Sistema de impresión de corazón en 3D para prototipado rápido

Oscar Gustavo Orellana Lacs



UVG UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



Sistema de impresión de corazón en 3D para prototipado rápido

Trabajo de graduación presentado por Oscar Gustavo Orellana Lacs
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2020

Vo.Bo.:

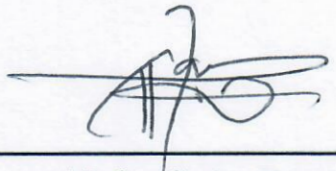
(f) 

Ing. Kurt Kellner

Tribunal Examinador:

(f) 

Ing. Kurt Kellner

(f) 

M. Sc. Carlos Esquit

(f) 

M. Sc. Renato Conedera

Fecha de aprobación: Guatemala, 15 de junio de 2020.

Prefacio

Antes de empezar la lectura de este proyecto, quisiera dirigir unas palabras de agradecimiento a todas esas personas que me ayudaron a terminar este trabajo, ya sea con apoyo directo en el proyecto o con el ánimo que me proveyeron todo el tiempo. Agradezco, sobre todo, a mi padre Gustavo Orellana y mi madre Lisseth Lacs por la oportunidad que me dieron para estudiar en esta prestigiosa Universidad y que siempre estuvieron a mi lado, apoyándome cada año desde que su servidor tiene memoria. Quiero agradecer a mi hermana Paulina Orellana, responsable de impulsarme a seguir, a continuar a pesar de los altibajos; le agradezco a Dulce González por su apoyo e impulso todos los días desde el comienzo del proyecto. Agradezco a mis amigos y compañeros, quienes siempre estuvieron ahí para ayudar y apoyar en todo lo podían.

A todos ustedes, les agradezco con mucho amor y cariño y desde el fondo de mi corazón ya que sin ellos este proyecto nunca pudo haberse llevado a cabo.

Por último, quiero agradecer a mi director y a mi asesor quienes apoyaron en todo el proceso; también le agradezco a la Unidad de Cardiología (UNICAR) por su colaboración, participación y aporte que impulsaron grandemente al desarrollo del proyecto. A los ingenieros, tanto en Guatemala como en Estados Unidos, que colaboraron con información esencial para el éxito de este proyecto.

Índice

Prefacio III

Lista de figuras XI

Lista de cuadros XII

Resumen XIV

Abstract XVI

1. Introducción 1

2. Antecedentes 3
2.1. Planeación y preparación . . . 3
2.2. Desarrollo actual . . . 5
2.3. Alcance y desarrollo futuro . . . 7

3. Justificación 9

4. Objetivos 10
4.1. Objetivo general . . . 10
4.2. Objetivos específicos . . . 10

5. Alcance 11

6. Marco teórico 13
6.1. Sistemas de impresión en 3D . . . 13
6.1.1. Tipos de impresoras . . . 14
6.2. Sistema de impresión a analizar . . . 23
6.2.1. Hardware . . . 23
6.2.2. Software . . . 26
6.2.3. MeshMixer como programa de edición . . . 26
6.2.4. Implementación electrónica . . . 27
6.2.5. Otros componentes electrónicos . . . 29

6.3. Materiales para impresión tridimensional . . . 30
6.4. Descripción general . . . 31
6.5. Materiales de impresión . . . 32
6.6. Resina . . . 33
6.6.1. Resina rígida . . . 34
6.6.2. Resina flexible . . . 34
6.7. Plásticos . . . 35
6.7.1. PLA . . . 35
6.7.2. TPU . . . 37
6.8. Biomateriales . . . 38

7. Descripción de la Impresora 3D 42
7.1. Funcionamiento general . . . 42
7.2. Familiarización del sistema de impresión DLP . . . 44
7.2.1. Uso de programas de edición . . . 44
7.2.2. Nivelación y calibración . . . 45
7.2.3. Impresiones iniciales . . . 47
7.2.4. Pruebas iniciales y de exposición . . . 47
7.2.5. Precauciones . . . 49

8. Procesos 52
8.1. Investigación de procesos, materiales y componentes . . . 53
8.1.1. Procesos de impresión . . . 54
8.1.2. Materiales de impresión . . . 54
8.1.3. Componentes de la impresora . . . 55
8.2. Impresión de corazones tridimensionales . . . 55
8.2.1. Parámetros de impresión . . . 56
8.3. Post-procesamiento . . . 60
8.4. Selección de materiales . . . 66

9. Validación 68
9.1. Prototipos y descripción . . . 68
9.2. Comparación . . . 68
9.3. Colaboración con los profesionales médicos . . . 81
9.4. Manuales de uso . . . 83

10. Conclusiones 84

11. Recomendaciones 85

12. Bibliografía 86

13. Anexos 91
13.1. Anexo A: Modelos 3D . . . 91
13.1.1. Modelos del corazón en CURA para impresora FDM . . . 91
13.1.2. Modelos del corazón en ANYCUBIC Photon Slicer para impresora SLA 92
13.1.3. Modelos del corazón modificado en MeshMixer . . . 92
13.1.4. Modelos del corazón recibido de ecocardiografias . . . 93
13.1.5. Modelos de corazón recibido de tomografías . . . 93

13.2. Anexo B: Construcción de la impresora 3D 94
13.2.1. Cotización de componentes 94
13.2.2. Cotización de materiales de impresión 94
13.2.3. Componentes impresos 95
13.3. Anexo C: Corazones 96
13.3.1. Corazones impresos en proceso FDM 96
13.3.2. Corazones impresos en proceso SLA 97
13.4. Anexo D: Resultados de mediciones de impresiones estándar 99
13.5. Anexo E: Manual descriptivo de uso y operación para la impresora de resina . 103
13.5.1. Prefacio 103
13.5.2. Instalación 103
13.5.3. Operación 106
13.5.4. Mantenimiento 108
13.5.5. Seguridad 109
13.6. Anexo F: Manual descriptivo de impresión para la impresora de resina 111
13.6.1. Prefacio 111
13.6.2. Software 111
13.6.3. Parámetros 121
13.6.4. Cuidado de la resina 125
13.6.5. Post-procesamiento 125
13.7. Anexo G: Manual de uso en línea para el público 127
13.7.1. Antes de usar la impresora 127
13.7.2. Al usar la impresora 128
13.7.3. Después de imprimir 130
13.7.4. Mantenimiento 130
13.7.5. Revisión de los componentes 131
13.8. Anexo H: Manual de impresión en línea para el público 133
13.8.1. CONOCIENDO EL PROGRAMA 133
13.8.2. SOPORTE 134
13.8.3. ¿Cómo poner el soporte? 136
13.8.4. PARÁMETROS 137
13.8.5. Posicionamiento de objeto 138
13.8.6. PASO A PASO PARA PREPARAR UNA IMPRESIÓN RÁPIDA . . 140
13.9. Anexo I: Bitácora de impresiones 142

Lista de figuras

1. Corazones impresos en 3D 4
2. Tomografías de corazón 5

3. Gran Cañón como ejemplo de erosión de material 14
4. centerProceso SLA de arriba hacia abajo [24] 16
5. Proceso SLA de abajo hacia arriba [25] 16
6. Masa o pastel de polvo 18
7. Proceso SLS [24] 18
8. Tabla comparativa de procesos SLA y SLS [24] 19
9. Tabla comparativa de impresoras FDM, SLA y SLS [26] 19
10. Proceso LOM [24] 20
11. Proceso FDM [21] 21
12. Proceso Polyjet [21] 22
13. Resumen de usos [29] 23
14. Caja o armamento de la impresora DLP Anycubic Photon [30] 24
15. VAT de la impresora DLP Anycubic Photon [30] 25
16. Placa de la impresora DLP Anycubic Photon [30] 25
17. Diagrama de posicionamiento del reflector en una impresora Anycubic Photon [30] 26
18. Objetos creados con resina flexible [40] 30
19. Objeto hecho con resina rígida marca Anycubic 32
20. Compresión de objetos hechos con resina flexible [43] 34
21. Propiedades mecánicas de la resina flexible de Photocentric 3D 35
22. Rollo de PLA usado por impresoras FDM Ultimaker 3 36
23. Rollo de PLA usado por impresoras FDM Ultimaker 3 de la misma marca . . 36
24. Objeto hecho en PLA antes y después de post procesado [47] 37
25. Objeto simple hecho con TPU [49] 38
26. Médula de hueso impreso en 28 días [29] 39
27. Propiedades de las biotintas [51] 40
28. Plano del sistema de impresión ITOP [53] 41
29. Proceso de impresión [53] 41

30. Placa y objeto en piscina de resina [54] 42

31. Parte de corazón con orientación de 45 grados respecto al eje X 43
32. Impresora con sistema DLP Anycubic [30] 45
33. Impresora con sistema FDM Ultimaker 3 [55] 45
34. Prueba de funcionamiento de la pantalla LCD [56] 46
35. Nivelación de la placa 46
36. Torture test que incluye Anycubic (6 horas) [56] 48
37. Torture test con menor tiempo de impresión (4 horas)[58] 48
38. Tiempos de exposición en la configuración del programa 49
39. Uso de guantes como medida de protección según el manual de usuario de Anycubic [56] 50

40. Resumen del proceso de impresión 52
41. Laboratorio Dhive 53
42. Proceso de impresión FDM 54
43. Caja de corazones 56
44. Caja de corazones vista aérea 56
45. Caja de corazones abierta para mejor visualización 56
46. Parámetros usados en el SLICER 57
47. Parámetros proceso FDM 59
48. Corazón hecho con TPU con 60 por ciento de relleno 60
49. Corazón hecho con TPU con 80 por ciento de relleno 60
50. Capas despegadas del disco 61
51. Capa pegajosa 61
52. Caja reflectora 62
53. Caja reflectora con luz UV 62
54. Llanta antes del post-procesado 62
55. Llanta dos minutos después del post-procesado 63
56. Llanta cuatro minutos después del post-procesado 63
57. Llanta seis minutos después del post-procesado 63
58. Llanta ocho minutos después del post-procesado 63
59. Llanta diez minutos después del post-procesado 63
60. Corazón primera etapa del post-procesamiento (antes) 64
61. Corazón segunda etapa del post-procesamiento (lijado) 64
62. Corazón tercera etapa del post-procesamiento (epoxi) 64
63. Corazón cuarta etapa del post-procesamiento (pintura) 64
64. Corazón quinta etapa del post-procesamiento (encerado) 65
65. Corazón sexta etapa del post-procesamiento (después) 65
66. Corazón encerado antes de lijar 65
67. Corazón encerado después de lijar 65
68. Corazón antes de aplicar post-procesamiento 66
69. Corazón antes de aplicar post-procesamiento 66
70. Área de trabajo de impresora Anycubic 67
71. Área de trabajo extendido 67

72. Prueba Bote DLP con resina rígida 69
73. Prueba Bote DLP con resina flexible 69
74. Prueba Bote FDM con PLA 69
75. Prueba Bote FDM con TPU 69

76. Prueba Bote SLS . . . 70
77. Corazón con grueso de capa 0.2mm a 70mm/s . . . 70
78. Corazón con grueso de capa 0.11mm a 60mm/s . . . 70
79. Corazón con grueso de capa 0.15mm a 65mm/s . . . 71
80. Corazón impreso con PLA . . . 71
81. Corazón impreso con Resina rígida . . . 71
82. Corazón impreso con resina flexible . . . 71
83. Corazón impreso con resina en proceso polyjet . . . 71
84. Primer objeto estándar de comparación [60] . . . 72
85. Segundo objeto estándar de comparación [61] . . . 75
86. Tercer objeto estándar de comparación . . . 77
87. Último objeto estándar de comparación . . . 79
88. Conferencia con los doctores en UNICAR . . . 81
89. Conferencia con los doctores en UNICAR . . . 81
90. Croquis descriptivo de ASD y VSD en inglés [62] . . . 82
91. Parte 1: Manual de uso y operación . . . 83
92. Parte 2: Manual de impresión . . . 83
93. Manual de uso . . . 83
94. Manual de impresión . . . 83

95. Corazón impreso en proceso FDM . . . 91
96. Corazón impreso en proceso FDM mostrando las capas . . . 91
97. Corazón impreso en proceso SLA . . . 92
98. Corazón impreso en proceso SLA mostrando soporte . . . 92
99. Placa de corazón con hiperplasia impreso antes y después de edición con Meshmixer . . . 92
100. Modelo del ecocardiografia del corazón completo . . . 93
101. modelo del ecocardiografia del corazón a la mitad . . . 93
102. Modelo del tomografía del corazón completo . . . 93
103. Modelo del tomografía del corazón a la mitad . . . 93
104. Cotización parte 1 . . . 94
105. Cotización parte 2 . . . 94
106. Cotización parte 3 . . . 94
107. Cotización parte 4 . . . 94
108. Cotización de materiales . . . 94
109. Esquina de hardware en impresión . . . 95
110. Dos esquinas ensambladas a un perfil de aluminio . . . 95
111. Esquina de hardware en impresión . . . 95
112. Dos esquinas ensambladas a un perfil de aluminio . . . 95
113. Mitad de corazón con 0.11mm de capa a 70mm/s . . . 96
114. Corazón completo con 0.11mm de capa a 70mm/s . . . 96
115. Corazón completo con 0.2mm de capa a 70mm/s . . . 96
116. Corazón completo con 0.2mm de capa a 65mm/s . . . 96
117. Corazón completo con 0.15mm de capa a 70mm/s . . . 96
118. Corazón completo con 0.15mm de capa a 65mm/s . . . 96
119. Corazón completo con 0.12mm de capa a 70mm/s . . . 97
120. Corazón completo con 0.12mm de capa a 65mm/s . . . 97
121. Corazón completo con 0.11mm de capa a 70mm/s . . . 97

122. Corazón completo con 0.11mm de capa a 65mm/s 97
123. Impresión del corazón en SLA con 0.05mm de capa 97
124. Perfil del corazón que muestra el soporte utilizado 97
125. Acercamiento para mejor visualización 98
126. Mitad de corazón vacío 98
127. Visualización de arterias vacías demostrando la utilidad de la impresora . . . 98
128. Perfil del corazón que muestra el soporte utilizado 98
129. Capa de papel debajo de la impresora para seguridad contra resina 104
130. Cama de papel donde se colocan materiales en contacto con resina 105
131. Contenedor lleno de artículos de limpieza para la resina 105
132. Instalación completa de la impresora 105
133. Impresión de prueba 106
134. Pantalla principal de la impresora 3D 107
135. Filtro de resina 107
136. Filtro con embudo incluido 107
137. Forma completa para devolver resina hacia el envase 107
138. Pantalla LCD dentro de la impresora 3D 108
139. VAT como se mira físicamente antes de meterlo a la impresora 108
140. Canasta para el almacenamiento de materiales para el uso en la impresora . . 109
141. Placa para el posicionamiento de objetos en impresión 109
142. Materiales de seguridad para uso de la impresora 110
143. Envase de la resina elástica 110
144. Envase del líquido de limpieza para la resina 110
145. Pantalla principal del slicer de la Anycubic 112
146. Barra de opciones principal 112
147. Objeto puesto en la plataforma 112
148. Barra de opciones de edición 112
149. Menú de soporte 113
150. Menú para configuración de parte media del soporte 114
151. Menú para configuración de la base del soporte 114
152. Opciones predeterminadas de soporte 114
153. Vista para agregar soporte manualmente a un objeto 115
154. Mas opciones para configuración de soporte 115
155. Objeto con soporte agregado automáticamente 116
156. Barra de opciones de edición al objeto 116
157. Menú para configuración de vista del objeto 117
158. Menú para configuración de orientación del objeto 117
159. Menú para configuración de dimensionamiento del objeto 118
160. Menú para configuración de posicionamiento del objeto 119
161. Menú para configuración de parámetros de la impresora 119
162. Barra de opciones principal 120
163. Objeto copiado y pegado después de elegir la opción de la barra 120
164. Primera venta desplegada después de opción de slice 120
165. Ventana detallada de datos de impresión 121
166. Ventana detalla de datos de impresión mostrando una capa de impresión del objeto 121
167. Menú de configuración para impresión en 3D 121
168. Fantasma impreso en 0.1mm grueso de capa 122

169. Base de un objeto 123

Lista de cuadros

1. Resumen de parámetros para impresión de objetos en resina 58

2. Parámetros medidos del objeto 'All In One 3D Test' 73
3. Porcentajes de error para objeto 'All In One 3D Test' 74
4. Parámetros medidos del objeto 'Kickstarter FDM all in one 3D test' 75
5. Porcentajes de error para objeto 'Kickstarter FDM all in one 3D test' 76
6. Parámetros medidos del objeto 'Benchy' 77
7. Porcentajes de error de mediciones hechas en el 'Benchy' 78
9. Porcentajes de error de mediciones hechas en el objeto 'PHOTON TEST' . . 79
8. Parámetros medidos del objeto 'PHOTON TEST' 80

10. Tabla de resultados de mediciones para Torture Test ANYCUBIC PHOTON 99
11. Tabla de resultados de mediciones para ALL IN ONE 3D TEST 100
12. Tabla de resultados de mediciones para FDM KICKSTARTER ALL IN ONE TEST 101
13. Tabla de resultados de mediciones para BENCHY 102
14. Tabla de valores para parámetros de impresión con resina rígida 124
15. Tabla de valores para parámetros de impresión con resina flexible 124
16. URL 125
17. Bitácora de impresiones 142

Resumen

Uno de los problemas que se enfrenta Guatemala, es el sistema de salud que tiene. Aquí, muchos de los ciudadanos del país ni siquiera tienen acceso. Pero uno de los más grandes problemas a nivel mundial son los problemas cardiovasculares y sobretodo aquellos que se relacionan con el corazón. Muchos cardiólogos, por lo que se investigó, llegan a las cirugías con una preparación que no se consideraría completa. Esto no quiere decir que el doctor no sabe lo que está haciendo, lo que si da a entender esta información, es que el estudio de patologías que se relacionan al corazón único de cada paciente mediante imágenes digitales no es suficiente para poder tener una visión completa del problema que se tiene en manos. Para ello, el modelado tridimensional cobra sentido, con modelos hechos y luego impresos en 3D se puede ayudar al doctor a conseguir una preparación de mejor calidad así como una imagen completa de como es el corazón de sus pacientes.

Con este proyecto se quiso ayudar a los doctores en Guatemala y, en colaboración con UNICAR, se creó un método o proceso adecuado para servir a este propósito. La impresión de corazones en 3D es el principal trabajo de esta tesis, con estas, se quiere ayudar a la preparación de cirugías de corazón. Pero, para ello, se necesitó crear un método de impresión rápida para poder prototipar corazones humanos con patologías; este es el objetivo principal de este proyecto poder crear prototipos y, mediante el seguimiento de ciertos procesos, obtener corazones impresos que pueden usarse de estudio.

Para poder cumplir este objetivo, se dividió el trabajo en varias tareas clave para el éxito del proyecto. Se investigaron y describieron varios materiales y procesos usado en la impresión 3D; tomando en cuenta los sistemas que se tienen a disposición se hizo una comparación de los procesos de impresión disponibles entre FDM y DLP y poder familiarizarse con estos, ya que de otra forma no se pueden imprimir objeto exitosamente; teniendo esta base teórica a disposición, una de las tareas más importantes del proyecto fue el poder imprimir corazones que fueran fieles a las imágenes digital provistas por profesionales médicos y a la vez, ayudar de la mejor forma, a la comunidad médica; por último, para poder cumplir la tarea de apoyar a la comunidad médica y crear el mejor proceso a seguir de impresión de corazones, se hicieron varios manuales, los cuales, no son de uso exclusivo para doctores sino que también son para el público en general.

Resultados muy prometedores nacieron de este proyecto. Después de hacer una exhausti-

va investigación se llegó a la conclusión que el uso del sistema de impresión DLP era el mejor candidato para obtener impresiones de calidad y fieles a lo que se tiene en formatos digitales. Comparando varios materiales y procesos, se hicieron muchas impresiones de corazones con tal de perfeccionar la técnica. Un total de 70 impresiones de corazones se hicieron para poder obtener datos relevantes, estos siendo parámetros y materiales a usar para obtener objetos de calidad. Con ayuda de UNICAR se pudieron filtrar varios de variables que se tenían contempladas y por ende se pudo enfocar el resto de la investigación. Los manuales que se hicieron, son de gran ayuda, ya que cualquier persona que no sea doctor o ingeniero pueden entenderlo y esto le da importancia a estos documentos debido a que ahora cualquiera puede imprimir un corazón.

Abstract

One of the problems Guatemala faces is the health system it has. Here, many of the country's citizens do not even have access. But one of the biggest problems worldwide are cardiovascular problems and especially those that relate to the heart. Many cardiologists, so it was investigated, arrive at surgeries with a preparation that would not be considered complete. This does not mean that the doctor does not know what he is doing, what this information implies is that the study of pathologies that relate to the unique heart of each patient through digital images is not enough to be able to have a complete vision. of the problem that is in the hands. For this, the three-dimensional modeling makes sense, with models made and then printed in 3D you can help the doctor to get better quality preparation as well as a complete picture of how the heart of his patients is.

With this project we wanted to help doctors in Guatemala and, in collaboration with UNICAR, an appropriate method or process was created to serve this purpose. The impression of hearts in 3D is the main work of this thesis, with these, you want to help the preparation of heart surgeries. But, for this, it was necessary to create a rapid printing method to be able to prototype human hearts with pathologies; This is the main objective of this project to be able to create prototypes and, by monitoring certain processes, obtain printed hearts that can be used for the study.

To achieve this objective, the work was divided into several key tasks for the success of the project. Various materials and processes used in 3D printing were investigated and described; taking into account the available systems, a comparison was made of the printing processes available between FDM and DLP and to become familiar with them, since otherwise they cannot be printed successfully; having this theoretical basis available, one of the most important tasks of the project was to be able to print hearts that were faithful to digital images provided by medical professionals and, at the same time, help the medical community in the best way; Finally, to fulfill the task of supporting the medical community and creating the best process to follow the printing of hearts, several manuals were made, which are not exclusively for doctors but also for the general public.

Very promising results were born from this project. After doing an exhaustive investigation, it was concluded that the use of the DLP printing system was the best candidate to obtain quality prints and faithful to what you have in digital formats. Comparing various

materials and processes, many impressions of hearts were made to perfect the technique. A total of 70 impressions of hearts were made to obtain relevant data, these being parameters and materials to be used to obtain quality objects. With the help of UNICAR, several of the variables that were contemplated could be filtered and therefore the rest of the research could be focused. The manuals that were made are very helpful, since anyone who is not a doctor or engineer can understand it and this gives importance to these documents because now anyone can print a heart.

CAPÍTULO 1

Introducción

La demanda por servicios de salud se ha incrementado exponencialmente a medida que la población mundial incrementa de sobremanera. Gran parte de esta población, requiere la necesidad de reemplazar uno de sus órganos que esta defectuoso por otro, para lo cual debe contarse con un repuesto"que los médicos coloquen mediante operaciones quirúrgicas necesarias. Debe contarse con una gran cantidad de reemplazos que, por lo general, son naturales gracias a donaciones de órganos. Mediante el aumento en demanda por órganos, últimamente se recurre al camino artificial en el cual se pueden reformar órganos con materiales adecuados y que sea funcional de igual manera.

Mucha investigación se ha hecho en torno al cuidado, reemplazo y creación de órganos a lo cual se ha tenido gran avance en la medicina. Debido a la naturaleza de este proyecto, se reducirá todo este ámbito médico y científico a uno solo, la impresión de corazones en 3D. Dentro de dicho tema se discuten los avances que se han hecho en este campo, la ayuda proporcionada debido a dicha tecnología y como se está manejando en la actualidad. La creación de órganos artificiales es una actividad que implica el esfuerzo de varios profesionales de distintos campos científicos. Esta tecnología se desarrolla a partir de la alta demanda que se tiene para contrarrestar complicaciones cardiacas, considerando que alrededor de 26 millones de personas padecen de alguna de complicación de esta naturaleza [1]

En los últimos años se han hecho grandes avances científicos los cuales benefician a las personas, con algún tipo de padecimiento, que requieren que alguno de sus órganos y específicamente el corazón sea total o parcialmente reemplazado por otro. Así que, estos avances son de gran ayuda a profesionales médicos que necesitan modelos de corazón que sean exactos a los naturales, con los cuales puedan experimentar, entrenar e incluso que necesitan ayuda para procedimientos quirúrgicos difíciles y prolongados. En la actualidad, ya se cuenta con la capacidad tecnológica para replicar partes de cuerpos personalizados y fiables que funcionan como prótesis que pueden ser colocados en el cuerpo.

Con materiales blandos y biológicos se crean órganos adaptados perfectamente a cada individuo [2], para lo cual es necesario poder desarrollar la creación de corazones mediante la impresión de los mismos. Para atender adecuadamente estos requerimiento se han desa-

rrollado varias tecnologías capaces de ayudar de sobremanera a cumplir el objetivo que se tiene presente. Se han desarrollado mejores procesos para obtener y procesar imágenes, se han perfeccionado los programas que procesan todo tipo de datos necesarios para ordenar la impresión de corazones y otros órganos que se acerquen lo mas posible a los naturales.

El siguiente proyecto se enfoca en la impresión en 3D y tratar de perfeccionar la forma de imprimir y obtener la mayor cantidad de detalles posibles, con el objetivo de obtener prototipos de corazones a gran detalle, para que sean usados como objetos de estudio por profesionales que necesitan ayuda en la preparación y planeación de intervenciones quirúrgicas. Con una extensa investigación acerca de los procesos, así como de los materiales, se puede tener un gran entendimiento de como todo el proceso funciona y como puede perfeccionarse al trabajar con parámetros y materiales distintos.

CAPÍTULO 2

Antecedentes

2.1. Planeación y preparación

Durante mucho tiempo, los profesionales médicos llegaban a encontrarse con sorpresas en una cirugía, no sabían lo que les esperaban hasta una vez empezado el procedimiento. Se mira ahora que los doctores se preparan con radiografías, tomografías y otro tipo de ayuda visual, con tal de tener una idea de lo que les esperan. Dichos profesionales, planean con base a imágenes digitales con alto detalle, pero con los cuales no se tiene información completa, tampoco se puede distinguir un corazón de otro [3]. "Incluso con una imagen renderizada MRI (imagen de resonancia magnética por sus siglas en ingles) con la cual solo se obtiene información 2D, no se obtiene la información ni anatomía que obtenemos en 3D" menciona el Doctor Bramlet de la Universidad de medicina de Illinois.

Ahora, se desarrolla una tecnología con la que un doctor es capaz de "llegar a la cirugía lo mas preparados posibles y sin ninguna duda" [4], con la cual se imprimen corazones 3D particulares, es decir, con problemas o patologías únicas de cada paciente, con las cuales profesionales médicos son capaces de prepararse, planear y tomar decisiones antes de empezar con cualquier cirugía [4]. Ahora, esta tecnología esta tomando grandes pasos en todo el mundo, es aprovechada por cirujanos y otros profesionales y es de gran ayuda, tanto para el profesional como el paciente. Como menciona Marisa di Santo, jefa de cardiología en el hospital pediátrico Garrahan en Argentina, "Tener el corazón, poder verlo, tocarlo y simular el procedimiento ayuda mucho". Con esto se entiende que los médicos también pueden aprender con las manos, aprenden tocando y con ello pueden prepararse de la mejor manera posible para cualquier problema [5]. Un ejemplo del beneficio de este procedimiento, viene de un comentario hecho al respecto por un cardiólogo profesional, quien menciona que operaciones difíciles que normalmente toman años aprender ahora es fácil enseñar a muchos en un solo año y con altas probabilidades de éxito [6]. Con dichos corazones artificiales o de prototipo, también es posible esterilizarlos y traerlos a la sala de operación para tener aún más ayuda de la que se tuvo previamente con la preparación digital [7].

Esta tecnología, es cada vez más necesaria y muy utilizada actualmente por profesionales

que necesitan ayuda antes de cualquier operación. Aparte, los profesionales médicos pueden tener listo un corazón al cual pueden decidir si operar o no, si la complicación es seria o no. De esta manera, esto no solo sirve para planear cirugías, sino que también para saber si una vale la pena o si hay que invertir en ella para quitar algún riesgo [7]. Esta tecnología no solo permite visualizar el corazón humano, sino que también, se observa cada acomplejamiento que se pueda tener. En el caso de Sudamérica, en Argentina, ocho intervenciones exitosas dentro del anterior mencionado hospital, nos da una clara idea de lo útil que es tener una ayuda antes de cualquier cirugía. "... la imagen 2D reveló un agujero en el corazón, pero el modelo 3D reveló muchas más complicaciones con la cual el bebe nació..."menciona el doctor Bramlet en Illinois, dando un claro ejemplo de la utilidad de la impresión de corazones en 3D. Con muchos simulacros por año, por paciente, se tiene una amplia idea de cómo será en vida real, como será de verdad y como se pueden tratar todos los problemas con una sola intervención y estar seguros de que el órgano no tendrá complicaciones futuras [4]. Con pruebas realizadas cada año, con pacientes dispuestos a colaborar, con profesionales dispuestos a aprender (7 por año en el hospital de niños en Boston), esta tecnología puede desarrollarse rápidamente y ser usada en cualquier momento [5].

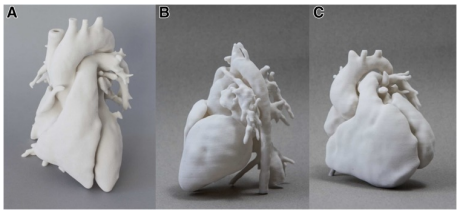


Figura 1: Corazones impresos en 3D

Tenemos ejemplos de todo el mundo donde están desarrollando y utilizando esta tecnología para la ayuda medicinal. Sabiendo también, que en Estados Unidos y Europa una de las complicaciones más comunes que requieren hospitalización es la Regurgitación Mitral, la cual también es una de las complicaciones más difíciles de ver con los métodos convencionales de imágenes en 2D, pero que, con la tecnología en 3D es fácil de visualizar [8]. En Norteamérica, tenemos profesionales que estudian formas de desarrollar de mejor manera la tecnología para aplicaciones más rápidas y fáciles [5]. En Europa, se tienen profesores tratando de mejorar lo que se tiene en la actualidad. En Zúrich, Suiza están desarrollando mejores materiales para poder estudiarlos y también para las otras aplicaciones para las que están trabajando [1].

Saliendo un poco del ámbito cardiológico, se tiene evidencia que apunta a el reemplazo de órganos o partes de órganos que son impresos en 3D y ayudan de una u otra manera al paciente: desde partes prostéticas, ayuda auditiva o incluso reemplazo dental [9]. Esto nos da una buena idea acerca de como el prototipado de órganos de cualquier tipo, deja claro todo el problema y no deja nada a la imaginación y no deja detalles fuera. Dejando entonces, cualquier problema en evidencia que en representaciones en 2D eran imposibles de obtener, pero en 3D se muestra de manera detallada. Como mencionan Farooqi *et. al.* [9] esta tecnología podría ser usada en todo ámbito medicinal, dejando a un lado el uso de animales para pruebas de cualquier tipo, que las personas consideran inhumanas.

2.2. Desarrollo actual

En esta sección se quiere aclarar un poco acerca de cómo se está desarrollando esta tecnología en la actualidad. El método convencional para la planeación de cirugías es con imágenes en 2D. Estas imágenes pueden provenir de distintos tipos de tecnologías incluyendo MRI, tomografías, ecocardiogramas y radiografías [8]. Con programas (como Rhinoceros) y algoritmos actuales, se pueden tomar estas imágenes y segmentarlas de manera que el análisis que se tiene, puede representar la anatomía del órgano. Pero este proceso requiere un procesamiento bastante alto, es decir, para poder crear una representación anatómicamente correcta, la cual es usada para el estudio y planeación de profesionales médicos, se requieren por lo menos 200 segmentaciones de las imágenes [5].

A través de tomografías computarizadas, se obtiene mucha información para la creación de los modelos en 3D que se imprimirán. Con este sistema y utilizando algoritmos de procesamiento, se genera la superficie completa del corazón a partir del volumen de sangre, en pocas palabras, mapean la cantidad de sangre en cada sección de interés que se tiene y a partir de esto se obtiene un molde para la superficie interna y externa del corazón [8]. Esto permite afirmar, que mientras mejor sea la imagen en 2D, mejor será el proceso de conversión a 3D. Cuando este no es muy bueno, se usan otras herramientas que permiten interpolar y terminar la figura que luego será la que se transformará en un modelo en 3D [6].



Figura 2: Tomografías de corazón

También, aislando otro tipo de funciones humanas automáticas (como la respiración), se obtiene una alta resolución de imagen en cuanto a la forma, tamaño y complejidad única de cada corazón. Pero además de aislar este tipo de funciones, también es necesario mejorar el proceso mediante aplicación de soluciones que puedan revelar de mejor manera los resultados de las imágenes tomadas en las distintas formas [6]. Otra manera de obtener los modelos en 3D, es mediante el estudio de las paredes del corazón, esto permite interactuar con la aparte interna y externa y crear una imagen fiable de lo que después se imprimirá. No importando que tipo de método se use, la aplicación de otros programas con tal de poder suavizar y

detallar las imágenes es tan importante como lo es tomarlas en primer lugar [6].

Cuando el procesamiento rápido se deriva del análisis de las imágenes en 2D, la mayor parte de dicho análisis proviene de tomografías computarizadas y el resto proviene de resonancias magnéticas. Pero también, se hacen muchos estudios con ecocardiogramas de alta definición y puestos en 3D virtual, con el cual, combinando el resto de los procesos, se acelera de manera significativa la creación del modelo en 3D que luego será impresa [9]. Como se menciona el articulo científico de [5], la segmentación se hace mucho menos prolongada y costosa de forma que ya no es necesario evaluar 200 pedazos o vistas del corazón, con el cual solo se obtiene 80 por ciento de la información de la anatomía de dicho órgano y, que además, puede llevar de ocho a diez horas de trabajo y estudio; ahora con el método en 3D y con solo 8 pedazos de los 200, se puede obtener hasta el 90 por ciento de la información que se necesita para poder modelar casi en totalidad el corazón y llevarse a cabo por lo menos en 3 horas de trabajo y estudio. Esta segmentación conlleva a una separación por partes del corazón, mediante el estudio del eje axial de la tomografía computarizada y con el cual el programa define y hace fácil la distinción entre musculo y tejido, así como la cantidad y lugar en el que se encuentran dichos componentes [8]. Cabe mencionar que los autores previamente citados discuten, que a pesar de que esta tecnología definitivamente es un gran avance en la medicina y es de mucha utilidad, la representación en 3D de la superficie del corazón puede no ser del todo correcta y por lo tanto se necesita mucho desarrollo para poder crear algo que sea 100 por ciento fidedigno. A partir de las herramientas actuales para procesamiento de imágenes, es difícil obtener una resolución lo suficientemente detallada como para considerarse realmente excelente [6].

Ahora bien, el método anterior solo es una forma específica para poder crear modelos en 3D. No se ha planteado de manera formal un método con el cual, cualquier profesional no tenga dudas de lo que hace y de la información que obtendrá a partir de dicho procedimiento. A la vez, tampoco existen recomendaciones acerca de como proceder cuando se tiene cierto escenario o como tratar con algún problema que no se había visto antes [9]. Con tal dilema entonces se llega a la conclusión de que para cada complicación cardiovascular, se tendrá que tener un procedimiento distinto para poder modelar en 3D el órgano con dicha complicación.

Dejando a un lado la parte de procesamiento de imágenes, se pasa a investigar sobre la manera en que los órganos son impresos. A partir del desarrollo de las impresoras en 3D se ha visto de una gran variedad de transformaciones y de iteraciones la cuales se pueden encontrar en cualquier lugar del mundo. Llegamos a un punto en el que se imprimen partes humanas blandas de las cuales caben mencionar: piel, cartílago, tendones, músculos y hueso; dichas partes nacen a partir de la colocación casi exacta de células vivas en capas (como funciona cualquier impresora 3D), y así se crean estructuras especializadas para uso anatómico [10].

En el artículo por [10], se menciona un procedimiento general sobre el proceso de impresión, el cual, siendo un proceso muy general, es importante analizarlo. Al principio se tiene una etapa de pre-procesamiento el cual detallado con anterioridad se usa procesamiento de imágenes para crear modelos en 3D. Pero también, en esta parte del proceso, se debe introducir el concepto de biotinta, el cual debe crearse cuidadosamente previa a la impresión.

Este material debe cumplir con 3 requisitos indispensables: el material de ser biocompatible de manera que permita adhesión entre células y que estas crezcan también por su cuenta; una viscosidad suficientemente baja como para que pueda pasar por la extrusora:

y con suficiente fuerza y rigidez para mantener la forma con la que se necesita trabajar [10]. Aparte que ha de planearse el uso de algún material no biológico, que servirá como apoyo en partes elevadas de la pieza. Para tal efecto, actualmente se usan los siguientes materiales para crear tejido suave, de los cuales caben mencionar varios usado típicamente: polímeros, agarosa, fibra, gelatina, hidro gel entre muchos otros. Pero cabe mencionar que, al momento de imprimir prototipos de corazones, se hace en materiales que tratan de simular los verdaderos, médicos se dan cuenta que estos materiales no son los mejores para poder hacer una operación de práctica como se quiere lograr; se da el problema que los materiales por muy cerca que están del verdadero no cumplen con el requisito que necesitan para ser operados, siendo usados al final como una ayuda visual [6]. En cuanto al uso de cualquier material como apoyo visual para cardiólogos, estos no necesariamente tienen que parecerse o simular los verdaderos en cuanto a textura o rigidez, con tal de tener prototipos detallados y altamente fiables es posible el uso de materiales como el plástico.

Luego, esta la parte de procesamiento en sí, la cual se visualiza en la impresión con los materiales especiales creados para este fin; esta etapa sufre de un problema sobre el posicionamiento del extrusor sobre el objeto que se tiene. Como se observa en impresoras de plástico, a veces se generan problemas que pueden ser el uso del material en un punto específico dentro del objeto, siendo este un error el cual se ve luego en toda la pieza. Este problema entonces deriva en una acumulación de errores que no se pueden tener al momento de imprimir sobre material biológico. Otro error que se tiene, es que los materiales usados actualmente no pueden retener la forma que se quiere después de cierto tiempo de impresión. Esfuerzos por mitigar estos problemas se han hecho con la inclusión de equipo y programas capaz de reducir y eliminar errores, inclusive con la resolución que el extrusor maneja, es capaz de mantener la mínima cantidad de errores posibles (aproximadamente 5 micro metros) y con velocidad desde 10 micro metros por segundo y con una base giratoria capaz de cubrir impresiones más difíciles de lograr. Con impresoras conteniendo hasta 6 cabezas de extrusión con distintos materiales cada uno, con distintas temperaturas y distintos tipos de extrusión dedicados para cada material, estas impresoras son de alta calidad y grandemente desarrolladas para poder crear prototipos muy fiables [10].

El post-procesamiento se trata de una especie de intervención sobre el objeto impreso. Con otra maquinaria especializada en materiales biológicos, se trata de mantener algún tipo de consistencia, de manera que el objeto no se degrade rápidamente o este pierda la forma que se le tenia planeada en un principio.

2.3. Alcance y desarrollo futuro

En la actualidad, no solo se esta tratando de crear prototipos 3D de cualquier tipo de órgano, sino que se quiere crear órganos totalmente funcionales. Por ahora, se han logrado crear prótesis de partes del cuerpo que no necesitan que funcionen como un órgano, sino que funcionan como reemplazos, así como huesos, caderas artificiales etc. Pero hay varios laboratorios y profesionales dedicándose a crear órganos funcionales, capaces de reemplazar aquellos que están defectuosos sin la necesidad de un trasplante. Partiendo de la idea de las prótesis, se usan procesos para poder crear corazones que cada vez usan menos cantidad de partes metálicas como se estaban haciendo antes y los cuales son fáciles de integrar en cuerpos

biológicos, no hay compatibilidad entre el metal y el tejido biológico [11]. Para poder probar otra técnica para reemplazar metal en el corazón, se han empezado a imprimir corazones con tejidos blandos que logran, hasta el momento, funcionar como corazones reales que bombean e imitan los movimientos que el corazón realiza. Hasta el momento, investigadores en Suiza, como es mencionado en el artículo por [11], el corazón es capaz de funcionar como uno real por al menos treinta minutos y además no esta hecho para trasplante sino solo para poder estudiar de mejor manera este órgano. Los corazones son solo usados como objetos de estudio, se investigan maneras de usar mejores materiales y tratar de que este pueda funcionar por mas tiempo, con lo cual, al final se quiere poder trasplantar este órgano artificial como si fuera uno real. Por el momento, el corazón de silicona trata de representar lo mejor posible al corazón y poder en el futuro moverlo y venderlo como si fuera un órgano real [1] [12].

CAPÍTULO 3

Justificación

Desde los inicios de la biomédica, los profesionales han estado desarrollando procedimientos, tecnología y maquinaria necesarias para ayudar a las personas que lo necesiten. Actualmente, se han logrado grandes avances en el ámbito del reemplazo de órganos y, en este caso, en la ayuda que proporciona el prototipado de órganos que sirven de modelo de estudio y trabajo. De esta manera se hace más práctico y eficiente las intervenciones quirúrgicas en el momento necesario.

Prototipos, modelos e imágenes se han perfeccionado con el fin de ayudar a profesionales médicos que están por realizar intervenciones quirúrgicas difíciles en pacientes humamos. Imágenes y modelos se han se han venido desarrollando y perfeccionando para ayudar a los doctores y cirujanos, a visualizar de mejor manera lo que no se observa por métodos convencionales; modelos y prototipos han sido de gran ayuda para ver detalles y tamaños que, de otra manera, no se logran obtener.

El uso de impresoras 3D para la creación de modelos exactos de órganos, ha sido de gran ayuda en los últimos años para los profesionales médicos. Esto es un gran éxito alcanzado en la medicina, ya que esto se debe a que el uso de esta metodología ha tenido gran impacto y, ha sido de utilidad para la preparación, planeacion y visualización de problemas y complicaciones. Lo anterior permite que, los médicos puedan prevenirla aparición de complicaciones al momento de estar interviniendo en un paciente elevando el riesgo de causar más daño sobre las personas.

Ahora bien, el propósito de este proyecto es concentrarse específicamente en la impresión de modelos de corazón y que sirvan de ayuda a los médicos guatemaltecos, en especial, aquellos que se encuentran en UNICAR, con el animo de minimizar en lo posible la ocurrencia de problemas al momento de realizar procedimientos quirúrgicos. Se quiere ayudar, en lo mejor posible a profesionales que su trabajo radica en prepararse y operar corazones, por lo que se considera que este proyecto tiene gran importancia para los profesionales que se beneficiarán de gran manera al contar con un sistema que estará a su disposición y que podrán usar en cualquier momento, de tal modo puedan estar listos para cualquier caso particular.

CAPÍTULO 4

Objetivos

4.1. Objetivo general

Hallar el método y proceso más apropiado para el prototipado de corazones mediante impresiones en 3D.

4.2. Objetivos específicos

- Describir el uso de los materiales durante el proceso de impresión 3D.
- Describir la tecnología DLP como método predilecto de impresión 3D.
- Comparar impresiones obtenidas de impresoras FDM y DLP.
- Imprimir corazones en 3D que sean aceptables a las imágenes provistas por los profesionales médicos.
- Colaborar y apoyar con la comunidad médica en el ámbito de la impresión de corazones 3D.
- Proveer de manuales de uso e impresión a profesionales en salud y al público en general.

CAPÍTULO 5

Alcance

En este capítulo se trata de definir el alcance que tendrá el trabajo de graduación en cuanto la investigación y prototipado de corazones, así como el cumplimiento de los objetivos tanto los específicos como el general.

Se inicia el trabajo con una investigación previa de varios sistemas y procesos de impresión existentes. Esto se hace con tal de caracterizar a las impresoras a cierto nivel. Con dicha caracterización se logran ver las ventajas que tienen las impresoras y los procesos que utilizan. Se investigan muchas impresoras pero, no todas son ni serán caracterizadas a profundidad, se describen brevemente aquellos sistemas que no serán muy utilizados durante el trabajo de graduación. Como se define en uno de los objetivos, el interés está enfocado en describir en gran medida el proceso de impresión DLP. Esta decisión es tomada por el hecho de que la impresora que se tiene a disposición puede cumplir con el objetivo de crear prototipos detallados y rápidos. A pesar de esto, se harán comparaciones con otras impresoras disponibles en la universidad, dichos sistemas son FDM y polyjet y no se harán comparaciones con otras impresoras debido a la limitante económica y, por tanto, se escoger un sistema que pueda ser efectivo en realizar impresiones a detalle.

En el caso de la impresora polyjet, no se toma tanto en cuenta debido al costo económico que se tiene al momento de imprimir objetos y por tanto se harán muy limitadas pruebas o impresiones. Se imprimirán como mínimo quince corazones en las impresoras FDM. En el caso del sistema DLP se imprimirán como mínimo 15 corazones para poder comparar directamente los dos procesos de impresión. Se imprimirán corazones exclusivamente, no se enfocara el proyecto en realizar comparaciones de otros órganos debido a que lo que se espera del proyecto es obtener corazones impresos en 3D, sin embargo, para poder corroborar algunos parámetros y detalles y comparar materiales, se crearán objetos con medidas estandarizadas para obtener los mejores resultados.

Al momento de caracterizar el material, no se hace un análisis profundo sobre dicho tema. El enfoque principal del proyecto es obtener corazones a detalle, pero con tal saber acerca del material con el que se esta trabajando, se usarán los datos provistos por la empresa sobre pruebas que estos ya realizaron. Los objetos hechos en las impresoras se tratarán

de caracterizan de forma que la información que se obtenga sea entendida por profesionales médicos. Con este alcance se limita el enfoque del proyecto para poder perfeccionar la técnica de impresión y no desviarse o concentrarse en otra información que no tiene mucha importancia. Describir y familiarizarse con las impresoras a usar se basará mucho en investigación. Estas impresoras son dispositivos que llevan mucho tiempo en la industria por lo que se tiene mucha información sobre estos.

Considerando que el proyecto inició con la idea de armar una impresora basado en trabajos hechos por [13] [14], se sabe mucho acerca de la importancia que tiene cada componente para realizar el trabajo, para el cual, fue construido el sistema. Con tal información se es capaz de describir la impresora por los componentes que tiene. Para el caso de la impresora FDM, se hará una breve descripción con en el objetivo de que, tanto el lector, como profesionales médicos y asesores puedan comparar también ambos sistemas. A pesar de haber empezado el trabajo con la construcción del sistema, no se diseñó más de lo que ya se hizo; para interés del lector, se adjuntaron algunos de los diseños y referencias, que tenían el propósito de guiar la primera parte del proyecto. No se diseñarán circuitos ni se harán programas que ayuden o apoyen la elaboración del proyecto, debido a que ya se tienen muchas opciones disponibles y mas desarrolladas.

Para finalizar, se quiere cumplir el objetivo especifico de imprimir corazones que sean fieles a las imágenes provistas por los profesionales médicos. La forma en la que se cumplió este objetivo, fue mediante la validación de estos con los profesionales médicos. No sabiendo que tan bien se tiene un corazón, o como es este anatómicamente, se consultó con profesionales médicos en UNICAR para poder apoyar los resultados obtenidos. Con la retroalimentación dada por estos, se podrá definir la calidad de las impresiones hechas. Se quieren poder comparar corazones tomados de ecocardiogramas pero de ser posible se usaron otros métodos de obtención de imágenes digitales, estos análisis pueden resultar beneficiosos para poder elegir que método y proceso es el más sencillo para la impresión de corazones.

CAPÍTULO 6

Marco teórico

6.1. Sistemas de impresión en 3D

Mientras avanza la tecnología, se ha hecho más evidente la necesidad de prototipar antes de crear. El prototipo es el paso previo al hacer y durante muchos años, el método para crear prototipos ha ido evolucionando desde dibujos, a modelos de cartón y como paso final (siendo más usado en la actualidad) es la impresión 3D. La impresión 3D, es el método de manufactura por medio del cual materiales como el plástico o metal son depositados en capas una encima de otra creando estructuras tridimensionales [15], mediante una serie de pedazos entrelazados [16]. Con ayuda de programas y software creados específicamente para el modelado tridimensional (CAD) se pueden visualizar las capas que serán creadas a partir del modelo en impresión.

Con el objetivo de poder crear estos objetos o modelos tridimensionales, se han desarrollado sistemas de impresión por medio de la deposición de material denominados impresoras 3D. Esta técnica fue inventada en la década de los 80 por Charles Hull, con el método de estereolitografía o STL por sus siglas en inglés [15] y desde entonces ha ido evolucionando y han facilitado la manera de prototipar en el mundo con muchas ventajas a su favor incluyendo: facilidad de duplicación de productos, bajo costo y seguridad de producto [16] y avanzando día a día de tal forma que en el futuro es muy probable mantener estos sistemas como parte de las herramientas de trabajo en casa. Con varios de estos sistemas, se pueden prototipar todo tipo de objetos y estructuras de manera que, cuando se necesitan piezas para construcción o para mecanizar operaciones es posible tener y producir cuantas piezas sean requeridas para este fin.

Otra forma de impresión o creación de objetos en 3D, se basan en operaciones más mecanizadas y menos electrónicas y automatizadas. En este sentido entonces, se tiene el método de remoción de material, esto se hace cortando materiales con formas predeterminadas. Las esculturas son un ejemplo clave de este método, donde el artista quita material hasta crear la forma deseada [17]. Este proceso puede verse en talleres de metal-mecánica, en los cuales el uso de tornos, fresas y CNC se esculpen objetos a partir de materiales de tamaños más

grandes, entonces de cubos de metal se pueden obtener piezas que luego se usan en las aplicaciones correspondientes. Otro ejemplo de este tipo de impresión se haya en la naturaleza, en donde la erosión de materiales es otro gran factor para la creación de estructuras.



Figura 3: Gran Cañón como ejemplo de erosión de material

A partir del desarrollo de los sistemas de impresión en 3D, se han creado muchas aplicaciones como consecuencia de las nuevas tecnologías. Todo depende tanto del tamaño como del volumen, complejidad y cantidad de material que se usará. Las impresiones tridimensionales se usan de forma general en aplicaciones de baja masa o volumen, partes diminutas y para dimensionar diseños complejos. El material más usado para la creación de objetos 3D es el plástico, con dicho material, el consumidor es capaz de crear prototipos de bajo costo, aunque las impresoras 3D son capaces de utilizar materiales más pesados como aluminio y muchas aleaciones [16].

6.1.1. Tipos de impresoras

Mientras esta tecnología ha ido en avance, distintos métodos y procesos para cumplir el mismo objetivo se han desarrollado de forma muy creativas e innovadoras. Creando sistemas cada vez más accesibles a personas y compañías interesadas en el uso de estos sistemas, para la implementación que mejor se adecue a sus necesidades. Las impresoras 3D que se usan hoy en día, son las que se basan en el método de deposición de material. Como se menciona en la sección anterior, estas crean capas de material que se sobreponen unas a otras y estas, típicamente, se les llaman por sus acrónimos en inglés como SLS, FDM, SLA, DLP entre otros, siendo estos los que serán mencionados a profundidad pero igualmente existen otros métodos como derretimiento por láser selectivo (SLM), derretimiento por haz de electrones (EBM), escritura por deposición por micro dispensador (MDDW) entre otros [18]. Este método de deposición de material es englobado en el proceso de manufactura aditiva (AM por sus siglas en inglés).

Otros métodos de impresión se basan en la solidificación selectiva de materiales fotosensibles o materiales polimerizados. Este método incluyendo la estereolitografía fue, mencionado con anterioridad, el primer método creado. A partir de esto se han hechos muchos avances e iteraciones del mismo método con distintos materiales. Dependiendo del tipo de impresora, la solidificación se da a cabo por distintos procesos y materiales, esta no es la única forma de crear objetos en 3D, la solidificación no solo se da por selección sino que se dan por

enfriamiento.

A continuación, se presentan las diferencias entre estos tipos de impresoras y la forma que se usan para la impresión de materiales en 3D. Para cada una de estas impresoras se usan distintos métodos de deposición de material y cada uno es único y diferente del anterior, con algunas similitudes.

SLA

La estereolitografía fue la primera técnica creada para la impresión en 3D [15]. Creado Por Charles Hull, se tiene los primeros sistemas de impresión tridimensional en el mundo, encontrado en la patente [19]. Una variación este método es el que se usa en el proyecto. El motivo de la elección de este tipo de impresora se debe al detalle que este proporciona, además de la variedad de materiales basados en resina que pueden usarse para crear las impresiones y la calidad que estas proporcionan [20]. Esta variación de los tipos de resina permiten crear superficies de todo tipo así como acabados, detalles y diferencias de tacto, a esto se refiere a la rigidez que se pueden obtener en los objetos de impresión; la cantidad de resinas disponibles hace necesario un análisis mecánico de cada uno de los materiales, por fortuna existen muchos documentos, incluso de los mismos proveedores, que tiene toda la ficha técnica de los materiales, con tal información se sabe entonces que tipo de resina se quiere usar para la aplicación en cuestión. Con tantos tipos de resina se pueden tener muchas formas de imprimir prototipos de corazones, todo este proceso es de ayuda para la validación del prototipo necesario y el que profesionales médicos especializados necesitarán. Es necesario mencionar que mucho detalle depende de la orientación de posición del objeto, donde una orientación cerca a 45 grados logra mejorar de sobremanera el detalle [21] [22].

Además de que esta tecnología ha sido usada en varias industrias fuera de la ingeniería, donde se necesitan reproducir partes y piezas especializadas que conseguirlas de otras maneras seria más difícil. Esta tecnología de impresión es de rápida utilidad y aplicación de piezas de alta definición y fiabilidad. Con esto es más fácil crear prototipos. El proceso de curado por láser ha sido usado en el área mecánica en una variedad de aplicaciones de manufactura, utilidad en el área médica para prótesis, modelado y prototipado, en el arte, en la tecnología aeroespacial en el área de experimentos y simulaciones y hasta aplicaciones domésticas [23]. Este tipo de impresora se basa en la solidificación del material blando (en este caso resina) mediante la proyección de un láser concentrado hacia el material en un patrón determinado [16] . El láser parte de una fuente de luz ultravioleta (UV) la cual es dirigida a ciertos puntos clave que componen la capa actual del objeto en impresión [17].

Entonces, como se menciona con anterioridad, el proceso de estereolitografía se basa en el solidificación de resina, esta siendo fotosensible es la responsable de crear los objetos en 3D. Cuando la luz ultravioleta topa con la resina, se solidifica creando las capas. Estas se basan principalmente en epoxi o acrílico las cuales han de chocar con rayos UV con una longitud de onda específica para la polimerización del material terminado de solidificar [21] [26]. La ventaja de este tipo de solidificación, es la velocidad en la que se hace este proceso y provee calidad en la superficie de los objetos así como un detalla milimétrico por la cantidad de luz UV a la que se exponen las capas de material. Este detalle sobrepasa aquellas que se dan en otras impresoras, en las cuales, hay que tener otro proceso adicional para obtener

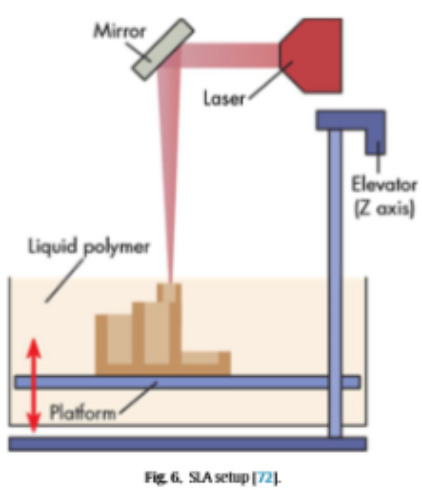


Figura 4: centerProceso SLA de arriba hacia abajo [24]

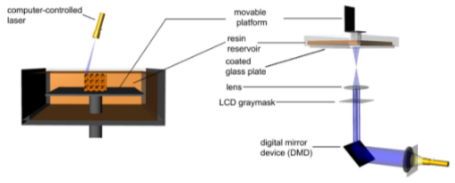


Figura 5: Proceso SLA de abajo hacia arriba [25]

los mismos resultados. El otro proceso que compite con este sistema es el SLS, el resto de impresoras pueden obtener este alto detalle en sus objetos, pero el proceso esto requiere más tiempo y material para mantener el detalle debido al soporte y el relleno que estos necesitan. Los sistemas SLA y SLS, mantienen alto detalle en las superficies de los objetos, en los pedazos pequeños de estos sin necesidad de mucho material extra. Este detalle se obtiene en gran manera según el proceso que se lleva para imprimir materiales, también depende de la profundidad a la cual se sumerge la placa al principio del proceso, teniendo la primera capa como la que establece la base (hasta 0.15 milímetros), pero esto depende de la capacidad del láser e inclusive de la calidad del material, pero este establece el detalle con el grueso de la capa [24] [21] [22].

Existen diversos procesos para implementar el mismo método de estereolitografía, de los cuales, el más común es el proceso de abajo hacia arriba en el cual se cura la resina desde el fondo de la piscina donde se encuentra; mientras que de arriba hacia abajo hace lo mismo pero con las capas superiores del objeto [25]. Cabe mencionar el post-proceso que cada objeto impreso debe tener. Este proceso no es más que la curación final del material, pero lo más importante, debido a la naturaleza tóxica de la resina, es necesario limpiar el objeto utilizando equipo de seguridad durante este proceso, igualmente importante usar este equipo durante el posicionamiento de la resina dentro del tanque. En dicho post-procesamiento, es útil evaluar las propiedades mecánicas del objeto debido a que existe el problema de expansión o compresión del material debido a la temperatura, que afectan directamente al objeto tanto física como visualmente, por lo que el post-procesamiento se hace esencial para mantener al objeto en buenas condiciones. Siguiendo esta linea, hay que tener en cuenta la calidad del material y el manejo que debe observarse, ya que la resina se debilita con el tiempo y pierde sus propiedades cuando esta ya lleva mucho tiempo en la intemperie [21] [22].

DLP

Proyección de luz digital o por sus siglas en inglés DLP, es un tipo de impresora que funciona de manera muy parecida al SLA. La diferencia con el sistema de SLA radica en que, este sistema no usa un láser dirigido hacia la resina, sino que un haz de luz atraviesa la máscara de una pantalla que con tiene un patrón predeterminado y que cura la resina al igual que lo haría una impresora SLA [21] [26]. Otra clara diferencia con la impresora SLA, es que el tiempo de impresión es menor debido a que se enciende toda la capa al mismo tiempo en lugar de un punto a la vez. Se podría argumentar que el detalle que provee la SLA puede ser mejor que la DPL, pero el detalle de esta depende de la resolución de la pantalla que se usa para la solidificación del material. La resolución y el detalle puede mejorar conforme la dirección de impresión, esto se da por la pobre polimerización del material, la pobre adhesión y solidificación requiere que se mantenga cierta dirección de impresión para lograr detalles e incluso para lograr terminar de imprimir. La resolución de esta pantalla puede ser de tal forma que el detalle que se obtiene puede ser mejor que la del láser, ya que depende exclusivamente del tamaño de los píxeles de dicha pantalla. También, los objetos impresos en 3D dependen de la dirección de construcción, sin embargo, de esta manera la pantalla tiene poder sobre la calidad de la impresión. Esto conlleva problemas con la el nivel de curación del material [21] [22].

El sistema DLP también tiene fuerte impacto en el sistema que se construyó en este proyecto, ya que el sistema de impresión que se tiene es de este tipo. Sabiendo que puede ser mejor que el sistema SLA y sabiendo que pueden obtenerse impresiones mas rápidas, se optó por utilizar este sistema.

SLS

Por sus siglas en inglés SLS, el sistema de impresión por sintetización selectiva por láser utiliza otro tipo de solidificación distinto a los anteriores. Usando un láser de la misma manera que un SLA y DLP, el sistema SLS, direcciona dicho láser de potencia, precisión y calor para poder solidificar una cama de polvo polimerizado como resina o metal, siendo el último de un punto de fusión apropiado para poder calentar las partículas sin derretir por completo el material [23] [21] [26].

Este tipo de proceso necesita de mucho polvo dentro de algún contenedor y la parte que se solidifica es la superficie dentro de un tanque donde se tiene el objeto de impresión. De forma general, el tanque de polvo sube a velocidad constante de forma que este cae al segundo tanque, donde el láser es dirigido para solidificar, dicho objeto también se sienta sobre una cama de polvo que baja a velocidad constante para que el objeto siempre quede dentro de dicho tanque. Al empezar la impresión, la capa inferior se pega al tanque y una fina capa se sobrepone para poder adherir el resto del material [17]. Ambos tanques se precalientan a punto de fusión, entonces el polvo se mueve de forma más fluida. Este proceso se repite de forma constante y los tanques dejan de moverse cuando se esta solidificando la última capa del objeto [21] [23] [22]. Este proceso se ejemplifica en la siguiente figura.

Al finalizar el proceso de impresión, se tiene una masa o pastel de polvo, dentro del cual, se encuentra el objeto y que también funciona como un tipo de soporte para cualquier



Figura 6: Masa o pastel de polvo

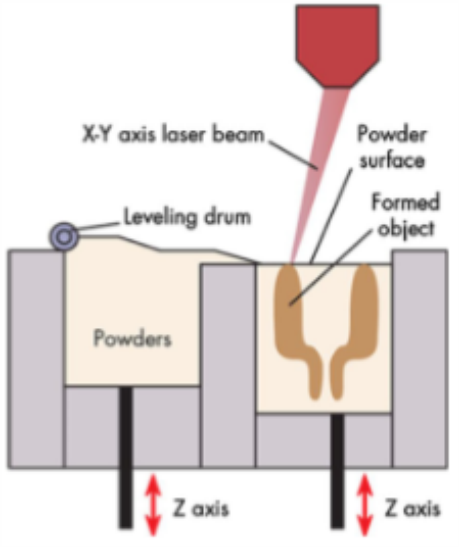


Figura 7: Proceso SLS [24]

pieza fina o pequeña que requiere soporte [17] [26]. Antes de poder utilizar el objeto hay que limpiar el objeto lo mejor posible debido a que el polvo es igual de dañino que la resina [21] [22].

El objeto que se obtiene al final del proceso tiene un acabado muy fino, el cual, puede ser muy difícil de tratar por métodos convencionales [17]. Las impresoras que utilizan este proceso tienden a ser muy caros y difíciles de usar. Pero una ventaja es que los objetos que se crean pueden ser muy finos y de alto detalle, así como de una superficie muy detallada y homogénea. Estas ventajas dependen de la calidad de polvo que se use, porque dependiendo del tamaño de la partícula de polvo, así como de la velocidad, poder del láser y espaciado por capas que se tiene, de manera que si se cumple con tales condiciones que se mencionan, se logra un mejor detalle en los resultados ya que los objetos tendrán al final una calidad superior a otros sistemas. A diferencia de otros sistemas, el SLS puede tener un grueso de capa de 0.01 milímetros y con una tolerancia igual al grueso de capa [24].

Los objetos que se crean tienen la ventaja que el soporte que necesita ya esta incluido en el pastel de polvo alrededor, porque en otros sistemas se deben solucionar mediante la impresión de soporte. Al no tener este problema, detalles de alta definición son fáciles de crear. Todas estas ventajas hacen increíble el uso de este sistema, pero como se menciona con anterioridad, este tipo de impresora resulta muy costosa en términos económicos así como energéticos, estos se deben a: al material que se usa, la energía y costo requerido para mantener un sistema de calentamiento tan especializado como lo necesita esta impresora [21]. En la siguiente figura se muestra una tabla comparativa creada por [24] en la cual se pueden ver las diferencias de los métodos SLA y SLS siendo estos los mejores para crear objetos de alto detalle. Cabe mencionar que los demás sistemas no se quedan atrás en cuanto a la calidad que estos pueden proveer. Y en la figura que le sigue se halla una comparación bastante resumida de tres tipos de impresión: FDM, SLA y SLS

SLA VS SLS					
	Tolerance	Minimum wall thickness	Layer thickness	Post processing	Material type
SLA	±0.002 to 0.005 in. (0.05 to 0.127 mm)	0.02 in. (5 mm)	0.002 to 0.006 in. (0.05 to 0.15 mm)	UV baking & removing support structures	Liquid polymer and resin
SLS	~ ±0.004 to 0.007 in. (0.1 to 0.18 mm)	0.040 in. (1 mm)	0.002 to 0.004 in. (0.05 to 0.10 mm)	Dusting & possible sanding	Powder polymer, resin, and metal

Figura 8: Tabla comparativa de procesos SLA y SLS [24]

	FFF	RESINA	POWDER
Precio Impresora	**500-10.000 €**	1.000-20.000 €	40.000-250.000 €
Precio Material	**15-100 €/kg**	40 – 600 €/kg	40 – 10.000 €/kg
Tipo Material	Termoplásticos (PLA, ABS, Nylon, Flexible, Laywood...)	Fotopolímeros (Duros, flexibles, calcinables, biocompatibles)	Aleaciones **(Metales)**, plásticos, ceras, yesos, cerámicas
Combinación de materiales	Sí	No	Sí (PolyJet) No (otros)
Colores	Sí/No	No	Sí
Necesidad de Soportes	Sí	Sí	**No**
Resolución (X/Y)	0,4 mm	**0,025 mm**	0,05 mm
Volumen de impresión *	20x20x20 cm Medio	15 x10 x 20 cm Pequeño	**60 x 60 x80 cm Grande**
Velocidad media	Lenta	**Rápida**	Media-Rápida
Sector	• Personal • Pyme • Industrial	• Personal • Pyme • Industrial	• Industrial

Figura 9: Tabla comparativa de impresoras FDM, SLA y SLS [26]

LOM

Manufactura por laminación de objetos es el sistema de impresión en 3D más usado en la industria para el prototipado rápido de objetos y piezas. El proceso funciona de manera muy fluida y constante ya que se trata del corte continuo de una lámina de material, hecha específicamente para efectuar una adhesión constante de cada capa, creando los objetos o modelos de la impresión. Esto se muestra en la siguiente figura. Los objetos creados no necesitan soporte para cada una de las capas así como de cada detalle que se tenga. Cada vez que una lámina de material cae sobre el resto del objeto se logra un soporte hecho por el mismo objeto. Pero este proceso es muy lento en comparación al resto de sistemas, esto se debe a que la remoción de material innecesario es un proceso delicado y tardado. Este proceso a pesar de ser rápido no es detallado y la resolución que este provee no es suficiente como para usar en trabajos especializados, así como el acabado superficial no alcanza mucha calidad por lo que se utiliza en casos que no se necesitan detalles, pero tiene la ventaja que la creación de los prototipos es muy rápida [21] [23] [22].

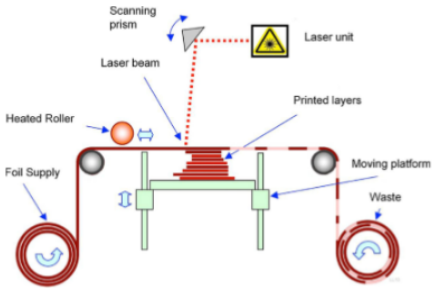


Figura 10: Proceso LOM [24]

FDM

El tipo de proceso que más avance ha tenido en los últimos años, ha sido el de deposición de fusión creado como un segundo método después del SLA en la década de los 80 y lo único que se requiere es calentar progresivamente y mantener un nivel de temperatura apropiado con el cual se derrite el material y posicionarlo según el objeto que se esta imprimiendo [18] [21]. Este tipo de proceso ha alcanzado gran popularidad entre las personas y compañías interesadas en el rápido prototipado de partes que este puede proveer [21]. De este método han nacido muchas variaciones, donde el material que se utiliza es distinto cada vez. La facilidad que este proceso tiene es tal, que la implementación de sistemas así han sido de gran apoyo a la sociedad.

El funcionamiento en general de este método es muy simple, utilizando material termoplástico en forma de filamento, pasa por un sistema llamado extrusor el cual es calentado a tal nivel que es capaz de derretirlo y guiarlo en la dirección que se desea. El objeto se crea cuando el material es sobrepuesto en capas delgadas o paredes del objeto, esto se hace sin tener en cuenta el relleno del objeto [27] [26]. Este método provee facilidad de impresión e incluso un proceso de impresión que facilita muchas estructuras difíciles, teniendo en cuenta que se puede imprimir hasta con 45 grados de inclinación [21] [26]. Durante el proceso de impresión, es necesario considerar concentraciones de estrés que pueda tener la pieza en algún punto, esto se debe a que dependiendo de la velocidad de impresión, los objetos pueden presentar vacíos y falta de material debido a que este no se adhirió o no tuvo tiempo de adherirse como se necesitaba. Al igual que se tiene que tomar en cuenta las temperaturas de trabajo, debido a que distintos materiales requieren distintas temperaturas y muchas de estas necesitan que se mantengan continuas para evitar que las impresiones fallen en determinado momento [21]. Este sistema se visualiza en la figura a continuación donde se nota un proceso general del mismo. Cabe mencionar que, en varios casos, se aplica un post procesamiento a los objetos impresos para mejorar atributos mecánicos. Como se menciona con anterioridad, muchas veces la adhesión de material no es buena y por ende se quedan espacios vacíos que muchas veces requieren un relleno extra luego de la impresión e inclusive hay casos que meter el objeto a un microondas es suficiente para derretir el material, lo suficiente para pegar el resto de capas que le hacen falta [21].

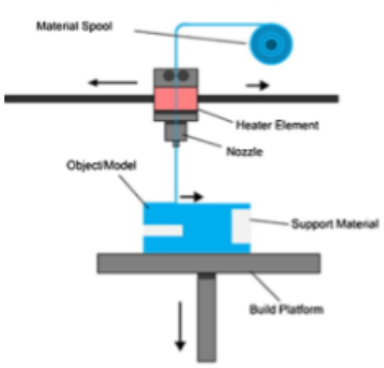


Figura 11: Proceso FDM [21]

Con este proceso, el control recae en el plano XY, a comparación del DLP en la que solo se maneja el eje Z y el láser cura el plano XY. Este control depende del material que se utilice, ya que cada uno necesita distintas temperaturas así como velocidades para crear objetos tridimensionales. Estos materiales, así como los extrusores que se utilizan pueden generar objetos detallados, rápidos o pobres. El control que se tiene con estas impresoras hace que en consecuencia el detalle del objeto sea responsabilidad del usuario y no del mecanismo, pero mientras más es el detalle que se desea más tiempo se necesita [21]. Por el momento, debido a la calidad de los materiales de uso y la facilidad del método, las últimas investigaciones de desarrollo se han enfocado en el material, debido a que los objetos creados están hechos exclusivamente para el prototipado rápido. Esto se debe a que muchas de las propiedades mecánicas de los objetos impresos dependen mucho del material así como de los parámetros de impresión [18]. Esto ha derivado en la utilización de la micro extrusión, con dicha técnica se ha tenido que desarrollar mejores materiales que puedan adaptarse a dicho sistema, esta tecnología se ha visto en los últimos avances demostrada por la calidad de impresión que los objetos presentan y muchos dan a entender que el grueso de capa es lo que provee tal detalle cuando se usa esta tecnología [21]. Esta micro extrusión que se encuentra disponible en muchos sistemas FDM actuales, son capaces de proveer detalles milimétricos, mayor detalle que sistemas como el DLP o SLA, que llegan a los micrómetros pero para propósitos de prototipado rápido es suficiente [18] [22].

EBM, SLM, 3DP y Polyjet

Esta sección se dedica exclusivamente a dar una breve explicación de los métodos no convencionales. Estos métodos no están tan disponibles en el mercado como el resto descritos con anterioridad. Los primeros tres métodos son recientes y que no se sabían de su existencia hasta el momento de realizar esta investigación. El último siendo un método que se usa mucho en la industria pero no es muy conocido y que cabe mencionar que se tiene disponible en la universidad del Valle.

Derretimiento por haz de electrones (EBM) al igual que Derretimiento por láser selectivo (SLM) son dos procesos muy nuevos y recientes pero que igual entran al tema de AM. Estos métodos permiten la obtención de objetos muy complejos y el uso materiales difíciles de tratar como aleaciones que se basan en el método de solidificación de polvo. Con el sistema

EBM se generan electrones en un cañón con el uso de lentes electromagnéticos y el material es depositado gracias a la fuerza de gravedad sin ayuda de sistemas adicionales. El método SLM usa un láser muy concentrado que puede dar una precisión de hasta 100 micrómetros y la manera de depositar material es mediante un ambiente gaseoso como el nitrógeno [28] [22].

Impresión en 3D (3DP) es otro tipo de método de impresión por solidificación de polvo desarrollado en la universidad MIT. Muy parecido al SLS, pero usa un material que tiene más fluidez en su movimiento y que se endurece y adhiere por capas en dos dimensiones hasta lograr un objeto. Se trata de un proceso iterativo en donde el acabado y detalle del objeto depende de las propiedades del material que se utilice. Pero aparte del material, la implementación de este método es bastante sencillo y barato [21]. La tecnología polyjet funciona con materiales muy especializados, en donde no se usa material convencional. El proceso de este sistema se trata de varios extrusores que lanzan gotas de un material liquido foto polimerizado y que luego es curado o endurecido por luz UV, creando capas ultra delgadas de material. Objetos de alta definición, pero que igualmente necesitan material de soporte para estructuras más complejas. A diferencia del sistema FDM, estos objetos no necesitan un post-procesamiento [21] [22].

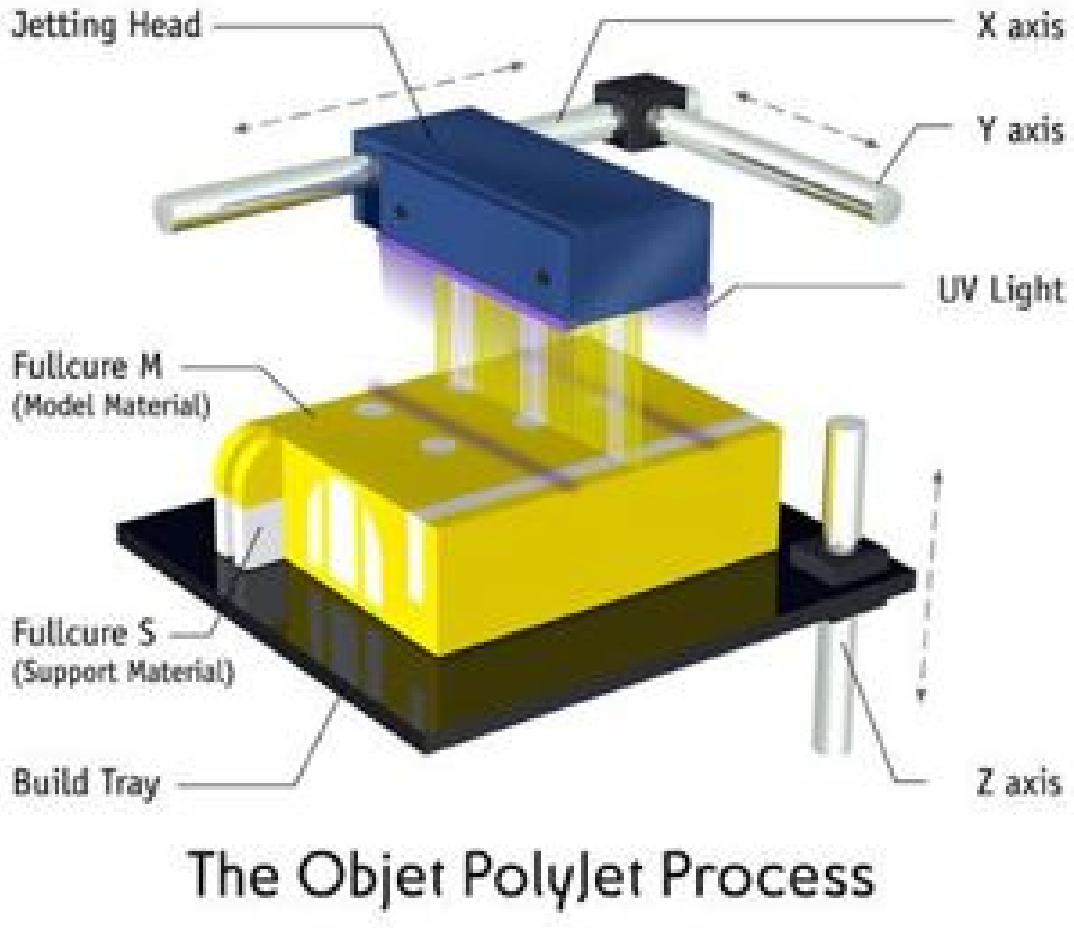


Figura 12: Proceso Polyjet [21]

En la siguiente tabla se presenta un resumen detallado de los distintos sistemas de impresión y sus usos en la industria así como las ventajas que tienen cada uno cuando se quiere aplicar en algún proyecto.

Methods	Materials	Applications	Benefits	Drawbacks	Resolution range (μm)
Fused deposition modelling	Continues filaments of thermoplastic polymers Continuous fibre-reinforced polymers	Rapid prototyping Toys advanced composite parts	Low cost High speed Simplicity	Weak mechanical properties Limited materials (only thermoplastics) Layer-by-layer finish	50-200 μm [13]
Powder bed fusion (SLS, SLM, 3DP)	Compacted fine powders Metals, alloys and limited polymers (SLS or SLM) ceramic and polymers (3DP)	Biomedical Electronics Aerospace Lightweight structures (lattices) Heat exchangers	Fine resolution High quality	Slow printing Expensive High porosity in the binder method (3DP)	80-250 μm [13]
Inkjet printing and contour crafting	A concentrated dispersion of particles in a liquid (ink or paste) Ceramic, concrete and soil	Biomedical Large structures Buildings	Ability to print large structures Quick printing	Maintaining workability Coarse resolution Lack of adhesion between layers Layer-by-layer finish	Inkjet: 5–200 μm Contour crafting: 25–40 mm [32]
Stereolithography	A resin with photo-active monomers Hybrid polymer-ceramics	Biomedical Prototyping	Fine resolution High quality	Very limited materials Slow printing Expensive	10 μm [13]
Direct energy deposition	Metals and alloys in the form of powder or wire Ceramics and polymers	Aerospace Retrofitting Repair Cladding Biomedical	Reduced manufacturing time and cost Excellent mechanical properties Controlled microstructure Accurate composition control Excellent for repair and retrofitting	Low accuracy Low surface quality Need for a dense support structure Limitation in printing complex shapes with fine details	250 μm [23]
Laminated object manufacturing	Polymer composites Ceramics Paper Metal-filled tapes Metal rolls	Paper manufacturing Foundry industries Electronics Smart structures	Reduced tooling and manufacturing time A vast range of materials Low cost Excellent for manufacturing of larger structures	Inferior surface quality and dimensional accuracy Limitation in manufacturing of complex shapes	Depends on the thickness of the laminates

Figura 13: Resumen de usos [29]

6.2. Sistema de impresión a analizar

En esta sección del marco teórico se quiere dar a conocer, de manera muy general, los componentes físicos y electrónicos que forman parte de la impresora a analizar. También, se le dará importancia a los programas de computadora necesarios para la edición efectiva de objetos tridimensionales antes de su impresión. En este caso siendo las impresoras SLA y DLP muy parecidas, se describen las partes importantes de cada uno y lo que comparten o tienen en común. Dado a un trabajo previamente hecho para la construcción de dichas impresoras, se describen dichos componentes sin necesidad de mucha referencia externa, además de que gran parte del funcionamiento se describe en el capítulo 7 acerca del funcionamiento de estas. Dichos componentes que se mencionan en las siguientes secciones, son esenciales para el funcionamiento óptimo del sistema de impresión.

6.2.1. Hardware

En inglés se usa la palabra Hardware para definir toda implementación física o armamento, que es necesaria para crear soporte y encajar toda implementación electrónica necesaria, para poder cumplir con los objetivos para el cual se crea. Entonces, tanto la implementación física como su armamento son de vital importancia para el funcionamiento correcto de dispositivos y, en este caso, de impresoras en 3D. A continuación, se mencionan algunas partes



Figura 14: Caja o armamento de la impresora DLP Anycubic Photon [30]

físicas importantes para el funcionamiento de las impresoras 3D.

Caja

Para este proyecto se definirá como caja a la parte principal y más grande de la impresora, dicha caja es la que contiene todos los componentes electrónicos y crea soporte a varios de los mismos. También, es de gran ayuda para crear estabilidad a los componentes móviles ya que estos están ajustados a la misma. Dado que el sistema de impresión necesita asegurarse por el tipo de material que se usa, esta caja esta hecha con el fin de evitar derrames y crear protección al ambiente externo así como a sus propios componentes.

Acrílico o vidrio polarizado

En la imagen anterior se observa la caja con ventanas naranja, las cuales rodean la carcasa. Debido a la naturaleza del material a trabajar en una impresora DLP, este debe ser protegido contra otros tipos de exposición a radiación o luz. Debido a que estos solo se trabajan usando luz ultravioleta, estos deben de protegerse de otros tipos que se encuentran naturalmente en el ambiente. Las resinas con la que se trabajan son fotosensibles por lo que dicha protección es esencial para el funcionamiento óptimo de este tipo de impresoras. Cuando se trata de impresoras FDM, no es necesario contar con tal protección ya que el proceso funciona cuando se derrite el material.

VAT

El sistema VAT es un componente físico en la cual es resguardada la resina. Este sistema de almacenaje temporal cuenta con materiales que se prestan para ser tocados por la resina, pero el fondo de dicho contenedor esta hecha de un material especial que permite la polimerización del material. Este material hecho de propileno, permite el paso de la luz ultravioleta a través del VAT y que toque la resina y permite el proceso químico de foto polimerización [31]. Este material al fondo del VAT se le conoce como un filme FEP o etileno propileno fluorado por sus siglas en inglés. Este filme FEP permite la separación

de materiales y reacciones de componentes físicos, que necesitan mantener cierta calidad y mantenimiento con tal de continuar con impresiones de calidad [32]. Incluso la distancia que se mantiene entre el FEP, la pantalla y el material a imprimir puede ser fundamental para impresiones precisas y fiables. Este es un tipo de material que puede refractar la luz por lo que los rayos UV puedan no tocar el material y evitar que se cumpla el trabajo de impresión en 3D [32]. En el trabajo por [33] se da a entender la importancia de tal material, que incluso, se debió implementar otro tipo de tecnologías para poder mejorar el proceso de impresión. En el caso de este proyecto, este material es genérico pero igualmente importante para tener un proceso exitoso de impresión.



Figura 15: VAT de la impresora DLP Anycubic Photon [30]

Placa

La placa es un componente que al igual que las otras, es vital para la impresión de objetos 3D. En dicha placa se da a lugar la adhesión de material, desde la base hasta la última capa que se necesita para completar objetos. Esta placa tiene un proceso descrito en el capítulo 7 pero con dicho proceso es necesario considerar calidad de los materiales, debido a que si se usan calidades inferiores, la remoción de materiales puede deformar los objetos, efecto que incluso se puede dar desde el principio de la impresión. Esta placa es de tal importancia, que esta ha de ser nivelada y calibrada antes de empezar a imprimir cada objeto, esto es necesario ya que a mitad de una impresión puede causar topes o inclinaciones que afectan el proceso.

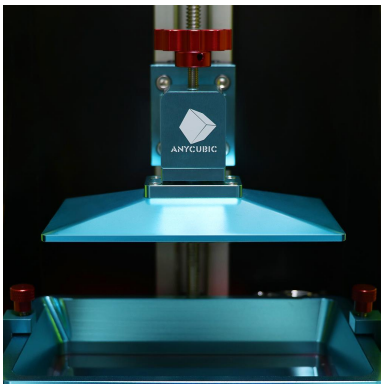


Figura 16: Placa de la impresora DLP Anycubic Photon [30]

Reflector

Debajo de la pantalla LCD y más abajo aun del VAT se encuentra el reflector de rayos UV. Este reflector permite un haz de luz constante y lineal de los LEDs UV contra la pantalla. Para mantener tanto el calor como la mayor cantidad de luz que los LEDs proveen dirigidos hacia el material, se crean los reflectores que limitan el espacio por donde se dirigirá toda la luz UV [34].



Figura 17: Diagrama de posicionamiento del reflector en una impresora Anycubic Photon [30]

6.2.2. Software

Existen muchos programas de computadora que se requieren cuando se quiere imprimir en 3D. Muchas veces cuando se diseñan objetos estos requieren edición con tal de mejorar y aumentar la calidad del objeto antes de mandar a imprimir, con tal de que dicha impresión sea la mejor. Esto ayuda a que la impresión mantenga la calidad y detalle que la caracteriza. Aparte de estos programas, también existen muchos y diversos que se usan específicamente como un tipo de pre proceso de impresión. Con esto ser refiere a todas las formas en las que se puede posicionar, adaptar e incluso editar funciones de la impresora, las cuales han de tener configuraciones específicas para cada objeto. Estos programas se le denominan slicers, con estos se da el detalle que la impresora puede llegar a proveer mediante el aumento de capas que el objeto puede admitir. Muchos slicers son creados para impresoras específicas, queriendo decir que un slicer creado para una impresora FDM no puede ser usado para una DLP.

El programa slicer que se usó es el que la impresora Anycubic Photon incluye en su compra. Debido a que este fue creado específicamente para ser usado con la impresora, por lo que no se usó otro para poder dividir el objeto y posicionarlo. Lo que si se valida con este programa es comparar si el posicionamiento y orientación tiene algún efecto sobre la calidad de la impresión.

6.2.3. MeshMixer como programa de edición

MeshMixer es un programa gratuito que permite la creación, edición y corrección de objetos 3D. Con este, se pueden crear modelos basados en geometrías existentes por lo que tendrán un alto nivel de calidad. Este programa se usa específicamente para la corrección

de diseños preexistentes antes de que estos sean impresos. [35] [36]

6.2.4. Implementación electrónica

Esta sección trata sobre la descripción de componentes electrónicos, que son implementados en una gran parte de impresoras DLP. Siendo el sistema que se obtuvo con el proceso DLP, se le dará especial énfasis a sus componentes. Los componentes descritos a continuación son los más comunes que incluso son usado en impresoras caseras y a las cuales pueden encontrarse guías en internet.

Controlador

Los sistemas caseros e incluso algunos comerciales, los controladores más comunes pueden ser solo dos: el sistema Arduino y el Raspberry Pi. Para ambos casos, los controladores requieren más componentes que son necesarios para controlar tanto la pantalla como los motores e incluso hasta el ventilador. En el caso del Arduino se utilizan circuitos compatibles denominados shield, los cuales son programables con dichos controladores. Tales circuitos incluyen componentes electrónicos necesarios para mantener un funcionamiento óptimo de los motores y pantalla. Para este caso los Rampps es el circuito adaptable para Arduino y para Raspberry Pi siendo el nanoDLP el cual tiene el mismo funcionamiento que el anterior. Los controladores son de vital importancia, ya que sin ellos no se pueden operan todos los componentes que necesitan la guía que dichos controladores proveen [37].

Para el caso de la impresora, el controlador esta a cargo de guiar dos pantallas, un motor, el ventilador y LEDs UV. También cabe mencionar que el controlador usado por dicho sistema, es creado específicamente por la empresa que creo la impresora. Este controlador fue desarrollado específicamente para optimizar el funcionamiento de la impresora y también son de gran ayuda para evitar interrupciones en el proceso de impresión, por lo que controladores habituales no son tomados en consideración [37].

El controlador por lo general tiene en consideración el voltaje que se le aplica, con este sistema solo se tiene una programación, pero el voltaje ha de ser considerado en otro tipo de componentes electrónicos, los cuales van incluidos en la impresora y que funciona en conjunto al controlador [37].

Motores

Muchos motores pueden usarse para cumplir el objetivo de mover la placa de abajo hacia arriba. En muchos sistemas de impresión DLP se utilizan hasta dos motores los cuales sirven para moverla placa en dos ejes distintos, dando más detalle a las impresiones. Los motores Stepper son usados por la precisión que estos proveen. Con tal motor se hace un tornillo sinfín, el cual también puede atribuir bastante con la precisión y calidad de impresiones. Los motores Nema 17 han sido de mucha utilidad para poder cumplir con este objetivo, pero esto puede variar según la impresora y según la empresa que los construya. El objetivo principal de los motores es, como se menciona con anterioridad, el mover la placa en un eje

vertical y horizontal si son dos motores los que componen al sistema. A dichos motores se les modifican la velocidad a la cual funcionan, con tal cambio se controla el detalle que tendrán los objetos que de impresión [37].

Pantalla LCD

En las impresoras que aplican el proceso DLP se utiliza una pantalla LCD. Pero esta pantalla esta adaptada de tal forma que solo las máscara polarizada de la pantalla es usada, pero que igualmente puede controlarse, lo que se elimina de tal pantalla es la luz que se tiene de fondo y que provee el color e imagen en las pantallas. La pantalla LCD, es controlada de tal manera que se deja pasar la luz UV a través de los píxeles en áreas descubiertas controladas previamente en un slicer. Con una secuencia predefinida, la pantalla funciona para solidificar el material de impresión. La calidad y detalle de los objetos de impresión depende mucho de la calidad de la pantalla y la resolución que esta tiene; para el sistema que se obtuvo, la pantalla es 2K, lo cual da a entender que hay muchos píxeles en el espacio reducido que tiene la pantalla LCD. Esta pantalla se encuentra justo debajo del VAT y sostenida por una placa y por el reflector de luz UV. Dicha pantalla es parte fundamental del proceso de impresión por lo cual, es necesario mantener en condiciones óptimas el estado su físico [38].

LEDs UV

Los LEDs UV, junto con la pantalla son el corazón de este tipo de proceso, el cual requiere una fuente de rayos UV que pueda ser controlada y que sea constante sobre la pantalla. La longitud de onda de los rayos UV son importantes para poder crear la reacción química que la resina necesita para que la solidificación se de a lugar. La fuente de emisión de los LEDs UV es de 40 Watts, la cual puede variar según el material que se va a trabajar, este seria el caso pero las resinas hechas por empresas que apoyan las impresiones 3D se encargan de estandarizar la reacción de la resina y, por tanto, se tiene definido la potencia a la cual tienen que trabajar los LEDs, así como la longitud de onda requerida para poder tener una reacción exitosa. La longitud de onda predefinida para muchas impresoras caseras e inclusive la impresora que se obtuvo, trabaja con una longitud de onda de 405 nanómetros, por lo cual la resina que se usa puede ser de cualquier tipo con tal de que reaccione a esta longitud de onda [34].

Las LEDs UV no son controladas en tiempo pero si hay que estar monitorizando el calor que estos emiten, debido a la potencia a la cual trabajan el calor emitido tiene que ser controlado por disipadores de calor. Este calor aumenta y es constante debido a que estos LEDs están siempre encendidos mientras se hace el proceso de impresión, el controlador se enfoca más en la pantalla para dar el tiempo de exposición de rayos UV sobre el material. Los disipadores son placas de aluminio que están puestas en serie una a la par de otra y todas estas puestas encima de otra placa más grande de aluminio. Esta placa grande es la que está tocando directamente el componente electrónico que emite calor; para poder usar bien estos disipadores, también se utilizan tanto pasta térmica como cinta térmica, las cuales facilitan la transferencia de calor a través de los disipadores. Los disipadores empujan el calor hacia afuera del lugar de origen, evitando que se acumule y causar daños sobre otros componentes

electrónicos [34].

Ventiladores

Los ventiladores son parte pequeña pero importante del funcionamiento de la impresora 3D. Debido a que los LEDs UV generan mucho calor y el disipador realmente solo empuja el calor lejos, se necesita sacar el calor y esto se logra mediante el ventilador. Muchos sistemas se conectan directamente para lograr empujar el aire fuera del área de trabajo [37]. En el caso de la impresora Anycubic Photon, el ventilador empuja el aire hacia arriba, por encima de la placa así como arriba de la parte del VAT. Este aire se concentra entonces en la parte superior de la caja donde el calor no tiene efecto sobre el proceso, y que al final de la impresión tiene facilidad de escape.

Pantalla táctil

La pantalla táctil es una opción que muchas impresoras toman en consideración para el control de impresión. La pantalla realmente funciona para visualizar lo que se esta haciendo y ser más amigable con el usuario, esto provee una facilidad para el control y nivelación del sistema. En el caso de la impresora que se obtuvo, la pantalla es de gran ayuda para la visualización previa de objetos a imprimir. Además de esto, ayuda también a comprobar el estado físico de los componentes y ayuda a nivelar y calibrar la impresora antes de empezar su funcionamiento.

6.2.5. Otros componentes electrónicos

Durante el proceso de contracción de la impresora de resina, se hallaron varias soluciones a los problemas que se estuvieron presentando. Muchos de estos problemas se derivaron de la necesidad de tener bien los componentes electrónicos, con tal de que todos funcionen como deben.

Stepper driver

Con anterioridad, se menciono el uso de motores en la impresora de resina, pero para que esta funcione bien y que se pueda controlar de manera certera, se tienen que implementar drivers que ayudan en el funcionamiento de los motores. Hay muchos drivers disponibles para poder tener el control que se necesita. El más común de estos es el A4988, estos pueden aguantar hasta 2 amperios de corriente, pero con un calentamiento bastante definido[39].

Arduino Mega

El controlador que muchos utilizan en la creación de impresoras caseras se trata del arduino mega 2560. Este es un dispositivo que es capaz de proveer control a varios motores al mismo tiempo y que se debe utilizar con un shield como el RAMPPS [39].

6.3. Materiales para impresión tridimensional

En cuanto a la descripción del material como objetivo especifico del proyecto se trata, sobretodo, de una investigación en la cual se miran tanto los materiales usados en impresoras de resina como usados en las de filamento. Con tal de saber qué clase de material se está trabajando, esta investigación se basa, sobre todo, en lo que se hace con dichos materiales al momento de ser usados. Luego de tener tales datos de cada material se procede a verificar la información con lo que se tiene en los objetos impresos, con estos se pueden notar los detalles que el material puede proveer. Como por ejemplo, cabe mencionar los detalles que las impresoras FDM causan, teniendo objetos con lineas o con las capas visibles las cuales tienen que existir para crear un objeto.

En cuanto a los materiales que se usan en impresoras con el proceso FDM, se tienen distintos materiales termoplásticos, pero para efectos de este proyecto y debido a limitantes que se tienen en el laboratorio se hacen descripciones de los materiales que se pueden usar y que se tienen disponibles. Dicho esto, el material más abundante en los laboratorios es el PLA, con el cual se hacen varias impresiones con tal de encontrar las configuraciones que mejor se adecuan para este tipo de impresora. Con estas configuraciones hechas, se pueden usar para la impresión de objetos en otros materiales como el TPU o ABS. Teniendo las mejores configuraciones y mejores impresiones con cada tipo de material, se usan estos objetos, que este caso, son tres corazones hechos de materiales distintos. Como cada material tienen sus propias propiedades que, en algunos casos, les dan ventaja sobre otros materiales, es importante analizar lo que se logra con este tipo de proceso para luego ser comparado con el proceso DLP que también usa distintos materiales que se tienen que comparar y definir.

Cuando se toman en cuenta los materiales para la impresora con el proceso DLP, se tiene que tomar en consideración que es el mismo material el que usa para todas las impresiones. Lo que cambia son las distintas propiedades que se pueden llegar a tener con cada uno de estos. Se imprime con resina tanto rígida como flexible, con estas se pueden conseguir distintos acabados y detalles que varían en cada impresión. La resina flexible y la rígida requieren un conocimiento previo de sus propiedades y formas de impresión en la cuales se analizan tiempos, resistencias y formas de impresión. Siendo materiales muy parecidos unos a otros, la forma de diferenciar las propiedades y la forma de impresión es mediante una comparación de impresiones, se requiere la impresión de muchos prototipos de corazones, impresos con distintas orientaciones que permiten detalles distintos como acabados que no se presentan tan fácilmente como cuando los objetos son impresos horizontalmente, como se menciona en el capítulo 4 del marco teórico, donde se describe el proceso de impresión que se obtuvo para la realización del proyecto.



Figura 18: Objetos creados con resina flexible [40]

Para complementar un poco más la descripción de los materiales, se hace una sencilla investigación en la cual se describen materiales menos usados y que probablemente no se usaran en este proyecto, con esto se refiere al polvo polimerizado que se usa en impresoras SLS. Estas impresoras no están a disposición de la universidad ni del investigador, pero sabiendo la importancia que tiene este en la industria es necesario dar una descripción que ayude a visualizar la importancia del mismo. A la vez, sabiendo que al impresora polyjet no tiene gran presencia en la duración del proyecto, se hace un breve descripción del material que usa, este material siendo una resina especializada para el tipo de impresora que se tiene a disposición. Sabiendo que el sistema tiene un uso industrial, no se tiene mucha información acerca de los materiales que usa ni como está compuesta, por lo que para poder describirla se busca lo más que se pueda. Y para finalizar, para ir un poco más de lo que se pide en este proyecto, se describen los biomateriales, que en los últimos años ha tenido un aumento en su uso pero que no son usados con tanta frecuencia. Esta última descripción se hace para poder dar a lugar una siguiente parte para este trabajo de graduación, que ya sería la impresión de los corazones con biomateriales, lo cual ayudaría de sobremanera a la comunidad médica de la forma que este proyecto quiere lograr, mediante la impresión de prototipos tridimensionales.

6.4. Descripción general

En la impresión tridimensional muchos materiales pueden ser usados para imprimir objetos de cualquier tipo. Como se menciona en capítulos anteriores, se tienen muchos procesos por los cuales se puede imprimir en 3D. Los materiales usados para imprimir dependen del tipo de proceso que se quiere usar. En la industria, el uso de metales y aleaciones es de los principales materiales usados para hacer objetos. El tipo de proceso más usado, es el de corte de material, con este las industrias usan maquinaria pesada para remover material de un objeto, de forma que se esculpe para obtener objetos deseados. Se usan tornos, fresas y otra maquinaria que quitan material de cilindros y cubos, esto combinado con tratamientos térmicos se han hecho grandes y pequeños objetos que tienen mucha utilidad en las industrias [29].

Estos materiales solo pueden usarse en temas industriales y no cuando se están haciendo prototipos, debido al elevado costo que tienen estos metales industriales en comparación con materiales hechos de plástico y derivados, que fueron creadas exclusivamente para su uso en el prototipado rápido e impresión 3D. Cuando se quieren usar metales para prototipado rápido, se usan derivados de aluminio que son fáciles de maquinar y son mucho mas baratos en comparación de otros metales, pero que de igual manera no pueden usarse como forma de deposición de material para crear patrones y objetos, sino que siempre se tiene usar quitando material. En el caso del uso de materiales compatibles biológicamente, los que se usan para tratar a un humano es mediante el uso de derivados del titanio. Este material es más caro en comparación al aluminio, pero permite el uso de aparatos dentro de seres humanos a diferencia de los plásticos que no son biocompatibles. Indagando más allá de lo que se tiene en disposición, se considera una investigación acerca del desarrollo de biomateriales llamados biotintas, que ayudan a imprimir objetos que pueden ser usados para tratar humanos. El uso de plástico y resina como se hace en este proyecto no pueden ser usados para reemplazar partes humanas en forma de órganos, sino que están hechas exclusivamente para un uso visual y fuera del contacto con partes internas humanas [29].

El reto en el desarrollo de materiales es poder crearlos de forma que puedan ser usados y adaptados para cualquier clase de problema a solucionar. En muchas iteraciones se mencionan en [31] al menos 4 materiales que puedan ser de gran utilidad en solucionar problemas específicos incluyendo materiales cerámicos, digitales y biocompatibles que pueden solucionar grandes problemas que se presentan en sus respectivas áreas. Para el caso de este proyecto, solo los materiales biocompatibles serán investigados con mas detalle debido a la importancia que estos tienen en el futuro de impresiones de órganos, en algún momento, implementables en seres humanos.

6.5. Materiales de impresión

Las impresoras 3D sea cual sea el proceso que se use, requieren el uso de material que se adecue al tipo de proceso con el que se esta trabajando. Materiales que se usan en proceso FDM no puede ser usado en SLA y viceversa. Estos materiales están hechos específicamente para cumplir con los requisitos que cada proceso tiene. A pesar de estas diferencias, muchos de estos materiales tienen bastante en común, con esto se refiere a que muchos de estos están hechos a partir de polímeros, pero cada uno de estos pasó por algún tipo de tratamiento que lo hace útil para el proceso al cual se aplica. Muchas veces, dichos materiales requieren una investigación previa a su uso para saber que conseguir y que comprar para el tipo de impresora que se tiene [21].

En el caso de este proyecto solo se debió buscar el material necesario para la impresora de resina DLP, pero para las otras impresoras utilizadas no se compro ningún material porque los laboratorios ya tienen estos a disposición. De igual manera, se investigaron algunas características de los materiales que se usaron ya que se tiene que saber que limitantes existen para las impresiones que se quieren conseguir, pero para no extenderse mucho, en la investigación de materiales que no son pertinentes en este proyecto se limitó la búsqueda a los dos procesos que se usaron y luego se investigó acerca de materiales que están en desarrollo pero de otro proceso, los cuales son interesantes y son un punto de investigación para la continuación de este proyecto en fases futuras.



Figura 19: Objeto hecho con resina rígida marca Anycubic

6.6. Resina

La resina es un material fotosensible, con el cual rayos de luz UV son capaces de curar el material y solidificarlo de tal manera que se crean objetos. La resina es un tipo de polímero que es usado muy comúnmente en el proceso DLP para impresión tridimensional. Este tipo de proceso, junto con el material son el 50 por ciento de métodos usados en la industria por su facilidad de uso y rapidez de trabajo [29]. El problema que tiene este material radica en sus propiedades termo-mecánicas al momento de imprimir un objeto, la distancia e intensidad de luz tienen un efecto directo sobre las propiedades del material y por ende del éxito de la impresión. Una ventaja clara de la resina, son sus propiedades de viscosidad y muchas otras que permiten una mejora según lo que se agrega a dicho material, de tal modo que se pueden obtener todo tipo de resinas para cualquier tipo de trabajo que se quiera realizar; desde resina cerámica hasta resina ultra dura. Empresas dedicadas a la venta de este material tiene esta variedad de tipos de resina que son cotizadas enormemente en el mercado [29]. En el trabajo hecho por [31] se detallan varias operaciones para el manejo de resina, esto varía desde el número de capas que se deben de tener para poder completar el objeto, así como el grueso de capa mínimo para la impresión efectiva hecha en resina, hasta la cantidad de energía a la cual tiene que exponerse el material para poder solidificarse. Se debe de tomar en cuenta que la resina es más propensa a caer bajo su propio peso al momento de la impresión de cualquier objeto, por lo que esta debe de estar bien preparada para que esta se pegue a los componentes necesarios para crear un objeto [41].

La resina así como el PLA, tiene maneras de uso que pueden ser beneficiosos para la impresión, en la que se pueden ver detalles o propiedades mecánicas únicas a lo que tenemos originalmente. En la investigación hecha por [21] se menciona la orientación de impresión en comparación del numero de capas, en la cual, la última de estas es la que tiene impacto directo y es más sustancioso en comparación a la orientación del objeto. Esto quiere decir que entre más capas se tienen mejores propiedades mecánicas del material y aún más efectivo el grueso de capa aplicado al objeto, con ello se logran propiedades mecánicas mejoradas en comparación a solo utilizar una orientación distinta de impresión.

Los esfuerzos de tensión mejoraron de sobremanera cuando el grueso de capa aumentó también, pero en este mismo artículo [21] se detallan otras especificaciones que deben tomarse en consideración como la temperatura, selección de material e intensidad para poder tener impresiones con propiedades mecánicas mejoradas. Esta intensidad hay que tomarla en cuenta en el momento de elegir un material apropiado para la impresión de objetos, la resina es una material como se describe con anterioridad, fotosensible, el cual trabaja a cierta intensidad de luz. Normalmente, empresas dedicadas a este tipo de proceso hacen resinas que se curan y solidifican con luz UV, esta es la que los tipos de impresoras DLP usan en distintos tipos de origen de luz, en el caso del SLA se usa un láser dirigido hecho con luz ultravioleta, pero en el caso de las impresoras de DLP se usa una luz de origen como una foco que luego es redirigida a los patrones que uno como diseñador quiere que tome para formar objetos específicos. La resina por otro lado, puede ser hecha de materiales que siendo también fotosensibles, pueden curarse y solidificarse con luz que se genera naturalmente sin la necesidad de que se concentre en el objeto. Este tipo de resina no fue usada para la creación de objetos en cuanto se trata este proyecto, la creación de objetos se dedicó exclusivamente en la resina fotosensible que se cura con luz UV a una frecuencia específica de onda de luz de 405 nm..

6.6.1. Resina rígida

La resina es una polímero líquido el cual es sensible a los rayos UV. Esta resina se solidifica en las partes convenientes para poder crear las capas que componen los objetos. Esto funciona gracias a una pantalla o proceso selectivo de transmisión de luz UV por medio de alguna mascara. Dicha máscara puede obtenerse de algún tipo de pantalla LCD que puede controlarse para dejar algunos píxeles libres para que la luz pueda pasar. En el proceso de impresión SLA, se usa un láser dirigido directamente sobre el material, esto permite una mejoría en el detalle de los objetos pero que el proceso DLP puede disminuir el tiempo de impresión.

6.6.2. Resina flexible

La resina flexible es un polímero elastómero creado para aplicaciones que requieren gran elongación y que no afecte la forma original del objeto cuando este se doble, estire, comprima y se someta a esfuerzos de fatiga. La elección por la cual es transparente el material, es que facilita el estudio de los objetos resultantes. Es especialmente utilizada para crear partes para prototipos, modelos médicos y dispositivos, pero no es recomendable su uso para objetos que requieren detalle de superficie o que se necesiten exactitud en cuanto a dimensiones [42]. Este tipo de material presenta similitudes con el caucho que hacen que los objetos que se impriman con este material sean doblados y estirados hasta cierto punto. El punto de la creación de objetos con este material es poder ofrecer productos que se sientan como si fueran hechos de silicona. Este material es principalmente usado en la creación de objetos sin la necesidad de un molde, o en otras palabras, eliminar la necesidad de un molde para poder obtener objetos de esta magnitud [43]. Según el blog de formlabs [43] practicantes y profesionales médicos prefieren el uso de este tipo de material para poder estudiar partes humanas o estudiar estructuras complejas para la preparación que conlleva una cirugía u operación.

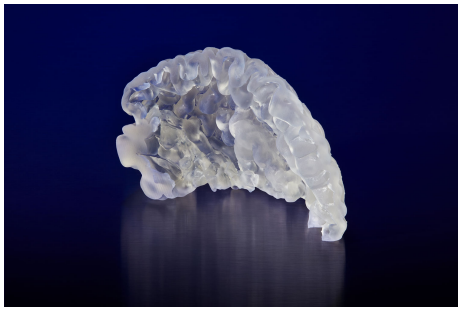


Figura 20: Compresión de objetos hechos con resina flexible [43]

En la figura anterior se muestra el modelo de una dentadura hecha en resina flexible de la marca formlabs, estos modelos han tenido gran auge en el campo de la medicina debido a que no solo las dentaduras son modeladas para una práctica previa a cualquier intervención médica. En el ámbito de las operaciones cardiovasculares, modelos de corazones han sido de gran ayuda para la preparación de cualquier profesional médico. A pesar de no tener un detalle superficial aceptable en el modelo de cualquier corazón, el poder tener visualizadas

las estructuras interiores ya apoya de gran manera para poder identificar problemas, que por otros medios es muy difícil de identificar.

Propiedades mecánicas del material pueden hacerse tanto antes de una impresión como después. Para poder tener mediciones concretas del material, se requieren hacer pruebas con objetos que tienen geometrías únicas que miden de forma correcta estas mencionadas propiedades mecánicas. Las propiedades mecánicas de la resina flexible usada en la realización de este proyecto son las que se muestran en la figura a continuación.



DATA	
Viscosity (At 25ºC Brookfield spindle 3)	200 cPs
Hardness (After post exposure)	85 Shore A
Tensile strength ASTM D638 (After post exposure)	4.9 MPa
Tensile strength ASTM D638 (Before post exposure)	1.5 MPa
Tensile modulus ASTM D638 (After post exposure)	-
Elongation at break ASTM D638	60%
Storage	10<t>50ºC
Density	1.18 g/cm^3

Figura 21: Propiedades mecánicas de la resina flexible de Photocentric 3D

6.7. Plásticos

Sabiendo que la resina es un derivado del plástico, en esta sección de la investigación se discute acerca de los termoplásticos usados en la impresión tridimensional con el proceso FDM. Estos materiales que se presentan a continuación son los que se usan normalmente para imprimir objetos pero no son todos. Existe una gran variedad de materiales con los que impresoras FDM se apoyan para su funcionamiento, pero en este proyecto solo con estos se trabajaron para la creación de prototipos de corazones, estos no son materiales ideales para la creación de prototipos pero son lo que están a disposición del investigador.

6.7.1. PLA

El poliácido láctico o PLA es un plástico comprimido que puede ser basado de muchos materiales, con tal de que estos sean de baja temperatura de fusión, ya que el equipo que maneja estos materiales no llegan a temperaturas muy altas a menos que se diseñen así. Es por ello que estos materiales se denominan termoplásticos. Dichos termoplásticos pueden también tener altas temperaturas de fusión para usos más específicos, estos pueden ser ABS o PA entre otros [44]. El PLA con una simple inspección se nota que es bastante duro y rígido pero es muy frágil y tiene muy poca resistencia al impacto. En el trabajo hecho por

[44] se describe la manera en la que se crean los filamentos de PLA donde, a la vez, se trata de mejorar las propiedades mecánicas del material para mejores impresiones.



Figura 22: Rollo de PLA usado por impresoras FDM Ultimaker 3

La figura que se muestra con anterioridad contiene información valiosa sobre las propiedades del material que se usa. En esta se visualizan las temperaturas de uso que han de aplicarse a la impresora en sí. Estas temperaturas son las que irán en la placa de vidrio, en el extrusor y en la ventilación necesaria para que el material pueda fusionarse al objeto que se está creando. Esta información es buena, pero no es absoluta para la impresora que se está usando.

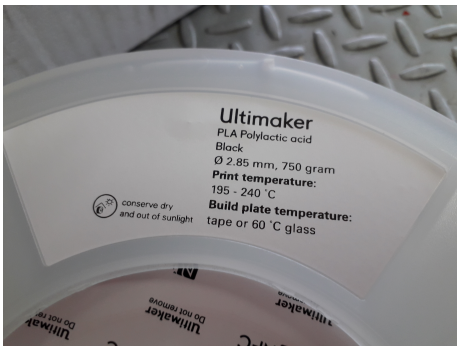


Figura 23: Rollo de PLA usado por impresoras FDM Ultimaker 3 de la misma marca

Muchos rollos de PLA pueden crearse a partir de distintos materiales base. Algunos y los que se usan en el laboratorio están hechos de almidón, pero se pueden tener otros compuestos incluidos que pueden mejorar las propiedades mecánicas del material. Discutiendo sobre el más usado, el PLA basado en almidón ha pasado a ser aceptado para gran variedad de usos aparte del de prototipado, desde la industria textil hasta el empaque de comida [45]. En este documento [45] se describe muy claramente que los rollos de PLA pierden muchas propiedades mecánicas cuando están en proceso de fabricación, pero que estos proceso continúan existiendo gracias a la facilidad económica que conlleva fabricarlos. En este estudio se tiene una gran discusión acerca de el efecto de la orientación de los objetos en la propiedades del material. En el trabajo por [21] se menciona que el material mejora considerablemente cuando el objeto esta siendo impreso a 45 grados con respecto a la horizontal, en el documento se mencionan las pruebas a 0 y 90 grados que se usaron pero que no llegan a la mejora que los 45 grados ocasionan.

En el artículo [46] se describen las excelentes propiedades que el material posee de por sí, incluyendo biocompatibilidad y biodegrabilidad entre otros. A diferencia de otros plásticos, este no requiere y no basa su proceso en el petróleo y otras fuentes de energía no renovable. El gran fuerte de este material es que el PLA puede descomponerse en agua y dióxido de carbono, por lo que no crea contaminación ambiental. Este material puede ser usado en gran variedad de industrias como se menciona con anterioridad, pero la desventaja que tiene radica principalmente en la temperatura, ya que después de los 60 grados celsius el material empieza a deformarse.

Así como la resina, el PLA tiene también un post procesado, en el cual se agrega material o se somete el objeto a un tratamiento térmico. Debido a que una pobre adhesión de capa es el principal problema que tiene el PLA, pero [21] se menciona el uso de un microondas para poder derretir el material lo suficiente para que las capas terminen de adherirse unas a otras. En otro proceso que se hizo, la aplicación de cera, resina o esmalte, logra pegar por completo las capas y después de esperar a que se sequen se puede arreglar este problema [21].



Figura 24: Objeto hecho en PLA antes y después de post procesado [47]

En el artículo [29] se investiga acerca de cómo los materiales de impresión para proceso FDM se combinan con otros nano materiales y materiales comúnes para mejorar de sobremanera las propiedades mecánicas del PLA o ABS. Con lo que se intuye el uso de biomateriales para la mezcla entre estos y el PLA para poder usar este material para usos biomédicos.

6.7.2. TPU

El termoplástico poliuretano es un polímero del cual se han hecho filamentos y que también es usado para la impresión 3D dentro del proceso FDM. Este plástico es un compuesto con elasticidad linear compuesto de segmentos suaves de material. Por lo normal se usa poliéster elástico como material suave y materiales duros para la creación del mismo. Este material presenta buena compatibilidad, como se menciona en su elaboración, presenta buenas propiedades mecánicas como resistencia térmica, gran elasticidad y un moderado esfuerzo de tensión y compresión [48]. Gracias a las propiedades del material, este ha sido usado en varias industrias de ingeniería para la creación de adhesivos o espumas estructurales, pero el TPU tiene la desventaja que la forma no es constante y es fácil de deformar. Este material ha tenido gran auge en el campo biomédico debido a los derivados que se han podido obtener de este, basados en otros materiales que no son petróleo [48].

En [49] se mencionan las propiedades mecánicas del material, incluyendo el esfuerzo de tensión y la elongación máxima. Esta página también menciona las distintas variaciones del

TPU que existen y que se encuentran disponibles en el mercado. Según el tipo de TPU con el que se está trabajando, se le puede dar distintos usos en varias industrias y para la creación de contenedores que requieren un material inerte pero flexible.



Figura 25: Objeto simple hecho con TPU [49]

Siendo este material bastante compatible con otros, y también siendo biocompatible, en la investigación por [50] se concentran en la fabricación de TPU de grado médico. Este tipo de desarrollo da lugar a gran potencial en el uso del TPU para aplicaciones médicas. El propósito del proyecto es crear prototipos de corazones, pero con este desarrollo en el material se pueden crear corazones biocompatibles y que probablemente puedan servir como implantes para pacientes que lo requieren.

6.8. Biomateriales

En la actualidad, el desarrollo que se ha hecho en materiales biocompatibles ha dado gran paso a la gran utilidad que estos tienen en el tratamiento de seres humanos. Los materiales biocompatibles pueden ser usados en cualquiera de los procesos explicados. Con estos materiales se pueden crear tejidos humanos y por ende capaces de formar estructuras más complejas como músculos e incluso nervios humanos, en pocas palabras, se pueden crear tejidos funcionales vivos. Por el momento el desarrollo de estos es muy limitado debido al material que se usa de base para generar biocompatibilidad. En otras palabras, el material base del cual se derivan biomateriales es difícil de hacer o conseguir. Muchos de estos materiales han sido creados a partir de hidrogels como la agarosa que son capaces de retener sus propiedades físicas, manteniendo un gran nivel de viscosidad que permite la solidificación del material [51] [29].

Por el momento dichas bases son polímeros creados de otros elementos naturales en el cuerpo humano. Este es un paso crítico pero no tanto como el desarrollo y continuidad que ha de hacerse a este material. El material tiene que poder ser construido a partir de estructuras celulares y que pueda tener la rigidez e integridad física que requieren los tejidos para un continuo y prolongado uso como el que se tienen en los órganos humanos [31].

A diferencia de los materiales convencionales usados para la impresión de prototipos, los biomateriales requieren el uso de células y la producción de biotintas. Se han hecho estudios en los cuales, la deposición de biotintas puede lograrse mediante procesos más avanzados

para la deposición. Pero igualmente, esta no es la forma en la cual estas trabajan, estas no se depositan y crean objetos inmediatamente como lo hacen otros materiales, estos materiales requieren tiempo para que maduren y puedan unirse para hacer objetos. También, muchos objetos de impresión requieren el uso de soporte, pero este soporte no puede ser de un material común como lo es el plástico, esto tiene que ser hecho con biomateriales de otra naturaleza que puedan ser desechados después de su uso [29].

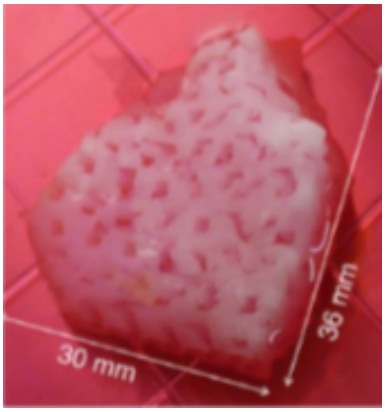


Figura 26: Médula de hueso impreso en 28 días [29]

Los biomateriales tienen que cumplir ciertas necesidades para que su uso sea más prologando y puedan ser usados en muchos casos donde los estudios ya no tengan que ser pre-clínicos [31], dichas necesidades son únicas para aplicaciones biomédicas.

La alta complejidad que ha de tenerse para cada problema único del ser humano tiene que ser atacada por biomateriales y, por lo tanto, estos no pueden ser fabricados de una sola manera, sino que estas tienen que adecuarse a las necesidades únicas del paciente. Para dar lugar a implantes, creación de tejidos y órganos artificiales, por lo que algún proceso de impresión resulta muy útil en la creación de prototipos que puedan ser usados para la solución de complicaciones médicas [29].

Como se menciona con anterioridad, los biomateriales tienen la necesidad de ser específicos al problema que tiene cada paciente, por lo que estos materiales tienen que ser personales. Los procesos de impresión tridimensional son capaces de atacar los problemas que se presentan de tipo biomédico y específico de paciente a paciente. Este tipo de proceso es capaz de atacar los problemas que este proyecto trata de atacar con respecto a la ayuda que se provee a un profesional médico para que eliminar la necesidad de varios análisis así como la reducción de tiempo en tratamiento médico [29].

El proceso aditivo de las impresiones es elevado en costo debido a la cantidad de material que se usa entre prototipo en prototipo. Materiales de calidad, aumentan en precio conforme se crean para usos específicos y los biomateriales presentan un costo+ mucho más elevado cuando se usa para impresiones de órganos. Debido a este problema, el material tiene que poder producirse en pequeñas cantidades, poder obtener prototipos hechos con este material vale más y su costo sera mejor validado si su uso ayuda a solucionar problemas. Dicho esto, se tiene que tener en cuenta que los biomateriales no están disponibles para vender corazones de todo tipo en cualquier momento, sino que esto es usado cuando la necesidad es requerida

[29].

A través del desarrollo de los biomateriales, se han introducido nuevos conceptos, uno de los cuales se trata de la ventana de bio-fabricación. Esta ventana describe las características y compromisos que se han hecho para diseñar biotintas, que toman muchas características físicas, químicas y biológicas la cuales pueden tratarse de viscosidad, elasticidad, cito compatibilidad, bio-degradación entre otras. Materiales de baja viscosidad y que son cito compatibles pueden ser usadas para diseñar material de soporte y que se sacrifica al momento de obtener el modelo deseado [51]. Por el momento se han podido crear tratamientos basados en los procesos de deposición de material, e incluso se han aprobado para su distribución a partir del 2015 [29] [52]. En la figura a continuación se resumen las propiedades que deben cumplir los materiales para poder ser aceptables para su uso biomédico.

Methods	Materials	Applications	Benefits	Drawbacks	Resolution range (µm)
Fused deposition modelling	Continuos filaments of thermoplastic polymers Continuous fibre-reinforced polymers	Rapid prototyping Toys advanced composite parts	Low cost High speed Simplicity	Weak mechanical properties Limited materials (only thermoplastics) Layer-by-layer finish	50-200 µm [13]
Powder bed fusion (SLS, SLM, 3DP)	Compacted fine powders Metals, alloys and limited polymers (SLS or SLM) ceramic and polymers (3DP)	Biomedical Electronics Aerospace Lightweight structures (lattices) Heat exchangers	Fine resolution High quality	Slow printing Expensive High porosity in the binder method (3DP)	80-250 µm [13]
Inkjet printing and contour crafting	A concentrated dispersion of particles in a liquid (ink or paste) Ceramic, concrete and soil	Biomedical Large structures Buildings	Ability to print large structures Quick printing	Maintaining workability Coarse resolution Lack of adhesion between layers Layer-by-layer finish	Inkjet: 5–200 µm Contour crafting: 25–40 mm [52]
Stereolithography	A resin with photo-active monomers Hybrid plield polymer-ceramics	Biomedical Prototyping	Fine resolution High quality	Very limited materials Slow printing Expensive	10 µm [13]
Direct energy deposition	Metals and alloys in the form of powder or wire Ceramics and polymers	Aerospace Retrofitting Repair Cladding Biomedical	Reduced manufacturing time and cost Excellent mechanical properties Controlled microstructure Accurate composition control Excellent for repair and retrofitting	Low accuracy Low surface quality Need for a dense support structure Limitation in printing complex shapes with fine details	250 µm [23]
Laminated object manufactering	Polymer composites Ceramics Paper Metal-filled tapes Metal rolls	Paper manufacturing Foundry industries Electronics Smart structures	Reduced tooling and manufacturing time A vast range of materials Low cost Excellent for manufacturing of larger structures	Inferior surface quality and dimensional accuracy Limitation in manufacturing of complex shapes	Depends on the thickness of the laminates

Figura 27: Propiedades de las biotintas [51]

Al cumplir con estas necesidades los biomateriales pasan a un nuevo problema, la deposición e impresión de los mismos. Por el momento se tienen formas avanzadas para poder depositar el material para crear objetos, con el proceso de transferencia inducida por láser (LIFT) y otros procesos convencionales se hace una impresión exitosa de objetos biocompatibles. Ahora bien, el proceso de impresión por el cual se inclina mucho a usar es el de extrusión, esto se debe a su facilidad de entendimiento pero presenta problemas que se deben atacar, pero igualmente cualquier tipo de proceso presenta su problema específico [51] [52].

En el caso de la extrusión, se tienen que tomar en cuenta muchos parámetros con tal de no dañar el material cuando este está siendo depositado, por lo que se tienen limitaciones a la hora de diseñar. Un ejemplo de esto es la presión que está siendo expulsado el material, esta tiene que ser lo suficientemente baja para no dañar el tejido y el material a nivel celular y por ende no dañar las células con las que esta compuesta. El material tiene que estar hecho de manera que pueda aguantar cualquier tipo de estrés mecánico y térmico que causa la impresora a la hora de usarla. Se debe tener un mecanismo dentro de la impresora y del material que sea capaz de evitar el crecimiento acelerado de células dañinas. La maquinaria necesaria para imprimir, tiene que poder extruir el material de forma que una viscosidad muy pequeña esté presente para poder mover el material de forma fluida sin dañarla, pero se tiene que tener una gran viscosidad después de la deposición para que el material pueda unirse y solidificarse sin dañar el tejido [51] [29].

En la literatura [53] se menciona un tipo de sistema, en el cual la impresión de biotinta es capaz de reproducir varios tejidos humanos con buena precisión. Con el uso de hidrogels y otros componentes se usaron para crear varios tipos de sistemas biocompatibles. Usan varios cartuchos de material conectados directamente a un extrusor a micro escala y por encima de

todo se tiene un controlador de presión de aire para controlar el volumen de forma precisa. A este sistema lo denominaron ITOP, que por sus siglas en inglés significa impresora integrada de tejido-órgano. Con este proyecto, se da evidencia lo avanzado que se tiene la tecnología de deposición de material y lo útil que puede ser para desarrollar órganos y tejido compatibles con los seres humanos. Este sistema, aunque sea una primera aproximación a lo que es posible hacer con los biomateriales, es un comienzo de lo que se puede llegar a desarrollar y el punto de partida que se tiene para seguir adelante.

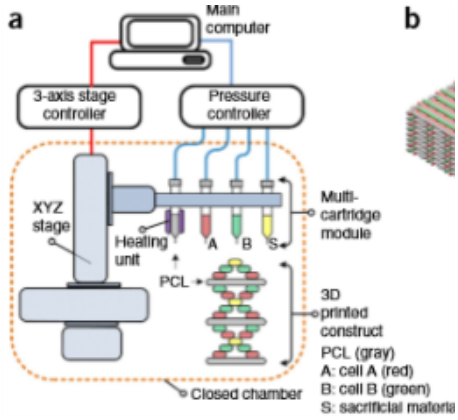


Figura 28: Plano del sistema de impresión ITOP [53]

En al siguiente imagen se muestra el proceso que se siguió por parte de [53] para lograr imprimir cartílago en forma de una oreja humana.

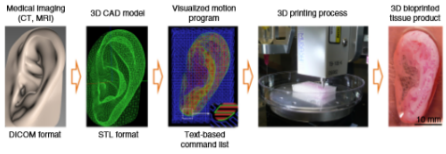


Figura 29: Proceso de impresión [53]

CAPÍTULO 7

Descripción de la Impresora 3D

7.1. Funcionamiento general

El sistema de impresión por resina que usó en este proyecto tiene un funcionamiento bastante simple; de manera general, se trata de la solidificación del material usado (como la resina) cuando una luz encuentra a la resina siendo esta fotosensible. De manera simple según presentado por [23], se trata de una solidificación mediante la penetración de rayos ultravioleta en un orden y control preestablecido por computadora, curando el material creando capas y capas de material sólido.

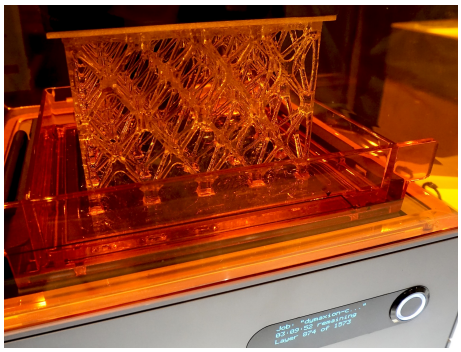


Figura 30: Placa y objeto en piscina de resina [54]

La impresora 3D aprovecha esta solidificación para poder hacer objetos, dichos objetos pueden ser creados con tan alta definición [23][20] . Para poder crear tales objetos, se empieza con una placa que sólo se mueve en el eje Z, la cual es posicionada de tal forma que está tocando la superficie de la resina, la cual se encuentra en una caja abierta simulando una piscina (mostrado en la figura). Una vez la primera capa de solidificación fue creada, la resina ya se pegó a la placa, por lo que crea la base del objeto a completar. Entonces, comienza el

proceso de repetición, en la cual distintas capas del objeto son solidificadas y estas se pegan a la capa anterior; por cada capa hecha se tiene un ligero movimiento hacia arriba por parte de la placa gracias a los motores stepper utilizados. Este proceso puede variar en tiempo según el número de capas que se le asignó al objeto con anterioridad, dicho número es el que da el detalle a los objeto a imprimir. Para lograr tal solidificación, es absolutamente necesario dirigir la luz ultravioleta sea como sea. Muchos sistemas implementan un espejo que refleja la luz UV hacia la máscara que se usa para filtrar estos rayos. Esta implementación se visualiza en la siguiente Figura 4.3 extraída de [25]

Para mejorar la calidad de esta proyección de luz UV, se implementa un reflector, que a diferencia del espejo esta hecho de un material espacial que logra reflejar por completo la luz UV, así como la forma que se diseñó con tal de poder dirigir toda la luz disponible hacia la pantalla LCD, donde se establece el patrón a solidificar. Gracias al controlador de la pantalla se puede dejar la luz en el orden que se quiera y uno tiene la opción de controlar el tiempo que este se queda así, de forma que se asegure la impresión que se tendrá. Debido a la naturaleza de los LEDs UV, se requiere el control de calor para evitar dañar otros componentes.

Gracias a los controladores usados, se controla fácilmente la velocidad con la cual sube la placa así como el patrón que la luz ultravioleta tendrá en cuando esta pasa por la pantalla y el material plástico FEP. Para asegurar que la luz ultravioleta pueda curar de manera completa la resina, se debe aislar el sistema de otro tipo de interferencias causadas por luz, como la solar.

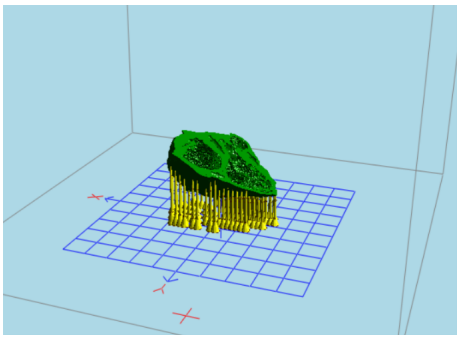


Figura 31: Parte de corazón con orientación de 45 grados respecto al eje X

En otros mecanismos más avanzado y costosos, se pueden ver el reingreso de la resina mediante sistemas de bombeo. De esta forma cada vez que se acaba la resina en la caja, se introduce más con tal de mantener una superficies fresca. Para el sistema usado en este proyecto, dicho reingreso no fue necesario debido a que la luz ultravioleta toca el fondo de la piscina en la cual la placa ya está posicionada para agarrar el objeto. En varias ocasiones, se requiere el uso de movimientos más ligeros sobre otro eje. Cuando los objetos en impresión requieren que sus detalles no se pierdan mientras se mueve la placa, se hace un ligero movimiento en el eje x con tal de mantener las capas de solidificación lo más pequeñas posibles y por tanto evitando que el detalle se pierda en la solidificación y el movimiento.

Para poder validar el uso de la tecnología DLP se requieren varias comparaciones, pero debido a que no se compara cada proceso de impresión por el elevado precio que esto conllevaría, se limita la comparación de impresiones en tres procesos: DLP, FDM y polyjet; a

este último proceso no se le da mucho énfasis debido a que para poder hacer una comparación completa de esta impresión con el resto, se ha de invertir mucho dinero y tiempo. El laboratorio D-Hive ubicado en la universidad cuenta con dicha impresora pero el precio de cada impresión permite solo poder crear un número limitado de prototipos.

7.2. Familiarización del sistema de impresión DLP

Para cumplir el objetivo del conocimiento de la impresora y del proceso DLP se hace una investigación en la que se resaltan las diferencias y ventajas que tiene este sistema sobre otros ya existentes. En la sección de funcionamiento general, se describe de forma resumida la forma en que trabaja la impresora.

La forma en la cual se familiariza con la impresora que se tiene es mediante su uso, se hacen pruebas y se siguen guías acerca de su funcionamiento. Siendo este un sistema que no se puede conectar y empezar a trabajar de una vez se ha de tener un proceso previo a su uso, estas son: la nivelación y calibración. Con tales procesos se logra colocar la impresora de tal forma que las impresiones que se obtienen son precisas y detalladas. Este proceso previo se de a conocer por muchos tutoriales que explican la importancia de hacerlo.

Con el trabajo previo que se hizo de querer construir una impresora, se tiene en cuenta que toda la información recopilada por ello hace fácil la descripción de la impresora y su proceso. Dicho trabajo, da a conocer muchas de las funciones que tienen los componentes tanto mecánicos como electrónicos que conforman la impresora. En el anexo B de este trabajo se puede notar como la cotización de materiales llega a un nivel muy elevado en cuanto a precio. También, se notan todos los planos de componentes que han de hacerse por otros medios, debido a la cantidad de componentes y el tiempo que cada uno de ellos se toma en imprimir no se puede tener el sistema funcionando y hacer la cantidad de pruebas que requieren en el limite de tiempo que se da. Por tal razón, se consigue un sistema de impresión DLP, que sabiendo la calidad de producto que venden y teniendo en cuenta que es el mismo sistema que se estaba construyendo.

Para poder tener una descripción completa del proceso, se hacen comparaciones de impresiones para poder verificar que lo que se investiga es en efecto lo que se tiene. En esta parte de la metodología, se familiariza uno con el sistema de impresión FDM que, siendo el método más común, más usado y con mayor accesibilidad en la universidad se cuenta con mucha información tanto en internet como en forma común. Para efectos del proyecto y con tal de obtener resultados que se saben que son aceptables para trabajos académicos, se usan las impresoras FDM y las cuales pueden ser usadas en cualquier momento y que están a disposición de todos los estudiantes de la universidad.

7.2.1. Uso de programas de edición

Para la impresión exitosa de corazones, a veces es necesario el uso de programas de edición. En el caso de este proyecto se usa el programa de MeshMixer, una plataforma creada por Autodesk, que permite editar algunos de los parámetros o detalles de los objetos. El uso de este programa es importante debido a que muchos modelos de corazones provistos

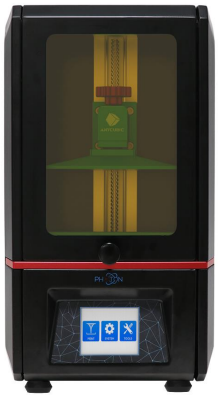


Figura 32: Impresora con sistema DLP Anycubic [30]

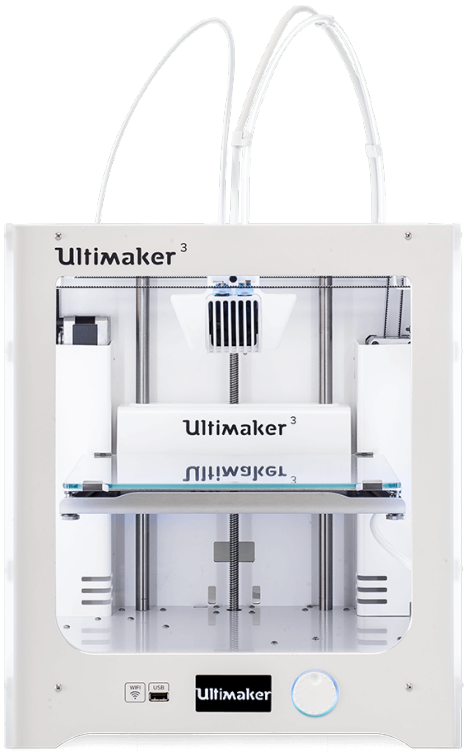


Figura 33: Impresora con sistema FDM Ultimaker 3 [55]

cuentan con muchos defectos. Estos defectos hacen que el reconocimiento de estructuras y de partes del corazón que son esenciales no se muestren al momento de imprimirlos. Con este programa, se pudieron arreglar muchos de los objetos que se imprimieron, pero estos fueron corregidos después de haber visto que no pudieron imprimirse la primera vez. La opción que tiene a disposición de poder sellar rajaduras y rellenar partes, hace que el corazón juntos con sus estructuras internas puedan ser reconocidas por programas SLICER y que pueden imprimirse exitosamente.

7.2.2. Nivelación y calibración

Antes de empezar a trabajar con una impresora 3D, hay que considerar los parámetros iniciales con los cuales se empiezan a trabajar. Esto se hace con el fin de tener la placa de impresión paralela y nivelada sobre la pantalla LCD, al no hacer esto, los objetos que se están imprimiendo no se pegan a dicha placa y toda la resina que se seca se mantiene en el fondo del VAT. Cuando esto sucede, el objeto no logra imprimirse en 3D sino que solo queda una placa de material solidificado en 2D, cosa que no sirve. Uno de los problemas presentados en el proyecto fue la nivelación de dicha placa, por lo que cuando se quisieron hacer las primeras pruebas de impresión, se formaron placas en vez de objetos y no se pudo continuar con la impresión. [30] [56].

Parte de la nivelación es poder resolver el problema de suciedad y limpieza. La limpieza de los componentes que tienen contacto con la resina ha de ser constante y debe tomarse

en consideración, esto se debe a que cuando alguno de los componentes esta sucio, no se cuenta con ciertas áreas de impresión, aparte que la resina se pega a dichas partículas por lo que la solidificación se arruina. La pantalla LCD, también tiene que ser limpiada con sumo cuidado, ya que esta es la parte esencial de la impresión tridimensional, si la pantalla está sucia, la luz UV se refracta y no se generan los objetos que se desean. [56].

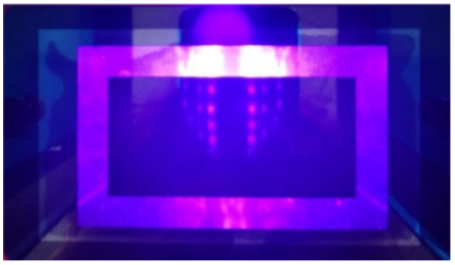


Figura 34: Prueba de funcionamiento de la pantalla LCD [56]

La calibración de la maquinaria, se debe sobretodo a poder reconocer la configuración de inicio, así como mantener la placa de impresión paralela al área de trabajo. Esto es parte importante del reconocimiento de la impresora ya que si no se hace, se pueden generar errores que eviten que las impresiones se den. Por otro lado, también es importante poder dar un mantenimiento previo a los componentes móviles de la impresora, esto se debe a que dichos componentes han de estar libres de obstáculos y siempre listos para trabajar y moverse constantemente. [56]. Muchos tutoriales y manuales existen para la nivelación efectiva de la maquinaria, para este proyecto se usaron ambas para poder obtener los mejores resultados. A pesar que al principio no se obtuvieron los resultados esperados, con varias iteraciones en todo el proceso se pudo llevar a cabo las impresiones necesarias. El manual del fabricante es de utilidad para el uso y procedimiento adecuado para la obtención de buenas impresiones [57] [56].

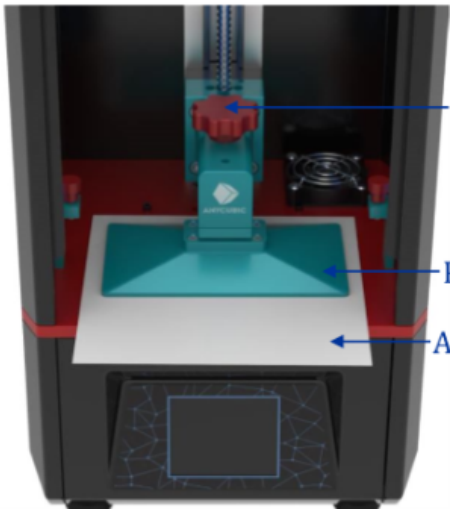


Figura 35: Nivelación de la placa
[56]

7.2.3. Impresiones iniciales

Antes de empezar con las impresiones de corazones, se han de tener impresiones iniciales que ponen a prueba varias áreas de la máquina. En dichas pruebas, se pueden ver los funcionamientos de la pantalla LCD, las luces UV, los motores y la resina. Cuando se están viendo dichas impresiones, se prueba si el funcionamiento de la pantalla es adecuado cuando este da los patrones de luz que han de curar la resina, así como el paso de luz a través de esta y el FEP film. El motor ha de moverse de arriba hacia abajo en un movimiento constante por lo que esto puede verse desde el principio cuando se empiezan a hacer impresiones de cualquier tipo. En cuanto a la resina, hay que observar si esta en condiciones para trabajar o si esta vencida. Cuando la pigmentación de la resina se separa de esta, la solidificación es más difícil de completarse, por lo que es necesario ver si esta se esta curando y solidificando.

Para asegurar buenas impresiones, se iniciaron con modelos simples de figuras geométricas para poder tener objetos rápidos y que puedan mostrar los posibles fallos de la impresora. Cuando se usó la impresora por primera vez, se tuvieron varios problemas debido a que el objeto no se pegó de manera efectiva sobre la placa de impresión, ocasionando que el modelo quedara aplastado y pegado en el FEP film y que este estuviera en 2D. Este es uno de los muchos problemas que pueden presentarse al momento de imprimir objetos en la impresora.

En todo tipo de impresoras se tienen objetos que están listos para ser probados, estos se les denominan pruebas de tortura, ya que si la impresión de estas son exitosas, cualquier impresión futura también lo será. Pero cuando este no se imprime como debería, se requieren impresiones rápidas de otros modelos simples como los que se mencionan con anterioridad. Las impresiones que se dan a lugar, sirven de forma que el usuario sepa si el procedimiento que se ha de llevar antes de imprimir fue exitoso o si es necesario hacer cambios en alguno de los parámetros que constituyen tanto el hardware como la configuración de impresión del objeto a través de software.

7.2.4. Pruebas iniciales y de exposición

Los objetos iniciales de prueba que se proporcionan han de imprimirse para ver el estado de la máquina. El estado de la misma puede dar a entender todo lo que esta mal con las impresiones, desde la resina hasta la placa donde se pega el objeto. El tiempo de exposición de los objetos es importante, la exposición influye directamente sobre el resultado de las impresiones. Cuando se tratan grandes periodos de tiempo de exposición, hay que tener en cuenta que la resina puede pegarse al VAT en vez de pegarse a la placa pero de igual manera pasa si el tiempo de exposición es muy pequeño. Con dichas pruebas se tiene un tiempo de exposición apropiado al momento de imprimir. Se debe tener en cuenta que el tiempo de exposición tiene que aumentar según aumenta el grueso de capa, esto se debe a que la capa debe pegarse al resto del modelo sin que haya mucho problema y se evita que la impresión tarde más de lo necesario.

Las pruebas de exposición también incluyen la cantidad de tiempo entre exposiciones llamadas 'off time', en las cuales la luz no tocan los objetos en impresión. Estos tiempos son necesarios para dejar que los objetos terminen de curar la capa anterior antes de seguir con las demás. Otro tiempo de exposición es el de 'Bottom exposure', en el cual el tiempo es

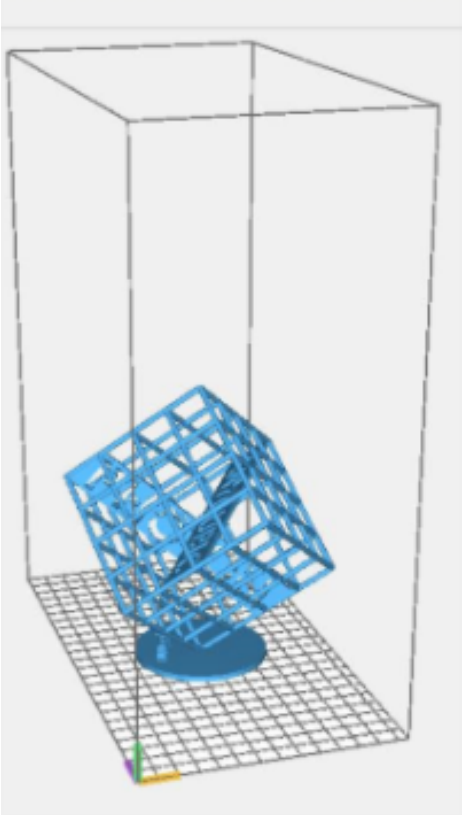


Figura 36: Torture test que incluye Anycubic (6 horas) [56]

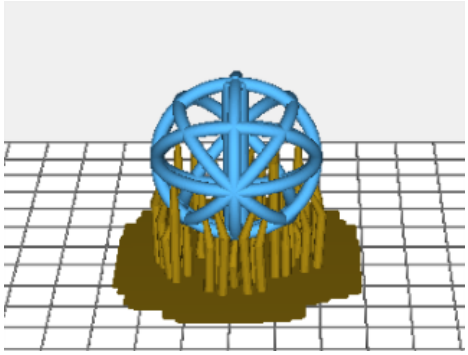


Figura 37: Torture test con menor tiempo de impresión (4 horas)[58]

mucho mayor para poder conseguir que las bases de cualquier objeto se peguen a la placa, también se definen la cantidad de capas que servirán como base del objeto, esto se hace con tal de concentrar mucho tiempo en esta base y permitir que los objetos se peguen a ella sin problemas. Las pruebas de exposición dan mucho problema al momento de imprimir, esto se debe a que la exposición deseada no es la indicada y la indicada no es la apropiada para el funcionamiento óptimo. Cuando el tiempo de exposición falla de cualquiera de las maneras, se tiene que tomar en cuenta que la nivelación de la placa no es la apropiada y por ende ha de volverse a hacer con más cuidado y teniendo en cuenta que esta es parte fundamental para el proceso de impresión. En el slicer, se pueden controlar todos estos tiempos de exposición para hacerlo a conveniencia del usuario. Estas pruebas de exposición requieren el uso constante de resina, debido a que estas pruebas fallarán la mayor parte del tiempo hasta que se encuentre el punto que la resina requiere para su funcionamiento óptimo.

En el caso de este proyecto, que tuvieron varios problemas con las impresiones iniciales, se dieron porque el objeto se pegaba al VAT y no a la placa como se menciona con anterioridad, después de hacer varias nivelaciones el problema persistía. La resina no funciona según la temperatura sino que con exposición a luz UV. Haciendo un breve análisis de los comportamientos de los materiales que se usan para la impresión se investigó que el plástico, y en este caso, la resina tiende a cambiar de tamaño cuando esta experimenta cambios de temperatura. Inicialmente la maquinaria se encontraba en el laboratorio especializado don-

de la temperatura era baja gracias al sistema de acondicionamiento, cuando la maquinaria fue llevada a un laboratorio donde la temperatura es la del ambiente el objeto lograba permanecer en su lugar pegado a la placa. La primera impresión hecha para la prueba de la impresora fue un cubo de 5mm x 5mm x 5mm los cuales si se dieron, midiendo el cubo con un vernier se pudo notar dicha exactitud en las medidas. Luego de haber tenido la primera impresión exitosa, se continua con pruebas más complejas denominadas 'Torture Test' que ponen a prueba la forma de hacer bien estructuras complejas.

7.2.5. Precauciones

La limpieza de los componentes es importante, ya que esto hará que las impresiones pueden tener la calidad que se busca de cada una de ellas. Después de cada impresión y cuando se termina de usar por completo la impresora es necesario limpiar la placa de impresión, así como el VAT. Ahora bien, la resina que se usa para la impresión es tóxica por naturaleza y aún más cuando está caliente y sacando vapores dañinos, así como es tóxico tocarlo porque puede irritar mucho la piel, es peligroso inhalar los vapores que este genera, ya que son extremadamente tóxicos y cancerígenos. Para poder llevar una limpieza segura y un manejo adecuado del material, se usan guantes y mascarilla. La resina no se puede tratar de limpiarse con agua, ya que reacciona cuando entra en contacto con esta, la resina requiere el uso de alcohol isopropílico, este es de suma ayuda al momento de limpiar, ya que este sí es capaz de eliminar cualquier rastro de resina que pueda haber en los componentes o los lugares que esta haya tocado.

La pantalla LCD, así como el FEP film han de estar suficientemente limpios como para permitir el paso de la luz UV hacia la resina. Para asegurarse que todo sea homogéneo a la hora de solidificarse, hay que mantener todas las superficies limpias, esto se logra con el alcohol que se menciona anteriormente, ya que este se evapora rápidamente al estar expuesto a temperatura ambiente. La resina puede quedarse en el VAT si este será usado en menos de 48 horas, según el manual este material puede quedarse dentro en este periodo de tiempo, sino la resina puede haberse desgastado o puede que se haya solidificado en algunas partes debido a la exposición de luz que este tiene incluso cuando se tiene en cuenta que la impresora esta polarizada.

Además de limpiar de sobremanera los componentes, este no requiere un secado después

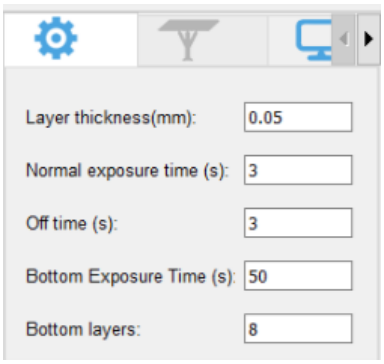


Figura 38: Tiempos de exposición en la configuración del programa

por lo que es la mejor opción para la limpieza y remoción de la resina. Este componente no reacciona con la resina por lo que es aún mejor opción para la limpieza que se necesita hacer. Si la resina entra en contacto con la piel, es aconsejable limpiar el área con un pañuelo remojado en alcohol y luego enjuagar bastante con tal de evitar cualquier problema, así como cualquier irritación provocada por la resina. Si en dado caso se llegara a tocar la resina con la piel, aparte de limpiar de sobremanera el área de contacto es aconsejable no tocarse ni los ojos ni otras partes que son más sensibles a la irritación. Se recomienda de igual manera mantener un contenedor plástico donde se tenga bastante alcohol y que sirva solo para meter los objetos impresos, así como los componentes ya que esto hará que no se inhale constantemente la resina cuando se estén limpiando dichos objetos y componentes.

En el caso de la resina flexible se tiene un gran problema, el alcohol isopropílico es tóxico cuando entra en contacto con este material. La mezcla de estos dos componentes causa una reacción en el material que es capaz de penetrar los guantes de látex que se tengan, por lo que cuando se está usando esta resina es recomendable usar guantes especializados o usar etanol a 95 por ciento como material de limpieza de la resina. Hay que mantener en cuenta, que el uso de la mascarilla es absolutamente necesario cuando se tiene contacto directo con la resina, cuando se abre la impresora o cuando se abre el contenedor.

Es recomendable tener algún tipo de contenedor que no se vaya a usar en futuras ocasiones para algo más, ya que a pesar de haber limpiado todo no se puede estar completamente seguro que no hay residuos que puedan ser dañinos. Este contenedor puede ser de vidrio o de aluminio desechable, y en este se hace la limpieza de los componentes así como la limpieza de los objetos. La curación de dichos objetos requiere un proceso donde se use luz UV, esto hace que el objeto se termine de solidificar y que dure más tiempo antes de perder su propiedades físicas y químicas. Muchas máquinas hacen esto mismo, pero más concentrado con el fin de tener mejores resultados y en el menor tiempo posible, esto se hizo de una manera más rústica para el proyecto debido a que estos aparatos son muy costosos y gran parte del presupuesto se invirtió en la impresora.

Otra precaución a considerar, es que el objeto cuando está recién hecho no puede tocarse directamente con las manos ya que los residuos son peligrosos todavía, hay que bañar el objeto en alcohol para poder tocarlo. El post-procesamiento de luz se hace para endurecer y mejorar las propiedades del material, pero no son necesarios para evitar efectos adversos en la salud. Otro componente que es muy efectivo en la limpieza de los componentes y objetos impresos es el etanol al 95 por ciento.

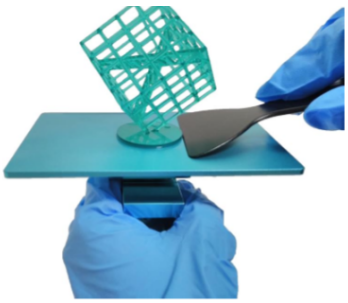


Figura 39: Uso de guantes como medida de protección según el manual de usuario de Anycubic [56]

CAPÍTULO 8

Procesos

El proceso que se presenta, es el que define todas las pruebas que se obtuvieron antes de la impresión de los corazones, así como todo el proceso que se tiene para poder configurar de manera exitosa la impresora. El proceso empieza con la investigación hecha en el marco teórico, en dicho capítulo se muestran todos los tipos de procesos que se investigaron para poder llegar a cabo este proyecto. Tanto como los procesos de impresiones como los materiales a utilizar.Los parámetros usados para cada material disponible y para cada uno de los casos se toman en cuenta para la impresión exitosa de los corazones.

En algunos de los casos se tienen que imprimir varias copias de un mismo objeto o corazón, con esto se pueden usar las copias para que los doctores o profesionales médicos puedan operar y usar los objetos a conveniencia. Los profesionales médicos requieren de la ayuda de la universidad, así como del investigador para poder obtener los mejores resultados de los corazones que se quieren analizar de cualquiera de la maneras que se tienen disponibles. En el caso de este proyecto, poder obtener imágenes de ecocardiografías e imprimirlas para mantener los requisitos cumplidos. Al final de este proceso, se quieren tener datos importantes acerca del material que se pudieron caracterizar, con esto lo que se logra es verificar los datos que se nos presentan mediante las hojas de datos de los fabricantes.



Figura 40: Resumen del proceso de impresión

8.1. Investigación de procesos, materiales y componentes

En la investigación, se tiene una descripción de los distintos procesos de impresión que se tienen disponibles en la industria y en la academia, pero no todos estos se pueden usar para lograr mantener las limitaciones del proyecto, estas siendo económicas y de tiempo. Se filtraron las opciones al aprender acerca de estos procesos, aquí se elige entre varias opciones pero al final, considerando las limitaciones económicas, se usó el proceso de impresión de DLP. Eligiendo el proceso luego se se trata de describir los componentes que se tienen dentro de este sistema, con ello puede comprenderse el funcionamiento los componentes electrónicos que hay dentro de las impresoras.

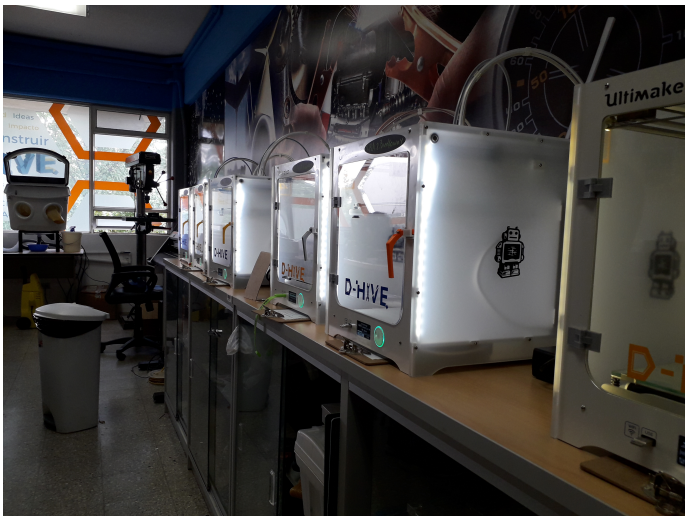


Figura 41: Laboratorio Dhive

Los corazones tienen distintas propiedades al ser impresos y luego al ser pasados por procesos posteriores a su impresión que puedan afectar las condiciones de los corazones. Esto se puede notar en los corazones cuando se solidifican después de la impresión, capas del corazón se rajan o quiebran luego de ser pasados por un pos-procesamiento pero que no se mira en los corazones hechos con resina rígida, esta tiene propiedades que son capaces de mantener sus propiedades físicas. Esto también puede verse en el procesamiento que se tiene durante la impresión de los corazones, cuando el material no se pega a la placa de la impresora o cuando esta capa se estira tanto que no resiste el esfuerzo a tensión que se genera.

El proceso de impresión elegida es detallada en secciones posteriores, en las cuales se describen los pasos que se siguieron para la impresión de objetos (en este caso corazones) ideales o que se acercan los suficiente a los modelos reales los cuales son estudiados de mejor manera. Se describe cómo se llega de un punto al otro probando distintos parámetros para tener un punto de referencia y comparación y así poder validar de mejor manera dicho proceso.

8.1.1. Procesos de impresión

Luego de haber investigado las distintas tecnologías usadas para la impresión 3D, se hizo un filtrado de estos procesos con el fin de hallar el más adecuado para poder llevar a cabo de forma exitosa la impresión de corazones en 3D. De todos los procesos hallados se escogieron los que estaban dentro de las limitaciones y condiciones del proyecto. De todos estos se encontraron los que pudieran crear los objetos con el mejor detalle posible, pero para validar su uso se hizo una comparación directa con objetos impresos en otro tipo de proceso que se tienen disponible. Con esta comparación, se tiene la forma de comparar velocidades, detalles y parámetros que se usan para los procesos.

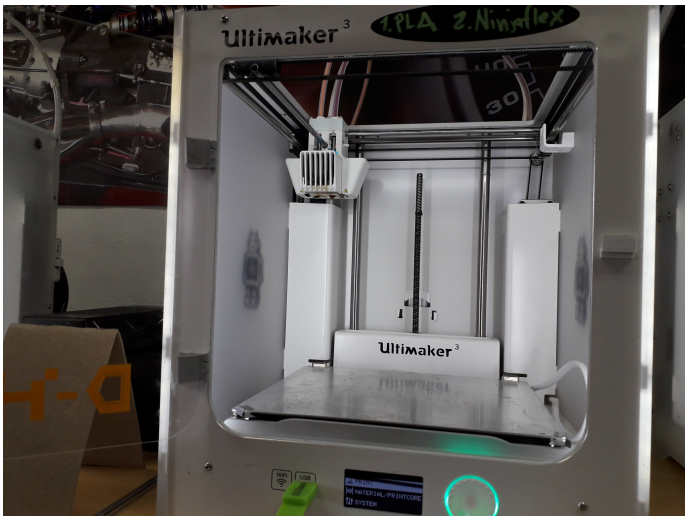


Figura 42: Proceso de impresión FDM

Con esta investigación se llegó a la conclusión de usar el proceso DLP de impresión mediante el curado de resina fotosensible con luz UV dirigida hacia dicho material. La comparación directa de este proceso de impresión es con el proceso FDM el cual usa filamentos de termoplásticos para crear objetos. Luego de haber hecho esta comparación y luego de haber elegido las mejores condiciones de impresión del objeto, se hizo una impresión en el proceso de impresión Polyjet con la impresora industrial.

8.1.2. Materiales de impresión

Estos materiales son la resina y los termoplásticos, pero también se hace una investigación sobre el futuro de los materiales y que, gracias a estos, se avanza de sobremanera en el proyecto de impresión de corazones. La resina tanto rígida como flexible se caracteriza según las propiedades que nos proveen los fabricantes tanto mecánicas, así como el potencial que estas tienen para que en un futuro se puedan implementar en proyectos más avanzados. Entonces, según los procesos elegidos para llevar a cabo el proyecto, se enfoca específicamente en materiales rígidos y flexibles en procesos FDM y DLP. Por lo que la investigación se basa específicamente en PLA, TPU y las resinas que se usaron en el proceso de impresión.

Luego de haber investigado los materiales que se tienen a disposición, se hizo una investigación acerca de los materiales del futuro que, en este caso específico, se trata de los biomateriales. Debido a que el proyecto trata de imprimir corazones, se avanza de sobremanera la calidad del proyecto teniendo corazones impresos en biomateriales que todavía se están desarrollando. Para el uso de este tipo de materiales se requiere el uso de maquinaria específica que pueda manejar de manera efectiva este tipo de problema. En la investigación se menciona uno de los trabajos que se han hecho para poder unir dos tipos de materiales o para crear materiales existentes en uno que puedan ser usados para crear corazones biocompatibles. Los termoplásticos como el TPU pueden ser usados con tal de que este pueda ser biocompatible y crear órganos biocompatibles.

8.1.3. Componentes de la impresora

Por último se investigan los componentes que se encuentran dentro de la impresora DLP. Se toma en cuenta solo esta impresora porque los componentes de esta se parecen mucho a las de otras impresoras. Solo se cambian algunos componentes debido a la naturaleza de los procesos. Para el proceso FDM se añade un extrusor en el cual un tubo de metal se calienta a una temperatura ideal para poder derretir el filamento plástico y poder manipularlo para crear objetos. En esta parte de la investigación se toman en cuenta los componentes tanto mecánicos como electrónicos, los electrónicos siendo los parecidos a los de otros proceso pero los mecánicos como el VAT y la placa difieren de sobremanera.

Los componentes de estas impresoras, son las que pueden conseguirse fácilmente para poder construir un sistema de impresión. Al comenzar el proyecto, se inicia construyendo un sistema único para imprimir. Por ende, los objetos que se investigaron son los que se investigaron también para la implementación de la impresora 3D que al final no se logra construir por la limitante de tiempo impuesta por los asesores de este proyecto. El resto de los componentes que se encontraron y se iban a usar son los que se encuentran en la lista o cotización de materiales tanto electrónicos como los materiales de impresión, dicha lista se encuentra en los anexos.

8.2. Impresión de corazones tridimensionales

Este proceso incluyen las impresiones hechas en los procesos de FDM y DLP, pero se descarta el proceso polyjet debido a que el investigador no tuvo un acercamiento directo con la impresora, esta siendo una condición de uso que se tiene en el laboratorio Dhive de la universidad.

No todos los materiales actúan de la misma manera y no todos los materiales usan los mismos parámetros. El post procesamiento que se detalla en secciones posteriores indica todas las modificaciones que se le hicieron a los objetos luego de haber sido impresos. Este post procesamiento se toma en cuenta para mejorar la calidad de los objetos impresos. Este efecto puede ser negativo o positivo según el tratamiento que se le haga. En la figura a continuación se visualiza el contenedor donde se dejaron todas las impresoras hechas de los corazones en los procesos que se usaron para este proyecto, este es un tipo de resumen donde

pueden verse todos objetos hechos y todos los corazones hechos para todos los parámetros usados para la comparación de corazones.



Figura 43: Caja de corazones



Figura 44: Caja de corazones vista aérea



Figura 45: Caja de corazones abierta para mejor visualización

8.2.1. Parámetros de impresión

Los parámetros elegidos para los objetos se describen en varias partes desde velocidad, grosor de capa hasta orientaciones. Los parámetros a usar son importantes en el proceso de impresión para poder obtener información valiosa acerca de la calidad y velocidad. También toma en cuenta las condiciones que se deben de tener para cada material con tal de no arruinar dichos materiales, estos no pueden ser usados siempre y cuando estos ya estén solidificados, también las condiciones en la cual se guardan dichos materiales. Ahora bien, en cada proceso se tienen distintos materiales, para cada uno se usaron materiales rígidos y materiales flexibles. Los dos materiales pasaron por un proceso en la cual los parámetros se variaron con tal de mejorar el detalle que se consigue con cada uno de estos. En la siguiente sección se se describen los parámetros utilizados para poder conseguir impresiones de calidad para la resina.

Resina

La resina es un material que comienza líquido y luego se endurece para crear objetos, este proceso es descrito en el marco teórico. Para el proyecto se utilizaron dos tipos de resina, una rígida y una flexible. Ambos tienen parámetros distintos, como el tiempo de curado o el grosor de la capa, para lograr impresiones exitosas; la resina rígida y flexible cambian significativamente entre uno tanto en propiedades prácticas para manipulación o el detalle que presentan. En la bitácora (ver anexo I) se encuentran los parámetros usados para la impresión exitosa de algunos de los objetos de prueba. En dicha tabla se explican varios parámetros; el tiempo que se usa en los parámetros para la resina flexible son hasta 5 veces más lento que los usados en la resina rígida, por lo que el cambio de parámetros entre un material y otro es necesario para poder tener impresiones exitosas. Para poder ver los parámetros requeridos para la impresión de objetos, se revisó primero una tabla en internet en la cual varios colaboradores ayudan a los usuarios proveyendo puntos de partida (como tiempos de curado o condiciones ambientales) para poder imprimir objetos.

En la figura a continuación se muestran los parámetros que pueden editarse dentro del programa slicer para preparar objetos antes de la impresión, en el manual de impresión se detalla el uso de estos parámetros y la parte del programa en la cual se pueden editar.

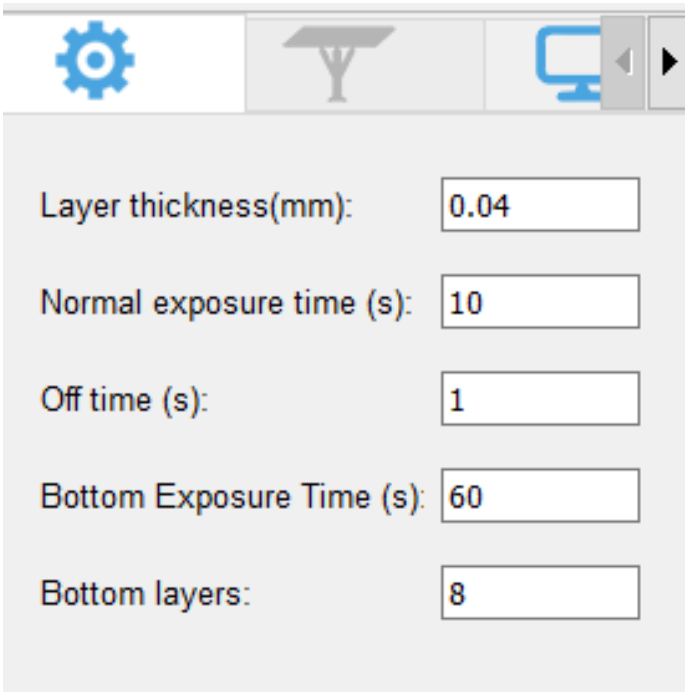


Figura 46: Parámetros usados en el SLICER

El manejo de la resina es de suma importancia para obtener buenos resultados en la impresión de objetos, ya que si no se siguen algunas condiciones para poder imprimir, el material no es curado. Los parámetros que se manejan con la resina son: los tiempos de curado que se tienen entre cada fase de la impresión, esto incluye los tiempos que se usan en la base del objeto como los tiempos normales de exposición del objeto a luz UV y hasta el tiempo que el objeto no recibe luz. Todos estos son importantes ya que de otro modo,

el material se pega al VAT o las capas se despegan de otras capas causando que el objeto tenga agujeros que pueden comprometer la integridad del mismo, hasta el objeto cayéndose de la placa. Estos tiempos fueron apuntados en cada impresión realizada con el fin de saber que parámetros son correctos al momento de querer imprimir un objeto con características similares al anterior.

En varias ocasiones se tuvo que hacer un proceso iterativo de impresión en la cual se fueron variando los parámetros de tiempo que usa este tipo de proceso de impresión. Variando solo uno de los tiempos se pudo obtener resultados rápidos para poder imprimir objetos. La resina flexible necesitó un proceso más extenso debido a la naturaleza del material, el cual, no puede alejarse mucho el tiempo de exposición necesario debido a que este material se estira y se cae muy fácilmente pero si es mucho el tiempo de exposición el objeto se pega al VAT causando una impresión fallida.

La resina rígida, siendo de alta calidad, se tuvieron muy pocas iteraciones al respecto. Cabe mencionar que una marca de resina no es igual a la anterior por lo que los parámetros usados en la resina rígida Anycubic no fueron los mismos para la resina Elegoo, esto se debe a que cada empresa tiene sus propias condiciones para su creación. Por ende, el resultado final para la impresión de resina para el mismo grueso de capa, difiere casi el doble del tiempo para la exposición normal en la marca Elegoo (10-15s) en comparación a la Anycubic (3-5s) esta diferencia puede deberse a muchos factores en la fabricación de los materiales pero las empresas encargadas de la creación de las mismas no tienen mucha información respecto al proceso que siguen para este tipo de resinas. En la siguiente tabla se muestra un resumen de los parámetros usados para la impresión de objetos con los distintos tipos de resina así como las marcas que se usaron.

Resina	**Marca**	**Normal exposure time (s)**	**Off time (s)**	**Bottom Exposure time (s)**
Flexible	Photocentric3D	25-30	1	80-85
Rígida	Anycubic	4-6	4-5	60-80
Rígida	Elegoo	10-15	1-3	60-70

Cuadro 1: Resumen de parámetros para impresión de objetos en resina

La resina flexible sin embargo tuvo muchas complicaciones al iniciar su uso, luego de varios días probando parámetros distintos se llego a un rango el cual hace que las impresiones duraran mucho más en tiempo en comparación a las resinas rígidas teniendo un tiempo de exposición normal de hasta 25 segundos. Esta diferencia es algo que se debe tomar en cuenta al momento de hacer una decisión respecto de a que material se quiere usar para imprimir un corazón, se sacrifica detalle por rapidez y viceversa.

Termoplásticos

Los parámetros usados en los termoplásticos, difiere de sobremanera a como funciona la resina. Los termoplásticos no requieren tiempos de cada uno de los tiempos del proceso de impresión. Estos tiempos no son los de exposición de luz debido a que se usan solo temperaturas y velocidades para la deposición de filamento. La velocidad es el valor más importante dentro de la impresión con tecnología FDM, este es el parámetro al que más hay que prestar atención que se tiene para la impresión de los objetos en proceso FDM. Se

usaron tres velocidades distintas de impresión para los corazones, lo que se diferencia del otro tipo de proceso es que la velocidad de impresión del proceso DLP se debe a la suma de los tiempos de exposición. En comparación, el proceso FDM tiene que moverse en al menos dos ejes del plano cartesiano, esto añade tiempo cuando el objeto es grande o cuando el objeto es complejo por lo que e tiempo de impresión es mucho mayor al tiempo de DLP.

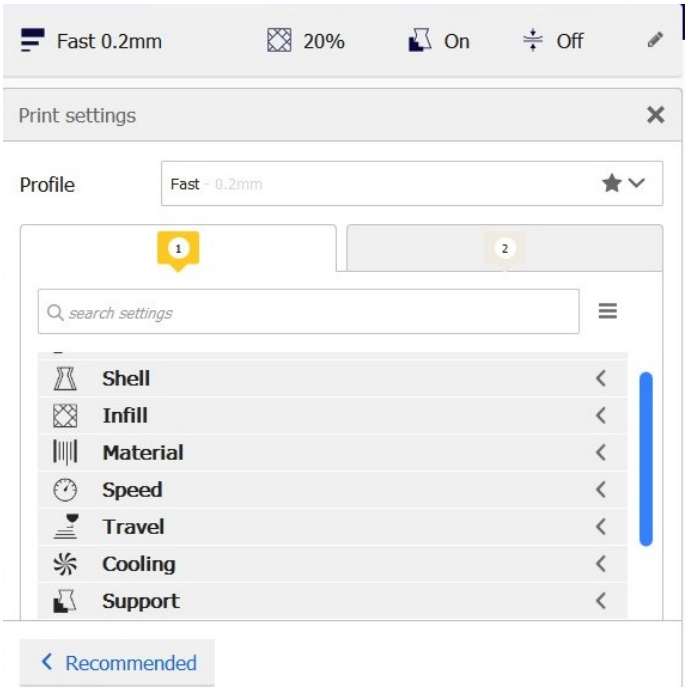


Figura 47: Parámetros proceso FDM

Otro parámetro importante para la impresión de filamento de termoplásticos se trata del grueso de capa, al igual que con el sistema de DLP el grueso de capa añade tiempo de impresión debido a que para poder crear los objetos se requieren más capas de impresión cuando el grueso de capa es muy pequeño. La impresora de resina es capaz de tener una definición de grueso de capa de hasta 0.01 milímetros mientras que el proceso FDM tiene 0.1 milímetros como mínimo. De esta forma el proceso DLP puede llegar a ser muy tardado y llevar mucho tiempo de impresión pero la definición y detalle es aceptable para su estudio. En el proceso FDM, el grueso de capa aumenta de sobremanera el tiempo de impresión de objeto pero que de igual manera no logra mejorar el detalle de los objetos, por lo que los objetos al final logra eliminar detalles que no deberían estar presentes, en este caso cuando las capas de filamento no se adhieren de forma correcta y se crean agujeros. El detalle que logra este proceso no es tan significativa como para considerar el tiempo de impresión elevado que se tiene para poder imprimir corazones. En el caso de este proyecto, se hallaron que las impresiones hechas en gruesos de capa no tan finos y a velocidades no tan pequeñas se tendrá un objeto ligeramente menos detallado y que se compara directamente con el objeto con los parámetros más finos que se pueden lograr con el proceso de impresión FDM.

Un parámetro importante en el uso de termoplásticos, se trata de la temperatura de fusión del material, no se requiere que este parámetro cambie a menos que el material lo especifique. Para poder imprimir corazones flexibles en el proceso FDM se usó TPU con el

cual se tiene buenas propiedades mecánicas elásticas, y por ende se es capaz de crear un objeto a partir de este tipo de material. Sin embargo, este requiere un ligero aumento en la temperatura de extrusión, esta temperatura es tomada en cuenta debido a que si no se varia para ser aún más caliente, las capas de material no se adhieren de forma correcta al objeto. Este problema es muy común en este tipo de proceso pero se da de una forma aun más notoria cuando se usa el proceso FDM. Ahora bien, existen otros parámetros de impresión de objetos que pueden ser alterados y una forma bastante eficiente de arreglar el problema de adhesión se trata del relleno del material. Este relleno se dejó estandarizado para todos los objetos impresos con PLA y también en la mayoría de los objetos impresos en TPU. Este relleno consiste del 60 por ciento del objeto y da buenas propiedades mecánicas que permiten que el objeto dure lo suficiente como para hacer pruebas.

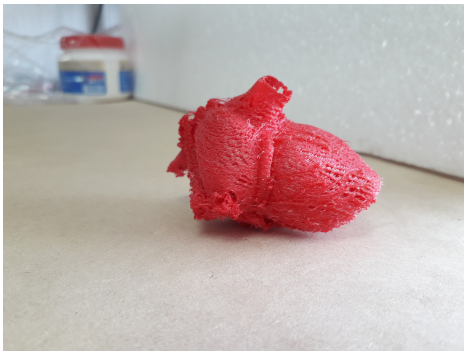


Figura 48: Corazón hecho con TPU con 60 por ciento de relleno

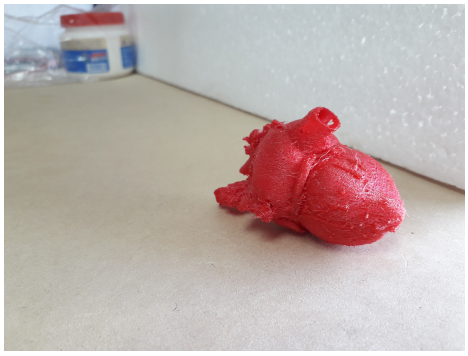


Figura 49: Corazón hecho con TPU con 80 por ciento de relleno

8.3. Post-procesamiento

El post-procesamiento es aquel proceso que se le hace al objeto luego de haber sido impreso, eliminando el exceso de material y que mejora de manera significativa la forma en la que se detallan los objetos. Por una gran duración del proyecto, el post-procesamiento que se le hicieron a los objetos impresos en resina se dan mediante una exposición a luz UV, pero como la fuente de esta luz no es fue de forma artificial y por ende concentrada se tuvieron que dejar los objetos impresos bajo el sol. Esto sí ayuda al objeto a terminar de curar el material, sin embargo conlleva mucho tiempo expuesto a otros factores climáticos que pueden afectar de sobremanera al objeto. Cuando los objetos en cuestión se dejan bajo la intemperie, se logran los resultados esperados por la luz UV en el transcurso del día, pero la luz solar no toca uniformemente al objeto y no se logran los efectos deseados, en muchos de los casos los objetos no logran curar por completo la resina sobrante. En el caso de la resina flexible se dio un efecto inesperado, la resina creó una capa pegajosa en la superficie del objeto y da a entender que el objeto no esta limpio y que no se logro el efecto esperado además de complicar las propiedades mecánicas del material haciendo que muchas de las capas de dicho objeto se despeguen este efecto se muestra en la figura a continuación en la cual se mira el disco de una vertebra la cual después del post-procesado se arruina; sin embargo, el material "si logróçurarse y adherirse pero con este efecto que se atribuye a otros factores ambientales como la humedad o el viento. En el caso de la resina rígida, la luz solar no es capaz de curar rápidamente el material, por lo que el objeto debe quedarse por mucho

tiempo bajo el sol para que este tenga el efecto deseado.



Figura 50: Capas despegadas del disco

En la figura a continuación, se mira un ejemplo de cómo el post-procesamiento crea una capa de resina que es pegajosa y captura cualquier tipo de viruta o basura en el ambiente. Este tipo de efecto tiene dificultades para poder realizar un análisis superficial de los objetos ya que puede afectar los detalles superficiales que se tratan de mantener en la superficie de los corazones. Un post-procesamiento que sea más concentrado sobre el objeto es necesario para poder mantener sus propiedades intactas y por ende evitar este efecto indeseado en los corazones.



Figura 51: Capa pegajosa

Luego de haber hecho varias impresiones, se logra obtener una fuente de luz UV artificial y que el investigador es capaz de redirigir y concentrar completamente sobre el objeto. Para lograr este objetivo se construyó una caja UV. La caja está repleta de un material reflejante

que actúan como reflectores y que es capaz de rebotar toda la luz en el objeto en cualquier dirección. Este material reflejante es muy fácil de conseguir y para este proyecto se uso aluminio, el aluminio refleja de manera muy efectiva la luz UV, por lo que los objetos dentro de esta caja pueden tener un post-procesamiento bastante rápido y efectivo. Lo que se tardaba todo un día en completarse, dentro de esta caja se lleva hasta 10 minutos en completarse. En la siguiente figura se muestra la caja que se construyó para poder llevar a cabo el post-procesamiento de los objetos.

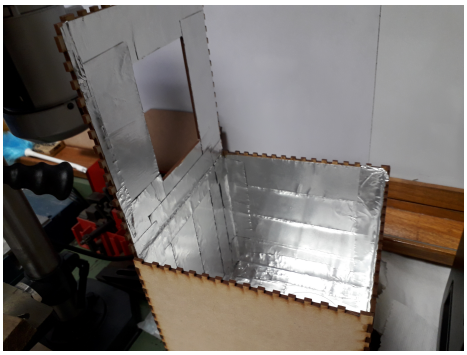


Figura 52: Caja reflectora

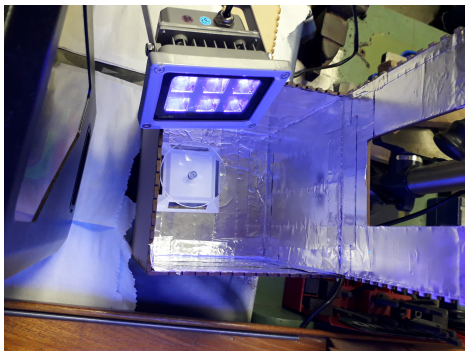


Figura 53: Caja reflectora con luz UV

Ahora bien, la caja reflectora tuvo un efecto imprevisto sobre los objetos. Al curar el material sobrante por un largo periodo de tiempo este empieza a quemarse. Este quemado puede notarse en varios objetos antes y después del post-procesamiento y un parámetro adicional que se debe tomar en consideración cuando se quieren tener objetos de calidad, pero si en dado caso no importa que el efecto que se da entonces este parámetro extra puede ignorarse; el parámetro adicional al que se refiere es el tiempo de post-procesamiento y este tiempo se considera cuando no se quiere quemar el material y solo quiere curarse. En las figuras a continuación se pueden ver los efectos de la caja reflectora sobre una llanta, se tomaron fotos en intervalos de dos minutos durante diez minutos para poder tener una comparación bastante lineal en cuanto al efecto causado por la caja.

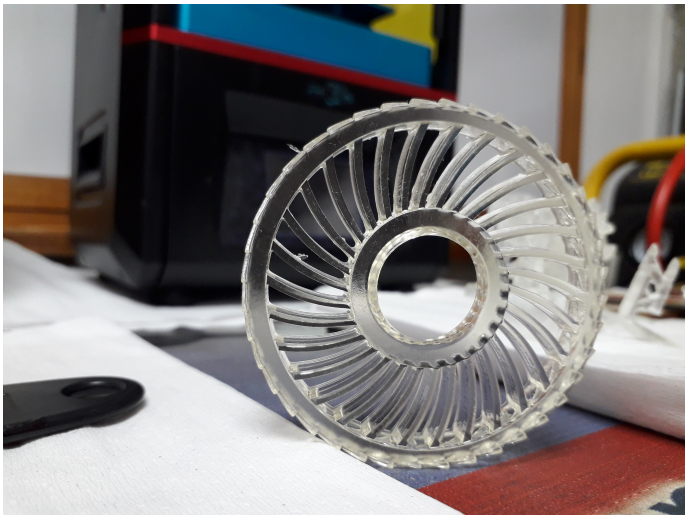


Figura 54: Llanta antes del post-procesado

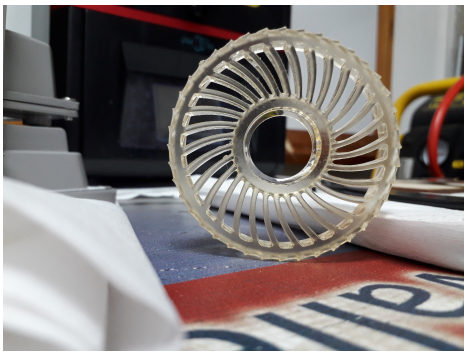


Figura 55: Llanta dos minutos después del post-procesado

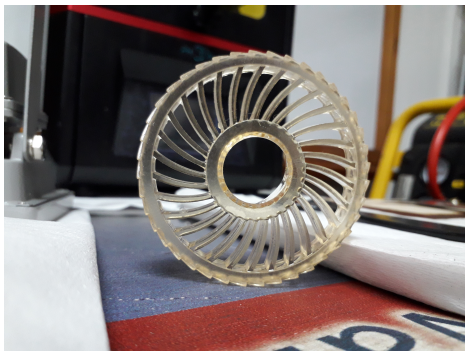


Figura 56: Llanta cuatro minutos después del post-procesado



Figura 57: Llanta seis minutos después del post-procesado

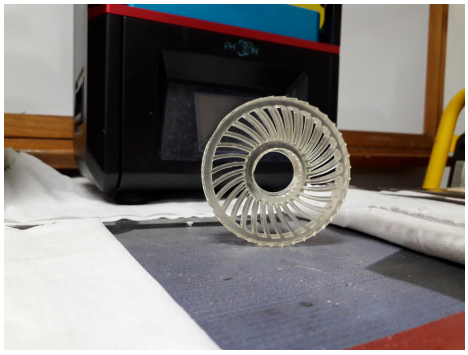


Figura 58: Llanta ocho minutos después del post-procesado

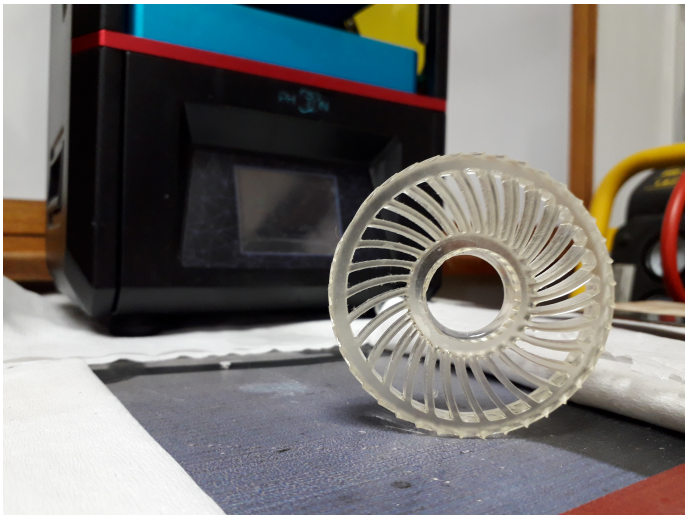


Figura 59: Llanta diez minutos después del post-procesado

Como se observa en las figuras, los objetos muestran partes y lados que están de color café, a diferencia de los objetos que no pasaron por este tipo de proceso los colores son transparentes. El post-procesado de los objetos, ayuda mucho en los detalles superficiales y

mejora también algunas propiedades mecánicas del objetos haciéndolo más rígido y difícil de quebrar. El único problema es el mencionado con respecto a las quemaduras, pero este tipo de problemas no se darán en colores distintos, con otros colores no se nota este tipo de efectos de proceso.

En la investigación que se encuentra en el marco teórico se encontraron varios tipos de post-procesamiento que pueden ser usados para mejorar la calidad y el detalle de los objetos para tener objetos mejor definidos. Luego de elegir el mejor de las impresiones hechas en este tipo de proceso, se hizo un post-procesamiento al peor renglón de impresiones hechas, por lo que un post-procesamiento es necesario para verificar si esto puede llegar a un nivel aceptable de detalle superficial. El proceso que se siguió para este objeto fue el de aplicar un material líquido que mejora de manera significativa las propiedades del objeto. En alguno de los procesos se pude ver un efecto no deseado en los objetos, algunos procesos empeoran el detalle de los objetos a nivel superficial, muchos de estos detalles se pierden cuando el uso de materiales de post-procesamiento es el recomendado por guías de internet. En la figura a continuación se muestra el proceso que se llevo combinando epoxi y pintura, proceso el cual hizo que los detalles se perdieran de manera significativa.

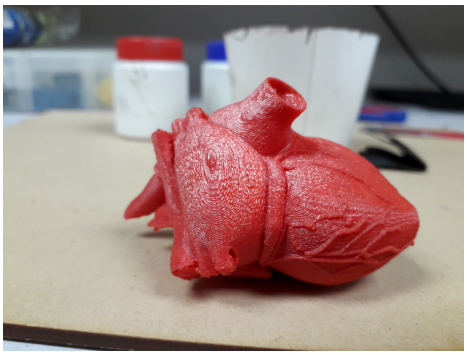


Figura 60: Corazón primera etapa del post-procesamiento (antes)

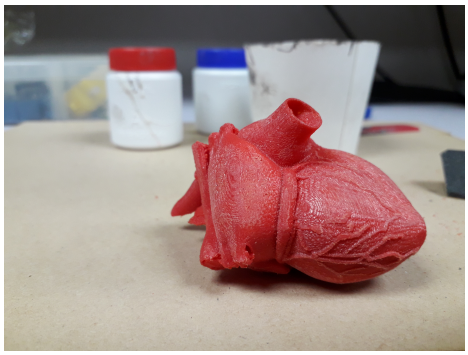


Figura 61: Corazón segunda etapa del post-procesamiento (lijado)



Figura 62: Corazón tercera etapa del post-procesamiento (epoxi)

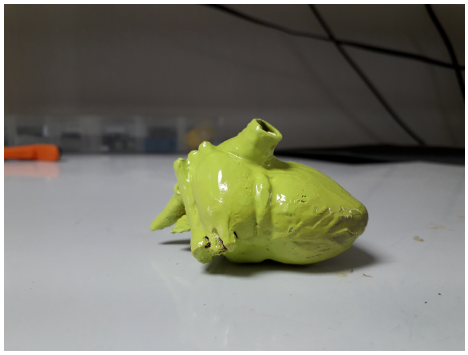


Figura 63: Corazón cuarta etapa del post-procesamiento (pintura)

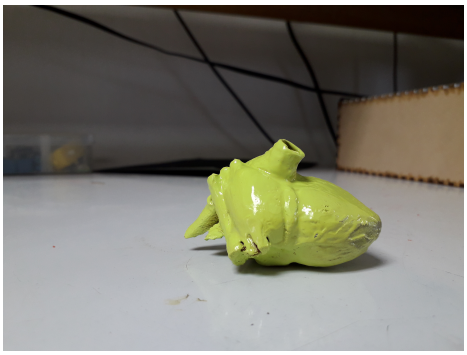


Figura 64: Corazón quinta etapa del post-procesamiento (encerado)



Figura 65: Corazón sexta etapa del post-procesamiento (después)

En el caso de este post-procesamiento, se hicieron varios procesos que se encontraron que podrían funcionar en en cuanto a la mejora de estos objetos. Estos se tratan como parte principal lijar el objeto para poder suavizar el objeto, con esto se refiere a las capas que se forman cuando se termina de imprimir un objeto. En la figura a continuación se mira un ejemplo de cómo este proceso no funciona en objetos de alta complejidad como las que son los corazones; este proceso es más fácil en objetos que son más sencillos geométricamente y que se usan para piezas de prototipos las cuales serán usado de forma más mecánica. En las figuras que se mencionaron con anterioridad se muestra un antes y después de lijar en el proceso que se tomó para tratar de mejorar el objeto de la mejor forma posible, pero en este caso no se pudo lograr, este caso es en el cual solo se enceró el objeto después de lijarlo.

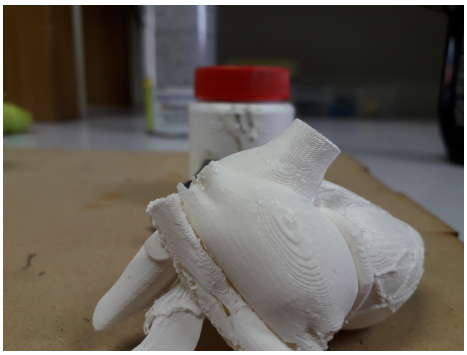


Figura 66: Corazón encerado antes de lijar

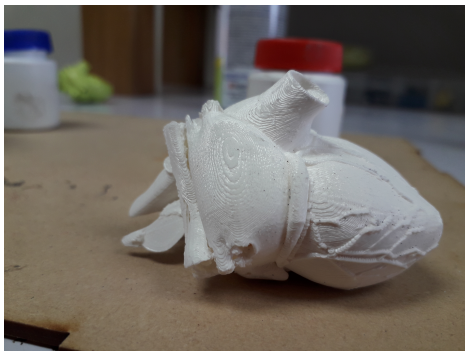


Figura 67: Corazón encerado después de lijar

Otros tipos de proceso se siguieron para poder encontrar el mejor tipo de proceso posible, se usaron varias formas como el uso de epoxi para poder cerrar las grietas que se forman cuando una impresión no adhiere sus capas por completos. Otro proceso realizado fue la aplicación de pintura más una base, esto permite que las capas y el acabado superficial pueda suavizarse de una forma fácil y rápida y que los doctores en algún momento puedan usar para tratar los corazones de una manera rápida y sin necesidad de complicar mucho el post-procesamiento. El último tipo de procesamiento que se usó, se trata del derretimiento de objetos mediante el uso de vapores de acetona, este proceso es más tardado y se requiere el uso de líquidos tóxicos para el humano. Este proceso supone una mejora en el objeto de

manera significativa. En las figuras a continuación se muestra el proceso que se siguió para conseguir el mejor tipo de post-procesado posible en la cual se uso acetona.



Figura 68: Corazón antes de aplicar post-procesamiento

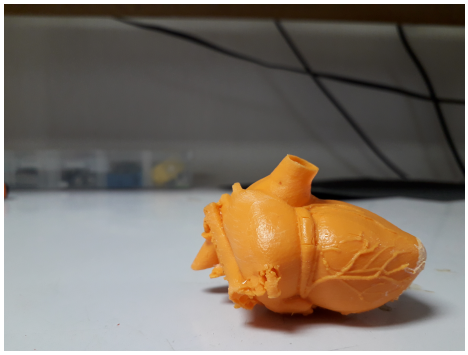


Figura 69: Corazón antes de aplicar post-procesamiento

Otros tipos de proceso se siguieron para todos los corazones que tenían pobre adhesión de capas, estos fueron los corazones que se imprimieron con un grueso de capa de 0.2 mm. Todos estos post-procesamientos se hicieron para poder comparar el mejor, algunos procesos se hicieron en su totalidad, usando todos los materiales a disposición, pero otros procesos se hicieron usando no más de dos materiales de tratamiento, con tal de poder comparar directamente los corazones tratados con los que no.

En el anexo se pueden notar todas las figuras que, en secuencia, muestran los distintos procesos que se siguieron en los corazones. Uno de estos procesos que se siguieron es el mismo que se siguió con epoxi, pintura y cera, pero de una forma menos prominente con esto se logra no saturar los objetos con material que quita el detalle superficial de los corazones de una manera que no se entienda lo que se ve, pero con este proceso que se logra más rápido se tiene una mejora considerable sin perder tanto detalle superficial.

8.4. Selección de materiales

La selección de materiales no se se basa en los materiales de impresión que se usaron debido a que estos, como se mencionó en secciones anteriores, se eligieron según los procesos de impresión elegidos, estos procesos siendo evidentemente los de FDM y DLP. La selección de materiales a las que se refiere es capítulo se trata de los materiales de trabajo.

Los materiales de trabajo se dan a entender al proceso que se debe de tener para la impresión exitosa de los corazones tridimensionales. Dichos materiales entonces, complementan de sobremanera la forma en la que se trabaja con los objetos y la forma en la que se tienen los mejores modelos de corazones que se pueden obtener gracias a los sistemas disponibles. Los materiales para la impresión para el proceso de resina se definen en el anexo en el cual se detalla el uso de la impresora y de todos los materiales que se tienen que tener a disposición para poder sacar impresiones y mantener el espacio libre de suciedad. Estos materiales se dividen en tres etapas del proceso de impresión: impresión, limpieza y post-procesado. En la etapa de impresión se tienen varios tipos de materiales, desde la impresora en si hasta los

componentes adicionales que se deben mantener al alcance de la mano para evitar desastres al momento de imprimir.

Cuando se inició el proyecto no se tomaron en cuenta dichos componentes adicionales y esto resultó en un espacio contaminado de resina, lo cual debe evitarse a toda costa cuando se toma en cuenta la toxicidad de la resina. Para evitar todos estos inconvenientes se delimitó un espacio donde se tiene un contenedor o un material absorbente que pueda soportar cualquier tipo de riego debido a la resina y que está antes de la impresión así como los residuos que dejan son líquidos y difíciles de manejar por lo que siempre se tendrá algún tipo de accidente. Los materiales que deben usarse mientras se rellena el tanque de la impresora así como cuando la resina es manipulada se trata de los artículos de seguridad, estos se describen de mejor manera en el manual del usuario de la impresora. En las figuras a continuación se detalla el área de trabajo que se tiene para el uso de la impresora.



Figura 70: Área de trabajo de impresora Anycubic

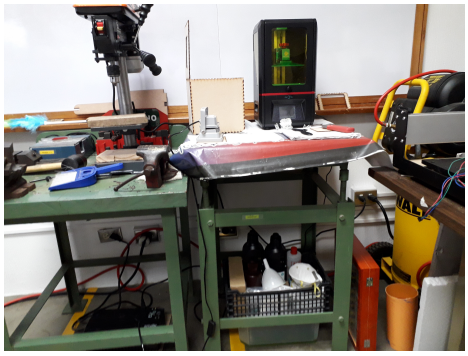


Figura 71: Área de trabajo extendido

Se pasa a la etapa de limpieza, en la cual se debe tomar en cuenta que se manejan distintos tipos de químicos y líquidos los cuales pueden resultar dañinos cuando entran en contacto con la piel del operador. Para el caso de la resina, la forma de limpiar el objeto de los residuos que esta deja es mediante el uso de alcohol isopropílico o mediante el uso de líquidos especiales de limpieza de resina, no importando cuál de los materiales se usen estos siempre terminan en el contenedor para no desperdiciar material, así como para evitar que el material está en contacto con alguna superficie del área de trabajo.

Por último se tiene la etapa del post-procesamiento, en este caso, se trata de la caja reflectora que se menciona en secciones anteriores. Esta caja está diseñada para que el objeto se quede dentro de ella mientras la luz UV se concentra en cualquier ángulo del objeto para terminar de curarlo. Esta caja por muy simple que parezca es de de gran utilidad para el trabajo de impresión exitoso de los objetos, pero es igualmente dañino para el operador. La luz UV puede causar ceguera cuando se tiene un periodo de tiempo significativo, esta también puede causar daños en la piel por lo que esta caja tiene que ser aislada con tal de que las personas y operarios no entren en contacto con esta tan fácilmente.

CAPÍTULO 9

Validación

9.1. Prototipos y descripción

Para comenzar con las pruebas e impresiones, se analizó un modelo anatómico del corazón encontrado en internet [59]. Dicho modelo se tiene como primera aproximación para la resolución de las impresiones. Debido a la naturaleza del proyecto, no se puede esperar a tener modelos que se generan en la primera parte del proyecto, sino que se tiene que empezar con algunos ejemplos con tal poder aplicarlos a los modelos reales que de pacientes que tienen alguna complicación. La primera aproximación con FDM, se realiza con tal de poder generar detalles superficiales que no requieren llegar al detalle que requieren pacientes pero que sirve como punto de partida para el resto de comparaciones tanto superficiales como internas. La aproximación que se hace con el sistema DLP, se realiza con tal de poder obtener detalles de todo tipo en cualquier punto del corazón que son necesarios y que requieren visualización y validación para su uso en la medicina. Con tal comparación, se dará a conocer la mejor aproximación con parámetros predeterminados para la impresión de corazones con detalle milimétrico.

9.2. Comparación

Las comparaciones hechas se hacen en la exactitud de dimensiones que se logran. Esto se hace con tal de poder satisfacer dos de los objetivos específicos los cuales tratan de poder validar el uso de la impresora DLP como el proceso más viable, tanto por las limitantes que se tienen sino por la calidad y detalle que se obtiene teniendo un sistema que, siendo barato, puede ayudar de mejor forma a la comunidad médica. Este proceso, es el más indicado según lo investigado en el marco teórico, pero para poder dar una validez a su uso es necesario

hacer las comparaciones que se requieren con impresoras aun más baratas según la marca o disponibilidad que, en este caso, se tratan de impresoras FDM.

Para hacer estas comparaciones, se requiere obtener la mejor impresión posible en FDM con distintos materiales disponibles y compararla con la mejor impresión posible en DLP. Por último, gracias al laboratorio D-Hive se tiene la posibilidad de imprimir corazones en una impresora Polyjet la cual es de la marca Stratasys que tiene un nivel industrial; este nivel y posición en el mercado hace que esta impresora sea la mejor opción. Debido a la alta calidad de la impresora, pero el altísimo costo que tiene el material y su uso, se tiene que limitar el número de impresiones ya que esto se pasa de una limitante económica. Siendo el proceso DLP el más accesible, tanto para el investigador como para la comunidad médica, es el elegido para apoyar a esta última en la tarea que tienen de operar corazones. La ventaja que se tiene es que, a pesar de ser mucho más barata que otros sistemas, mantiene un nivel de detalle y calidad que se necesitan y el cual es conveniente indagar más en su proceso, por lo cual, se hacen muchas iteraciones de un mismo corazón genérico y anatómicamente correcto para poder evaluar la calidad que se obtiene para luego imprimir corazones únicos de cada paciente. En las siguientes figuras, se pueden apreciar las "pruebas de tortura"que se utilizan para reconocer el estado de las impresoras en las cuales se pueden notar los detalles que presentan.

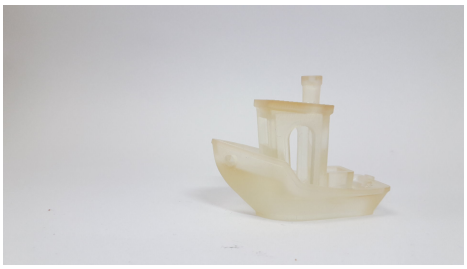


Figura 72: Prueba Bote DLP con resina rígida



Figura 73: Prueba Bote DLP con resina flexible



Figura 74: Prueba Bote FDM con PLA



Figura 75: Prueba Bote FDM con TPU



Figura 76: Prueba Bote SLS

Para continuar con las comparaciones, se hicieron varias impresiones en el sistema FDM, en las cuales se varían tanto la velocidad como el grueso de la capa teniendo un total de quince corazones. Debido a la naturaleza de la impresión FDM, se observan las lineas o capas que conforman al objeto, pero las cuales no caben dentro del modelo de un corazón, con tales cambios en las impresiones se tratan de validar dos cosas: la primera la capacidad de la impresora de imprimir objetos con tal complejidad, con esto se verifica si esta impresora puede proveer prototipos rápidamente; la segunda cosa que valida es el detalle que este tendrá, cual es la mejor configuración que se usa con tal de obtener los mismos resultados. Con tales impresiones se elegirá el mejor acabado y el mejor detalle con tal de poder hacer comparaciones directas con la mejor impresión que se obtiene con el proceso DLP. Con las impresoras FDM, se tiene una limitada cantidad de impresiones definida con anterioridad debido al gran uso que se le dan a estos sistemas, pero con tales impresiones se pueden validar de sobremanera la calidad que se obtiene de ellas e incluso alguna recomendación para futuros desarrollos de este trabajo.



Figura 77: Corazón con grueso de capa 0.2mm a 70mm/s

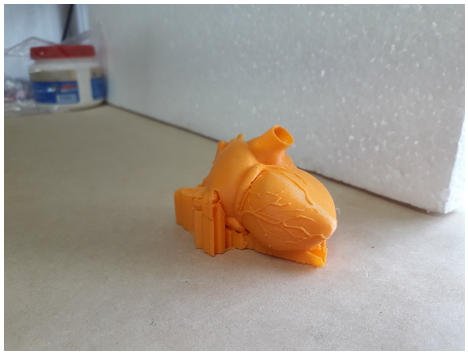


Figura 78: Corazón con grueso de capa 0.11mm a 60mm/s

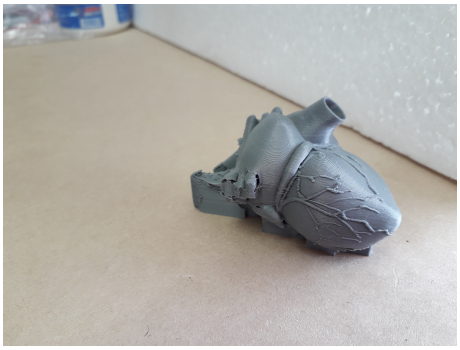


Figura 79: Corazón con grueso de capa 0.15mm a 65mm/s

Terminando la impresión de dichos prototipos, se procede a imprimir en el sistema DLP. Sabiendo que este proceso elimina visualmente las capas, se trata de obtener el mejor acabado y detalle posible eliminando la comparación del grueso de capa y de velocidad. Con este sistema se trata de obtener la mayor cantidad de objetos posibles, esto se hace con el fin de modificar o perfeccionar de sobremanera los objetos. En las figuras a continuación se observa una comparación directa de los distintos tipos de proceso que se usaron para la impresión de corazones.

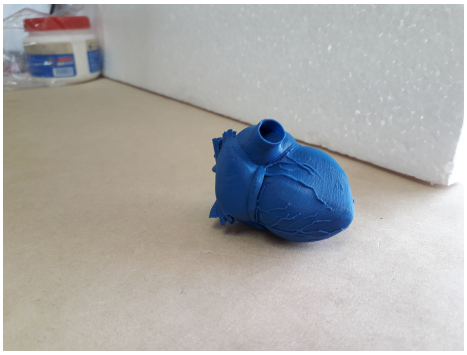


Figura 80: Corazón impreso con PLA



Figura 81: Corazón impreso con Resina rígida



Figura 82: Corazón impreso con resina flexible



Figura 83: Corazón impreso con resina en proceso polyjet

Por último, estas comparaciones pasan por un cierto proceso de filtrado, con esto se refiere a que el investigador con ayuda de profesionales tratan de buscar los mejores prototipos hechos en cualquiera de los casos. Estos casos se refieren a la calidad de la superficie como al nivel de detalle interno de los corazones, siguiendo por los parámetros de impresión. Todas estas condiciones han de evaluarse con tal de poder filtrar los mejores prototipos de corazones, para que luego estos pasen por el proceso de validación que profesionales médicos le den. Esta última fase del proyecto puede que saque resultados inconclusos como obtener resultados aceptables pero que, en cualquiera de los casos, se trabaja sobre ellos y seguir perfeccionando el proceso de impresión para luego obtener resultados que pueden ser de apoyo a cualquier profesional médico.

Para cumplir con el objetivo específico de comparar los procesos y las impresiones se hicieron varias pruebas. Estas pruebas se realizaron en las impresoras de resina DLP y de filamento PLA y con los materiales que se tenían a disposición. Para poder comparar de mejor manera los objetos que se imprimieron, se hicieron las pruebas con materiales rígidos y flexibles. Estas impresiones fueron medidas en varias dimensiones conocidas para poder comprobar que lo que se obtuvo si era fiel a lo que se quería obtener.

A la vez, la diferencia de impresión entre materiales ayudo a comprobar si este puede imprimir el objeto que se espera. En las siguientes tablas, se visualiza el porcentaje de error que se obtiene después de analizar los datos recolectados de las mediciones hechas para cada característica de los objetos. La primera impresión que se hizo fue creada en linea por [60]; este objeto, al igual que los demás, se hicieron con varias medidas para que poder comprobar la impresora. Esta primera prueba se le tuvo que aplicar una escala de tamaño para que la impresora DLP pudiera imprimirlo y que cupiera en el espacio de trabajo.

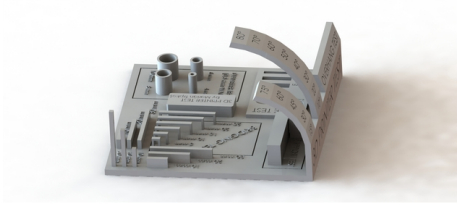


Figura 84: Primer objeto estándar de comparación [60]

Valor original (mm)	**Valor a medir (mm)**	**Resultados (mm)**			
Diámetros		Resina rigida	PLA	Resina flexible	TPU
10	6	5.99	6.06	6.11	6.72
8	4.8	4.85	4.84	4.73	5.22
6	3.6	3.66	3.8	3.37	3.86
4	2.4	2.6	2.51	2.56	2.55
Largos					
10	6	6.1	6.35	6.62	6.17
20	12	12.09	12.14	12.31	12.15
30	18	18.1	18.15	17.66	17.8
10	6	6.09	6.16	5.15	6.16
20	12	12.07	12.14	11.83	11.9
30	18	18.1	18.2	18.03	18.1
Bridge test					
2	1.2	2.5	2.7	0	2.8
5	3	4.3	4.48	0	4.49
10	6	7.3	7.47	0	7.61
15	9	10.2	10.4	0	10.42
20	12	13.24	13.41	0	13.69
25	15	16.2	16.4	0	16.44
Hole test					
8	4.8	4.6	5.25	4.5	5.32
6	3.6	3.5	3.3	3.77	3.6
4	2.4	2.2	2	1.57	2.25
3	1.8	1.6	1.81	2.78	2.33
2	1.2	1.1	1.21	1.33	1.44
4	2.4	2.2	2.46	2.51	2.59

Cuadro 2: Parámetros medidos del objeto 'All In One 3D Test'

De estos parámetros, se realizaron análisis de porcentajes de error, con ello se tienen datos que indican de mejor manera si el proceso fue o no exitoso en el impresión de objetos.

	Error %			
	Resina rígida	**PLA**	**Resina flexible**	**TPU**
	0.16667	1	1.83333	12
	1.04167	0.83333	1.45833	8.75
	1.66667	5.55556	6.38889	7.22222
	8.33333	4.58333	6.66667	6.25
	2.8021	**2.9931**	**4.0868**	**8.5556**
	1.66667	5.83333	10.3333	2.83333
	0.75	1.16667	2.58333	1.25
	0.55556	0.83333	1.88889	1.11111
	1.5	2.66667	14.1667	2.66667
	0.58333	1.16667	1.41667	0.83333
	0.55556	1.11111	0.16667	0.55556
	0.9352	**2.1296**	**5.0926**	**1.5417**
	108.333	125	100	133.333
	43.3333	49.3333	100	49.6667
	21.6667	24.5	100	26.8333
	13.3333	15.5556	100	15.7778
	10.3333	11.75	100	14.0833
	8	9.33333	100	9.6
	34.167	**39.245**	**100**	**41.549**
	4.16667	9.375	6.25	10.8333
	2.77778	8.33333	4.72222	1.2E-14
	8.33333	16.6667	34.5833	6.25
	11.1111	0.55556	54.4444	29.4444
	8.33333	0.83333	10.8333	20
	8.33333	2.5	4.58333	7.91667
	7.1759	**6.3773**	**19.236**	**12.407**
Promedio	**11.27**	**12.686**	**32.104**	**16.013**

Cuadro 3: Porcentajes de error para objeto 'All In One 3D Test'

Valor original (mm)	**Valor a medir (mm)**	**Resultados (mm)**			
Diámetros		Resina rígida	PLA	Resina flexible	TPU
6	3.6	4.1	4.23	3.75	3.95
12	7.2	8.01	8.09	7.72	8.01
18	10.8	12.09	12.05	11.71	11.85
24	14.4	16.03	16.18	15.8	15.9
30	18	20.04	20.14	19.69	19.52
Largos					
54	32.4	32.45	32.66	32.59	32.6
54	32.4	32.45	32.3	32.81	32.75
70	42	41.89	42.05	41.5	41.45
55	33	32.13	32.15	32.2	18.6
55	33	32.77	32.72	23.92	31.6
Bridge test					
30	18	17.04	17.17	17.02	16.66
40	24	25.01	24.91	25.89	24.46
50	30	32.99	32.97	33.62	32.62
70	42	41.33	40.99	42.56	39.84
80	48	49.11	48.94	57.28	47.5
Hole test					
5	3	5.5	6.06	6.64	5.98
4.5	2.7	5.7	5.8	5.45	5.44
5.5	3.3	5.82	5.91	5.54	5.67
6	3.6	5.97	6.03	5.63	5.92
6.5	3.9	6.12	6.29	5.73	6.03

Cuadro 4: Parámetros medidos del objeto 'Kickstarter FDM all in one 3D test'

El segundo objeto creado por [61] trata de una prueba de "todo en uno"parecida al anterior pero con la condición de que este esta hecho específicamente para impresoras FDM. Pero teniendo esto en cuenta, se quiso hacer esta prueba para comparar de mejor manera la calidad de las impresiones que puede obtenerse. Cabe mencionar que, el primer intento de impresión de este objeto falló en la impresora de filamento; se hizo una segunda iteración y se logró imprimir el objeto, pero este fallo queda anotado para la evaluación final. Este objeto, al igual que el anterior tuvo que aplicarse una escala a un 60 por ciento para que cupiera en el espacio de trabajo de la impresora DLP.

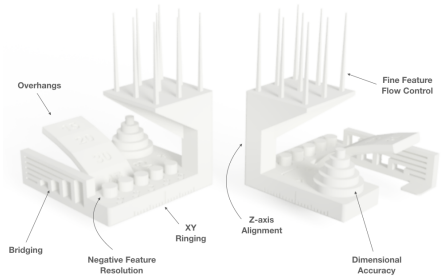


Figura 85: Segundo objeto estándar de comparación [61]

	Error			
	Resina rígida	**PLA**	**Resina flexible**	**TPU**
	13.88889	17.5	4.16667	9.72222
	11.25	12.3611	7.22222	11.25
	11.94444	11.5741	8.42593	9.72222
	11.31944	12.3611	9.72222	10.4167
	11.33333	11.8889	9.38889	8.44444
	11.94722	**13.137**	**7.78519**	**9.91111**
	0.154321	0.80247	0.58642	0.61728
	0.154321	0.30864	1.26543	1.08025
	0.261905	0.11905	1.19048	1.30952
	2.636364	2.57576	2.42424	43.6364
	0.69697	0.84848	27.5152	4.24242
	0.780776	**0.93088**	**6.59634**	**10.1772**
	5.333333	4.61111	5.44444	7.44444
	4.208333	3.79167	7.875	1.91667
	9.966667	9.9	12.0667	8.73333
	1.595238	2.40476	1.33333	5.14286
	2.3125	1.95833	19.3333	1.04167
	4.683214	**4.53317**	**9.21056**	**4.85579**
	83.33333	102	121.333	99.3333
	111.1111	114.815	101.852	101.481
	76.36364	79.0909	67.8788	71.8182
	65.83333	67.5	56.3889	64.4444
	56.92308	61.2821	46.9231	54.6154
	78.7129	**84.9376**	**78.8752**	**78.3386**
Promedio	**24.03103**	**25.8847**	**25.6168**	**25.8207**

Cuadro 5: Porcentajes de error para objeto 'Kickstarter FDM all in one 3D test'

El tercer objeto de prueba estándar se trata del conocido Benchy, los benchies ya son objetos que se usan para calibrar y probar impresoras. El benchy viene con un manual en línea donde se tienen todas las medidas del mismo y las que se tienen que encontrar en la impresión.

Valor original (mm)	**Valor a medir (mm)**	**Resultados (mm)**			
Diámetros		Resina rígida	PLA	Resina flexible	TPU
12	12	12.3	12.22	12.14	11.79
7	7	7.1	6.85	6.54	6.85
6	6	5.8	5.75	5.35	5.47
5.5	5.5	5.55	5.56	4.89	5.51
5.5	5.5	5.8	5.96	4.9	5.69
4	4	3.59	3.75	3.42	3.69
6	6	6.27	5.91	5.47	6.19
Largos					
60	60	61.5	60.65	60.36	58.99
48	48	48	47.81	48.1	47.69
31	31	31.11	31.22	30.81	30.19
23	23	23.12	23	22.8	22.95
15.5	15.5	15.36	15.35	15.42	15.27
12	12	12.18	12.5	11.94	12.05
10.81	10.81	10.91	10.68	10.73	10.55
10.5	10.5	10.51	10.3	10.63	10.67
9.5	9.5	9.28	10	10.2	10.26
Bridge test					
23	23	23	23	22.8	22.95
8.5	8.5	8.5	7.8	9.2	7.81
Hole test					
3	3	2.6	2.67	2.85	2.26
4	4	3.82	3.68	4.36	3.89
4	4	3.81	3.83	4.22	3.69
7	7	6.94	6.65	7.81	8.69
9	9	7.91	8.14	9.81	8.3
9	9	8.65	9.3	8.44	8.74
9.5	9.5	9.5	10	9.78	7.02
10.5	10.5	10.51	10.3	11.29	10.4

Cuadro 6: Parámetros medidos del objeto 'Benchy'



Figura 86: Tercer objeto estándar de comparación

Para terminar con las comparaciones de las impresoras, se usa la prueba de tortura con la que viene la impresora DLP, esta impresión se usa para verificar que la impresora esté bien calibrada y nivelada, pero también se comprueba la calidad de la impresión. Para probar si las impresoras pueden imprimir esta prueba, se usan todos lo materiales. Una observación que se hace, es que los materiales flexibles no pueden imprimir estructuras de este tipo. Mientras que la impresora DLP pudo sacar gran parte de la impresión, la impresora FDM no pudo sacar mucho más que la base del objeto.

	Error			
	Resina rígida	**PLA**	**Resina flexible**	**TPU**
	2.5	1.83333	1.16667	1.75
	1.42857	2.14286	6.57143	2.14286
	3.33333	4.16667	10.8333	8.83333
	0.90909	1.09091	11.0909	0.18182
	5.45455	8.36364	10.9091	3.45455
	10.25	6.25	14.5	7.75
	4.5	1.5	8.83333	3.16667
	4.0536	**3.6211**	**9.1293**	**3.897**
	2.5	1.08333	0.6	1.68333
	0	0.39583	0.20833	0.64583
	0.35484	0.70968	0.6129	2.6129
	0.52174	0	0.86957	0.21739
	0.90323	0.96774	0.51613	1.48387
	1.5	4.16667	0.5	0.41667
	0.92507	1.20259	0.74006	2.40518
	0.09524	1.90476	1.2381	1.61905
	2.31579	5.26316	7.36842	8
	1.0129	**1.7438**	**1.4059**	**2.1205**
	0	0	0.86957	0.21739
	0	8.23529	8.23529	8.11765
	0	**4.1176**	**4.5524**	**4.1675**
	13.3333	11	5	24.6667
	4.5	8	9	2.75
	4.75	4.25	5.5	7.75
	0.85714	5	11.5714	24.1429
	12.1111	9.55556	9	7.77778
	3.88889	3.33333	6.22222	2.88889
	0	5.26316	2.94737	26.1053
	0.09524	1.90476	7.52381	0.95238
	4.942	**6.0384**	**7.0956**	**12.129**
Promedio	**9.435**	**17.971**	**18.287**	**14.296**

Cuadro 7: Porcentajes de error de mediciones hechas en el 'Benchy'

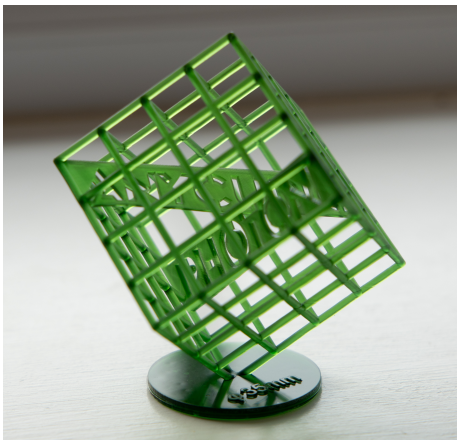


Figura 87: Último objeto estándar de comparación

	Error			
	Resina rígida	**PLA**	**Resina flexible**	**TPU**
	0.28571	1	1.14286	0.57143
	0.28571	**1**	**1.14286**	**0.57143**
	2.11628	1.16279	100	100
	1.72093	0.51163	100	100
	1.06977	1.46512	100	100
	1.81395	0.48837	100	100
	1.04651	0.60465	100	100
	1.2093	42.4419	100	100
	1.23256	0.11628	100	100
	1.46512	0.67442	100	100
	0.7907	1.97674	100	100
	2.02326	1.11628	100	100
	1.72093	1.04651	100	100
	1.11628	0.60465	100	100
	0.18909	1.03998	100	100
	1.34728	**4.0961**	**100**	**100**
Promedio	**0.8165**	**2.54805**	**50.5714**	**50.2857**

Cuadro 9: Porcentajes de error de mediciones hechas en el objeto 'PHOTON TEST'

Valor original (mm)	**Valor a medir (mm)**	**Resultados (mm)**			
Diametros		Resina rigida	PLA	Resina flexible	TPU
35	35	35.1	35.35	35.4	35.2
Largos					
43	1	43.91	43.5	0	0
43	2	43.74	43.22	0	0
43	3	43.46	43.63	0	0
43	4	43.78	43.21	0	0
43	5	43.45	43.26	0	0
43	6	43.52	24.75	0	0
43	7	43.53	42.95	0	0
43	8	43.63	43.29	0	0
43	9	43.34	43.85	0	0
43	10	43.87	42.52	0	0
43	11	43.74	43.45	0	0
43	12	43.48	42.74	0	0
74.04	13	73.9	74.81	0	0

Cuadro 8: Parámetros medidos del objeto 'PHOTON TEST'

Después de comparar todas las impresiones y teniendo los datos y sus porcentajes de error con respecto al valor real de los objetos, se llega a la conclusión de que, las impresiones hechas con el proceso DLP con el material de resina rígida, es la mejor opción para poder hacer los corazones. Estos corazones en su mayoría son de este material, pero esto no quiere decir que se descartan los demás. Con la resina flexible se hacen unas pocas impresiones con el fin de comparar el comportamiento de los materiales en los objetos, así como tener una alternativa para la impresión de corazones y lograr prácticas quirúrgicas exitosas.

Cabe mencionar que varias partes de los objetos y sus valores mejoraron de sobremanera con otros materiales y con el otro proceso (FDM). Con algunos materiales se obtuvieron datos iguales a los teóricos. En algunos de los procesos se obtuvieron muy buenos resultados con todos los materiales y procesos extra. Pero, en general, el proceso de DLP y usando resina rígida se obtuvieron los mejores resultados en todos los valores que se midieron.

9.3. Colaboración con los profesionales médicos

Gran parte del éxito del proyecto se debe al trabajo en conjunto hecho con los doctores, cardiólogos y asistentes en la Unidad de Cardiología (UNICAR). Gracias a la retroalimentación y estrecha correspondencia se logró llegar a varias conclusiones que son de utilidad y que se tomaron en consideración para poder completar el proyecto.



Figura 88: Conferencia con los doctores en UNICAR

Entre esta ayuda que se proporcionó, se lograron obtener los modelos que se esperaban para los corazones, debido a que, los doctores mencionaron su satisfacción con los modelos impresos y el alcance que estos tienen en el futuro. Esto dio un impulso al proyecto, debido a que los corazones que se imprimieron fueron exitosos en poder detallar estructuras clave que los doctores reconocieron inmediatamente.

Observando cómo los doctores se aproximan al proyecto y toman las muestras para poder analizarlas, prueban la eficacia que tiene el proceso de impresión en cuanto a lo que se esperaba de los corazones. En muchos casos, sin embargo, los profesionales médicos mencionaron hasta qué punto quisieran que llegara el proceso de impresión; esto pone un nivel muy alto en lo que se logra en la limitante de tiempo, pero que al continuar el proyecto en el futuro se tiene una meta muy clara en cuanto lo que se busca.



Figura 89: Conferencia con los doctores en UNICAR

Una de las observaciones que más se tomaron en cuenta con respecto al proyecto, es el hecho de que este proceso y metodología puede ser usada para crear un repertorio completo de patologías que, con los suficientes recursos, puede realizarse pero para ello se necesitan muchos modelos y casos generales y particulares. Empezando con esta labor, se utilizaron algunos de los modelos que se tienen para continuar con la creación del repertorio. Se tienen casos separados de hipoplastia ventricular, defecto atrial septal y coartación. Pero esto no es suficiente para poder definir un repertorio.

En colaboración con ingenieros biomédicos y con estudiantes de la universidad de Minnesota se llegó a definir el mini-repertorio de patologías con el defecto septal atrial (ASD por sus siglas en inglés) así como el defecto septal ventricular(VSD por sus siglas en inglés).

Este defecto se conoce literalmente como un .ªgujero en el corazón", conociéndolo como un hoyo entre los ventrículos izquierdo y derecho así como las aurículas.

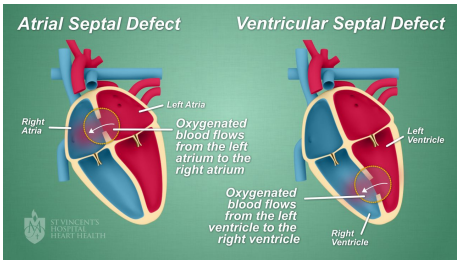


Figura 90: Croquis descriptivo de ASD y VSD en inglés [62]

En reuniones separadas con los doctores, se logró observar como este proyecto toma forma en manos de estos mismos. Inclusive queriendo aportar a los futuros resultados, mencionaron el uso de la resina flexible como el predilecto para la impresión de corazón, debido a que este hace más fácil la práctica de cirugías pero sin dejar atrás la preferencia en el uso del TPU. Habiendo dicho esto, se les mencionó que estos materiales comprometen el detalle de los modelos y por lo tanto no sería ideal su uso por el momento. Para arreglar el problema, se deben generar modelos en condiciones ejemplares desde el proceso de digitalización y seguir muy cuidadosamente en la impresión del mismo.

Se llegó a la más importante de las conclusiones cuando se trabaja con los doctores, el proceso que se les especifica tanto digital como impreso no es trabajo de los doctores. Con esto no se afirma que ellos no puedan hacerlo, pero se aclara que este trabajo tiene que llevarse a cabo en paralelo con doctores, radiólogos, biomédicos, ingenieros y alianzas con instituciones, esto se debe a que solo uno trabajando y tratando de entender todo el proceso, desde el reconocimiento de órganos hasta la impresión de los mismos no se puede lograr, pero que el trabajo colaborativo entre todos estos sí.

9.4. Manuales de uso

Para poder colaborar con los doctores y cualquiera que esté interesado en el proceso de impresión de corazones, se realizaron dos manuales con el fin de poder explicar lo básico para usar una impresora DLP y también usar un sofware Slicer necesario para poder preparar impresiones. Se hicieron dos manuales descriptivos sobre el uso de una impresora y otro para el uso del software.



Figura 91: Parte 1: Manual de uso y operación

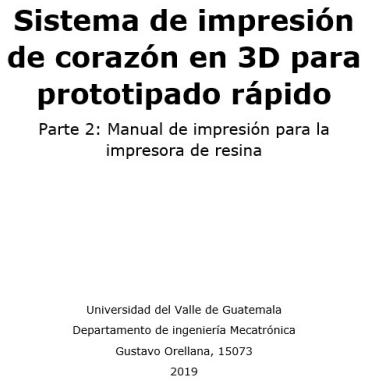


Figura 92: Parte 2: Manual de impresión

A la vez, se hicieron dos manuales en el formato HTML, que cualquiera es capaz de descargar y ver en cualquier dispositivo. Las versiones en HTML son manuales más rápidos, pero igualmente descriptivos con tal de poner a cualquier usuario en la misma página. Se probaron los manuales con varias personas para tener una opinión más amplia sobre la familiarización de los sistemas y procesos que se usan para imprimir. Con retroalimentación de estas personas, se mejoraron los manuales para que cualquiera pueda entenderlos. Las versiones HTML existen en los anexos pero no se pueden apreciar de la forma en la que fueron escritos y de la forma en que pueden visualizarse con algún navegador web.



Figura 93: Manual de uso



Figura 94: Manual de impresión

CAPÍTULO 10

Conclusiones

- El proceso de impresión de corazones mediante el uso de la tecnología DLP es más rápido y produce una mejor calidad en los detalles de los objetos impresos.
- Los corazones impresos con modelos obtenidos con tomografías son superiores en detalle y exactitud de dimensiones a los que se obtienen de ecocardiografías.
- El post-procesamiento mejora la calidad de los objetos impresos y es un proceso que se tiene que tener en cuenta al momento de imprimir corazones.
- El uso de programas de edición de modelos 3D son necesarios para la impresión de modelos con defectos.
- Es necesario contar con el apoyo de profesionales médicos para obtención de modelos 3D reales y
- La tiempo total de impresión de los corazones resulta beneficioso para los médicos debido a que se pueden estudiar las patologías rápidamente.
- A pesar de que los corazones impresos en TPU presentan propiedades más prácticas para la manipulación, el nivel de detalle que estos proveen imposibilita su utilización
- A pesar de que los corazones impresos en DLP presentan un nivel de detalle aceptable para su estudio, sus propiedades prácticas para la manipulación son muy pobres.

CAPÍTULO 11

Recomendaciones

- La siguiente fase de este proyecto, es poder imprimir tejido orgánico para luego poder imprimir órganos biocompatibles con seres humanos. La creación de tecnología capaz de imprimir tejido orgánico es importante para el futuro desarrollo de este proyecto, esto puede complementar de sobremanera el proyecto que se realizó y perfeccionar la técnica de impresión.
- La construcción de una impresora es muy beneficioso para la familiarización de los componentes y funcionamiento del proceso de impresión por lo que una fase de este proyecto puede ser la construcción de este mismo y tratar de mejorar el proceso de impresión.
- La creación de material orgánico que pueda ser usado para impresión, puede resultar beneficioso para estudiantes de biomédica para su futuro uso en impresoras.
- El manejo de las impresoras de resina, es un proceso delicado en el cual se tienen que tener cuidado cuando se usan varios de sus componentes. Para evitar daños a la salud, se recomienda poder separar el área de trabajo cuando este se encuentra en algún espacio cerrado como el laboratorio en el que se trabajó.
- El proceso de impresión es un poco delicado cuando la impresión está haciéndose. Movimientos en la impresora pueden afectar de sobremanera la impresión de las capas del objeto. Por lo que hacer una impresora que sea inmune a este tipo de eventos y proteger la impresión.
- Como electrónicos y mecatrónicos, trabajar con doctores es crucial para el éxito de este proyecto, en cambio, para un biomédico muchas de las cosas que se tuvieron dificultad no se presentarán, por lo que se recomienda que uno continúe el proyecto.
- Si quiere hacerse algún proyecto que este al nivel de este, tomar en consideración la ayuda de un doctor desde el primer día para tener los mejores resultados posibles desde el principio.

CAPÍTULO 12

Bibliografía

[1] Ec, *Utilizan impresora 3D para crear corazón que "late como uno real"*, 2017. dirección: https://elcomercio.pe/tecnologia/crean-corazon-impresora-3d-late-real-442330.

[2] M. Interesante, *Cerebros y corazones hechos con una impresora 3D*. dirección: https://www.muyinteresante.es/innovacion/articulo/cerebros-y-corazones-hechos-con-una-impresora-3d-241445953800.

[3] Voa y Voa, *3-D Printed Model Heart Guides Surgeons, Saves Lives*, 2015. dirección: https://learningenglish.voanews.com/a/2559456.html.

[4] P. Galinsky, *En el Garrahan imprimen los corazones en 3D para planear mejor las cirugías*, 2018. dirección: https://www.clarin.com/sociedad/garrahan-imprimen-corazones-3d-planear-mejor-cirugias_0_SJRR8XVif.html.

[5] L. Hardesty y M. N. Office, *Personalized heart models for surgical planning*, 2015. dirección: https://news.mit.edu/2015/3-d-printed-heart-models-surgery-0917.

[6] S.-J. Yoo, O. Thabit, E. K. Kim, H. Ide, D. Yim, A. Dragulescu, M. Seed, L. Grosse-Wortmann y G. V. Arsdell, "3D printing in medicine of congenital heart diseases", *3D Printing in Medicine*, vol. 2, n.º 1, 2016. DOI: 10.1186/s41205-016-0004-x.

[7] D. Schmauss, N. Gerber y R. Sodian, "Three-dimensional printing of models for surgical planning in patients with primary cardiac tumors", *The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery*, vol. 145, n.º 5, págs. 1407-1408, 2013. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2012.12.030.

[8] R. Dankowski, A. Baszko, M. Sutherland, L. Firek, P. Kalmucki, K. Wróblewska, A. Szyszka, A. Groothuis y T. Siminiak, "3D heart model printing for preparation of percutaneous structural interventions: description of the technology and case report", *New Methods*, vol. 6, n.º 72, págs. 546-551, 2014. DOI: 10.5603/KP.2014.0119.

[9] K. M. Farooqi, O. Saeed, A. Zaidi, J. Sanz, J. C. Nielsen, D. T. Hsu y U. P. Jorde, "3D Printing to Guide Ventricular Assist Device Placement in Adults With Congenital Heart Disease and Heart Failure", *JACC: Heart Failure*, vol. 4, n.º 4, págs. 301-311, 2016. DOI: 10.1016/j.jchf.2016.01.012.

[10] A. Munaz, R. K. Vadivelu, J. S. John, M. Barton, H. Kamble y N.-T. Nguyen, "Three-dimensional printing of biological matters", *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, vol. 1, n.º 1, págs. 1-17, 2016. DOI: 10.1016/j.jsamd.2016.04.001.

[11] D. Coldewey y D. Coldewey, *Researchers 3D print a soft artificial heart that works a lot like a real one*, 2017. dirección: https://techcrunch.com/2017/07/13/researchers-3d-print-a-soft-artificial-heart-that-works-a-lot-like-a-real-one/.

[12] McMullan, *This 'soft' 3D-printed heart throbs and pumps blood just like the real thing*, 2017. dirección: https://www.alphr.com/bioscience/1006309/this-soft-3d-printed-heart-throbs-and-pumps-blood-just-like-the-real-thing.

[13] Thingiverse.com, *Cristelia - Open Source LCD SLA resin printer | DayLight | by dvjcodec*. dirección: https://www.thingiverse.com/thing:1680172.

[14] ——, *FDM printed SLA-Printer by TOS by Tinkering On Steroids*. dirección: https://www.thingiverse.com/thing:2749678.

[15] C. Schubert, M. Langeveld y L. Donoso, *Innovations in 3D printing: a 3D overview from optics to ...* dirección: https://bjo.bmj.com/content/bjophthalmol/98/2/159.full.pdf.

[16] B. Berman, "3D printing: the new industrial revolution", *IEEE Engineering Management Review*, vol. 41, n.º 4, págs. 72-80, 2013. DOI: 10.1109/emr.2013.6693869.

[17] J. Horvath, "A Brief History of 3D Printing", *Mastering 3D Printing*, págs. 3-10, 2014. DOI: 10.1007/978-1-4842-0025-4_1.

[18] S. Hwang, E. I. Reyes, K.-S. Moon, R. C. Rumpf y N. S. Kim, "Thermo-mechanical Characterization of Metal/Polymer Composite Filaments and Printing Parameter Study for Fused Deposition Modeling in the 3D Printing Process", *Journal of Electronic Materials*, vol. 44, n.º 3, págs. 771-777, 2014. DOI: 10.1007/s11664-014-3425-6.

[19] C. Hull, *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography*, US Patent 4,575,330, 1984. dirección: https://patents.google.com/patent/US4575330A/en?oq=4575330.

[20] K. Szykiedans y W. Credo, "Mechanical Properties of FDM and SLA Low-cost 3-D Prints", *Procedia Engineering*, vol. 136, págs. 257-262, 2016. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.01.207.

[21] J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen y R. C. Advincula, "Mechanical characterization of 3D-printed polymers", *Additive Manufacturing*, vol. 20, págs. 44-67, 2018. DOI: 10.1016/j.addma.2017.12.002.

[22] I. Gibson, D. W. Rosen y B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. Springer US, 2010.

[23] X. L. Ma, "Research on Application of SLA Technology in the 3D Printing Technology", *Applied Mechanics and Materials*, vol. 401-403, págs. 938-941, 2013. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.401-403.938.

[24] J. Kerns, *What's the Difference Between Stereolithography and Selective Laser Sintering?*, 2015. dirección: https://www.machinedesign.com/3d-printing/what-s-difference-between-stereolithography-and-selective-laser-sintering.

[25] F. P. Melchels, J. Feijen y D. W. Grijpma, "A review on stereolithography and its applications in biomedical engineering", *Biomaterials*, vol. 31, n.º 24, págs. 6121-6130, 2010. DOI: 10.1016/j.biomaterials.2010.04.050.

[26] T. Nadal, *Tipos de impresoras 3D: Extrusión, Resina y Polvo*, 2017. dirección: http://toninadal.frax3d.com/tipos.

[27] Y. Zhang, F. Zhang, Z. Yan, Q. Ma, X. Li, Y. Huang y J. A. Rogers, "Printing, folding and assembly methods for forming 3D mesostructures in advanced materials", *Nature Reviews Materials*, vol. 2, n.º 4, 2017. DOI: 10.1038/natrevmats.2017.19.

[28] L. E. Murr, S. M. Gaytan, D. A. Ramirez, E. Martinez, J. Hernandez, K. N. Amato, P. W. Shindo, F. R. Medina y R. B. Wicker, "Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using Laser and Electron Beam Melting Technologies", *Journal of Materials Science and Technology*, vol. 28, n.º 1, págs. 1-14, 2012. DOI: 10.1016/s1005-0302(12)60016-4.

[29] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Nguyen y D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods,applications and challenges", *Sciencie Direct*, vol. 143, págs. 172-196, 2018. dirección: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359836817342944?via=ihub.

[30] Anyubic, *LCD Photon*. dirección: http://www.anycubic3d.com/products/show/1359.html.

[31] J.-Y. Lee, J. An y C. K. Chua, "Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials", *Applied Materials Today*, vol. 7, págs. 120-133, 2017. DOI: 10.1016/j.apmt.2017.02.004.

[32] A. A. Folgueiras-Amador, K. Philipps, S. Guilbaud, J. Poelakker y T. Wirth, "An Easy-to-Machine Electrochemical Flow Microreactor: Efficient Synthesis of Isoindolinone and Flow Functionalization", *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 56, n.º 48, págs. 15 446-15 450, 2017. DOI: 10.1002/anie.201709717.

[33] H. Guo, Z. Wen, Y. Zi, M.-H. Yeh, J. Wang, L. Zhu, C. Hu y Z. L. Wang, "A Water-Proof Triboelectric-Electromagnetic Hybrid Generator for Energy Harvesting in Harsh Environments", *Advanced Energy Materials*, vol. 6, n.º 6, pág. 1 501 593, 2015. DOI: 10.1002/aenm.201501593.

[34] T. O. Steroids, *DIY: FDM-printed SLA-Printer: Part 8 - Building the UV-Box*, 2018. dirección: https://www.youtube.com/watch?v=Y7dDw7RyXCs.

[35] *Meshmixer Tutorial: Using 3D Modeling Software for 3D Printing*. dirección: https://www.sculpteo.com/en/tutorial/prepare-your-model-3d-printing-meshmixer/.

[36] *Meshmixer is state-of-the-art software for working with triangle meshes*. dirección: http://www.meshmixer.com/.

[37] ——, *DIY: FDM-printed SLA-Printer: Part 3*, 2018. dirección: https://www.youtube.com/watch?v=DbIEzbua1AI.

[38] ——, *DIY: FDM-printed SLA-Printer: Part 9 - Preparing the Display*, 2018. dirección: https://www.youtube.com/watch?v=zdHR6w-UEnI.

[39] Anon, *8 Best 3D Printer Controllers and Components on Amazon*, 2018. dirección: https://all3dp.com/1/3d-printer-controllers-components-on-amazon/.

[40] FORMLABS. dirección: https://support.formlabs.com/s/article/Using-Elastic-Resin?language=en_US.

[41] S. H. Huang, P. Liu, A. Mokasdar y L. Hou, "Additive manufacturing and its societal impact: a literature review", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 67, n.º 5-8, págs. 1191-1203, 2012. DOI: 10.1007/s00170-012-4558-5.

[42] FORMLABS. dirección: https://support.formlabs.com/s/article/Using-Elastic-Resin?language=en_US.

[43] ——, *Introducing Elastic Resin: A Soft, Resilient 3D Printing Material*. dirección: https://formlabs.com/blog/elastic-resin-soft-resilient-3d-printing/.

[44] P. Dudek, "FDM 3D Printing Technology in Manufacturing Composite Elements", *Archives of Metallurgy and Materials*, vol. 58, n.º 4, págs. 1415-1418, 2013. DOI: 10.2478/amm-2013-0186.

[45] R. L. Shogren, G. Selling y J. L. Willett, "Effect of Orientation on the Morphology and Mechanical Properties of PLA/Starch Composite Filaments", *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 19, n.º 2, págs. 329-334, 2011. DOI: 10.1007/s10924-010-0267-z.

[46] G. Wu, S. Liu, H. Jia y J. Dai, "Preparation and properties of heat resistant polylactic acid (PLA)/Nano-SiO2 composite filament", *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, vol. 31, n.º 1, págs. 164-171, 2016. DOI: 10.1007/s11595-016-1347-2.

[47] Pinshape, *Post Processing PLA and ABS Prints Pinshape Blog*, 2015. dirección: https://pinshape.com/blog/post-processing-your-pla-and-abs-prints/.

[48] Q. Chen, J. D. Mangadlao, J. Wallat, A. D. Leon, J. K. Pokorski y R. C. Advincula, "3D Printing Biocompatible Polyurethane/Poly(lactic acid)/Graphene Oxide Nanocomposites: Anisotropic Properties", *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 9, n.º 4, págs. 4015-4023, 2017. DOI: 10.1021/acsami.6b11793.

[49] Treatstock, *Treatstock*. dirección: https://www.treatstock.com/material/tpu.

[50] J. Xiao e Y. Gao, "The manufacture of 3D printing of medical grade TPU", *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 2, n.º 3, págs. 117-123, 2017. DOI: 10.1007/s40964-017-0023-1.

[51] D. Chimene, K. K. Lennox, R. R. Kaunas y A. K. Gaharwar, "Advanced Bioinks for 3D Printing: A Materials Science Perspective", *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 44, n.º 6, págs. 2090-2102, 2016. DOI: 10.1007/s10439-016-1638-y.

[52] S. V. Murphy y A. Atala, "3D bioprinting of tissues and organs", *Nature Biotechnology*, vol. 32, n.º 8, págs. 773-785, 2014. DOI: 10.1038/nbt.2958.

[53] H.-W. Kang, S. J. Lee, I. K. Ko, C. Kengla, J. J. Yoo y A. Atala, "A 3D bioprinting system to produce human-scale tissue constructs with structural integrity", *Nature Biotechnology*, vol. 34, n.º 3, págs. 312-319, 2016. DOI: 10.1038/nbt.3413.

[54] tritrends. dirección: https://www.tomsguide.com/us/hottest-3d-printing-trends,news-20813.html.

[55] ULTIMAKER, *Ultimaker 3: Unrivaled print quality | Ultimaker*. dirección: https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-3.

[56] ANYCUBIC, *Photon*. dirección: http://www.anycubic.com/collections/3d-printers/products/anycubic-photon-3d-printer?variant=28767658836028.

[57] ——, *Anycubic Photon Use Tutorial | Offline and Touch Screen Operation*, 2017. dirección: https://www.youtube.com/watch?v=bIMwjmVl3Ho.

[58] Thingiverse.com, *Spherical*. dirección: https://www.thingiverse.com/thing:3534193.

[59] Anon. dirección: https://www.thingiverse.com/thing:852939.

[60] Thingiverse.com, *All In One 3D Printer test by majda107*. dirección: https://www.thingiverse.com/thing:2656594.

[61] Kickstarter, *kickstarter/kickstarter-autodesk-3d*, 2018. dirección: https://github.com/kickstarter/kickstarter-autodesk-3d.

[62] S. V. H. Health, *St Vincent's Heart Health*. dirección: https://www.svhhearthealth.com.au/procedures/procedures-treatments/septal-defect-closures.

CAPÍTULO 13

Anexos

13.1. Anexo A: Modelos 3D

Este anexo tiene como propósito, que el lector pueda visualizar en forma muy resumida el proceso de modificación del corazón usado para impresiones preliminares, y llegando a usar el corazón provisto por imágenes médicas parte de otro modulo del proyecto de graduación. Se puede diferenciar los slicers que se usan en cada impresora.

13.1.1. Modelos del corazón en CURA para impresora FDM

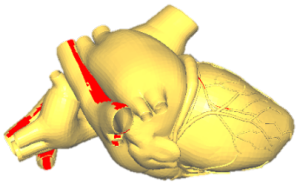


Figura 95: Corazón impreso en proceso FDM

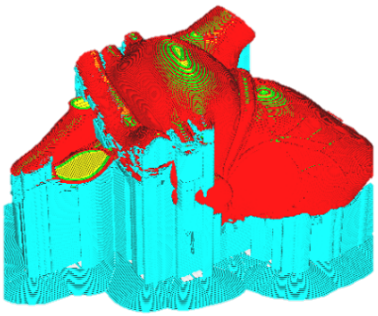


Figura 96: Corazón impreso en proceso FDM mostrando las capas

13.1.2. Modelos del corazón en ANYCUBIC Photon Slicer para impresora SLA

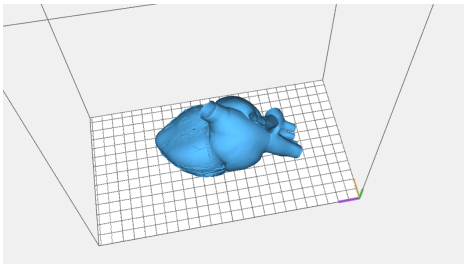


Figura 97: Corazón impreso en proceso SLA

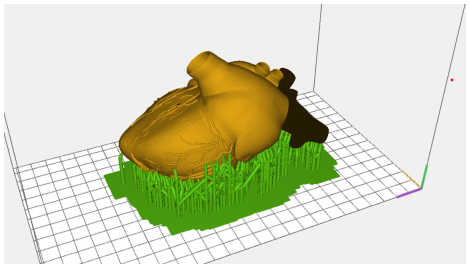


Figura 98: Corazón impreso en proceso SLA mostrando soporte

13.1.3. Modelos del corazón modificado en MeshMixer

En este anexo se muestra como la edición de los objetos en cualquier programa de edición puede afectar un objeto impreso. En las siguientes figuras se muestra un antes y después de la edición de una placa de corazón. A la izquierda de la figura se puede ver la placa impresa antes de la edición del objeto y a la derecha se puede ver el después. Puede notarse cierta pérdida de detalle superficial en la segunda placa.



Figura 99: Placa de corazón con hiperplasia impreso antes y después de edición con Meshmixer

13.1.4. Modelos del corazón recibido de ecocardiografias

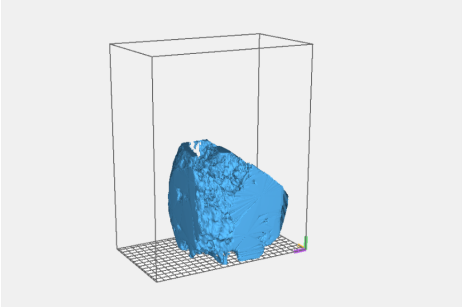


Figura 100: Modelo del ecocardiografia del corazón completo

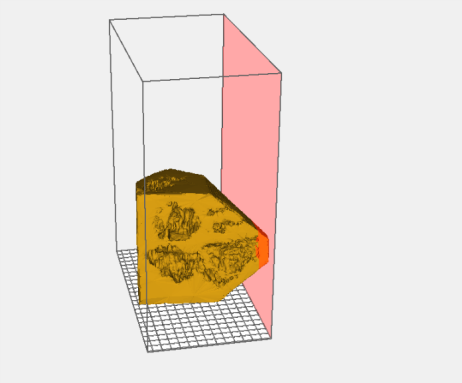


Figura 101: modelo del ecocardiografia del corazón a la mitad

13.1.5. Modelos de corazón recibido de tomografías

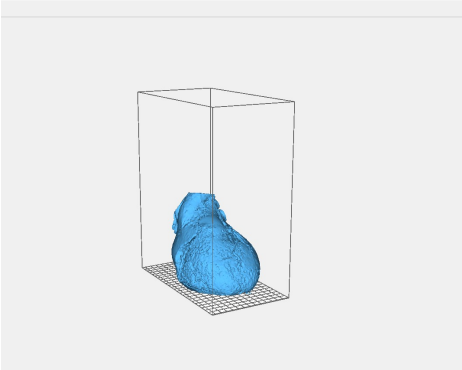


Figura 102: Modelo del tomografía del corazón completo

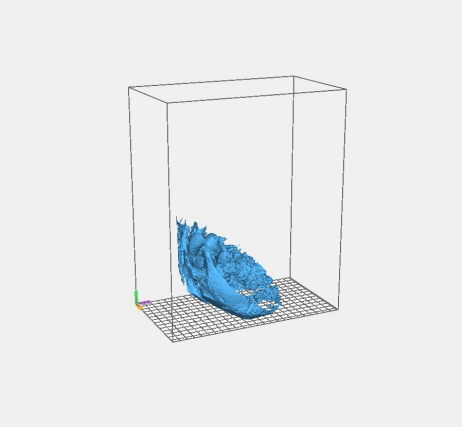


Figura 103: Modelo del tomografía del corazón a la mitad

13.2. Anexo B: Construcción de la impresora 3D

Teniendo en cuenta que el proyecto comenzó con la construcción de la impresora, se tiene a continuación todo el avance que se tenía hasta el momento, esto incluye una cotización de componentes tanto mecánicos como electrónicos, planos para las piezas diseñadas y la construcción inicial del sistema.

13.2.1. Cotización de componentes



Figura 104: Cotización parte 1



Figura 105: Cotización parte 2



Figura 106: Cotización parte 3



Figura 107: Cotización parte 4

13.2.2. Cotización de materiales de impresión

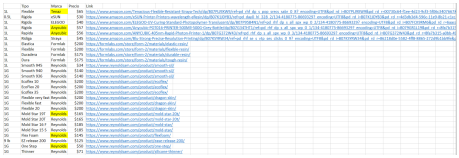


Figura 108: Cotización de materiales

13.2.3. Componentes impresos

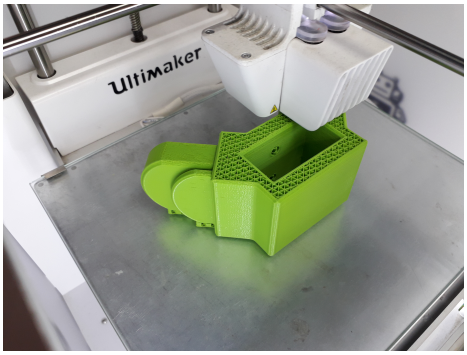


Figura 109: Esquina de hardware en impresión



Figura 110: Dos esquinas ensambladas a un perfil de aluminio

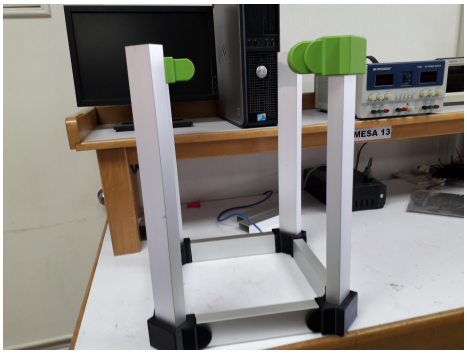


Figura 111: Esquina de hardware en impresión

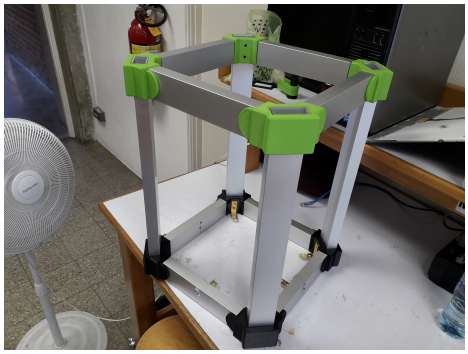


Figura 112: Dos esquinas ensambladas a un perfil de aluminio

13.3. Anexo C: Corazones

13.3.1. Corazones impresos en proceso FDM

A partir del modelos obtenidos en internet y que se usó para empezar a comparar los detalles de los corazones, se presentan las imágenes de los resultados.

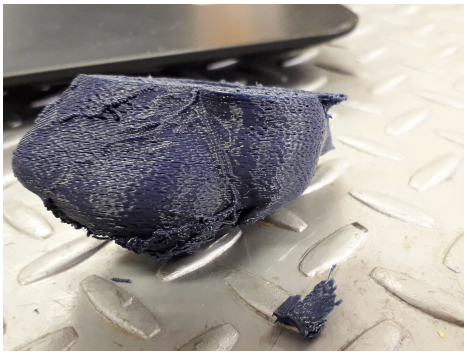


Figura 113: Mitad de corazón con 0.11mm de capa a 70mm/s

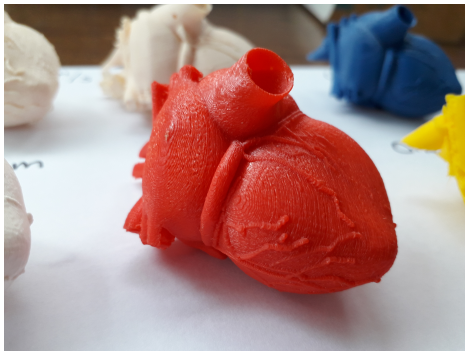


Figura 114: Corazón completo con 0.11mm de capa a 70mm/s



Figura 115: Corazón completo con 0.2mm de capa a 70mm/s

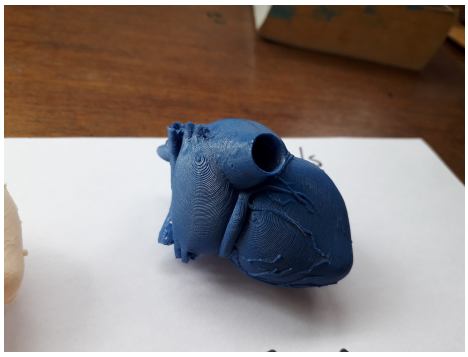


Figura 116: Corazón completo con 0.2mm de capa a 65mm/s

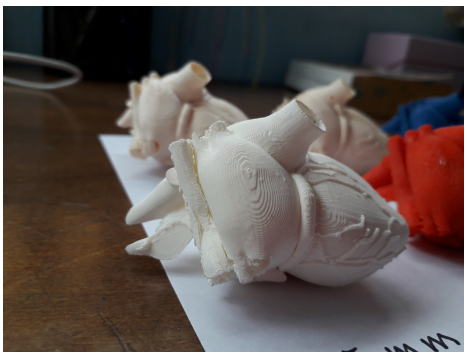


Figura 117: Corazón completo con 0.15mm de capa a 70mm/s

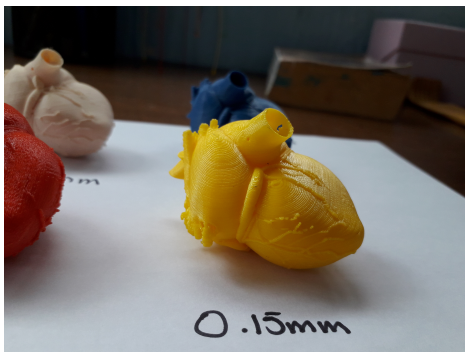


Figura 118: Corazón completo con 0.15mm de capa a 65mm/s

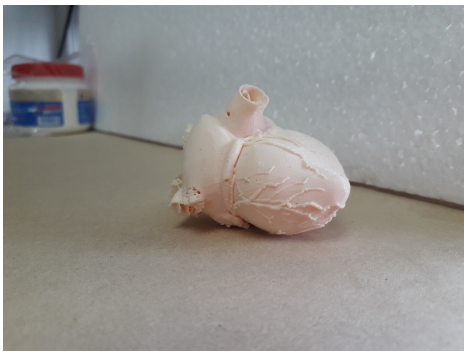


Figura 119: Corazón completo con 0.12mm de capa a 70mm/s

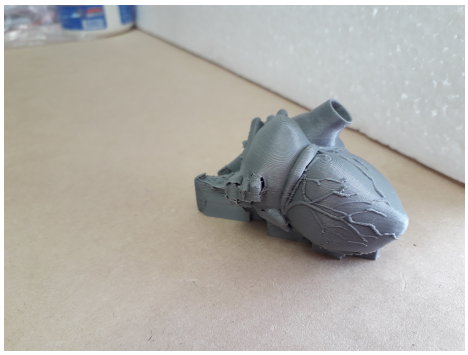


Figura 120: Corazón completo con 0.12mm de capa a 65mm/s

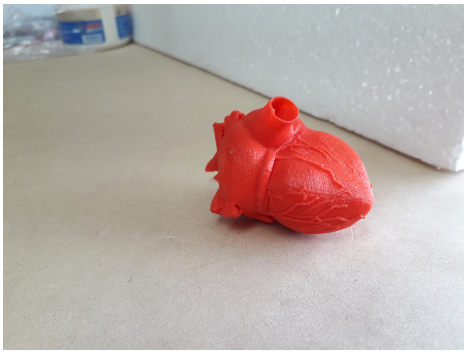


Figura 121: Corazón completo con 0.11mm de capa a 70mm/s

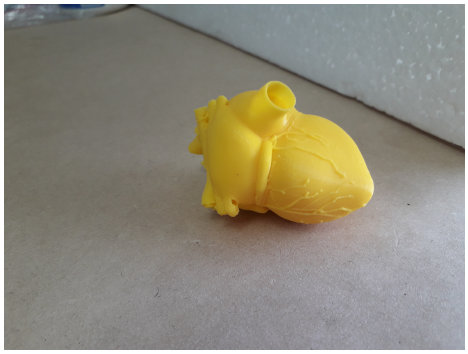


Figura 122: Corazón completo con 0.11mm de capa a 65mm/s

13.3.2. Corazones impresos en proceso SLA

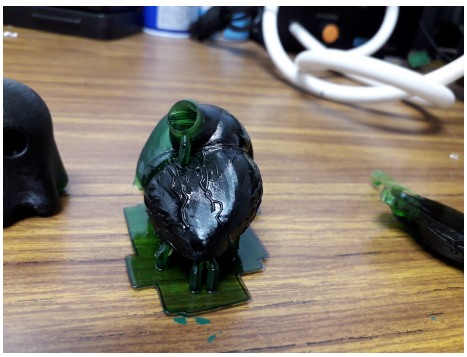


Figura 123: Impresión del corazón en SLA con 0.05mm de capa

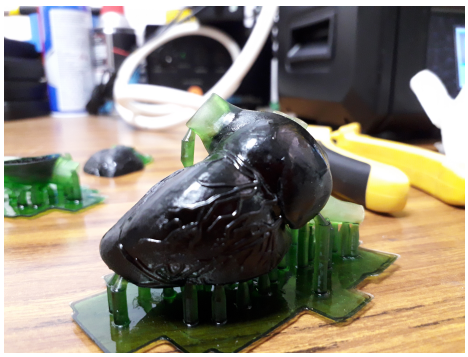


Figura 124: Perfil del corazón que muestra el soporte utilizado

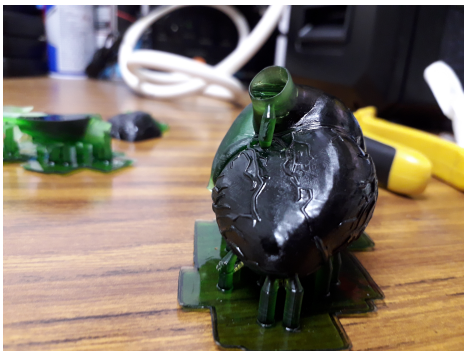


Figura 125: Acercamiento para mejor visualización

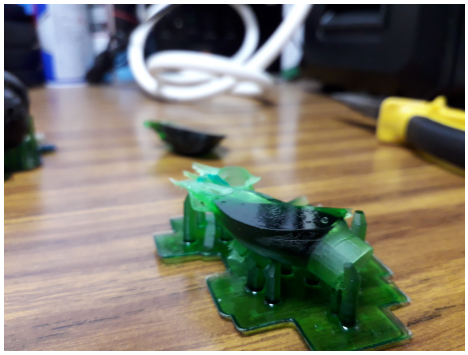


Figura 126: Mitad de corazón vacío



Figura 127: Visualización de arterias vacías demostrando la utilidad de la impresora

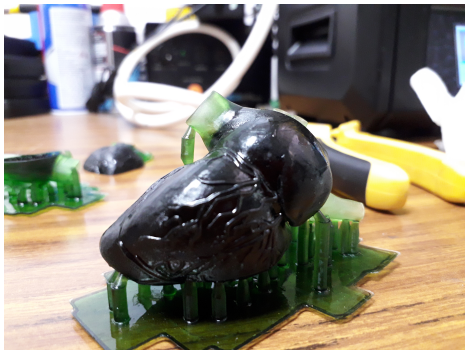


Figura 128: Perfil del corazón que muestra el soporte utilizado

13.4. Anexo D: Resultados de mediciones de impresiones estándar

Valor original (mm)	**Valor a medir (mm)**	**Resultados (mm)**			
Diámetros		Resina rígida	PLA	Resina flexible	TPU
35	35	35.1	35.35	35.4	35.2
Largos					
43	1	43.91	43.5	0	0
43	2	43.74	43.22	0	0
43	3	43.46	43.63	0	0
43	4	43.78	43.21	0	0
43	5	43.45	43.26	0	0
43	6	43.52	24.75	0	0
43	7	43.53	42.95	0	0
43	8	43.63	43.29	0	0
43	9	43.34	43.85	0	0
43	10	43.87	42.52	0	0
43	11	43.74	43.45	0	0
43	12	43.48	42.74	0	0
74.04	13	74.09	74.81	0	0

Cuadro 10: Tabla de resultados de mediciones para Torture Test ANYCUBIC PHOTON

Valor original (mm)	**Valor a medir (mm)**	**Resultados (mm)**			
Diámetros		Resina rígida	PLA	Resina flexible	TPU
10	6	5.99	6.06	6.11	6.72
8	4.8	4.85	4.84	4.73	5.22
6	3.6	3.66	3.8	3.37	3.86
4	2.4	2.6	2.51	2.56	2.55
Largos					
10	6	6.1	6.35	6.62	6.17
20	12	12.09	12.14	12.31	12.15
30	18	18.1	18.15	17.66	17.8
10	6	6.09	6.16	5.15	6.16
20	12	12.07	12.14	11.83	11.9
30	18	18.1	18.2	18.03	18.1
Bridge test					
2	1.2	2.5	2.7	0	2.8
5	3	4.3	4.48	0	4.49
10	6	7.3	7.47	0	7.61
15	9	10.2	10.4	0	10.42
20	12	13.24	13.41	0	13.69
25	15	16.2	16.4	0	16.44
Hole test					
8	4.8	4.6	5.25	4.5	5.32
6	3.6	3.5	3.3	3.77	3.6
4	2.4	2.2	2	1.57	2.25
3	1.8	1.6	1.81	2.78	2.33
2	1.2	1.1	1.21	1.33	1.44
4	2.4	2.2	2.46	2.51	2.59
Ángulos					
80	80	0	1	0	0
70	70	0	1	0	-
60	60	0	1	0	-
50	50	0	1	0	-
40	40	0	0	0	-
30	30	0	0		0
20	20	0	0	0	0
10	10	0	0	0	0
75	75	0	1	0	1
60	60	0	1	0	0
45	45	0	0	0	0
30	30	0	0	0	0
15	15	0	0	0	0
Support test					
1	1	1	1	1	0
2	2	1	0	1	0
3	3	1	0	0	0

Cuadro 11: Tabla de resultados de mediciones para ALL IN ONE 3D TEST

Valor original (mm)	**Valor a medir (mm)**	**Resultados (mm)**			
Diámetros		Resina rígida	PLA	Resina flexible	TPU
6	3.6	4.1	4.23	3.75	3.95
12	7.2	8.01	8.09	7.72	8.01
18	10.8	12.09	12.05	11.71	11.85
24	14.4	16.03	16.18	15.8	15.9
30	18	20.04	20.14	19.69	19.52
Largos					
54	32.4	32.45	32.66	32.59	32.6
54	32.4	32.45	32.3	32.81	32.75
70	42	41.89	42.05	41.5	41.45
55	33	32.13	32.15	32.2	18.6
55	33	32.77	32.72	23.92	31.6
Bridge test					
30	18	17.04	17.17	17.02	16.66
40	24	25.01	24.91	25.89	24.46
50	30	32.99	32.97	33.62	32.62
70	42	41.33	40.99	42.56	39.84
80	48	49.11	48.94	57.28	47.5
Hole test					
5	3	5.5	6.06	6.64	5.98
4.5	2.7	5.7	5.8	5.45	5.44
5.5	3.3	5.82	5.91	5.54	5.67
6	3.6	5.97	6.03	5.63	5.92
6.5	3.9	6.12	6.29	5.73	6.03
Ángulos					
15		0	1	0	1
20		0	1	0	1
30		0	1	0	0
45		0	0	0	0
Support test					
1		0	0	1	1
2		0	0	0	1
3		0	0	0	1

Cuadro 12: Tabla de resultados de mediciones para FDM KICKSTARTER ALL IN ONE TEST

Valor original (mm)	**Valor a medir (mm)**	**Resultados (mm)**			
Diámetros		Resina rígida	PLA	Resina flexible	TPU
12	12	12.3	12.22	12.14	11.79
7	7	7.1	6.85	6.54	6.85
6	6	5.8	5.75	5.35	5.47
5.5	5.5	5.55	5.56	4.89	5.51
5.5	5.5	5.8	5.96	4.9	5.69
4	4	3.59	3.75	3.42	3.69
6	6	6.27	5.91	5.47	6.19
Largos					
60	60	61.5	60.65	60.36	58.99
48	48	48	47.81	48.1	47.69
31	31	31.11	31.22	30.81	30.19
23	23	23.12	23	22.8	22.95
15.5	15.5	15.36	15.35	15.42	15.27
12	12	12.18	12.5	11.94	12.05
10.81	10.81	10.91	10.68	10.73	10.55
10.5	10.5	10.51	10.3	10.63	10.67
9.5	9.5	9.28	10	10.2	10.26
Bridge test					
23	23	23	23	22.8	22.95
8.5	8.5	8.5	7.8	9.2	7.81
Hole test					
3	3	2.6	2.67	2.85	2.26
4	4	3.82	3.68	4.36	3.89
4	4	3.81	3.83	4.22	3.69
7	7	6.94	6.65	7.81	8.69
9	9	7.91	8.14	9.81	8.3
9	9	8.65	9.3	8.44	8.74
9.5	9.5	9.5	10	9.78	7.02
10.5	10.5	10.51	10.3	11.29	10.4
Ángulos					
40	40	0	1	0	1
5.5	5.5	0	0	0	0
Grosores					
0.3	0.3	0.37	0.45	0	0.48
0.3	0.3	0.45	0.24	0.32	0.53
0.3	0.3	0.43	0.4	0.49	0.46
0.3	0.3	0.47	0.94	0.66	0.43
0.8	0.8	0.7	1.24	1.25	0.9

Cuadro 13: Tabla de resultados de mediciones para BENCHY

13.5. Anexo E: Manual descriptivo de uso y operación para la impresora de resina

Sistema de impresión de corazón en 3D para prototipado rápido

Parte 1: Manual de uso y operación para la impresora de resina

Universidad del Valle de Guatemala

Departamento de ingeniería Mecatrónica

Gustavo Orellana, 15073

2019

13.5.1. Prefacio

El presente documento se trata de un manual que pueda ser usado por catedráticos, así como estudiantes con tal de poder todos los puntos y acciones necesarias para usar una impresora de resina. En el caso de este proyecto, la impresora que se está analizando es una Anycubic Photon, con la cual se hacen impresiones de abajo hacia arriba y que tiene una capacidad limitada en cuanto al tamaño de impresiones que pueden lograrse.

Varios puntos han de analizarse con tal de poder entender la impresora de forma correcta. Se tiene considerar tanto la instalación de la impresora en lugares adecuados para su uso, así como la operación que ha de realizarse para poder empezar a imprimir. Dejando todo esto de lado también se analiza el mantenimiento que debe de realizarse a cada componente para que estos tengan una vida útil bastante larga y por ultimo se muestran los pasos a seguir para poder operar la impresora con la mayor seguridad posible. Esta última se dedica a describir las acciones que son necesarias para que el material de impresión no se dañina para el operador.

Lo que se deja a un lado en este manual son los pasos para seguir para tener una impresión exitosa, esto se hizo debido a que esto es un tema que merece su propio manual por sí solo pero que se complementa con este. Por esta razón, si se quieren tener las mejores impresiones con la mayor seguridad posible, es recomendable leer el manual de impresión después de haber leído el presente manual.

El lector debe tener en consideración que el manual de usuario que viene incluido con la impresora y que este manual toca los mismos puntos, pero desde una perspectiva con más contacto con la impresora, por lo que este documento puede considerarse más como una lista de consejos para el futuro operador y no como un manual como tal.

13.5.2. Instalación

La instalación de la impresora, según el manual de operación con el que viene incluido requiere únicamente que se conecte la impresora directamente al enchufe, calibrar y nivelar.

En otras palabras, la impresora es plug and play, pero se tienen muchas otras cosas que tomar en consideración.

Durante los primeros días en que se puso en marcha la impresora, se tenía conectado directamente a una regleta. Uno de esos días también coincidió varios apagones cortos en tiempo que fueron capaces de detener el funcionamiento de la impresora. Debido a esta clase de ocurrencias, la impresora requiere la conexión de esta a un UPS que sirve para mantenerlo activo mientras ocurren los apagones. Con esto se evita que las impresiones se detengan y que horas de trabajo se desperdicien.

Para continuar con la instalación, también es necesario preparar el lugar donde se tendrá la impresora. Debido a la naturaleza del proceso, el material de impresión tiende a ensuciar mucho el área de trabajo. Debido a que el material es bastante toxico no se puede permitir que las superficies que toquen el material se queden así.

Se recomienda que antes de empezar a usar la impresora de resina esta ha de ponerse sobre algún contenedor donde la resina pueda caer. Un contenedor de aluminio es aconsejable para que cualquier riego quede aquí, este objetivo también puede conseguirse con varios pliegues de papel debajo de la impresora, esto inclusive es mas recomendable ya que los pliegues absorben la resina o por lo menos el exceso que esta provoca.



Figura 129: Capa de papel debajo de la impresora para seguridad contra resina

Continuando con los materiales necesarios, después de varios días de usar un contenedor abierto de vidrio el riego de resina y su desperdicio por toda el área de trabajo se debió tener un área donde se colocan objetos de limpieza y de trabajo encima de estos.

En esta área de trabajo, cualquier material que entra en contacto con la resina se pone sobre esto para que esta no se ponga sobre mesas o se toquen por accidente. La forma en la que se delimito esta área en la mesa, fueron con varios pliegues de papel tantos como fueran posibles para que la capa de papel sea gruesa y que la resina no llegue a tocar la mesa después de un prolongado uso.

En esta área, se han puesto todos los objetos que han entrado en contacto con la resina o que están hechos de resina, por lo que la mesa siempre esta limpia y libre de toxicidad. Esta cama de papel es muy eficiente para absorber cualquier resina que se tenga, pero es aconsejable cambiarla cada semana.



Figura 130: Cama de papel donde se colocan materiales en contacto con resina

Antes de continuar con el trabajo, se debe limitar un área de limpieza. El contener abierto de vidrio que se menciono fue usado para poder la resina y alcohol dentro y poder limpiar tanto los componentes como los objetos. Pero el alcohol se evapora naturalmente. Si se quiere trabajar sin desperdiciar material y manteniendo todo en orden se deben de usar contenedores donde los materiales serán puestos y usados en algún futuro.



Figura 131: Contenedor lleno de artículos de limpieza para la resina

En la siguiente figura se muestra la instalación de la impresora como se tiene en el laboratorio.

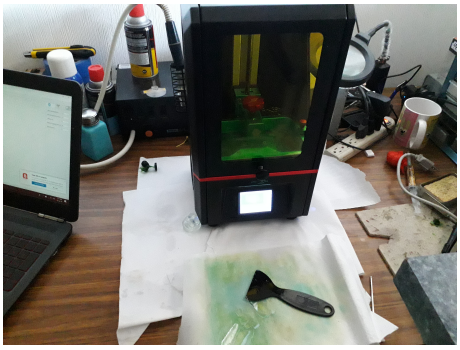


Figura 132: Instalación completa de la impresora

Se puede notar en la imagen que la impresora esta sobre una capa de papel y justo en

frente de esta esta la cama de papel gruesa donde se tienen los objetos que tocan resina.

El área de trabajo de la impresora tiene que ser espacioso a pesar de que la impresora en si es pequeña en tamaño, pero debido a que la resina suele causar mucha suciedad se debe limitar el área para que cualquier goteo de resina pueda ser absorbido por papel.

El cuarto de trabajo de la impresora puede estar en una temperatura desde 8 grados a 40 grados por lo que la temperatura no es algo por lo que hay que preocuparse. Lo que sí se debe tener en consideración es que el espacio tiene que ser ventilado ya que la resina es muy apestosa además de que así se verifica que cualquier humo toxico no se acumule.

13.5.3. Operación

Esta siguiente sección del manual se dedica a explicar como ha de operarse la impresora de manera eficiente y sencilla apartándose del manual de operación con la que viene incluida la impresora.

El manual de la impresora de una extensa información acerca de las funcionalidades de la impresora, todas estas se encuentran en las varias pantallas que se incluye el firmware de esta misma. Pero la operación que se quiere explicar es breve y se trata de la operación que se debe tener para que la impresora este funcionando de una manera eficiente.

El primer paso para poner en operación la impresora es ver si esta sí es capaz de curar la resina. La resina cuando se cura se solidifica, esta solidificación solo funciona cuando la impresora esta bien instalada y operando de manera correcta. Para poder ver esto es necesario poner en prueba el objeto con el que viene la impresora.

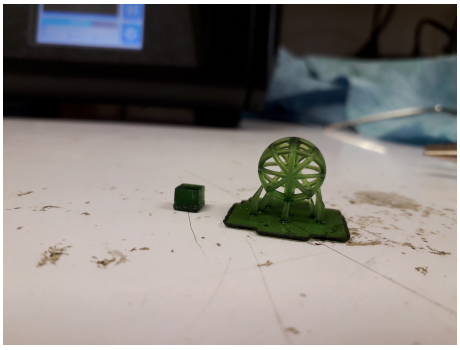


Figura 133: Impresión de prueba

Para usar la pantalla táctil con la que viene incluida la impresora es aconsejable usar algún objeto que no se vaya a usar en otras actividades. Este objeto tiene que ser usado cuando el operador tiene guantes puestos ya que con esto se evita que se manche la pantalla de cualquier manera.



Figura 134: Pantalla principal de la impresora 3D

Para asegurarse que todo está funcionando es necesario seguir el manual del usuario en el cual se siguen todos los pasos para comprobar el funcionamiento de todos los componentes de los cuales los más importantes se describen a continuación.

Una operación importante en el proceso es devolver la resina al envase cuando esta ya no será usada para imprimir y todavía queda en el VAT. LA resina suele tener partes o espacios rígidos dentro de ella por lo que es necesario usar los filtros con los que vino la impresora. Por experiencia propia se vio la utilidad en usar un embudo para dirigir la resina hacia el bote, las siguientes figuras demuestran este proceso.



Figura 135: Filtro de resina



Figura 136: Filtro con embudo incluido

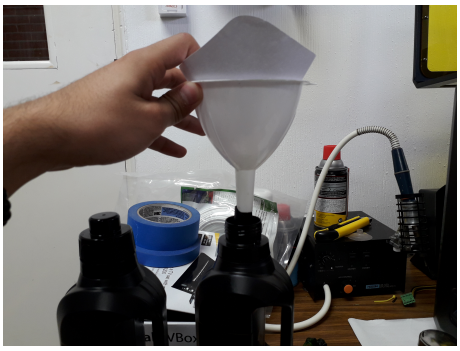


Figura 137: Forma completa para devolver resina hacia el envase

13.5.4. Mantenimiento

En la parte de mantenimiento de la impresora es necesario de enfatizar varios puntos los cuales son esenciales para mantener en funcionamiento y para asegurar buenas impresiones. La pantalla LCD ubicada debajo del VAT tiene que estar limpia, y si esta no lo está se puede usar alcohol para limpiarla ya que este se seca rápidamente.

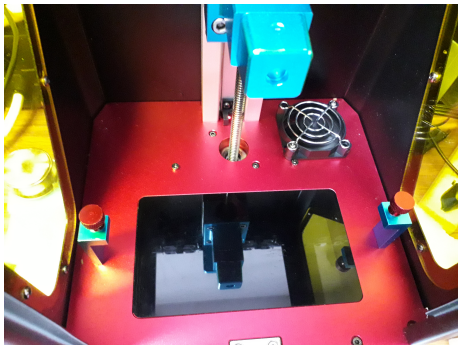


Figura 138: Pantalla LCD dentro de la impresora 3D

Hay que revisar el estado del VAT y verificar que el fundo de esta no presente rasguños, si en dado caso se presentan todavía se pueden tener impresiones exitosas, pero si los rasguños son muchos es necesario cambiarlo.



Figura 139: VAT como se mira físicamente antes de meterlo a la impresora

Se requiere que la impresora siempre esté limpia, ya que el riego de resina puede presentar riesgos de uso.

Si el motor que mueve la placa de abajo hacia arriba es muy ruidoso cuando esto sucede es necesario aceitar el tornillo para que las impresiones no se vean comprometidas.

Estos son los puntos más importantes del mantenimiento de la impresora los cuales vienen de experiencia propia, pero si se quiere más detalle al respecto es mejor consultar el manual de operación que viene con la misma impresora.

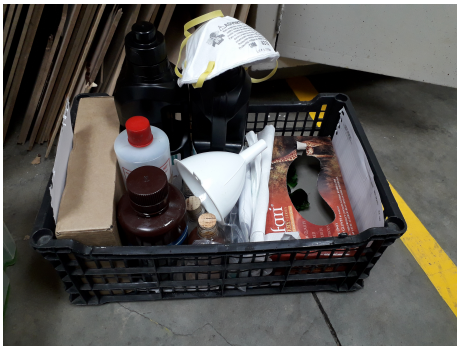


Figura 140: Canasta para el almacenamiento de materiales para el uso en la impresora

13.5.5. Seguridad

Todos los puntos de seguridad que son pertinentes al manejo de la impresora de resina son resaltados y detallados en el manual del usuario, pero algunos consejos que se pueden dar por experiencia para agregar mayor seguridad al manejo del material de impresión.

Primero, lo más importante es no tocar la resina con las manos descubiertas y no oler o inhalarla para comprobar su estado. La resina es tóxica y estando mucho tiempo expuesto a ella puede provocar náuseas y síntomas de cansancio.

Si se quiere remover alguna impresión de la placa se puede tocar la parte roja de la placa puede tocarse con la mano, pero sí se necesita apoyo extra, se requiere el uso de guantes.

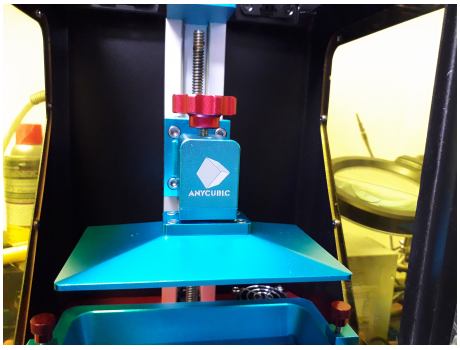


Figura 141: Placa para el posicionamiento de objetos en impresión

La resina no se calienta mucho por lo que no hay que preocuparse por quemarse, pero sí se debe preocupar por la inhalación de químicos que emanan de esta cuando se abre la impresora por lo que es necesario usar mascarilla cuando se quiera abrirla para sacar impresiones.

El contenedor que se mencionó con anterioridad tiene mucho material de limpieza combinada con resina por lo que se tienen muchos humos tóxicos que es de una mezcla de químicos por lo que también es necesario usar mascarilla cuando se quiera abrir este contenedor.

Cuando se quiere manipular los objetos impresos en resina se requiere el uso de guantes,

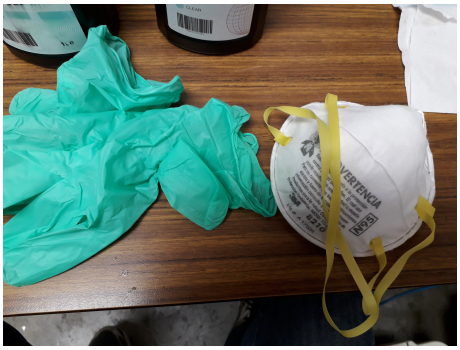


Figura 142: Materiales de seguridad para uso de la impresora

pero para la resina elástica es necesario usar aun más los guantes para protección. La resina suele regarse cuando se esta usando o cuando esta se coloca en el VAT, el envase en el que viene suele estar lleno de resina por lo que los guantes son necesarios.



Figura 143: Envase de la resina elástica

Hay que tomar en cuenta que la resina rígida se puede limpiar con alcohol, pero la elástica hace reacción con dicha resina y puede traspasar los guantes por lo que es recomendable usar el líquido especial de limpieza para la resina elástica, pero también puede ser usada en la rígida.



Figura 144: Envase del líquido de limpieza para la resina

13.6. Anexo F: Manual descriptivo de impresión para la impresora de resina

Sistema de impresión de corazón en 3D para prototipado rápido

Parte 2: Manual de impresión para la impresora de resina

Universidad del Valle de Guatemala

Departamento de ingeniería Mecatrónica

Gustavo Orellana, 15073

2019

13.6.1. Prefacio

El presente documento se trata de un manual que pueda ser usado por catedráticos, así como estudiantes con tal de poder todos los puntos y acciones necesarias para imprimir en una impresora de resina. En el caso de este proyecto, la impresora que se está analizando es una Anycubic Photon, con la cual se hacen impresiones de abajo hacia arriba y que tiene una capacidad limitada en cuanto al tamaño de impresiones que pueden lograrse.

Este manual es considerado la segunda parte en la cual se detalla específicamente los pasos a seguir para usar de la mejor forma el programa slicer que Anycubic incluye. Saber usar este programa es el paso previo y esencial para poder lograr impresiones de los objetos que se quieren. Debido a esto se hace una detallada guía de uso del programa, desde los parámetros de la impresora, pasando por los parámetros objetos y terminando con la configuración de tiempos para curar la resina cuando se quiera imprimir objetos.

Después de esto se da una guía simple y breve sobre el cuidado del material de impresión que puede usarse para imprimir en la impresora Anycubic. Además del cuidado del material también se explica brevemente los tipos de material que pueden usarse para imprimir.

Con este documento se concluye la guía para el uso e impresión exitosa de la impresora Anycubic pero que de igual forma puede usarse para otro tipo de impresoras parecidas o que utilizan el proceso SLA/DLP.

13.6.2. Software

Antes de poder empezar a imprimir es necesario saber utilizar el slicer de la impresora ANYCUBIC, se hace un apartado para esta impresora específicamente, pero para cualquier tipo de impresora o marca se utilizan los slicers creados específicamente para estos. El principio del slicer es el mismo para cualquier impresora de cualquier marca, pero para saber usar ANYCUBIC Photon, este apartado es un buen comienzo. En la figura a continuación se tiene la imagen del programa y pantalla principal del slicer.

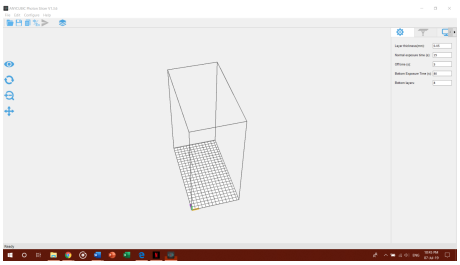


Figura 145: Pantalla principal del slicer de la Anycubic

Para empezar a trabajar con el programa es necesario abrir un nuevo objeto en formato STL y ubicarlo en el espacio de trabajo. Esto se hace en la opción de abrir del programa.



Figura 146: Barra de opciones principal

Une vez se haya ubicado un objeto dentro del espacio de trabajo la pantalla ha de verse de la siguiente manera.

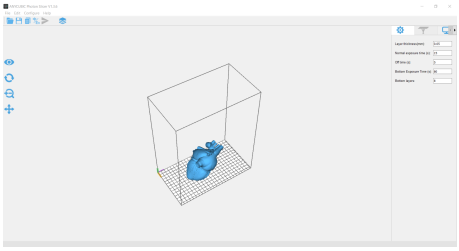


Figura 147: Objeto puesto en la plataforma

A partir de aquí ya se puede hacer el objetivo del programa de hacer capas al objeto, pero con objetos complejos es necesario agregar soporte, para ello se elige la opción que agrega soporte.

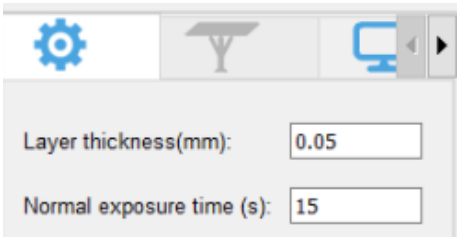


Figura 148: Barra de opciones de edición

Si esta opción no está disponible es porque se necesita elegir el objeto para poder habilitar

la opción de soporte y que se despliegue el menú para editar dicho soporte.

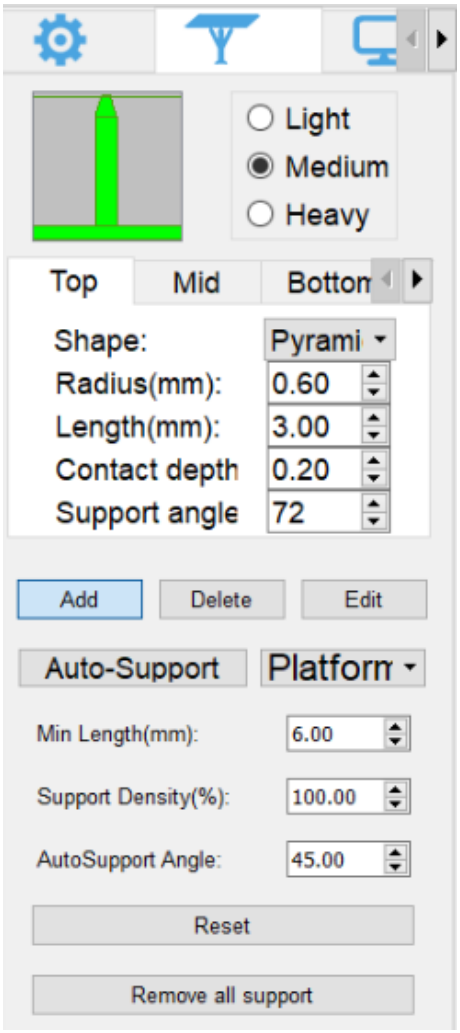


Figura 149: Menú de soporte

En este menú pueden editarse varias partes del soporte, pero el programa divide en tres dichos soportes: base (bottom), parte media (mid) y punta (top). La punta como se aprecia en la figura anterior puede modificarse de varias formas las cuales pueden ser: forma, radio, largo, profundidad de contacto y ángulo de soporte. La forma y radio del soporte ayuda de sobremanera a sostener a la capa inmediatamente. El largo y profundidad del soporte ayuda al resto del soporte a mantener estabilidad. Por último el ángulo de soporte se configura para que el minino en el cual un objeto puede esta con respecto a la horizontal para dar soporte.

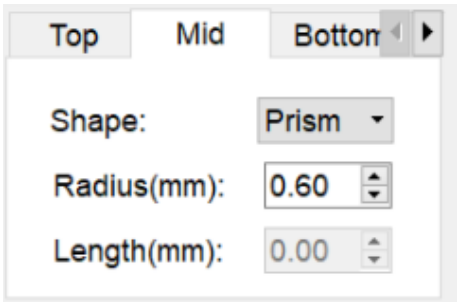


Figura 150: Menú para configuración de parte media del soporte

Para la parte media del soporte, se pueden hacer tres cambios: forma, radio y largo. Estos tres parámetros son suficientes para poder obtener lo que se necesita para soportar el objeto. La forma del soporte puede proveer más soporte que otra, pero no cambia mucho entre una y otra. El radio del soporte puede cambiarse también, pero este tiene que ser menor al de la base para poder tener un soporte adecuado.

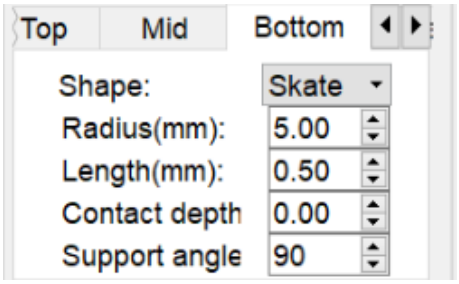


Figura 151: Menú para configuración de la base del soporte

La base del soporte también tiene opción para varios cambios como se tenían para la punta del soporte, la regla para que este funcione con el resto de los parámetros es que la base sea más grande que la parte media y la parte media un poco mas grande o igual que la punta. La forma de la base puede cambiarse para abarcar mas espacio.

Si se quieren tener parámetros predefinidos pero que igualmente funcionan para objetos de pequeño o mediano tamaño se puede elegir entre las opciones mostradas a continuación.

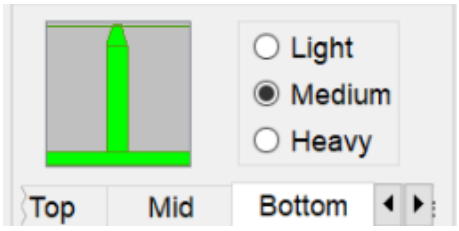


Figura 152: Opciones predeterminadas de soporte

Estas opciones cambian todos los parámetros de tamaño, excepto la forma que se tenga.

Luego de haber elegido los parámetros para el soporte se tienen varias opciones para

agregarlo. Se puede hacer manualmente mediante el ratón de eligiendo los puntos donde se pondrán como se muestra a continuación.

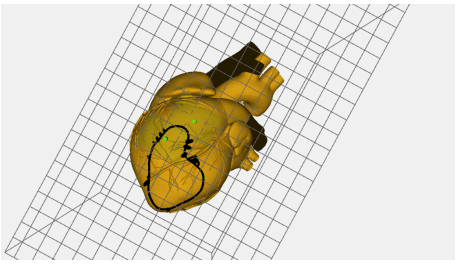


Figura 153: Vista para agregar soporte manualmente a un objeto

Los puntos verdes de la imagen muestran los soportes que ya se agregaron y la línea negra que es la capa sobre la que está el cursor del ratón. En esta línea negra se activaría la opción de agregar soporte si se muestra una luz verde sobre el punto donde se agregará el soporte. De no poderse agregar el soporte el área iluminada será de color rojo.

Si no se quiere agregar el soporte manualmente se tiene la opción de agregarlo automáticamente, esto se puede lograr con la opción mostrada a continuación.

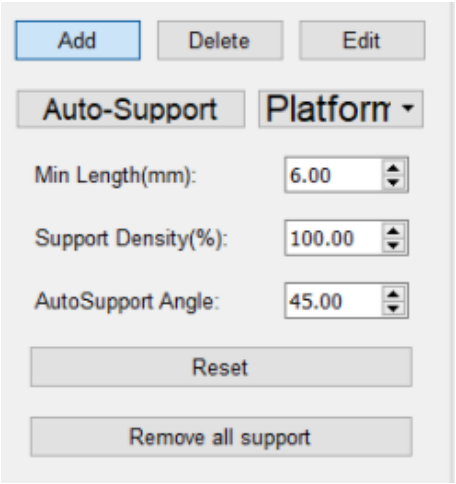


Figura 154: Mas opciones para configuración de soporte

En este mismo menú de opciones se tiene la opción de eliminar soporte que se haya agregado manualmente con el botón eliminar (delete) o puede editarse a conveniencia con el botón editar (edit). También, puede cambiarse todo el soporte puesto manualmente con la opción de reinicio (reset). La última opción que puede usarse para soporte manual y automático es el que elimina todo el soporte y se activa con el botón del mismo nombre (remove all support).

Una vez puesto el soporte deseado se tendrá algo parecido a la imagen siguiente. Hay que mantener en consideración que mientras más soporte se le aplica al objeto, más lento será la renderización del programa y por lo tanto hará lento el movimiento del objeto y su edición.

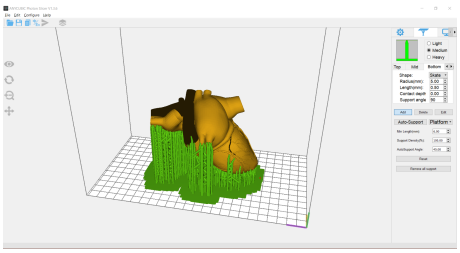


Figura 155: Objeto con soporte agregado automáticamente

Una vez se tenga este objeto listo con el soporte deseado ya puede hacerse varias ediciones para el cambio que quiera hacerse. La configuración de este merece un apartado por su cuenta y se describe en la siguiente sección. Por el momento solo se limita a los otros cambios que pueden hacerse.

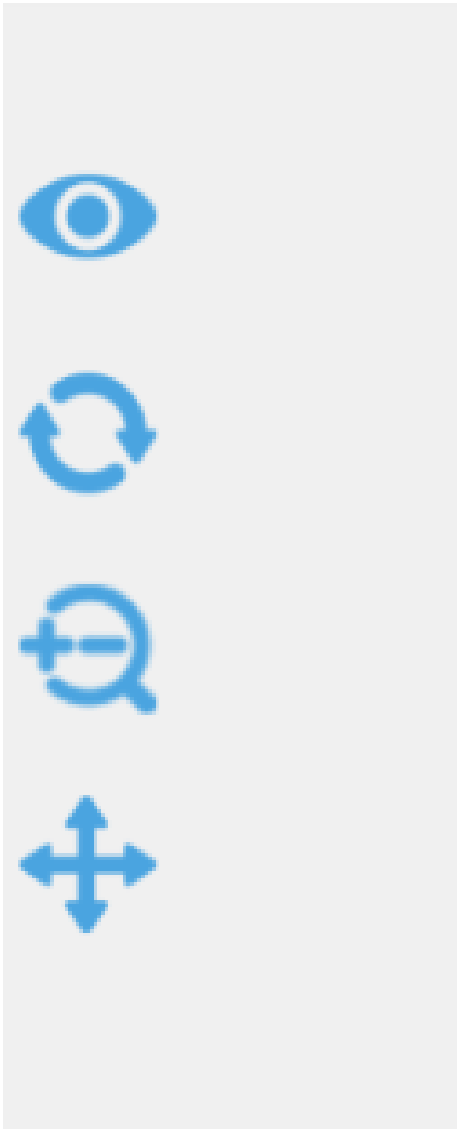


Figura 156: Barra de opciones de edición al objeto

La primera opción del menú modifica la vista del objeto, esta puede ponerse para tener una mejor vista de cada parte del objeto y sus soportes. Estas vistas tienen tres opciones para visualización: frontal (front), aéreo (top) y base (bottom). Así como se puede reiniciar los parámetros para que estas vistas.

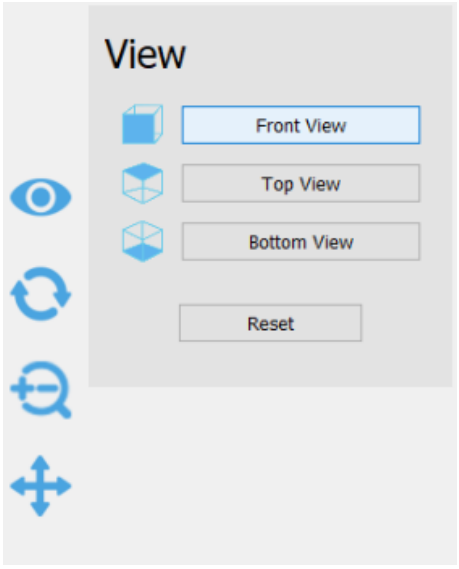


Figura 157: Menú para configuración de vista del objeto

La siguiente opción que se tiene para el objeto es la orientación de este, este funciona para los tres ejes del mapa cartesiano.

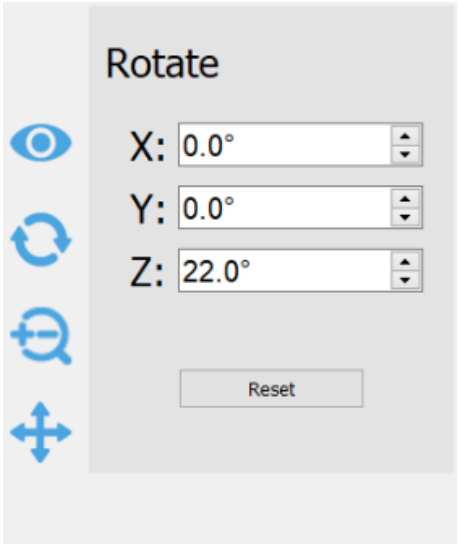


Figura 158: Menú para configuración de orientación del objeto

Con la orientación se pueden lograr ángulos de impresión que logran mayor detalle, esta opción es aconsejable usar antes de agregar soporte al objeto si se hace después de agregarlo la impresión no será adecuada. Esta rotación es de gran utilidad cuando se quiere posicionar el objeto de tal forma que gran parte de este toque la base del área de trabajo o para ponerlo en un ángulo de 45 grados el cual es recomendable para impresiones de alto detalle. La siguiente opción tiene que ver con el dimensionamiento del objeto.

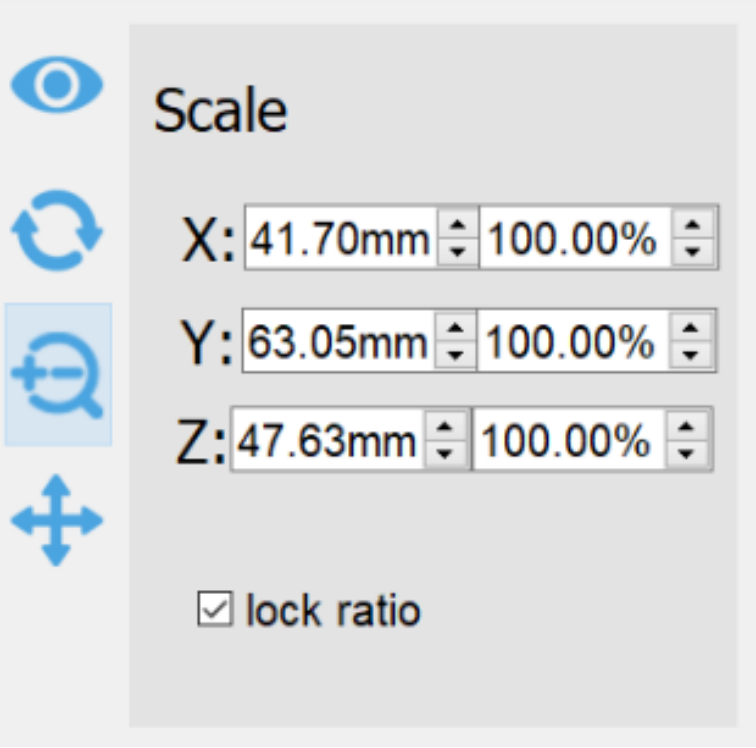


Figura 159: Menú para configuración de dimensionamiento del objeto

Los cambios que pueden hacerse al objeto se dan en los tres ejes del plano cartesiano, en cada una de las opciones de ejes puede verse lo que mide el objeto actualmente y al lado izquierdo de este se puede modificarse el porcentaje que quiere darse para agrandar o disminuir el tamaño del objeto. Un cambio en cualquiera de estos porcentajes afecta todos los ejes del objeto y por tanto no es necesario cambiar cada uno de estos.

La siguiente opción de se trata del posicionamiento del objeto, este puede darse en cualquiera de los ejes del plano. Sirve también para poder centrar el objeto o para ponerlo sobre la superficie del área de trabajo. El programa también da la opción automática de centrar el objeto automáticamente (center) o de posicionarlo sobre la plataforma de trabajo (on platform), se puede mover el objeto en cualquier lugar de la plataforma, pero se debe mantener en cuenta que este no puede salir de la plataforma.

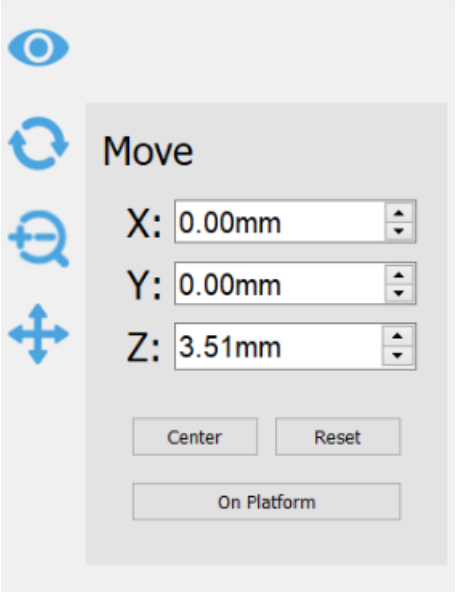


Figura 160: Menú para configuración de posicionamiento del objeto

Por último, el programa da algunas opciones múltiples que sirven para todo tipo de ediciones extra que quieran hacerse hasta en la plataforma.

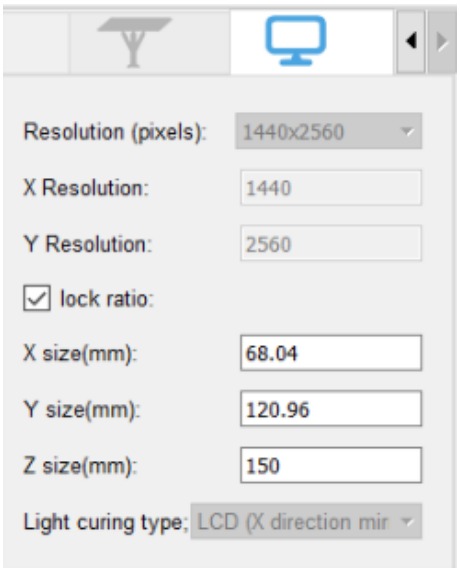


Figura 161: Menú para configuración de parámetros de la impresora

En este quinto menú pueden editarse las resoluciones y tamaños de la pantalla que utiliza la impresora, esto se hace para adecuarse al tipo de impresora que se tenga o el tamaño que se tenga o que se quiera usar en alguna impresora armada.



Figura 162: Barra de opciones principal

En esta barra de opciones donde se abrieron objetos guardados se tiene otras opciones. La segunda después de abrir archivos es la de guardar, si no se hizo un slice al objeto lo único que hace es guardar el objeto en formato STL. La cuarta opción tiene opción de lenguaje para todas las opciones del programa.

La tercera opción copia y pega el objeto uno a la par del otro dentro de la plataforma de trabajo, cuando se quieren imprimir múltiples objetos al mismo tiempo.

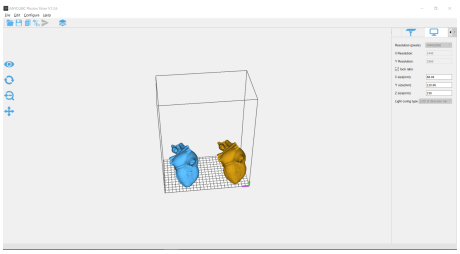


Figura 163: Objeto copiado y pegado después de elegir la opción de la barra

La última opción de la barra de opciones es la que configura al objeto para poderse imprimir creando las capas necesarias según los parámetros que se tienen en la configuración y que se detallan en la siguiente sección. Esta opción abre una ventana con datos y esta tiene opción para otra aun más detallada en la que se muestran las capas que la impresora tendrá para poder curar la resina y que puede moverse con la barra de cambio, estos datos se pueden obviar si solo se elige el botón de continuar (ok) pero pueden verse al elegir el botón de vista previa (show preview) de la primera ventana de datos como se muestra en las siguientes figuras.

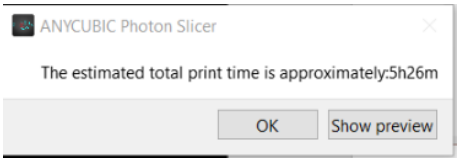


Figura 164: Primera venta desplegada después de opción de slice

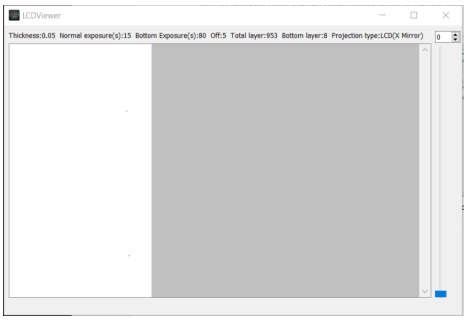


Figura 165: Ventana detallada de datos de impresión

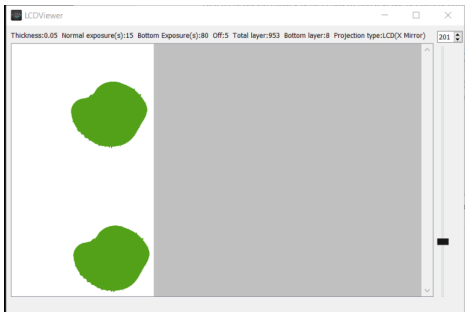


Figura 166: Ventana detalla de datos de impresión mostrando una capa de impresión del objeto

13.6.3. Parámetros

La parte más importante en la impresión de objetos tridimensionales y enfocándose en la impresora de resina con la que se esta trabajando. Los parámetros de impresión dependen del tamaño del objeto, la altura de capa y hasta la velocidad la cual va a estar imprimiendo el objeto.

Para configurar estos parámetros de impresión se necesita ir al menú de configuración ubicado en la parte derecha del programa slicer de Anycubic.

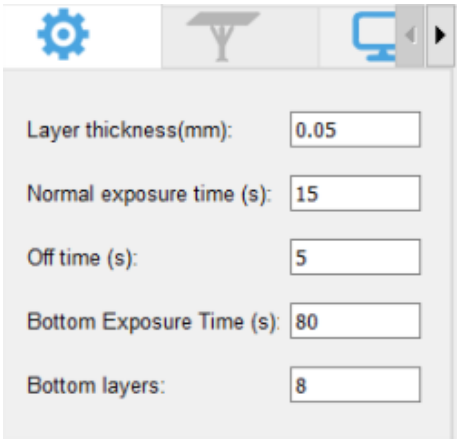


Figura 167: Menú de configuración para impresión en 3D

De esta imagen es necesario definir cada uno de los componentes ya que todos son importantes para el proceso de impresión.

Grueso de capa (layer thickness): como lo dice el nombre, este parámetro define el grueso de cada capa individual que compone al objeto de impresión. Los valores para este parámetro están en las especificaciones de desempeño de la impresora y se encuentra en un rango entre 0.01 a 0.2 mm donde el primer valor es lo más fino que puede lograrse en cuanto al grueso de capa. El grueso de capa modifica el nivel de detalle de los objetos imprimir, los objetos más finos son los que pueden llegar hasta 0.01mm de grosor. Lo que pasa con el detalle es que

aumenta de manera considerable el tiempo de impresión debido a que se crean más capas que han de curarse.

Tómese por ejemplo el siguiente objeto, un fantasma del videojuego Pacman. Este objeto fue impreso originalmente en un grosor de 0.1mm y se tardo 1:15 horas en terminarse de imprimir, pero se quiso más detalle y al dejar todos los parámetros iguales pero el grosor de capa distinto (0.05mm) el tiempo es de 2 horas con 840 capas y hasta 10 horas con 0.01mm creando 4201 capas.

Este ejemplo debe servir para que el usuario tome en cuenta la cantidad de tiempo que tiene disponible para imprimir algún objeto en esta impresora.



Figura 168: Fantasma impreso en 0.1mm grueso de capa

Tiempo de exposición normal (normal exposure time): Este tiempo de exposición es el tiempo al cual la resina estará expuesta a luz UV cuando se estén curando capas. Este tiempo nace después de completar las capas de base que también pueden ser configuradas en el menú. El tiempo normal de exposición es únicamente usado para las capas que no son parte de la base que se definió en los parámetros, por lo que no se puede usar el tiempo normal de exposición en la base para ahorrar tiempo de impresión ya que de este modo la impresión no se completara.

Tiempo fuera (off time): Este tiempo es el que se da entre capa y capa. Es un tiempo que ayuda a la resina a pegarse a la capa anterior o que ayuda a que esta baje su temperatura un poco, pero lo suficiente para que no se dañe la impresión. Este tiempo es recomendable dejarlo muy bajo en comparación al tiempo normal de exposición, esto se debe a que no se quiere que la capa recientemente solidificada se arruine por el cambio de temperatura, cuando se requiere que la resina mantenga una temperatura constante para que logre curarse, es recomendable dejar este valor entre 1-3 segundos, pero si el objeto es menos detallado y se quiere sacar rápido, se puede dejar este valor entre 3 a 5 segundos.

Tiempo de exposición de base (bottom exposure time): este tiempo de exposición esta dedicado exclusivamente a las capas de base que se definieron con anterioridad. El tiempo de estas será mayor debido a que la resina tiene que pegarse a la placa para poder continuar con la impresión.

Capas de base (bottom layers): el numero de capas que se toman del objeto para que sirvan de base, estas son las que se pegaran a la placa pero que de igual forma son parte del objeto.

Estos últimos valores son igual de importantes como cualquier otro y de este dependen uno del otro para trabajar y crear buenas impresiones. El tiempo de exposición de base es importante ya que de este dependerá el éxito del resto de la impresión, la impresión tiene que pegarse a la placa para poder obtener todo el objeto que se quiere. Mientras más tiempo se tenga de exposición, más fijo este estará en la placa y se pegara por mas tiempo sobre ella. Se ha de tomar en cuenta que si la impresión no se pega a la placa es necesario reconfigurar la impresión con más tiempo de exposición de base, se recomiendan valores entre 30 y 80 segundos, pero este puede aumentar si la resina que se usa es más rígida y se resiste a pegarse a la placa. Lo que también influye mucho si el objeto se pega o no a la placa son el número de capas que se definen como base, el número de capas que se defina como base se tomaran del objeto en si pero si no se quiere tener esta clase de configuración se puede editar el objeto para crearle una base.

No usar el tiempo de la base como tiempo normal de exposición ya que esto causa que el objeto se pegue al VAT y no a la placa.



Figura 169: Base de un objeto

Los valores de estos parámetros dependen mucho del tamaño y del grueso de capa que se usara para los objetos de impresión. El manual del usuario aconseja que mientras mas gruesa sea la capa, mayor el tiempo normal de exposición. Hay que tomar en cuenta que el tiempo no tiene que ser excesivo para que la resina se pegue a la placa y no al VAT.

Estos tiempos también dependen mucho del tipo de resina con el que se esta trabajando. Cuando se trata de resina rígida, el tiempo de impresión es bastante corto en comparación al tiempo requerido para curar resina elástica o flexible

Para dar un comienzo al lector, se tiene en la siguiente tabla u resumen de tamaños y tiempos de impresión con la cual se puede guiar para impresiones futuras.

Se puede notar que las primeras impresiones tienen más tiempo de exposición normal que los que tienen grueso de capa que si lo requiere, esto se debe a que estas fueron las primeras impresiones que se obtuvieron y todavía se estaba familiarizando con la impresora. Estos valores funcionan para los gruesos de capa siempre y cuando la resina que se use sea rígida.

Objeto	Dimensiones (mm)	Tiempo normal de exposición (s)	Tiempo fuera (s)	Tiempo de exposición de base (s)	Número de capas	Grueso de capa (mm)
Esfera	x = 20 y = 20 z = 20	10	3	70	6	0.05
Benchie	x = 15.16 y = 7.96 z = 12	6	5	80	8	0.05
Ghost	x = 35.13 y = 3765 z = 42	4	4	60	8	0.1
Tortuga	x = 31.87 y = 33.65 z = 7.09	6	6	80	6	0.05
Corazón	x = 38.46 y = 66.70 z = 42.48	6	6	80	6	0.05

Cuadro 14: Tabla de valores para parámetros de impresión con resina rígida

El uso de resina flexible ha sido más difícil por lo que es necesario hacer varias pruebas previas antes de imprimir el objeto que se quiere. La tabla a continuación han sido las pruebas que se han hecho que logran curar la resina y que lograr empezar el objeto pero que no están completamente bien.

Objeto	Dimensiones (mm)	Tiempo normal de exposición (s)	Tiempo fuera (s)	Tiempo de exposición de base (s)	Numero de capas	Grueso de capa (mm)
Cubo	x = 12.5 y = 12.5 z = 12.5	20	5	80	8	0.05
Mitad corazón	x = 38.34 y = 46.83 z = 23.65	20	4	80	8	0.05
Corazón	x = 38.34 y = 66.70 z = 42.48	25	3	80	8	0.1

Cuadro 15: Tabla de valores para parámetros de impresión con resina flexible

Estas dos tablas son muy útiles para empezar algún tipo de impresión rígido o elástico pero hay que tomar en cuenta también que las marcas de resina usado en estas tablas son Anycubic para la resina rígida y Photocentric para resina elástica por lo que estos valores no siempre serán apropiados para cualquier tipo de resina. En la página que se deja a continuación se tiene una tabla que es constantemente actualizada por usuarios de impresoras de resina, en esta tabla se tiene una gran compilación de datos y parámetros

para la impresión de objetos para muchos tipos de resina y marcas de resina.

Página de valores:

https://docs.google.com/spreadsheets/d/1crvzMnt_8NJXAsABinoIhcOjE8l3h7s0L82Zlh1vkL8/htmlview?sle=true#gid=0

Cuadro 16: URL

13.6.4. Cuidado de la resina

Durante el proceso de impresión se pueden tener varios percances y se obtienen de estas impresiones fallidas, las impresiones fallidas dejan muchos pedazos de resina sólida dentro del VAT. Estos pedazos solidificados deben de retirarse del área de impresión o de curado de resina. Esto ha de hacerse ya que las capas de un objeto pueden quedarse pegados a estos pedazos, cuando las capas quedan pegadas se quedan en el VAT aumentando el tamaño de los pedazos que se encuentran en el VAT afectando toda impresión futura que se haga.

Para arreglar este problema es recomendable usar pinzas, con las pinzas se pueden agarrar pedazos sólidos y sacarlos del VAT. Pero cuando se trata de objeto muy pequeños no es necesario sacarlos directamente del VAT, con estos basta simplemente usar la espátula de plástico para empujarlos a los lados del VAT y estos ya no interfieren en la impresión de los objetos futuros que se tengan.

Ahora bien, la resina es fotosensible y esta se endurece rápidamente con luz UV y muy lentamente con luz eléctrica. Durante la noche, la resina puede quedarse en el VAT, no es necesario devolver la resina restante al envase, sino que se puede mantener la resina ahí hasta nuevo uso. Siempre y cuando la resina no este más de dos días sin usarse, esta puede estar dentro de la impresora sin problema alguno. La resina normalmente viene siempre en envases opacos que pueden proteger la resina que es fotosensible. Esta resina necesita estar aquí y en un ambiente o temperatura ambiente, por lo que es necesario mantener esta resina dentro de dicho envase siempre que se pueda y no exponerlo a la luz UV. La caja reflectora que se hizo para poder terminar de curar la resina es necesaria para poder agarrar los objetos de manera segura sabiendo que los residuos de la resina sean tratados.

13.6.5. Post-procesamiento

El post-procesamiento es la ultima fase del proceso de impresión de los objetos de cualquier tipo. Esta parte del proceso es igualmente importante describirlo y detallarlo por lo que esta sección se dedica exclusivamente a poder dar a entender el proceso que se conlleva y tratar de mejorar de alguna manera la calidad de los objetos que se tienen.

Este proceso es bastante simple en comparación al resto de los procesos anteriores cuando se están imprimiendo los objetos. Esta parte del proceso de impresión se trata exclusivamente de tratar y curar los residuos de resina que quedan sobre la superficie de los objetos luego de sacarlos de las impresoras.

Todos los objetos luego de ser impresos han de meterse a la caja reflectora que se construyo para poder concentrar toda la luz UV que se tiene debido a una fuente artificial de

la misma. La caja reflectora por dentro esta repleta de aluminio con tal de poder reflejar la mayor cantidad de luz UV posible. Dentro de esta caja se tiene el objeto por cierta cantidad de tiempo que es suficiente para poder curar la resina y terminar de endurecer el objeto que se imprime con tal de prolongar su vida útil. El tiempo recomendado de curado depende del material, pero para objetos medianos en tamaño se recomienda al menos tres minutos dentro de la caja reflectora, esto se debe a que dependiendo de la resina esta puede presentar quemaduras. Estas quemaduras tal vez, en algún momento pueden resultar adversas hacia los objetos. En términos de los detalles superficiales o visuales, este efecto que se tiene puede resultar desagradable, por lo que si se quiere mantener el objeto por mas tiempo en la caja reflectora se tiene que hacer según el operador lo desee.

13.7. Anexo G: Manual de uso en línea para el público

MANUAL DE USO PARA IMPRESORA DLP ANYCUBIC PHOTON En colaboración con la Universidad del Valle de Guatemala y la Unidad de Cardiología (UNICAR)

Guatemala, enero 2020 // Gustavo Orellana - gustavoorellanal@gmail.com

Conociendo la impresora Las partes que siempre tendrán un contacto directo con el operador y que pueden contaminarse con resina al momento de usarlas. Estas se listan a continuación:

TAPA

VAT

PLACA

El VAT tiene un plástico especial en el fondo hecho de etileno propileno (FEP, por sus siglas en ingles), el usuario debe tratarlo con cuidado evitando rayarlo o romperlo para que las impresiones salgan bien.

La PLACA esta compuesta por dos partes: primero un tornillo rojo y grande que puede apretarse para que se quede fijo en la base móvil y la segunda siendo la parte plana donde se pegarán las impresiones.

La TAPA de la impresora es una parte grande la cual se usa para accesar al entorno interior.

13.7.1. Antes de usar la impresora

El usuario, antes de usar cualquier impresora debe tomar algunas precauciones para asegurar la mejor calidad de impresión posible.

Instalación

Preparar el lugar colocando papel debajo del lugar donde se pondrá la impresora.

CUIDADO: el usuario deberá usar guantes y mascarilla ya que la resina es irritante para la piel. La resina no debe tener contacto con otros utensilios y materiales que tenga el usuario.

Nota: El papel es un material bastante eficiente para absorber la resina.

Asegurarse de tener un toma corrientes cerca del espacio de trabajo.

Colocar la impresora en el espacio seleccionado y conectarla.

Materiales necesarios

Antes de usar la impresora tener a mano los siguientes materiales adicionales.

Designar un espacio donde se podrán guardar todos los materiales que se listan a continuación:

Guantes de nitrilo

Mascarilla

Alcohol isopropílico (o cualquier producto de limpieza de resina)

Embudo

Filtro (desechable o metálico)

Nota: Estos objetos son necesarios para evitar daños al usuario.

Designar un contenedor, puede ser de plástico (puede ser polipropileno) o vidrio para poder lavar las impresiones que vayan saliendo.

La resina es el material mas importante que se usará. Esta puede ser de cualquier tipo siempre y cuando la impresora pueda manejarlo.

Nota: Para saber que resinas funcionan con la impresora, consultar el manual del operador.

Nota: Agitar bien el contenedor de la resina. Al agitar los contenedores se crearán burbujas de aire en este, por lo que es necesario esperar un poco antes de usarla.

Caja de secado

Se recomienda tener una caja de secado. Esta caja se puede comprar en línea o hacerse a mano.

Si quiere construirse la caja, tener en mente las siguientes características.

Esta caja requiere un ambiente cerrado y que se refleje toda la luz posible.

Usar una lámpara de luz UV a una longitud de onda de 400-405 nm (este valor puede variar según la impresora)

Un componente adicional puede ser una base giratoria, para que la impresión pueda secarse de todos los ángulos posibles.

13.7.2. Al usar la impresora

Los pasos a seguir para evitar daños al usuario y lograr buenas impresiones son:

CUIDADO: Siempre usar guantes y mascarilla cuando se está operando la impresora

Operación

Para encender la impresora, presionar el boton de encendido ubicado en el costado inferior derecho de esta.

Conectar un USB en el puerto también ubicado en el inferior derecho de la impresora.

Nota: Para asegurarse de que el USB esta funcionando correctamente, presionar el botón de "PRINTƨ ver si el objeto que se desea imprimir se visualiza en el listado.

La PLACA de la impresora debe estar bien asegurada con el tornillo rojo a la base móvil.

El VAT debe estar libre de rayones y que esté sujeto a la base con los tornillos que tiene a los costados.

Debe haber suficiente RESINA en el VAT para que la impresión no falle. Por lo regular se recomienda colocar más resina de la que usará el objeto sin que esta sobrepase el nivel que especifica el fabricante.

Presionar el botón PRINT en la pantalla de la impresora.

Buscar la impresión que se quiere hacer.

Nota: Si la impresión que se quiere hacer no aparece en la primera pantalla, buscarla con los botones de abajo y arriba que aparecen a la derecha de la pantalla de impresión.

Presionar la imagen del objeto que quiere imprimirse.

Cerrar la TAPA de la impresora.

Esperar a que la impresión termine, este se especifica en la pantalla.

Nota: Si falla la impresión en medio del proceso, detenerla para sacar el objeto y repertir la impresión.

CUIDADO: al sacar la impresión fallida, revisar el fondo del VAT que no hayan residuos de resina solidificada.

Para asegurarse de que la impresión está yendo bien:

Esperar a que se solidifiquen las capas base del objeto.

Pausar la impresión.

Abrir la TAPA de la impresora.

Revisar que la base se haya pegado a la PLACA sin mover la impresora.

Cerrar la TAPA de la impresora.

Continuar con la impresión del objeto.

13.7.3. Después de imprimir

Al terminar el proceso, la impresora inmediatamente subirá la PLACA lo más alto posible. Se indicará la finalización de la impresión con una alarma que sonara dos veces.

Sacar el objeto

Al terminar, aflojar el tornillo rojo que sostiene la PLACA en su lugar.

Sacar la PLACA de la impresora.

Usar una ESPÁTULA para despegar el objeto de la PLACA.

Usar una espátula metálica si el objeto es difícil de despegar.

Cuidado: Aplicar fuerza de forma gradual para evitar que el objeto impreso se caiga y se rompa.

Nota: Siempre usar guantes al manipular los objetos o la impresora.

Limpieza del objeto

Nota: Siempre usar guantes y mascarilla al manipular los objetos y componentes de la impresora.

Dentro del contenedor que se asignó, usar alcohol isopropílico o algún producto de limpieza para eliminar el exceso de resina en el objeto.

Con papel o agua, secar el objeto.

Luego de secar el objeto, meter este dentro de la caja de secado y encenderla.

Nota: Si no se cuenta con una caja de secado, colocar los objetos bajo el sol.

Nota: Los objetos dentro de la caja pueden quemarse y si se está usando resina transparente esta tomará una tonalidad café.

Sacar el objeto de la caja.

Si al tocar el objeto este se siente viscoso, eliminar la resina restante con papel.

Lavarse las manos.

13.7.4. Mantenimiento

Parte fundamental del buen funcionamiento de la impresora es la limpieza, revisión de componentes y el uso correcto de materiales.

Limpieza de la impresora

Nota: Siempre usar guantes y mascarilla al momento de limpiar la impresora y sus componentes.

Apagar la impresora.

Sacar la PLACA de la impresora.

Sacar el VAT de la impresora.

Con un trapo o papel húmedo con alcohol etílico o con algún producto de limpieza asegurarse de limpiar toda la impresora.

En el contenedor de limpieza dejar remojando la PLACA y el VAT por al menos 5 minutos.

Con las manos, limpiar por completo cada componente.

Dejar el exceso de los productos de limpieza en el contenedor.

Secar los componentes con un trapo seco o con otro pedazo de papel.

La limpieza de la pantalla de la impresora es importante pero hay que tener cuidado al hacerlo.

Quitar el VAT de la impresora

Ubicar la pantalla LCD de la impresora al fondo.

Nota: La pantalla solo puede limpiarse con alcohol.

Aplicar el alcohol en el trapo y no en la pantalla.

Limpiar la pantalla con mucho cuidado para evitar rayones.

No aplicar fuerza sobre la pantalla al limpiarla.

Hacer movimiento en una sola dirección para que este se seque de manera uniforme.

Luego de que se seque el alcohol, pasar un paño de microfibra sobre la pantalla para eliminar por completo la suciedad.

13.7.5. Revisión de los componentes

Para el VAT:

Sacar el VAT de la impresora.

Con el embudo y el filtro, vaciar la resina del VAT y regresarla al contenedor.

Limpiar y secar bien el VAT.

Revisar el plástico en el fondo por rayones.

Revisar que el VAT no tenga pegado trozos de resina solidificada.

Revisar que el VAT no tenga hoyos.

Nota: Con el tiempo el VAT presenta rayones que pueden permitirse en pocas cantidades. Mientras aumenten el fondo del VAT quedará inservible.

Para la PLACA:

Sacar la PLACA de la impresora.

Limpiar y secar bien la PLACA.

Revisar si hay rayones.

Revisar que no se hayan desprendido partes de la pintura o metal de la PLACA.

Revisar que el tornillo rojo este en buenas condiciones.

Nota: La PLACA si puede tener rayones pero, cuando estos son muy profundos, puede resultar difícil despegar la impresión de la PLACA.

Para la pantalla LCD:

Saca el VAT de la impresora

Revisar la pantalla por manchas de resina o líquido de limpieza

Revisar por rayones en la pantalla

Limpiar la pantalla de ser necesario

CUIDADO: La pantalla NO puede tener ningun rayón porque esto afectará negativamente el proceso de impresión.

13.8. Anexo H: Manual de impresión en línea para el público

MANUAL DE IMPRESIÓN USANDO SLICER ANYCUBIC PHOTON En colaboración con la Universidad del Valle de Guatemala y la Unidad de Cardiología (UNICAR)

Guatemala, junio 2020 // Gustavo Orellana - gustavoorellanal@gmail.com

13.8.1. CONOCIENDO EL PROGRAMA

Antes de empezar a usar el programa Slicer Anycubic Photon, es necesario familiarizarse con algunas de las opciones que se tienen a disposicion.

A continuación, se muestra el entorno del programa al abrirlo en cualquier momento.

SOFTWARE

Es necesario abrir un modelo en formato .STL para poder empezar a trabajar.

Presionar el botón con forma de un folder de la barra de herramientas.

Ubicar el modelo que se quiere imprimir en los documentos de la computadora.

Nota: Se recomienda dejar todos los modelos en una carpeta.

Elegir el modelos y esperar que cargue en el programa.

Teniendo el objeto cargado, ya se le pueden hacer cambios para poder imprimir exitosamente.

Si se desea, guardar el objeto en formato .STL para continuar su preparación en otro momento. Para ello se elegirá la opción con forma de floppy disk en la barra de herramientas.

Elegir la ubicación de guardado

La opción a la derecha de la opción de guardar puede copiar el objeto que se tiene cargado e imprimir una copia.

Nota: La copia del objeto quedará donde mejor quepa dentro del área de trabajo.

Para los que pueden hablar mandarín, la opción para cambiar el idioma se encuentra después del botón de copiar.

La última opción de la barra de herramientas permite el comienzo de la creación de capas, la cantidad de estas dependen del grueso de capa que se haya especificado.

A esta opción se le denominará como Slice.

Slice

Al presionar la opción de Slice se generarán varias ventanas adicionales.

La primera ventana será para que el usuario elija la ubicación donde se guardará el archivo generado con extension .PHOTON.

La segunda ventana que aparecerá, será una barra de progreso la cual indica cuanto falta para terminar este proceso.

La tercera ventana da información sobre el tiempo que estima se tardará en imprimir. Aqui se tienen dos opciones: Presionar OK y terminar; y elegir Show preview donde se tendrá más información.

La cuarta ventana aparece al presionar la opción de Show preview.

En esta ventana se tienen varios datos que sirven para asegurarse que todo esta correcto, entre los cuales están los siguientes: Grueso de capa, tiempos de exposición, cantidad total de capas generadas y capas base.

A la derecha de estos datos se encuentra un navegador con el cual el usuario puede ver las capas individuales que conforman el objeto y se puede escoger alguna en específico para encontrar errores.

Ejemplo 1. Se puede ver la capa 108 del objeto.

13.8.2. SOPORTE

El soporte en un objeto es vital para que este pueda imprimirse como uno desea, cuando un modelo tiene geometrías complejas es difícil acostarlo en la base.

Para empezar con ello, el usuario debe ubicarse en la parte derecha del programa, a la derecha un ícono con la forma de un engrane en la barra de herrramientas.

Nota: El menú de soporte no aparecerá a menos que haya un objeto cargado en el programa y se haya seleccionado.

Una vez en este menú se tienen muchas opciones, pero en general debería de verse como en la siguiente imagen.

Se tienen 3 opciones de edición del soporte que se quiere usar: base(Bottom), parte media(Mid) y punta(Top).

TOP

La punta del soporte puede editarse para tener distintos diámetros y formas.

Seleccionar la opción TOP.

En SHAPE elegir entre las opciones, la forma que se quiere.

Nota: Puede elegirse entre las opciones de cubo y prisma.

En RADIUS elegir el radio que tendrá la punta del soporte. Se recomienda que este radio sea menor o igual que el radio de la Parte media del soporte.

Ejemplo. Si el radio de la punta es de 0.60mm el radio de la parte media es 0.60mm o más.

En Length se puede editar el largo del soporte. Se recomienda que este sea más corto posible para que siempre tenga contacto con la PLACA.

En Contact depth se especifíca la profundidad la cual entrará la punta dentro del objeto. Mientras más profundo el contacto, más difícil que se despegue la impresión del soporte.

Nota: Se recomienda dejar esta opción tal y como está ya que este valor es suficiente para obtener buenos resultados.

Por último en Support angle se puede editar el ángulo en el cual se pegará la punta del soporte en el objeto.

Mid

En la parte media del soporte se pueden notarse tres valores. Sin embargo, solo pueden cambiarse 2.

Para la forma, se tienen varias opciones y puede elegirse que se adecúe mejor al ojeto de impresión.

El otro parámetro es el radio del soporte, como se mencionó, este puede ser mayor o igual que el radio de la punto pero mucho menor al de la base.

Bottom

La base del soporte es esencial para una impresión exitosa. Esta tiene que pegarse a la PLACA para que el resto del objeto pueda imprimirse sobre el soporte.

La primera opción, como las anteriores, es elegir la forma de esta parte del soporte.

El radio de la base tiene que se mucho mayor a los demás.

Ejemplo. Si el radio de la punta y la parte media es de 0.60mm, la base será de 5.00mm.

El siguiente parámetro es el largo de la base, en vez de pensar en este dato como un largo, es mejor pensarlo como un grosor y así se puede definir de mejor manera al momento de poner soporte.

La profundidad de contacto es un parámetro que no se toca, esto se deja en cero para evitar que la base se imprima dentro del objeto y arruine su forma.

El ángulo de soporte puede variar entre 45 y 90 grados, esto indica el ángulo mínimo o máximo que se permite para crear la base del soporte.

A continuación se presentan unos ejemplos de como quedaría el soporte.

Ejemplo 1. Punta y parte media con forma de prisma, base con forma Skate y profundiad de contacto de 0.20mm.

Ejemplo 2. Punta con forma de cono, parte media con forma de cubo y base con forma de cilindro.

Raft

El raft es la última opción que se tiene para poder crear soporte para los objetos impresión. Con esta se puede crear una sola estructura sin tener que ver cada uno individualmente. Normalmente esta opción no se usa debido a que es mucha la cantidad de resina que usa.

13.8.3. ¿Cómo poner el soporte?

Para poner soporte se tienen varias opciones las cuales se contemplan a continuación:

Manualmente

Para colocar el soporte manualmente seguir lo siguientes pasos:

Elegir el objeto de manera que este cambie su color para que este naranja.

Seleccionar la opción de soporte.

Cambiar los parámetros como el usuario considere según lo visto en las secciones anteriores.

En el menú también presionar la opción de ADD, para asegurarse que se si agreguen los soportes.

Para colocar el soporte manualmente, girar la vista del objeto de modo que este se mire desde abajo.

Mover el cursor hasta estar debajo del objeto.

Se verán unas líneas negras que se crean mientras se mueva el cursor y un punto verde que indica que ahi se puede poner un soporte.

Nota: Si el punto que aparece es rojo, no puede ponerse soporte bajo ninguna circunstancia.

Elegir las áreas que el usuario considere de importancia para el soporte y hacer clic.

Una opción muy útil para este método para el soporte es el poder quitarlo a conveniencia. Eligiendo el botón Delete se puede eliminar el soporte que uno seleccione.

Automáticamente

Ubicarse en el menú de soporte.

Pueden cambiarse tres parámetros: longitud mínima, densidad de soporte y ángulo de auto soporte.

La longitud mínima puede ser de hasta 3.50 mm.

Nota: Dejar al longitud lo más corto posible para asegurar que este se imprima bien, mientras más largo sea este, menos probabilidad de éxito.

La densidad de soporte varía según el tamaño de la impresión, mientras más grande sea, más densidad de soporte habrá que poner.

El último parámetro puede dejarse a conveniencia según el objeto que se esté creando, mientras más recto el ángulo más soporte tendrá el objeto.

Se tiene una opción adicional al momento de poner automáticamente el soporte y puede elgirse entre: Platform que sólo agrega soporte fuera del objeto, y Full que agrega soporte en todas partes que el programa considere necesario.

Elegir alguna de las opciones adicionales que se describieron anteriormente.

Una vez se tengan todos los parámetros elegidos, presionar el botón Auto-support para que el soporte se coloque automáticamente.

Si todos los parámetros que se eligieron no son satisfactorios pueden eliminarse con la opción de Reset.

Luego de elegir Auto-support, se abrirá una ventana de espera.

Cuando termine de generarse el soporte, el objeto los tendrá incluidos debajo del mismo.

Si se quiere quitar el soporte por algún error, puede elegirse la opción de Remove all support que eliminará todo el soporte que se haya creado.

Nota: Mientras más densidad de soporte se ponga, más lento se cargará y en algunos casos, el programa se cerrará porque no podrá cargar tanto soporte.

13.8.4. PARÁMETROS

Los parámetros de impresión se refieren a los tiempos de curado que se necesita para poder imprimir exitosamente un objeto. Las opciones se muestran en el menú encontrado a la derecha del programa, en el ícono con forma de engrane.

En este menú se encuentran los tiempos, grueso de capa y número de capas base.

Tiempos

Los tiempos se dividen en tres grupos: Normal exposure time para el tiempo al que normalmente se expondrá la resina a la luz UV; Off Time para el tiempo de descanso para cada capa curada; y por último Bottom Exposure Time el cúal es un tiempo distinto para las capas base del objeto.

El normal exposure time dependerá del tipo de resina que se utilice. Como base se usan 10 segundos.

Off time Tiene que se un tiempo mucho menor al normal, se puede utilizar la mitad del tiempo que se especifíca en el tiempo normal.

Bottom exposure time Es el tiempo que se dejará únicamente para las capas base del objeto, este es mucho mayor al normal para asegurarse que se pegue a la placa.

Otros parámetros

El grosor de capa la define el usuario, mientras más gruesa la capa más tiempo normal ha de dejarse para asegurar que esta se cure.

Cuidado: el mínimo grosor permitido es de 0.01mm y el máximo de 2mm según el manual del fabricante

La número de capas define cuántas de las generadas se utilizarán para pegarse a la placa. Se recomienda especificar más de una capa para asegurarse que esta se pegue.

¿Qué parámetros especificar?

Los tiempos utilizados para curar la resina depeden de la marca y tipo que se utilice. Mediante la definición del grosor de capa se puede tener una buena idea de cuales valores poner.

Se recomienda visitar la siguiente página:

En esta se puede revisar una base de datos hecha por una comunidad que se dedica a imprimir objetos. Aquí pueden verse parámetros recomendados por usuarios que usan impresoras para todo tipo y color de resina.

13.8.5. Posicionamiento de objeto

Un paso importante para obtener impresiones exitosas es el posicionamiento del objeto dentro del área de trabajo.

Para poder configurar estas opciones, el usario tiene que irse a la barra de herramientas vertical ubicado a la izquierda del programa.

En esta barra de herramientas se tienen 4 opciones: View, Rotate, Scale y Move.

View

Con la opción View uno puede girar por completo el entorno para poder ver el objeto en alguna de las vistas isométricas.

Ejemplo 1. Al elegir la vista frontal.

Ejemplo 2. Al elegir vista aérea.

Con estas opciones el usuario puede apoyarse para posicionar el ver el objeto de mejor manera y poder posicionarlo a conveniencia.

Rotate

Rotar el objeto es parte importante del proceso de impresión, con esto se puede asentar el objeto a conveniencia para que la impresión sea más sencillo.

Ir a la barra de herramientas.

Elegir sobre cual eje se quiere rotar el objeto.

Definir los grados que se quiere girar el objeto.

Ejemplo 1. Girando el objeto 90 grados sobre el eje Z.

Otra forma de girar el objeto sin tener usar las opciones de los tres ejes es mediante el uso del mouse. Con clic derecho sobre el objeto y moviendo el mouse puede girarse el objeto sobre cualquier eje.

Ejemplo 2. Girando el objeto 318.5 grados sobre el eje Z.

Con Reset pueden borrarse los datos que se editaron para volver a empezar.

Scale

La opción de escalar ayuda al usuario a editar el tamaño del objeto, si este es muy grande puede hacerse más pequeño y viceversa.

Nota: Cuando la opción de Lock ratio está activada no importa cual de los parámetros se edite, se modificarán todos al mismo tiempo según el valor que se ingrese.

Ejemplo 1. Usando Lock ratio y editando X al 50

Hay dos opciones para modificar el tamaño del objeto, uno es mediante los porcentajes y dos es con la medida del mismo.

Si el objeto es muy grande, hacerlo mas pequeño para que quepa en el área de trabajo.

Si el objeto es muy pequeño, hacerlo más grande para sacar provecho a los detalles que pueden obtenerse.

Move

La última opción disponible en la barra vertical de herramientas, es el de mover el objeto en la posición deseada.

Dirigirse a la opción.

Nota: Hay dos opciones para mover un objeto: haciendo clic izquierdo sobre el objeto y moviendo el mouse hasta dejarlo en la posición deaseada; y colocando el valor de la posición en cada eje.

Alguna opciones rápidas pueden usarse también para mover el objeto.

Con Center puede ubicarse el objeto justo en el centro del área de trabajo.

Con On Platform el usuario se asegura de dejar el objeto sobre el área de trabajo.

Con Reset se pueden borrar los datos que se cambiaron.

El programa cuenta con un menú de opciones que son útiles para definir el área de trabajo, normalmente no se edita ninguno de los parámetros en este menú. Pero, algunas veces la impresora tiene más área de trabajo que lo que indica el programa.

Las primeras tres opciones siempre estarán bloqueadas al usuario ya que estas se definen según los parámetros que se cambien después.

Con Lock ratio se logra lo mismo que con el posicionamiento, asi que al cambiar un dato se cambiarán todos los datos.

Las siguientes tres opciones sirven para definir el área, con el apoyo del manual del fabricante, el usuario podrá definir con exactitud los parámetros que se han de poner.

El útlimo, asi como las primeras tres opciones, está bloqueada al usuario.

13.8.6. PASO A PASO PARA PREPARAR UNA IMPRESIÓN RÁPIDA

Abrir el programa slicer.

Cargar el objeto y esperar que se cargue en el área de trabajo.

Clic izquierdo sobre el objeto para habilitar soporte (De ser necesario).

Escoger la opción Light para objetos pequeños, Medium para objetos menores a los 10 cm y Heavy para objetos más grandes.

Especificar densidad de soporte evitando pasarse del 50

Volver al menú de tiempos.

En la página: hay muchas opciones para elegir pero si el usuario quiere definirlas por su cuenta, a continuación se encuentran algunas recomendaciones:

Especificar 0.05 mm para el grueso de capa (Suficiente definición) o 0.02 mm (Excelente definición)

Para el tiempo Normal exposure time dejar un rango entre 7 a 10 segundos para 0.05 mm o entre 4-6 segundos para 0.01mm.

Off time de 1 segundo (es suficiente para impresiones rápidas).

Bottom exposure time se dejarán en un rango entre 40-60 segundos.

Dejar de 8-10 capas en la opción de Bottom Layers

En las opciones de Move presionar en On platform y center.

Si el objeto es muy grande, ir a Scale y hacer lo siguiente:

Habilitar lock ratio.

Ajustar el porcentaje hasta que el objeto quepa en el área de trabajo.

Cuando el objeto ya esté según lo deseado, presionar Slice y escoger la ubicación donde se guardará el archivo (preferiblemente un USB).

Presionar OK.

Esperar a que termine el proceso.

Presionar OK.

Listo!

13.9. Anexo I: Bitácora de impresiones

A continuación se presenta una tabla que tiene la bitácora de impresiones hechas en la impresora de resina Anycubic, esta tabla incluye toda la información necesaria que se uso para cada uno de lo objetos descritos. En esta tabla también se incluyen todas las impresiones fallidas y la razón por la que fallaron, algunos de estos incluye imágenes después de la tabla.

En la tabla se tienen varias variables que funcionan para describir los parámetros de impresión: N es para el tiempo normal de exposición, O es el tiempo de apagado, B es el tiempo de exposición para las capas base del objeto, Rs es el radio de la punto del soporte, Rm es el radio de la parte media del soporte, Rb es el radio de la base del soporte y por ultimo se tiene las dimensiones x, y, z.

No.	Objeto	Resina	Grueso de capa (mm)	Tiempos (s)	Soporte (mm)	Tamaño (mm)	Tiempo de impresión (hrs)	Capas	Impresiones fallidas	Comentarios
1	Esfera	Rígida	0.05	N = 10 O = 3 B = 70	Rs = 0.4 Rm = 0.4 Rb = 3	x = 20 y = 20 z = 20	1:28	330	Sin soporte	La primera impresion falla al no tener un soporte
2	Benchies	Rígida	0.05	N = 6 O = 5 B = 80	Sin soporte	x = 15.16 y = 7.96 z = 12	0:51	241	No hay impresiones fallidas	Estos barquitos se imprimieron al primer intento
3	Ghost	Rígida	0.1	N = 4 O = 4 B = 60	Sin soporte	x = 35.13 y = 37.65 z = 42	1:15	840	N = 5 O = 3 B = 60	Los parámetros de la primera impresión no fueron idóneos
4	Bobblehead	Rígida	0.1	N = 5 O = 5 B = 60	Rs = 1.4 Rm = 1.4 Rb = 7	x = 19.25 y = 39.88 z = 37.91	1:30	425	- 'light support' -RS=0.8 RM=0.8 RB=8 - suciedad en VAT - N= 3 O = 3 B = 30 -N =4 O = 3 B = 30 - N=4 O = 4 B=40	Para estructuras que están colgando es necesario hacer un soporte mas grande que pueda llegar hasta ese punto. Mantener VAT limpio
5	Turtle	Rígida	0.05	N = 6 O = 5 B = 80	Sin soporte	x = 31.87 y = 33.65 z = 7.09	0:33	142	No hay impresiones fallidas	Se imprimieron al primer intento
6	Corazón	Rígida	0.05	N = 6 O = 5 B = 80	Rs = 1.4 Rm = 1.4 Rb = 7	x = 38.46 y = 66.7 z = 42.28	2:55	916	No hay impresiones fallidas	Se imprimieron al primer intento
7	Corazón mitad superior	Rígida	0.05	N = 6 O = 5 B = 80	Rs = 1.4 Rm = 1.4 Rb = 7	x = 35.66 y = 53.84 z = 41.39	2:52	898	No hay impresiones fallidas	Se imprimieron al primer intento
8	Corazón mitad superior vació -1	Rígida	0.1	N = 5 O = 5 B = 60	Rs = 1.4 Rm = 1.4 Rb = 7	x = 39.80 y = 44.52 z = 38.31	1:15	417		Capas inferiores se caen
9	Corazón mitad superior vacío -2	Rígida	0.1	N = 5 O = 5 B = 80	Rs = 1.4 Rm = 1.4 Rb = 7	x = 37.34 y = 45.02 z = 27.69	0:59	313	No hay impresiones fallidas	Se imprimieron al primer intento
10	Corazón vacío	Rígida	0.1	N = 5 O = 5 B = 80	Rs = 1.4 Rm = 1.4 Rb = 7	x = 38.46 y = 66.7 z = 42.28	1:30	457	No hay impresiones fallidas	Se imprimieron al primer intento
11	Cubo	Elástica	0.05	N = 20 O = 5 B = 80	Rs = 5 Rm = 5 Rb = 7	x = 12.5 y = 12.5 z = 12.5	2:00	341	-N = 20 O = 5 B = 80 -N = 15 O = 5 B = 80 -Rs = 0.8 Rm = 2 Rb = 7	Se requiere un soporte mas grande para esta resina
12	Corazón mitad solido	Elástica	0.1	N = 20 O = 4 B = 80	Sin soporte	x = 38.34 y = 46.83 z = 23.65	4:20	460	-0.04 N = 20 O = 3 B = 60 -Rs = 1.4 Rm = 1.4 Rb = 7 -0.05 N = 30 O = 3 B = 60 -Rs = 0.6 Rm = 1.4 Rb = 7	Cuando se tiene una base mas grande, el objeto no requiere soporte
13	Corazón vacío	Elástica	0.1	N = 25 O = 1 B = 80	Rs = 2 Rm = 2 Rb = 7	x = 38.46 y = 66.7 z = 42.28	3:30	459	- Soporte 1 (h3) - Soporte 2 (h4) - N = 15 O = 5 B = 80 - N = 25 O = 3 B = 80 - Rs = 0.4 Rm = 0.4 Rb =7 -Rs = 0.6 Rm = 0.6 Rb = 7 -N = 30 O = 3 B = 60 -N = 25 O = 3 B = 60	La solución para este problema de soporte fue el tiempo de apagado, se recomiendo usar uno muy pequeño en comparación a los que se usan en resina rígida

Cuadro 17: Bitácora de impresiones