0.2
	6 mm	*	0.55	0.45
	10 mm		1.05	0.92
T5	6 mm		7	2.25
	10 mm	*	17	5.62
	16 mm		27	8.99
T10	16 mm	*	73	24.73
	25 mm		133	44.96

Figura 42. Catálogo de bandas de sincronización serie GT del proveedor. Tomado de: <https://es.aliexpress.com>, 2017

Para una banda de 9 mm de ancho la potencia entregada por el motor debe garantizar una tensión mínima en la banda, esta tensión se obtiene con la ecuación (30)

$$T_{st} = \frac{1,05 * DQ}{d} + m * S^2 (*) \quad (30)$$

(*) Esta ecuación se encuentra en el sistema inglés debido a que es proporcionada por el fabricante de correas de sincronización y fue obtenida experimentalmente.

Donde:

DQ : torque suministrado ($lb * in$)

d : diámetro de paso de la polea conductora (in)

m : factor de masa

$$S: \frac{\text{velocidad de banda}}{1000} \left(\frac{ft}{min} \right)$$

$$\Rightarrow T_{st} = \frac{1,05 * 3,40 \text{ lb} * in}{0,4811 \text{ in}} + 0,058 * \left(\frac{19,685}{1000} \right)^2$$

$$\Rightarrow T_{st} = 7,42 \text{ lb} = 33 \text{ N}$$

Ahora la potencia necesaria para garantizar por lo menos esta tensión en la banda cuando esté en funcionamiento se obtiene de la ecuación (44).

$$P_{min} = T_{st} * V \quad (44)$$

$$P_{min} = 33 \text{ N} * 0,1 \frac{m}{s} = 3,3 \text{ W}$$

Entonces la potencia mínima que debe suministrar el motor debe ser de $3,3 \text{ W}$, este valor está por debajo del valor de potencia de operación del motor seleccionado que es $6,23 \text{ W}$.

Se usó una relación de transmisión $R = 1$ con $D = d = 20 \text{ mm}$ puesto que la finalidad de las correas es lograr transmitir el movimiento a los ejes coordenados de impresión y no transmitir potencia.

Distancia entre ejes

Se verificó que se cumpliera la ecuación (24) de acuerdo a la relación de transmisión

$$E \geq \frac{(R + 1)d}{2} + d \quad (24)$$

$$\Rightarrow E \geq \frac{(2)(20)}{2} + 20$$

$$\Rightarrow E \geq 40 \text{ mm}$$

$$E_1 = 683 \text{ mm}$$

$$E_2 = 804 \text{ mm}$$

$$E_3 = 310 \text{ mm} \times 2$$

$$E_4 = 387 \text{ mm} \times 2$$

Todas las distancias cumplen con lo planteado en la ecuación (24), se procede a calcular la longitud de la correa.

Longitud de la correa

La longitud primitiva de la correa (L_p) de una transmisión se calcula directamente a partir de la ecuación (25)

$$L_p = 2E + \frac{\pi}{2}(D + d) + \frac{(D - d)}{4E} \quad (25)$$

Se modifica el coeficiente 2, se reemplaza por 1 puesto que las bandas no dan la vuelta entera.

$$L_p = E + \frac{\pi}{2}(40) \quad (45)$$

$$\Rightarrow L_p = \left[683 + \frac{\pi}{2}(40)\right] + \left[804 + \frac{\pi}{2}(40)\right] + \left[2(310) + \frac{\pi}{2}(40)\right] + \left[2(387) + \frac{\pi}{2}(40)\right]$$

$$\Rightarrow L_p = 746 + 867 + 683 + 837$$

$$\Rightarrow L_p = 3,133 \text{ m}$$

Como se necesitan dos correas en el sistema CoreXY

$$\Rightarrow L_T = 3,133 \text{ m} * 2 = 6,3 \text{ m}$$

Las bandas vienen comercialmente en rollos de 10 m abiertas. Entonces la banda seleccionada fue una GT2 de 9 mm de ancho (Figura 43).



Figura 43. Banda de sincronización GT2 9 mm. Fuente: Autor, 2017

3.1.6 Chasis

La ficha técnica proporcionada por el proveedor del perfil seleccionado para el chasis de la máquina se muestra en la Figura 44.



Figura 44. Ficha técnica del perfil 20x20 mm utilizado. Tomado de: <https://www.aliexpress.com/>, 2017

A este elemento se le realizó un estudio estático por medio de análisis de elementos finitos usando el software SolidWorks en su sección sometida a la carga más crítica, esta carga está ubicada donde van acoplados los motores del eje “Z”, estos soportan el peso del montaje de la cama de impresión, más su capacidad máxima de impresión. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 45.

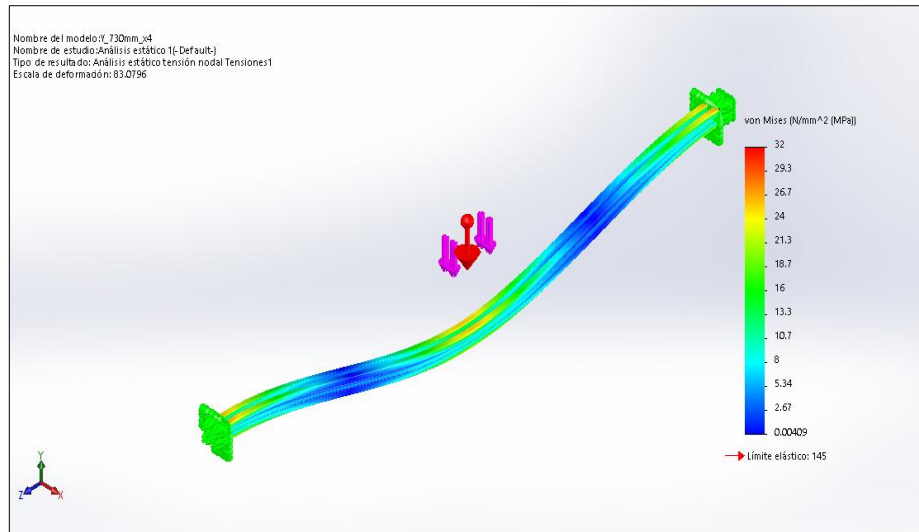


Figura 45. Simulación en SolidWorks de un perfil Bosch Rexroth 20x20 mm con una carga provocada por 20kg de masa. Fuente: Autor, 2017

Como se puede apreciar en la Figura 42 el esfuerzo máximo de Von Mises obtenido es de 32 MPa, este está por debajo del esfuerzo de fluencia del material que es de 145 MPa.

3.1.7 Piezas fabricadas en PLA por impresión 3D

La mayoría de las piezas fabricadas en impresión 3D fueron piezas de soporte para ensamblar varios componentes en conjunto, a estas piezas no fue necesario hacerle análisis de cargas puesto que no están sometidas a esfuerzos significativos. Sin embargo, la pieza más importante fabricada en este material fue el soporte de los motores del eje “Z” (Figura 46).

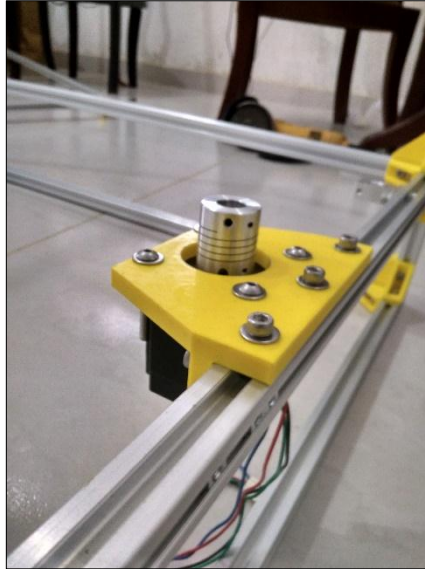


Figura 46. Soporte del motor eje "Z". Fuente: Autor, 2017

Se realizó un análisis de carga en el SolidWorks (Figura 47) y se encontró que su esfuerzo máximo de Von Mises es de $4,62 \text{ MPa}$, esto está por debajo del esfuerzo de fluencia del PLA que está en un rango de $16 - 114 \text{ MPa}$ (MatWeb, 2017).

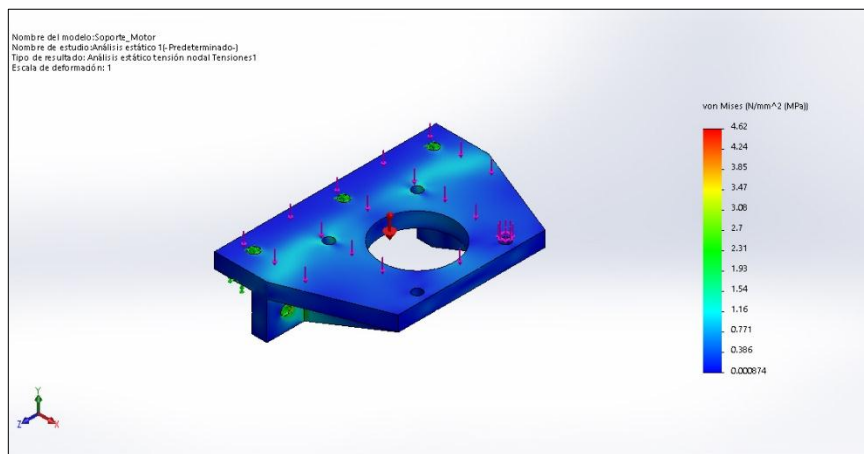


Figura 47. Simulación soportes motor eje "Z" obtenida de SolidWorks. Fuente: Autor, 2017

En la (Figura 48) se muestran las distintas piezas que se fabricaron por medio de impresión 3D para el ensamble de otros componentes de la máquina.



Figura 48. Piezas fabricadas en PLA por impresión 3D. Fuente: Autor, 2017

3.1.8 Selección de la placa Controladora

A continuación, En la (Figura 49) se muestra una comparativa de distintas placas Arduino:

Name	Processor	Operating/Input Voltage	CPU Speed	Analog In/Out	Digital IO/PWM	EEPROM [kB]	SRAM [kB]	Flash [kB]	USB	UART
101	Intel® Curie	3.3 V / 7-12V	32MHz	6/0	14/4	-	24	196	Regular	-
Gemma	ATtiny85	3.3 V / 4-16 V	8 MHz	1/0	3/2	0.5	0.5	8	Micro	0
LilyPad	ATmega168V ATmega328P	2.7-5.5 V / 2.7-5.5 V	8MHz	6/0	14/6	0.512	1	16	-	-
LilyPad SimpleSnap	ATmega328P	2.7-5.5 V / 2.7-5.5 V	8 MHz	4/0	9/4	1	2	32	-	-
LilyPad USB	ATmega32U4	3.3 V / 3.8-5 V	8 MHz	4/0	9/4	1	2.5	32	Micro	-
Mega 2560	ATmega2560	5 V / 7-12 V	16 MHz	16/0	54/15	4	8	256	Regular	4
Micro	ATmega32U4	5 V / 7-12 V	16 MHz	12/0	20/7	1	2.5	32	Micro	1
MKR1000	SAMD21 Cortex-M0+	3.3 V / 5V	48MHz	7/1	8/4	-	32	256	Micro	1
Pro	ATmega168 ATmega328P	3.3 V / 3.35-12 V 5 V / 5-12 V	8 MHz 16 MHz	6/0	14/6	0.512 1	1 2	16 32	-	1
Pro Mini	ATmega328P	3.3 V / 3.35-12 V 5 V / 5-12 V	8 MHz 16 MHz	6/0	14/6	1	2	32	-	1
Uno	ATmega328P	5 V / 7-12 V	16 MHz	6/0	14/6	1	2	32	Regular	1
Zero	ATSAMD21G18	3.3 V / 7-12 V	48 MHz	6/1	14/10	-	32	256	2 Micro	2
Due	ATSAM3X8E	3.3 V / 7-12 V	84 MHz	12/2	54/12	-	96	512	2 Micro	4
Esplora	ATmega32U4	5 V / 7-12 V	16 MHz	-	-	1	2.5	32	Micro	-
Ethernet	ATmega328P	5 V / 7-12 V	16 MHz	6/0	14/4	1	2	32	Regular	-

Figura 49. Comparativa de placas Arduino. Tomada de: <https://www.arduino.cc/en/Products/Compare>, 2017

Como placa controladora se seleccionó un Arduino Mega 2560 R3, se seleccionó la antes mencionada por la gran cantidad de puertos de entradas y salidas tanto analógicas como digitales lo cual la dota de una gran capacidad de expansión y conexión con otros

componentes, puertos con capacidad de salida PWM (pulse-width modulation o modulación por ancho de pulso) para controlar motores y otros componentes electrónicos como resistencias calefactoras lo cual es primordial para el uso que se le dará en este proyecto.

Además de esto se utilizó una shield (Modulo de expansión) que se denomina RAMPS (RepRap Arduino Mega Pololu Shield) (Figura 50) en su versión 1.4 en la cual se integran ya diferentes componentes electrónicos que se necesitan para el control de los demás componentes, en este a su vez se conectaran los drivers que controlaran los motores PAP.

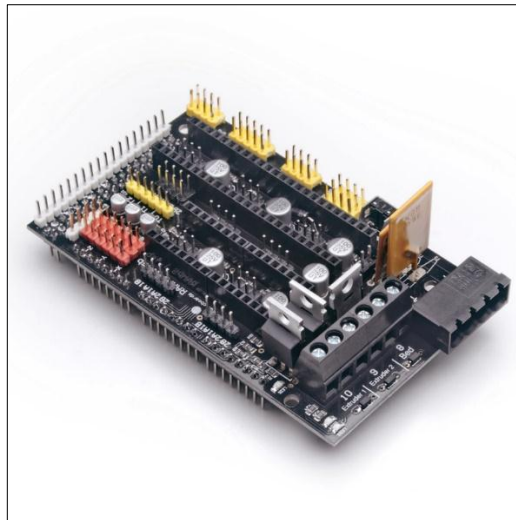


Figura 50. RAMPS 1.4 SB. Tomada de: <https://www.staticboards.es/>, 2017

3.1.9 Selección del Extrusor

Se selecciono un extrusor acorde a la tecnología (FFF) es decir para deposición de material fundido y que alcanzara temperaturas de hasta 260 °C. En el mercado ya hay extrusores que cumplen con este requisito, por ende, se seleccionó el extrusor E3D V6, ya que este tiene la particularidad de poder configurarse tanto para extrusión directa como para extrusión indirecta.

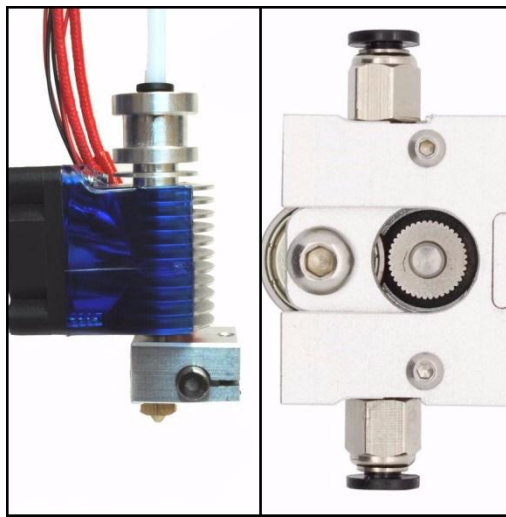


Figura 51. Extrusor E3D V6. Tomada de: <https://e3d-online.com/v6>, 2017

En la máquina se utilizó el modo de extrusión indirecta (Bowden) ya que al no ir montado el motor en el cabezal de impresión el peso de este se reduce haciendo que los motores que impulsan dicho carro necesiten menos torque, otra característica importante de esta configuración es que al no ir montado el motor en el cabezal de impresión se reducen las vibraciones que pueda generar este en su funcionamiento y que puedan afectar negativamente la impresión.

3.1.10 Selección de la resistencia calefactora para la cama

la resistencia calefactora que se selecciono fue una resistencia de silicona flexible de $300 \times 300 \text{ mm}$ a 12 V con una potencia de 280 W la cual es capaz de calentarse hasta los $150 \text{ }^\circ\text{C}$.



Figura 52. Resistencia Calefactora Fuente: Autor, 2017

3.1.11 Selección de los Drivers para el control de los motores paso a paso

En el mercado hay una gran variedad de drivers para controlar motores paso a paso de distintos tamaños y capacidad, en la impresión 3D los más utilizados son los drivers con factor de forma (2x8) es decir dos filas de 8 pines cada una ya que se adaptan fácilmente a proto-boards y a placas de expansión de Arduino. Ya que los motores que se utilizaron para dar movimiento a los ejes “X”, “Y” y al extrusor tienen capacidad nominal de 1.8 Amperios, entonces se seleccionó un driver con esta capacidad de corriente, por este motivo el driver Pololu DVR8825 fue el seleccionado, el cual tiene una capacidad nominal sin disipación de 1.5 Amperios y con refrigeración de hasta 2.2 A y pose la

capacidad de dividir cada paso del motor en hasta 1/32 micro-pasos dando una precisión y suavidad mayor en los movimientos del motor paso a paso. Además de poder conectarse a la RAMPS sin ninguna dificultad dado su factor de forma 2x8.

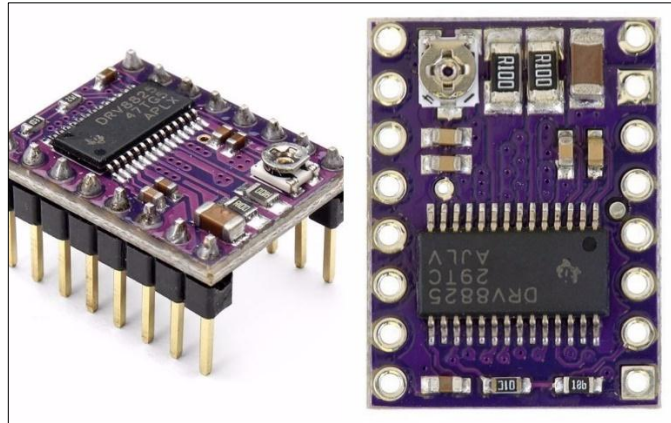


Figura 53. Driver Pololu DVR8825 Tomado de: <https://www.pololu.com/product/2133>, 2017.

Para los motores del eje “Z” que son de una capacidad mayor, por encima de los 2.2A y los cuales van a trabajar sometidos al peso de la cama y de la pieza que se esté imprimiendo sobre ella, se seleccionó el driver Toshiba TB6600 el cual cuenta con una capacidad nominal de 4.5 A soportando picos de corriente de hasta 6 A. éste cuenta a su vez con capacidad de dividir un paso del motor en hasta 1/16 micro-pasos. Ya que éste drivers no tiene factor de forma 2x8 tienen que ser conectado por medio de cables en los que en un extremo se le fue soldado pines para introducirse en el puerto hembra de la RAMPS y el otro extremo se conectó al borne del driver.

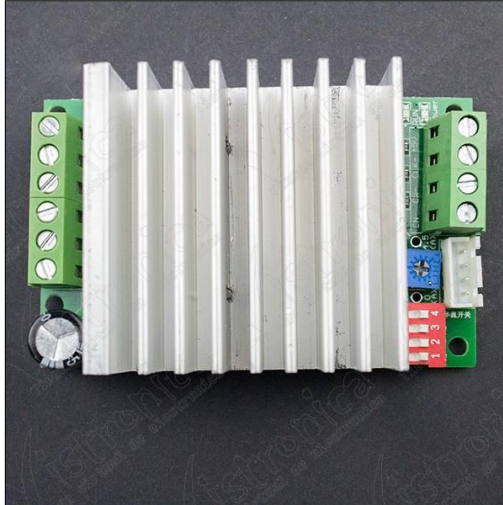


Figura 54. Driver Toshiba TB6600 Tomado de: <https://www.vistronica.com>, 2017

3.1.12 Selección Finales de carrera

Los finales de carrera son los que le dan un punto de referencia a la máquina por tanto estos deben contar con la mayor precisión de censado posible ya que si se quiere reanudar una impresión y este punto de referencia se ve alterado habrá un desfase de las capas, por este motivo se optó por usar finales de carrera ópticos que no tuviesen ningún componente mecánico el cual se puede desgastar con el tiempo e ir perdiendo precisión. El sensor que se utilizó para este propósito fue el TCST2103 para los ejes “X” y “Y”.



Figura 55. Sensor Óptico TCST2103 Fuente: Autor, 2017

Al tener un área de impresión tan grande es muy difícil hacer una nivelación de manera manual de la cama, por este motivo se utilizó un sensor capacitivo montado en el carro o cabezal de impresión que hiciera un censado en diferentes puntos de la superficie de la cama y hacer una auto nivelación de esta, el sensor q se utilizo fue el LJC18A3-H-Z/BX el cual cuenta con una distancia de detección de 1 a 10mm.



Figura 56. Sensor Capacitivo LJC18A3-H-Z/BX Fuente: Autor, 2017

3.1.13 Selección de Pantalla

La pantalla seleccionada fue la RepRap Discount full graphic smart controller ya que esta cuenta con un puerto de tarjeta SD en la parte posterior y tiene compatibilidad completa con la placa seleccionada, aparte de esto cuenta con un botón para paradas de emergencia en la parte frontal, así como un dial para controlar todos los parámetros de la impresora.



Figura 57. Pantalla RepRap Discount full graphic smart controller. Tomado de: <http://www.reprapdiscount.com/>, 2017

3.1.14 Selección de la Fuente de Alimentación

Como todos los componentes electrónicos fueron cuidadosamente seleccionados para que fuesen compatibles entre si y que a su vez todos funcionaran en un rango de 6 a 12V para facilitar su alimentación y así contar con una sola fuente de alimentación; para seleccionar la potencia eléctrica de esta fuente, se calculó la potencia de cada uno de los

componentes electrónicos con los valores nominales proporcionados por los fabricantes, así tenemos que según la ecuación (31):

Para los motores de los ejes “X”, “Y” y el Extrusor:

$$P = (2,8 V) \times (1.68 A) = (4,703 W) \times (3 Motores) = 14,112 W$$

Para los Motores del eje Z

$$P = (24 V) \times (2,5 A) = (60 W) \times (2 Motores) = 120 W$$

Para la resistencia calefactora el fabricante ya proporciona la potencia que consume esta que es de 280W al igual que para el extrusor que es de 40W.

Dado que los demás componentes electrónicos trabajan en el orden de los mA los cuales sumados no llegan a consumir (3A a 12V) por tanto se asume un consumo energético de 30W entonces se tiene que:

$$P_{Total} = (14,112 W) + (120 W) + (280 W) + (40 W) + (30 W) = 484.112 W$$

Entonces la fuente de alimentación para todo el conjunto de componentes electrónicos debe ser de una potencia mínima de 500W, comercialmente en el mercado colombiano las fuentes conmutadas con esta capacidad son las utilizadas para computadores de alto desempeño, estas cuentan con una certificación 80 Plus la cual garantiza su eficiencia energética; la fuente comercial que se selecciono fue la Termaltake Smart series 600W.

Se optó por esta fuente de una potencia mayor ya que algunos componentes cuando se ven sometidos a carga como los motores en el arranque para vencer la inercia tienen picos de corriente, por lo cual para no sufrir pérdida de potencia y tener un margen de seguridad se seleccionó esta fuente de 600W.



Figura 58. Fuente Thermaltake Smart 600W Tomado de: <http://www.thermaltake.com/>, 2017

3.1.15 Selección del Firmware

Actualmente hay varios firmwares capaces de controlar una impresora 3D, la mayoría de estos se basan en el código de GRBL un proyecto de código abierto que nació para el control de máquinas CNC en general. se tomó como base Marlin un fork de este código para el control de la impresora 3D el cual es fácil de adaptar a las características de la máquina y posee ya toda la implementación para el control de los motores, extrusor y la resistencia calefactora y se puede utilizar en placas Arduino. Esto ahorró tiempo a la hora de programar la impresora 3D. La versión del código fuente utilizado fue la 1.1.4 que era la más actual en el momento del ensamblaje de la máquina.

3.2 CONSTRUCCIÓN DE LA MÁQUINA DE IMPRESIÓN 3D

Para la construcción de la impresora 3D primero se armó el chasis puesto que todos los componentes de la máquina van montados sobre este, se obtuvieron los perfiles Bosch 20x20 mm cortados directamente del proveedor. Como el diseño de la máquina es totalmente modular se roscaron los extremos de los perfiles con un machuelo M6 (Figura 59).



Figura 59. Proceso de roscado de los perfiles del chasis. Fuente: Autor, 2017

Se taladraron agujeros marcados de acuerdo a los planos con una broca M6 para poder apretar con una llave Allen los tornillos con los perfiles para la estructura del chasis (Figura 60).

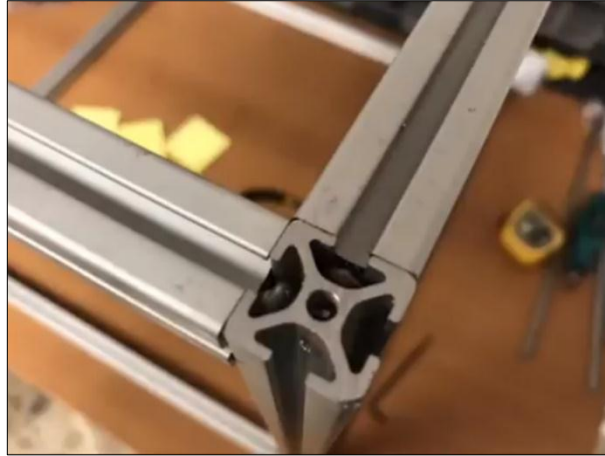


Figura 60. Armado de chasis modular. Fuente: Autor, 2017

Todos los componentes montados sobre el chasis se fijaron con tuercas T-Nuts especiales para este perfil que permiten montar de manera sencilla componentes sobre el chasis y fijarlos con tornillos como se muestra en la (Figura 61).

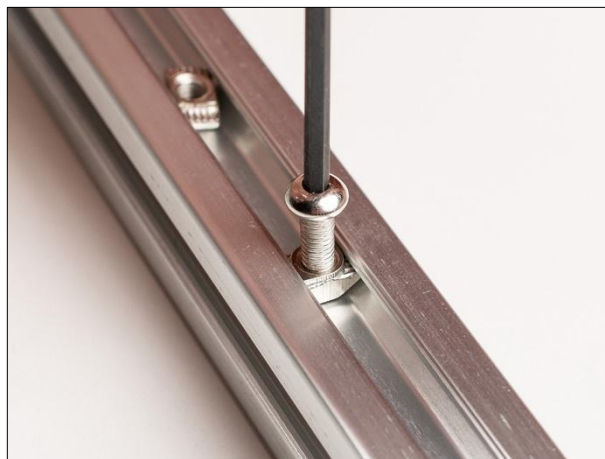


Figura 61. Tuercas T-Nuts. Fuente: Autor, 2017

Se inició el montaje de componentes con piezas fabricadas con impresión 3D como fueron las esquinas para reforzar el chasis y los soportes de los motores del eje “Z”, asegurando que estos quedaran totalmente alineados (Figura 62).



Figura 62. Montaje de refuerzos de chasis y soporte de motores eje "Z". Fuente: Autor, 2017

Luego se montaron los dos ejes guías del eje "Z" de 12 *mm* de diámetro a cada lado con sus cojinetes lineales de bolas verificando que quedaran totalmente alineados (Figura 63).



Figura 63. Montaje ejes guías "Z". Fuente: Autor, 2017

De igual forma que el chasis se ensambló el soporte de la cama de impresión y se montó esta con tornillos de sujeción (Figura 64)



Figura 64. Ensamble cama de impresión. Fuente: Autor, 2017

Se acoplaron los tornillos de potencia a los motores del eje “Z” y se procedió a acoplar el ensamble de la cama de impresión de la máquina (Figura 65), seguidamente de manera manual se nivelaron los dos tornillos de potencia con ayuda de un nivel de burbuja puesto en la cama de impresión. Así quedó finalizado el montaje del eje “Z” de la máquina.



Figura 65. Montaje de la cama de impresión al eje "Z". Fuente: Autor, 2017

Se montó el sistema CoreXY ensamblando los ejes, rodamientos y soportes con las piezas fabricadas en PLA, todo sujetado con tornillos de sujeción para su fácil mantenimiento y reemplazo de piezas (Figura 66).

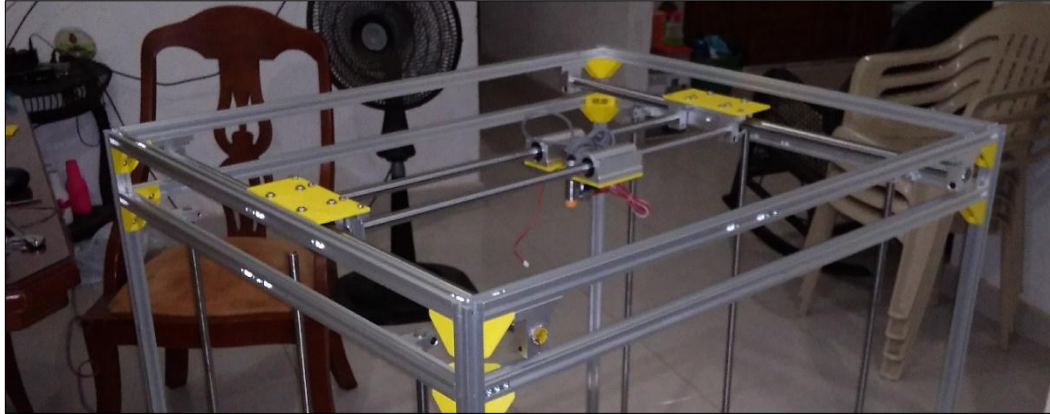


Figura 66. Montaje sistema CoreXY. Fuente: Autor, 2017

Se montaron los motores que mueven el sistema CoreXY y el sistema de transmisión por poleas y correas de sincronización verificando que las correas quedaran tensadas (Figura 67).

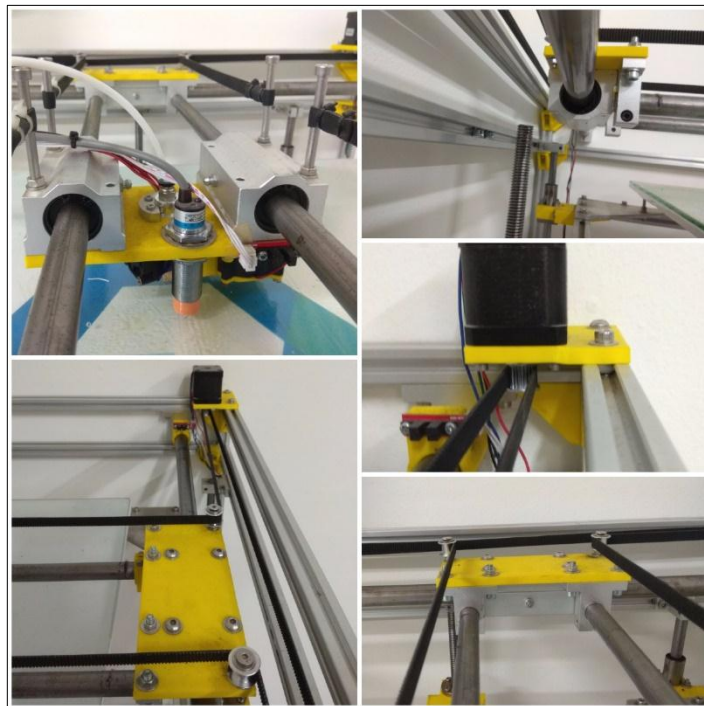


Figura 67. Montaje de sistema de transmisión de movimiento CoreXY. Fuente: Autor, 2017

Luego de tener todo el montaje mecánico finalizado se realizó la instalación electrónica de la máquina; conectando motores, extrusor, pantalla, resistencia calefactora y drivers a la RAMPS y esta a su vez al Arduino.

Luego de verificar que todo estuviese correctamente conectado se procedió a cargar el firmware adaptado a las características de la máquina.

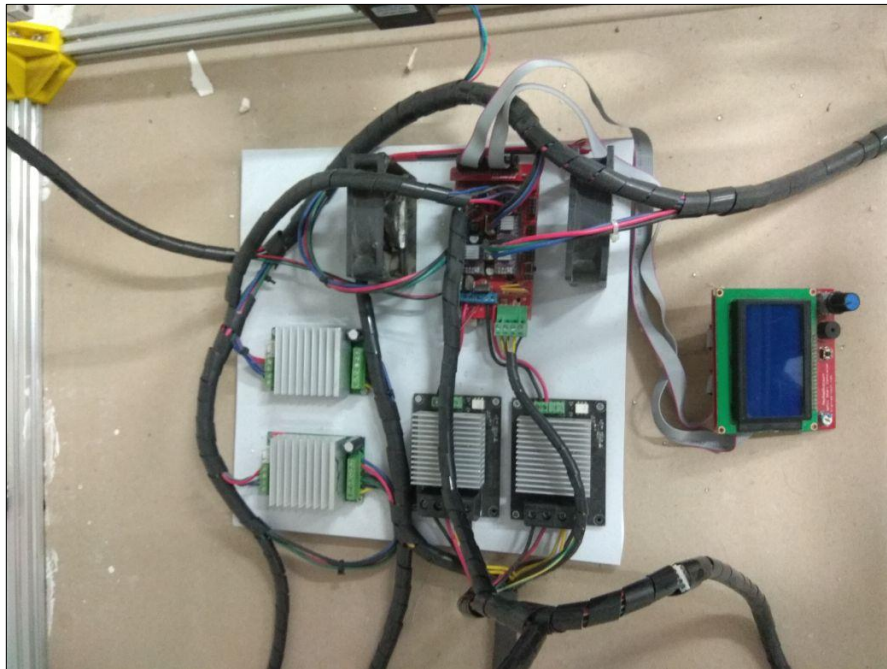


Figura 68. Instalación electrónica de la máquina. Fuente: Autor, 2017

En la (Figura 69) se muestra la máquina de impresión 3D terminada.

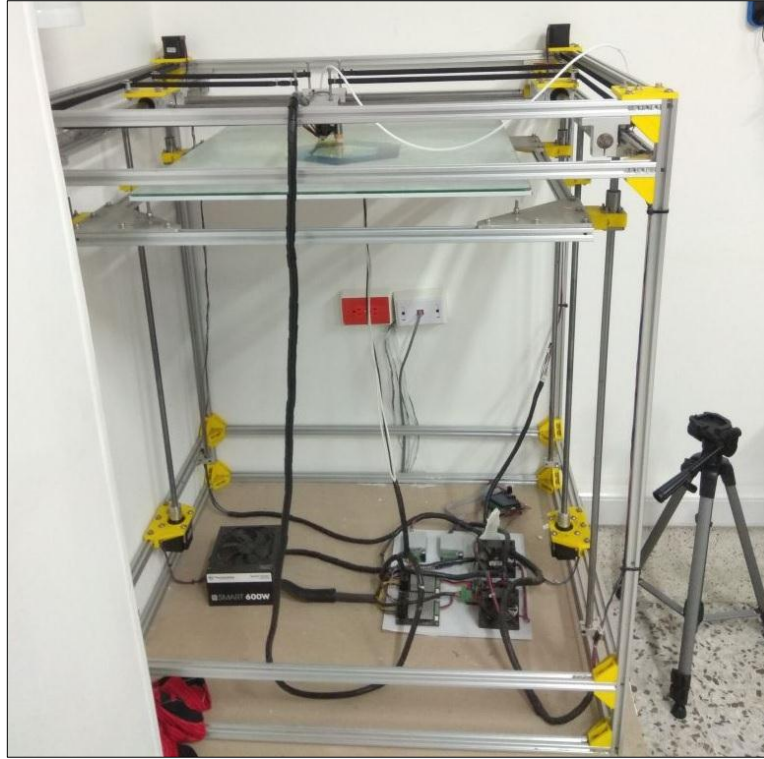

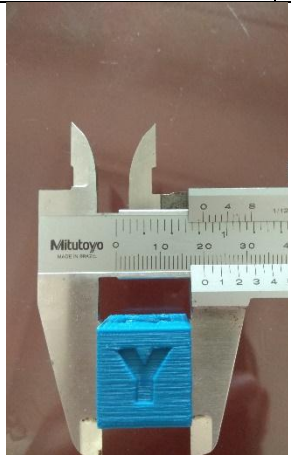
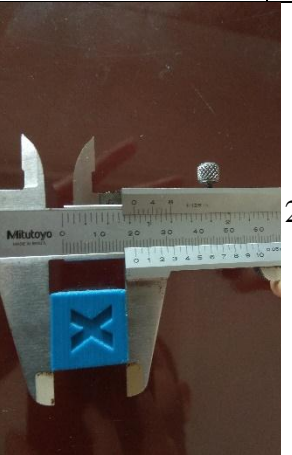
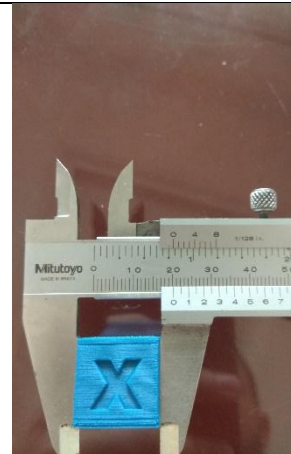

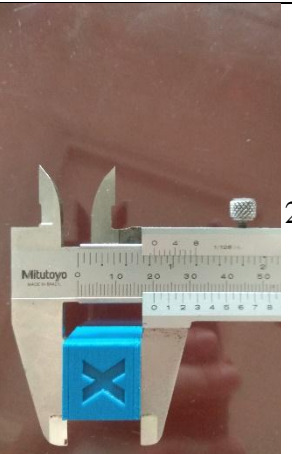


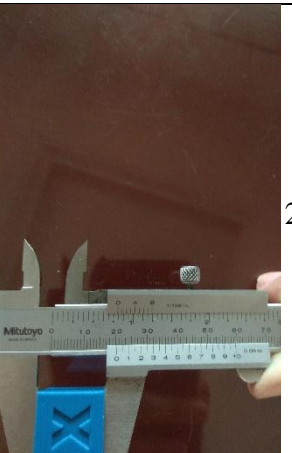


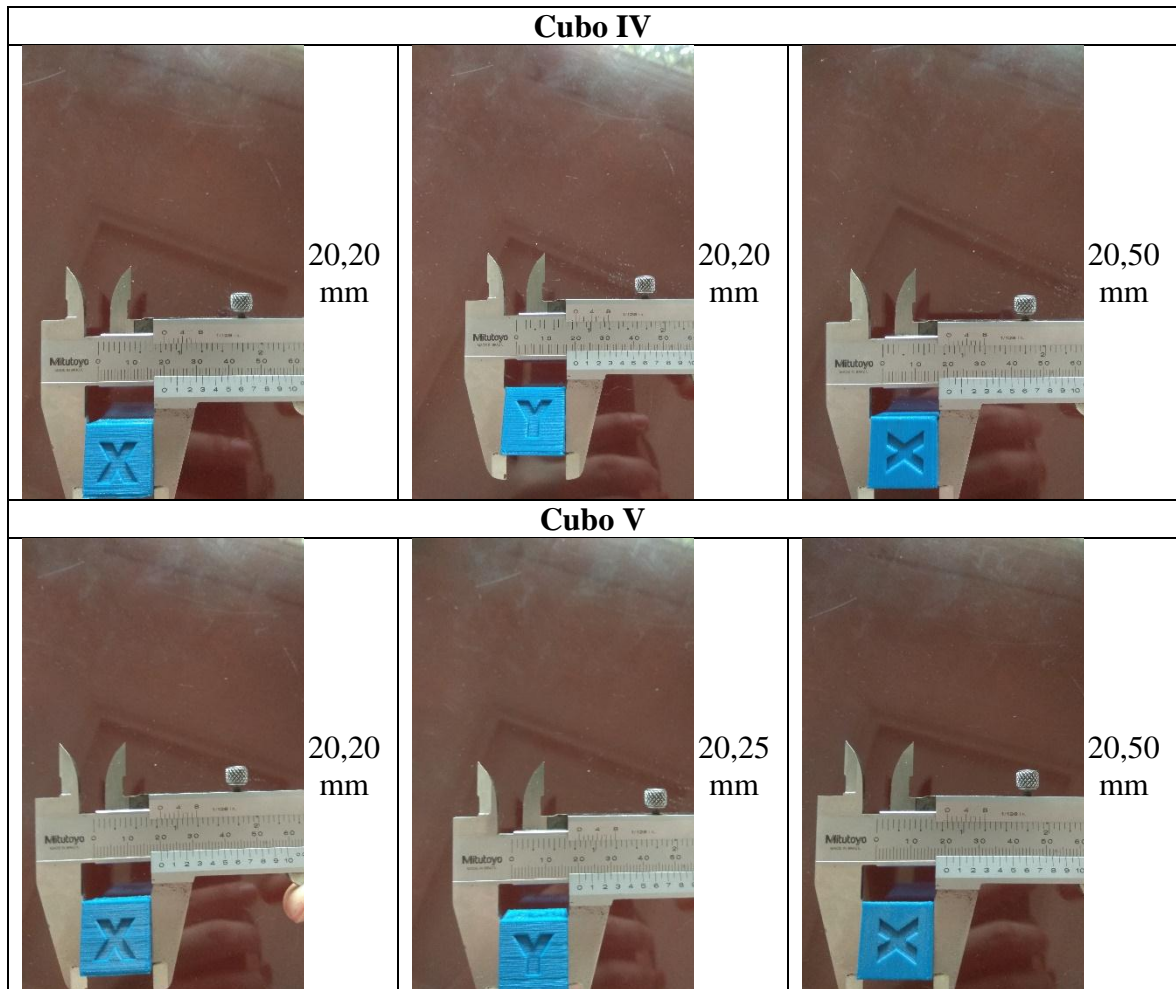
Figura 69. Impresora 3D terminada. Fuente: Autor, 2017

3.3 VALIDACIÓN DE LA MÁQUINA DE IMPRESIÓN 3D

Para la validación de la impresora 3D de gran formato se hizo la impresión de 5 cubos de $20 \times 20 \times 20 \text{ mm}$ y medir todos sus lados para verificar que estos tuviesen una tolerancia promedio en sus medidas de por lo menos $\pm 0,5 \text{ mm}$ como se estableció en el **capítulo 2.4**. Los resultados de estas mediciones se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultados de la medición para la validación de la máquina

VALIDACIÓN DE LA IMPRESORA 3D					
Cubo I					
Eje X	Medi da	Eje Y	Medi da	Eje Z	Medi da
	20,05 mm		20,05 mm		20,40 mm
Cubo II					
	20,20 mm		20,25 mm		20,40 mm
Cubo III					
	20,10 mm		20,25 mm		20,40 mm



Fuente: Autor, 2017

En la Tabla 12 se muestran las medidas promedio obtenidas para cada eje de la máquina de impresión 3D.

Tabla 12. Medidas promedio obtenida en cada eje de coordenadas de la impresora 3D

MEDIDA PROMEDIO	MEDIDA PROMEDIO	MEDIDA PROMEDIO
EJE X	EJE Y	EJE Z
20,15 mm	20,20 mm	20,44 mm

Fuente: Autor, 2017

Teniendo en cuenta que el eje Z fue el que obtuvo la medida más alejada de la medida nominal en la validación ($20,44\text{ mm}$), entonces la tolerancia dimensional de los productos modelados por esta impresora 3D es de $\pm 0,44\text{ mm}$, esta tolerancia está un 12% por debajo de los $\pm 0,5\text{ mm}$ planteados para la validación de la máquina.

Cabe resaltar que esta tolerancia está influenciada varios factores, en el “Z” se encontró que el sensor autolevel utilizado se ve afectado por la temperatura, esto se puede resolver utilizando un sensor autolevel BL Touch que censa la distancia de la cama de impresión por contacto. En los ejes “X” y “Y” se observa que el montaje CoreXY utilizado genera un desgaste prematuro de las correas por lo que requieren de un mantenimiento programado (tensado y reemplazo) este inconveniente se puede solucionar haciendo un rediseño de este sistema poniendo las poleas a dos niveles para que las correas no se crucen y evitar este desgaste. Con esto se espera que la tolerancia dimensional de los productos obtenidos de la máquina se reduzca aún más.

4. CONCLUSIONES

Se determinaron los parámetros y componentes para el diseño y construcción de una impresora 3D de gran formato con un volumen máximo de impresión de $0,16 m^3$.

Se seleccionaron los distintos componentes electrónicos y se programó el firmware que permite controlar la máquina.

Se diseñó y construyó una impresora 3D de gran formato con tecnología FFF basada en Arduino con una capacidad nominal de impresión de $0,15 m^3$ que permite obtener impresiones con una tolerancia dimensional de $\pm 0.44 mm$. Cumpliendo así con los requisitos que en un principio fueron requeridos por la empresa 3Deam.

La máquina es totalmente modular lo que le permite tener un mantenimiento sencillo y fácil montaje y desmontaje de sus elementos. Se elaboraron manuales de operación y mantenimiento teniendo en cuenta el funcionamiento del equipo, las medidas de seguridad y criterios para su buen uso

5. RECOMENDACIONES

Las recomendaciones para los futuros proyectos relacionados con el diseño y construcción de impresoras 3D industriales o de gran formato que basen su funcionamiento en tecnología FFF y su control sea a través de Arduino son las siguientes:

- 1) La utilización de sensor de contacto tipo BLTouch para mayor precisión a la hora de hacer el auto nivelado de la cama ya que este no se ve afectado por la temperatura de la cama.
- 2) La utilización de finales de carrera con lógica NC (Normalmente Cerrada) ya que estos pueden actuar como dispositivos de seguridad, puesto que al desconectarse o dañarse un final de carrera de este tipo la máquina se para automáticamente.
- 3) Si la máquina supera los 500 *mm* de altura se recomienda utilizar perfiles de una sección transversal mayor a 20x20 *mm* para evitar desestabilización de la máquina.
- 4) La utilización de resistencias de silicona que funcionen con corriente alterna a 110 o 220V y un relé de estado sólido para el control de esta ya que calentara mucho más rápido reduciendo así los tiempos de precalentamiento.
- 5) La disposición de las correas para el sistema de transmisión de movimiento sea totalmente a dos niveles para evitar el deterioro prematuro de las correas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- **3D printing industry.** (11 de Abril de 2017). Obtenido de <http://www.3dprintingindustry.com/>
- **3D Printing industry.** (19 de Mayo de 2017). Obtenido de <http://3dprintingindustry.com/>
- **3D printing.com.** (11 de Abril de 2017). Obtenido de <https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/#fff>
- **3D Systems.** (11 de Abril de 2017). Obtenido de <https://es.3dsystems.com/press-releases/3d-systems-acquires-bespoke-innovations>
- **A brief history of 3D printing .** (10 de Abril de 2017). Obtenido de https://individual.troweprice.com/staticFiles/Retail/Shared/PDFs/3D_Printing_Infographic_FINAL.pdf
- **arduino, A.** (21 de Mayo de 2017). Obtenido de Aprendiendo arduino: <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/category/software/>
- **Arduino.cl.** (21 de Mayo de 2017). Obtenido de <http://arduino.cl/arduino-mega-2560/>
- **Beer P. Ferdinand, J. R.** (2010). Mecánica de materiales. Mc Graw Hill.
- **Bloomberg.** (11 de Abril de 2017). Obtenido de Bloomberg: <https://www.bloomberg.com/research/stocks/private/snapshot.asp?privcapId=127137087>

- **Boik, J.** (2004). Lessons from the Greatest Stock Traders of All Time. McGraw-Hill Professional.
- **Cockrell School of engineering.** (11 de Abril de 2017). Obtenido de <http://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry>
- **Diosdado, R.** (23 de 04 de 2017). Zona Maker. Obtenido de <https://www.zonamaker.com>
- **Dominguez, Romero, & Espinosa.** (2013). Impresión 3D de maquetas y prototipos en arquitectura y construcción. Revista de la Construcción.
- **E. M., & D. M.** (2007). Ingeniería. Madrid: AIDA.
- **Engineering.** (17 de Agosto de 2017). Obtenido de Engineering.com Inc: <http://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/9869/Looking-to-3D-Print-a-Large-Hi-Res-Plastic-Model-Consider-the-Fortus-900mc.aspx>
- **Extruder Options.** (19 de Mayo de 2017). Obtenido de http://www.reprap.org/wiki/RepRap_Options#Extruder
- **Fab@Home.** (19 de Mayo de 2017). Obtenido de <http://www.fabathome.org/>
- **G. A., & E. M.** (2013). Avances en. DYNA, 286-290.
- **G. J., & D. V.** (2002). Architectural scale modeling using stereolithography. Rapid Prototyping J.

- **G. M., K. A., R. F., & V. B.** (2002). Rapid prototyping for mechatronic. Mechatronics.
- **Hubs, 3.** (19 de Mayo de 2017). 3D Hubs. Obtenido de 3D Hubs: <http://3dprinterhub.com/>
- **Ian Gibson, D. R.** (2017). Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. London: Springer.
- **IMPRESORAS.** (10 de Abril de 2017). Obtenido de IMPRESORAS: <http://www.3dimpresoras3d.com/pros-y-contras-impresion-3d/>
- **Impresoras 3D.com.** (19 de Mayo de 2017). Obtenido de <https://impresoras3d.com/blogs/noticias/102837127-abs-y-pla-diferencias-ventajas-y-desventajas>
- **Ingeniería mecánica.** (2017 de 04 de 2017). Obtenido de ingenieriamecanica.com: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn131.html#seccion33>
- **MakerBot.** (2017 de Agosto de 2017). Obtenido de Store MakerBot: <https://store.makerbot.com/printers/replicator/>
- **MatWeb.** (12 de Marzo de 2017). MatWeb. Obtenido de <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab96a4c0655c4018a8785ac4031b9278&ckck=1>

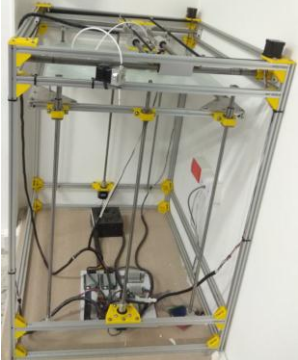
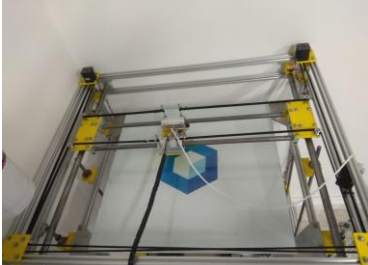


- **New Scientist.** (19 de Mayo de 2017). Obtenido de <https://www.newscientist.com/article/dn10922-desktop-fabricator-may-kick-start-home-revolution/>
- **Ojeda, L. T.** (25 de Septiembre de 2017). <http://arduino.cl>. Obtenido de <http://arduino.cl/que-es-arduino/>
- **Open future.** (19 de Mayo de 2017). Obtenido de <https://www.openfuture.org/es/new/que-tipos-de-impresion-3d-existen>
- **Pearson, J.** (17 de Agosto de 2017). MakerBot Just Laid Off 20 Percent of Its Staff. Obtenido de MakerBot Just Laid Off 20 Percent of Its Staff: https://motherboard.vice.com/en_us/article/8qx7ng/makerbot-just-laid-off-20-percent-of-its-staff
- **Redshift.** (11 de Abril de 2017). Obtenido de Redshift: <https://redshift.autodesk.com/history-of-3d-printing/>
- **RepRap.** (11 de Abril de 2017). Obtenido de <http://www.reprap.org/>
- **RepRap.** (19 de Mayo de 2017). Obtenido de <http://reprap.org/wiki/Category:Extruders>
- **Richard G. Budynas, J. K.** (2012). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. Mc Graw Hill.
- **Salud180.** (11 de Abril de 2017). Obtenido de <http://www.salud180.com/adultos-mayores/imprimen-mandibula-en-3d>

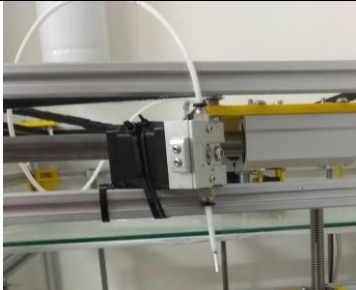
- **Sandglass Patrol.** (11 de Abril de 2017). Obtenido de <http://blog.sandglasspatrol.com/index.php/noticias/31-general/1000-vuela-el-primer-avion-impreso-con-una-impresora-3d>
- **SKF.** (Abril de 2014). Linear bearing and units. Linear bearing and units.
- **Solidforum.** (19 de Mayo de 2017). Obtenido de <http://www.soliforum.com/>
- **The Free Dictionary.** (10 de Abril de 2017). Obtenido de <http://es.thefreedictionary.com/imprimir>
- **The rise of additive manufacturing.** (19 de Mayo de 2017). Obtenido de <https://www.theengineer.co.uk/issues/24-may-2010/the-rise-of-additive-manufacturing/>
- **Thierry, R., & Ludmila, S.** (2015). From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. ELSEVIER, 214-224.
- **Thingiverse.** (20 de Mayo de 2017). Obtenido de Thingiverse: <https://www.thingiverse.com/>
- **Tomorrow, A.** (19 de Mayo de 2017). Obtenido de Aumented Tomorrow: <http://augmentedtomorrow.com/9-benefits-3d-printing/>
- **Trimaker.** (23 de 02 de 2017). Trimaker. Obtenido de <https://trimaker.com/consejos-imprimir-3d-velocidad/>
- **Ultimaker B.V.** (17 de Agosto de 2017). Obtenido de <https://ultimaker.com/en/about-ultimaker>

- **Wikipedia.** (11 de Abril de 2017). Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Modelado_por_deposici%C3%B3n_fundida
- **Wikipedia.** (11 de Abril de 2017). Obtenido de <https://en.wikipedia.org/wiki/MakerBot>
- **William F. Smith, J. H.** (2006). Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales 4 edición . México, D.F.: Mac Graw Hill.

7. ANEXOS

7.1 A1. MANUAL DE OPERACIÓN

No.	Consideraciones	
1	Comprobar que la superficie donde se va instalar la máquina este nivelada, de lo contrario el funcionamiento y calidad de impresión se verán afectados	
2	Verificar la tensión de las correas, ya que las correas demasiado flojas harán imprecisa la máquina y demasiado tensas harán que estas mismas tengan un desgaste prematuro	
3	Verifique que la máquina este en posición de apagado	
4	Verificar que la boquilla del extrusor no esté rosando con la superficie de la cama	


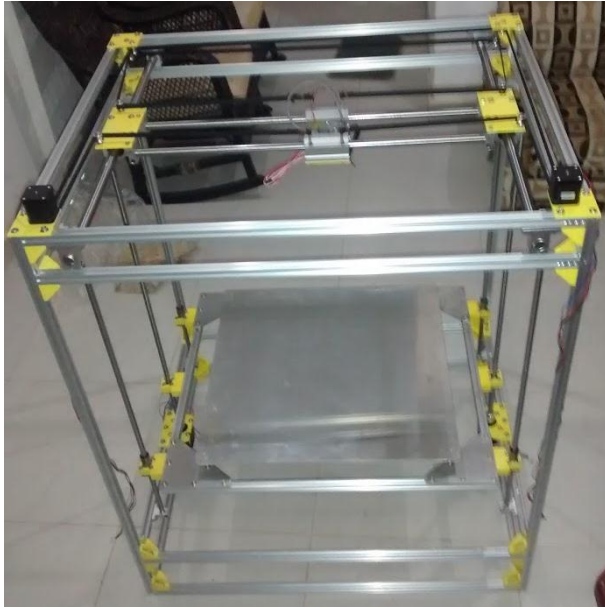
5	Verificar que la máquina se encuentre conectada a una fuente eléctrica de 110V	
6	Encienda la máquina	
7	Realice una calibración del offset de Z mediante el menú "motion" en la pantalla de la impresora guarde la configuración en el menú "storage settings"	
8	Mediante el menú prepare haga un precalentamiento del extrusor	
9	Inserte el filamento en el extrusor	
10	Inserte la tarjeta SD en la parte posterior de la pantalla y seleccione el archivo que desea imprimir	
11	Después de finalizar la impresión apague la máquina	

7.2 A2. MANUAL DE MANTENIMIENTO

Para garantizar el buen funcionamiento y vida prolongada de la máquina, se debe seguir un mantenimiento adecuado en este caso será un mantenimiento por operación el cual consiste en:

- Revisar la conexión eléctrica, que ningún cable se encuentre en mal estado o expuesto lo cual puede ocasionar corto circuitos.
- Evitar que la boquilla de impresión se encuentre en contacto con la superficie de la cama.
- Después de cada impresión retire todo el material sobrante de la cama.
- Después de utilizar la impresora realice un limpiado y aceitado de los ejes y tornillos de potencia con aceite WD40.
- Verifique la tensión de las correas, debido al uso pierden tensión
- Verifique que la cama este correctamente nivelada, ya que si esta no se encuentra a nivel los tornillos de potencia sufrirán un desgaste prematuro.

7.3 A3. FICHA TÉCNICA

	FICHA TÉCNICA DEL EQUIPO						
	IMPRESORA 3D DE GRAN FORMATO						
DESCRIPCIÓN	Impresora 3D de gran formato basada en Arduino la cual es capaz de imprimir piezas con materiales como el PLA, ABS, PETG						
CARACTERÍSTICAS GENERALES							
Peso	70Kg	Alto	1.2 m	Ancho	0,92 m	Largo	0,77 m
FOTO DEL				EQUIPO			
							
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS:							
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Materiales: Acero Inoxidable 304, Acero Plata DIN 1.2210, Aleación de Aluminio 1060, Aleación de Aluminio 6063T5, PLA. ➤ Volumen de Impresión Nominal: 550x380x700 mm ➤ Velocidad máxima de impresión: 120 mm/s ➤ Sistema de transmisión de potencia: Polea-Correa, Tornillos de Potencia ➤ Peso máximo de volumen de impresión nominal: 30 kg ➤ Alimentación eléctrica: 110V~220V ➤ Temperatura máxima para el extrusor: 260 °C ➤ Temperatura Máxima para la Cama: 100 °C 							

7.4 A4. COSTO DEL PROYECTO

Componente	Precio	Cantidad	Total
Motores Paso a Paso	\$ 56,000.00	5	\$ 280,000.00
Extrusor	\$ 120,000.00	1	\$ 120,000.00
Electrónica	\$ 1,000,000.00	1	\$ 1,000,000.00
Ejes	\$ 50,000.00	8	\$ 400,000.00
Tornillo de potencia	\$ 180,000.00	2	\$ 360,000.00
Rodamientos	\$ 20,000.00	8	\$ 160,000.00
Perfiles	\$ 60,000.00	20	\$ 1,200,000.00
Correas	\$ 20,000.00	9	\$ 180,000.00
Tornillos de sujeción	\$ 100,000.00	1	\$ 100,000.00
Gastos de envío	\$ 350,000.00	1	\$ 350,000.00
Imprevistos	\$ 450,000.00	1	\$ 450,000.00
Diseño y Ensamble	\$ 4,500,000.00	1	\$ 4,500,000.00
		Total	\$ 9,100,000.00