



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA  
Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA  
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
MECATRÓNICA**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA  
IMPRESORA 3D CON IMPRESIÓN DE SOPORTE  
EN AMBIENTE CONTROLADO.**

**AUTORES: CARABALÍ FARINANGO, EDUARDO  
LUIS**

**CORAL SALINAS, EDISSON STALIN**

**DIRECTOR: MSc. LOZA MATOVELLE, DAVID  
CÉSAR**

**SANGOLQUÍ**

**2016**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE****CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA****CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D CON IMPRESIÓN DE SOPORTE EN AMBIENTE CONTROLADO**” realizado por: EDISSON STALIN CORAL SALINAS y EDUARDO LUIS CARABALÍ FARINANGO ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores: EDISSON STALIN CORAL SALINAS y EDUARDO LUIS CARABALÍ FARINANGO para que lo sustenten públicamente.

**Sangolquí, 20 de junio del 2016**

Atentamente,



MSc. David Loza Matovelle

**DIRECTOR**

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE****CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA****AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Nosotros, EDISSON STALIN CORAL SALINAS, con cédula de identidad N° 1718428368 y EDUARDO LUIS CARABALÍ FARINANGO, con cédula de identidad N° 1715822167 declaramos que el trabajo de titulación **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D CON IMPRESIÓN DE SOPORTE EN AMBIENTE CONTROLADO”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

**Sangolquí, 20 de junio del 2016**



---

Edisson Stalin Coral Salinas

CI: 1718428368



---

Eduardo Luis Carabalí Farinango

CI: 1715822167

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE****CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA****AUTORIZACIÓN**

Nosotros, **EDISSON STALIN CORAL SALINAS** y **EDUARDO LUIS CARABALÍ FARINANGO**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA IMPRESORA 3D CON IMPRESIÓN DE SOPORTE EN AMBIENTE CONTROLADO**” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

**Sangolquí, 20 de junio del 2016**



---

Edisson Stalin Coral Salinas

CI: 1718428368



---

Eduardo Luis Carabalí Farinango

CI: 1715822167

Dedicado a nuestras familias

**Eduardo y Edison**

# Agradecimientos

Varias han sido las personas quienes directa o indirectamente han colaboraron con la realización del presente proyecto. En primer lugar, agradecemos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por habernos permitido culminar nuestra carrera en sus prestigiosas instalaciones, siendo parte de la misma el grupo de docentes quienes nos han brindado sus conocimientos y han sido una guía fundamental para nuestro desarrollo como futuros ingenieros en Mecatrónica.

También queremos dar gracias a todos nuestros compañeros y amigos con quienes de una u otra forma nos hemos apoyado a lo largo de la carrera. Juntos vivimos grandes y gratas experiencias.

Particularmente queremos agradecer a nuestro tutor MSc. David Loza, por guiar y supervisar todo el desarrollo del proyecto de titulación.

Finalmente un agradecimiento muy especial y con mucho cariño a nuestras familias, por todo su incondicional apoyo, tanto moral como económico, ya que nuestro logro también es el suyo.

Sin el apoyo de las personas antes mencionadas e desarrollo de nuestro proyecto de titulación, y en general de nuestra carrera no habría sido tan agradable y próspero.

**Eduardo y Edison**

## Contenido

Capítulo 1 .....	1
Introducción.....	1
1.1.    Motivación y problemática .....	1
1.1.2.    Motivación .....	1
1.1.2.    Problemática .....	2
1.2.    Antecedentes .....	3
1.2.1.    Origen de la impresión 3D .....	3
1.3.    Justificación e importancia .....	5
1.4.    Objetivos .....	6
1.4.1.    Objetivo general.....	6
1.4.2.    Objetivos específicos.....	6
1.5.    Alcance del proyecto.....	6
1.6.    Estructura del documento .....	7
Capítulo 2 .....	10
Estado del arte .....	10
2.1.    Introducción al prototipado rápido. ....	10
2.2.    Pasos generales en el proceso de prototipado rápido. ....	11
2.3.    Tecnologías de prototipado rápido más difundidas. ....	14
2.3.1.    Estereolitografía (SLA).....	15
2.3.2.    Fotopolimerización por luz UV (SGC).....	16
2.3.3.    Fabricación por corte y laminado (LOM). ....	17
2.3.4.    Tecnología de laminación con papel (PLT).....	19
2.3.5.    Sinterización selectiva láser (SLS). ....	20
2.3.6.    Proyección por aglutinante (3DP). ....	22
2.4.    Deposición de hilo fundido (FDM). ....	23
2.4.1.    Ventajas de la tecnología FDM .....	24
2.4.2.    Estructuras más empleadas para impresión con tecnología FDM.....	24
2.4.2.1. Impresoras 3D estructura robot cartesiano.....	25
2.4.2.2. Impresoras 3D estructura robot delta. ....	26
2.4.2.3. Impresoras 3D estructura polar Theta. ....	27
2.4.3.    Proceso de producción con tecnología FDM. ....	28
2.5.    Materia prima para la impresión 3D.....	29
2.5.1.    Termoplástico Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). ....	30
2.5.1.1.    Propiedades del termoplástico ABS.....	30

2.5.1.2.	Utilización de ABS como materia prima en la impresión 3D. ....	31
2.5.2.	Termoplástico Poliácido láctico (PLA). ....	31
2.5.2.1.	Utilización del PLA como materia prima en la impresión 3D.....	32
2.5.2.2.	Aplicaciones del PLA en impresión 3D. ....	32
2.5.3.	Acetato de Polivinilo (PVA) .....	32
Capítulo 3	.....	36
Diseño mecatrónico	.....	36
3.1.	Parámetros para el diseño de la impresora 3D .....	36
3.2.	Matriz QFD (Quality Fuction Deployment) .....	37
3.2.1.	Análisis de resultados de la matriz QFD.....	42
3.3.	Selección de los subsistemas .....	46
3.3.1.	Subsistema de estructura de la impresora 3D.....	46
3.3.1.1.	Parámetros a ser considerados para la selección .....	49
3.3.1.2.	Determinación de la mejor alternativa .....	49
3.3.2.	Subsistema de generación de movimiento.....	50
3.3.2.1.	Transmisión de movimiento .....	50
3.3.2.1.1.	Parámetros a ser considerados para la selección .....	52
3.3.2.1.2.	Determinación de la mejor alternativa .....	53
3.3.2.2.	Alternativas de Motores .....	54
3.3.2.2.1.	Parámetros a ser considerados para la selección .....	55
3.3.2.2.2.	Determinación de la mejor alternativa .....	55
3.3.3.	Subsistema de Extrusión .....	56
3.3.3.1.	Parámetros a ser considerados para la selección del extrusor.....	58
3.3.3.2.	Determinación de la mejor alternativa .....	58
3.3.4.	Subsistema de la base de impresión .....	59
3.3.4.1.	Parámetros a ser considerados para la selección de la base.....	60
3.3.4.2.	Determinación de la mejor alternativa .....	61
3.3.5.	Subsistema para el ambiente controlado. ....	61
3.3.5.1.	Etapa de potencia .....	61
3.3.5.1.1.	Parámetros a ser considerados para la selección del relé.....	63
3.3.5.1.2.	Determinación de la mejor alternativa .....	63
3.3.6.	Subsistema de la tarjeta de control .....	64
3.3.6.1.	Parámetros a ser considerados para la selección .....	66
3.3.6.2.	Determinación de la mejor alternativa .....	66

3.3.7.	Subsistema de Interfaz.....	67
3.3.7.1.	Parámetros a ser considerados para la selección .....	70
3.3.7.2.	Determinación de la mejor alternativa .....	70
3.4.	Diseño Mecánico.....	71
3.4.1.	Diseño de ejes. ....	71
3.4.1.1.	Determinación del diámetro del eje que soporta el carro con motor Nema 17, que se desplaza a lo largo del eje y (dirección posterior - frontal) .....	71
3.4.1.2.	Determinación del diámetro del eje que soporta el carro sin motor, que se desplaza a lo largo del eje y (dirección posterior - frontal) .....	74
3.4.1.3.	Determinación del diámetro del eje que soporta el carro con los dos extrusores MK8, que se desplaza a lo largo del eje x (dirección derecha - izquierda) .....	76
3.4.2.	Cálculos para la selección de los motores .....	79
3.4.2.1.	Cálculo del torque total del sistema en el eje y (dirección posterior - frontal).....	79
3.4.2.2.	Torque del sistema en el eje x (dirección derecha - izquierda) .....	82
3.4.2.3.	Cálculo del torque total del sistema en el eje z (dirección superior - inferior).....	83
3.4.2.4.	Selección de los motores .....	84
3.4.3.	Diseño de piezas y ensamble en software CAD. ....	85
3.5.	Diseño Electrónico. ....	86
3.5.1.	Descripción de módulos de programación seleccionados.....	86
3.5.1.1.	Módulo Arduino.....	86
3.5.1.2.	Módulo RAMPS (RepRap Arduino Mega Pololu Shield).....	87
3.5.1.3.	Módulo driver motor paso a paso DRV4988.....	89
3.5.1.4.	Módulo driver motor paso a paso DRV8825.....	89
3.5.2.	Selección del LCD. ....	90
3.5.3.	Selección de la cama caliente. ....	91
3.5.4.	Selección de los extrusores. ....	93
3.5.5.	Selección de sensores de temperatura.....	94
3.5.6.	Selección de la fuente de alimentación. ....	95
3.5.7.	Diseño del control de temperatura de la cámara principal de la impresora 3D.....	96
3.5.7.1.	Análisis del flujo de aire hacia la cámara principal de la impresora 3D. ....	97
3.5.7.2.	Relé de estado sólido. ....	98

3.6.	Aplicación de Softwares para control e interfaz.....	99
3.6.1.	Selección y modificaciones del programa del firmware de control....	99
3.6.1.1.	Detalle de modificaciones en el programa. ....	99
3.6.2.	Descripción del Software generador del código G e interfaz gráfica para la PC (MatterControl 1.5). ....	105
3.6.2.1.	Selección del tipo y modelo de impresora.....	106
3.6.2.2.	Selección de las características de la impresión. ....	107
3.6.2.2.1.	Layers/Surface.....	107
3.6.2.2.2.	Relleno. ....	107
3.6.2.2.3.	Speed.....	108
3.6.2.2.4.	Skirt and Raft.....	108
3.6.2.2.5.	Material de soporte. ....	109
3.6.2.2.6.	Output Options. ....	109
3.6.2.2.7.	Multiple Extruders. ....	110
3.6.2.3.	Selección de las características del filamento.....	110
3.6.2.3.1.	Filamento. ....	111
3.6.2.3.2.	Extrusión. ....	111
3.6.2.3.3.	Enfriamiento. ....	112
3.6.2.4.	Selección de las características de la impresora.....	112
3.6.2.4.1.	Print Area. ....	112
3.6.2.4.2.	Features. ....	113
3.6.2.4.3.	Print Leveling.....	113
3.6.2.4.4.	Custom G-Code. ....	114
3.6.2.4.5.	Extruder.....	114
3.6.2.5.	Accionamiento de los actuadores mediante la interfaz gráfica.....	115
3.6.2.6.	Menú OPCIONES.....	116
3.6.2.6.1.	Calibration Settings.....	116
3.6.2.6.2.	Application Settings.....	116
3.6.2.7.	Visualización 3D y características de las piezas a imprimir.....	117
3.6.2.7.1.	3D VER.....	117
3.6.2.7.2.	LAYER VIEW.....	118
3.6.2.8.	Inicio de la impresión.....	119
3.6.2.8.1.	Impresión desde el Matter Control.....	119
3.6.2.8.2.	Impresión desde la tarjeta SD. ....	120
Capítulo 4	.....	125

Implementación .....	125
4.1. Implementación estructural de la máquina.....	125
4.1.1. Diseño y construcción de las partes que forman la estructura externa de la impresora 3D. ....	125
4.1.2. Ensamble de la carcasa de la máquina. ....	126
4.1.3. Construcción de las partes de la estructura interna de la máquina. ....	127
4.1.4. Ensamble de la estructura interna y externa de la máquina. ....	129
4.1.5. Ensamble de las cubiertas de acrílico en la máquina.....	132
4.2. Implementación de la caja térmica.....	135
4.3. Implementación de los componentes eléctricos. ....	136
4.3.1. Implementación del sensor de temperatura ambiente.....	137
4.3.2. Implementación de los pulsadores fines de carrera.....	137
4.3.3. Implementación de la tarjeta LCD. ....	139
4.3.4. Implementación de las tarjetas controladoras.....	140
4.3.5. Implementación de la fuente de poder .....	140
4.4. Implementación de los Softwares .....	142
4.4.1. Implementación del Firmware de control .....	142
4.4.2. Implementación del Software generador de código G e interfaz gráfica con la PC.....	142
Capítulo 5 .....	145
Pruebas y Resultados .....	145
5.1. Pruebas dimensionales .....	145
5.1.1. Estructura.....	145
5.1.2. Área de trabajo .....	149
5.1.2.1. Cama Caliente .....	149
5.2. Pruebas de Funcionamiento .....	151
5.2.1. Agujeros impresos.....	151
5.2.2. Esferas impresas .....	152
5.2.3. Rectángulos internos .....	153
5.2.4. Rectángulos externos.....	155
5.3. Pruebas del material de soporte.....	156
5.3.1. PVA con PLA .....	156
5.4. Pruebas de control del ambiente.....	159
Conclusiones: .....	162
Recomendaciones:.....	164

Referencias bibliográficas: .....166  
Anexos.....170

## Índice de Figuras:

Figura 1. Método por estereolitografía para la producción de piezas en 3D. ....	3
Figura 2. Esquema del proceso de impresión 3D utilizando el método FDM. ....	4
Figura 3. Esquema del proceso de impresión 3D utilizando el método SLS. ....	4
Figura 4. Impresora RepRap autorreplicante. ....	5
Figura 5. Impresora 3D marca Wanhao modelo Duplicator 4 con doble extrusor. ....	7
Figura 6. Ejemplos de piezas manufacturadas mediante la técnica de prototipado rápido. ....	11
Figura 7. Modelo en software CAD, y el elemento físico posterior. ....	12
Figura 8. Impresión 3D en proceso. ....	13
Figura 9. Impresión 3D con material de soporte y sin el mismo. ....	14
Figura 10. Proceso de Estereolitografía (SLA). ....	15
Figura 11. Esquema del proceso de SGC. ....	16
Figura 12. Esquema de funcionamiento proceso LOM. ....	18
Figura 13. Esquema de fabricación por corte y laminado (PLT). ....	19
Figura 14. Esquema de funcionamiento SLS. ....	21
Figura 15. Maquinaria de 3DP. ....	22
Figura 16. Esquema general del funcionamiento de un proceso FDM. ....	24
Figura 17. Impresora 3D con la estructura de un robot cartesiano. ....	26
Figura 18. Impresora 3D robot delta. ....	27
Figura 19. Impresora 3D con 4 extrusores estructura polar Theta. ....	28
Figura 20. Tecnología FDM. ....	29
Figura 21 Ejemplos de termoplásticos usados en el proceso de impresión 3D. .	29
Figura 22. Carretes de ABS para impresión 3D. ....	31
Figura 23 Carretes de PLA para impresión 3D. ....	32
Figura 24. Carrete de PVA para impresión 3D. ....	33
Figura 25. . Estructura de la Matriz QFD. ....	38
Figura 26. Matriz QFD. ....	41
Figura 27. Evaluación de la competencia tomada de la matriz QFD. ....	43
Figura 28. Evaluación de las interrelaciones tomadas de la matriz QFD. ....	44
Figura 29. Análisis de correlación tomadas de la matriz QFD. ....	45
Figura 30. Análisis de correlación tomadas de la matriz QFD. ....	46
Figura 31. Impresora cartesiana con elevación de la base de impresión, MakerBot Replicator. ....	47
Figura 32. Impresora cartesiana con elevación de los extrusores, Prusa i3. ....	48
Figura 33. Impresora 3D tipo delta, Rostock Max. ....	49
Figura 34. Transmisión tornillo sin fin - tuerca. ....	51
Figura 35- Transmisión tornillo piñón – correa dentada. ....	52
Figura 36. Transmisión polea – banda plana. ....	52
Figura 37. Motor a pasos NEMA 17. ....	54
Figura 38. Motor DC. ....	55
Figura 39. Detalle de extrusión Directa. ....	57
Figura 40. Detalle de extrusión Bowden. ....	58

Figura 41. Cama caliente con diferentes estructuras geométricas y tamaños. ....	60
Figura 42. Cama con diferentes estructuras geométricas y tamaños. ....	60
Figura 43. Relé de estado sólido o SSR. ....	62
Figura 44. Módulo Relé. ....	62
Figura 45. Tarjeta Raspberry Pi. ....	64
Figura 46. Tarjeta Arduino Mega y Tarjeta RAMPS. ....	65
Figura 47. Tarjeta Launchpad MSP430. ....	66
Figura 48. Interfaz Repetier Host. ....	68
Figura 49. Interfaz Slic3r. ....	69
Figura 50. Diagramas de cuerpo libre de las fuerzas aplicadas en el eje en dirección y del lado donde se apoya el carro con el motor Nema 17. ....	72
Figura 51. Diagrama de momento flector del eje en dirección y del lado donde se apoya el carro con el motor Nema 17. ....	73
Figura 52. Diagramas de cuerpo libre de las fuerzas aplicadas en el eje en dirección y del lado donde se apoya el carro sin motor. ....	75
Figura 53. Diagrama de momento flector del eje en dirección y del lado donde se apoya el carro con el motor Nema 17. ....	75
Figura 54. Diagramas de cuerpo libre de las fuerzas aplicadas en uno de los ejes en dirección x. ....	77
Figura 55. Diagrama de momento flector en uno de los ejes en dirección x. ....	77
Figura 56. Motor paso a paso NEMA 17. ....	85
Figura 57. Impresora 3D ensamblada. ....	86
Figura 58. Placa Arduino Mega. ....	87
Figura 59. Módulo RAMPS 1.4. ....	88
Figura 60. Driver para motores paso a paso DRV5988. ....	89
Figura 61. Driver para motores paso a paso DRV8825. ....	90
Figura 62. Placa RAMPS, con los módulos A4988 y A8825. ....	90
Figura 63. LCD REPRAP Discount Smart Controller conectado en un módulo RAMPS. ....	91
Figura 64. HeatBed PCB MK2. ....	92
Figura 65. Motaje de la cama caliente con resortes. ....	93
Figura 66. Extrusor doble MK8. ....	94
Figura 67. Termistor NTC de 100K $\Omega$ . ....	95
Figura 68. Fuente de poder Mega ATXOMEGA-800W. ....	95
Figura 69. Características técnicas fuente de poder Mega ATXOMEGA- 800W. ....	96
Figura 70. Niquelina para el control de temperatura del ambiente. ....	96
Figura 71. Ventilador para el flujo de aire caliente. ....	97
Figura 72. Flujo de aire dentro de la cámara de impresión. ....	97
Figura 73. Software Arduino cargado el programa Repetier-Firmware. ....	99
Figura 74. Impresora y modelo seleccionados. ....	106
Figura 75. SETTINGS, General, Layers/Surface. ....	107
Figura 76. SETTINGS, General, Relleno. ....	108
Figura 77. SETTINGS, General, Relleno. ....	109
Figura 78. SETTINGS, General, Material de soporte. ....	109

Figura 79. SETTINGS, General, Output Options. ....	110
Figura 80. SETTINGS, General, Multiple Extruders. ....	110
Figura 81. SETTINGS, Filamento, Filamento. ....	111
Figura 82. SETTINGS, Filamento, Extrusión.....	111
Figura 83. SETTINGS, Filamento, Enfriamiento. ....	112
Figura 84. SETTINGS, Impresora, Print Area.....	113
Figura 85. SETTINGS, Impresora, Features.....	113
Figura 86. SETTINGS, Impresora, Print Leveling. ....	114
Figura 87. SETTINGS, Impresora, Custom G-Code. ....	114
Figura 88. SETTINGS, Impresora, Extruder. ....	115
Figura 89. Características generales de impresión. ....	115
Figura 90. Características generales de impresión. ....	116
Figura 91. Calibration Settings. ....	116
Figura 92. Cablibration Settings. ....	117
Figura 93. 3D VER. ....	118
Figura 94. LAYER VIEW.....	118
Figura 95. Agregar. ....	119
Figura 96. COLA, Exportar. ....	120
Figura 97. File export options. ....	120
Figura 98. Vista lateral izquierda de la impresora ESPE 3D. ....	121
Figura 99. Manufactura de las piezas que forman la carcasa de la impresora 3D.....	126
Figura 100. Montaje de la carcasa previo a ser pintado.....	127
Figura 101. Impresora 3D Makerbot en proceso de impresión y la pieza final. ....	128
Figura 102. Piezas impresas y sus respectivos acoples.....	129
Figura 103. Acople de la estructura interna de la impresora 3D con la carcasa de la misma.....	129
Figura 104. Confirmación del correcto nivel de la estructura interna de la máquina.....	130
Figura 105. Motores, bandas y extrusores montados en los carros y soportes en el plano horizontal (x, y).....	130
Figura 106. Pieza base y soporte superior en ABS para el sistema de elevación de la cama caliente.....	131
Figura 107. Viga tipo I que soporta a la cama caliente, y ensamble completo de la cama. ....	131
Figura 108. Sujeción del sistema de elevación de la cama caliente, en la carcasa de la impresora 3D.....	132
Figura 109. Cortadora laser del laboratorio de procesos de manufactura de la universidad de las fuerzas armadas ESPE. ....	133
Figura 110. Planchas de acrílico con sus respectivas perforaciones y pintado. ....	133
Figura 111. Piezas de acrílico fijadas caras lateral, superior, frontal y puertas de la máquina.....	134
Figura 112. Soportes para la colocación los carretes de ABS, PLA o PVA. ....	135
Figura 113. Conducto de aire ventilador, entre la caja térmica y la cámara principal de la impresora. ....	135

Figura 114. Niquelina en material cerámico. ....	136
Figura 115. Caja térmica. ....	136
Figura 116. Sensor de temperatura para el control ambiente de la cama. ....	137
Figura 117. Fin de carrera y tope eje “x” (eje derecha-izquierda). ....	138
Figura 118. Fin de carrera y tope eje “y” (eje frente-posterior). ....	138
Figura 119. Fin de carrera y tope eje “z” (eje superior-inferior). ....	139
Figura 120. Placa LCD REPRAP Discount Smart Controller, fijada en la carcasa de la máquina. ....	139
Figura 121. Montaje Arduino Mega, placa RAMPS, drivers DRV y conexiones de sensores y actuadores. ....	140
Figura 122. Montaje de la fuente de poder en la parte posterior de la impresora 3D. ....	141
Figura 123. Relé de estado sólido. ....	141
Figura 124. Interfaz MatterContol 1.5, y pieza impresa. ....	143
Figura 125. Acotación de vista Frontal. ....	146
Figura 126. Acotación de vista Lateral derecha. ....	147
Figura 127. Acotación de vista Lateral izquierda. ....	148
Figura 128. Acotación de vista Superior. ....	149
Figura 129. Acotación de cama caliente. ....	150
Figura 130. Distancia entre boquillas de los extrusores MK8. ....	150
Figura 131. Acotación de la máxima altura en el eje Z. ....	151
Figura 132. Acotación de diámetros internos. ....	152
Figura 133. Acotación de diámetros externos. ....	153
Figura 134. Acotación de rectángulos internos. ....	154
Figura 135. Acotación de rectángulos internos. ....	155
Figura 136. Impresión de Piezas que necesitan soporte debido a detalles internos materiales PVA y PLA. ....	156
Figura 137. Generación de pieza con soporte mediante el software Matter Control. ....	157
Figura 138. Proceso de remoción de material de soporte (PVA). ....	158
Figura 139. Impresión de Piezas que necesitan soporte debido a detalles internos materiales PVA y ABS. ....	158
Figura 140. Pieza impresa en ABS sin control de temperatura (izquierda) y con control de temperatura (derecha). ....	159

## Índice de Tablas:

Tabla 1. Características requeridas en la impresora 3D.....	37
Tabla 2. Jerarquía de requerimientos del cliente para una impresora 3D.....	42
Tabla 3. Jerarquía de inter relaciones tomada de la matriz QFD.....	44
Tabla 4. Selección de la alternativa para el tipo de estructura de la impresora 3D.....	50
Tabla 5. Selección de la alternativa para la transmisión de movimiento.....	53
Tabla 6. Selección de la alternativa para el tipo de motor.....	56
Tabla 7. Selección de las alternativas para el tipo de extrusor.....	59
Tabla 8. Selección de las alternativas para el tipo de extrusor.....	61
Tabla 9. Selección de las alternativas para el tipo de extrusor.....	63
Tabla 10. Selección de la alternativa para el tipo de estructura de la impresora 3D.....	67
Tabla 11. Selección de la alternativa para el tipo de estructura de la impresora 3D.....	71
Tabla 12. Coeficientes de rozamiento $\mu$ , para varios modelos de rodamientos..	80
Tabla 13. Características de los motores NEMA 17.....	82
Tabla 14. Análisis de resultados de acotaciones en Vista frontal de la impresora 3D.....	146
Tabla 15. Análisis de resultados de acotaciones en Vista lateral derecha de la impresora 3D.....	147
Tabla 16. Análisis de resultados de acotaciones en Vista lateral izquierda de la impresora 3D.....	148
Tabla 17. Análisis de resultados de acotaciones en Vista Superior de la impresora 3D.....	149
Tabla 18. Análisis de resultados diámetros internos.....	152
Tabla 19. Análisis de resultados diámetros externos.....	153
Tabla 20. Análisis de resultados rectángulos internos.....	154
Tabla 21. Análisis de resultados rectángulos externos.....	155

# Resumen

El proyecto tiene como objetivo en mejorar el área de prototipado rápido del laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE. Consiste en el diseño e implementación de una impresora 3D que tiene dos extrusoras, con el fin de realizar impresiones con soporte para estructuras complejas. También tiene un controlador que regula el ambiente de temperatura de la impresora 3D, con el fin de mejorar la calidad de impresión. Las impresiones se realizan en dos tipos de plásticos probados, ABS y PLA, mientras que el soporte de impresión se lleva a cabo en PVA, que es un plástico soluble en agua. El funcionamiento de la impresora 3D, se realiza de dos maneras:

La primera es por una placa inteligente LCD, en el que se muestran todas las opciones de los comandos de impresora 3D.

El segundo es mediante un software de interfaz gráfica, además del mando de los actuadores de la máquina, también permite al usuario modificar las características del proceso de impresión y generar el código G.

## **PALABRAS CLAVE:**

**PROTOTIPADO**

**IMPRESORA 3D**

**EXTRUSORAS**

**SOPORTE**

**SOLUBLE**

# Abstract

The project is to improve the area of rapid prototyping to the laboratory of manufacturing at ESPE University. It consists of the design and implementation of a 3D printer which has two extruders, in order to make prints with support for complex structures. Also it has a controller that controls the temperature environment of the 3D printer, in order to improve the print quality. Impressions are made in two types of plastics tested, ABS and PLA, while printing support is performed in PVA, which is a water-soluble plastic.

The operation of the 3D printer, is done in two ways:

The first is by an intelligent LCD smart shield, in which all options 3D printer commands are displayed.

The second is by a graphical interface software, in addition to commanding the actuators of the machine also it allows the user to modify the characteristics of the printing process and generate the G code.

## **KEY WORDS:**

**PROTOTYPING**

**3D PRINTER**

**EXTRUDERS**

**SUPPORT**

**SOLUBLE**

# Capítulo 1

## Introducción

El primer capítulo presenta la necesidad de construcción de una impresora 3D con impresión de soporte en ambiente controlado. Se hace una breve revisión cronológica de la impresión en 3 dimensiones. Se da la justificación e importancia del presente proyecto. También, se definen los objetivos y alcance del mismo, finalizando con la estructura del documento.

### 1.1. Motivación y problemática

#### 1.1.2. Motivación

El gran avance tecnológico ha permitido contar con muchas herramientas útiles en el campo de la manufactura. Una de ellas es el proceso de prototipado rápido, el cual permite la fabricación de modelos físicos utilizando diseños CAD en tres dimensiones (Stratasys, 2015).

La tecnología de impresión 3D es un tema muy novedoso, ya que el poder transformar diseños virtuales en tangibles a bajo costo y de una manera rápida no se los podía tener hasta el momento. Dicho proceso hace pocos años era aplicado a nivel industrial en la construcción de prototipos con un alto costo, debido a licencias de software y características propias de cada impresora

RepRap es un incentivo en la generación de máquinas libres como lo dice en (Valero, 2015): libertad para fabricar es: libertad de uso, libertad de estudio, libertad

de distribución y libertad de mejora. Dicha filosofía es aplicada en el presente proyecto.

El motivo más significativo que conlleva a la realización del presente proyecto surge de la necesidad por parte de los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en tener alternativas de procesos de manufactura para elaborar piezas mecánicas o diseños en general, que sean de difícil fabricación a bajo costo y en menor tiempo.

Construir una máquina para el Laboratorio de Procesos de Manufactura que permita ayudar a satisfacer dicha necesidad, permite reflejar parte de los conocimientos adquiridos en la carrera de ingeniería mecatrónica.

### **1.1.2. Problemática**

El país no cuenta con tecnología necesaria para poder fabricar impresoras 3D cien por ciento nacionales. Ya que la mayor parte de elementos necesarios para la construcción son importados de otros países

Dicho inconveniente genera que empresas ecuatorianas como TeleAutomática, Innova 3D, Maker Group, brinden servicios de impresión en tres dimensiones y a la comercialización de impresoras 3D importadas, que por motivos de movilización e impuestos, tienen un alto costo en el mercado nacional

Las últimas noticias sobre las impresoras 3D aseguran que la tecnología de impresión 3D se encuentra en auge a nivel nacional, y se tienen grandes expectativas del crecimiento de la misma. Cada vez son más las empresas dedicadas a la venta de impresoras 3D, servicio técnico y servicio de impresión 3D. Compartir datos, opiniones y sentimientos a través de la red es algo habitual hoy en día. Sin embargo ha llegado el momento de compartir elementos físicos, limitados únicamente por la imaginación del usuario.

## 1.2. Antecedentes

### 1.2.1. Origen de la impresión 3D

En el año 1983, (Burón, 2013) el inventor Chuck Hull destacado en el campo de la óptica iónica, genera el primer método de impresión en 3D, la estereolitografía un proceso de impresión orientado a prototipos. El método utiliza resinas líquidas fotopoliméricas que se solidifican expuestas a un rayo láser como se ve en la Figura 1.

Chuck en 1986 funda la empresa 3D Systems patentando su método y comercializa las primeras impresoras en el mercado. (Chus Fdez, 2015).

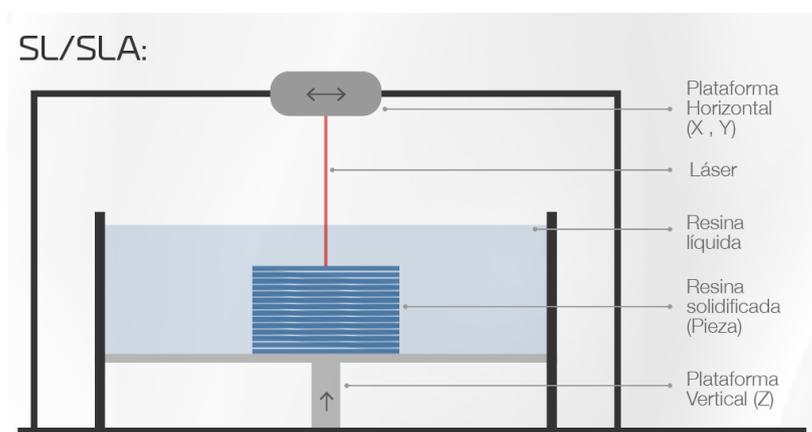


Figura 1. Método por estereolitografía para la producción de piezas en 3D.  
Fuente: (Tecnoimpre3D, 2016).

Entre los años 1988 y 1990 surgen nuevos métodos de impresión que dan un giro al sistema de impresión en 3 dimensiones (Chus Fdez, 2015). Los métodos son:

FDM.- Impresión por deposición de material fundido, se aprecia en la Figura 2.

SLS.- Impresión por Sinterización selectiva por láser, se muestra en la Figura 3.

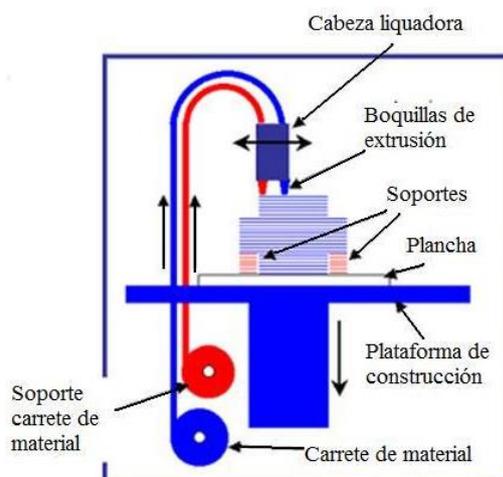


Figura 2. Esquema del proceso de impresión 3D utilizando el método FDM.  
Fuente: (Laboratory of Information Processing Science. Universidad de Helsinki, 2012).

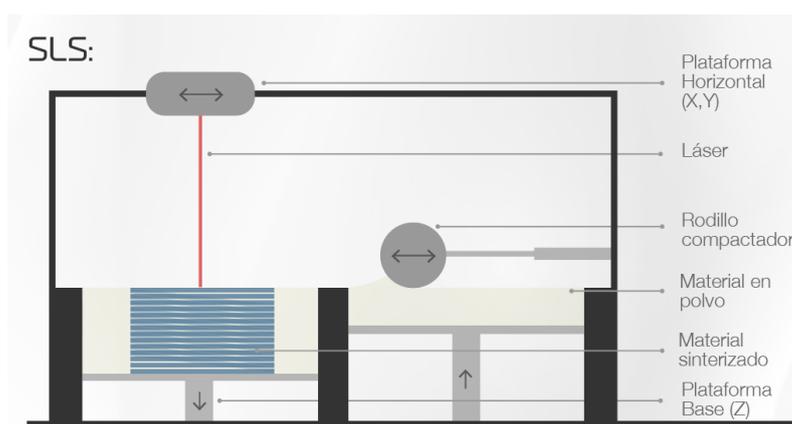


Figura 3. Esquema del proceso de impresión 3D utilizando el método SLS.  
Fuente: (Tecnoimpre3D, 2016).

El creador de la tecnología FDM, Scott Crump, crea la empresa Stratasys en 1990 y dos años más tarde se comercializan las impresoras con tecnología SLS y FDM.

A partir del año 2005 surgen las impresoras Open-Source (software libre), capaces de autoreplicar piezas que las conforman. Dicho desarrollo lo realizó el Dr. Bowyer en la Universidad de Bath en Reino Unido. (Chus Fdez, 2015).

En el año 2009 empieza un crecimiento exponencial con las impresoras RepRap en el mercado, con un costo de 900 euros por cada kit para armar la impresora, el tiempo para armarla era muy alto aproximado de 10 a 12 días, (Chus Fdez, 2015).



Figura 4. Impresora RepRap autorreplicante.  
Fuente: (Imprimalia 3D, 2013).

En la actualidad hay varias empresas dedicadas a la comercialización de impresoras 3D como Makerboot, Stratasys, Wanhao, Rostock entre otras, cada una con su característica, ventajas y desventajas. En el 2014 se vendieron alrededor de 108000 impresoras en el mundo, en el 2015 se estiman 214000 impresoras 3d vendidas, esto da una pauta del crecimiento de esta tecnología en el mercado. (Chus Fdez, 2015).

### **1.3. Justificación e importancia**

La importancia del presente proyecto se basa en la búsqueda de tecnología innovadora que contribuya al campo de la manufactura. La impresión en 3D es una alternativa de convertir diseños 3D en formatos digitales a objetos físicos.

La tecnología de impresión 3D es un tema novedoso, que ha dado un giro a la creación de objetos 3D ya que los fabrica en menor tiempo, sin desperdicio de material y con excelentes acabados a diferencia de los tradicionales procesos de arranque de viruta.

En el campo de impresión 3D, existen impresoras Open Source, que fueron creadas bajo la motivación de tener una alternativa frente a las impresoras 3D de las grandes industrias, es decir que tengan un bajo costo de producción que esté al alcance de personas que no tengan los recursos económicos necesarios para poder acceder a una impresora 3D industrial, además que puedan producir la mayor parte de componentes necesarios para la construcción de otra impresora, es decir que sea replicable.

En el presente proyecto se realiza la construcción de una impresora 3D con doble extrusor en ambiente controlado, mediante la utilización de software libre (Open Source). Fabricada para imprimir diseños complejos con una gran exactitud y calidad gracias al material de aporte y ambiente apropiado para la impresión en ABS o PLA, hacen de este diseño un tema novedoso en nuestro país, que no cuenta con dicha tecnología.

Dicho proyecto aportará al Laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, de otra alternativa para la obtención de piezas plásticas requeridas por parte del personal que requiera imprimir sus diseños en 3 dimensiones.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Diseñar y construir una impresora 3D con impresión de soporte en ambiente controlado.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Diseñar y construir un robot cartesiano cuyo efector final sean dos extrusores de polímero.
- Implementar una cámara que mantenga la temperatura estable en el proceso.
- Buscar un sistema de interfaz humano máquina (HMI) de software libre, que permita al usuario el accionamiento del sistema de una forma sencilla.
- Automatizar el proceso de impresión en tres dimensiones con y sin conexión de un computador.
- Optimizar el sistema de impresión para obtener piezas satisfactorias.

## **1.5. Alcance del proyecto**

La impresora 3D Wanhao es la impresora de doble extrusor más asequible en el mercado. Funciona con filamento estándar de 1.75mm con un tamaño de impresión de (225\*145\*150) mm. y permite tener piezas de gran tamaño con excelente calidad

(Wanhao, 2015). En la Figura 5, se indica a detalle las partes principales de la impresora.



Figura 5. Impresora 3D marca Wanhao modelo Duplicator 4 con doble extrusor.  
Fuente: (Wanhao, 2015).

El proyecto a desarrollar tiene gran similitud a la impresora Wanhao mencionada anteriormente, pretendiendo cumplir con los objetivos planteados e incorporar características propias del sistema como son:

Estructura robusta de fácil transporte, desarmable, autoreplicable en piezas plásticas, alta calidad en impresión, precisión de  $\pm 0.5\text{mm}$ , doble extrusor para impresión con soporte, ambiente controlado mediante convección forzada, teclado de instrucciones y mando, visualizador de estado de impresión y estados de componentes del sistema, impresión mediante tarjeta SD o directamente desde un computador conectado a la impresora.

## 1.6. Estructura del documento

El documento está conformado por cinco capítulos. En el primer capítulo se mencionan las generalidades del proyecto, definiendo objetivos y alcance del mismo.

El segundo capítulo aborda las bases de desarrollo de la impresión en tres dimensiones, tecnologías existentes en el campo de la impresión 3D haciendo un enfoque en la tecnología FDM detallando principios de funcionamiento.

En el tercer capítulo se encuentra la fase de diseño, subdividiendo en diseño mecánico y diseño electrónico, cada uno con sus respectivas ilustraciones.

El cuarto capítulo presenta la etapa de implementación, una vez finalizada la fase de diseño se inicia la construcción de la impresora 3D

En el capítulo cinco tenemos las pruebas y resultados del presente proyecto, analizando a detalle toda la estructura mecatrónica, funcionalidad y calidad de impresión finalizando con las conclusiones y recomendaciones.

## **Resumen**

Equipar el laboratorio de Procesos de Manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, de nueva tecnología en el campo de prototipado rápido, permite a los estudiantes y docentes tener herramientas y conocimientos actualizados, motivando al continuo estudio e investigación.

Las impresoras 3D que se comercializan en la actualidad a nivel nacional, tienen un alto costo en el mercado debido a que son importadas y muchas de ellas con software propio de su marca, adicionando el pago de licencias para el manejo de las impresoras.

La impresión 3D surge en el año 1983 por el inventor Chuck Hull, evolucionando en las diferentes tecnologías de impresión como son: SLA, FDM, SLS, REP RAP, estas últimas muchas de ellas auto replicables y de software libre.

Construir una impresora 3D cumpliendo con los objetivos planteados, permite llegar al alcance que se espera del presente proyecto.

# Capítulo 2

## Estado del arte

En el presente capítulo se estudian las bases para el desarrollo de la tecnología de impresión 3D. Donde se detalla la tecnología del prototipado rápido, se muestran las técnicas existentes, los principios de operación y la materia prima con la que se realizan las piezas e impresión de soporte.

### **2.1. Introducción al prototipado rápido.**

Históricamente los sistemas de prototipado rápido surgieron en 1987 con la introducción de la tecnología de estereolitografía según (Stratasys, 2015), el proceso consiste en solidificar capas de polímeros líquidos sensibles a la luz ultravioleta mediante tecnología láser. Años posteriores se introdujeron otras tecnologías de prototipado rápido como la de Fused Deposition Modeling (FDM), o el sinterizado selectivo por láser y fabricación de objetos laminados. En abril de 1992, Stratasys presentó el primer sistema de prototipado rápido 3D basado en tecnología FDM.

Se considera al prototipado rápido como un conjunto de tecnologías (Rodríguez, 2015), que permiten la manufacturación de piezas, mismas que pueden ser plásticas, cerámicas o metálicas. El proceso consiste en depositar material paulatinamente capa por capa hasta obtener el producto final. El proceso parte de un diseño generado mediante software CAD 3D (Rodríguez, 2015). En dicho procedimiento con regularidad se obtienen piezas con características similares a las que se obtendrían con procedimientos convencionales, como extrusión, modelado por inyección o por

soplado. De esta manera se evita la fabricación de moldes que generalmente son costosos, y que únicamente son rentables en producción en masa.

En la Figura 6, se observan unos ejemplos de piezas manufacturadas mediante la técnica de prototipado rápido.

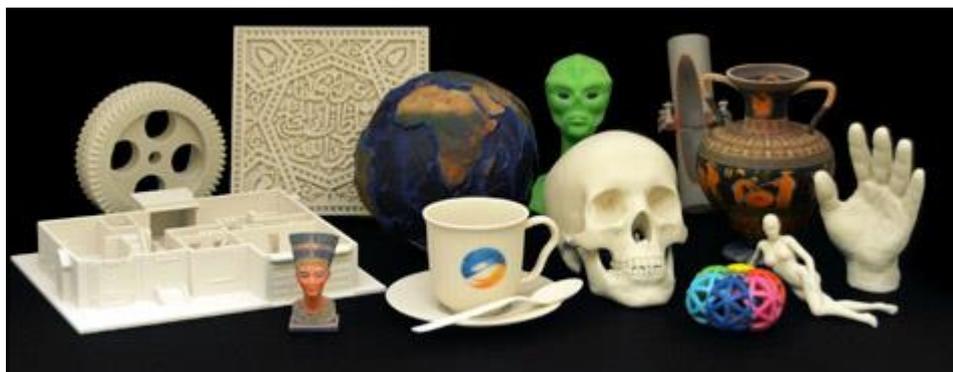


Figura 6. Ejemplos de piezas manufacturadas mediante la técnica de prototipado rápido.

Fuente: (Ebudae, 2014).

## 2.2. Pasos generales en el proceso de prototipado rápido.

Dentro de los sistemas de prototipado rápido existentes, los principios de operación de las prototipadoras son similares entre distintos tipos de máquinas. Los mismos se describen a continuación según (Liow, 2007).

- 1.- Construcción del modelo en un software CAD.
- 2.- Convertir el modelo CAD en formato STL.
- 3.- Revisar y arreglar el archivo STL.
- 4.- Generar estructuras de soporte, si aplica.
- 5.- Cortar el archivo STL en forma de capas.
- 6.- Imprimir el modelo físico
- 7.- Remoción de las estructuras de soporte si aplica.
- 8.- Post-procesado de la pieza en caso de ser requerida.

Como se muestra en (Mariano, 2013) se puede resumir el proceso en 3 etapas:

### **Etapa 1. Modelado.**

La impresión 3D parte de un modelo generado en un software de dibujo asistido por ordenador (CAD) 3D, para el posterior prototipado. Dependiendo de la máquina que se utiliza, el material de impresión se deposita sobre la plataforma de compilación hasta que capa por capa se completa el modelo 3D final.

Los datos estándar de interfaz entre el software CAD y el software generador del código G que lee la impresora 3D, es el formato de archivo STL. Un archivo STL se aproxima a la forma de una pieza con facetas triangulares. Mientras más pequeñas sean las facetas, se produce una superficie de mayor resolución y detalle en el acabado final.

En la Figura 7, se observa la ilustración de un modelo en software CAD 3D, junto con una pieza tangible del gráfico impresa.



Figura 7. Modelo en software CAD, y el elemento físico posterior.  
Fuente: (3DPRINTXPERTS, 2015).

### **Etapa 2. Impresión.**

El momento en que se va a realizar la impresión 3D de una pieza, la máquina lee el diseño en coordenadas posicionales (código G), y deposita las capas sucesivas de líquido, polvo o plástico fundido para construir el modelo a partir de una serie de secciones transversales. Estas capas se fusionan automáticamente para crear la forma final. La principal ventaja de esta técnica de prototipado es su capacidad de crear casi cualquier forma o característica geométrica, sin la necesidad de un molde. .

La resolución de la impresora 3D depende de los pasos por milímetro que entreguen los motores a pasos que producen el movimiento de los ejes X-Y (plano horizontal). En el eje Z (eje vertical), la resolución depende tanto del número de pasos por milímetro como de la asignación del espesor de capa. El espesor standard de capa usado en impresiones 3D es de alrededor de 200 micras (0,2 mm), aunque algunas máquinas, tales como la Objet Connex y la 3D Systems ProJet pueden imprimir capas tan delgadas como 16 micrómetros.

La manufacturación de una pieza con métodos tradicionales puede tardar de varias horas a varios días, dependiendo del método utilizado, el tipo de máquina utilizada, el tamaño y la complejidad de la pieza, y el número de los modelos de fabricación simultánea.

En la Figura 8, se observa una impresora 3D con tecnología de deposición por hilo fundido (FDM), a mitad de la etapa de impresión. En la imagen se observa como el extrusor deposita paulatinamente el material de impresión para dar forma a lo que será la pieza final.

Las técnicas tradicionales tales como el moldeo por inyección pueden ser menos costosas para la manufacturación de productos plásticos en masa, pero el prototipado por impresión 3D puede ser más flexible, rápido y menos costoso cuando se producen cantidades pequeñas de piezas. Las impresoras 3D ofrecen a los diseñadores la capacidad de producir piezas y modelos conceptuales.

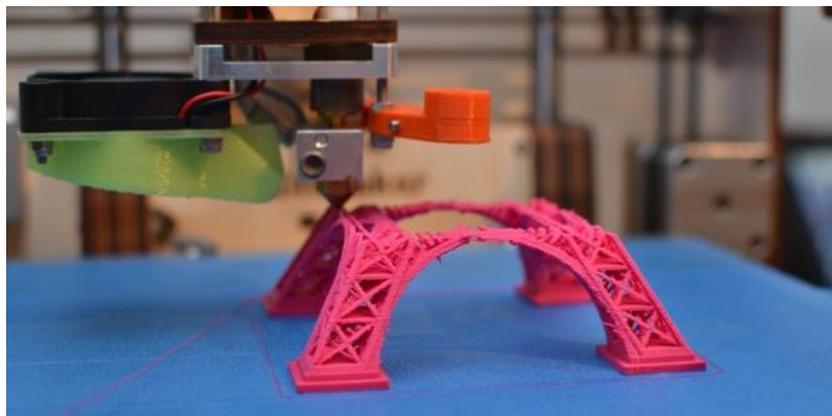


Figura 8. Impresión 3D en proceso.  
Fuente: (Impresoras3D.com, 2015).

### **Etapa 3. Acabado.**

Aunque la resolución de la pieza impresa es suficiente para muchas aplicaciones, una mayor resolución se puede lograr mediante la impresión de una versión ligeramente sobredimensionada del objeto deseado en resolución estándar y luego retirar material con un proceso de mayor resolución sustractivo.

Algunas técnicas de fabricación también utilizan impresiones de soporte durante la construcción. Los soportes son extraídos o disueltos tras la finalización de la impresión, y se utilizan para apoyar voladizos durante la construcción, tal como se observa en la Figura 9.



Figura 9. Impresión 3D con material de soporte y sin el mismo.

Fuente: (Zeitgeist, 2012).

## **2.3. Tecnologías de prototipado rápido más difundidas.**

Son varias las técnicas de prototipado rápido existentes, sin embargo se presentará una breve descripción de las técnicas más difundidas según (UNED, 2012), a continuación:

### 2.3.1. Estereolitografía (SLA).

La técnica ocupa un láser UV que se proyecta sobre resina fotosensible líquida para polimerizarla. También la podemos encontrar con la denominación de STL.

La estereolitografía como se menciona en (Infante, 2012), es un proceso de prototipado rápido que utiliza la estratificación para la construcción de piezas a partir de un modelo de diseño. La tecnología utiliza resinas líquidas fotopoliméricas que se solidifican expuestas a un rayo láser, este traza cada sección del modelo CAD 3D sobre la superficie de un baño de resina fotosensible, materializando así el modelo CAD 3D, capa a capa. En la Figura 10, se detalla el proceso.

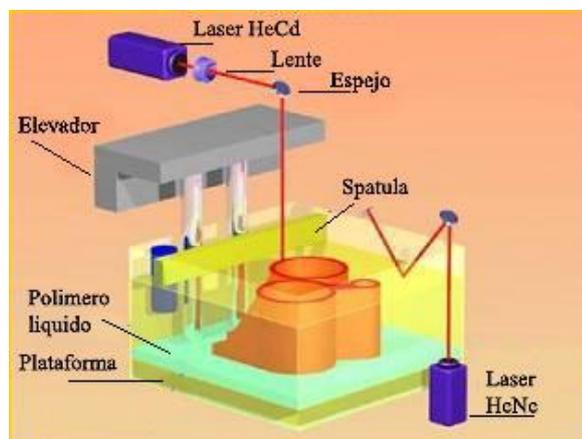


Figura 10. Proceso de Estereolitografía (SLA).  
Fuente: (UNDOprototipos, 2015).

El proceso consta de 4 etapas principales según (Garay, 2012), las cuales se exponen a continuación:

**Etapla 1. Preparación:** se predispone una estación de trabajo en la cual se posicionará la pieza final y los soportes necesarios para su apoyo durante su realización.

**Etapla 2. Generación de la pieza:** a través de sistemas ópticos, se localiza un rayo láser con una potencia de decenas de mW en la superficie del tanque que contiene un monómero epoxi líquido o resina fotosensible. El láser desencadena una reacción química en cadena que tiene como efecto la polimerización y la posterior creación de una partícula sólida, que da origen a la pieza.

El movimiento del láser en el plano permite la realización de la primera sección del prototipo, que tendrá un espesor igual a la del polímero fotosolidificado. Luego un sistema de recubrimiento de precisión cubre la sección de nueva construcción de una película de monómero líquido y el proceso comienza de nuevo con la consolidación de un siguiente estado, que se adhiere firmemente a la sección de abajo, hasta la realización del prototipo.

**Etapa 3. Post-Tratamiento:** La pieza obtenida se solidifica, pero no del todo en su superficie y por lo tanto la consistencia física todavía no es aceptable. Por lo tanto habrá que someterla a un post-tratamiento para completar el proceso de polimerización que consiste en la exposición de la pieza a una lámpara ultravioleta durante un período más corto o más largo dependiendo de su tamaño. Así se completará la polimerización de la resina líquida que sigue atrapada en el interior de la pieza.

**Etapa 4. Acabado:** Finalmente se elimina la impresión de soporte por remoción física o por disolución, y se da el acabado final a la pieza de ser necesario.

### 2.3.2. Fotopolimerización por luz UV (SGC).

De igual manera que en la estereolitografía, la base de esta tecnología es la solidificación de una resina fotosensible o un fotopolímero. Con la diferencia de que en el proceso de fotopolimerización, se irradia con una lámpara de UV de gran potencia todos los puntos de la sección simultáneamente.

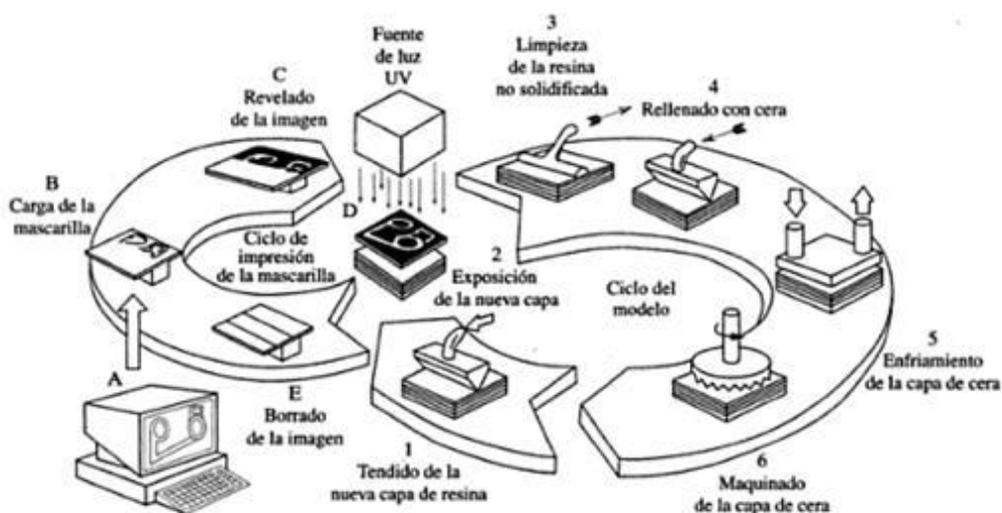


Figura 11. Esquema del proceso de SGC.  
Fuente: (UNED, 2012).

El proceso es descrito a continuación por (Garay, 2012):

### **Impresión de la máscara.**

- 1.- Modelado informático en 3D.
- 2.- Carga de la imagen en un plano dieléctrico transparente.
- 3.- Revelado, en el que se acerca al plato cargado un tóner que se adhiere debido a la carga electrostática.
- 4.- En la etapa de exposición se sitúa la placa sobre la resina y se expone a una luz ultravioleta.
- 5.- Proceso de borrado, donde se limpia de la máscara y se reutiliza.

### **Crecimiento del modelo.**

- 1.- Se procede a la impregnación donde se esparce el polímero en el área de trabajo.
- 2.- Exposición.
- 3.- Se realiza el secado, donde se elimina el polímero que no ha solidificado. Secado mediante aire. Se reutiliza la resina. El aire elimina la resina no solidificada.
- 4.- Se rellena con cera caliente a 70°C los huecos dejados en el secado, esto sirve de estructura de apoyo. El grosor de la capa de cera es igual que el de resina.
- 5.- Se solidifica la cera, esto no afecta al curado.
- 6.- Finalmente el fresado, donde se eliminan los restos de cera. Aquí se regula el espesor exacto.

## **2.3.3. Fabricación por corte y laminado (LOM).**

El proceso consiste en posicionar una hoja de papel encolado sobre una plataforma, posteriormente se prensa con un rodillo caliente que la adhiere a la hoja precedente.

La técnica de laminación de hojas de papel, permite construir prototipos de gran tamaño en menos tiempo del que se puede lograr con otros sistemas de prototipado. Como su nombre lo indica, el prototipo se realiza por la adhesión progresiva de hojas

de papel, una encima de otra, en la que posteriormente se genera la sección de la pieza mediante corte por láser o mecanizado. En la Figura 12, se detalla el esquema del proceso LOM.

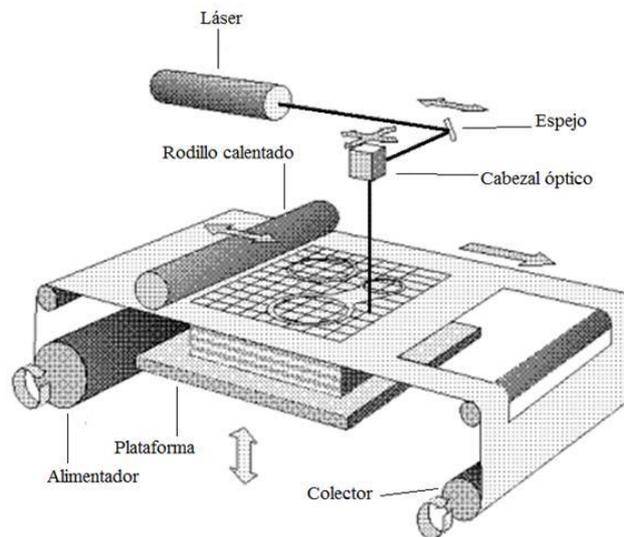


Figura 12. Esquema de funcionamiento proceso LOM.  
Fuente: (UNED, 2012).

Los pasos para la realización de la pieza según (Garay, 2012) son:

**Pegamento y corte de las secciones:** es la etapa de prototipado controlada por ordenador que utiliza el láser para el corte de la sección. Al finalizar se obtiene un paralelepípedo de material laminado del cual se extrae la pieza, con ayuda de las herramientas adecuadas. La función de soporte se realiza con el papel en exceso después del corte.

**Acabado:** la textura y apariencia de una pieza generada con la técnica de estratificación de capas es similar a la madera contrachapada, pero presenta un alto riesgo de separación de las láminas que conforman la pieza. Se puede obtener un buen acabado superficial mediante la aplicación de un tratamiento con tela de esmeril, también el prototipo debe ser tratado con una pintura impermeabilizante para evitar deformaciones causadas por la humedad atmosférica.

### 2.3.4. Tecnología de laminación con papel (PLT).

Emplea el mismo principio básico de construcción que el utilizado por la técnica de Fabricación por corte y laminado (LOM). El proceso se basa en el principio de fotocopia. El PLT usa un polvo de resina, el cual se aplica al papel en la posición exacta indicada por los datos de la sección para adherir las dos capas adyacentes de papel, para imprimir el contorno de la sección transversal.

El cortador usado es una cuchilla de carburo, montada sobre una base giratoria que corta el contorno de la sección transversal así como las secciones de separación con el fin de eliminar el material de soporte. La contracción del modelo se produce cuando se enfría en la unidad de prensa caliente y su expansión se produce cuando se expone a condiciones variables de humedad en la unidad mencionada. En la Figura 13, se presenta un esquema del proceso.

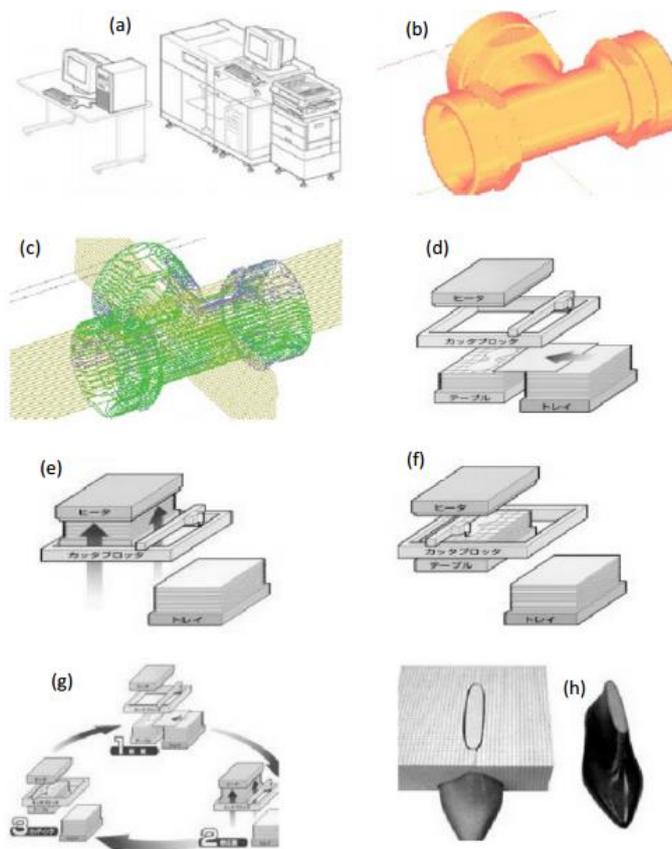


Figura 13. Esquema de fabricación por corte y laminado (PLT).  
Fuente: (Infante, 2012).

A continuación se presenta el detalle de los pasos mostrados en la Figura 13, los mismos que se mencionan en (Infante, 2012).

- 1.- Se cargan los datos de la pieza a prototipar en formato de archivos STL, del modelo a construir en el ordenador (Figura 13. a).
- 2.- Se orienta el modelo, con la ayuda del software, dentro del sistema para conseguir la mejor orientación para la construcción (Figura 13. b).
- 3.- Una vez orientado, el software del sistema procederá a cortar el modelo (Figura 13. c).
- 4.- Se genera la impresión a partir de los datos que proporciona cada una de las secciones del modelo. El polvo de resina es aplicado sobre una hoja de papel utilizando una impresora láser corriente típica, lo que se conoce como xerografía o fotocopiado (Figura 13. d).
- 5.- Un mecanismo de alineación ajusta la hoja impresa de papel en la capa anterior del modelo. Una prensa caliente se mueve sobre ellos presionando la hoja impresa. El prensado en caliente derrite el polvo de resina que se adhiere a las hojas. La prensa caliente también aplana la superficie superior impidiendo la formación de burbujas de aire entre las hojas (Figura 13. e).
- 6.- En la PC se generan entonces los datos de trazado sobre la base de los datos de la sección del modelo. Un cortador mecánico corta la capa superior del bloque a lo largo del contorno de la sección, así como las líneas de separación de la que se eliminará el exceso de papel después (Figura 13. f).
- 7.- Estos pasos se repiten hasta que el modelo está construido (Figura 13. g).
- 8.- Cuando la impresión, prensado en caliente y corte se ha completado, se elimina el papel sobrante. Una vez completado el modelo se realiza un acabado superficial de la pieza por métodos tradicionales de mecanizado (Figura 13. h).

### **2.3.5. Sinterización selectiva láser (SLS).**

La sinterización selectiva láser es una técnica de prototipado rápido que fabrica las piezas capa por capa. El material base es un polvo cuyas partículas miden casi

50 $\mu$ m, según (Infante, 2012). Para esta técnica es posible utilizar polvos de diferentes materiales. Un láser sinteriza las áreas seleccionadas causando que las partículas se fusionen y solidifiquen. El modo de generación de las piezas es similar a la Estereolitografía, que del mismo modo los elementos son generados de capa en capa, iniciando el proceso por las cotas más bajas y terminando por las superiores.

Se deposita una capa de polvo, de unas décimas de mm, en un contenedor previamente calentado a una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión del polvo. A reglón seguido un láser CO<sub>2</sub> sinteriza el polvo en los puntos seleccionados.

Como se menciona en (Infante, 2012), el proceso de resume en los siguientes pasos:

**Paso 1.** Se deposita una capa de polvo en el elevador y luego se presiona con un rodillo para que la superficie quede completamente plana.

**Paso 2.** Se emite una radiación láser de sinterización del polvo para consolidar la sección.

**Paso 3.** El elevador baja del espesor deseado y el proceso puede empezar de nuevo hasta completar la construcción del prototipo.

El proceso SLS se ilustra en la Figura 14.

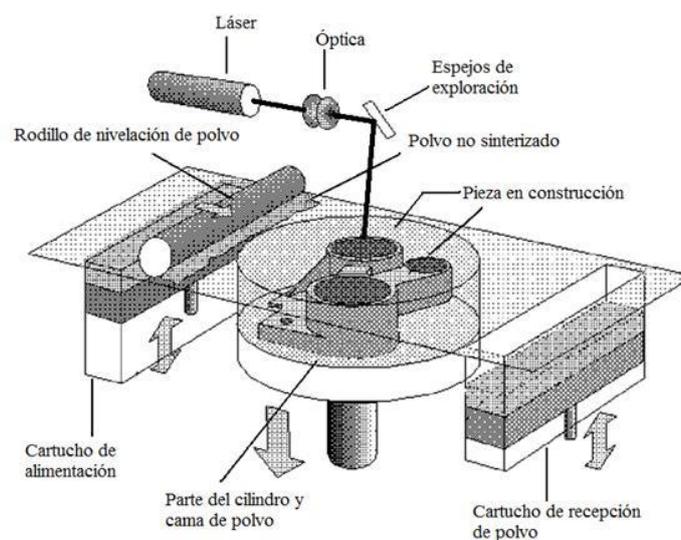


Figura 14. Esquema de funcionamiento SLS.

Fuente: (UNED, 2012).

### 2.3.6. Proyección por aglutinante (3DP).

Según (UNED, 2012), en el proceso se deposita una capa de polvo sobre una plataforma en un pistón y posteriormente se realiza la impresión de una solución de aglutinante sobre el polvo suelto, dando forma a las distintas secciones transversales que conforman el modelo. El aglutinante mantendrá el polvo fijado mientras que el resto de polvo permanece suelto.

En la Figura 15, se ilustra un esquema del proceso 3DP.

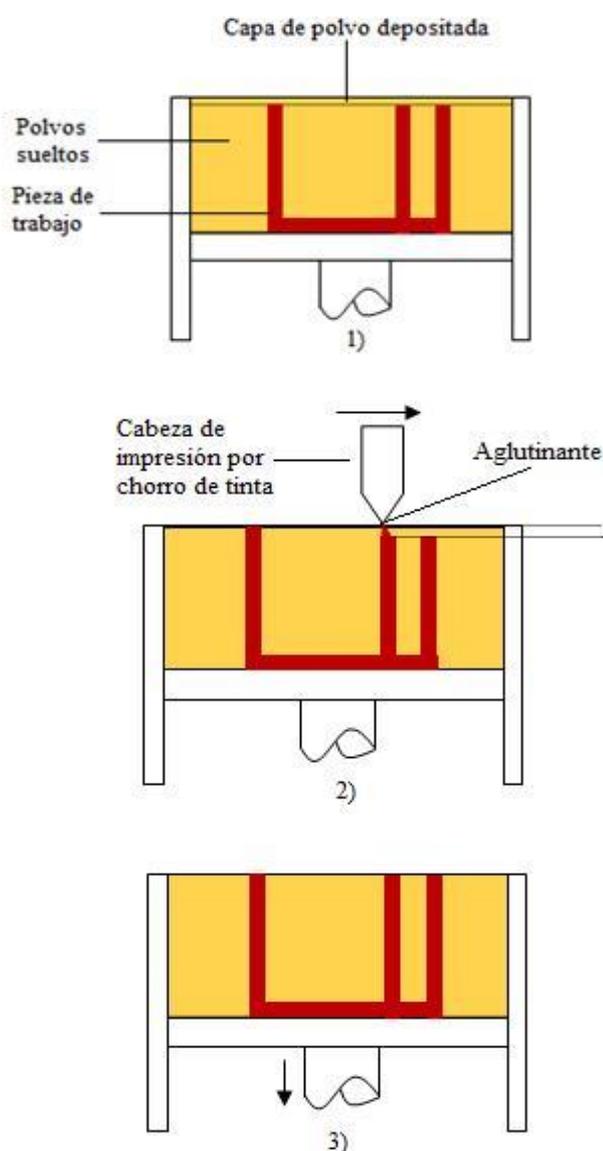


Figura 15. Maquinaria de 3DP.

Fuente: (UNED, 2012).

En (Infante, 2012), muestra el proceso de producción en forma más detallada.

**Paso 1.** La máquina deposita una capa de polvo de la caja de alimentación. Para posteriormente realizar la impresión de una solución de aglutinante sobre el polvo depositado, formando la primera sección transversal. El aglutinante se deposita en áreas correspondientes a las secciones transversales de la pieza sólida conforme al modelo CAD creado previamente. Este aglutinante mantendrá el polvo fijado mientras que el resto de polvo permanece suelto hasta el final del proceso, sirviendo de apoyo a la pieza en construcción. El prototipo se va generando capa por capa.

**Paso 2.** La pieza se construye sobre una plataforma cuyo nivel está controlado mediante un pistón. Cuando una sección transversal se ha completado, el pistón de construcción baja y se extiende de nuevo una capa de polvo sobre su superficie, repitiéndose el proceso para cada capa. La pieza prototipada va creciendo capa a capa en el pistón hasta que se completa su generación.

**Paso 3.** Finalmente se eleva el pistón y se aspira el polvo suelto dejando al descubierto la pieza completa. Una vez retirado, el prototipo se puede tratar para obtener un modelo más robusto, por ejemplo puede ser sumergido en cera. De igual forma se pueden lijar, pintar o incluso ser infiltradas con resina.

## **2.4. Deposición de hilo fundido (FDM).**

Como se menciona en (Stratasys, 2015), el fundador de Stratasys, Scott Crump, inventó la tecnología Fused Deposition Modeling (FDM), hace más de 20 años, y fue patentado por dicha empresa. Stratasys ha continuado liderando la revolución de las impresoras 3D, mediante el desarrollo de una gama de sistemas atractivos para el usuario.

La tecnología FDM crea prototipos funcionales y piezas finales en materiales termoplásticos estándar, de nivel de ingeniería y de alto rendimiento. Es la única tecnología de impresión 3D profesional que utiliza termoplásticos de nivel de producción, para que las piezas tengan las características mecánicas requeridas por el usuario.

En este proceso, una boquilla que se mueve en el plano XY horizontal deposita un hilo de material fundido que se solidifica al contacto con el aire por sobre la capa anterior, formando capa por capa la pieza requerida, según (UNED, 2012). A continuación en la Figura 16, se detalla el proceso FDM.

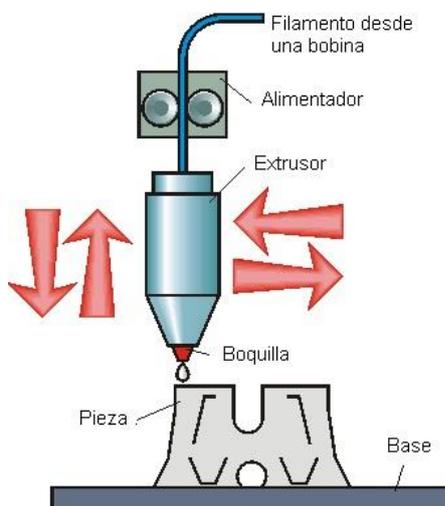


Figura 16. Esquema general del funcionamiento de un proceso FDM.  
Fuente: (Mariano, 2013).

### 2.4.1. Ventajas de la tecnología FDM

En (Stratasys, 2015), se mencionan las siguientes ventajas.

- La tecnología es limpia y fácil de usar.
- Los termoplásticos de producción compatibles son estables mecánicamente.
- La tecnología FDM presenta la capacidad de generar piezas con formas complejas que presentasen mucha dificultad de ser maquinadas mediante los métodos tradicionales.

### 2.4.2. Estructuras más empleadas para impresión con tecnología FDM

Dentro de los tipos de estructura para impresoras 3D se pueden mencionar dos como las más relevantes: las de estructura de robot cartesiano y las de estructura de robot delta.

### **2.4.2.1. Impresoras 3D estructura robot cartesiano.**

En (Eivar, 2009) menciona que en un robot cartesiano las primeras tres articulaciones son del tipo prismático, proporcionando un espacio de trabajo en forma cúbica.

En un robot cartesiano hay tres ejes ortogonales, situados a lo largo de los ejes x, y, z de un sistema de coordenadas cartesianas. Las posiciones de las articulaciones son por lo tanto idénticas a las coordenadas de la posición del efector final, haciendo que este robot sea de los más sencillos de controlar. En la actualidad es la estructura más utilizada para el diseño de la estructura de las impresoras 3D, por su versatilidad para alcanzar los diferentes puntos en el espacio.

Detallando el funcionamiento de la impresora 3D cartesiana, se menciona que dicha estructura realiza movimientos interpolados en los ejes XYZ, mediante la acción de motores, que por lo general para la estructura cartesiana son motores a pasos. Esta estructura se encarga de posicionar y mover el extrusor del material, que consta de un eje y un generador de calor controlado, para mantener una temperatura elevada constante, con la finalidad de fundir el hilo de plástico, como ejemplo se menciona 210° para el PLA (Interempresas, 2014). Dicho hilo de plástico está enrollado en un carrete y es desenrollado por la acción de un cuarto motor, que puede estar junto o separado del extrusor. Estos motores son gobernados por un controlador, que se encarga de convertir el código posicional de los puntos en el espacio pertenecientes a la pieza a ser manufacturada, en pulsos para energizar los motores. En la Figura 17, se visualiza una impresora 3D con movimientos cartesianos, cuyo funcionamiento ya fue detallado.



Figura 17. Impresora 3D con la estructura de un robot cartesiano.  
Fuente: (Imprimalia3D, 2014).

### **2.4.2.2. Impresoras 3D estructura robot delta.**

Como se menciona en (Movytech, 2013), el término "robot delta" se refiere a un diseño utilizando un conjunto de tres brazos metálicos que se deslizan a lo largo de 3 columnas y confluyen en el efector final, que en el caso de las impresoras 3D es el extrusor.

Para controlar el movimiento de lo que será la impresión, tal como se observa en la Figura 18, manteniendo la orientación plana de la terminal de agarre. En otras palabras, moviéndose de arriba hacia abajo con tres brazos, de esta forma podemos posicionar el cabezal de extrusión en el espacio 3D, a diferencia de un tradicional X, Y. Este sistema de control de eje Z, está diseñado para usarse sin motor y está vinculada a un solo eje.

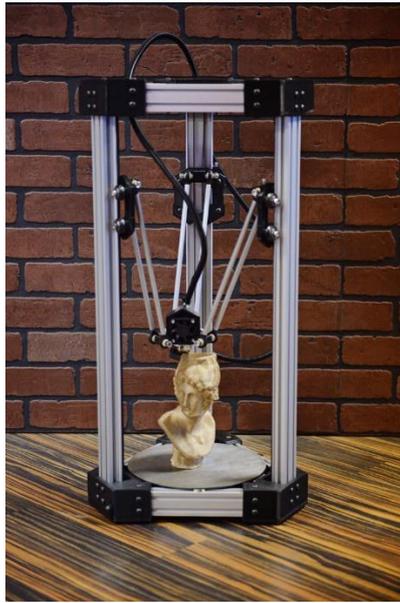


Figura 18. Impresora 3D robot delta.  
Fuente: (Movytech, 2013).

### 2.4.2.3. Impresoras 3D estructura polar Theta.

En (HWlibre, 2014), se menciona a Theta como una impresora que no usa las coordenadas tradicionales sino que usar coordenadas polares y que además tiene hasta 4 extrusores, con lo que se podrá imprimir objetos de hasta 4 materiales distintos.

Una impresora polar presenta un funcionamiento similar al de un tocadiscos antiguo (Menetray, 2013). Los objetos se imprimen en un plato giratorio. La ventaja es que se puede tener muchos extrusores. Cada extrusor está en el extremo de un brazo que gira. El plato giratorio se denomina eje  $\Theta$  ("theta") y el brazo oscilante se llama eje R.

Introducir cuatro extrusores haría que no solo la impresora consumiese mucha energía, sino que la impresión de cada pieza se ralentizase. En (HWlibre,2014), menciona que dicho problema se ha solucionado gracias al uso de coordenadas polares. Por un lado, el plato giratorio dónde se sitúa “la cama caliente”, es lo que se conoce como la coordenada Theta, que da el nombre a la impresora y una coordenada R que se materializa gracias a un brazo oscilante. Este tipo de coordenadas hacen que la impresión sea más rápida por el movimiento simultáneo de los extrusores y la base de la impresión.

En la Figura 19., se ve tres ilustraciones una impresora polar Theta con 4 extrusores de la marca Pimaker.



Figura 19. Impresora 3D con 4 extrusores estructura polar Theta.  
Fuente: [Menetray, 2013].

### 2.4.3. Proceso de producción con tecnología FDM.

Las impresoras 3D que utilizan la tecnología FDM crean piezas capa por capa de abajo a arriba calentando y extrudiendo el filamento termoplástico. El proceso se resume a continuación, en base a (Stratasys, 2015).

**Procesado previo:** El software de preparación de bandeja lamina y coloca un archivo CAD 3D. A continuación, calcula la trayectoria para extrudir el material termoplástico y cualquier material de soporte necesario.

**Producción:** La impresora 3D calienta el material termoplástico hasta que alcanza un estado semilíquido y lo deposita en gotas ultra finas a lo largo de la trayectoria de extrusión. En los casos en los que se precisa un soporte o apoyo, la impresora 3D deposita un material eliminable que hace las veces de andamiaje.

**Post-procesado:** El usuario retira el material de soporte o lo disuelve en agua y detergente, y a continuación la pieza ya se puede utilizar.

En la Figura 20 se puede visualizar un esquema de un proceso de producción con tecnología FDM, con material de soporte proporcionado por una segunda extrusora.

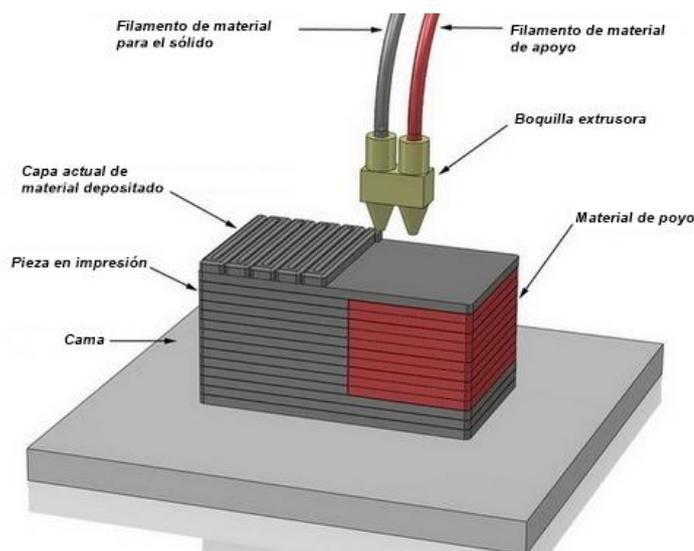


Figura 20. Tecnología FDM.  
Fuente: (HAZLO3D, 2014).

## 2.5. Materia prima para la impresión 3D.

Según se dice en (Pablo.Bejerano, 2013), la materia prima más utilizada para hacer funcionar a las impresoras 3D son los plásticos ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) y los PLA (ácido poliláctico), llamados termoplásticos por su capacidad para fundirse a altas temperaturas. Dicha característica es imprescindible para la impresión en tres dimensiones, ya que el material debe ser expulsado a través de una boquilla en forma de filamento. Al contacto con el aire se produce un enfriamiento repentino que convierte al plástico en estado sólido.



Figura 21 Ejemplos de termoplásticos usados en el proceso de impresión 3D.  
Fuente: (3DPRINTXPERTS, 2015)

## **2.5.1. Termoplástico Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS).**

El ABS es el nombre dado a una familia de termoplásticos. Según (Mariano, ABS, 2011) le llama plástico de ingeniería, debido a que es un plástico cuya elaboración y procesamiento es más complejo que los plásticos comunes.

El acrónimo ABS deriva de los tres monómeros utilizados para producirlo: acrilonitrilo, butadieno y estireno. Por estar constituido por tres monómeros diferentes se lo denomina terpolímero.

### **2.5.1.1. Propiedades del termoplástico ABS.**

(Mariano, ABS, 2011) menciona que los materiales de ABS tienen importantes propiedades en ingeniería, como buena resistencia mecánica, resistencia al impacto, y presentan facilidad para el procesado.

La resistencia al impacto de los plásticos ABS se ve incrementada al aumentar el porcentaje de contenido en butadieno pero disminuyen entonces las propiedades de resistencia a la tensión y disminuye la temperatura de deformación por calor.

El amplio rango de propiedades que exhibe el ABS es debido a las propiedades que presentan cada uno de sus componentes. Donde según (Mariano, ABS, 2011):

El acrilonitrilo proporciona:

- Resistencia térmica
- Resistencia química
- Resistencia a la fatiga
- Dureza y rigidez

El butadieno proporciona:

- Ductilidad a baja temperatura
- Resistencia al impacto
- Resistencia a la fusión

El estireno proporciona:

- Facilidad de procesado (fluidez)
- Brillo
- Dureza y rigidez

### **2.5.1.2. Utilización de ABS como materia prima en la impresión 3D.**

En (UNDOprototipos, 2015) se menciona que el ABS es un material fuerte y duradero, de la categoría de los termoplásticos, utilizado en muchas industrias. Es un material ideal para diseño conceptual a través del diseño de prototipos. La unión del ABS con la tecnología FDM da la posibilidad de crear piezas reales directamente desde archivos 3D.



Figura 22. Carretes de ABS para impresión 3D.  
Fuente: (Frontela, 2015)

### **2.5.2. Termoplástico Poliácido láctico (PLA).**

El ácido poliláctico (PLA), es un biopolímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico, según (TextosCientíficos.com, 2009). Debido a su biodegradabilidad, propiedades de barrera y biocompatibilidad, éste biopolímero ha encontrado numerosas aplicaciones ya que presenta un amplio rango inusual de propiedades, desde el estado amorfo hasta el estado cristalino.

Como se menciona en (Tech, 2013) el PLA se obtiene a partir de recursos renovables, como son: almidón de maíz, almidón de patata, tapioca, caña de azúcar, etc.

### **2.5.2.1.Utilización del PLA como materia prima en la impresión 3D.**

En (Imprimiren3D, 2014) menciona la funcionalidad del PLA en el proceso de impresión en 3D, siendo este un excelente material para manufacturar con esta técnica. Algunas características son el poseer una gran dureza, y ser difícil de moldear, sin embargo el PLA presenta un buen acabado y brillo superficial. También se menciona que el PLA posee un olor agradable, mientras se lo manufactura.



Figura 23 Carretes de PLA para impresión 3D.  
Fuente: (Icreativa.es, 2008)

### **2.5.2.2.Aplicaciones del PLA en impresión 3D.**

Como se menciona en (Icreativa.es, 2008), algunas de las aplicaciones para el proceso de impresión en 3D son:

- PLA imprime piezas de hasta un máximo de 200mm en X y/o Y.
- PLA no necesita material soporte para imprimir las piezas.
- PLA imprime piezas que necesitan desprender el material soporte.
- Se pueden producir contracciones y deformaciones.

### **2.5.3. Acetato de Polivinilo (PVA)**

Es un polímero obtenido mediante la polimerización del acetato de Vinilo, según se menciona en (Filament2print, 2016). El filamento de este material es soluble en agua ideal para ser utilizado como material de soporte en impresiones 3D. Es un excelente material de apoyo para piezas que necesitan estructuras de soporte para el cuál se deberá tener una impresora 3D con doble extrusor o cabezal. La temperatura de extrusión está entre los 160 y los 180 °C.



Figura 24. Carrete de PVA para impresión 3D.  
Fuente: (Filament2print, 2016).

En (Filament2print, 2016), menciona que tras acabar la impresión 3D de la pieza bastará con introducir esta en un recipiente con agua fría o caliente durante unas dos horas para que este material de soporte PVA se disuelva totalmente y no quede rastro de él (El agua caliente acelerará el proceso de disolución del PVA, si bien en agua fría es totalmente soluble). Debido a que es un material hidrosoluble es imprescindible guardar este material en un ambiente seco. Para ello las bobinas de PVA vienen en el interior de una bolsa con auto-sellado para aislar el filamento de la humedad del aire. Con el PVA podrás realizar con tu impresora 3D de tecnología FFF/FDM piezas inimaginables si no fuese por la ayuda de este revolucionario filamento. Este revolucionario material está diseñado para obtener una gran adherencia con materiales como el PLA, ABS o el Nylon.

## Resumen:

El prototipado rápido es un proceso de manufactura, que consiste en agregar material capa por capa, para generar piezas que pueden ser, metálicas, cerámicas o

plásticas. Estos sistemas surgieron en 1984 con la introducción de la tecnología de estereolitografía.

En general el proceso de prototipado rápido consta de los siguientes pasos: Construcción del modelo en un software CAD, convertir el modelo CAD en formato STL, revisar y arreglar el archivo STL, generar estructuras de soporte si aplica, cortar el archivo STL en forma de capas, imprimir el modelo físico, remover de las estructuras de soporte si aplica, post-procesar la pieza en caso de ser requerida.

Algunas de las tecnologías de prototipado rápido más difundidas son: **La Estereolitografía (SLA)**, que consiste en emplear un láser UV que se proyecta sobre un baño de resina fotosensible líquida para polimerizarla. **La fotopolimerización por luz UV (SGC)**, esta tecnología se basa en la solidificación de un fotopolímero o resina fotosensible. **La fabricación por corte y laminado (LOM)**, donde en una hoja de papel encolado se posiciona automáticamente sobre una plataforma y se prensa con un rodillo caliente que la adhiere a la hoja precedente. **La tecnología de laminación con papel (PLT)**, en la que el proceso se basa en el principio de fotocopia. **La Sinterización selectiva láser (SLS)**, que fabrica las piezas por capas, donde el material base es un polvo, y un láser sinteriza las áreas seleccionadas causando que las partículas se fusionen y solidifiquen. Y **la proyección por aglutinante (3DP)**, en el proceso se extiende una capa de polvo sobre una plataforma en un pistón y acto seguido se realiza la impresión de una solución de aglutinante sobre el polvo suelto, formando así las secciones transversales que conforman el modelo.

En el presente capítulo, hace un enfoque especial a la técnica de **Deposición por hilo fundido (FDM)**, que consiste en una boquilla que se mueve en el plano XY horizontal deposita un hilo de material a 1°C por debajo de su punto de fusión. En esta el hilo se solidifica inmediatamente sobre la capa precedente, formando la pieza capa por capa.

Las estructuras de las máquinas más empleadas para emplear la técnica FDM son: **Estructura de robot cartesiano**, donde las primeras tres articulaciones son del tipo prismático proporcionando un espacio de trabajo en forma de caja. Hay tres ejes de las juntas que son ortogonales situados a lo largo de ejes x, y, z de un sistema de coordenadas cartesianas. Las posiciones de las articulaciones son por lo tanto idénticas

a las coordenadas de la posición del efector final **Estructura de robot delta**, se refiere a un diseño utilizando tres conjuntos de brazos metálicos paralelos para controlar el movimiento de lo que será la impresión, manteniendo la orientación plana de la terminal de agarre. Y **estructura de robot polar o theta**, que es una impresora que no usa las coordenadas tradicionales sino que usar coordenadas polares y que además tiene hasta 4 extrusores.

La materia prima más utilizada para hacer funcionar a las impresoras 3D son los plásticos **ABS (acrilonitrilo butadieno estireno)** y los **PLA (ácido poliláctico)**, llamados termoplásticos por su capacidad para fundirse a altas temperaturas. Siendo el ABS denominado le llama plástico de ingeniería, debido a que es un plástico cuya elaboración y procesamiento es más complejo que los plásticos comunes. Las piezas de ABS tienen importantes propiedades en ingeniería, como buena resistencia mecánica, resistencia al impacto, y presentan facilidad para el procesado. Mientras que el PLA es un biopolímero termoplástico que debido a su biodegradabilidad, propiedades de barrera y biocompatibilidad, éste biopolímero ha encontrado numerosas aplicaciones ya que presenta un amplio rango inusual de propiedades, desde el estado amorfo hasta el estado cristalino. A diferencia del ABS que es un derivado del petróleo, el PLA se obtiene a partir de recursos renovables, como son: almidón de maíz, almidón de patata, tapioca, caña de azúcar, etc.

Una de las materias primas muy común para realizar impresiones de soporte es el **PVA (ácido de polivinilo)**. El filamento de este material es soluble en agua ideal para ser utilizado como material de soporte en impresiones 3D. Es un excelente material de apoyo para piezas que necesitan estructuras de soporte para el cuál se deberá tener una impresora 3D con doble extrusor o cabezal.

## Capítulo 3

### Diseño mecatrónico

En el presente capítulo se plantean los subsistemas que forman parte de la impresora 3D, haciendo un análisis de los criterios de selección de los mismos. Para posteriormente desarrollar y calcular los parámetros que darán estabilidad y precisión al funcionamiento a la impresora 3D. Los subsistemas se derivan de los 3 sistemas que conforman el proyecto que son: Sistema mecánico, eléctrico y control e interfaz.

#### **3.1. Parámetros para el diseño de la impresora 3D**

Para poder desarrollar el proyecto, se debe partir de ciertos parámetros que marcarán las pautas para el diseño de los distintos subsistemas involucrados en la impresora 3D. Dichos parámetros se detallan a continuación en la Tabla 1.

**Tabla 1.**  
Características requeridas en la impresora 3D.

Num	Característica	Detalle
1	Tamaño de la impresora	Entre 400x,400y,500z y 600x,600y,700z
2	Volumen de impresión	Mínimo 150x150x150mm
3	Número de extrusores	2, uno para material base y otro para el material de soporte
4	Control ambiente	30°C - 70°C
5	Materia prima para las piezas	ABS y PLA
6	Materia prima para el soporte	PVA
7	Software de control	Software Libre
8	Software del HMI	Software Libre
9	Ingreso de datos	Serial USB, tarjeta inteligente LCD, tarjeta SD

La Tabla 1, muestra la base de la cual se parte para el diseño y selección de los diferentes subsistemas que forman parte de la estructura de la impresora 3D. Dichos parámetros y análisis se derivan de la realización de una matriz QFD (Figura 26). De la que parte el diseño y selección de los componentes a ser usados en la estructura de impresora 3D.

### 3.2. Matriz QFD (Quality Fuction Deployment)

Mediante la matriz QFD se busca diseñar la impresora 3D con doble extrusor basado en las necesidades de usuarios que requieran imprimir sus diseños, asegurando la mejor opción para satisfacer dichas necesidades con los recursos disponibles, desarrollando un diseño dirigido a satisfacer al usuario cumpliendo con la garantía de calidad que se utilizará en cada etapa de producción.

La estructura de la matriz QFD se la presenta en la Figura 25.

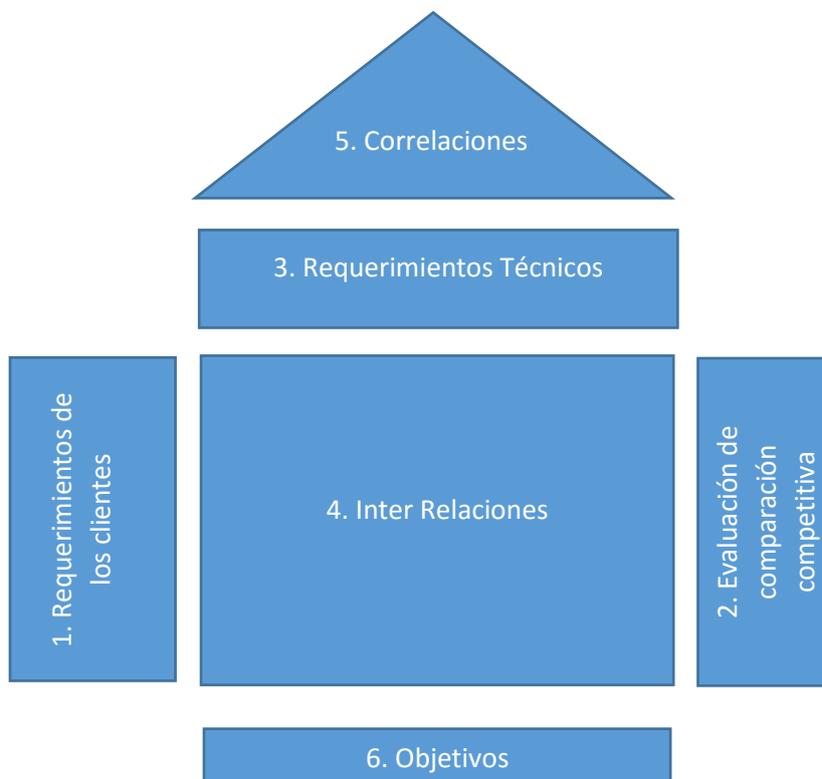


Figura 25. . Estructura de la Matriz QFD  
Fuente: (Herramientas ADMON, 2015)

A continuación se detalla cada una de las partes de la estructura QFD para el desarrollo del presente proyecto.

### **1. Requerimientos de los clientes**

Las necesidades de los usuarios de la tecnología de impresión 3D, tienen diversos requerimientos desde el plano comercial hasta el uso personal, destacando los siguientes:

- Diseño robusto y llamativo
- Económico
- Transportable, peso ligero
- Compatible con cualquier formato CAD
- Fácil de manejar
- Exactitud en impresiones
- Alta velocidad en impresiones

- Impresiones con excelentes acabados
- Amplio volumen interno de trabajo
- Impresión de diseños complejos

## **2. Evaluación de comparación competitiva**

En el país tenemos pocas marcas de impresoras con doble extrusor que son importadas y ninguna nacional como la del presente proyecto, se evalúa relacionándolas con los requerimientos de los usuarios.

## **3. Requerimientos técnicos**

Intervienen los requerimientos técnicos e ingenieriles para satisfacer las necesidades del usuario, los cuales deben ser llevados con alta calidad en todo su proceso

- Material resistente
- Diseño
- Automatización
- Software libre
- HMI
- Calibración
- Tolerancias
- Dos materiales ABS/PLA
- Impresión de soporte
- Ambiente controlado

## **4. Inter Relaciones**

Relaciona cuantitativa mente las necesidades de los clientes con las características de la calidad, Se utilizan notaciones gráficas que muestran relaciones "Fuertes", "Medias" o "Bajas".

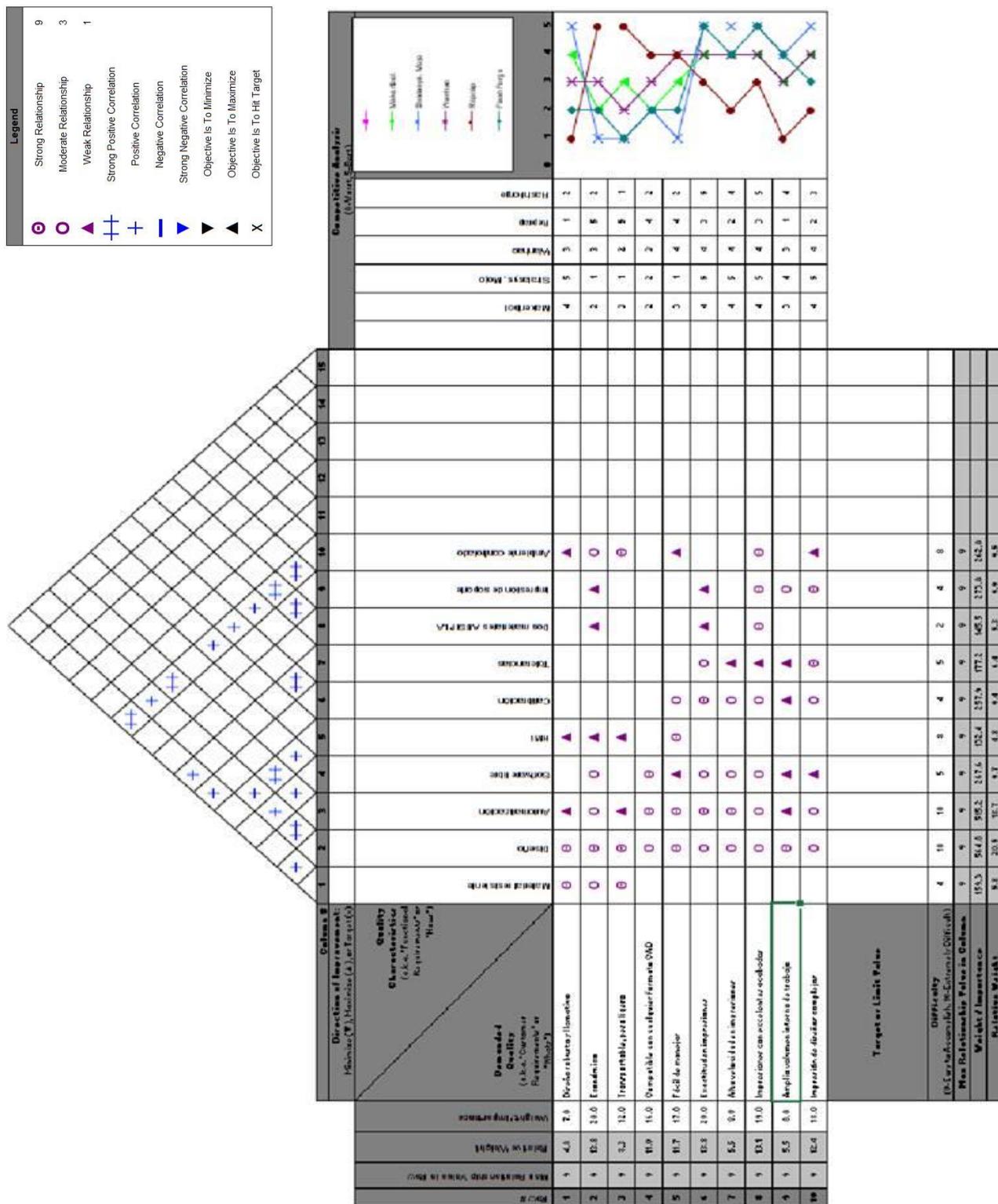
## **5. Correlaciones**

Se identifican las relaciones entre las características técnicas.

## **6. Objetivos**

Muestra los valores metas a alcanzar en cada característica técnica.

En la Figura 26 podemos apreciar la matriz QFD del presente proyecto.



### 3.2.1. Análisis de resultados de la matriz QFD

Se analiza los resultados según la estructura de la matriz QFD.

- **Requerimientos de los clientes.**

Según indica la matriz QFD vista en la Figura 3.2 se puede ordenar en orden jerárquico cual es la más importante o de mayor peso con una puntuación máxima de 20 como lo se indica a continuación.

**Tabla 2.**

Jerarquía de requerimientos del cliente para una impresora 3D.

<b>Importancia</b>	<b>Requerimiento del cliente</b>
20.0	Económico
20.0	Exactitud en impresiones
19.0	Impresiones con excelentes acabados
18.0	Impresión de diseños complejos
17.0	Fácil de manejar
16.0	Compatible con cualquier formato CAD
12.0	Transportable, peso ligero
8.0	Alta velocidad en impresiones
8.0	Amplio volumen interno de trabajo
7.0	Diseño robusto y llamativo

- **Evaluación de comparación competitiva.**

Los resultados obtenidos que se pueden ver en el recorte que se realizó de la matriz QFD en la Figura 3.3 indican cual es la mejor o peor impresora para satisfacer cada necesidad evaluando de 0 a 5 siendo 0 la peor y 5 la mejor opción, además de un gráfico de cómo evoluciona dicha impresora a todos los requerimientos, en cuanto más vertical sea y tenga más puntos coincidentes en el valor de 5 podemos determinar cuál es la mayor competencia frente a la impresora que se desarrollará en el presente proyecto.

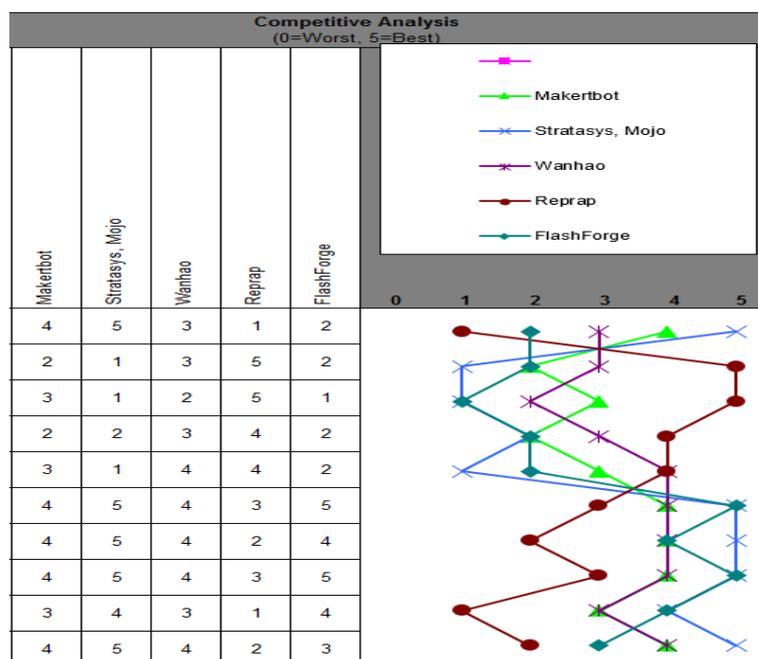


Figura 27. Evaluación de la competencia tomada de la matriz QFD.  
Fuente: (Herramientas ADMON, 2015).

- **Requerimientos técnicos.**

Se plantean 10 requerimientos técnicos para solucionar las necesidades de los clientes, siendo estos alcanzables y de disposición.

- **Inter Relaciones.**

Las interrelaciones que existen entre los requerimientos del cliente y de los usuarios se pueden apreciar en la Figura 28 en el cual cada signo indica lo siguiente

- ⊙ Relación Fuerte
- Relación Moderada
- ▲ Relación Débil

Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")									
	Material resistente	Diseño	Automatización	Software libre	HMI	Calibración	Tolerancias	Dos materiales ABS/PLA	Impresión de soporte	Ambiente controlado
Diseño robusto y llamativo	⊖	⊖	▲		▲					▲
Económico	○	⊖	○	○	▲			▲	▲	○
Transportable, peso ligero	⊖	⊖	▲		▲					⊖
Compatible con cualquier formato CAD		○	⊖	⊖						
Fácil de manejar		⊖	⊖	▲	⊖	○				▲
Exactitud en impresiones		○	⊖	○		⊖	○	▲	▲	
Alta velocidad en impresiones		○	⊖	○		○	▲			
Impresiones con excelentes acabados		○	○	○		○	▲	⊖	⊖	⊖
Amplio volumen interno de trabajo		⊖	▲	▲		▲	▲		○	
Impresión de diseños complejos		○	○	▲		○	⊖		⊖	▲

Figura 28. Evaluación de las interrelaciones tomadas de la matriz QFD.  
Fuente: (Herramientas ADMON, 2015).

Analizando los resultados podemos obtener cuál de los requerimientos técnicos tienen mayor relación con la demanda de los clientes como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 3. Jerarquía de inter relaciones tomada de la matriz QFD.

Relación con Demanda del cliente	Requerimiento Técnico
68	Diseño
48	Automatización
24	Software Libre
24	Ambiente controlado
23	Impresión de soporte
22	Calibración
21	material resistente
15	Tolerancias
12	HMI
11	Dos materiales ABS/PLA

- **Correlaciones**

La inter relación entre los requerimientos técnicos se establece por símbolos que indican el grado de ++ correlación

### Correlación Fuerte Positiva

- + Correlación Positiva
- Correlación Negativa
- ▼ Correlación Fuerte Negativa

De este modo podemos apreciar en la Figura 29 que el requerimiento técnico con mayor correlación con los demás es Ambiente controlado

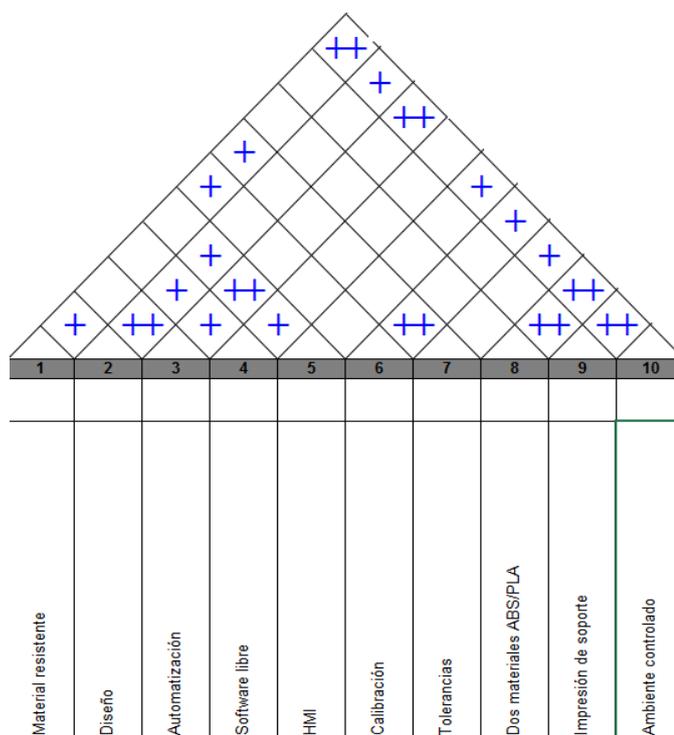


Figura 29. Análisis de correlación tomadas de la matriz QFD  
Fuente: (Herramientas ADMON, 2015)

- **Objetivos**

Se analizan en base a los requerimientos técnicos, indicando cual es el de mayor importancia y podemos asignar cuál tienen mayor complejidad según criterios de diseño.

	Material resistente	Diseño	Automatización	Software libre	HMI	Calibración	Tolerancias	Dos materiales ABS/PLA	Impresión de soporte	Ambiente controlado
<b>Target or Limit Value</b>										
<b>Difficulty</b> (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)	4	10	10	5	8	4	5	2	4	8
<b>Max Relationship Value in Column</b>	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
<b>Weight / Importance</b>	159.3	564.8	515.2	267.6	132.4	257.9	177.2	145.5	273.8	262.8
<b>Relative Weight</b>	5.8	20.5	18.7	9.7	4.8	9.4	6.4	5.3	9.9	9.5

Figura 30. Análisis de correlación tomadas de la matriz QFD.  
Fuente: (Herramientas ADMON, 2015).

### 3.3. Selección de los subsistemas

Partiendo de los 3 sistemas principales que conforman el desarrollo del proyecto que son el sistema mecánico, el sistema eléctrico y electrónico y el sistema de control e interfaz, se derivan subsistemas, mismos que se analizarán por separado y se compararán las diferentes alternativas de diseño para la selección de los elementos que conforman el hardware y software de la impresora 3D. Dichos subsistemas se detallan a continuación.

#### 3.3.1. Subsistema de estructura de la impresora 3D

La estructura de una impresora 3D depende del tipo de robot que los conforma, y de la forma en que sus eslabones son accionados, para dar el movimiento al efector final (extrusores) con relación a la base de deposición (cama caliente). De toda la gama de alternativas se analizarán 3 por su versatilidad y comercialidad.

- **Alternativa 1: Impresora 3D tipo cartesiana con elevación de la base de impresión.**

Es un tipo de impresora de movilidad de robot cartesiano en donde los eslabones del mismo se mueven en el espacio a lo largo de los ejes coordenados. En el caso de

la Alternativa 1 el efector final, que son los 2 extrusores, se mantiene en una altura fija mientras realizan su movimiento en el plano horizontal. En tanto que la base de deposición de material es la que sube o baja, dando forma a la pieza final. Un ejemplo comercial de este tipo de impresora 3D es la impresora MakerBot Replicator (Figura 31).



Figura 31. Impresora cartesiana con elevación de la base de impresión, MakerBot Replicator.

Fuente: (MakerBot, 2016).

- **Alternativa 2: Impresora 3D tipo cartesiana con elevación de los extrusores.**

Es un tipo de impresora de movilidad de robot cartesiano en donde los eslabones del mismo se mueven en el espacio a lo largo de los ejes coordenados. En el caso de la Alternativa 2 el efector final, que son los 2 extrusores, se mueven en un plano vertical, ya que a la vez que se elevan o descienden, se mueven en un eje transversal. En tanto que la base de deposición de material de mantiene en una altura fija en la parte inferior de la impresora pero realiza movimientos en un eje horizontal, dando forma a la pieza final. Un ejemplo comercial de este tipo de impresora 3D es la impresora Prusa i3 (Figura 32).

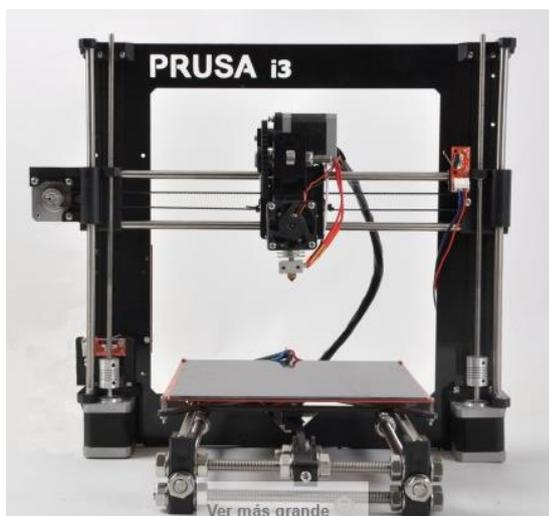


Figura 32. Impresora cartesiana con elevación de los extrusores, Prusa i3.  
Fuente: (Replikeo, 2015).

- **Alternativa 3: Impresora 3D tipo delta.**

La impresora 3D tipo delta es una máquina que presenta una movilidad de robot delta, lo que significa un diseño conjunto de 3 brazos que se deslizan a lo largo de 3 columnas paralelas y equidistantes entre sí. Los 3 brazos confluyen en un punto focal, donde se ubica el extrusor. Mientras que la base de impresión es circular, a diferencia de la base de las impresoras de estructura cartesiana que son cuadradas. También la base de deposición o cama caliente en las impresoras 3D tipo delta, permanece completamente estática, mientras todo el movimiento lo hacen sus 3 brazos. Un ejemplo comercial de impresoras 3D tipo delta es la Rostock Max (Figura 33).



Figura 33. Impresora 3D tipo delta, Rostock Max.  
Fuente: (3DDELTAprinting, 2015).

### **3.3.1.1. Parámetros a ser considerados para la selección**

Una vez planteadas las opciones para el presente subsistema, se deben determinar las características a ser consideradas para la selección de la mejor alternativa, las cuales son:

- Relación entre el tamaño de la máquina y el de la pieza impresa.
- Disponibilidad para el uso de doble extrusor.
- Velocidad de trabajo.
- Dificultad de manufacturación y programación de la máquina.
- Costo de fabricación de la máquina.

### **3.3.1.2. Determinación de la mejor alternativa**

Luego de determinar los parámetros a considerar en la selección de la mejor alternativa de subsistema, se debe hacer una comparación entre las 3 opciones. Dicha

comparación se desarrolla en la Tabla 5. Las ponderaciones para las diferentes alternativas se calificarán en una escala de 1 a 5. Siendo 1 la calificación más deficiente y 5 la de mejor ponderación.

**Tabla 4.**

Selección de la alternativa para el tipo de estructura de la impresora 3D.

Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
<b>Relación entre el tamaño de la máquina y el de la pieza impresa.</b>	4	2	3
<b>Disponibilidad para el uso de doble extrusor.</b>	5	2	3
<b>Velocidad de trabajo.</b>	4	3	5
<b>Dificultad de manufacturación y programación de la máquina.</b>	4	4	3
<b>Costo de fabricación de la máquina.</b>	4	4	4
<b>Ponderación Total</b>	21	15	18

De la Tabla 5, se determina que la opción más relevante para el propósito del proyecto el cual consiste en realizar una impresora 3D con impresión de soporte en ambiente controlado, es Alternativa 1, que corresponde a una impresora 3D tipo cartesiana con elevación de la base de impresión.

### **3.3.2. Subsistema de generación de movimiento**

Luego de haber determinado el tipo de impresora 3D como una cartesiana de elevación de su base de impresión. Se debe determinar el tipo de transmisión de movimiento para cada uno de los ejes y el tipo de motor que se empleará para producir el movimiento de los ejes de la máquina.

#### **3.3.2.1. Transmisión de movimiento**

Se debe determinar la manera más idónea de transmitir y transformar el movimiento circular que realizan los motores hacia cada uno de los 3 ejes del sistema cartesiano que conforman la estructura de la impresora 3D. Para esto se mencionan las siguientes alternativas de transmisión de movimiento.

- **Alternativa 1: Transmisión de movimiento por Tornillo sin fin – Tuerca.**

En este sistema de transmisión, el motor ejerce un movimiento giratorio sobre el tornillo sin fin, el cual al hacer contacto con la tuerca, impulsa linealmente a la misma, esto da al sistema una ventaja mecánica aumentando la fuerza de empuje en la tuerca con respecto al torque de salida del motor, y al mismo tiempo permite un control de movimiento de mayor precisión causada por la reducción en la velocidad de salida. Este es uno de los mecanismos que permiten la mayor transmisión de potencia. Dicho sistema de transmisión se visualiza en la Figura 34.



Figura 34. Transmisión tornillo sin fin - tuerca.  
Fuente: (WMH, 2016).

- **Alternativa 2: Transmisión de movimiento por Piñón – Correa dentada.**

En este tipo de sistema el piñón transmite el movimiento hacia otro piñón o engrane, mediante una correa dentada con un paso igual al del piñón. Y la relación de transmisión es igual a la relación de dientes entre el piñón motor y el engrane inducido. Una de las ventajas de este tipo de transmisión es la versatilidad para el montaje de los componentes a diferentes distancias. Además posee la capacidad de transmitir una mayor potencia que un juego de polea – banda plana. Dicho sistema de transmisión se visualiza en la Figura 35.

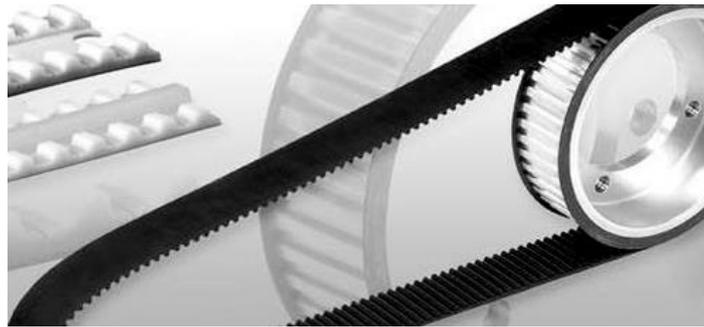


Figura 35- Transmisión tornillo piñón – correa dentada.  
Fuente: (WMH, 2016).

- **Alternativa 3: Transmisión de movimiento por Polea – Banda plana.**

En este tipo de sistema la polea transmite el movimiento hacia otra polea, mediante una banda plana. Donde la relación de transmisión es igual a la relación entre los diámetros de las poleas que entran en contacto. Una de las ventajas de este tipo de transmisión es la versatilidad para el montaje de los componentes a diferentes distancias. Pero posee la desventaja de transmitir potencias menores a los otros sistemas de transmisión conocidos. Dicho sistema de transmisión se visualiza en la Figura 36.

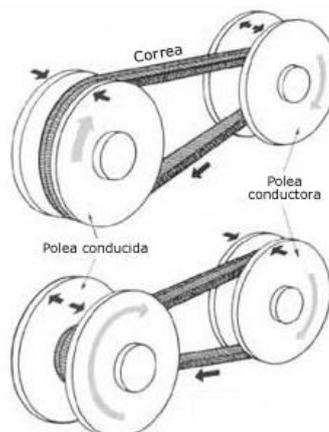


Figura 36. Transmisión polea – banda plana.  
Fuente: (Blogdiario, 2014).

### 3.3.2.1.1. Parámetros a ser considerados para la selección

Una vez planteadas las opciones para el presente subsistema, se deben determinar las características a ser consideradas para la selección de la mejor alternativa, las cuales son:

- Permite mayor transmisión de potencia.
- Velocidad en el movimiento.
- Aumento de fuerza.
- Facilidad de fabricación e instalación.
- Costo de montaje del sistema.

### **3.3.2.1.2. Determinación de la mejor alternativa**

Luego de determinar los parámetros a considerar en la selección de la mejor alternativa de subsistema, se debe hacer una comparación entre las 3 opciones. Dicha comparación se desarrolla en la Tabla 5. Las ponderaciones para las diferentes alternativas se calificarán en una escala de 1 a 5. Siendo 1 la calificación más deficiente y 5 la de mejor ponderación.

**Tabla 5.**

Selección de la alternativa para la transmisión de movimiento.

Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
<b>Permite mayor transmisión de potencia.</b>	5	3	2
<b>Velocidad en el movimiento.</b>	2	4	3
<b>Aumento de fuerza.</b>	5	3	2
<b>Facilidad de fabricación e instalación.</b>	3	4	5
<b>Costo de montaje del sistema.</b>	3	4	3
<b>Ponderación Total</b>	18	18	15

De la Tabla 5, se determina que la opción más idónea para el mecanismo de elevación de la base de impresión (movimiento en el eje z) es la Alternativa 1 transmisión tornillo sin fin – tuerca, ya que se necesita elevar un peso considerable al mismo tiempo que el movimiento debe ser lento y preciso para generar las impresiones capa por capa.

Del mismo nodo se determina que la opción más idónea para los mecanismos de transmisión de movimiento para los ejes que forman el plano horizontal (ejes X e Y), es la Alternativa 2 transmisión piñón – correa dentada, por tener la capacidad de transmitir una potencia moderada, ser de fácil montaje y tener la capacidad de moverse rápidamente.

### 3.3.2.2. Alternativas de Motores

Los motores son los encargados de generar el movimiento de los ejes que conforman la estructura interna de la impresora 3D y traslada a los extrusores en todo el espacio de trabajo para dar forma a la pieza. Para la selección del tipo de motor se presentan 2 alternativas.

- **Alternativa 1: Motor a pasos.**

Es un motor que trabaja con corriente alterna enviando voltaje en secuencia a los terminales de sus bobinados, haciendo que el motor se mueva paso a paso. La velocidad depende de que tan rápido se realice el cambio en la energización de las bobinas del motor. El torque depende de la velocidad a la que está girando el motor. Y la magnitud del paso depende del tipo de motor paso a pasos. Además tiene la ventaja de que existen drivers que regulan la potencia del mismo regulando el flujo de corriente y también pueden reducir el tamaño de los pasos, para aumentar la precisión del motor. Un ejemplo de motor paso a pasos comercial muy usado para impresiones 3D es el NEMA 17 este motor se visualiza en la Figura 37.



Figura 37. Motor a pasos NEMA 17.  
Fuente: (LINEAR, 2011).

- **Alternativa 2: Motor DC.**

En este tipo de motor funciona con corriente continua y su velocidad depende de la cantidad de voltaje enviado a sus terminales, pero el torque a bajas velocidades es muy bajo comparado con el torque generado un motor a pasos. Dicho motor se visualiza en la Figura 38.



Figura 38. Motor DC.  
Fuente: (MotionDynamics, 2015).

### **3.3.2.2.1. Parámetros a ser considerados para la selección**

Una vez planteadas las opciones para el presente subsistema, se deben determinar las características a ser consideradas para la selección de la mejor alternativa, las cuales son:

- Torque a bajas velocidades.
- Torque a altas velocidades.
- Precisión en el control.
- Controlabilidad.
- Costo del motor.

### **3.3.2.2.2. Determinación de la mejor alternativa**

Luego de determinar los parámetros a considerar en la selección de la mejor alternativa de subsistema, se debe hacer una comparación entre las 3 opciones. Dicha

comparación se desarrolla en la Tabla 6. Las ponderaciones para las diferentes alternativas se calificarán en una escala de 1 a 5. Siendo 1 la calificación más deficiente y 5 la de mejor ponderación.

**Tabla 6.**

Selección de la alternativa para el tipo de motor.

Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2
<b>Torque a bajas velocidades.</b>	5	1
<b>Torque a altas velocidades.</b>	3	5
<b>Precisión en el control.</b>	5	3
<b>Controlabilidad.</b>	5	3
<b>Costo del motor.</b>	4	4
<b>Ponderación Total</b>	22	16

De la Tabla 6, se determina que la opción más idónea para el tipo de motor es la Alternativa 1 el motor a pasos, por su alta controlabilidad, su alta precisión, y su torque moderado tanto a altas como a bajas velocidades.

### 3.3.3. Subsistema de Extrusión

El extrusor es una parte fundamental en una impresora 3D, este puede variar según los requerimientos de la impresora pero en si todas tienen el mismo propósito, el cual es tomar el filamento de plástico de la bobina o carrete y depositarlo fundido, según los parámetros generados por código G, en la superficie de impresión.

El extrusor está compuesto básicamente de:

- Motor paso a paso
- Engranaje de tracción
- Engranaje Reductor
- Rodamiento de precisión
- Guía del filamento
- Hotend
- Sensor de temperatura
- Boquilla de salida o Nozzle

Existen dos alternativas de extrusión dentro de la impresión 3D estos son:

- **Alternativos 1: Extrusión Directa.**

Este tipo de extrusión consiste en pasar el filamento directamente desde el engrane que absorbe el filamento hasta la boquilla que lo deposita fundido. Presenta un diseño compacto y sencillo incluso de fácil manejo y mantenimiento. En la Figura 39, se indica a detalle.

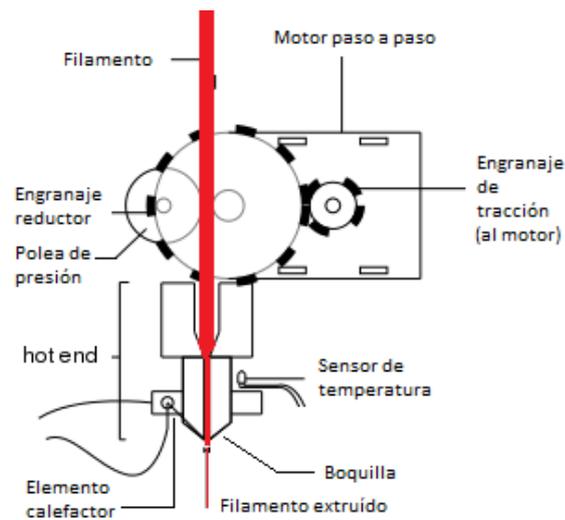


Figura 39. Detalle de extrusión Directa.  
Fuente: (Herramientas ADMON, 2015).

- **Alternativa 2: Extrusión Bowden.**

Esta alternativa de extrusión consiste en tener el motor de empuje separado del Hotend, llevando el filamento a través de una tubería flexible a la boquilla de impresión. Dicho proceso se observa en la Figura 40.

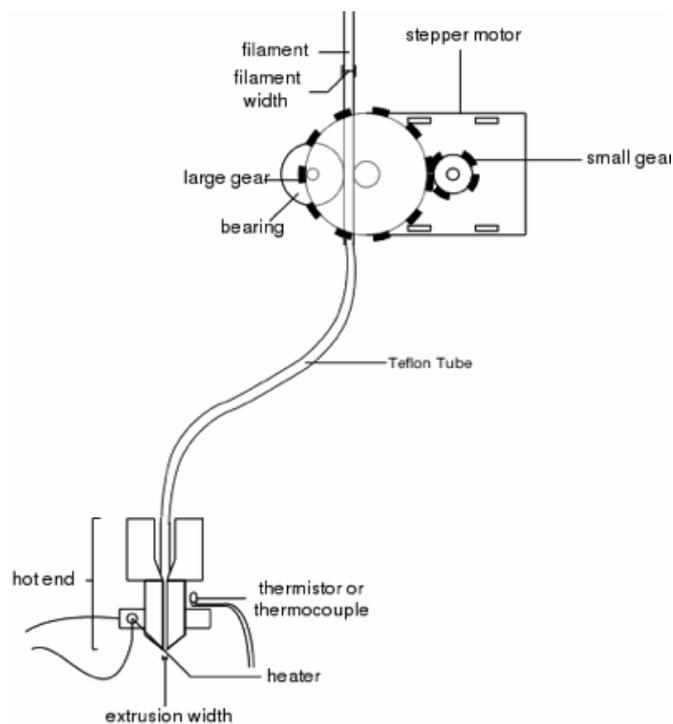


Figura 40. Detalle de extrusión Bowden.  
Fuente: (Herramientas ADMON, 2015).

### 3.3.3.1. Parámetros a ser considerados para la selección del extrusor

Siguiendo la línea de la matriz QFD podemos plantear los siguientes parámetros:

- Costo
- Material con el que se puede imprimir
- Compatibilidad con accesorios estándar electrónicos y mecánicos
- Fácil manejo y mantenimiento para el usuario

### 3.3.3.2. Determinación de la mejor alternativa

Luego de determinar los parámetros a considerar en la selección de la mejor alternativa de subsistema, se debe hacer una comparación entre las 4 opciones. Dicha comparación se desarrolla en la Tabla 7. Las ponderaciones para las diferentes

alternativas se calificarán en una escala de 1 a 5. Siendo 1 la calificación más deficiente y 5 la de mejor ponderación.

**Tabla 7.**

Selección de las alternativas para el tipo de extrusor.

Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2
<b>Costo</b>	5	3
<b>Material con el que se puede imprimir</b>	5	1
<b>Compatibilidad con accesorios estándar electrónicos y mecánicos</b>	5	5
<b>Fácil manejo y mantenimiento para el usuario</b>	5	3
<b>Ponderación Total</b>	20	12

De la Tabla 7, se determina que la opción más relevante para el propósito del proyecto el cual consiste en realizar una impresora 3D con impresión de soporte en ambiente controlado, es Alternativa 1 correspondiente al tipo de extrusor directo ya que puede trabajar con materiales como ABS, PLA, PVA que son utilizados en el presente proyecto además de su bajo costo presenta una estructura robusta y de fácil manejo.

### 3.3.4. Subsistema de la base de impresión

La base de impresión puede variar según los requerimientos del usuario, del tamaño y estructura de la impresora y del filamento de impresión, existiendo alternativas como las que se citan a continuación.

- **Alternativa 1: rectangular/circular caliente.**

Estos dos tipos de geometría como se muestra en la Figura 41, pueden elevar su temperatura de 0 a 120°C dependiendo de los requerimientos del usuario, dispersando el calor por toda su área



Figura 41. Cama caliente con diferentes estructuras geométricas y tamaños.  
Fuente: (3D Impresoras y Suministros, 2016).

### • Alternativa 2: rectangular/circular fría.

Tiene una geometría variada al igual que la alternativa 1 variando únicamente en que estas no se las puede calentar no poseen ninguna conexión más que solo montar la base a la estructura de la impresora. En la Figura 42, podemos apreciar 2 tipos.

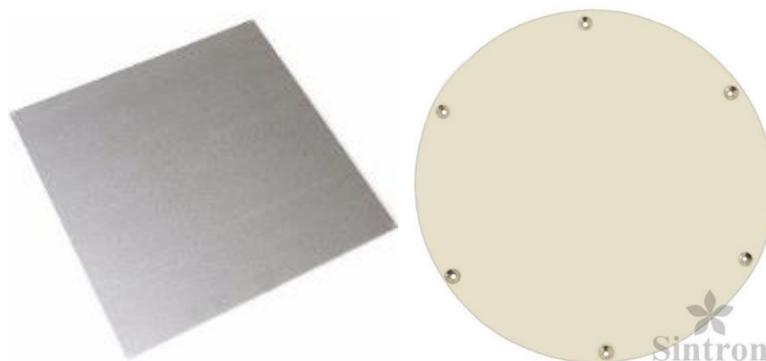


Figura 42. Cama con diferentes estructuras geométricas y tamaños.  
Fuente: (3D Impresoras y Suministros, 2016).

### 3.3.4.1. Parámetros a ser considerados para la selección de la base

Basándonos en la construcción de la impresora 3D con impresión de soporte del presente proyecto podemos limitar los siguientes parámetros

- Costo
- Diseño acorde a la alternativa 1 (Impresora 3D tipo cartesiana con elevación de la base de impresión)

- Posibilidad de calentar la base a diferentes temperaturas
- Base para impresiones en ABS, PLA y PVA

### 3.3.4.2. Determinación de la mejor alternativa

Luego de determinar los parámetros a considerar en la selección de la mejor alternativa de subsistema, se debe hacer una comparación entre las 3 opciones. Dicha comparación se desarrolla en la Tabla 8. Las ponderaciones para las diferentes alternativas se calificarán en una escala de 1 a 5. Siendo 1 la calificación más deficiente y 5 la de mejor ponderación.

**Tabla 8.**

Selección de las alternativas para el tipo de extrusor

Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2
<b>Costo</b>	3	5
<b>Diseño acorde a la alternativa 1 (Impresora 3D tipo cartesiana con elevación de la base de impresión)</b>	5	3
<b>Posibilidad de calentar la base a diferentes temperaturas</b>	5	0
<b>Base para impresiones en ABS, PLA y PVA</b>	5	1
<b>Ponderación Total</b>	18	9

De la Tabla 8, se determina que la opción más relevante para la construcción del presente proyecto es la Alternativa 1.

### 3.3.5. Subsistema para el ambiente controlado.

Uno de los requerimientos más importantes en el desarrollo del proyecto, es la capacidad de generar un control de la temperatura interna de la cámara principal de la impresora 3D.

#### 3.3.5.1. Etapa de potencia

Se requiere de elementos como relés para controlar un voltaje alto en corriente alterna, dicha corriente alimentará una niquelina, mediante pulsos de control enviados a bajo voltaje en corriente continua. Los relés pueden ser de 2 tipos:



### 3.3.5.1.1. Parámetros a ser considerados para la selección del relé

Por las necesidades de instalar un sistema para el control de temperatura del ambiente de impresión, se plantea los siguientes parámetros

- Costo
- Capaz de trabajar con señales AC
- Activado por señales DC
- Pueda conmutar sin generar chispa en su interior

### 3.3.5.1.2. Determinación de la mejor alternativa

Luego de determinar los parámetros a considerar en la selección de la mejor alternativa de subsistema, se debe hacer una comparación entre las 4 opciones. Dicha comparación se desarrolla en la Tabla 9. Las ponderaciones para las diferentes alternativas se calificarán en una escala de 1 a 5. Siendo 1 la calificación más deficiente y 5 la de mejor ponderación.

**Tabla 9.**

Selección de las alternativas para el tipo de extrusor.

Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2
<b>Costo</b>	3	5
<b>Capaz de trabajar con señales AC</b>	5	2
<b>Activado por señales DC</b>	5	5
<b>Conmutación sin generar chispa en su interior</b>	5	1
<b>Ponderación Total</b>	18	13

De la Tabla 9, se determina que la mejor opción para la etapa de potencia que activa la niquelina para el control de temperatura interno de la impresora 3D es mediante la Alternativa 1, que representa a un relé de estado sólido.

### 3.3.6. Subsistema de la tarjeta de control

La impresora 3D debe ser controlada por mediante una tarjeta que posea un microcontrolador en su composición, mismo que llevará el programa que permita a la máquina realizar la función para la cual fue programada. A continuación se describen algunas opciones de placas controladores que pueden comandar el funcionamiento de la impresora 3D.

- **Alternativa 1: Tarjeta Raspberry Pi.**

Es una computadora independiente que puede ejecutar un sistema operativo en Linux, según (Hacedores, 2014), puede realizar varias tareas, soportar dos puertos USB y conectarse de forma inalámbrica a Internet. En pocas palabras, es lo suficientemente potente como para funcionar como una computadora personal. Sin embargo la tarjeta Raspberry Pi no es tan flexible como la tarjeta Arduino para realizar la lectura de los sensores analógicos, esta requiere de la asistencia de un hardware adicional. Por ejemplo para hacer parpadear un led con Rasbery Pi se necesitaría de la instalación de un sistema operativo y de algunas librerías de código, mientras que con la tarjeta Arduino esto es posible con un par de líneas de programación. La tarjeta RaspBerry Pi se la puede observar en la Figura 45.



Figura 45. Tarjeta Raspberry Pi.  
Fuente: [Hacedores, 2014].

- **Alternativa 2: Arduino Mega y Tarjeta Ramps.**

El Arduino Mega es una tarjeta que en su estructura posee un microcontrolador programable, también presenta 16 entradas analógicas y 54 entradas y salidas digitales incluyendo 15 salidas pwm, es ideal para aplicaciones en proyectos de hardware y sus aplicaciones han sido muy difundidas. La tarjeta RAMPS es una tarjeta que se acopla al Arduino Mega de tal manera que es capaz de distribuir los pines del Arduino para que sobre estos se acoplen drivers, sensores, fines de carrera, actuadores como ventiladores, extrusores, y la tarjeta inteligente LCD. Siendo esto de gran ayuda cuando se desea controlar una máquina CNC, pero principalmente una Impresora 3D. Ambas tarjetas se visualizan en la Figura 46.



Figura 46. Tarjeta Arduino Mega y Tarjeta RAMPS.  
Fuente: [Joshendy, 2016].

- **Alternativa 3: Launchpad MSP430.**

El Texas Instruments Launchpad MSP430, según (Hacedores, ¿Qué tarjeta de desarrollo elegir?, 2016), es muy similar al chip microcontrolador ATmega de Atmel. Las diferencias principalmente radican en el precio siendo el MSP430 aproximadamente 4 veces más económico que un Arduino Mega original. El MSP430 presenta algunas mejoras interesantes para un bajo consumo de energía.

El chip MSP430G2553, mismo que utiliza la LaunchPad, tiene 14 pines de entrada y salida, y 16 Kbytes de memoria de programa. Dicha tarjeta se visualiza en la Figura 47.



Figura 47. Tarjeta Launchpad MSP430.

Fuente: (Hacedores, ¿Qué tarjeta de desarrollo elegir?, 2016).

### **3.3.6.1. Parámetros a ser considerados para la selección**

Una vez planteadas las opciones para el presente subsistema, se deben determinar las características a ser consideradas para la selección de la mejor alternativa, las cuales son:

- Capacidad de entradas y salidas tanto analógicas como digitales.
- Facilidad en la programación.
- Facilidades en el montaje de elementos externos.
- Costo de la placa.

### **3.3.6.2. Determinación de la mejor alternativa**

Luego de determinar los parámetros a considerar en la selección de la mejor alternativa de subsistema, se debe hacer una comparación entre las 3 opciones. Dicha comparación se desarrolla en la Tabla 3.10. Las ponderaciones para las diferentes alternativas se calificarán en una escala de 1 a 5. Siendo 1 la calificación más deficiente y 5 la de mejor ponderación.

**Tabla 10.**

Selección de la alternativa para el tipo de estructura de la impresora 3D.

Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
<b>Capacidad de entradas y salidas tanto analógicas como digitales.</b>	3	5	3
<b>Facilidad en la programación</b>	2	5	4
<b>Facilidades en el montaje de elementos externos.</b>	3	5	3
<b>Costo de la placa.</b>	4	4	5
<b>Ponderación Total</b>	12	19	15

De la Tabla 10, se determina que la opción más relevante para el propósito del proyecto el cual consiste en realizar una impresora 3D con impresión de soporte en ambiente controlado, es Alternativa 2, que corresponde a una combinación de placas controladoras Arduino Mega y Tarjeta Ramps 1.4.

### **3.3.7. Subsistema de Interfaz**

Para el control de la impresora 3D por parte del usuario, es necesario del uso de una interfaz gráfica de software libre, en la cual la persona a cargo del uso de la máquina podrá setear todos los parámetros para llevar a cabo la impresión de la pieza, así como también observar mediante un gráfico tridimensional el proceso de prototipado capa por capa.

- **Alternativa 1: Repetier Host.**

Repetier Host es una versátil herramienta de software libre para impresiones 3D. Según (Repetier, 2016), Repetier Host trabaja con casi todo tipo de impresoras 3D FDM conocidas, y es un software todo en uno que brinda múltiples ventajas como la capacidad para imprimir con múltiples extrusores, la posibilidad de generar 3 tipos diferentes de soporte para las impresiones con soporte dependiendo el gusto y necesidad del usuario, brinda la opción de imprimir múltiples piezas al mismo tiempo, también permite la impresión en todo tipo de filamento dependiendo la capacidad de

la impresora 3D. Una ventaja de este software es que permite una conexión en red de multiples impresoras y al mismo tiempo un control inalámbrico via internet desde cualquier dispositivo PC, Mac, Smartphone o tablet. permite el control desde cualquier dispositivo. En la Figura 48, se muestra una ilustración de la interfaz Repetier Host.



Figura 48. Interfaz Repetier Host.

Fuente: (Repetier, 2016).

## • Alternativa 2: Slic3r.

Según (Slic3r, 2016), Slic3r es una plataforma que convierte un modelo 3D en las instrucciones de impresión 3D. Slicer es compatible con MacOSX, Linux y Window. El software corta el modelo en capas horizontales, genera las trayectorias para el relleno y la cantidad de material a extruir. Dentro de las características que ofrece la plataforma es la impresión con múltiples extrusores, detección de puentes, comando de la línea de corte, alturas de capas variables, impresión secuencial (un objeto a la vez), relleno de nido de abeja, partición de un objeto en partes, evitar cruce de perímetros, distintas anchuras de impresión, entre otras. En la Figura 49, se muestra una ilustración de la interfaz Slic3r.

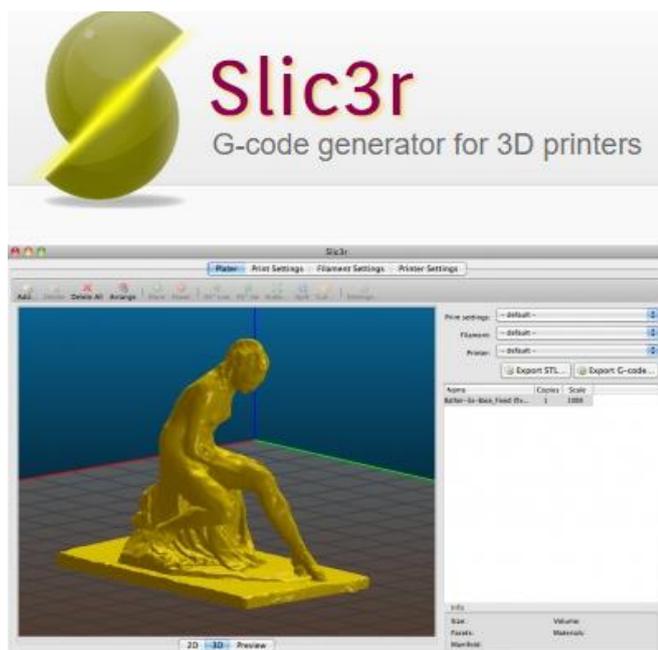


Figura 49. Interfaz Slic3r.  
Fuente: (Slic3r, 2016).

### • Alternativa 3: Matter Control.

Según (MatterControl, 2016), Matter Control es un paquete de software libre de código abierto que permite al usuario organizar y manejar el proceso de impresión 3D. Está designado para sacar el máximo partido a las impresiones 3D, haciéndolo fácil de seguir de obtener vistas previas e imprimir las piezas. Dentro de las características especiales del software Matter Control están:

- Configuraciones precargadas que permiten enlazar la impresora 3D a la interfaz en un instante.
- La impresora 3D puede enviar un mensaje de texto o un email de alerta cuando el trabajo está finalizado.
- Detección automática de múltiples piezas dentro de un mismo archivo de diseño para ser manipuladas por separado en características como: rotado, escalado, espejo, selección de material.
- Organiza, busca y maneja la librería de diseños para impresión.
- Permite al usuario ajustar, modificar y calibrar, de acuerdo a la conveniencia del mismo.

En la Figura 3.26, se muestra una ilustración de la interfaz Matter Control.

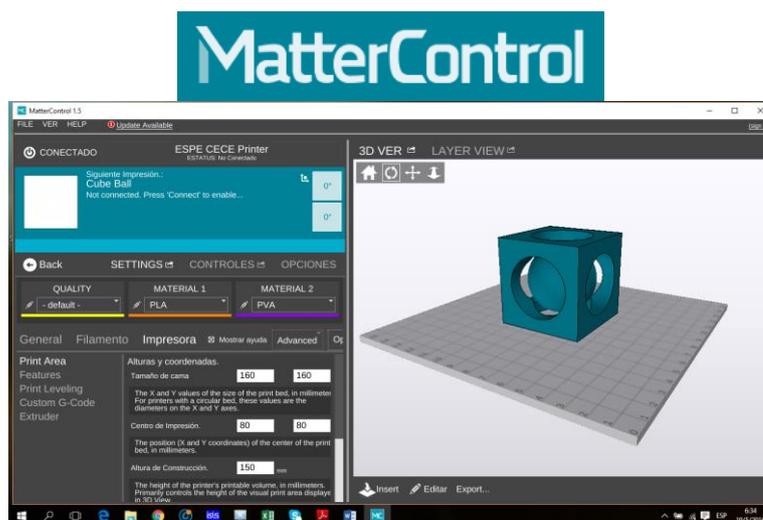


Figura 3.26. Interfaz Matter Control.  
Fuente: (MatterControl, 2016).

### 3.3.7.1. Parámetros a ser considerados para la selección

Una vez planteadas las opciones para el presente subsistema, se deben determinar las características a ser consideradas para la selección de la mejor alternativa, las cuales son:

- Prestaciones.
- Facilidad de manejo del programa.
- Interfaz amigable con el usuario.
- Costo y restricciones del software.

### 3.3.7.2. Determinación de la mejor alternativa

Luego de determinar los parámetros a considerar en la selección de la mejor alternativa de subsistema, se debe hacer una comparación entre las 3 opciones. Dicha comparación se desarrolla en la Tabla 11. Las ponderaciones para las diferentes alternativas se calificarán en una escala de 1 a 5. Siendo 1 la calificación más deficiente y 5 la de mejor ponderación.

**Tabla 11.**

Selección de la alternativa para el tipo de estructura de la impresora 3D.

Parámetros	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
<b>Prestaciones.</b>	5	4	4
<b>Facilidad del manejo del programa.</b>	4	3	5
<b>Interfaz amigable con el usuario</b>	4	4	5
<b>Costo y restricciones del software.</b>	5	5	5
<b>Ponderación Total</b>	18	16	19

De la Tabla 11, se determina que la opción más relevante para el propósito del proyecto es Alternativa 1, que corresponde al Software de interfaz Matter Control, ya que este cumple con todas las características que cumplen los parámetros del proyecto.

### **3.4. Diseño Mecánico.**

Una vez determinadas las opciones más idóneas para el tipo de subsistema se debe analizar y calcular cada uno de los elementos mecánicos a ser empleados en el proyecto.

#### **3.4.1. Diseño de ejes.**

Se cuenta con ejes de acero inoxidable de 8 mm de diámetro que posteriormente se demostrará mediante cálculos si dicho diámetro es idóneo para cumplir con su función, considerando tolerancias y factores de seguridad. Los ejes sirven de guías para realizar los desplazamientos del sistema en el plano X-Y, los mismos están sometidos a cargas que generan momentos flectores, dichas cargas pueden pandearlos si estos no están correctamente dimensionados. El pandeo ocasiona errores de precisión en el movimiento coordinado de los efectores finales, lo que causa deformaciones en las piezas a manufacturar.

##### **3.4.1.1. Determinación del diámetro del eje que soporta el carro con motor Nema 17, que se desplaza a lo largo del eje y (dirección posterior - frontal)**

**Parámetros:**

Masa del carro: 106g

Masa motor Nema 17: 380g

Masa del doble extrusor MK8: 900g

Masa del eje de acero inoxidable AISI 304, en dirección “x (dirección derecha - izquierda)”: 146g

Resistencia a la tensión del acero AISI 304 laminado en frío: 540 -740 MPa

[ThyssenKrupp, 2015]

Factor de incidencia de la carga del carro con los 2 extrusores:

$$F_i = 1 - \frac{\text{Distancia más cercana del centro de gravedad al apoyo}}{\text{Distancia entre apoyos de los ejes en } x}$$

$$F_i = 1 - \frac{76}{350} = 0,78$$

$$\text{Masa Total} = 146 + 380 + 900 \times 0,78 + 106 = 1334g$$

$$\text{Fuerza Total} = \text{Masa Total} \times \text{Gravedad}$$

$$\text{Fuerza Total} = 1,334Kg \times 9,8 \frac{m}{s^2} = 13,07N$$

$$\text{Fuerza puntual aplicada en los apoyos} = \frac{\text{Fuerza Total}}{2} = 6,57N$$

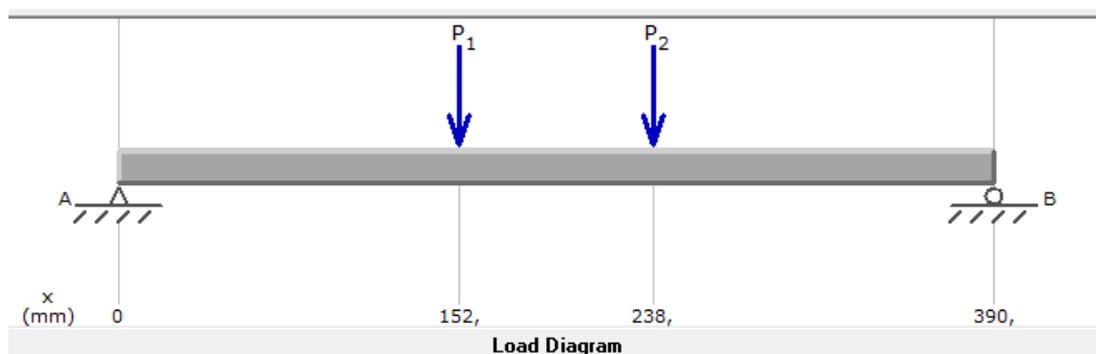


Figura 50. Diagramas de cuerpo libre de las fuerzas aplicadas en el eje en dirección y del lado donde se apoya el carro con el motor Nema 17.

Fuente: (Los Autores).

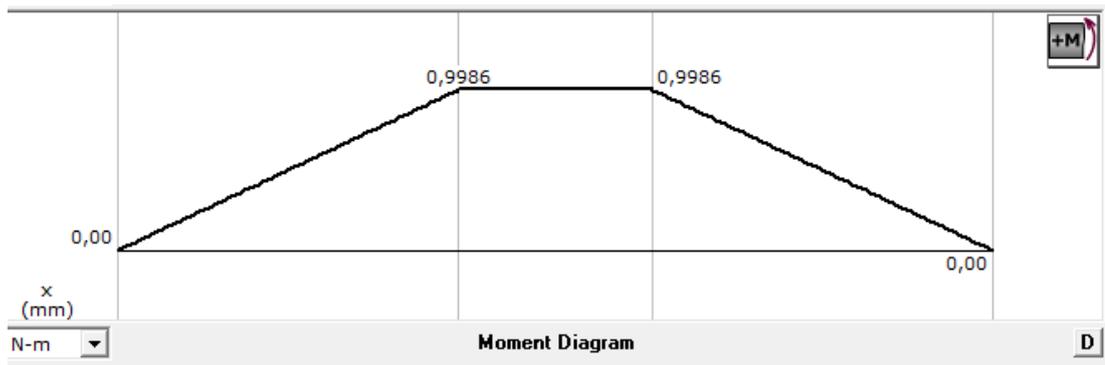


Figura 51. Diagrama de momento flector del eje en dirección y del lado donde se apoya el carro con el motor Nema 17.

Fuente: (Los Autores).

Para el cálculo del diámetro del eje se usa el criterio de ED-Goodman, usando la ecuación (7 - 8) del libro (Budynas & Nisbett, 2008). Con  $M_m = T_a = T_m = 0$ , debido a que los ejes no están sometidos a torsión, la ecuación (7 - 8) se reduce a:

$$d = \left( \frac{32nK_f M_a}{\pi S_e} \right)^{\frac{1}{3}}$$

**Donde:**

n: Factor de seguridad = 3

$K_f$ : Factor de concentración de esfuerzo para flexión = 1.7 (Tabla 7-1) (Budynas & Nisbett, 2008).

$M_a$ : Momento flector en el punto crítico = 1 (Figura 3.28).

$S_e$ : Límite de resistencia a la tensión en el punto crítico.

$S_{ut}$ : Esfuerzo último para el acero inoxidable AISI 304 = 568MPa (Tabla A-22)

Nota:

Las numeraciones de tablas y ecuaciones para los cálculos siguientes han sido tomadas del libro de diseño de elementos de máquinas (Budynas & Nisbett, 2008).

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (\text{Ec. 6 - 18})$$

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (\text{Ec. 6 - 19})$$

$$a = 4.51 \text{ y } b = -0.265 \quad (\text{Tabla 6 - 2})$$

$$k_a = 4.51 \times 568^{-0.265}$$

$$k_a = 0.84$$

$$k_b = 1.24d^{-0.107} \quad (\text{Ec. 6 - 20})$$

$$k_b = 1.24 \times 8^{-0.107}$$

$$k_b = 0.99$$

$$k_c = 1, \text{ por estar sometido a flexión} \quad (\text{Ec. 6 - 26})$$

$$k_d = k_e = k_f = 1$$

$$S'_e = 0.5S_{ut} \quad S_{ut} \leq 1400 \text{MPa} \quad (\text{Ec. 6 - 18})$$

$$S_e = 0.84 \times 0.99 \times 0.5 \times 568 = 236.17 \text{MPa}$$

$$d = \left( \frac{32 \times 3 \times 1.7 \times 1}{\pi \times 236.17 \times 10^6} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 6.04 \text{mm}$$

### 3.4.1.2. Determinación del diámetro del eje que soporta el carro sin motor, que se desplaza a lo largo del eje y (dirección posterior - frontal)

#### Parámetros:

Masa del carro: 115.6g

Masa del doble extrusor MK8: 900g

Masa del eje de acero inoxidable AISI 304, en dirección "x": 146g

Resistencia a la tensión del acero AISI 304 laminado en frío: 540 -740 MPa

[ThyssenKrupp, 2015]

Factor de incidencia de la carga del carro con los 2 extrusores:

$$F_i = 1 - \frac{\text{Distancia más cercana del centro de gravedad al apoyo}}{\text{Distancia dentre apoyos de los ejes en y}}$$

$$F_i = 1 - \frac{76}{350} = 0,78$$

$$\text{Masa Total} = 146 + 900 \times 0.78 + 115.6 = 963.6 \text{g}$$

$$\text{Fuerza Total} = \text{Masa Total} \times \text{Gravedad}$$

$$\text{Fuerza Total} = 0.964 \text{Kg} \times 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 9.45 \text{N}$$

$$\text{Fuerza puntual aplicada en los apoyos} = \frac{\text{Fuerza Total}}{2} = 4.72N$$

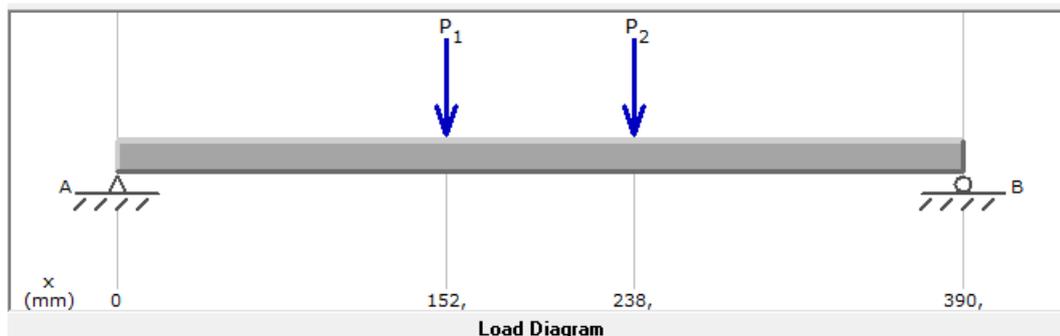


Figura 52. Diagramas de cuerpo libre de las fuerzas aplicadas en el eje en dirección y del lado donde se apoya el carro sin motor.  
Fuente: (Los Autores).

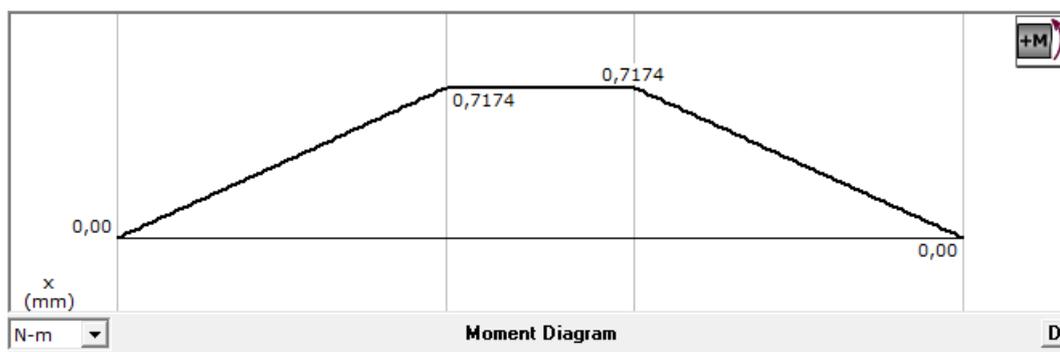


Figura 53. Diagrama de momento flector del eje en dirección y del lado donde se apoya el carro con el motor Nema 17.  
Fuente: (Los Autores).

Para el cálculo del diámetro del eje se usa el criterio de ED-Goodman, asando la ecuación (7 - 8) del libro (Budynas & Nisbett, 2008). Con  $M_m = T_a = T_m = 0$ , debido a que los ejes no están sometidos a torsión, la ecuación (7 - 8) se reduce a:

$$d = \left( \frac{32nK_f M_a}{\pi S_e} \right)^{\frac{1}{3}}$$

**Donde:**

n: Factor de seguridad = 3

$K_f$ : Factor de concentración de esfuerzo para flexión = 1.7 (Tabla 7-1) (Budynas & Nisbett, 2008).

$M_a$ : Momento flector en el punto crítico = 0.717 (Figura 3.30.)

$S_e$ : Límite de resistencia a la tensión en el punto crítico.

$S_{ut}$ : Esfuerzo último para el acero inoxidable AISI 304 = 568MPa (Tabla A-22)

Nota:

Las numeraciones de tablas y ecuaciones para los cálculos siguientes han sido tomadas del libro de diseño de elementos de máquinas (Budynas & Nisbett, 2008).

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (\text{Ec. 6 - 18})$$

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (\text{Ec. 6 - 19})$$

$a = 4.51$  y  $b = -0.265$  (Tabla 6 - 2)

$$k_a = 4.51 \times 568^{-0.265}$$

$$k_a = 0.84$$

$$k_b = 1.24 d^{-0.107} \quad (\text{Ec. 6 - 20})$$

$$k_b = 1.24 \times 8^{-0.107}$$

$$k_b = 0.99$$

$$k_c = 1, \text{ por estar sometido a flexión} \quad (\text{Ec. 6 - 26})$$

$$k_d = k_e = k_f = 1$$

$$S'_e = 0.5 S_{ut} \quad S_{ut} \leq 1400 \text{MPa} \quad (\text{Ec. 6 - 18})$$

$$S_e = 0.84 \times 0.99 \times 0.5 \times 568 = 236.17 \text{MPa}$$

$$d = \left( \frac{32 \times 3 \times 1.7 \times 0.717}{\pi \times 236.17 \times 10^6} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 5.40 \text{mm}$$

### **3.4.1.3. Determinación del diámetro del eje que soporta el carro con los dos extrusores MK8, que se desliza a lo largo del eje x (dirección derecha - izquierda)**

**Parámetros:**

Masa del carro: 200g

Masa del doble extrusor MK8: 900g

Resistencia a la tensión del acero AISI 304 laminado en frío: 540 -740 MPa (ThyssenKrupp, 2015).

Factor de incidencia de la carga del carro con los 2 extrusores:

$$F_i = 1 - \frac{\text{Distancia más cercana del centro de gravedad al apoyo}}{\text{Distancia entre apoyos de los ejes en y}}$$

$$F_i = 1 - \frac{76}{350} = 0,78$$

$$\text{Masa Total} = 900 + 200 = 1100g$$

$$\text{Fuerza Total} = \text{Masa Total} \times \text{Gravedad}$$

$$\text{Fuerza Total} = 1.1Kg \times 9.8 \frac{m}{s^2} = 10.78N$$

$$\text{Fuerza puntual aplicada en los apoyos} = \frac{\text{Fuerza Total}}{2} = 5.39N$$

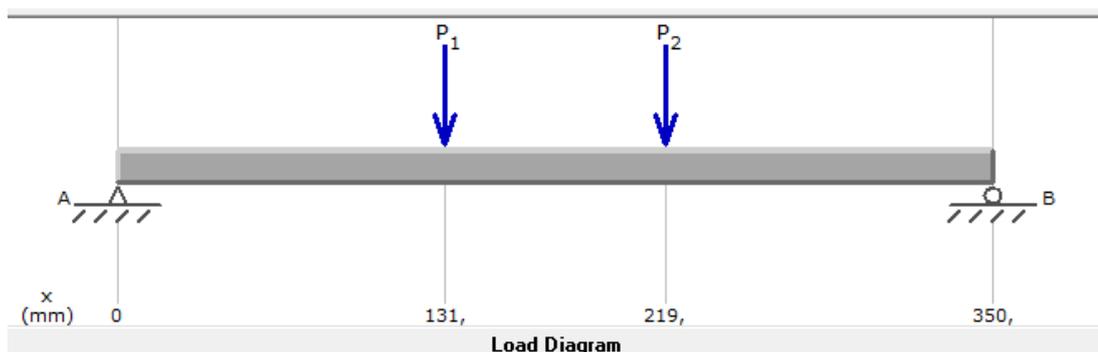


Figura 54. Diagramas de cuerpo libre de las fuerzas aplicadas en uno de los ejes en dirección x.

Fuente: (Los Autores).

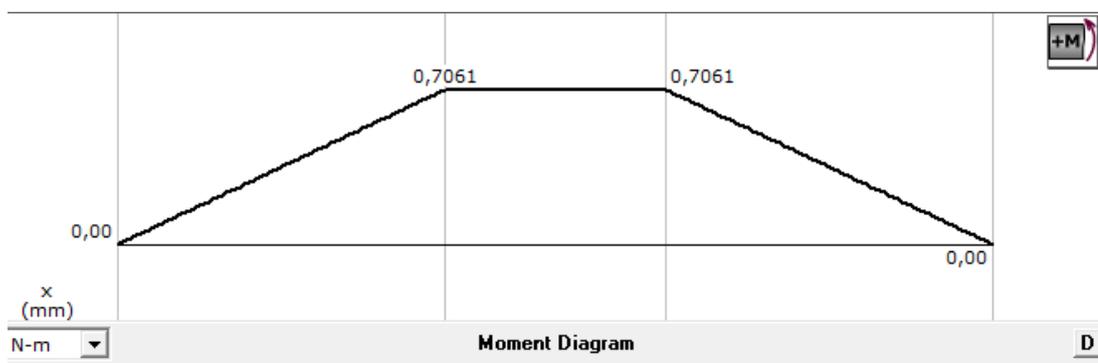


Figura 55. Diagrama de momento flector en uno de los ejes en dirección x.

Fuente: (Los Autores).

Para el cálculo del diámetro del eje se usa el criterio de ED-Goodman, usando la ecuación (7 - 8) del libro (Budynas & Nisbett, 2008). Con  $M_m = T_a = T_m = 0$ , debido a que los ejes no están sometidos a torsión, la ecuación (7 - 8) se reduce a:

$$d = \left( \frac{32nK_f M_a}{\pi S_e} \right)^{\frac{1}{3}}$$

**Donde:**

$n$ : Factor de seguridad = 3

$K_f$ : Factor de concentración de esfuerzo para flexión = 1.7 (Tabla 7-1) (Budynas & Nisbett, 2008).

$M_a$ : Momento flector en el punto crítico = 0.706 (Figura 3.32.)

$S_e$ : Límite de resistencia a la tensión en el punto crítico.

$S_{ut}$ : Esfuerzo último para el acero inoxidable AISI 304 = 568MPa (Tabla A-22)

Nota:

Las numeraciones de tablas y ecuaciones para los cálculos siguientes han sido tomadas del libro de diseño de elementos de máquinas (Budynas & Nisbett, 2008).

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e \quad (\text{Ec. 6 - 18})$$

$$k_a = a S_{ut}^b \quad (\text{Ec. 6 - 19})$$

$$a = 4.51 \text{ y } b = -0.265 \quad (\text{Tabla 6 - 2})$$

$$k_a = 4.51 \times 568^{-0.265}$$

$$k_a = 0.84$$

$$k_b = 1.24 d^{-0.107} \quad (\text{Ec. 6 - 20})$$

$$k_b = 1.24 \times 8^{-0.107}$$

$$k_b = 0.99$$

$$k_c = 1, \text{ por estar sometido a flexión} \quad (\text{Ec. 6 - 26})$$

$$k_d = k_e = k_f = 1$$

$$S'_e = 0.5 S_{ut} \quad S_{ut} \leq 1400 \text{MPa} \quad (\text{Ec. 6 - 18})$$

$$S_e = 0.84 \times 0.99 \times 0.5 \times 568 = 234.17 \text{MPa}$$

$$d = \left( \frac{32 \times 3 \times 1.7 \times 0.706}{\pi \times 234.17 \times 10^6} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$d = 5.39mm$$

**Resumen:**

De los cálculos realizados se concluye que con un diámetro de 8mm para los 4 ejes guías de acero inoxidable AISI 304, se garantiza la estabilidad de la estructura sobre el plano X-Y.

### **3.4.2. Cálculos para la selección de los motores**

Para el presente proyecto se dispone de motores paso a paso NEMA 17, cuyas características de torque se muestran en la Tabla 2., por lo tanto se partirá del análisis del torque total generado por el sistema en cada uno de los motores que generan los respectivos movimientos en el plano tridimensional.

#### **3.4.2.1. Cálculo del torque total del sistema en el eje y (dirección posterior - frontal)**

**Parámetros:**

Del subcapítulo anterior se determinó que:

Masa que soporta el eje y del lado con motor es: 1334g

Masa que soporta el eje y del lado sin motor es: 963,6g

De la Tabla 12, se determina que el coeficiente de rozamiento  $\mu_1$  de los rodamientos axiales de rodillos cilíndricos es de 0,004.

De la Tabla 12, se determina que el coeficiente de rozamiento  $\mu_2$  de los rodamientos rígidos de bolas es de 0,0015.

**Tabla 12.**

Coefficientes de rozamiento  $\mu$ , para varios modelos de rodamientos.

**Coefficientes de rozamiento  $\mu$  de varios rodamientos a**

<b>P/Co=0,1 para estimación del par de rozamiento M</b>	
<b>Tipo de rodamiento</b>	<b>Coefficiente de rozamiento <math>\mu</math></b>
<b>Rodamientos rígidos de bolas</b>	0,0015
<b>Rodamientos de bolas de contacto angular, de una hilera</b>	0,002
<b>Rodamientos de bolas de contacto angular, de doble hilera</b>	0,0024
<b>Rodamiento con cuatro caminos de rodadura</b>	0,0024
<b>Rodamientos oscilantes de bolas</b>	0,0013
<b>Rodamientos de rodillos cilíndricos</b>	0,0013
<b>Rodamientos de rodillos cilíndricos, llenos de rodillos</b>	0,002
<b>Rodamientos de rodillos cónicos</b>	0,0018
<b>Rodamientos oscilantes de rodillos</b>	0,002
<b>Rodamientos axiales de bolas</b>	0,0015
<b>Rodamientos axiales de rodillos Cilíndricos</b>	0,004
<b>Rodamientos axiales oscilantes de rodillos</b>	0,002

Fuente: (Catálogo de rodamientos FAG).

**Cálculos:**

Eje y del lado del carro con el motor:

$$N_1 = m_1 \times g$$

$$F_1 = \mu_1 N_1$$

$g$ : Aceleración de la gravedad =  $9,8 \frac{m}{s^2}$

$m_1$ : Masa que soporta el eje y del lado con motor.

$F_1$ : Fuerza que ejerce el carro a lo largo del eje y donde va el motor.

$N_1$ : Normal sobre el eje en y donde va el carro con el motor.

$$N_1 = 1,334kg \times 9,8 \frac{m}{s^2}$$

$$N_1 = 13,0732N$$

$$F_1 = 0,004 \times 13,07N$$

$$F_1 = 0,0523N$$

Eje y del lado del carro sin el motor:

$$N_2 = m_2 \times g$$

$$F_2 = \mu_1 N_2$$

$g$ : Aceleración de la gravedad =  $9,8 \frac{m}{s^2}$

$m_2$ : Masa que soporta el eje y del lado sin motor.

$F_2$ : Fuerza que ejerce el carro a lo largo del eje y donde no va el motor.

$N_2$ : Normal sobre el eje en y donde va el carro sin motor.

$$N_2 = 0,964kg \times 9,8 \frac{m}{s^2}$$

$$N_2 = 9,447N$$

$$F_2 = 0,004 \times 9,447N$$

$$F_2 = 0,0378N$$

Fuerza en "y" generada por los carros =  $F_{yc} = F_1 + F_2$

$$F_{yc} = 0,0901N$$

Fuerza generada por los rodamientos en los soportes =  $F_{sy} = 3 \times F_{yc} \times \mu_2$

$$F_{sy} = 3 \times 0,0901 \times 0,0015$$

$$F_{sy} = 0,000405N$$

Fuerza total en "y" =  $F_y = F_{yc} + F_{sy}$

$$F_y = 0,0905N$$

Torque motor movimiento en el eje y =  $F_y \times \text{radio del engrane}$

Torque motor movimiento en el eje y =  $0,0905N \times 0,006m$

Torque motor movimiento en el eje y =  $0,000543Nm$

**Tabla 13.**

Características de los motores NEMA 17.

Descripción (Stack)	Length *L* Max	Mounted Rated Current Amps	Mounted Holding Torque		Winding		Dent Torque		Rotor Inercia		Motor weight	
			Nm	oz-in	±10 %	Typ .	mNm	oz-in	g cm 2	oz- in2	kg	lbs
Single	39.8mm(1.57in)	2	0.48	68	1.04	2.2	15	2.1	57	0.31	0.28	0.62
Double	48.3mm(1.90in)	2	0.63	89	1.3	2.9	25	3.5	82	0.45	0.36	0.79
Triple	62.8mm(2.47in)	2	0.83	120	1.49	3.8	30	4.2	123	0.67	0.61	1.34

Fuente: Datasheet Stepper Motor NEMA 17 (PBC Linear, 2011).

**Resumen:**

Según la Tabla 13, el torque de los motores NEMA 17 se encuentra entre 15-30mNm, lo que es lo mismo 0,015-0,03Nm, el torque requerido para el funcionamiento del sistema es de aproximadamente 0,000543Nm, por lo tanto el motor NEMA 17 cumple con el torque necesario para el correcto funcionamiento del sistema en el eje y.

### 3.4.2.2. Torque del sistema en el eje x (dirección derecha - izquierda)

**Parámetros:**

Masa del doble extrusor MK8: 900g

Masa del carro en x: 200g

De la Tabla 12, se determina que el coeficiente de rozamiento  $\mu_1$  de los rodamientos axiales de rodillos cilíndricos es de 0,004.

De la Tabla 12, se determina que el coeficiente de rozamiento  $\mu_2$  de los rodamientos rígidos de bolas es de 0,0015.

**Cálculos:**

Eje y del lado del carro con el motor:

$$N_1 = m_1 \times g$$

$$F_1 = \mu_1 N_1$$

$g$ : Aceleración de la gravedad =  $9,8 \frac{m}{s^2}$

$m_1$ : Masa que soportan los ejes x.

$F_1$ : Fuerza que ejercen los rodamientos axiales a lo largo del eje x.

$N_1$ : Normal sobre los ejes x.

$$N_1 = 1,1kg \times 9,8 \frac{m}{s^2}$$

$$N_1 = 10,78N$$

$$F_1 = 0,004 \times 10,78N$$

$$F_1 = 0,0431N$$

*Fuerza en x, generada por los rodamientos circulares =  $F_{rx} = F_1 \times \mu_2$*

$$F_{rx} = 0,0431 \times 0,0015$$

$$F_{rx} = 0,000065N$$

*Fuerza total en x =  $F_x = F_1 + F_{rx}$*

$$F_x = 0,0432N$$

*Torque motor movimiento en el eje x =  $F_x \times \text{radio del engrane}$*

*Torque motor movimiento en el eje x =  $0,0432N \times 0,006m$*

*Torque motor movimiento en el eje x =  $0,00026Nm$*

### **Resumen:**

Según la Tabla 13, el torque de los motores NEMA 17 se encuentra entre 15-30mNm, lo que es lo mismo 0,015-0,03Nm, el torque requerido para el funcionamiento del sistema es de aproximadamente 0,00026Nm, por lo tanto el motor NEMA 17 cumple con el torque necesario para el correcto funcionamiento del sistema en el eje x.

### **3.4.2.3. Cálculo del torque total del sistema en el eje z (dirección superior - inferior)**

#### **Parámetros:**

Masa de la cama caliente: 0,9kg

Masa de la palanca de elevación en el eje z: 0,6kg

Torque de motor NEMA 17: 25mNm (Tabla 3.13)

Radio de trabajo del tornillo sin fin: 6mm.

Paso del tornillo sin fin: 1.4mm.

**Cálculos:**

$$F = \frac{T \times \emptyset \times \theta}{r}$$

F: Fuerza de elevación en el eje z.

T: Torque del motor NEMA 17

$\emptyset$ : Relación de velocidad tornillo sin fin

r: Radio de trabajo del tornillo sin fin

$\theta$ : Porcentaje de trabajo de motor.

$$\emptyset = \frac{\pi \times D}{p}$$

D: Diámetro de trabajo del tornillo sin fin.

p: paso del tornillo sin fin.

$$\emptyset = \frac{\pi \times 6mm}{1,4mm}$$

$$\emptyset = 13,14$$

$$F = \frac{25mNm \times 13,14 \times 0,6}{0,003m} = 65700mN$$

$$F = 65,7N$$

$$F = \frac{65,7}{9,8} = 6,7kgf$$

**Resumen:**

El motor NEMA 17 que realiza el movimiento en el eje z tiene una capacidad de carga máxima de 6kg, como la masa que debe levantar la palanca es de 1,9kg, entonces la fuerza del motor es suficientemente para garantizar el correcto funcionamiento del sistema, con un factor de seguridad de 3,5. Este factor debe ser alto para contrarrestar fuerzas opuestas por fricción o pesos adicionales como el de las piezas maquinadas.

**3.4.2.4. Selección de los motores**

Para producir los respectivos movimientos en el espacio de la impresora 3D, fue necesario el uso de motores paso a paso. Para lo cual se utilizaron stepper motors

NEMA 17 modelo 42BYGH W811 Figura 56, que como se menciona en el literales anteriores cumplen con la fuerza necesaria para realizar los movimientos requeridos.

Características según (LINEAR, 2011):

Voltaje: 3,1V

Corriente: 2,5A

Torque de mantenimiento: 47 N.cm

Potencia: 7,75W

Potencia de los 5 motores que entran en juego: 38,75W



Figura 56. Motor paso a paso NEMA 17.  
Fuente: (LINEAR, 2011).

### **3.4.3. Diseño de piezas y ensamble en software CAD.**

El diseño se lo realizo en software CAD. El diseño morfológico se realizó tomando en cuenta las dimensiones fijas de elementos dados, como la cama caliente, motores NEMA 17, ejes, engranes, rodamientos, placas, fuente de poder, niquelina, ventiladores. A partir de estas medidas se diseñó y generó cada pieza por separado para luego ser ensamblada en el conjunto que conforma la impresora 3D. En la Figura 57, se puede apreciar el diseño final ensamblado.

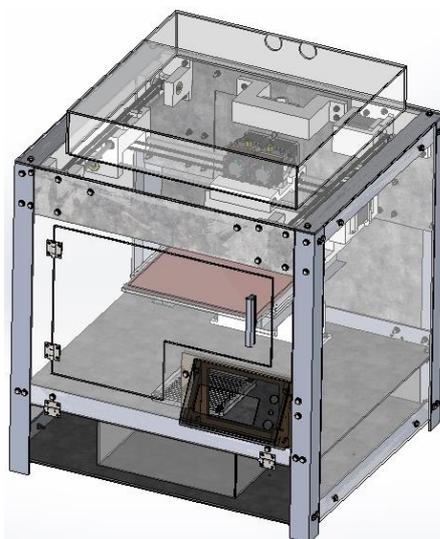


Figura 57. Impresora 3D ensamblada.  
Fuente: (Los Autores, ARDUINO, 2016).

### **3.5. Diseño Electrónico.**

En base a la selección previa de las mejores opciones de los componentes que formarán parte de los subsistemas, se detalla la aplicación de los mismos en el proyecto, y su interacción con otros componentes.

#### **3.5.1. Descripción de módulos de programación seleccionados.**

##### **3.5.1.1. Módulo Arduino.**

La programación del hardware de la impresora 3D se la realizó mediante un módulo Arduino Mega que según [ARDUINO, 2016], es una placa electrónica basada en el ATmega1280 (data sheet). Cuenta con 54 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 14 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos serie de hardware), un oscilador de 16MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP, y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para apoyar el microcontrolador; basta con conectarlo a un ordenador con un cable USB o la corriente con un adaptador de CA a CC o una batería para empezar. El Mega es compatible con la mayoría de los shields para el Arduino Duemilanove o Diecimila. Para visualizar mejor las partes de la placa Arduino Mega se presenta la Figura 58.



Figura 58. Placa Arduino Mega.  
Fuente: (ARDUINO, 2016).

### 3.5.1.2. Módulo RAMPS (RepRap Arduino Mega Pololu Shield)

El módulo RAMPS 1.4 según (Impresoras3D, 2015), es una shield o placa adicional diseñada para el Arduino Mega, que traslada las ordenes digitales a órdenes de potencia para los actuadores. Placa de diseño compacto (todo-en-uno) en la que se conectan directamente todos los componentes electrónicos, tanto de potencia como de control, de una impresora 3D. Para ello dispone de diferentes conjuntos de zócalos, conectores y pines, todos ellos perfectamente identificados en la placa. Además a la placa RAMPS 1.4, se le pueden añadir tarjetas de expansión para Arduino.

En resumen, la placa RAMPS 1.4, es el corazón de la mayoría de las impresoras 3D RepRap. Es una placa con un diseño limpio y agradable, que permite integrar todos los sistemas electrónicos de una impresora 3D en un solo espacio compacto, de tal manera que el montaje y la conexión de los componentes sean claro y sencillo. Dicha distribución se puede observar mejor en la Figura 59.

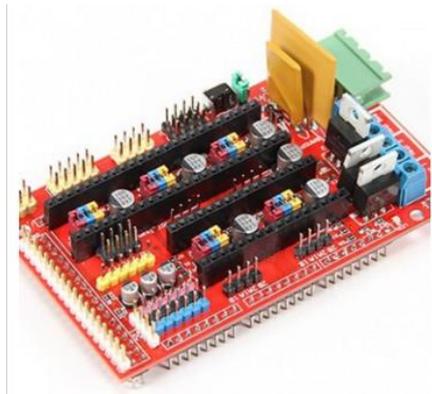


Figura 59. Módulo RAMPS 1.4.  
Fuente: (Impresoras3D, 2015).

#### Características del Módulo RAMPS:

- Ampliable para controlar otros accesorios.
- 3 MOSFET para las salidas de calefacción / ventilador y 3 circuitos de termistor.
- Protegido por fusible 5A para la protección adicional de componentes.
- Control de la cama climatizada con fusible 11A adicional.
- Se pueden conectar hasta 5 Pololu (tarjetas driver paso a paso).
- Dispone de 5 zócalos, en los cuales se inserta los drivers Pololu para que puedan ser fácilmente reemplazadas.
- Dispone de pins I2C y SPI para una futura expansión.
- Todos los MOSFETs están enganchados en los conectores PWM para una mayor versatilidad.
- Los conectores de tipo pin se utilizan para conectar los endstop, los motores y los LEDs. Estos conectores están preparados para 3ª.
- Se le puede añadir un lector de tarjeta SD.
- LEDs indicadores de funcionamiento del HotBed.

El circuito electrónico que detalla el funcionamiento de la placa RAMPS, se muestra en el ANEXO 3.1.

### 3.5.1.3. Módulo driver motor paso a paso DRV4988.

Según (Impresoras3DEcuador, 2015), el DVR4988 (Figura 60.) es un driver controlador de corriente para motores paso a paso. Este puede controlar un motor paso a paso bipolar hasta 2A de corriente de salida por inductor, usado típicamente como controlador para motores NEMA17. Cuyas características principales son:

- Ser compatible con el módulo RAMPS 1.4.
- Control de corriente ajustable, por medio de un potenciómetro interno.
- Protección de sobrecarga de corriente.
- Protección de temperatura.
- Resolución de micropasos,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{8}$ ,  $\frac{1}{16}$ .



Figura 60. Driver para motores paso a paso DRV5988.  
Fuente: (Impresoras3DEcuador, 2015).

### 3.5.1.4. Módulo driver motor paso a paso DRV8825.

Según (Impresoras3D, Pololu – DRV8825 Driver motor paso a paso, 2015), el DRV8825 es un driver para motores paso a paso de TI, mejorado respecto al A4988. Con un microstepping de hasta  $\frac{1}{32}$  que le da al movimiento de los motores bipolares paso a paso una gran finura, puede entregar hasta un máximo teórico de 2,2A por fase con ventilación forzada de aire o 1,5A sin ventilación ni disipadores por tanto aumenta la potencia de estos.

La placa de circuito impreso del DRV8825, puede ser montada directamente en los zócalos de la Ramps 1.4 u otras shields o placas que soporten dichos drivers. El

módulo tiene una interfaz y pinout que son casi idénticos a los de los drivers de motor paso a paso A4988, por lo que se puede utilizar el DRV8825 como un driver de mayor rendimiento en el microstepping o bien como placa de reemplazo en placas en que ya esté montado el A4988 dicha placa se observa en la Figura 61.



Figura 61. Driver para motores paso a paso DRV8825.

Fuente: (Impresoras3D, Pololu – DRV8825 Driver motor paso a paso, 2015).

Este driver fue seleccionado en lugar del A4988 tanto para los ejes x e y, ya que este me permite un mayor microstepping de 1/32, además de entregarme una mayor corriente, dándome una potencia y una resolución superior, características necesarias para el correcto accionamiento de dichos ejes.

La placa RAMPS con los módulos A4988 y A8825 montados, se ilustra en la Figura 62.



Figura 62. Placa RAMPS, con los módulos A4988 y A8825.

Fuente: (Los Autores).

### 3.5.2. Selección del LCD.

Para la visualización y modificación de los parámetros de la impresora 3D, lectura de tarjeta SD y señales auditivas, se utilizó una placa LCD REPRAP Discount Smart

Controller, la misma que es compatible con el módulo RAMPS anteriormente mencionado.

Según (REPRAP, REPRAP Discount Smart Controller, 2016), este controlador inteligente contiene un lector de tarjetas SD, un codificador rotatorio y una pantalla LCD de 20 caracteres x 4 líneas. Se puede conectar fácilmente a la módulo RAMPS, mediante el "adaptador inteligente" incluido.

Después de conectar este panel en la tarjeta RAMPS, ya no es necesario una PC, el Controlador Smart provee de alimentación para la tarjeta SD. Adicionalmente todas las acciones como la calibración, movimientos de los ejes se pueden hacer simplemente usando el codificador rotatorio en el Controlador inteligente. Imprimir sus diseños en 3D sin necesidad de PC, sólo con un diseño g-código almacenado en la tarjeta SD. Dicho controlador inteligente se lo observa en la Figura 63.



Figura 63. LCD REPRAP Discount Smart Controller conectado en un módulo RAMPS.

Fuente: (REPRAP, REPRAP Discount Smart Controller, 2016).

### **3.5.3. Selección de la cama caliente.**

La cama caliente empleada en la presente impresora 3D es una HeatBed PCB MK2, Figura 64. Este tipo de cama caliente es esencial para obtener una buena adherencia a la base y evitar choques bruscos de temperatura que pueden pandear las piezas impresas, principalmente para materiales duros como el ABS.

Según (FACTORUM, 2016), posee las siguientes características:

- Puede llegar a calentar por encima de los 110°C, importante si quieres utilizar tu impresora 3D RepRap con plástico ABS y otros materiales que requieren de una plataforma caliente.
- Resistencia y led indicador de funcionamiento pre soldados en la placa.
- Superficie de calentamiento 200x200mm.
- Tamaño de la placa 215x215mm.
- Distancia entre agujeros 209mm.
- Termistor de 100K $\Omega$ .



Figura 64. HeatBed PCB MK2.  
Fuente: (FACTORUM, 2016).

La base de la cama caliente cuenta con 4 resortes ubicados por debajo de la misma, en cada una de sus esquinas. Los resortes son apretados mediante tuercas, lo cual permite asegurar que la cama se ubique perfectamente de manera horizontal, mismos que se observan en la Figura 65.



Figura 65. Motaje de la cama caliente con resortes.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.5.4. Selección de los extrusores.

Para el presente proyecto se ocuparon dos extrusores del modelo MK8, Figura 66, unidos con el fin de realizar tanto la impresión del material base como la del material de soporte.

Como se menciona en (Geeetech, 2014), esta es una extrusora doble que se puede utilizar en impresoras 3D como Mendel, Prusa, Makerbot, Printboard y otros. Los dos cabezales de impresión están unidos con un trozo de barra de aluminio de alta dureza con buena dispersión del calor y alta fiabilidad. Los principales beneficios de esta extrusora de doble extrusor incluye, ser capaz de imprimir objetos más complejos con estructuras de soporte y más estéticamente agradables objetos que cuentan con múltiples colores o múltiples materiales.

En (Geeetech, 2014) también menciona algunas características de los extrusores como son:

- Tamaños de las puntas de las boquillas: 0.3mm, 0.35mm, 0.4mm, 0.5mm.
- Material de impresión: 1.75mm or 3mm PLA/ABS.
- Velocidad de flujo de las boquillas:
- Voltaje de la boquilla de calentamiento: 12V.

- Termistor: NTC de  $100K\Omega$
- Voltaje de operación de los ventiladores: 12V.
- Temperatura normal de trabajo:  $190^{\circ}\text{C}$ - $230^{\circ}\text{C}$
- Peso neto: 980g.



Figura 66. Extrusor doble MK8.  
Fuente: (Geeetech, 2014).

### 3.5.5. Selección de sensores de temperatura.

En vista de que el control de temperatura se lo va a realizar entre la temperatura ambiente ( $25^{\circ}\text{C}$ ) y una temperatura de  $240^{\circ}\text{C}$  se vio conveniente utilizar un termistor de NTC de  $100K\Omega$  (Figura 3.67), nombrado así debido a que a la temperatura promedio ambiente de  $25^{\circ}\text{C}$  la resistencia interna de la misma es de  $100K\Omega$ . Algunas de las características principales de este termistor se mencionan en (Element14, 2016):

- Resistencia a  $25^{\circ}\text{C}$ : 100kohm
- Temperatura de Trabajo Mín:  $-55^{\circ}\text{C}$
- Temperatura de Trabajo Máx:  $300^{\circ}\text{C}$
- Termistor, Tolerancia -1% a +1%
- Tipo de Termistor: NTC
- Número de Contactos: 2



Figura 67. Termistor NTC de 100K $\Omega$ .  
Fuente: (Aprendiendo, 2014).

### 3.5.6. Selección de la fuente de alimentación.

Para energizar casi todos los componentes de la impresora, como son motores, extrusores, módulo RAMPS, módulo ARDUINO, módulo relé, lcd y ventiladores, se utilizó una fuente de poder de la marca Mega modelo ATXOMEGA-800W (Figura 68) la misma que alimenta el módulo RAMPS a 12VDC y de este se energizan los componentes anteriormente mencionados. Las características técnicas de la fuente se muestran en la Figura 69.

Para energizar la niquelina, se hizo una conexión en paralelo con la misma alimentación que energiza la fuente de poder ATXOMEGA-800W.



Figura 68. Fuente de poder Mega ATXOMEGA-800W.  
Fuente: (Nexolocal, 2012).

ITTEK SWITCHING POWER SUPPLY MODEL:ATX-800		
<b>INPUT</b>	115V/230V~, 12/6A 60~50Hz	
<b>Output:800W</b>		
+ 3.3V	36A	ORANGE
+ 5V	38A	RED
+ 12V <sub>1</sub>	20A	YELLOW
+ 12V <sub>2</sub>	24A	YEL/BLK
+ 5VSB	2.0A	PURPLE
- 12V	1.0A	BLUE
PS-ON		GREEN
P.G		GREY
+5V and +3.3V Combined load maximum 300W		
Total output maximum 800W		
54P300 MJ01D		

Figura 69. Características técnicas fuente de poder Mega ATXOMEGA-800W.  
Fuente: (Nexolocal, 2012).

### 3.5.7. Diseño del control de temperatura de la cámara principal de la impresora 3D.

Para un mejor desempeño de la impresora 3D, es necesario hacer un control de temperatura ambiente de la misma, principalmente cuando se trabaja con ABS, por ser un material más termo resistente, y como trabaja a temperaturas más elevadas que el PLA, amerita suavizar los choques térmicos mediante un control de su ambiente de trabajo. Para lo cual se hizo uso de una niquelina de 4400W (Figura 70), que contribuye con el principal aporte de calor al ambiente. La niquelina empleada trabaja con un voltaje 110Vac y una frecuencia de 60Hz. Este voltaje generaría una corriente de 40A. La niquelina está conectada en paralelo con la fuente de poder a la toma de suministro eléctrico.



Figura 70. Niquelina para el control de temperatura del ambiente.  
Fuente: (Los Autores).

El control de temperatura se lo realizó mediante un control ON/OFF, programado en el Arduino Mega. El cual a partir de las señales de entrada recibidas por parte del

sensor de temperatura NTC de  $100K\Omega$ , este a su vez envía las señales de control que comandan un módulo relé que corta o cortocircuita la alimentación de la niquelina. Las características del módulo relé empleado, se detallan en el literal 3.2.7.1.

Para finalizar, el aire caliente que se encuentra en la caja térmica es enviado a la cámara principal, mediante un ventilador DC de 12V (Figura 71), que realiza la convección forzada del aire. La simulación del flujo de la distribución del aire en la cámara principal se lo realizó mediante el software SolidWorks y dicho análisis se visualiza en la Figura 72.



Figura 71. Ventilador para el flujo de aire caliente.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.5.7.1. Análisis del flujo de aire hacia la cámara principal de la impresora 3D.

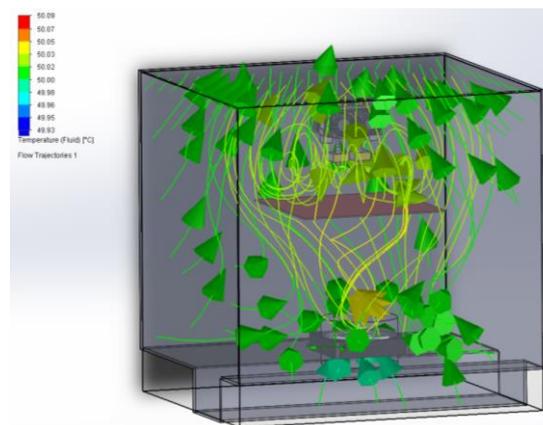


Figura 72. Flujo de aire dentro de la cámara de impresión  
Fuente: (Los Autores).

**Cálculos:**

Medidas internas del área de impresión:

$$x = 491\text{mm.} = 0.491\text{m.}$$

$$y = 435\text{mm.} = 0.435\text{m.}$$

$$z = 394\text{mm.} = 0.394\text{m}$$

Volumen de impresión

$$V = x \times y \times z$$

$$V = 0.491 \times 0.435 \times 0.394 = 0.0841\text{m}^3$$

Como se puede apreciar en la Figura 72, la dispersión del aire generado por el ventilador ocupa todo el volumen de trabajo.

**3.5.7.2. Relé de estado sólido.**

En el presente proyecto se utilizó el relé de estado sólido FOTEK SSR-40 DA, el cual acepta en la entrada un rango de voltaje de entrada de entre 3 a 32 Vdc, y permite una conexión de voltaje de entre 24 a 380 Vac, permitiendo un flujo de corriente de hasta 40 A. Dicho relé se muestra en la Figura 73. El relé ya mencionado, se encarga de abrir o cerrar el circuito que alimenta una niquelina con 110VAC, la misma que calienta el ambiente al interior de la impresora 3D. El accionamiento del relé se lo hace de manera automática mediante un control ON/OFF.



Figura 73. Relé de estado sólido FOTEK SSR-40 DA.

Fuente: (Los Autores).

## 3.6. Aplicación de Softwares para control e interfaz.

Para poder controlar el funcionamiento completo de la impresora 3D es necesario programar la tarjeta Arduino y a su vez proporcionar un software de interfaz que permita al usuario comandar la máquina.

### 3.6.1. Selección y modificaciones del programa del firmware de control.

El Repetier-Firmware es un software libre de código abierto de interfaz ARDUINO, en el cual se puede modificar el programa dependiendo las características de la impresora 3D o máquina CNC a programar.

#### 3.6.1.1. Detalle de modificaciones en el programa.

En el Repetiere-Firmware se debe ir a la pestaña “Configuration.h”, aquí se realizarán todas las modificaciones necesarias para la impresora 3D. Esta interfaz se puede ver en la Figura 73.

```

/*
 * This file is part of Repetier-Firmware.
 *
 * Repetier-Firmware is free software: you can redistribute it and/or modify
 * it under the terms of the GNU General Public License as published by
 * the Free Software Foundation, either version 3 of the License, or
 * (at your option) any later version.
 *
 * Repetier-Firmware is distributed in the hope that it will be useful,
 * but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
 * MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the
 * GNU General Public License for more details.
 *
 * You should have received a copy of the GNU General Public License
 * along with Repetier-Firmware. If not, see <http://www.gnu.org/licenses/>.
 */

#ifndef CONFIGURATION_H
#define CONFIGURATION_H

/* Some words on units:
 *
 * From 0.80 onwards the units used are unified for easier configuration, watch out when transferring from older configs!
 *
 * Speed is in mm/s
 * Acceleration in mm/s^2
 * Temperature is in degrees celsius
 */

```

Figura 73. Software Arduino cargado el programa Repetier-Firmware.

Fuente: (Los Autores).

A continuación se explicará en detalle las modificaciones en las líneas del programa para el presente trabajo:

### Para la impresora en General:

- #define NUM\_EXTRUDER 3.- En realidad la impresora presenta 2 extrusores, pero el tercero es un extrusor ficticio que representa y ayuda en el control de temperatura ambiente de la impresora.
- #define MIXING\_EXTRUDER 0.- Se coloca en cero porque cada extrusor ocupa un filamento y una boquilla independiente. Hay máquinas en donde dos o más extrusores poseen solo una boquilla común para hacer combinación de colores, en ese caso se debe colocar en número 1.
- #define MOTHERBOARD 33.- El número 33 representa en número para las tarjetas RAMPS 1.3, o RAMPS 1.4, que es la que se está ocupando. Una lista de los códigos para las diferentes tarjetas se puede observar en el ANEXO 3.1.
- #define DRIVE\_SYSTEM 0.- Se pone en cero por ser el número que representa a un sistema cartesiano de ejes xyz, con motores independientes, como se visualiza en el ANEXO 3.2.
- #define BELT\_PITCH 2.- Es el paso (distancia entre dientes) de la banda dentada.
- #define XAXIS\_STEPS\_PER\_MM 160.- Este valor representa el número de pasos que debe dar el motor para que los efectores finales se desplacen a lo largo del eje X un milímetro.

#### Datos:

Número de dientes engrane del motor: 20dientes.

Paso de la banda dentada:  $2\frac{mm}{diente}$ .

Resolución del motor NEMA 17: 1.8 grados.

MicroStepping del driver pololu DRV 8825: 1/32.

#### Cálculos:

*Desplazamiento por vuelta*

= Número de dientes  $\times$  Paso banda dentada

$$\text{Desplazamiento por vuelta} = 20\text{dientes} \times 2\frac{mm}{diente}$$

$$\text{Desplazamiento por vuelta} = 40\frac{mm}{vuelta}$$

$$\text{Pasos motor por vuelta} = \frac{360^\circ/vuelta}{1.8^\circ/paso} = 200\frac{pasos}{vuelta}$$

$$\text{Pasos por vuelta debido al driver} = \frac{\text{Pasos por vuelta motor}}{\text{MicroStepping}}$$

$$\text{Pasos por vuelta debido al driver} = \frac{200 \frac{\text{pasos}}{\text{vuelta}}}{\frac{1}{32}} = 6400 \frac{\text{pasos}}{\text{vuelta}}$$

$$\begin{aligned} \text{Pasos por milímetro del sistema en el eje X} &= \frac{6400 \frac{\text{pasos}}{\text{vuelta}}}{40 \frac{\text{mm}}{\text{vuelta}}} \\ &= 160 \frac{\text{pasos}}{\text{mm}} \end{aligned}$$

- `#define YAXIS_STEPS_PER_MM 160`.- Este valor representa el número de pasos que debe dar el motor para que los efectores finales se desplacen a lo largo del eje Y un milímetro. El cálculo es el mismo que para el eje X.
- `#define ZAXIS_STEPS_PER_MM 2272.72`.- Es el valor de pasos por milímetros de desplazamiento en el eje Z obtenido de [Printrbot, 2015].

#### Para el extrusor 0.

- `#define EXT0_X_OFFSET 0`.- Debido a que el extrusor 0 se encuentra en el origen para el eje X.
- `#define EXT0_Y_OFFSET 0`.- Debido a que el extrusor 0 se encuentra en el origen para el eje Y.
- `#define EXT0_Z_OFFSET 0`.- Debido a que el extrusor 0 se encuentra en el origen para el eje Z.
- `#define EXT0_STEPS_PER_MM 99`.- Es el número de pasos por milímetro de desplazamiento del filamento por el extrusor 0, obtenido de [Printrbot, 2015].
- `#define EXT0_TEMPSENSOR_TYPE 1`.- El número 1 representa a un termistor de 100K, esto se ve en el ANEXO 3.3, usado para medir la temperatura del extrusor 0.
- `#define EXT0_INVERSE true`.- Se coloca la palabra true, para no invertir el sentido de giro del motor del extrusor.
- `#define EXT0_ENABLE_ON 0`.- Se pone en 0 para que los pines se activen en bajo.

- `#define EXT0_HEAT_MANAGER 1`.- El número 1 representa un control PID, para el Sistema de calentamiento del extrusor 0.
- `#define EXT0_WATCHPERIOD 5`.- Este es un tiempo de espera luego de que el extrusor alcanza un rango de temperatura máximo, si no se estabiliza luego de este periodo de tiempo, el extrusor se desactiva por seguridad.
- `#define EXT0_PID_PGAIN_OR_DEAD_TIME 24`.- Constante proporcional del PID del control de temperatura para los extrusores.
- `#define EXT0_PID_I 0.88`.- Constante integral del PID del control de temperatura para los extrusores.
- `#define EXT0_PID_D 80`.- Constante derivativa del PID del control de temperatura para los extrusores.
- `#define EXT0_PID_MAX 255`.- Está en 255, que representa el máximo valor al que puede llegar el PID por que se trabaja con la señal de activación PWM con 8 bits.
- `#define EXT0_SELECT_COMMANDS "M117 Extruder 1"`.- Es el código M que selecciona el extrusor 0.
- `#define EXT0_EXTRUDER_COOLER_PIN -1`.- Con esto se deshabilita el ventilador para el extrusor 1, ya que todos los ventiladores están conectados directamente a VCC.

### Para el extrusor 1.

Las configuraciones para el extrusor 2 son las mismas que para el extrusor 1, con la diferencia de la siguiente línea de código:

- `#define EXT1_X_OFFSET 5120`.- Se coloca en 5120, que es la cantidad en pasos de la distancia entre los 2 extrusores en el eje X.

### Datos:

Distancia entre boquillas de los extrusores: 32mm.

Resolución del motor en el eje X:  $160 \frac{\text{pasos}}{\text{mm}}$

### Cálculo:

*Número de pasos*

*= Distancia entre boquillas de los extrusores*

*× Resolución del motor en el eje X.*

$$\text{Número de pasos} = 32\text{mm} \times 160 \frac{\text{pasos}}{\text{mm}} = 5120\text{pasos}$$

- `#define EXT1_SELECT_COMMANDS "M117 Extruder 2"`.- Es el código M que selecciona el extrusor 1.

### **Para el control de temperatura ambiente.**

Se realizó la programación como si fuese un extrusor más, y en el código se lo llamó como EXT2, también se realizaron modificaciones en la pestaña “pins.h”, que es la pestaña que donde se asignan los pines de la tarjeta RAMPS, para las diferentes conexiones.

- `#define HEATER_3_PIN 4`.- Se asigna el pin análogo 4 de la tarjeta RAMPS para el control de la activación o desactivación de la niquelina que calienta el ambiente de la máquina.
- `#define TEMP_3_PIN 5`.- Se asigna el pin 5 de la tarjeta RAMPS, como una entrada analógica de lectura del termistor que ayuda al control de temperatura de la impresora.
- `#define EXT2_TEMPSSENSOR_TYPE 1`.- En vista de que el sensor de temperatura usado para el control ambiente de la máquina es el termistor NTC de 100K.
- `#define EXT2_HEAT_MANAGER 0`.- El número cero representa un control ON/OFF de temperatura.
- `#define EXT2_WATCHPERIOD 100`.- El tiempo de espera para que se establezca la temperatura ambiente en el valor seteado, antes de cortar la energía a la niquelina es de 100 segundos.
- `#define EXT2_SELECT_COMMANDS "M117 AMBIENTE"`.- Es el código M que selecciona el control de temperatura ambiente.

### **Para la cama caliente:**

- `#define HAVE_HEATED_BED 1`.- El número 1 representa la existencia de cama caliente en la impresora 3D.
- `#define HEATED_BED_MAX_TEMP 115`.- La cama caliente no puede sobrepasar este valor de temperatura(115°C).

- `#define HEATED_BED_SENSOR_TYPE 1`.- El número 1 representa a un termistor de 100K para el sensado de temperatura de la cama caliente.
- `#define HEATED_BED_SET_INTERVAL 5000`, La temperatura de la cama caliente es seteada cada 5000 milisegundos.
- `#define HEATED_BED_HEAT_MANAGER 1`.- El número 1 representa a que el control de temperatura de la cama caliente se lo realiza mediante un control PID.
- `#define HEATED_BED_PID_PGAIN_OR_DEAD_TIME 196`.- Este número es la constante proporcional del control PID de temperatura de la cama caliente.
- `#define HEATED_BED_PID_IGAIN 33.02`.- Este número es la constante integral del control PID de temperatura de la cama caliente.
- `#define HEATED_BED_PID_DGAIN 290`.- Este número es la constante derivativa del control PID de temperatura de la cama caliente.

### **Configuraciones en el menú de la LCD.**

Para el menú a visualizarse en la LCD, se selecciona el idioma español. Dicho menú se encuentra en la pestaña de programa “uiflang.h” en esta pestaña se pueden hacer todas las configuraciones de frases o palabras que posteriormente se desplegarán en la LCD. Las mismas que se pueden ver en el ANEXO 3.4.

### **Configuraciones en el menú de la LCD.**

- `#define ENDSTOP_PULLUP_X_MIN true`.- Ya que el fin de carrera está en el punto mínimo en eje X.
- `#define ENDSTOP_PULLUP_Y_MIN true`.- Ya que el fin de carrera está en el punto mínimo en eje Y.
- `#define ENDSTOP_PULLUP_Z_MIN false`.- Ya que en el punto mínimo en el eje Z no hay fin de carrera.
- `#define ENDSTOP_PULLUP_X_MAX false`.- Ya que en el punto máximo en el eje X no hay fin de carrera.
- `#define ENDSTOP_PULLUP_Y_MAX false`.- Ya que en el punto máximo en el eje Y no hay fin de carrera.
- `#define ENDSTOP_PULLUP_Z_MAX true`.- Ya que el fin de carrera está en el punto máximo en eje Z.

- `#define X_ENABLE_ON 0`.- La señal del fin de carrera en X, activa en bajo el pin de entrada de la placa.
- `#define Y_ENABLE_ON 0`.- La señal del fin de carrera en X, activa en bajo el pin de entrada de la placa.
- `#define Z_ENABLE_ON 0`.- La señal del fin de carrera en X, activa en bajo el pin de entrada de la placa.
- `#define X_HOME_DIR -1`.- Representa que la posición HOME en X es el punto mínimo.
- `#define Y_HOME_DIR -1`.- Representa que la posición HOME en Y es el punto mínimo.
- `#define Z_HOME_DIR 1`.- Representa que la posición HOME en Z es el punto máximo.
- `#define ENDSTOP_X_BACK_MOVE 10`.- Luego de que se alcanza el fin de carrera en X, la máquina regresa 10mm en sentido opuesto.
- `#define ENDSTOP_Y_BACK_MOVE 10`.- Luego de que se alcanza el fin de carrera en Y, la máquina regresa 10mm en sentido opuesto.
- `#define ENDSTOP_Z_BACK_MOVE 3`.- Luego de que se alcanza el fin de carrera en Z, la máquina regresa 3mm en sentido opuesto.

### **3.6.2. Descripción del Software generador del código G e interfaz gráfica para la PC (MatterControl 1.5).**

Luego de considerar las prestaciones del programa, y tomando en cuenta la necesidad de usar un software libre, se decidió usar la interfaz gráfica para la PC y llevar a cabo el proceso de generación de las coordenadas en código G, mediante el software MatterControl en la versión 1.5, que es la versión más actual a la fecha (03/05/16) este software se lo puede descargar gratuitamente de la página de Mattercontrol ([www.mattercontrol.com](http://www.mattercontrol.com)). A continuación se detalla el manejo de este software.

### 3.6.2.1. Selección del tipo y modelo de impresora.

El programa Matter Control 1.5, permite al usuario seleccionar el tipo de impresora que se va a utilizar, en la barra de herramientas en la pestaña FILE. Pudiendo ser incluso de una marca conocida como son: Makerbot, Wanhao, Prusa i3, entre otras. En el caso de la impresora ESPE3D 1.0., se utilizó una impresora cartesiana de doble extrusor. En la Figura 3.52., se muestra la selección de la impresora que se utilizó, se seleccionó una impresora 3D que tenga características muy similares tanto en cinemática como en el hecho de tener dos extrusores, por ende se seleccionó la impresora Maker's Tool Works del modelo Mendel Max 3 (Dual Extrusion). Una vez conectado el cable USB al ordenador, este me reconoce por defecto el puerto serial y la velocidad por defecto está en 250000 baudios, pero de tener problemas con esta velocidad se debe seleccionar 115200 baudios, esta es la segunda velocidad de comunicación que permite seleccionar el software MatterControl, como se observa en la Figura 74.

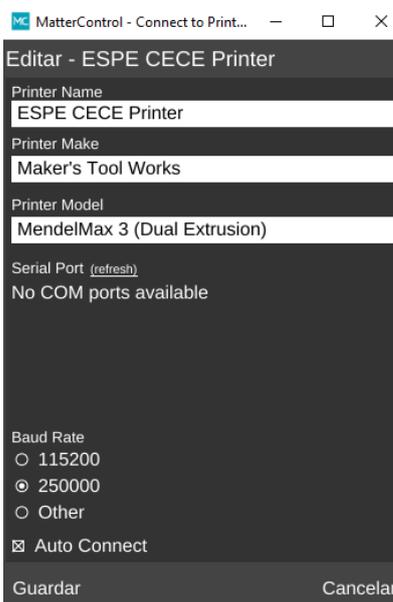


Figura 74. Impresora y modelo seleccionados.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.6.2.2. Selección de las características de la impresión.

En la interfaz se selecciona la pestaña SETTINGS, General, permite seleccionar algunas las características del proceso de impresión y el producto final. En la pestaña general existen sub pestañas que permiten la selección de parámetros para las pasadas y superficies, del relleno, velocidades, bases de la impresión, parámetros del material de soporte, perímetros auxiliares para el trabajo con doble extrusor, tanto del material de soporte como del material base. A continuación se describen las pestañas de los parámetros generales (SETTINGS, General).

#### 3.6.2.2.1. Layers/Surface.

Aquí se generan los parámetros para las superficies externas de las piezas, como espesores. La opción se visualiza en la Figura 75.

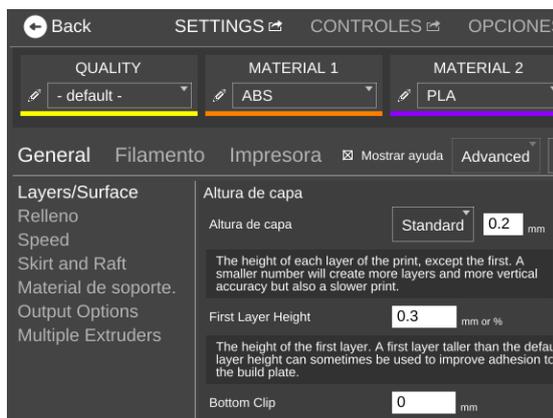


Figura 75. SETTINGS, General, Layers/Surface.

Fuente: (Los Autores).

#### 3.6.2.2.2. Relleno.

Aquí se generan los parámetros para el relleno de las piezas, como el porcentaje de relleno y el tipo de mallado. La opción se visualiza en la Figura 76.

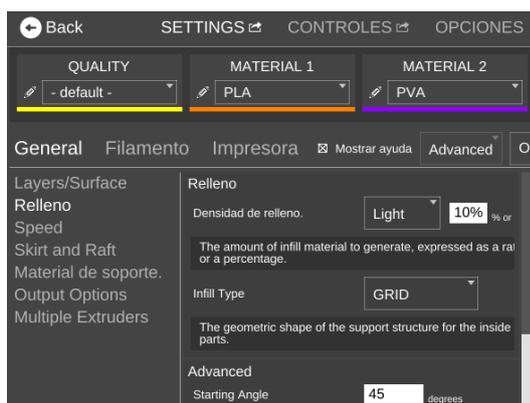


Figura 76. SETTINGS, General, Relleno.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.6.2.2.3. Speed.

Aquí se setean las velocidades para el proceso de producción de las piezas. La opción se visualiza en la Figura 77.

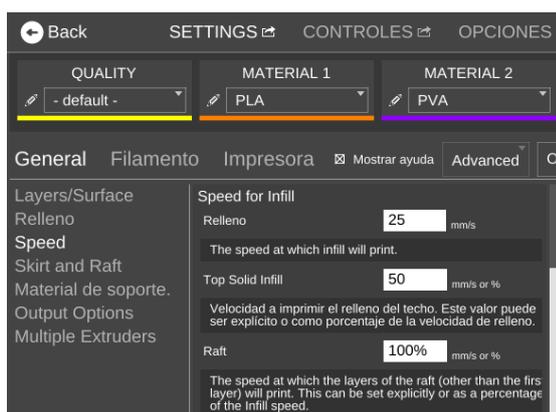


Figura 77. SETTINGS, General, Speed.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.6.2.2.4. Skirt and Raft.

De igual manera en la opción “Skirt and Raft” permite seleccionar las características de la base impresa sobre la cual se asentará la pieza. Esta opción se visualiza en la Figura 78.

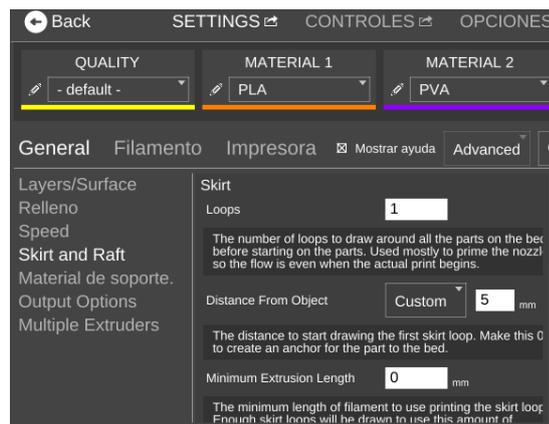


Figura 77. SETTINGS, General, Relleno.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.6.2.2.5 Material de soporte.

En esta opción se dan todos los parámetros para la generación del soporte en la impresión. Esta opción se visualiza en la Figura 78.

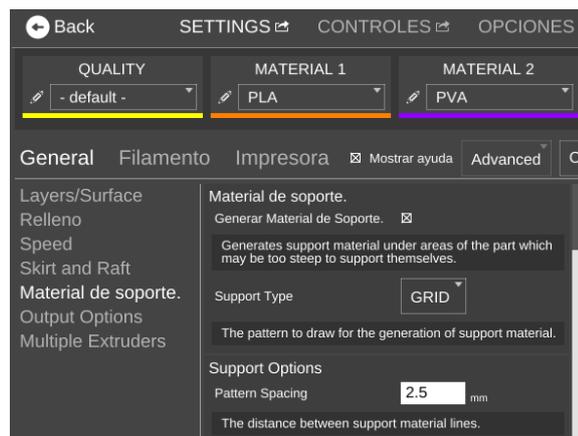


Figura 78. SETTINGS, General, Material de soporte.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.6.2.2.6. Output Options.

Aquí únicamente me permite seleccionar que la pieza se imprima en el centro de la cama caliente. Esta opción se visualiza en la Figura 79.

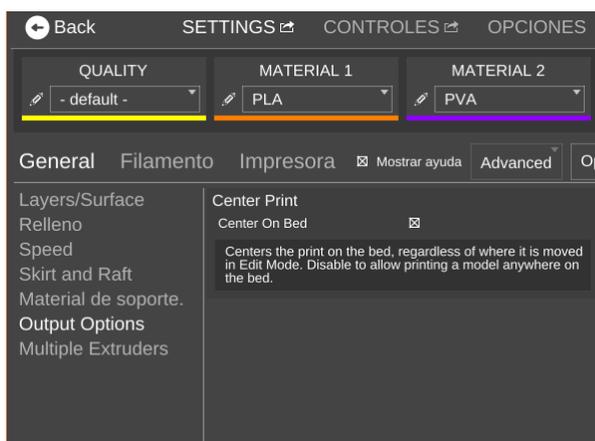


Figura 79. SETTINGS, General, Output Options.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.6.2.2.7. Multiple Extruders.

La opción me permite realizar impresión de un perímetro rectangular para limpiar la boquilla del segundo extrusor. Esta opción se visualiza en la Figura 80.

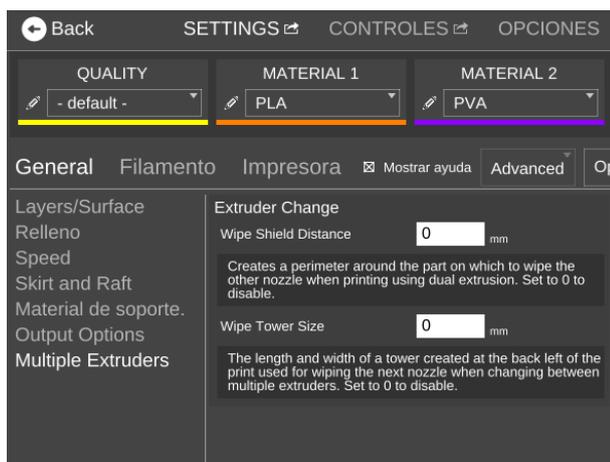


Figura 80. SETTINGS, General, Multiple Extruders.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.6.2.3. Selección de las características del filamento.

En la pestaña SETTINGS, Filamento, se puede definir las características del o los filamentos en el caso de trabajar con doble extrusor. A continuación se detallan cada una de las 3 sub pestañas.

### 3.6.2.3.1. Filamento.

Aquí se lo pueden definir las características físicas de los filamentos, temperaturas tanto de extracción como de cama caliente y retracciones. Esta opción se visualiza en la Figura 81.

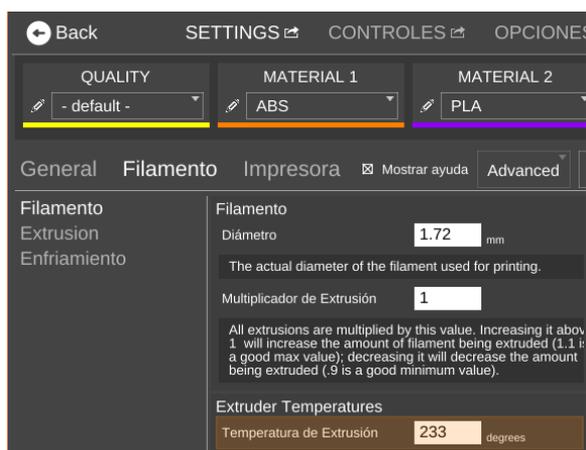


Figura 81. SETTINGS, Filamento, Filamento.  
Fuente: [Los Autores].

### 3.6.2.3.2. Extrusión.

La opción me permite modificar anchuras de impresión, pero se puede trabajar bien sin esta opción. La pestaña Extrusión se visualiza en la Figura 82.

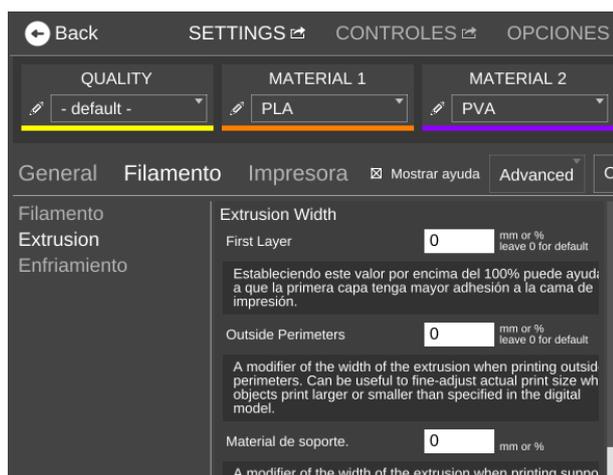


Figura 82. SETTINGS, Filamento, Extrusión.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.6.2.3.3. Enfriamiento.

La opción me permite modificar el control de los ventiladores tanto de los motores de los extrusores como de los ventiladores que enfrían la punta de la boquilla de extrusión, pero las opciones son indiferentes para la impresora ESPE3D 1.0, por que los ventiladores para los motores de los extrusores están conectados directamente en la alimentación, y por no disponer de ventiladores de punta de boquilla. La pestaña Enfriamiento se visualiza en la Figura 83.

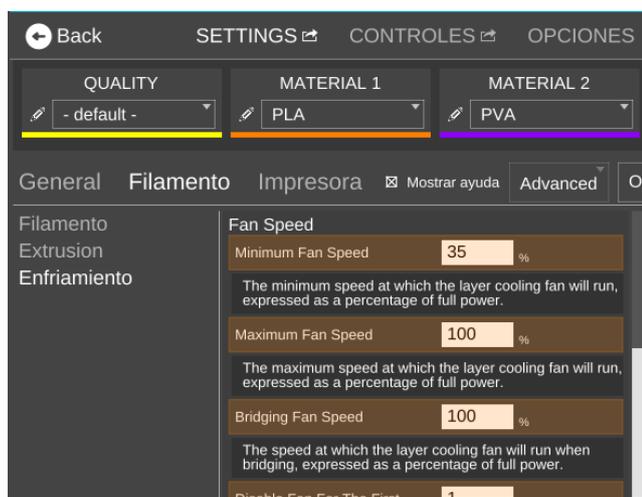


Figura 83. SETTINGS, Filamento, Enfriamiento.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.6.2.4. Selección de las características de la impresora.

En la pestaña SETTINGS, Impresora, se puede definir características como las dimensiones y la forma de la cama caliente, características de los extrusores, también se seleccionan elementos que posee la impresora, como ventiladores, cama caliente, controles, etc. A continuación se detallan cada una de las 5 sub pestañas.

#### 3.6.2.4.1. Print Area.

Aquí se definen los parámetros del área y altura de impresión. Opción visualizada en la Figura 84.

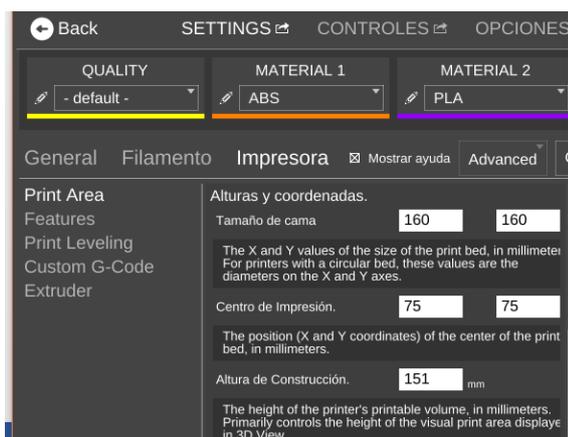


Figura 84. SETTINGS, Impresora, Print Area.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.6.2.4.2. Features.

En la sub pestaña Features, se seleccionan los elementos que posee la impresora, como ventiladores, cama caliente, número de extrusores, tarjeta SD, etc. Opción visualizada en la Figura 85.

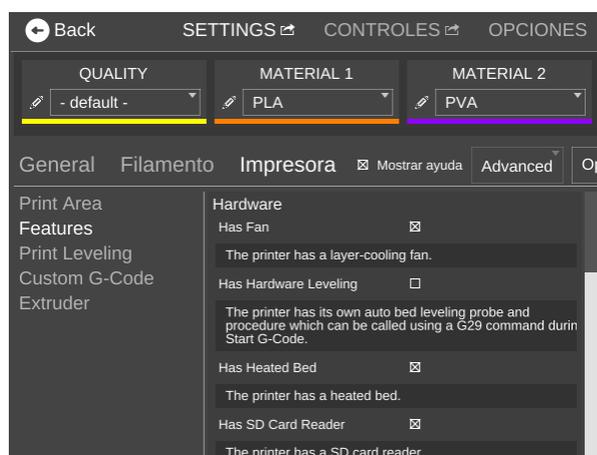


Figura 85. SETTINGS, Impresora, Features.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.6.2.4.3. Print Leveling.

La opción leveling me permite nivelar el plano de impresión. Opción visualizada en la Figura 86.

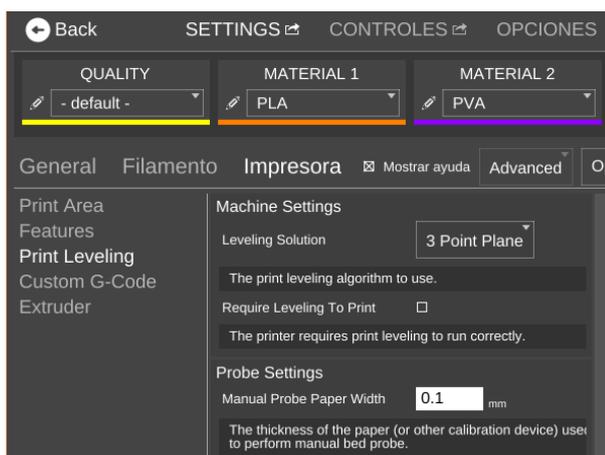


Figura 86. SETTINGS, Impresora, Print Leveling.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.6.2.4.4. Custom G-Code.

En la sub pestaña Custom G-Code, se escriben o visualizan fragmentos claves del código G. Opción visualizada en la Figura 87.

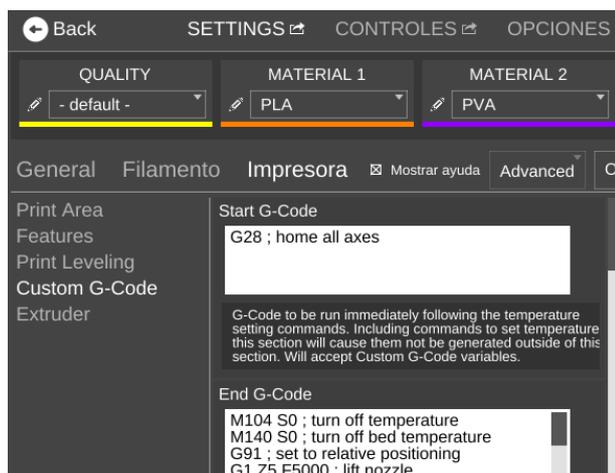


Figura 87. SETTINGS, Impresora, Custom G-Code.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.6.2.4.5. Extruder.

En la sub pestaña Extruder, se seleccionan los diámetros de las puntas de las boquillas y offsets. Opción visualizada en la Figura 88.

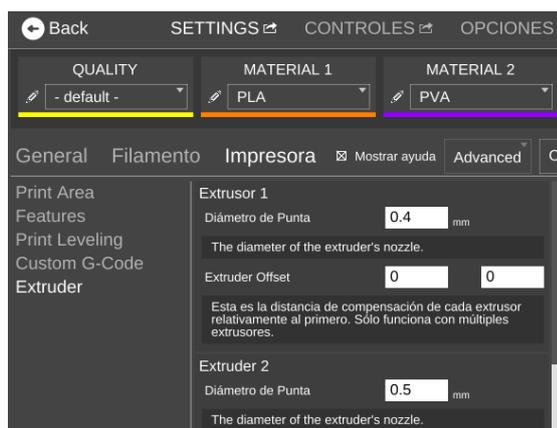


Figura 88. SETTINGS, Impresora, Extruder.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.6.2.5. Accionamiento de los actuadores mediante la interfaz gráfica

El Matter Control 1.5 permite al usuario controlar los actuadores de la impresora 3D desde la misma interfaz como la temperatura de los extrusores o de la cama caliente, o los movimientos de los ejes y accionamiento de los extrusores. Para lo cual el usuario debe dirigirse a la pestaña CONTROLES, tal como se muestra en las Figuras 89, y 90.



Figura 89. Características generales de impresión.  
Fuente: (Los Autores).



Figura 90. Características generales de impresión.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.6.2.6. Menú OPCIONES

La pestaña opciones permite al usuario seleccionar algunos parámetros, pero los principales son:

#### 3.6.2.6.1. Calibration Settings

La opción permite al usuario nivelar el plano de impresión por software, seteando 3 puntos, en el que se genera un plano imaginario sobre el cual comienza la impresión de la pieza. Para habilitar esta opción se debe tener conectada la impresora a la PC, mediante el cable USB. La opción se visualiza en la Figura 91.

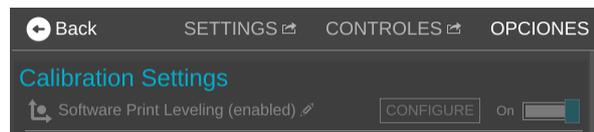


Figura 91. Calibration Settings.  
Fuente: (Los Autores).

#### 3.6.2.6.2. Application Settings

La opción permite al usuario seleccionar el idioma y los colores de la interfaz. La opción se visualiza en la Figura 92.

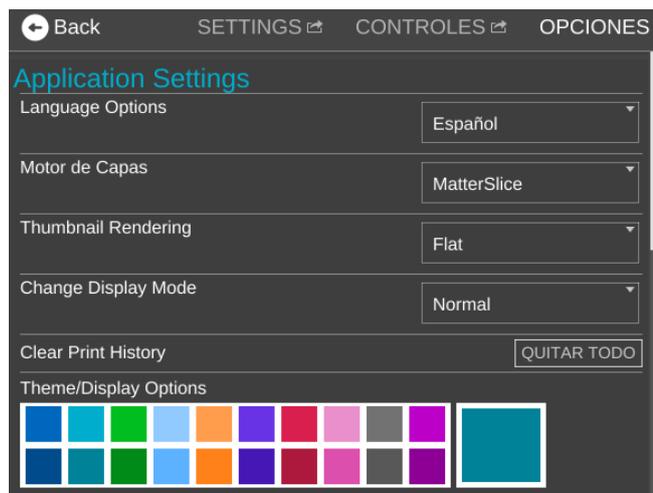


Figura 92. Cablibration Settings.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.6.2.7. Visualización 3D y características de las piezas a imprimir.

El Matter Control 1.5 permite al usuario visualizar las piezas a imprimir y la gráfica en 3 dimensiones de cada una de las capas de la impresión. De este modo se puede tener una idea clara de cómo se va a ir generando paso a paso la impresión 3D de la pieza. Para ello el programa cuenta con 2 opciones que se presentan a continuación.

#### 3.6.2.7.1. 3D VER.

El usuario podrá rotar, escalar, hacer espejo y definir el tipo de material para cada pieza. Luego de cada cambio se debe dar click en guardar para guardar los cambios. Si se desea agregar una nueva pieza, se debe dar click en el ícono Insertar, para abrir un nuevo archivo .stl en la misma pantalla. La opción se visualiza en la Figura 93.

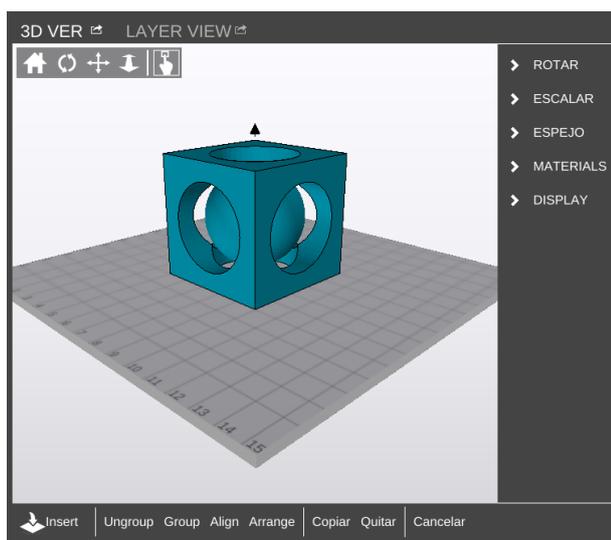


Figura 93. 3D VER.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.6.2.7.2. LAYER VIEW.

El usuario podrá ver capa a capa como se va a generar la impresión, pero previamente se debe dar click en Generar que también genera el código G leído por la máquina para la impresión. La opción se visualiza en la Figura 94.

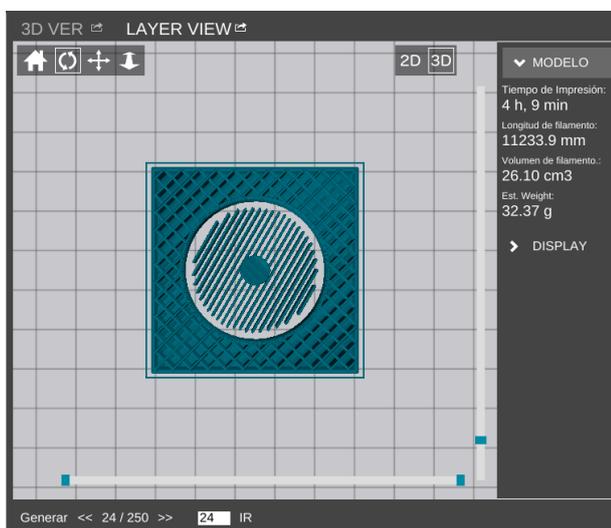


Figura 94. LAYER VIEW.  
Fuente: (Los Autores).

### 3.6.2.8. Inicio de la impresión

La impresión se puede realizar directamente desde el Matter Control, siempre y cuando la impresora esté enlazada al programa mediante el cable USB. O en su defecto se puede imprimir un archivo desde una tarjeta SD.

#### 3.6.2.8.1. Impresión desde el Matter Control.

Una vez que la impresora 3D sea conectada a la PC por medio del cable USB. Se debe dar click sobre el recuadro ubicado en la parte superior izquierda “CONECTADO”, de la pantalla principal, para que la PC se enlace a la impresora 3D. En el recuadro de al lado se visualiza la palabra Status, donde indica el estado de conexión o desconexión de la máquina. Si la máquina no logra enlazarse al cabo de unos segundos, se debe cambiar la velocidad de transmisión como se menciona en el Título “Selección del tipo y modelo de impresora”.

Cuando la impresora está enlazada con la PC y el programa Matter Control, se debe cargar la pieza deseada a ser impresa, misma que debe estar en formato .stl, para lo cual el usuario debe dar click en el recuadro inferior izquierdo de la pantalla principal “Agregar”, mismo que se muestra en la Figura 95, inmediatamente se despliega el recuadro para selección de documentos donde se puede buscar y cargar el archivo .stl de la pieza requerida. En la pantalla principal del programa Matter Control es posible visualizar el listado de las piezas cargadas en ese momento (Figura 95).



Figura 95. Agregar.  
Fuente: (Los autores).

Luego de que la pieza ha sido cargada en el Matter Control, y todos los parámetros han sido seteados, se debe dar click en Generar como se muestra en el Título “LAYER VIEW”, para que el software genere el código G que será interpretado por el microcontrolador de la impresora 3D.

Finalmente cuando el código G ha sido generado, aparecerá la opción imprimir, en la cual hay que dar click para que le proceso de impresión comience.

Adicionalmente mientras la impresión se está llevando a cabo se puede tanto parar como cancelar el proceso de impresión.

### 3.6.2.8.2. Impresión desde la tarjeta SD.

Se debe ir a la pestaña COLA, seleccionar la pieza a imprimir, y dar clic en la opción exportar, como se ve en la Figura 96.



Figura 96. COLA, Exportar.

Fuente: (Los autores).

Una vez dado click en exportar se debe seleccionar Export as GCode del cuadro File Export Options, y guarda el archivo en la tarjeta SD, que posteriormente será leída por la impresora ESPE 3D. El cuadro se ve en la Figura 97.

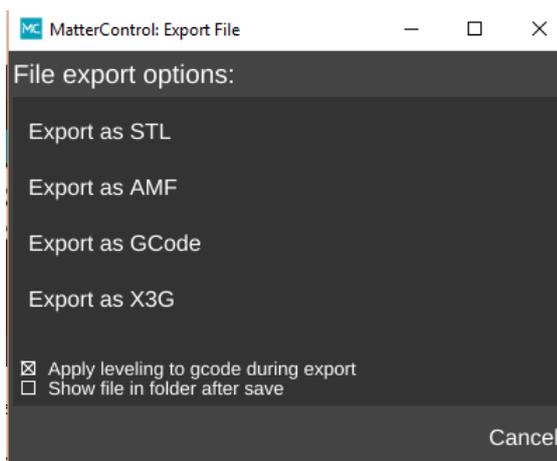


Figura 97. File export options.

Fuente: (Los autores).

La tarjeta SD debe ser insertada por el lado izquierdo del panel de mando de la impresora ESPE 3D como se indica en la Figura 98.

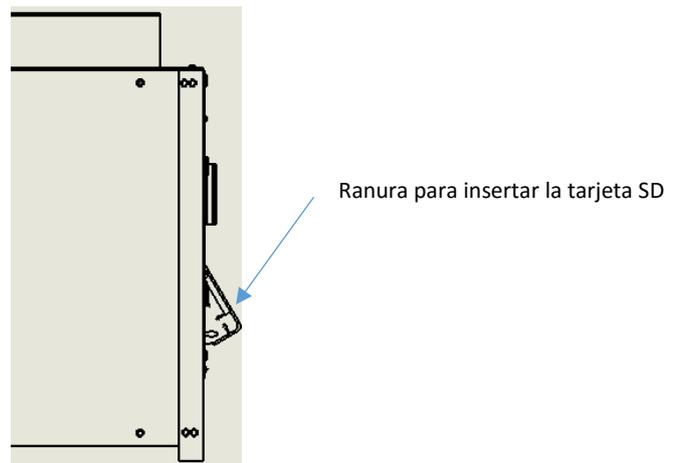


Figura 98. Vista lateral izquierda de la impresora ESPE 3D.  
Fuente: (Los autores).

Luego de ser insertada la tarjeta SD, la impresora leera automáticamente los archivos que contenga y podemos seleccionar el archivo a ser impreso mediante el giro de la perilla del panel de mando, ya encontrado dicho archivo pulsamos la perilla para imprimir el seleccionado, se escuchara un sonido de "bip" indicando que la impresora se está preparando para imprimir.

## Resumen:

En el presente capítulo, se realiza el análisis del desarrollo completo del proyecto, partiendo de una **matriz QFD**, en la cual se plantean las necesidades o requerimientos para la realización de la impresora 3D. Una vez determinadas las necesidades se plantean posibles soluciones, y finalmente se selecciona la alternativa más idónea que satisface dicha necesidad.

Seguidamente se determinan parámetros particulares técnicos y cuantificables requeridos en el proyecto, los cuales serán la base para el completo desarrollo del mismo.

Con los parámetros ya determinados, se plantean cuáles son los **subsistemas** que forman parte del proyecto. Los cuales son:

- Subsistema de estructura de la impresora 3D.
- Subsistema de generación de movimiento.
- Subsistema de extrusión.
- Subsistema de la base de impresión.
- Subsistema para el ambiente controlado.
- Subsistema de la tarjeta de control.
- Subsistema de interfaz.

Determinados ya los **subsistemas**, se analiza alternativas de solución para cada uno de ellos se plantean las opciones se comparan y se determina cual es la alternativa más idónea para llevar a cabo los subsistemas.

Cundo las alternativas ya estén seleccionadas, se realiza el diseño tanto mecánico, electrónico y de control, para el desarrollo completo de la máquina.

En el **diseño mecánico** se cálculos de los componentes y mecanismos mecánicos de la impresora 3D, esto con el fin de determinar puntos críticos, margen de error, factores de seguridad, para seleccionar elementos que cumplan con requisitos de torque, potencia tenacidad, etc. En el **diseño electrónico** se analizan los elementos eléctricos y electrónicos que conforman la impresora 3D, y que muchos de ellos ya fueron determinados en literales anteriores. Mientras que en el **diseño de control** se

analizan tanto el programa que comanda el accionamiento de la máquina y que será quemado en el microcontrolador, como también el software de interfaz con el usuario.

Haciendo un resumen de las características de la impresora se tiene:

### **Impresión**

Tecnología de impresión	FFF
Volumen de impresión alto	180mm de ancho x 180mm de largo x151mm de  (180 x 180 x 151) mm
Ajustes de altura de capa	Fino: 0.1mm Standard: 0.2mm Grueso: 0.3mm Personalizado: definido por el usuario
Precisión de posicionamiento:	X-Y: 6.2 micras Z: 0.5 micras
Diámetro del filamento:	1.75 mm
Diámetro de la boquilla:	0.4mm

### **Software**

Paquete de software:	Matter Control 1.5
Archivos admitidos:	stl
SO compatibles:	Windows [7 o superior], Ubuntu, Mac Os

### **Dimensiones Físicas**

Estructura ensamblada: alto	527mm de largo x 497mm de ancho x596mm de  (527 x 497 x 596) mm
Peso sin carretes de filamento:	20 Kg
Peso con carretes de filamento:	22Kg (peso variable según el peso del carrete)

### **Temperatura**

Temperatura externa de funcionamiento: (9° - 40°) C

Temperatura interna de funcionamiento: PLA: 50°C ABS: 70°C

Valores variables según usuario

Temperatura de extrusión: PLA: 210°C ABS: 240°C

Valores variables según usuario e indicaciones de cada material

### **Sistema Eléctrico**

Entrada AC: 110 V, 12 A

Potencia requerida: 800W

Conectividad: Tarjeta SD, conexión USB al computador

### **Sistema Mecánico**

Chasis: Aluminio y acero con recubrimiento lacado,

Cuerpo: Paneles de Acrílico espesor 3mm

Plataforma de impresión: Cobre

Rodamientos XYZ: Rodamientos Lineales LM8UU de aluminio,

Motores paso a paso: Nema 17 con ángulo de paso de 1.8°, micro pasos de 1/32

# Capítulo 4

## Implementación

En el presente capítulo se detalla la construcción y ensamble de la estructura con los componentes mecánicos, seguida por la implementación de los componentes eléctricos y electrónicos. Finalizando con la programación del controlador y el programa especializado para la impresión en 3D. Dando vida tanto al hardware como al software de la impresora 3D.

### **4.1. Implementación estructural de la máquina.**

La implementación de la estructura física tanto interna como externa de la máquina, sigue una secuencia de pasos posteriores al diseño y dibujo mecánico, que permitieron la construcción de la estructura física de la impresora 3D. Dichos pasos se detallan a continuación.

#### **4.1.1. Diseño y construcción de las partes que forman la estructura externa de la impresora 3D.**

En este paso se transforma la materia prima en piezas cuyo posterior ensamble da forma al cuerpo donde se apoyan todos los componentes de la impresora 3D.

Una vez realizado el diseño de las piezas, su ensamble y los respectivos planos con la ayuda de un software CAD, se procede a la manufactura de las mismas. El material elegido para las columnas fue aluminio, por ser fácil de maquinar y de baja densidad. Las bases inferiores y placas frontal y posterior, fueron planchas de acero para que

brindan una mayor rigidez, mientras que las paredes y el techo son de planchas de acrílico, por ser translúcido y fácil de maquinar.

En proceso de construcción fueron necesarias técnicas de manufactura como corte, esmerilado, taladrado, limado, lijado, para finalmente proceder a pintar las partes que conforman la carcasa metálica. Dichos procesos se ilustran en las imágenes de la Figura 99.

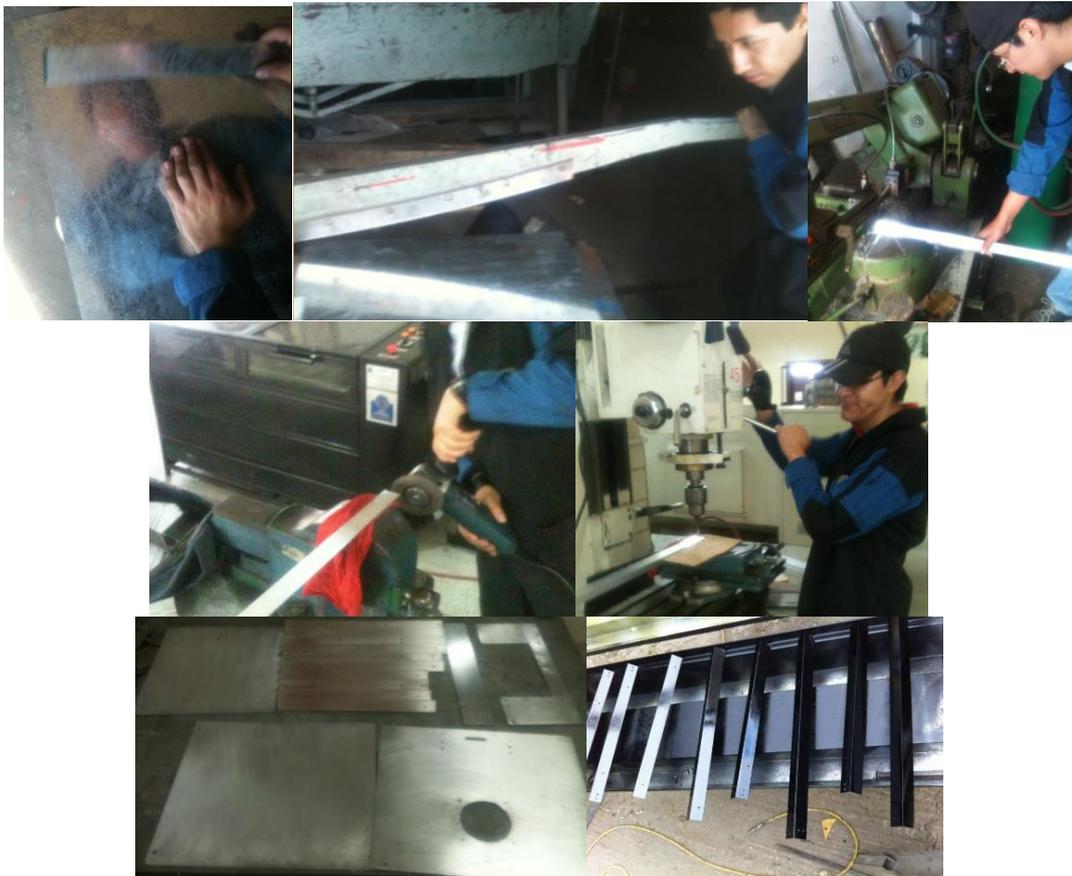


Figura 99. Manufactura de las piezas que forman la carcasa de la impresora 3D  
Fuente: (Los Autores).

#### **4.1.2. Ensamble de la carcasa de la máquina.**

Una vez manufacturadas las piezas metálicas que forman el esqueleto de la máquina, se proceda a unir las. Dicho ensamble se lo realizó con unión no permanente, para esto fue necesario el uso de pernos de acero inoxidable de cabeza hexagonal de 4mm de diámetro y longitudes de 20mm y 15mm, dependiendo el espesor de los elementos a ser emperrados. Una vez realizado esto, con ayuda de un nivel se ve si la

estructura está perfectamente alineada, y a su vez se corrigen detalles de desfase en las perforaciones. Este proceso se ilustra en la Figura 100.



Figura 100. Montaje de la carcasa previo a ser pintado.  
Fuente: (Los Autores).

### **4.1.3. Construcción de las partes de la estructura interna de la máquina.**

La estructura interna de la impresora 3D, permite el movimiento del actuador final, en este caso es un doble extrusor MK8, en 2 direcciones (x, y). Además cuenta con un sistema de elevación de cama caliente para impresión 3D, en dirección z. Los 3 grados de libertad mencionados permiten al robot cartesiano de la impresora 3D cubrir todo volumen de trabajo.

Para la construcción de la estructura interna se precisó de los siguientes elementos:

- Engranés
- Bandas
- Rodamientos circulares.
- Rodamientos lineales.
- Ejes acero inoxidable diámetro 8mm.
- Ejes acero A36 diámetro 5mm.
- Pernos diámetro 4mm, longitud 20mm.
- Tres motores NEMA 17.
- Un extrusor de doble cabezal MK8.

- Soportes, carros y palanca de ABS.
- Dos vigas de aluminio tipo I, para soporte de la cama caliente.
- Una cama caliente HeatBed PCB MK2.

Todas las piezas de ABS, utilizadas en la construcción de esta máquina fueron producidas mediante el proceso de prototipado rápido a partir de diseños tridimensionales previamente realizados en un software CAD (SolidWorks). Con ayuda de una impresora 3D del modelo MakerBot Replicator 2X del laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE se realizaron dichas impresiones 3D, tal y como se muestra en la Figura 101. Esto con el fin de optimizar tiempo y recursos económicos, además de demostrar que la impresora 3D posee partes que pueden ser auto replicables.

En las imágenes de la Figura 102, se muestran las piezas impresas en ABS, mediante la técnica de deposición por hilo fundido (FDM), acoplados los respectivos engranes, ejes, platinas, rodamientos, tornillo sin fin, motores y la cama caliente.

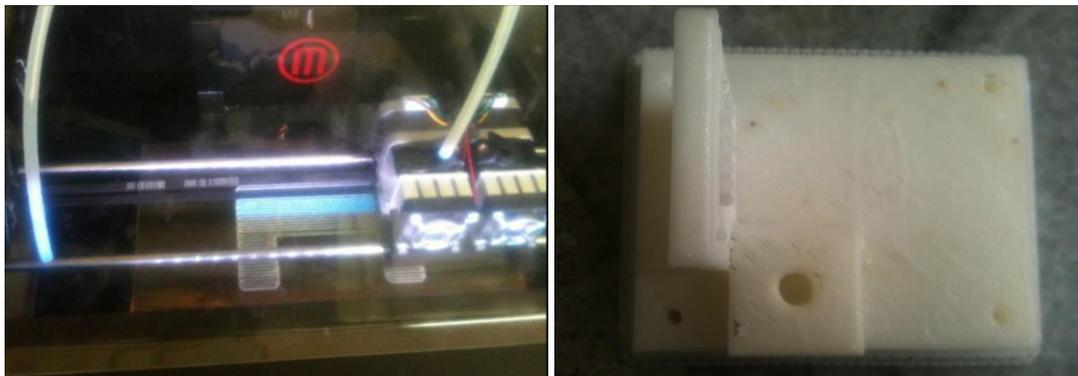


Figura 101. Impresora 3D Makerbot en proceso de impresión y la pieza final.

Fuente: (Los Autores).

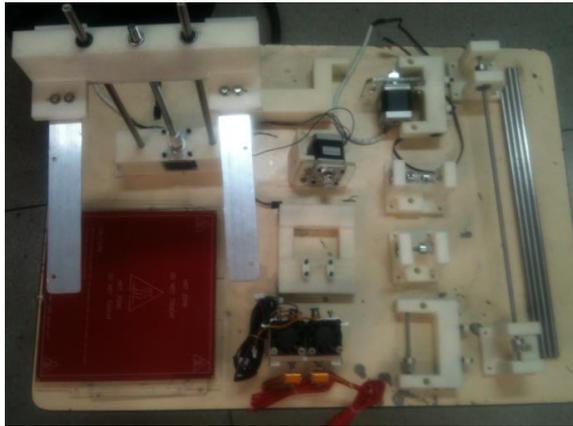


Figura 102. Piezas impresas y sus respectivos acoples.  
Fuente: (Los Autores).

#### 4.1.4. **Ensamble de la estructura interna y externa de la máquina.**

El proceso de acople a la carcasa consistió en cortar los ejes de acero inoxidable de 8mm de diámetro a las medidas predefinidas en el diseño. Dichos ejes son las guías por donde se desplazan los carros que generan el movimiento del sistema. Posteriormente se acopla los rodamientos axiales a los carros en x, y, z. los mismos que son fijados mediante un adhesivo líquido. Una vez hecho esto, se procede a insertar los ejes en todos los carros y soportes necesarios que me dan el movimiento en el plano horizontal (x, y), para posteriormente fijarlos en las paredes y columnas de la impresora. Dicho proceso se ilustra en las imágenes de la Figura 103.



Figura 103. Acople de la estructura interna de la impresora 3D con la carcasa de la misma.  
Fuente: (Los Autores).

Paso siguiente, se ajustan los ejes y los soportes los más nivelado posible, con ayuda de un nivel de burbuja (Figura 104), esto con el fin de asegurar una mayor exactitud de la máquina en el momento de ser puesta en marcha. Sobre los carros y soportes se fijan motores, bandas y los extrusores, Figura 105.

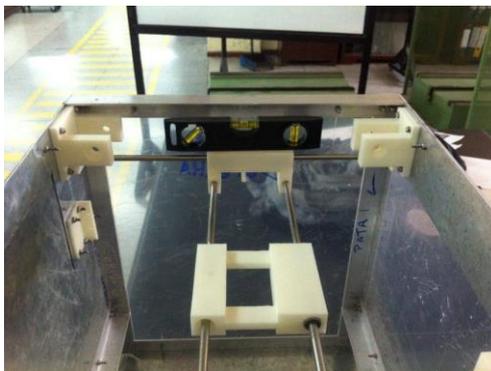


Figura 104. Confirmación del correcto nivel de la estructura interna de la máquina.  
Fuente: (Los Autores).

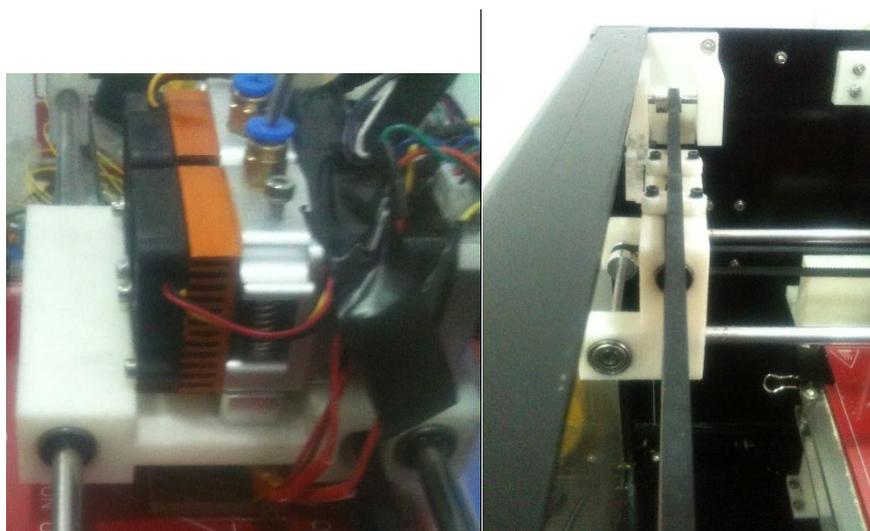


Figura 105. Motores, bandas y extrusores montados en los carros y soportes en el plano horizontal (x, y).  
Fuente: (Los Autores).

Una vez fijado el sistema en el plano horizontal se procedió a fijar es sistema de elevación de la cama caliente en el eje vertical (z). Para lo cual se utilizaron dos piezas de soporte tanto inferior como superior, mismas que se ilustran en la Figura 106. La pieza de soporte inferior será fijada en la plancha base superior de la impresora 3D mediante pernos cabeza hexagonal de 4mm de diámetro, sobre esta se monta el motor que produce la elevación y los dos ejes que sirven de guía para la palanca que sostiene la cama caliente. Mientras que la pieza de soporte superior es fijada a la pared posterior

de la impresora 3D mediante los pernos ya mencionados, y en esta se insertan los ejes guías ya mencionados. Posteriormente se acopla la palanca y con ayuda de pernos se fijan las vigas tipo I, sobre las cuales se monta la cama caliente, y sobre esta se coloca un vidrio, para asegurar planitud como se muestra en el Figura 4.9. Para finalmente fijar todo en la carcasa de la impresora 3D, proceso que es mostrado en la Figura 108.

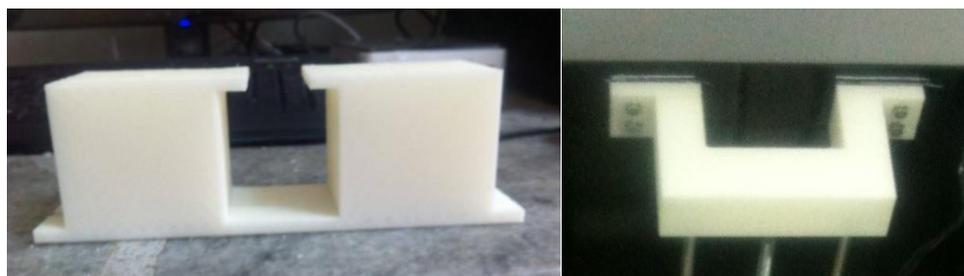


Figura 106. Pieza base y soporte superior en ABS para el sistema de elevación de la cama caliente.

Fuente: (Los Autores).

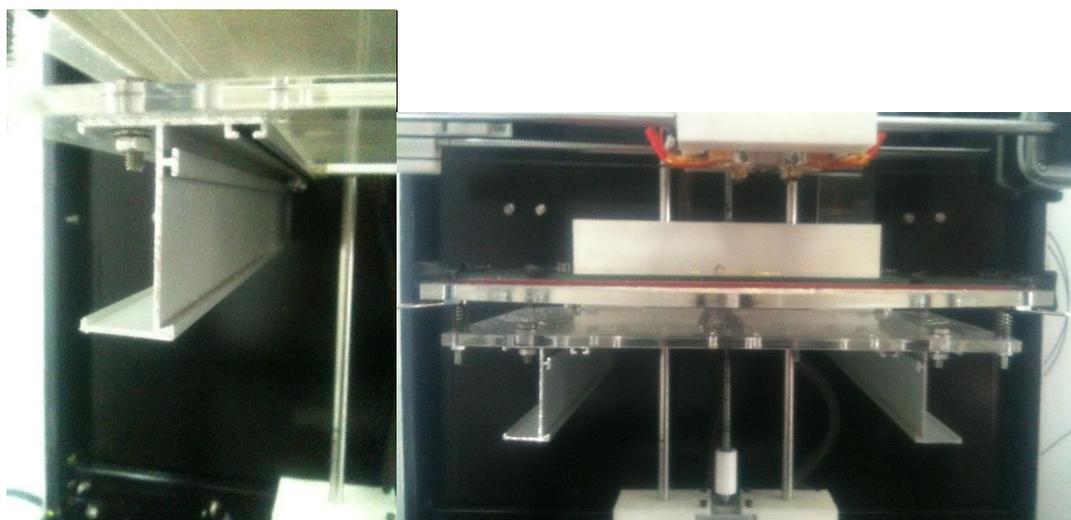


Figura 107. Viga tipo I que soporta a la cama caliente, y ensamble completo de la cama.

Fuente: (Los Autores).



Figura 108. Sujeción del sistema de elevación de la cama caliente, en la carcasa de la impresora 3D.

Fuente: (Los Autores).

#### **4.1.5. Ensamble de las cubiertas de acrílico en la máquina.**

Con el objetivo de poder hacer el control de temperatura interno de la impresora 3D, se debe tener un ambiente cerrado de la misma. Además es importante visualizar el proceso de impresión y del sistema en todo momento. Por lo cual se decidió cubrir las paredes laterales, frontal, y cubierta superior con planchas de acrílico transparente de 3mm de espesor. Una vez conocidas las medidas de dichas planchas, de la puerta frontal, de las puertas inferiores, y de la cámara térmica inferior de la cual se mencionará luego, se las dibuja con un software CAD, y luego se las guarda con la extensión .dxf. Para posteriormente cortar las planchas con ayuda de una cortadora láser, similar a la que se ilustra en la Figura 109.



Figura 109. Cortadora laser del laboratorio de procesos de manufactura de la universidad de las fuerzas armadas ESPE.

Fuente: (Los Autores).

Una vez obtenidas las planchas y piezas de acrílico, estas son perforadas para posteriormente ser empernadas en las paredes y columnas de la carcasa de la impresora 3D. También se debe hacer las perforaciones para acoplar bisagras, la manija de la puerta de acrílico, y la entrada de la fuente de alimentación, switch ON/OFF de la impresora 3D y entrada de la comunicación serial USB tipo B, dichas acciones se observan en la Figura 110. Una vez realizadas dichas perforaciones se procede a pintar de negro las partes inferiores de las paredes laterales y las puertas inferiores. Esto con el fin de tapar la circuitería interna de la máquina. Para finalmente fijar todas las piezas de acrílico en la carcasa de la máquina, y colocar las puertas con ayuda de bisagras y tornillos (Figura 111.)



Figura 110. Planchas de acrílico con sus respectivas perforaciones y pintado.

Fuente: (Los Autores).

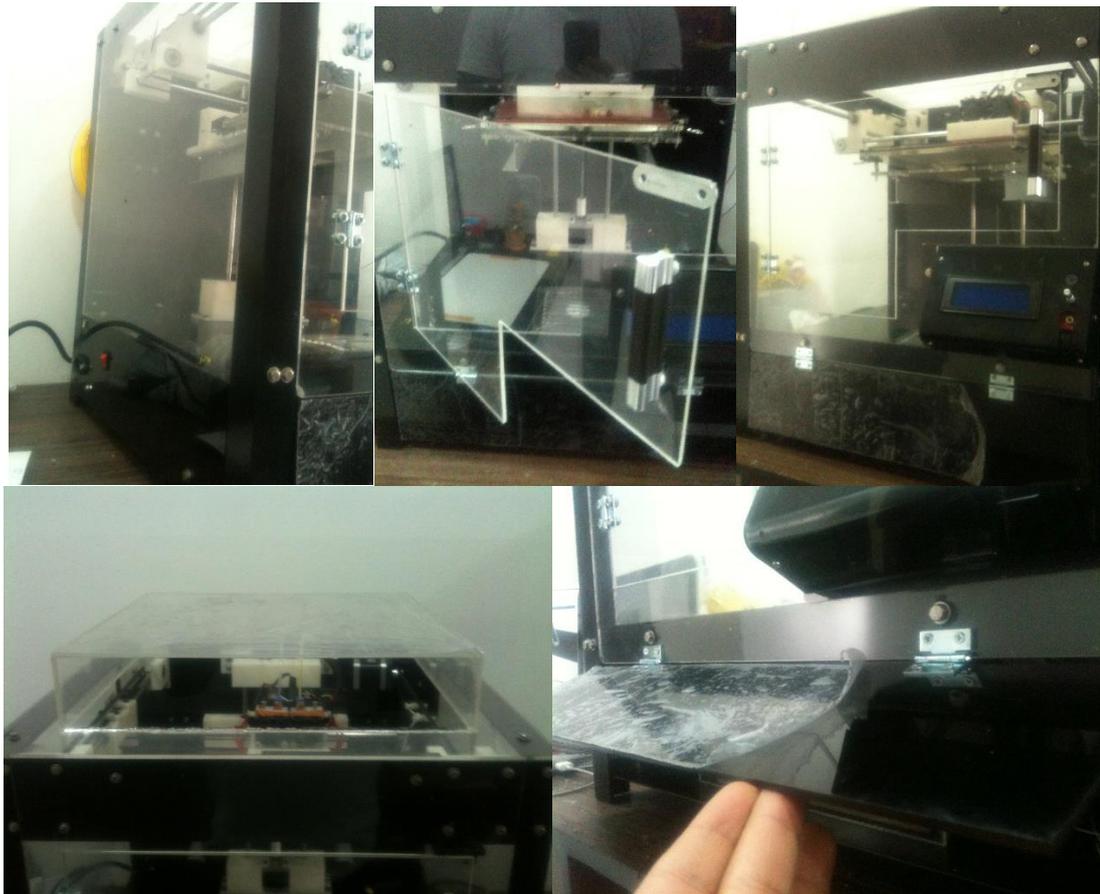


Figura 111. Piezas de acrílico fijadas caras lateral, superior, frontal y puertas de la máquina.

Fuente: (Los Autores).

Finalmente en la parte externa de la pared posterior, se fijan los soportes para los carretes de materia prima (ABS, PLA, PVA). Estos fueron hechos de una placa cuadrada de acrílico de 6mm de espesor, perforada tanto para insertar un tocho de PVC, como para ser emperrada en la pared posterior de la máquina. Por último las piezas son pintadas y fijadas en la carcasa de la impresora 3D, dichos soportes se muestran en la Figura 112.



Figura 112. Soportes para la colocación los carretes de ABS, PLA o PVA.  
Fuente: (Los Autores).

## 4.2. Implementación de la caja térmica.

Como se menciona en el capítulo anterior, para elevar la temperatura ambiente de la impresora 3D, es necesario la utilización de una niquelina que me aporte el calor necesario, y un ventilador que distribuya el aire caliente hacia el volumen de trabajo de la impresora 3D, las características de los mismos se mencionan en el capítulo anterior. Para lo cual se realizó una perforación en la plancha base superior de la máquina (Figura 113) que es por donde va a circular el aire caliente desde la caja térmica hacia el ambiente del volumen de trabajo. En el centro de este agujero se fijó el ventilador y por seguridad se lo cubrió con una rejilla de acrílico, como se muestra en la Figura 113.



Figura 113. Conducto de aire ventilador, entre la caja térmica y la cámara principal de la impresora.  
Fuente: (Los Autores).

Cuando ya haya sido fijado el ventilador, se fijan las paredes de la caja térmica de acrílico previamente cortadas con ayuda de un adhesivo líquido. Una vez fijadas las paredes de la caja térmica se colocan las bisagras y se fija la puerta. Con la caja térmica ensamblada, se coloca en el suelo de la mesa una baldosa cuadrada que hará de aislante térmico. Y sobre la baldosa se fija la pieza cerámica, que también hace de aislante y contiene a la niquelina (Figura 114), todo el conjunto se puede observar en la Figura 115.



Figura 114. Niquelina en material cerámico.  
Fuentes: (Los Autores).

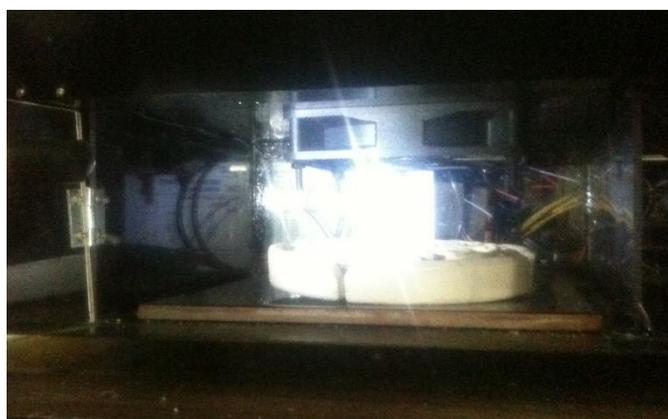


Figura 115. Caja térmica.  
Fuentes: (Los Autores).

### **4.3. Implementación de los componentes eléctricos.**

Para el accionamiento de todo es sistema, es necesario conectar sensores, actuadores y controladores a una fuente de energía eléctrica. Además de facilitar en la carcasa de la máquina una conexión USB, para el comando de la impresora 3D desde una PC.

### 4.3.1. Implementación del sensor de temperatura ambiente.

Como ya se mencionó en el capítulo 3, para medir la temperatura en puntos críticos de la máquina es necesario el uso de 4 sensores de temperatura NTC de  $100K\Omega$ . Dichos sensores ya vienen por defecto insertados uno en cada extrusor. Adicional a esto se debe insertar uno en el centro de la cama caliente, fijándolo en la superficie de la misma con ayuda de una pasta adhesiva térmica. Mientras que el cuarto es ubicado en la parte superior frontal de la cámara principal de la impresora 3D, para asegurar que el aire caliente llegue hasta ese punto, la ubicación de este sensor se visualiza en la Figura 116.



Figura 116. Sensor de temperatura para el control ambiente de la cama.  
Fuentes: (Los Autores).

### 4.3.2. Implementación de los pulsadores fines de carrera.

Para que los actuadores finales se puedan posicionar en cualquier punto en el espacio dentro del volumen de trabajo de la impresora 3D, se debe partir desde un cero

posicional o home. También para evitar que los carros en x, y, z choquen contra alguna parte de la impresora 3D, es esencial colocar pulsadores fines de carrera, al menos uno por cada eje de coordenadas, los fines de carrera se muestran en las Figuras 117, 118, y 4.21. Estos fines de carrera se ubicaron en puntos específicos dentro de la máquina. Y para facilitar el accionamiento de los mismos, es necesario la colocación de topes en los carros en x, y, z. Tanto los pulsadores fines de carrera como los topes son fijados con ayuda de un adhesivo líquido.



Figura 117. Fin de carrera y tope eje “x” (eje derecha-izquierda).  
Fuente: (Los Autores).



Figura 118. Fin de carrera y tope eje “y” (eje frente-posterior).  
Fuente: (Los Autores).



Figura 119. Fin de carrera y tope eje “z” (eje superior-inferior).  
Fuente: (Los Autores).

### 4.3.3. Implementación de la tarjeta LCD.

Para la visualización y modificación de los parámetros de la impresora 3D, lectura de tarjeta SD y señales auditivas, se utilizó una placa LCD REPRAP Discount Smart Controller, a la cual se mencionó en el capítulo 3. Esta se ubicó en la parte frontal inferior derecha de la máquina, esto con el fin de que el usuario pueda acceder a la misma de una manera fácil y rápida. Para poder fijarla a la carcasa de la impresora 3D, se construyó un pequeño soporte, mostrado en la Figura 120. Finalmente los cables de datos y alimentación de la placa LDC REPRAP, son enviados por una pequeña perforación en la base superior de la máquina, para su conexión con el módulo RAMPS.



Figura 120. Placa LCD REPRAP Discount Smart Controller, fijada en la carcasa de la máquina  
Fuente: (Los Autores).

#### 4.3.4. Implementación de las tarjetas controladoras.

Para el control de los sensores y actuadores de la impresora 3D, fue necesario el uso de un módulo Arduino Mega, sobre el cual se monta un módulo RAMPS, y sobre este se montan los drivers DRV4988 y DRV8825 para el control de corriente de los motores paso a paso, también sobre la tarjeta RAMPS se conecta la placa LCD REPRAP Discount Smart Controller, los motores, los extrusores, los ventiladores, los pulsadores fines de carrera y los sensores de temperatura dicho montaje se ilustra en la Figura 121. Posterior a esto se fija la placa Arduino Mega mediante tornillos a una base de acrílico a manera de aislante, y esta a su vez se fija a la base inferior de la impresora 3D. Para finalmente conectar un cable USB tipo B macho hembra en el módulo Arduino Mega, y la fuente de alimentación de 12Vdc en las borneras de la placa RAMPS.

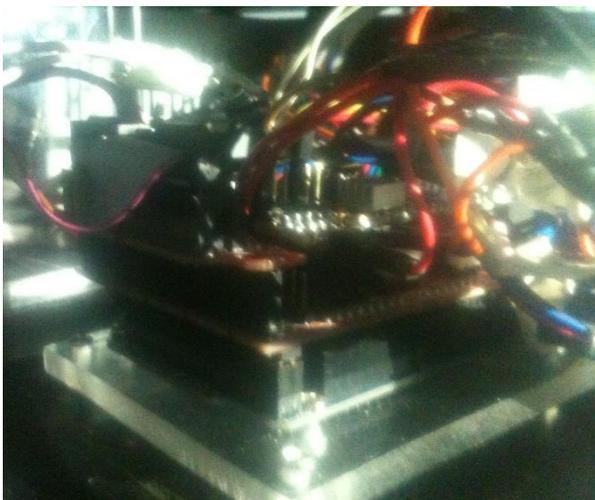


Figura 121. Montaje Arduino Mega, placa RAMPS, drivers DRV y conexiones de sensores y actuadores.  
Fuente: (Los Autores).

#### 4.3.5. Implementación de la fuente de poder

Para la energización casi todos los componentes de la impresora, con excepción de la niquelina que trabaja a 110Vac, fue necesario el uso de una fuente de poder ATXOMEGA-800W, misma que fue descrita en el Capítulo 3.

La fuente es atornillada en la base inferior de la máquina, detrás de la caja térmica. La fuente por un lado alimenta la tarjeta RAMPS, mientras que por el otro es conectada con una extensión a la carcasa de la impresora 3D, dicha ubicación se puede observar en la Figura 122.



Figura 122. Montaje de la fuente de poder en la parte posterior de la impresora 3D.  
Fuente: (Los Autores).

La niquelina es conectada en paralelo a 110Vac directamente de la alimentación del suministro eléctrico, y comandada por un relé de estado sólido con un rango de voltaje de entrada de entre 3Vdc a 32Vdc, y un voltaje de salida de entre 24Vac y 380Vac. Como se muestra en la Figura 123.



Figura 123. Relé de estado sólido.  
Fuente: (Los Autores).

## **4.4. Implementación de los Softwares**

Es la implementación de los programas que comandan el funcionamiento de la impresora 3D, en esta sección se tiene tanto el firmware de control a cargar en la tarjeta controladora, y el software HMI generador del código G.

### **4.4.1. Implementación del Firmware de control**

Para el control de los sensores y actuadores de todo el sistema, fue necesario el uso de un firmware llamado Repetier, este al ser un programa libre open source (código abierto), puede ser bajado de forma gratuita y modificado a la conveniencia del usuario, para posteriormente se cargado en la tarjeta Arduino Mega. La descripción del programa y sus respectivas modificaciones se detalla en el Capítulo 3.

### **4.4.2. Implementación del Software generador de código G e interfaz gráfica con la PC**

Para que el usuario pueda modificar los parámetros de la impresión de una forma fácil y dinámica, sin necesidad de modificar directamente el firmware del controlador, pudiendo además visualizar a detalle cómo se va a generar producir la impresión y generar automáticamente los códigos posicionales o código G. Se empleó un software libre llamado MatterControl 1.5., cuya última versión, al ser un software libre, se la puede descargar de forma gratuita de la página de MatterControl ([www.mattercontrol.com](http://www.mattercontrol.com)) y dando click en la pestaña Download, se descarga el programa. Las características del mismo, se visualiza en el Capítulo 3. El software MatterControl 1.5., es necesario instalarlo en la PC que ha de trabajar con la impresora 3D. Una vista de la interfaz de este programa, así como una pieza ya generada por la impresora se puede visualizar en la Figura 124.



Figura 124. Interfaz MatterControl 1.5, y pieza impresa.  
Fuente: (Los Autores).

## **Resumen:**

En el presente capítulo se detalla la implementación de la impresora 3D en base al diseño desarrollado en el Capítulo 3. Partiendo de la manufacturación de las piezas que conforman la máquina, seguido por el ensamblado de las mismas con los elementos mecánicos. Dicho ensamble se lo realiza tanto con uniones no permanentes (pernos), como permanentes (adhesivo líquido).

Luego se instalan los elementos electrónicos, que lo conforman la fuente de poder, motores, placas electrónicas, fines de carrera, termistores, extrusores, cama térmica, LCD y circuitería en general.

Una de las características principales de la máquina es la capacidad de controlar su temperatura interna ambiente, para lo cual se acopló un relé de estado sólido para la etapa de potencia, una niquelina que genera calor y un ventilador que produce la convección forzada.

Finalmente se carga el programa al microcontrolador, el cual comanda el accionamiento inteligente de los respectivos actuadores. Y se instala la interfaz humano - máquina en el ordenador, para la interacción de la impresora 3D con el usuario.

# Capítulo 5

## Pruebas y Resultados

El presente capítulo permite evaluar el funcionamiento de la impresora 3D, partiendo con el análisis dimensional de la estructura, tolerancias y partes críticas en la impresión, velocidad y acabado con cada parámetro. El capítulo finaliza con el análisis del material de soporte PVA con los filamentos de PLA y ABS.

### 5.1. Pruebas dimensionales

Para el desarrollo de las pruebas dimensionales se han formado dos grupos los cuales son: estructura, área de trabajo.

#### 5.1.1. Estructura

Desde la Figura 125, a la Figura 126, se indican las medidas de la estructura de la impresora diseñada por software con tolerancias de  $\pm 1\text{mm}$  junto a fotos reales. Al finalizar cada par de imágenes se presenta una tabla con el análisis dimensional de las medidas tomadas.

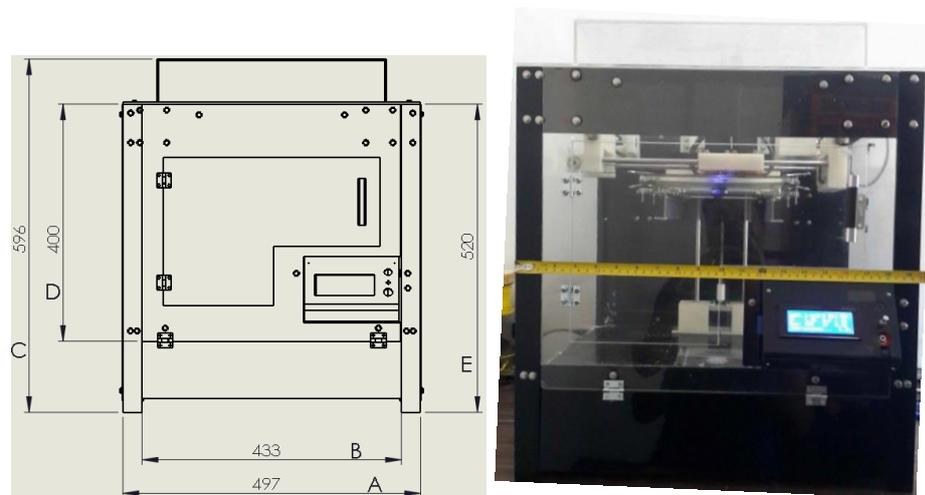


Figura 125. Acotación de vista Frontal.

Fuente: (Los Autores).

**Tabla 14.**

Análisis de resultados de acotaciones en Vista frontal de la impresora 3D.  
Vista Frontal

Medida	Software	Real	Diferencia	Error	Tolerancia(+,-)	Estado
A	497	497	0	0.000	0.5	ok
B	433	432	1	0.002	0.5	ok
C	596	598	-2	-	0.5	ok
				0.003		
D	400	399	1	0.003	0.5	ok
E	520	520	0	0.000	0.5	ok

De la Tabla 14, se concluye que el margen de error en las dimensiones de la vista frontal se encuentra dentro del rango permitido en la construcción de la estructura de la impresora 3D. Las medidas se visualizan en la Figura 125.

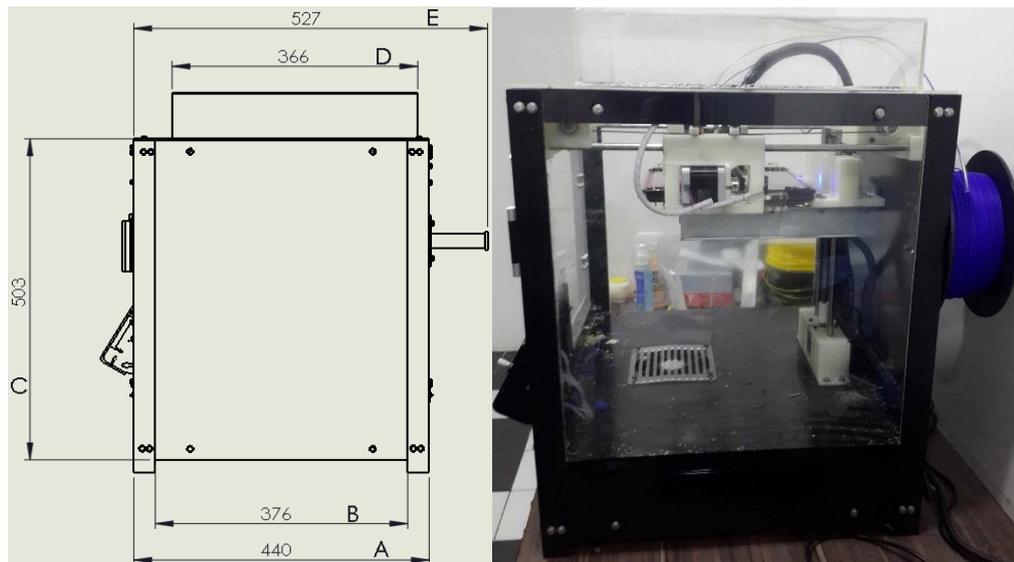


Figura 126. Acotación de vista Lateral derecha.

Fuente: (Los Autores).

**Tabla 15.**

Análisis de resultados de acotaciones en Vista lateral derecha de la impresora 3D.  
Vista Lateral Derecha

Medida	Software	Real	Diferencia	Error	Tolerancia(+,-)	Estado
A	440	440	0	0.000	0.5	ok
B	376	376	0	0.000	0.5	ok
C	503	504	-1	-	0.5	ok
				0.002		
D	366	365	1	0.003	0.5	ok
E	527	526	1	0.002	0.5	ok

De la Tabla 15, se concluye que el margen de error en las dimensiones de la vista lateral derecha se encuentran dentro del rango permitido en la construcción de la estructura de la impresora 3D. Las medidas se visualizan en la Figura 126.

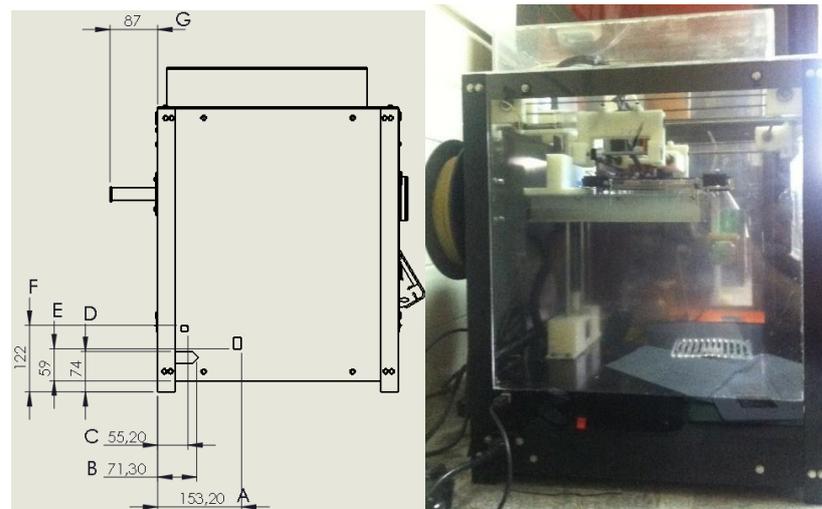


Figura 127. Acotación de vista Lateral izquierda.

Fuente: (Los Autores).

**Tabla 16.**

Análisis de resultados de acotaciones en Vista lateral izquierda de la impresora 3D.  
Vista Lateral Izquierda

Medida	Software	Real	Diferencia	Error	Tolerancia(+,-)	Estado
A	153.2	152	1.2	0.008	0.5	ok
B	71.3	70	1.3	0.018	0.5	ok
C	55.2	55	0.2	0.004	0.5	ok
D	74	73	1	0.014	0.5	ok
E	59	59	0	0.000	0.5	ok
F	122	122	0	0.000	0.5	ok
G	87	87	0	0.000	0.5	ok

De la Tabla 16, se concluye que el margen de error en las dimensiones de la vista lateral izquierda se encuentran dentro del rango permitido en la construcción de la estructura de la impresora 3D. Las medidas se visualizan en la Figura 127.

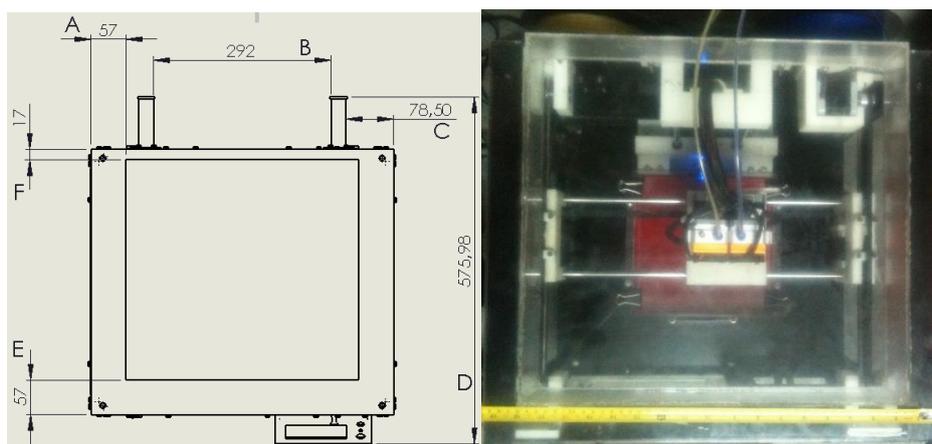


Figura 128. Acotación de vista Superior.

Fuente: (Los Autores).

**Tabla 17.**

Análisis de resultados de acotaciones en Vista Superior de la impresora 3D.

Vista Superior

Medida	Software	Real	Diferencia	Error	Tolerancia(+,-)	Estado
A	57	56.4	0.6	0.011	0.5	ok
B	292	291	1	0.003	0.5	ok
C	78.5	78	0.5	0.006	0.5	ok
D	575.98	574	1.98	0.003	0.5	ok
E	57	56.7	0.3	0.005	0.5	ok
F	17	17	0	0.000	0.5	ok

De la Tabla 17, se concluye que el margen de error en las dimensiones de la vista superior se encuentran dentro del rango permitido en la construcción de la estructura de la impresora 3D. Las medidas se visualizan en la Figura 128.

## 5.1.2. Área de trabajo

Las dimensiones máximas de impresión dependen de las medidas que tiene la cama caliente y de la altura máxima que puede moverse el eje Z generando un volumen de impresión en el cual se puede trabajar.

### 5.1.2.1. Cama Caliente

Las medidas de la cama caliente se indican en la Figura 129, acotadas mediante software el área de trabajo es referencial a los ejes “X” “Y” del movimiento de la impresora 3D.

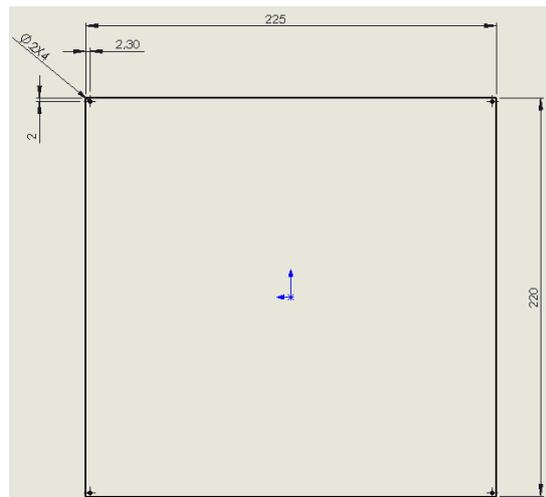


Figura 129. Acotación de cama caliente.

Fuente: (Los Autores).

En el eje X tenemos 225mm y en el eje Y 220mm pero considerando que deben llegar los 2 extrusores que tiene una medida de 35mm como se indica en la Figura 130, y la distancia de los pernos para sujetar la cama, tenemos que reducir el área de trabajo sobre la cama caliente.



Figura 130. Distancia entre boquillas de los extrusores MK8.

Fuente: (Los Autores).

Distancia máxima de trabajo en “X” y “Y” son:

$$Dx = 225 - 35 - 10 = 180mm$$

$$Dy = 220 - 35 - 5 = 180mm$$

La altura máxima en el eje Z se detalla en la Figura 131, teniendo en cuenta que es tomada ya en el ensamble de toda la impresora.

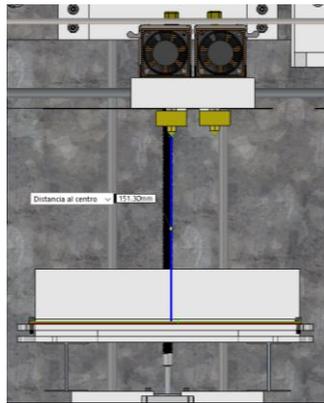


Figura 131. Acotación de la máxima altura en el eje Z.  
Fuente: (Los Autores).

Por lo cual se tiene como resultado un volumen de trabajo de:

$$V = 180 \times 180 \times 151 = 4892400 \text{ mm}^3$$

## 5.2. Pruebas de Funcionamiento

Con el fin de analizar el funcionamiento de la impresora 3D, y determinar su desempeño en diferentes tipos de formas, se han realizado impresiones de agujeros, esferas, y rectángulos. Mismos que fueron impresos en diferentes tamaños para poder analizar el margen de error entre la medida diseñada por software y la medida real de la pieza impresa, poniendo a prueba cual sería la mínima resolución que podemos obtener.

### 5.2.1. Agujeros impresos

En la Figura 132, podemos apreciar las medidas por software y una foto de la pieza impresa para poder apreciar los resultados.

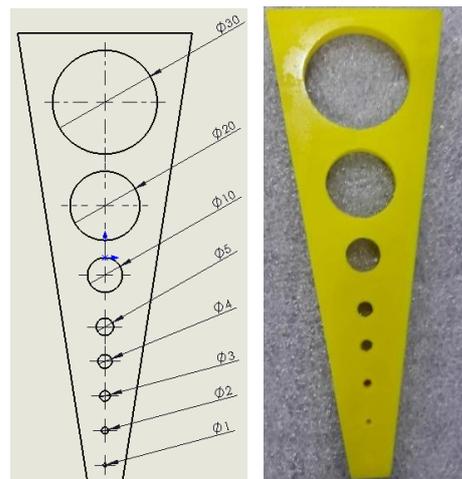


Figura 132. Acotación de diámetros internos.

Fuente: (Los Autores).

**Tabla 18.**

Análisis de resultados diámetros internos.

Medida	Software	Diámetro Interno				Tolerancia(+,-)	Estado
		Real	Diferencia	Error			
A	30	29.1	0.9	0.030	0.5	ok	
B	20	19.2	0.8	0.040	0.5	ok	
C	10	9.6	0.4	0.040	0.5	ok	
D	5	4.4	0.6	0.120	0.5	ok	
E	4	3.5	0.5	0.125	0.5	ok	
F	3	2.7	0.3	0.100	0.5	ok	
G	2	1.8	0.2	0.1	0.5	ok	
H	1	0.98	0.02	0.02	0.5	ok	

De la Tabla 18, se concluye que luego de haber realizado una impresión de diámetros internos en material ABS, las medidas de software CAD, en comparación con las medidas reales de la pieza, se encuentran dentro del margen de error, por consiguiente la pieza es aceptable dimensionalmente.

### 5.2.2. Esferas impresas

Esta prueba verifica la dimensión que se obtiene en los diámetros externos que se pueden obtener en la impresión analizando cual es el mínima medida que se imprimir. En la Figura 133, se aprecia las dimensiones por software y una foto de la pieza impresa.

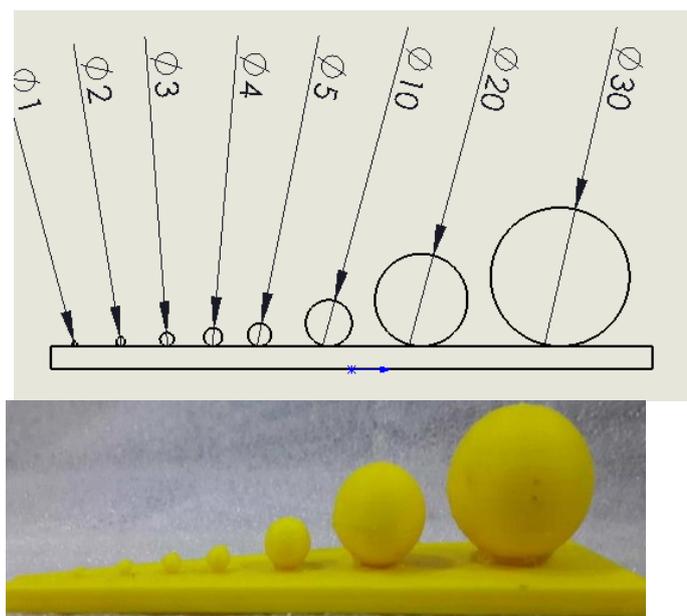


Figura 133. Acotación de diámetros externos.

Fuente: (Los Autores).

**Tabla 19.**

Análisis de resultados diámetros externos.

Esferas Impresas

Medida	Software	Real	Diferencia	Error	Tolerancia(+,-)	Estado
A	30	30	0	0.000	0.5	ok
B	20	19.9	0.1	0.005	0.5	ok
C	10	9.8	0.2	0.020	0.5	ok
D	5	5	0	0.000	0.5	ok
E	4	4	0	0.000	0.5	ok
F	3	2.8	0.2	0.067	0.5	ok
G	2	1.9	0.1	0.05	0.5	ok
H	1	1	0	0	0.5	ok

De la Tabla 19, se concluye que luego de haber realizado una impresión de esferas en material ABS, las medidas de software CAD, en comparación con las medidas reales de la pieza, se encuentran dentro del margen de error, por consiguiente la pieza es aceptable dimensionalmente.

### 5.2.3. Rectángulos internos

En la Figura 134, podemos apreciar las medidas acotadas por software y una foto de la pieza ya impresa.

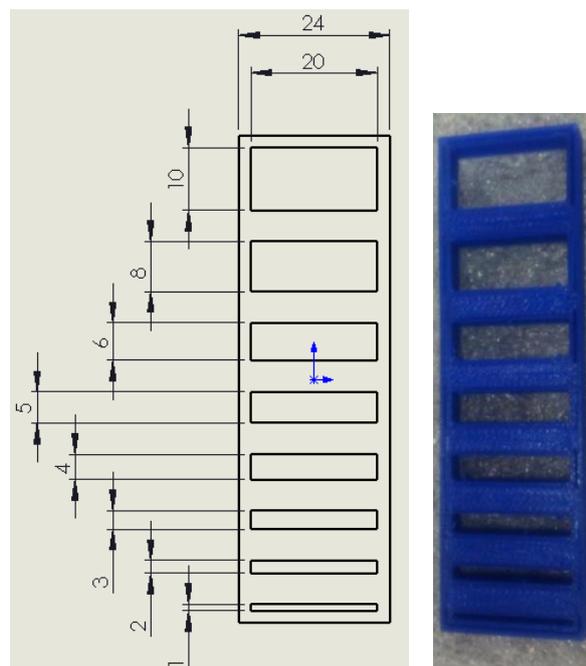


Figura 134. Acotación de rectángulos internos.  
Fuente: (Los Autores).

**Tabla 20.**

Análisis de resultados rectángulos internos.

Medida	Software		Real		Diferencia	Erro r	Tolerancia(+,-)	Estad o
	X	Y	X	Y				
A	20	10	19.9 6	9.6	0.4	0.040	0.5	ok
B	20	8	19.9 6	7.8	0.2	0.025	0.5	ok
C	20	6	19.9 6	5.6	0.4	0.067	0.5	ok
D	20	5	19.9 6	4.6	0.4	0.080	0.5	ok
E	20	4	19.9 6	3.7	0.3	0.075	0.5	ok
F	20	3	19.9 6	2.7	0.3	0.100	0.5	ok
G	20	2	19.9 6	1.8	0.2	0.1	0.5	ok
H	20	1	19.9 6	0.8	0.2	0.2	0.5	ok

De la Tabla 20, se concluye que luego de haber realizado una impresión de rectángulos internos en material PLA, las medidas de software CAD, en comparación

con las medidas reales de la pieza, se encuentran dentro del margen de error, por consiguiente la pieza es aceptable dimensionalmente.

### 5.2.4. Rectángulos externos

La prueba de impresión de rectángulos externos nos permite apreciar cual sería el mínimo espesor que podemos imprimir con la impresora 3D, a continuación se aprecia la acotación mediante software y una foto de la pieza ya impresa.

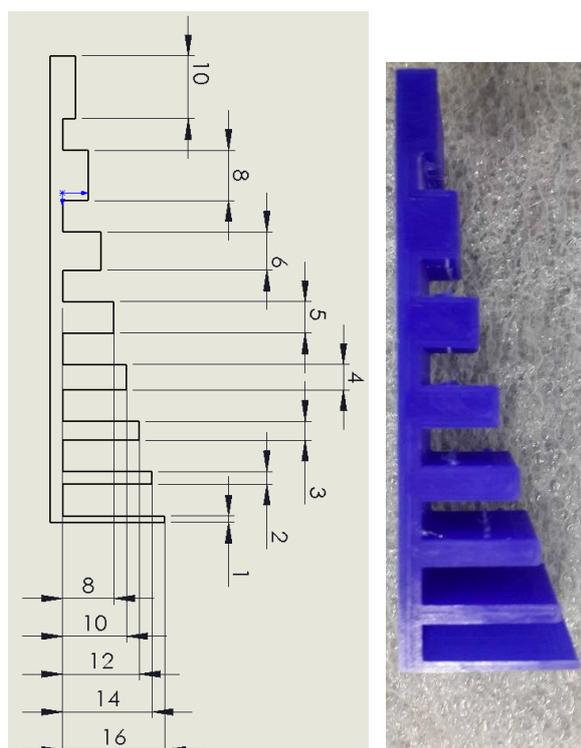


Figura 135. Acotación de rectángulos internos.

Fuente: (Los Autores).

**Tabla 21.**

Análisis de resultados rectángulos externos.

Rectángulo Externo- Espesor

Medida	Software		Real		Diferencia	Error	Tolerancia(+,-)	Estado
	X	Y	X	Y				
A	20	10	10	9.6	0.4	0.04	0.5	ok
B	20	8	8	7.8	0.2	0.03	0.5	ok
C	20	6	5.9	5.6	0.4	0.07	0.5	ok
D	20	5	5	4.6	0.4	0.08	0.5	ok
E	20	4	3.9	3.7	0.3	0.08	0.5	ok
F	20	3	3	2.7	0.3	0.10	0.5	ok
G	20	2	1.9	1.8	0.2	0.10	0.5	ok
H	20	1	0.8	0.8	0.2	0.20	0.5	ok

De la Tabla 21, se concluye que luego de haber realizado una impresión de rectángulos externos en material PLA, las medidas de software CAD, en comparación con las medidas reales de la pieza, se encuentran dentro del margen de error, por consiguiente la pieza es aceptable dimensionalmente.

### 5.3. Pruebas del material de soporte

#### 5.3.1. PVA con PLA

El material PVA es utilizado como soporte de piezas de material PLA, analizando si es factible el trabajo en conjunto de estos dos materiales. En la Figura 136, apreciamos los resultados luego de varios intentos y calibraciones.

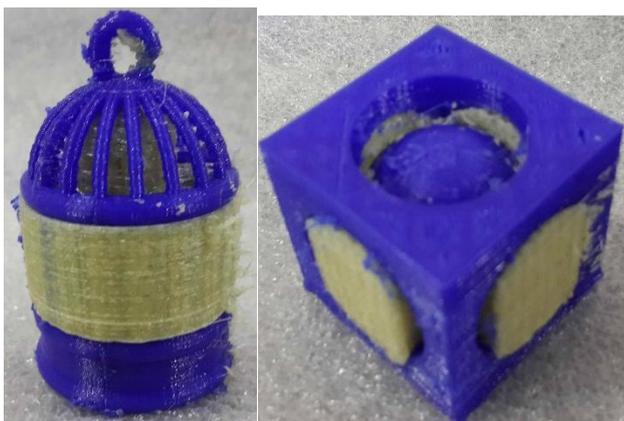


Figura 136. Impresión de Piezas que necesitan soporte debido a detalles internos materiales PVA y PLA.

Fuente: (Los Autores).

La calibración para poder obtener las piezas de la Figura 136, se las realizo en el software de impresión utilizado para la impresora 3D, Matter Control, los parámetros son los siguientes:

Porcentaje de Material de Soporte:	40%
Angulo de relleno:	45°
Distancia “X” y “Y”:	1mm
Soporte en todos lados:	Activado
Crear Perímetro:	Activado

Temperatura PVA:	190°C
Temperatura PLA:	210°C
Temperatura cama caliente:	50°C
Temperatura ambiente dentro de la cámara de impresión:	35°C

En la Figura 137, se puede apreciar la generación de la pieza con el soporte PVA con los parámetros que se señalaron.

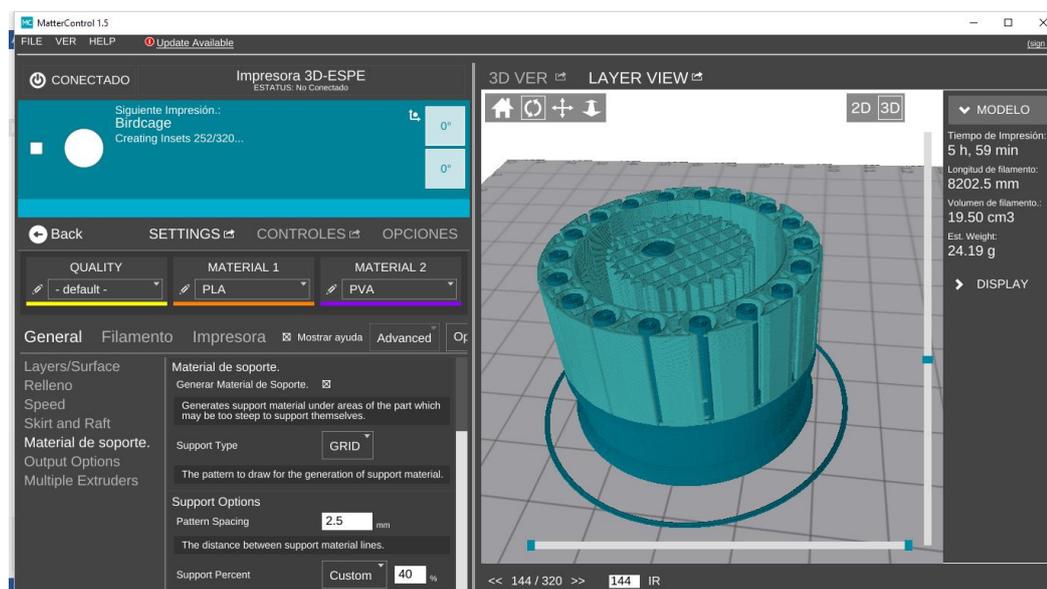


Figura 137. Generación de pieza con soporte mediante el software Matter Control.

Fuente: (Los Autores).

Una vez impresa la pieza de PLA con material de soporte en PVA, se realiza el tratamiento final que consiste en la remoción del mismo. Como ya se mencionó anteriormente el PVA es un plástico hidrosoluble. Por consiguiente luego de unas horas de sumergir la pieza en agua, el soporte se diluye y queda únicamente la pieza base. Las imágenes del proceso de remoción de material de soporte PVA se ilustran en la Figura 138.



Figura 138. Proceso de remoción de material de soporte (PVA).  
Fuente: (Los Autores).

### 5.2.1. PVA con ABS

El material PVA es utilizado como soporte de piezas de material ABS, analizando si es factible el trabajo en conjunto de estos dos materiales. En la Figura 139, apreciamos los resultados luego de varios intentos y calibraciones.

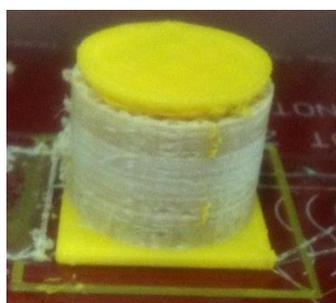


Figura 139. Impresión de Piezas que necesitan soporte debido a detalles internos materiales PVA y ABS.  
Fuente: (Los Autores).

Los parámetros utilizados para imprimir con estos dos materiales son los mismos que al anterior análisis variando únicamente las temperaturas para impresión con ABS:

Temperatura PVA: 190°C

Temperatura ABS: 233°C

Temperatura cama caliente: 80°C

Temperatura ambiente dentro de la cámara de impresión: 50°C

#### **5.4. Pruebas de control del ambiente.**

Como se ha mencionado en capítulos previos, la adaptación de la temperatura ambiente a los requerimientos del usuario se realiza mediante un control ON/OFF que energiza o apaga una niquelina, y el calor generado es enviado por convección forzada mediante un ventilador al interior de la impresora.

El objetivo del control de temperatura interna de la máquina es mejorar en cierta medida el acabado superficial de la pieza impresa. Para esto se ha realizado la impresión de 2 piezas del mismo material, forma, y parámetros de impresión, con y sin control de temperatura respectivamente. Mismas que se muestran en la Figura 140.

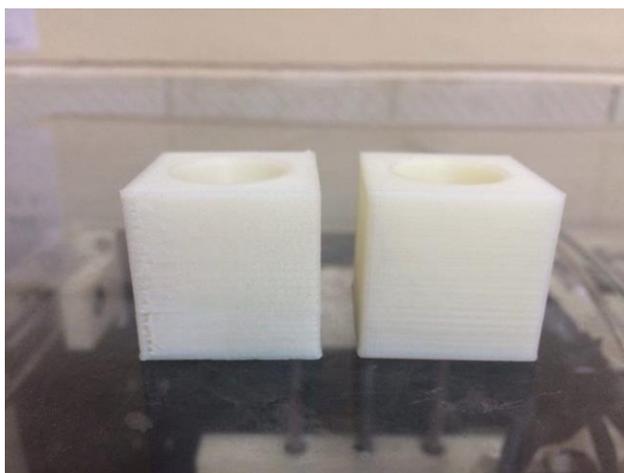


Figura 140. Pieza impresa en ABS sin control de temperatura (izquierda) y con control de temperatura (derecha).

Fuente (Los Autores).

Luego de la impresión de estas 2 piezas se puede concluir que el acabado y brillo superficial en las piezas mejora con una temperatura unos grados por encima de la temperatura ambiente natural de trabajo. En este caso se probó con 45 °C. Demostrando el cumplimiento del objetivo de la función de ambiente controlado.

## **Resumen:**

Una vez armada y calibrada la impresora 3d, se realizan pruebas de impresión para comprobar si la misma cumple con los requerimientos de impresión.

Para los cual se imprimieron probetas con figuras de diferente forma y tamaño. Tanto para material ABS como PLA. Y finalmente se imprimieron figuras complejas con material de soporte hidrosoluble PVA, para demostrar que e factible el uso del mismo en el proceso de impresión.

De los resultados de las pruebas ya mencionadas se concluye que en las impresiones con PLA se pueden producir rectángulos tanto internos como externos desde 1 mm de espesor.

En las impresiones con ABS se pueden producir esferas externas y círculos internos desde 1 mm de diámetro.

Finalmente se concluye que es factible el uso de PVA como material de soporte tanto para piezas de PLA, como para piezas de ABS.

Todos los resultados se detallan y visualizan en tablas y gráficas en el presente capítulo.

## Conclusiones:

- Se diseñó y construyó una impresora 3D con estructura de soporte y ambiente controlado entre 25°C y 70°C, de estructura cartesiana. El tamaño de la máquina es de 497mm x 527mm x 596mm, que permite imprimir piezas de 180mm x 180mm x 150mm a una resolución de 6.2micras en el plano X-Y y 0.5micras en Z. Cuenta con dos extrusores, una cama caliente y una Smart shield LCD.
- Ha logrado construirse un robot de estructura cartesiana, cuyo efector final son dos extrusores que depositan termoplástico en estado líquido de los cuales se ha probado que trabaja correctamente con ABS y PLA como material base y PVA como material de soporte.
- Pudo implementarse exitosamente una cámara cerrada que permite un control ON/OFF de temperatura interno de la impresora 3D entre temperatura ambiente y 70°C.
- Se encontró e implementó exitosamente un software libre llamado MatterControl en versión 1.5, para el accionamiento de la máquina desde la PC. Mismo que es fácil de usar, amigable con el usuario y cumple con todos los requerimientos técnicos para el desarrollo del proyecto. Presenta características como configuraciones precargadas que permiten enlazar la impresora 3D a la interfaz en un instante, detección automática de múltiples piezas dentro de un mismo archivo de diseño para ser manipuladas por separado en características como rotado, escalado, espejo, selección de material. También organiza, busca y maneja la librería de diseños para impresión.
- Fue posible concretar el proceso de impresión 3D sin la necesidad de tener conectada una impresora 3D, con la ayuda de una placa inteligente LCD, misma que con el giro de una perilla puede comandar la máquina y el proceso de impresión. Y es capaz de leer los códigos para la impresión directamente de una tarjeta SD.

- Una vez finalizada la impresora 3D, esta fue capaz de imprimir pieza con un acabado satisfactorio para las necesidades del usuario. Tanto en dimensiones macro métricas, como en acabado superficial micrométrico. De esta forma se realizó la impresión de 8 piezas que forman parte de la estructura interna de la máquina, en la misma impresora 3D del proyecto. Concluyendo que las 17 piezas prototipadas de la impresora 3D pueden ser autoreplicables en la misma.
- Luego de las pruebas realizadas se observa que con un control de temperatura ambiente a 40 °C se obtuvieron buenos resultados en el acabado de piezas en ABS, sin afectar las propiedades físicas del material de soporte PVA. Pero con un control de temperatura ambiente a 60 °C se obtuvieron los mejores resultados en el acabado de piezas en ABS, siempre y cuando se realice la impresión de soporte con el mismo material que se realiza la impresión de la pieza base (ABS). Mientras que cuando se trabaja con PLA como materia prima, no es necesario realizar un control de temperatura ambiente para obtener un buen acabado superficial de las piezas impresas.
- Se concluye mediante pruebas de impresión que el material ABS trabaja bien con una temperatura de cama caliente de entre 85°C y 95°C, sin embargo para lograr una buena adherencia del material de soporte PVA sobre el ABS, se obtuvieron buenos resultados con una temperatura de cama de 75°C. Mientras que el material PLA no requiere de ningún calentamiento de la cama, aunque puede trabajar con una temperatura de entre 40°C y 50°C.
- Con la impresión de piezas de prueba se concluye que la impresora 3D es capaz de generar estructuras con un mínimo error dimensional de figuras como rectángulos y círculos tanto internos como externos desde 1mm de espesor, para materiales ABS y PLA.

## Recomendaciones:

- Se recomienda realizar la impresión de soporte del material hidrosoluble en piezas complejas, además de no imprimir piezas que se encuentren fuera del rango dimensional que soporta la máquina. Para esto es importante revisar el correspondiente manual de usuario con el fin de evitar errores en el proceso de impresión.
- Verificar los movimientos en cada eje x, y, z mediante el accionamiento tanto desde el lcd de la impresora, como desde el software de interfaz MatterControl, con el fin de ubicarse dentro del área de impresión, de este modo el usuario tendrá una mejor apreciación al escalar sus diseños.
- Los encargados de la impresora y usuarios deberían realizar futuras pruebas del doble extrusor de la impresora 3D, no solo para impresiones de soporte, sino también para impresiones bicolor.
- Para el control ON/OFF de temperatura ambiente se recomienda usar un relé de estado sólido, ya que un relé electromagnético de contacto tiende a quemar sus contactos luego de un periodo corto de tiempo debido a la alta corriente (40 Amperios) que circula por la niquelina y por las múltiples aperturas y cierres de circuito en el momento de alcanzar la temperatura deseada.
- No es recomendable usar un control de temperatura ambiente por encima de los 40°C cuando se trabaja con material de soporte PVA, ya que este pierde sus propiedades físicas en un punto inadecuado del interior del extrusor, provocando desviaciones de la trayectoria del filamento, en el interior del extrusor o a su vez que haya una corrida del filamento en el engrane que empuja el material hacia la boquilla.
- Se debe setear el plano inicial de impresión desde el software MatterControl, para que el código G generado tome en cuenta cualquier desnivel de la superficie de impresión. Esto se debe hacer cada vez que se cambia de computador o luego de dar mantenimiento a los extrusores o cama caliente de la impresora.

- Es aconsejable emplear el material de soporte PVA únicamente con el material base PLA, ya que el PVA presenta dificultades de adherencia con el material ABS, procurando que la materia prima sea de buena calidad.

## Referencias bibliográficas:

- 3DDELTAprinting. (2015). *Impresoras 3D*. Obtenido de <http://3delta.com.mx/impresoras3d>
- 3DPRINTXPERS. (2015). *Impresoras 3D ¿como elegir?* Obtenido de <http://3dprintxperts.com/impresoras-3d-como-elegir/>
- 3DSlicer. (2016). *A multy-platform, free and open souce software package for visualization .* Obtenido de <https://www.slicer.org/>
- Aprendiendo. (2014). *TERMISTOR NTC 100K*. Obtenido de <http://aprendiendo.laconeccion.com/producto/termistor-ntc-100k>
- ARDUINO. (2016). *Arduino Mega*. Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega>
- Bauer, J. (2015). *Introducción al mundo de la impresión 3D*. Kindle .
- Blogdiario. (2014). *Bandas*. Obtenido de <http://123equipo5.blogspot.es/1400299452/bandas/>
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: Mc Graw Hill.
- Chua, C. K., & Leong, K. F. (2010). *Rapid Prototyping. Principleas and Applications* (Tercera ed.). Word Scientific Publishing.
- Ebudae. (2014). *Servicios de impresión en 3 dimensiones*. Obtenido de <http://www.ebudae3d.es/>
- Eivar, G. (2009). *DISEÑO DE UN ROBOT CARTESIANO PARA ORDENAR*. Ambato-Ecuador.
- Element14. (2016). *EPCOS B57560G104F THERMISTOR, 100K, 1%, NTC, RAD*. Obtenido de <http://es.farnell.com/epcos/b57560g104f/thermistor-100k-1-ntc-rad/dp/3878697>
- FACTORUM, T. (2016). *Plataforma caliente HeatBed PCB MK2*. Obtenido de <http://shop.tecnofactorum.com/electronica3d/29-plataforma-caliente-termistor.html>
- Filament2print. (2016). *PVA Advanced*. Obtenido de <http://www.filament2print.com/producto/pva-advanced/>
- Frontela, P. (2015). *Termoplásticos FDM*. Obtenido de <http://www.eis.uva.es/~macromol/curso13-14/impresoras3D/materiales.html>
- Garay, F. (2012). *Análisis técnico económico del proceso de prototipado rápido en modelos geométricos de gran tamaño*. Obtenido de <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/50a3f4403e3c5.pdf>
- Geeetech. (2014). *MK8 Dual Extruder*. Obtenido de <http://www.geeetech.com/mk8-dual-extruder-p-921.html>

- Github. (2015). *Herculien*. Obtenido de <https://github.com/eclsnowman/HercuLien>
- Hacedores. (2014). *Arduino o Raspberry Pi ¿Cuál es la mejor herramienta para tí?* Obtenido de <http://hacedores.com/arduino-o-raspberry-pi-cual-es-la-mejor-herramienta-para-ti/>
- HAZLO3D. (2014). *Tecnologías de impresión 3D*. Obtenido de <http://hazlo3d.com/tecnologias-de-impresion-3d/>
- Hod, L., & Melba, K. (s.f.). *La Revolución de la Impresión 3D*. Anaya Multimedia .
- HWlibre. (2014). *Theta una impresora plar libre*. Obtenido de <http://www.hwlibre.com/theta-una-impresora-polar-libre/>
- Icreativa.es. (2008). *Impresoras 3D Cubex PLA*. Obtenido de <http://www.icreatia.es/consumibles-impresoras-3d-cubex-pla.html#.VinGTbcvfIU>
- Impresoras3D. (2015). *Pololu – DRV8825 Driver motor paso a paso*. Obtenido de <http://impresoras3decuador.com/producto/pololu-drv8825-driver-motor-paso-a-paso>
- Impresoras3D. (2015). *RAMPS 1.4 Modulo Controlador*. Obtenido de <http://impresoras3decuador.com/producto/modulo-controlador-ramps-1-4>
- Impresoras3D.com. (2015). *Tipos de Impresoras 3D*. Obtenido de <http://impresoras3d.com/tipos-de-impresoras-3d/>
- Impresoras3DEcuador. (2015). *Pololu A4988 controlador para motores paso a paso*. Obtenido de <http://impresoras3decuador.com/producto/pololu-a4988-controlador-para-motores-paso-a-paso>
- Imprimalia3D. (2014). *Límites que impone la ley española al usuario de impresoras 3D*. Obtenido de <http://www.imprimalia3d.com/noticias/2014/11/17/003787/l-mites-que-impone-ley-espasa-ola-al-usuario-impresoras-3d>
- Imprimiren3D. (2014). *Termoplástico PLA*. Obtenido de <http://www.imprimiren3d.com.mx/materiales-3d/termoplastico-pla/>
- Infante, R. (2012). *Proceso de conformado de materiales poliméricos por prototipado rápido*. Obtenido de <https://tfmrimumed.files.wordpress.com/2012/03/tfm-procesos-de-conformado-de-materiales-polimc3a9ricos-por-prototipado-rc3a1pido1.pdf>
- Interempresas. (2014). *Una impresora 3D con parámetros industriales*. . Obtenido de <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/120548-Una-impresora-3D-con-parametros-industriales.html>
- Joshendy. (2016). *CNC, 3D printer, Robotic and programming projects*. Obtenido de <http://www.joshendyblog.net/what-ive-got-so-far/>
- LINEAR, P. (2011). *ML SERIES Miniature Linear Actuator*. Obtenido de <http://www.pbclinear.com/Download/Catalog/ML-Catalog.pdf>
- Liow, F. (2007). *Rapid Prototyping and Engineering Applications*. Virginia : CRC PRESS.

- MakerBot. (2016). *MAKERBOT REPLICATOR DESKTOP 3D PRINTER*. Obtenido de <http://store.makerbot.com/replicator>
- Mariano. (2011). *ABS*. Obtenido de <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/abs.html>
- Mariano. (2013). *Tecnología de los plásticos* . Obtenido de Impresión 3D: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2013/02/impresion-3d.html>
- MatterControl. (2016). *MatterControl-3D Printing software* . Obtenido de <http://www.mattercontrol.com/>
- Menetray, R. (2013). *Impresora Polar Theta*. Obtenido de <http://robertmenetray.com/impresora-polar-theta>
- MotionDynamics. (2015). *United MY6812 12V DC 100W, 2750 RPM* . Obtenido de <https://www.motiondynamics.com.au/united-my6812-12v-dc-100w-2750-rpm-electric-motor.html>
- Movytech. (2013). *Nueva impresora 3D compuesta por 3 brazos robóticos*. Obtenido de <http://www.movytech.com/2013/01/nueva-impresora-3d-compuesta-por-3.html>
- Nexolocal. (2012). *Fuente de poder ATXOMEGA 800W conectores SATA/IDE*. Obtenido de <http://quito.nexolocal.com.ec/p9462775-fuente-de-poder-atx-omega-800w-reales-conector-sata-nueva>
- Pablo.Bejerano. (2013). *Think Big*. Obtenido de Llegan nuevos materiales para la impresión 3D: <http://blogthinkbig.com/gama-materiales-impresion-3d/>
- Peñarrolla, P. (2013). *Prototipado Rápido* . Obtenido de [http://www.academia.edu/6692051/PELAYO\\_PE%C3%91ARROYA\\_-\\_PROTOTIPADO\\_R%C3%81PIDO](http://www.academia.edu/6692051/PELAYO_PE%C3%91ARROYA_-_PROTOTIPADO_R%C3%81PIDO)
- Printrobot. (2015). *Steps Per Millimeter for Specific Hardware*. Obtenido de <https://printrobot.zendesk.com/hc/en-us/articles/202434754-Steps-Per-Millimeter-for-Specific-Hardware>
- ProyectoRecicla3D. (2014). *Proyecto de reciclaje de materiales para impresión 3D*. Obtenido de <https://recicla3dplabs.wordpress.com/2014/09/26/tecnologia-de-modelado-por-deposicion-fundida-fdm/>
- Repetier. (2016). *Repetier Host*. Obtenido de <https://www.repetier.com/>
- Replikeo. (2015). *Prusa i3 Kit de impresora 3D* . Obtenido de <http://www.replikeo.com/es/impresora-3d/9-prusa-i3-3d-printer-full-kit-.html>
- REPRAP. (2014). *RAMPS 1.4 eschematic* . Obtenido de <http://www.reprap.org/wiki/File:RAMPS1.4schematic.png>
- REPRAP. (2016). *REPRAP Discount Smart Controller*. Obtenido de [http://reprap.org/wiki/RepRapDiscount\\_Smart\\_Controller](http://reprap.org/wiki/RepRapDiscount_Smart_Controller)

- Rodriguez, J. A. (2015). *Sistemas de Prototipado Rápido*. Obtenido de [http://www.academia.edu/4513126/SISTEMAS\\_DE\\_PROTOTIPADO\\_R%C3%81PIDO\\_-----SLA\\_SGC\\_SLS\\_LOM\\_FDM](http://www.academia.edu/4513126/SISTEMAS_DE_PROTOTIPADO_R%C3%81PIDO_-----SLA_SGC_SLS_LOM_FDM)
- Serope, K., & Schmid, S. (2002). *Manufactura Ingeniería y Tecnología* (Cuarta ed.). Prentice hall.
- Slic3r. (2016). *Slic3r G-code generator for 3D printers*. Obtenido de <http://slic3r.org/>
- Stratasys. (2015). *stratasys*. Obtenido de <http://www.stratasys.com/es/resources/rapid-prototyping>
- Stratasys. (2015). *Tecnología FDM*. Obtenido de <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/technologies/fdm-technology>
- Tech, U. L. (2013). *Portal de soporte y conocimiento*. <https://ultralab.zendesk.com/entries/23010193-ABS-o-PLA->
- Tecnológica, D. (2015). *Modulo RELE 5V (110 / 220Vac) 10A para Arduino*. Obtenido de <http://dinastiatecnologica.com/producto/modulo-rele-5v-110-220vac-10a-para-arduino/>
- ThyssenKrupp. (2015). *ThyssenKrupp Aceros y Servicios*. Obtenido de <http://web.archive.org/web/20111216004759/http://www.thyssenkrupp.cl/Documentos/fichasT/Aceros%20Inoxidables/AISI%20304%20-%20304L.pdf>
- UNDOprototipos. (2015). *Materil ABS para piezas funcionales*. Obtenido de <http://www.undoprototipos.com/portfolio/abs-2/>
- UNDOprototipos. (2015). *Tecnología SLA, Estereolitografía*. Obtenido de <http://www.undoprototipos.com/portfolio/tecnologia-sla-estereolitografia/>
- UNED. (2012). *CLASIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE LAS TÉCNICAS DE PROTOTIPADO RÁPIDO*. Obtenido de <https://tfmrimuned.wordpress.com/clasificacion-de-las-tecnologias-de-prototipado-rapido/>
- UNED. (2012). *Proceso de conformado de materiales poliméricos por prototipado rápido*. Obtenido de <https://tfmrimuned.wordpress.com/fotopolimerizacion-por-luz-ultravioleta-sgc/>
- Valero, A. (13 de Agosto de 2015). *Conocimiento libre en impresión 3D*. Obtenido de <http://diwo.bq.com/conocimiento-libre-e-impresion-3d/>
- Wanhao. (2015). *Wanhao Usa*. Obtenido de <http://wanhaousa.com/>
- WMH. (2016). *Gato de husillo de tornillo sin fin*. Obtenido de <http://www.directindustry.es/prod/wmh-srl/product-99689-924551.html>
- Zeitgeist. (2012). *Impresora 3D*. Obtenido de <http://movimientozeitgeist.org/home/index.php/component/k2/item/148-impresora-3d.html>

## **Anexos**

- Manual de usuario.
- Planos Técnicos.