



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL MECANICA

DEMOCRATIZACIÓN DE LA IMPRESIÓN 3D CON FOTOPOLÍMEROS

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL MECANICO

ARIEL ALEJANDRO CALDERÓN AVENDAÑO

PROFESOR GUIA:

JUAN CRISTOBAL ZAGAL MONTEALEGRE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

MARCO ANTONIO BEJAR VEGA

AGUSTÍN VILLENA MOYA

SANTIAGO DE CHILE

SEPTIEMBRE 2012

## Resumen ejecutivo

Las impresoras 3D son máquinas que permiten producir objetos tridimensionales físicos a partir de un modelo virtual o sólido, diseñado desde algún programa CAD.

Un movimiento de crear impresoras 3D de tipo Open (libres de ser reproducidas o modificadas), ha permitido un desarrollo de parte de comunidades que han visto cómo la tecnología mejora, esto también ha atraído a empresas a tener su propia oferta de impresoras 3D, como resultado se ha visto una baja en el precio considerable además de un menor tamaño, que ha permitido crear el concepto de impresora de escritorio para el hogar.

En esta memoria se diseña y construye a BeamMaker, una impresora 3D que utiliza fotopolímeros para la creación de piezas, junto con ella se desarrolla un software para utilizar con la misma. Se requiere que la máquina sea de carácter Open con el objetivo de su fácil masificación y modificación, además de un precio bajo (menos de 500 dólares), ya que el objetivo es llevar esta tecnología a los hogares.

La tecnología de polimerización utiliza una fuente de luz, que va curando capa a capa el objeto a crear, se utiliza un fotopolímero que es sensible a una longitud de onda de luz visible, para así utilizar un proyector como fuente de luz, esto permite bajar los costos considerablemente.

Durante el diseño de la impresora se observan una serie de problemas que se han de solucionar para así lograr imprimir de manera correcta, entre estos problemas se encuentra la adherencia del objeto a la bandeja móvil de polimerización y a la piscina de polímero, además de problemas por la viscosidad del material para refrescar una capa nueva.

Con el objetivo de conocer las mejoras que tiene BeamMaker con respecto a las impresoras actuales, se hace una comparación imprimiendo la misma pieza, para 2 tipos de impresora y BeamMaker, los resultados muestran mejoras tanto a simple vista como en las medidas del objeto, la figura impresa con BeamMaker tuvo un error medio en las medidas de 0.03 mm, mientras que las otras impresoras tuvieron errores de 0.4 y 0.3 mm, mostrando que efectivamente BeamMaker es un aporte respecto al desarrollo de esta tecnología.

## **Dedicatoria y agradecimientos**

### **A mi Familia**

Mi hermana Paloma que pese a que ya no esté en Chile, me recuerda siempre que los objetivos en la vida son para alcanzarlos y no hay sueños imposibles. Mi Padre Nivaldo ejemplo de esfuerzo y que el trabajo duro siempre es recompensado. Mi Madre Purísima que me enseñó que la constancia y la disciplina son indispensables en la vida.

### **A mis amigos**

Que gracias a ellos, estos años en la universidad han sido más llevaderos, independiente qué tan ocupado estés, siempre es importante darle tiempo a las amistades.

### **A mis profesores**

En especial a Juan Cristóbal que desde hace años mostró confianza en lo que podíamos hacer, criticando de manera constructiva para hacernos crecer como ingenieros. Al profesor Marco Antonio que me enseñó que la ingeniería no se acaba en el papel, sino que es su comienzo. Quizás estas fueron las razones por las cuales los elegí como profesores guía.

### **A los compañeros del laboratorio**

Estos meses de memoria han sido de mucho aprendizaje gracias a este grupo de personas, nuestras diferencias han permitido que enriquezcamos nuestros conocimientos, además el tiempo generó una amistad más allá del trabajo.

# Índice

1	Introducción .....	1
1.1	Objetivos .....	2
2	Antecedentes .....	2
2.1	Democratización de la invención .....	2
2.2	Impresoras 3D .....	3
2.2.1	Tecnologías.....	4
2.2.2	Metodologías de impresión.....	4
2.2.3	Impresoras 3D actualmente .....	6
2.2.4	Aplicaciones.....	17
2.3	Fotopolímeros .....	19
2.3.1	Proceso .....	19
2.4	Sistema de impresión para una impresora 3d de fotopolímeros.....	19
2.5	Archivos 3D STL .....	20
3	Metodología .....	21
3.1	Síntesis del polímero y calibración de curado .....	21
	Realización del fotopolímero .....	21
	Prueba del fotopolímero .....	24
3.1.1	Resultados observados.....	24
3.2	Diseño de impresora 3D .....	27
3.2.1	Hardware .....	30
3.2.2	Estructura .....	30
3.2.3	Posicionamiento .....	31
3.2.4	Electrónica .....	31

3.2.5	Software .....	32
3.3	Manufactura de la impresora .....	36
3.3.1	Motor y bomba.....	36
3.3.2	Controlador .....	37
3.3.3	Cuerpo de acrílico y pernos con sus tuercas .....	38
3.3.4	Tornillo de bolas recirculantes y acople a motor .....	38
3.3.5	Ejes, rodamientos y cuerpo soporta rodamiento.....	39
3.3.6	Espejo .....	40
3.3.7	Armado .....	41
3.4	Pruebas de curado, Impresiones básicas y calibrado .....	43
3.4.1	Múltiples pruebas erróneas .....	43
3.4.2	Resolviendo el problema de la antiadherencia .....	47
3.4.3	Resolviendo el problema de la pérdida de calidad .....	48
3.4.4	Resolviendo el problema de la adherencia con impresiones de más de 2.5 mm. ....	49
4	Resultados .....	52
4.1	Evolución en la calidad de impresión .....	52
4.2	Comparación de resolución con otras impresoras.....	53
4.3	Comparación de características con otras impresoras .....	55
4.4	Otros usos encontrados .....	56
4.5	Limitaciones.....	57
5	Análisis y discusión de resultados .....	58
5.1	Sistema de impresión final .....	58
5.2	El fotopolímero.....	59
5.3	El proyector .....	59
5.4	Arduino.....	59
5.5	El software.....	60

5.6	BeamMaker .....	60
5.6.1	Costo.....	60
5.6.2	Resolución .....	60
5.6.3	Portabilidad .....	61
5.7	Democratización de la tecnología (Open Hardware) .....	61
5.8	Futuro.....	62
6	Conclusiones.....	63
7	Bibliografía .....	65
Anexos	.....	66

# 1 Introducción

La fabricación personal [1] ya es una realidad con la existencia de las impresoras 3D, éstas cambiarán por completo el modo actual de manufactura industrializada.

La democratización de la invención [2] consiste en poner en manos de las personas los medios de producción actualmente utilizados por las más grandes empresas.

Se está llevando un movimiento que consiste en la creación de hardware libre, lo que significa que se puede tener acceso a tecnología, a precios de costo de producción, esto abriría las puertas hacia un futuro donde no se requiera grandes sumas de dinero para tener acceso a la tecnología.

Dentro de este movimiento de hardware libre se encuentran algunas impresoras 3D, las cuales han tenido un gran impacto debido a su precio tan bajo, comparativo a las impresoras 3D comerciales.

El desarrollo de impresoras 3D ha llevado a la existencia de diferentes métodos de impresión, cada una con alguna característica que la distingue. El norte está en lograr resoluciones cada vez más altas, lo que permite crear objetos de mayor complejidad. Entre las diferentes tecnologías de impresión 3D, están las de modelado por deposición fundida [3] las cuales ya se encuentran a precios medianamente accesibles, pero su resolución es demasiado limitada, otra tecnología es la de fotopolímeros que tiene gran resolución pero los precios tanto de las máquinas como de sus materiales es muy elevado. Más adelante se hará un análisis acerca de las tecnologías de impresión 3D y sus características.

Los fotopolímeros son materiales que poseen la propiedad de reaccionar ante luces de ciertas longitudes de onda, la reacción produce un endurecimiento que permite darle forma a gusto. Con éstos materiales se puede obtener una excelente definición de impresión. Esta tecnología de impresión aun no ha sido llevada a al hardware libre, por lo que todas las impresoras de este tipo son extremadamente costosas.

## **1.1 Objetivos**

El objetivo general de esta memoria consiste en la invención de una impresora 3D de fotopolímeros libre de patentes, para así compartir la metodología de construcción. Para esto, como objetivos específicos está el diseño y la manufactura de la impresora, calibración con el fotopolímero que se utilizará, impresión de figuras básicas piloto y comparación con otras impresoras.

## **2 Antecedentes**

### **2.1 Democratización de la invención**

La democratización de la invención consiste en el acceso de cualquier persona a la creación, diseño y manufactura de elementos, es decir llevar la tecnología a manos de la gente común [4]. Los enormes precios de las maquinarias o softwares necesarios para convertirse en un inventor, crea una distancia enorme entre las personas y el mundo de la invención.

Desde la revolución industrial se ha visto que todos los elementos que utilizamos en nuestra vida cotidiana se hacen en grandes cantidades debido a que su costo disminuye, pero dejando a los usuarios completamente ignorantes del cómo funcionan o cómo fue su desarrollo. Además que todo el mundo está obligado a elegir entre una gama dada por la empresa creadora, en otras palabras el usuario apenas puede elegir el producto.

La masificación de la computación, además de lo económico que es hacer productos digitales (solo hace falta tener un computador y los conocimientos necesarios), creó el concepto de software libre, que consiste en programas libres de patentes diseñados por usuarios, por lo que dejan sus inventos en internet, para que cualquier otra persona gratuitamente los baje y utilice.

Gracias al desarrollo de software libres, se ha visto que cada vez más usuarios desde sus hogares tienen una mayor participación en la creación de software, y de ese modo alejarse de las empresas que venden patentados sus programas a precios demasiado altos para un individuo.

Así mismo apareció el concepto de hardware libre, que consiste en máquinas funcionales libres de patentes que en base a una lista de materiales y las ganas de construir, permiten a las personas acceder a la tecnología a precios de costo (muy bajos).

Junto con este movimiento del hardware libre, se comenzaron a desarrollar impresoras 3D libres de patentes, máquinas que son capaces de prototipar objetos creados por el usuario en su propia casa, la idea era llevar el prototipado a cualquier persona. El ideal de democratizar la

invención está cada vez más cerca gracias a las impresoras 3D libres de patentes.

## **2.2 Impresoras 3D**

Las impresoras 3D crean objetos tridimensionales desde archivos digitales usando materiales de impresión, de manera similar a las impresiones en papel. Los archivos se crean mediante la adición de material en capas sucesivas

Desde el 2003 se ha observado un crecimiento en las ventas de impresoras 3D, adicionalmente el precio de éstas ha bajado. La tecnología ha encontrado campos en joyería, diseño industrial, arquitectura, ingeniería, prototipado rápido, aeroespacial, dental e industria médica, además de muchas otras.

Existen varias tecnologías de impresión 3D, sus diferencias se encuentran en la forma de crear las capas para construir el sólido, algunos métodos usan fundición o ablandamiento, también hay otros métodos para materiales líquidos que son curados con diferentes tecnologías.

Cada método tiene ventajas y desventajas, las consideraciones importantes son la velocidad de impresión, costo de impresión (materiales) y costo de la impresora 3D.

El método más popular para impresión 3D es mediante modelado por deposición fundida , la impresora crea el modelo adhiriendo material en estado maleable mediante líneas, achurando una capa del objeto, luego cambia su altura para achurar la siguiente capa, finalmente el proceso se repite hasta obtener el modelo. Ejemplos de ésta tecnología serían la impresora Open Source MakerBot y la 3d Touch, que imprimen con ABS y PLA . Una ventaja de estas impresoras es que se ha ido bajando su costo hasta precios similares al de un computador personal y los materiales que utilizan son de un precio accesible, pero su resolución es limitada.

La otra tecnología más utilizada es la de fotopolimerización, donde se pueden crear objetos de gran resolución, ésta tecnología consiste en un material liquido al cual le enfocan un laser o luz, el material sólo cura los lugares donde el laser o la luz fue emitida, luego el resto no reacciona. Se pueden hacer figuras muy pequeñas y de gran complejidad gracias a su alta resolución, el problema está en el alto costo de estas impresoras y del material de impresión. Es por esto que diversos grupos están desarrollando este sistema, intentando abaratar los costos. Esta memoria busca desarrollar una impresora Open Source de fotopolimerización de bajo costo que pueda llegar al alcance de cualquier persona gracias a internet.

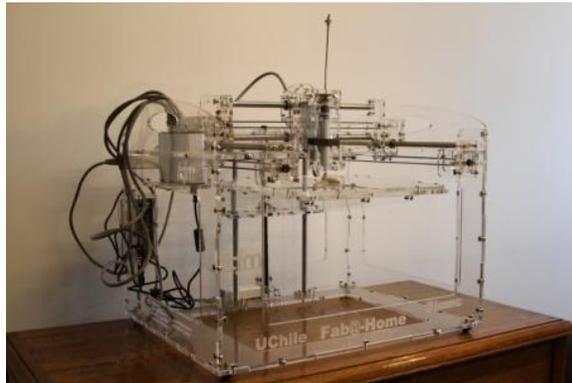


Ilustración 1 impresora 3D Fab@Home hecha un la U. de Chile.

### 2.2.1 Tecnologías

Existen variados métodos para impresión 3d, se expone una tabla con métodos y materiales que utilizan.

Tabla 1: Tecnologías de impresión 3D

Tecnología	Materiales utilizados
Sinterización por laser selectivo (SLS)	Termoplásticos, polvos metálicos, polvos cerámicos
Sinterización directa en metal por laser (DMLS)	Aleaciones metálicas
Modelado por deposición fundida(FDM)	Termoplásticos y metales eutécticos
Estereolitografía (SLA)	Fotopolímeros
Manufactura de objetivo por laminado (LOM)	Papel , films plásticos
Fundido por rayo electrónico (EBM)	Aleaciones de titanio
Impresión 3d por polvos e inyección de tinta(PP)	Yeso

### 2.2.2 Metodologías de impresión

Las tecnologías mencionadas se utilizan con las siguientes metodologías:

## **Deposición por plástico moldeado**

Es una tecnología desarrollada por Stratasys (empresa que se dedica a vender impresoras 3D), se comenzó a comercializar en los 90´s.

Esta tecnología trabaja usando filamentos plásticos o cables metálicos que se guardan en un carrete, desde donde se supe al extrusor (que maneja el flujo de material). El extrusor es calentado para llevar al material a un estado maleable, el movimiento del extrusor que es controlado numéricamente por un software, permite entregar material en sentidos horizontales y verticales. Al salir del extrusor el material baja su temperatura endureciéndose y así formando el objeto, achurando con material las capas necesarias para darle la forma correcta.

Esta metodología la utilizan las impresoras de tipo FDM (modelado por deposición fundida) y los materiales más utilizados en este tipo de impresión son: ABS, PLA, PC, etc.

## **Enlace de materiales granulados**

En una cama de material granulado, se funden las capas necesarias para formar el objeto. El mismo material que no está fundido sirve de soporte, por lo que no requiere material de soporte.

Generalmente se utiliza un laser para sinterizar el medio y formar el sólido. Ejemplos de este método son sinterización por laser selectivo (SLS), sinterización directa en metal por laser (DMLS), fundido por rayo electrónico (EBM) y de polvos con inyección de tinta (PP).

Como materiales se pueden utilizar polvos metálicos, polvos plásticos y yeso.

## **Fotopolimerización**

Se expone el polímero a imágenes, las cuales indican los lugares donde el material se requiere curado, así sólo los lugares expuestos endurecen formando una capa del objeto, luego una bandeja cambia ligeramente de altura, para así exponer otra capa. El proceso se repite hasta formar el objeto.

La principal tecnología donde se utilizan fotopolímeros para obtener objetos es la estereolitografía (SLA) y los materiales que utiliza son fotopolímeros.

### **2.2.3 Impresoras 3D actualmente**

Existe una variedad de impresoras 3D en la actualidad. Debido a la explosión de ventas se han creado empresas que se han unido al rubro, además de la aparición de impresoras Open Hardware.

A continuación se expondrán las impresoras 3D más importantes:

#### **2.2.3.1 Fab@Home**

Fab@Home [5] es un proyecto Open Source para el desarrollo de la fabricación personal, que permitiría traer la fabricación personal al hogar. Miembros de este proyecto pueden ser cualquier persona que desee utilizar sus habilidades para desarrollar hardware, software o simplemente aquellos que utilicen la impresora para hacer objetos únicos. La comunidad incluyen cientos de ingenieros, inventores, artistas, estudiantes y hobbyistas en todos los continentes, que se comunican mediante el blog o foro de la impresora.

El objetivo principal de Fab@Home es brindar un dispositivo que permite a la gente personalizar objetos, crear un mundo donde la comida, un repuesto u otro objeto, pueda ser obtenido luego de algunos clics. Sin retrasos de envío, sin monopolios de los productores, solo clic e impresión.

Este concepto es realmente una revolución digital que permite libertad de creación, lo que hace posible vender o comprar objetos virtuales. Su siguiente paso consiste en lograr formar artefactos completamente funcionales [6].

Mejoras de Fab@Home fueron creadas gracias al aporte de diferentes grupos de trabajo, así creando nuevas versiones de la misma impresora y nuevos extrusores que pueden utilizar materiales termoplásticos.

#### **Especificaciones técnicas**

- Volumen de impresión: 200mm x 200mm x 200mm
- Espesor de capa eje Z: ~0.3mm
- Resolución X/Y: ~0,3 mm

- Medidas: 490mm x 385mm x 330mm
- Materiales: Líquidos y pastas que puedan ser extruidas por una jeringa como las siliconas, con extrusores especiales puede imprimir ABS Y PLA.
- Tipo De archivos CAD: STL

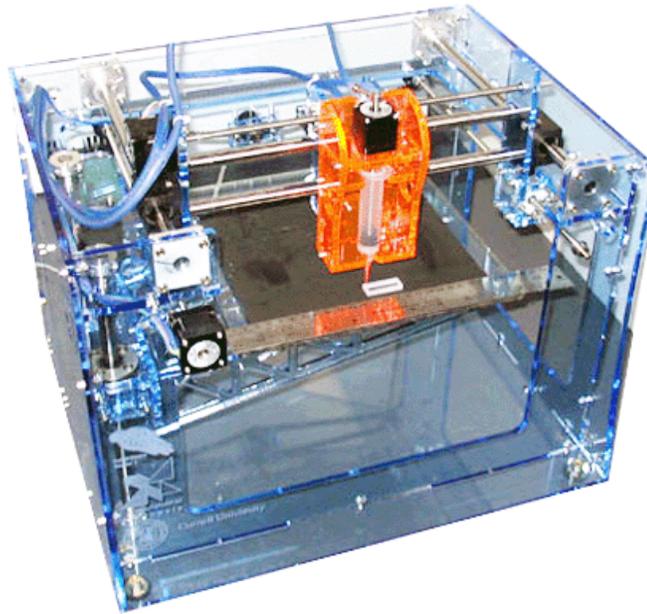


Ilustración 2: Fab@Home versión 2[6]

### 2.2.3.2 RepRap

El proyecto RepRap [7] se inició como una iniciativa de máquina autoreplicante con la idea de utilizar el concepto de evolución. El creador visionaba la distribución a bajo costo de la máquina (en ese entonces no existían impresoras 3D de bajo costo) a personas y comunidades.

La principal meta del proyecto RepRap, es producir un aparato auténtico auto-replicable, para ponerlo en las manos de individuos en cualquier parte del planeta y con una mínima inversión de capital. Un sistema de fábrica de escritorio que permite a cualquier persona la fabricación de objetos para su vida cotidiana.

La naturaleza de auto-replicación de RepRap también puede facilitar una diseminación viral y podría facilitar una revolución en el diseño y manufactura de productos. Cambiando desde una producción en fábrica de productos patentados a una producción personal de productos sin patente y

con especificaciones libres. Dando apertura al diseño de productos y oportunidades de manufactura a cualquier persona.

Desde un punto de vista teórico, el proyecto intenta probar la siguiente hipótesis:

*"Prototipado Rápido y tecnologías de escritura directa ("direct writing" en inglés) son suficientemente versátiles para permitir ser usadas en la creación de un Constructor Universal".*

Es una impresora de tipo FDM, este método de impresión se volvió muy popular y es seguido por muchas impresoras posteriores.

Especificaciones técnicas:

- Volumen de impresión: 200mm x 200mm x 140mm
- Espesor de capa eje Z:  $\sim 0.3\text{mm}$
- Resolución X/Y:  $\sim 0,3\text{ mm}$
- Medidas: 500mm x 400mm x 360mm
- Tipo archivos CAD: STL
- Materiales: ABS Y PLA.



Ilustración 3: Impresora 3D RepRap[7]

### 2.2.3.3 MakerBot Industries.

MakerBot Industries es una empresa que diseña impresoras 3D Open Hardware y vende sus kits o piezas para que la gente las arme (aunque también venden las impresoras armadas). Al interior de MakerBot existen 3 impresoras 3D, todas comparten una estructura básica que es la siguiente.

- Un sistema 3D de posicionamiento
- Una electrónica que permita su control
- Tecnología Open Hardware

#### CNC CupCake

Cupcake CNC y las otras impresoras de MakerBot son un producto derivado del proyecto RepRap. Sus objetivos son similares, construir una impresora 3D de bajo costo. CupCake se centra en una máquina de bajo precio, de confianza y fácil de usar/hackear. Según ellos mismos mencionan que RepRap al centrarse en el concepto de autoreplicación se alejan del concepto de una máquina que funcione bien.

Especificaciones técnicas:

- Volumen de impresión: 100mm x 100mm x 130mm
- Resolución (motor) X/Y: 0.085mm
- Resolución (motor) en Z: 3.125 micrones
- Máxima velocidad de avance en X/Y: 5000mm/minuto
- Máxima velocidad de avance en Z: 200mm/minute
- Espesor de capa eje Z: 0.3725mm
- Medidas: 350mm x 240mm x 450mm
- Tipo archivos CAD: STL
- Materiales ABS y PLA

Al ser un proyecto Open Source están los planos y software libres, para que cualquier persona pueda crear la suya propia.

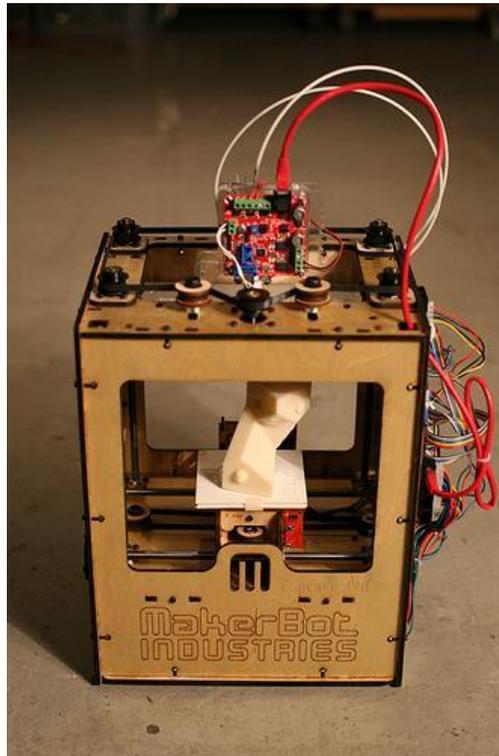


Ilustración 4: CNC CupCake, se puede apreciar que es una impresora muy tosca ya que es la primera de las herramientas creadas por MakerBot Industries.

### Thing-o-matic

Impresora 3d FDM Open Source al igual que sus hermanas, su característica diferencial consiste en que no es el extrusor el que se mueve, sino que es la bandeja la que es móvil, permitiendo crear los objetos. Utiliza controlador Arduino Mega lo cual hace más fácil su reproducción.

#### Especificaciones técnicas

- Volumen de impresión: 100mm x 100mm x 100mm
- Resolución (motor) X/Y: 20 micrones
- Resolución (motor) en Z: 5 micrones
- Máxima velocidad de avance en X/Y: 5000 mm/minuto
- Máxima velocidad de avance en Z: 1000mm/minuto
- Espesor de capa eje Z: 0.3mm
- Medidas: 300mm x 300mm x 400mm
- Tipo archivos CAD: STL
- Materiales ABS y PLA
- Placa Arduino Mega.



Ilustración 5: Thing-O-Matic se puede apreciar que es como una versión más depurada de CupCake

## The Replicator

Posee las mismas características que la anterior, pero con 2 extrusores que le permite utilizar 2 materiales al mismo tiempo, también posee un cuerpo más grande para así tener un mayor volumen de impresión.

### Especificaciones Técnicas

- Volumen de impresión: 225mm x 145mm x 150mm
- Resolución (motor) X/Y: 0.085mm
- Resolución (motor) en Z: 3.125 micrones
- Máxima velocidad de avance en X/Y: 40 mm/segundo
- Máxima velocidad de avance en Z: 200mm/minute
- Espesor de capa eje Z: entre 0.2 y 0.3 mm
- Medidas: 320 x 467 x 381 mm
- Tipo archivos CAD: STL
- Materiales ABS y PLA
- Placa mightyboard



Ilustración 6: The replicator ultima versión en impresoras 3D de MakerBot Industries.

#### 2.2.3.4 3D System

Es una empresa que desarrolla y vende impresoras 3D, sus impresoras no son Open pero son muy bien vendidas, por lo que es interesante analizarlas.

#### Z printer

Existe una gran variedad de este tipo de impresoras, sus diferencias están más que nada en el volumen de impresión (y su tamaño también), además del número de colores que puedes imprimir.

Son de tipo SLS, utilizan polvos de colores, de tal modo que la densidad de cada polvo permite imprimir en muchos colores, obviamente el precio tanto de las impresoras como del material es altísimo.

Especificaciones técnicas:

- Volumen de impresión: hasta 500 x380x230 mm depende del modelo
- Resolución X/Y: 600x540 DPI
- Espesor de capa eje Z: 0.1mm
- Medidas: Varias
- Tipo archivos CAD: STL

- Materiales: polvos que la misma empresa distribuye en diferentes colores



Ilustración 7: Zprinter 350

## Projet

Al igual que Zprinter las venden en diferentes versiones donde la diferencia más importante es el tamaño de impresión, es una impresora de tipo SLA, funciona con un fotopolímero que no se conocen sus componentes y la única manera de obtenerlo es comprándole directamente a 3D System.

Especificaciones técnicas:

- Volumen de impresión: hasta 170 x220x200 mm depende del modelo
- Resolución X/Y: 1024x768 DPI
- Espesor de capa eje Z: 0.1mm
- Medidas: Varias (pesan alrededor de 60kg, es decir son muy grandes)
- Tipo archivos CAD: STL
- Materiales: fotopolímero que la misma empresa distribuye en diferentes colores



Ilustración 8: Projet 1000, Impresora 3D de BFB.



Ilustración 9: Projet 3500 de BFB.

### **3D touch**

Impresora FDM de 3D system, posee una pantalla touch desde donde se controla, es fácil de usar. Utiliza un software de la empresa que transforma los archivos STL en un formato legible con la impresora, luego con un pendrive USB se entregan los archivos a la impresora. Existen diferentes versiones que difieren en el número de extrusores (1 a 3) lo que también varía el volumen máximo de impresión.

### Especificaciones técnicas:

- Volumen de impresión: varía, hasta 275mm x 230mm x 185mm
- Resolución (motor) X/Y: 0.085mm
- Resolución (motor) en Z: 3.125 micrones
- Máxima velocidad de avance en X/Y: 15 mm<sup>3</sup>
- Espesor de capa eje Z: 0.125
- Medidas: 515mm x 515mm x 598mm
- Tipo archivos CAD: STL
- Materiales ABS y PLA



Ilustración 10: 3D touch

#### 2.2.3.5 Ultimaker

Ultimaker es una impresora 3D de tipo FDM de alto volumen de construcción. Es un proyecto Open Source que tiene como características ser seguro, rápido y de costo accesible. Tiene una wiki-comunidad donde la gente comparte sus dudas, problemas y proyectos en que ha utilizado la impresora.

Ultimaker utiliza un extrusor que se mueve en sentido horizontal y un plato donde se forma la figura que se mueve en sentido vertical. Como toda impresora de tipo FDM utiliza un extrusor donde el material caliente está en un estado donde fluye con facilidad, y así lograr formar el objeto línea por línea y capa por capa.

Utiliza 3 motores stepper para los movimientos en XYZ y un cuarto motor para el extrusor. Para controlar todo esto, utiliza un Arduino Mega 1280. Tanto el software como los planos de hardware están disponibles libremente.

#### Especificaciones técnicas:

- Volumen de impresión: 210mm x 210mm x 220mm
- Resolución(motor) X/Y: 20 micrones
- Resolución (motor) en Z: 5 micrones
- Máxima velocidad de avance en X/Y: 5000 mm/minuto
- Máxima velocidad de avance en Z: 1000mm/minuto
- Espesor de capa eje Z: 0.3mm
- Medidas: 340mm x 355mm x 390mm
- Tipo archivos CAD: STL
- Materiales ABS y PLA
- Placa Arduino Mega.

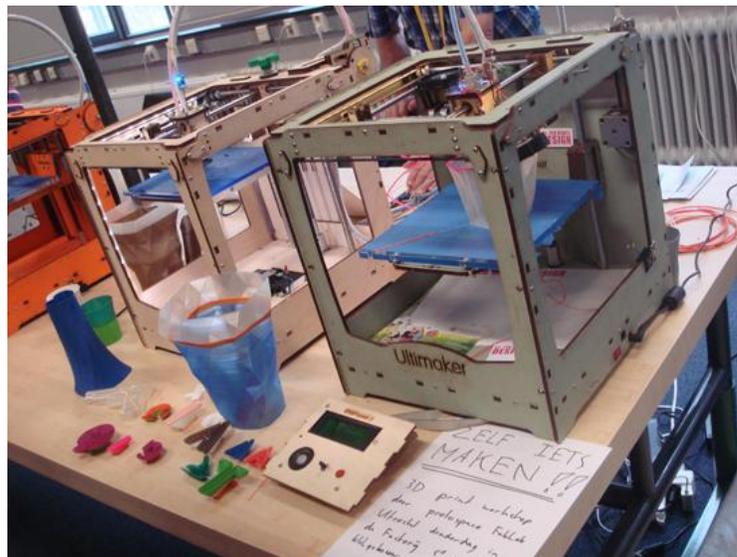


Ilustración 11: Ultimaker se puede observar su parecido con las impresoras de Makerbot Industries.

### 2.2.3.6 B9Creator

Impresora 3D de tipo SLA, apareció a mediados de este año y aun no se lanza al mercado. Utilizó sistema kickstarter para generar suficientes fondos para iniciar la empresa. Para imprimir usa un proyector para curar un polímero capa por capa, es de un gran tamaño y pese a que se supone que es de carácter Open Source, aun no están sus planos ni software libres.

Especificaciones técnicas:

- Volumen de impresión: 102x77x200 mm
- Resolución X/Y: 1024x768 DPI
- Espesor de capa eje Z: 0.1mm
- Medidas: 790x470x305
- Tipo archivos CAD: STL
- Materiales: fotorpolímero que ellos provienen por ahora sólo en rojo.



Ilustración 12: B9Creator.

### 2.2.4 Aplicaciones

Muchas aplicaciones se le puede dar a la impresión 3D, entre ellas en diseño, arquitectura, educación, salud, entretenimiento, etc. Pero las que interesan en el mundo de la ingeniería mecánica, son las siguientes:

## **Prototipado rápido**

Desde los 80's se han visto impresoras 3D y han sido muy usadas para prototipado rápido con propósitos de investigación. Estas máquinas eran muy grandes y generalmente usaban polvos metálicos, arena y plásticos, que sólo podían ser obtenidos de las empresas que vendían las mismas impresoras. Obviamente con precios muy elevados, lo cual no era problema para prototipado donde se hacen dispositivos muestra.

## **Manufacturado rápido**

Avances en la tecnología permitió a las impresoras utilizar materiales apropiados para manufactura final y a precios lo suficientemente bajos como para la producción de piezas. Se espera que esta evolución madure, ya que aun la tecnología de manufacturado rápido en impresoras 3D está en pañales.

## **Usos domésticos y hobbies**

Muchas Impresoras 3D domésticas han aparecido en el último tiempo, las cuales tienen como características tener un costo reducido y utilizar materiales de precios accesibles. Esto es muy parecido a lo que ocurrió con los computadores [8], antiguamente eran muy caros y su tamaño hacía imposible tener un computador en casa, pero con la aparición del primer computador personal, se inició una evolución que terminó con la realidad actual, donde los computadores son un bien muy común en los hogares.

Éstas impresoras son utilizadas para hobbyistas y entusiastas, éstos han impreso objetos como relojes, repuestos plásticos, engranajes, inclusive comida como figuras de chocolate. Es considerable el potencial que tienen las impresoras 3D en un hogar, ya que las personas se convierten en diseñadores de sus objetos.

## 2.3 Fotopolímeros

Fotopolímero es un polímero que cambia sus propiedades cuando es expuesto a luz, frecuentemente en el espectro ultra violeta, éstos son usados en odontología y prototipado rápido en impresoras 3D y máquinas de estereolitografía.

### 2.3.1 Proceso

El proceso para que un fotopolímero llegue a curarse tiene los siguientes pasos.

- 1- Exposición según imagen a radiación con cierta longitud de onda( cada fotopolímero es sensible a cierta longitud de onda)
- 2- Remoción de las zonas no expuestas con solvente.
- 3- Secado

Para hacer un fotopolímero generalmente se requiere de 3 ingredientes principales: la resina, el fotoiniciador y el colorante.

- Resina: Es el principal componente del fotopolímero generalmente es del orden del 97% del compuesto, es el material en sí.
- Fotoiniciador: Su labor consiste en darle la sensibilidad ante cierta longitud de onda para que cure, mientras más fotoiniciador se utilice más sensible será el material, es decir menos tiempo será necesario para que cure.
- Colorante: Permite que las ondas luminosas no lleguen tan profundo en el material, controlando el espesor de capa a curar, mientras más colorante se utilice más delgadas serán las capas de polimerizado.

## 2.4 Sistema de impresión para una impresora 3d de fotopolímeros.

### Elementos:

- Proyector DLP: Consiste en el sistema de proyección, éste emite imágenes al fotopolímero para que reaccione, existen proyectores específicos que pueden seleccionar las longitudes de onda emitidas, pero tienen altos costos.
- Controlador de altura Z: Bandeja que permite subir y bajar la bandeja de construcción. Ésta requiere de un control computacional, para manejar el motor eléctrico que lo acciona.

- Piscina de polimerización: Bandeja traslúcida que permite que la imagen lanzada por el proyector llegue al fotopolímero. Sobre la bandeja se encuentra el fotopolímero en estado líquido.

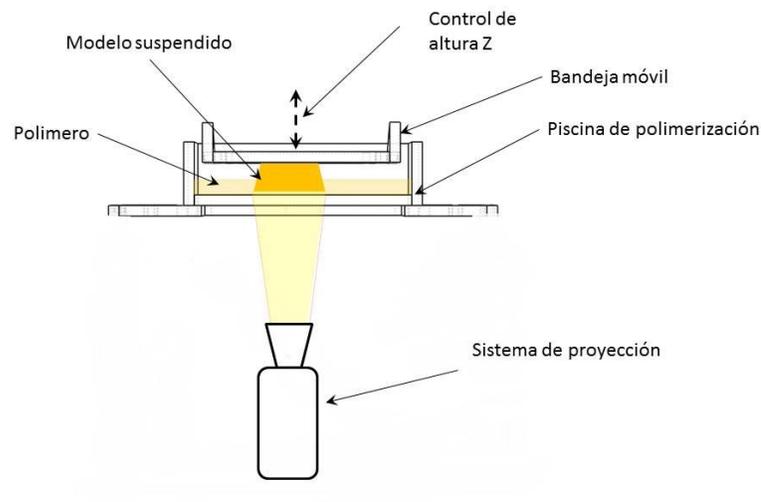


Ilustración 13: Diagrama del sistema de impresión.

## 2.5 Archivos 3D STL

STL (de la palabra Stereolithography en inglés, estereolitografía en español) es un formato de archivo nativo de softwares CAD de estereolitografía creada por 3D system. Es también conocido como Standard Tessellation Language (lenguaje estándar de mosaicos), este tipo de archivo es muy usado para prototipado rápido y software de manufactura asistida por computador (CAD).

El formato describe solo las superficies geométricas de un objeto tridimensional sin representación de color, textura u otros atributos típicos usados en CAD.

Existen 2 tipos de STL los ASCII y los binarios, siendo los últimos los más utilizados debido a que son más compactos.

En la actualidad todas las impresoras 3D utilizan este tipo de archivo como entrada, es por esto que se ha vuelto un estándar de la tecnología de impresión 3D.

### 3 Metodología

BeamMaker es el nombre con que se bautiza a la impresora, el nombre es debido a que utiliza un haz de luz para crear objetos. Las etapas para el desarrollo de la máquina fueron las siguientes:

1-Síntesis del polímero y calibración de curado: Fase donde se hace el polímero, se pone a prueba y se define el tiempo de curado.

2-Diseño de impresora 3D: Fase de diseño donde se definen los elementos para la construcción de la impresora.

3-Manufactura de impresora 3D: Fase de manufactura donde se construye.

4-Pruebas de curado final, Impresiones básicas y calibrado: Se imprimen geometrías básicas y se observan los resultados, además se compara la resolución con otras impresoras 3D disponibles en el laboratorio.

#### 3.1 Síntesis del polímero y calibración de curado

De la bibliografía se logra obtener la receta de un fotopolímero, el cual está basado en el desarrollo Open de impresión 3D en USA (U. de Illinois)[9], la cual es la siguiente:

Tabla 2: Receta del fotopolímero

Componente	% en peso
Poly(ethylene glycol) diacrylate	98
Phenylbis (2,4,6-trimethylbenzoyl)phosphine oxide	2
Sudan I	0,02

Esta receta fue conseguida mediante la empresa SIGMA ALDRICH.

#### Realización del fotopolímero

Una vez se tienen los componentes del polímero, se realiza la síntesis del fotopolímero.

Se utilizan las instalaciones del departamento de Química de la facultad de ciencias físicas y matemáticas de la Universidad de Chile (laboratorio de

polímeros), donde se unen los componentes y se dejan revolver por un mezclador magnético durante 3 días.

El proceso tiene la siguiente metodología:

Adherir la cantidad correcta de ingredientes, éstos son medidos con una pesa electrónica para asegurar la medida.

Verter todos los materiales en una botella ámbar, adherir a la botella una pastilla magnética, y luego poner en el mezclador magnético durante 3 días. Entonces la mezcla del fotopolímero está completa.

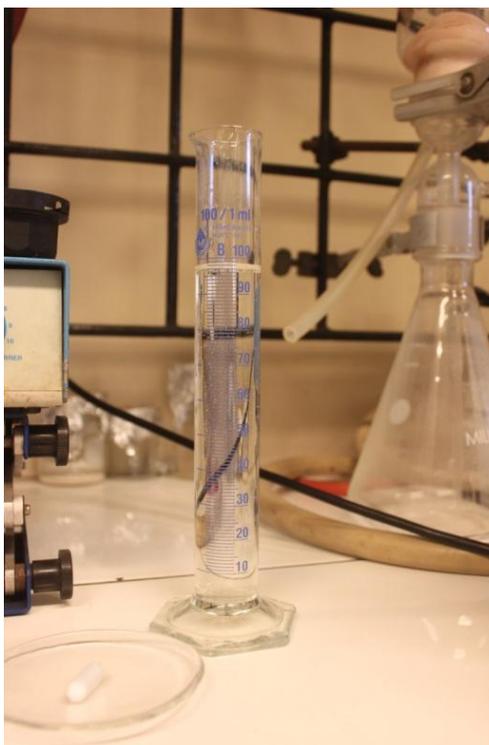
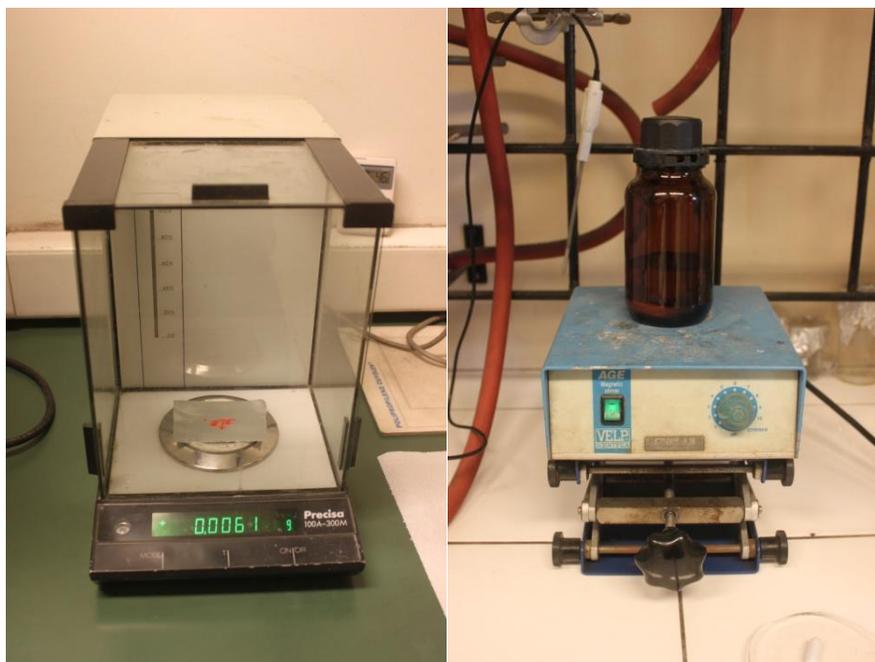


Ilustración 14: Probeta con 98 ml de polietilenglicol



**Ilustración 15: Izquierda: Pesa digital utilizada para la obtención del fotopolímero;  
Derecha: Pesa digital con 2 gramos de polietilenglicol**



**Ilustración 16: Izquierda: Pesa digital con 0.006 g. de sudan ;  
Derecha: Mezcla siendo revuelta por el meclador magnético**

## **Prueba del fotopolímero**

Una vez ya obtenido el compuesto, se hacen pruebas de curado para observar si se había obtenido efectivamente un fotopolímero que reaccionaba ante luz de un proyector en longitud de onda visible. Para esto se hace una impresión de una figura LEGO con algunos elementos básicos del laboratorio.

La metodología y resultados fueron los siguientes:

Se utilizaron los siguientes materiales  
Fab@Home (el motor que maneja el eje Z)  
Lupa  
Proyector DLP  
Espejo  
Vaso precipitado

Se coloca la lupa delante del proyector para acercar el foco. La imagen del proyector rebota en el espejo y se proyecta en la bandeja levemente sumergida en el fotopolímero.

El vaso precipitado descansa en la bandeja de la Fab@Home. La altura de la bandeja es controlada con un motor paso a paso que a su vez es controlado por un computador, así se puede tener un control del tiempo al que es expuesto el fotopolímero y observar el tiempo de curado.

### **3.1.1 Resultados observados**

El tiempo de curado da como resultado 15 segundos para un espesor de capa de 0,5 mm, lo que significa casi una hora por centímetro de impresión.

La impresión tiene una buena resolución, pero se aprecian errores asociados a que la bandeja sumergida en el fotopolímero no estaba horizontal y la bandeja de la fab@Home estaba medianamente descalibrada. Lo que significa que cuando se imprima con la impresora final, la calidad de impresión debiera mejorar mucho más.





Ilustración 19: Comienza a observarse la aparición del objeto en luz amarilla brillante



Ilustración 20: Impresión siendo limpiada de residuos

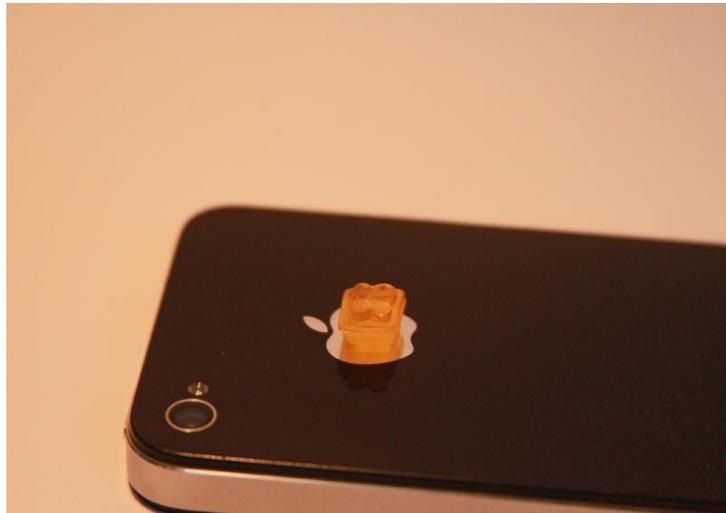


Ilustración 21: Impresión de figura LEGO terminada.

### 3.2 Diseño de impresora 3D

Una vez ya asegurada la efectividad del polímero, se comienza con el diseño de BeamMaker. El modelo fue cambiando vía iteraciones, las cuales iban mejorando con cada reunión dónde se analizaba el diseño actual con el profesor guía. Aquí se presentarán algunos diseños preliminares y el diseño final al cual se llegó.

Diseños preliminares:

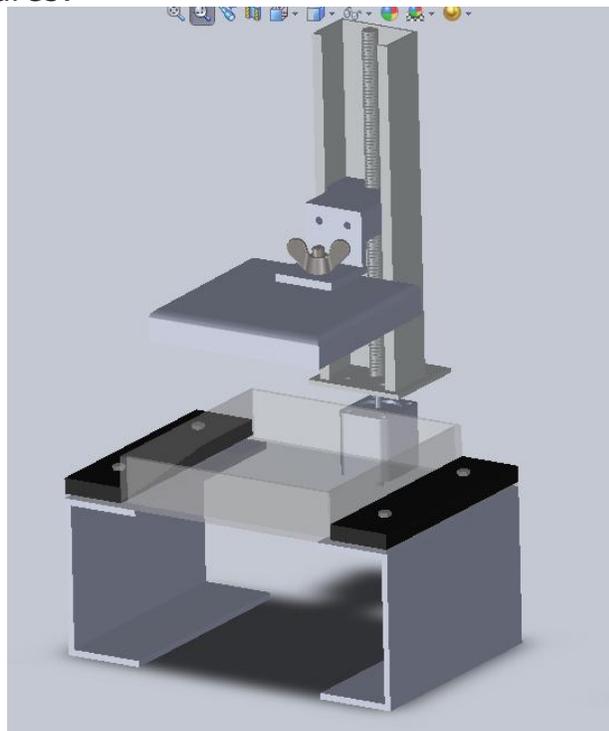


Ilustración 22: Primer diseño de la impresora en aluminio

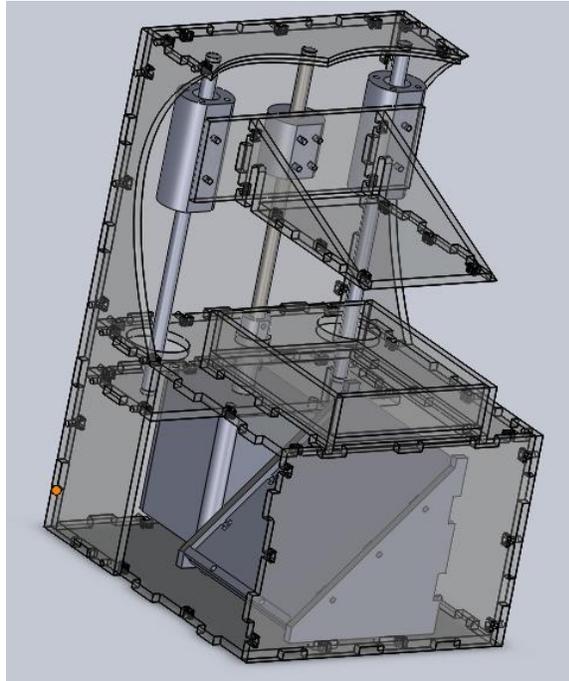


Ilustración 23: Diseño más elaborado en acrílico pero con otro sistema de elevación de bandeja.

Se pasó por diseños hechos en aluminio y múltiples sistemas de control de altura, luego se pasó a un diseño 100% en acrílico con un tornillo de bolas para controlar la altura y 2 ejes guías. Los motivos fueron variados, desde estética hasta facilidad en la obtención de los materiales.

Se hace el diseño en Solid Works [10], lo que facilita la obtención de los planos de construcción, ya que el mismo programa los genera. Es importante en el diseño considerar que las piezas sean luego manufacturables en la vida real.

Se tienen varias tecnologías para la manufactura gracias al FabLab de la universidad, entre las herramientas se encuentran impresoras 3D y cortador láser.

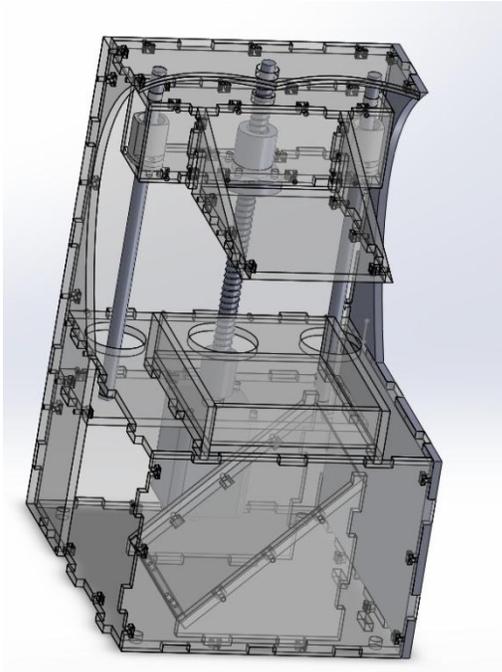


Ilustración 24: Diseño avanzado de la impresora 3D.

Finalmente el diseño Final de la impresora está en la siguiente figura.

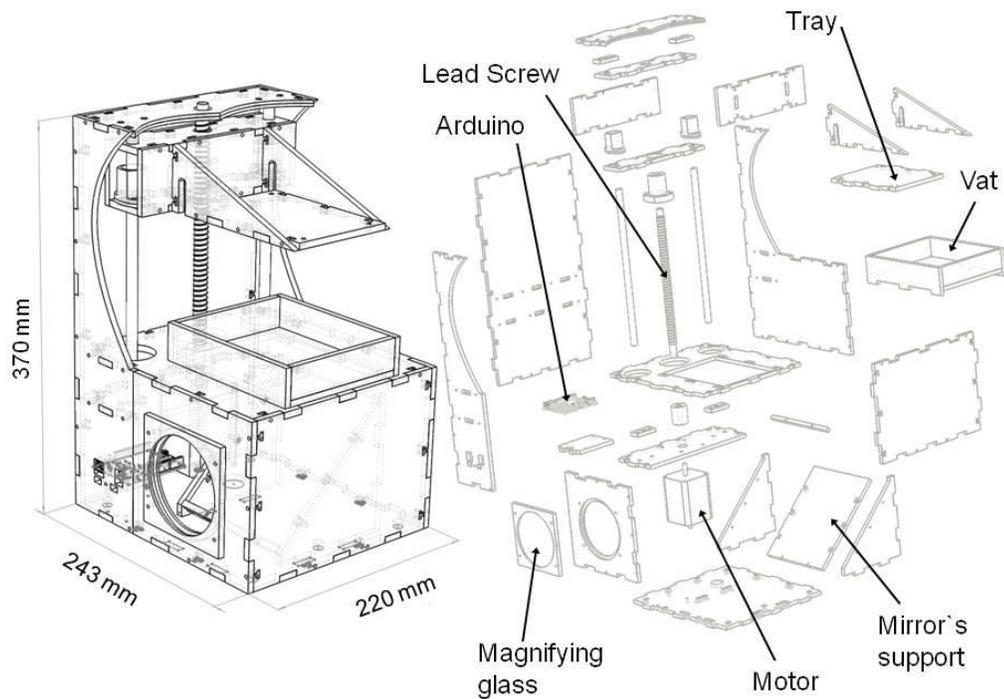


Ilustración 25: BeamMaker y sus medidas generales y su explosionado con sus partes principales, detalles de la impresora en Anexos.

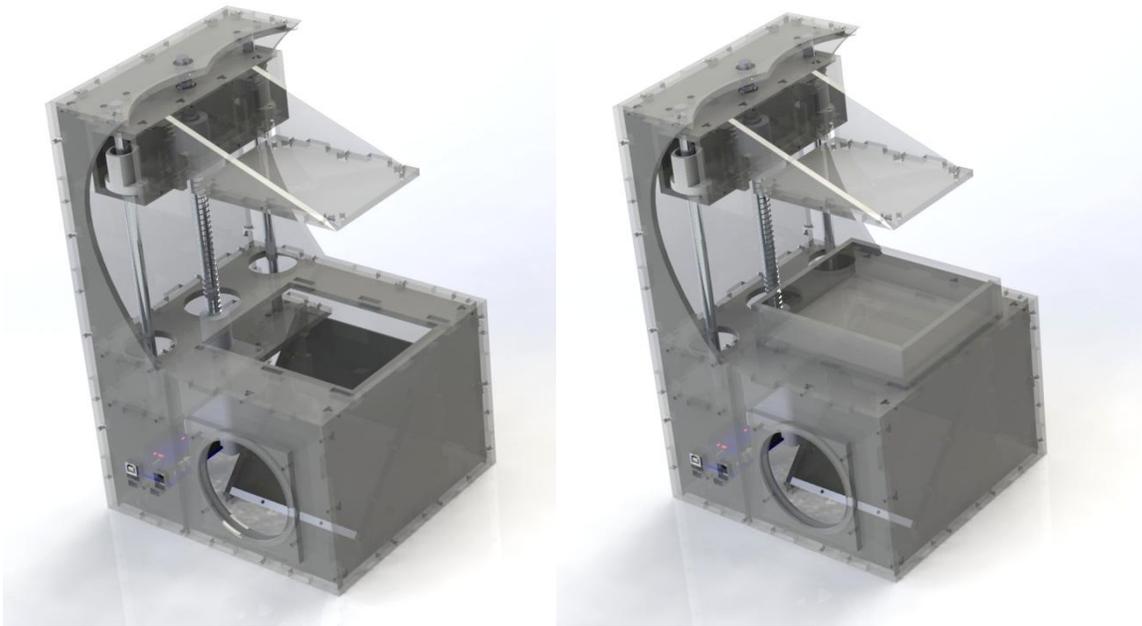


Ilustración 26: Render de BeamMaker, hechos en el programa Solid Works, a la derecha se encuentra la piscina de polimerización

### 3.2.1 Hardware

### 3.2.2 Estructura

Los componentes estructurales del sistema son fabricados desde una plancha de acrílico, la cual es cortada con láser, la unión entre ellas es mediante un sistema "snap.it" y "T-nut" de perno tuerca, en donde un perno es insertado en una muesca de una de las partes a unir, y una tuerca es atravesada en un orificio en el otro cuerpo que ha de estar perpendicular al primero. La increíble calidad de la cortadora láser permite lograr una excelente ortogonalidad entre las piezas, además de ser un sistema de muy rápido y fácil armado.

La Universidad de Chile cuenta con una cortadora láser Epilog Legend 36EXT Laser Engraver, con la cual se cortaron las planchas directamente desde el programa SolidWorks, que permitió hacer el diseño 3D de la máquina. El mismo programa permite obtener los planos que se envían a la cortadora.

Son necesarias 2 planchas de acrílico de 900x600 para tener todas las piezas necesarias para la construcción total de la máquina y el tiempo de cortado es de alrededor de 2 horas. Debido a que comercialmente existen empresas que cortan laser por un costo no muy alto, se pueden obtener estas partes sin dificultad. Otro aspecto importante es que los planos pueden ser modificados por usuarios libremente, lo que les permite crear sus propias BeamMakers con sus diseños y grabados personalizados. Actualmente se

pueden modificar los planos mediante software de edición de imagen y dibujos vectorizados, por lo tanto no es necesario tener conocimientos de programas 3D CAD para hacer nuevos diseños o modificaciones de BeamMaker.

El usuario también puede hacer uso de otros materiales para la construcción de su BeamMaker, quedando a su antojo la apariencia de la misma.

### **3.2.3 Posicionamiento**

Un aspecto muy interesante de la tecnología de BeamMaker es que requiere de sólo una parte móvil (a diferencia de la tecnología FDM que requiere de una parte móvil por cada eje más los extrusores), lo que además de ser una disminución en los costos, significa una simplificación en el posicionamiento inicial y en el funcionamiento de la misma.

El movimiento lineal de la bandeja se compone de: rodamientos lineales para ejes de 10 mm, ejes, y un tornillo de bolas recirculantes de paso 5mm, que permite un sofisticado y cuidadoso control del eje Z, evitándose vibraciones y movimientos en ejes indeseados. Todo esto controlado por un stepper motor (motor paso a paso), de un ángulo de step de  $1,8^\circ$ , esta característica significa que una vuelta de  $360^\circ$  se logra con 200 pasos, lo que se traduce en que se pueden lograr capas de polimerizado de hasta 0,025 mm.

### **3.2.4 Electrónica**

La electrónica es controlada por un Arduino Uno, herramienta electrónica que permite mediante un software de fácil programación, crear controles y rutinas para múltiples motores u otros componentes electrónicos.

Arduino es muy utilizado en múltiples proyectos Open Hardware, permitiendo a personas que no conocen mucho de electrónica, la posibilidad de crear sus propias máquinas. Éste hecho y su bajo costo hacen de Arduino la herramienta perfecta para un proyecto como el de BeamMaker.

La unión entre los motores y Arduino se hace mediante una placa de motores para Arduino (adafruit motorshield), que permite una conexión rápida y sin necesidad de soldadura. Por otra parte la unión entre el computador y el arduino es mediante puerto USB, que existe en todos los computadores actuales, desde donde mismo se energiza el sistema.

Se puede apreciar que es un sistema limpio, muy simple y rápido de armar.

### 3.2.5 Software

El software de Beammaker es diseñado en conjunto con un grupo de estudiantes del ramo de Agilidad del departamento de ciencias de la computación de la Universidad de Chile, gracias a la colaboración del profesor Agustín Villena del mismo departamento.

Para el diseño se utilizaron metodologías ágiles, para así acelerar el proceso y obtener un resultado de mayor valor en el menor tiempo posible, considerando que las horas que se disponían eran limitadas.

#### **KANBAN**

Es un sistema de tablero que permite controlar la fabricación de productos en la cantidad y tiempo necesarios, esto mediante un tablero con tarjetas que representan un trabajo a realizar. Si el trabajo se ha realizado, la tarjeta se pasa a un conjunto de tareas terminadas, para así tener claro qué es lo que se ha realizado y qué tareas son las que faltan. Las tarjetas actúan de testigo del proceso de producción.

Se hizo un tablero con las tareas necesarias para crear el software minimal, estas tareas debían seguir un orden con la idea de que si se planeaba llegar de A hasta D, era necesario pasar por B Y C, de este modo el trabajo es continuo y eficiente.

#### **DLI3D**

DLI3D es el nombre que se le da al programa durante su programación, el funcionamiento del mismo es el siguiente:

El programa toma de entrada un archivo 3D en formato STL (formato universal CAD), luego corta el objeto en tantas capas como desea el usuario, estas capas se convierten en imágenes JPG, que son guardadas en un directorio también elegido por el usuario. Las imágenes consisten en un fondo negro y el cuerpo del sólido en el plano intersectado es de color blanco (color que permite al fotopolímero curarse en el tiempo correcto), luego de esto, el software muestra el botón "print" que inicia la impresión. Esto inicia en la segunda pantalla (donde debiese estar el proyector) una animación con las imágenes de los cortes, además de controlar la altura de la bandeja a medida que va cambiando la imagen, de tal manera que una imagen significa una capa. Además de un control de una válvula que permite entrada de más fotopolímero cuando es necesario (el control de la entrada de polímero también es dado por el software, el cual tiene un contador que permite calcular el volumen utilizado de material en cada capa)

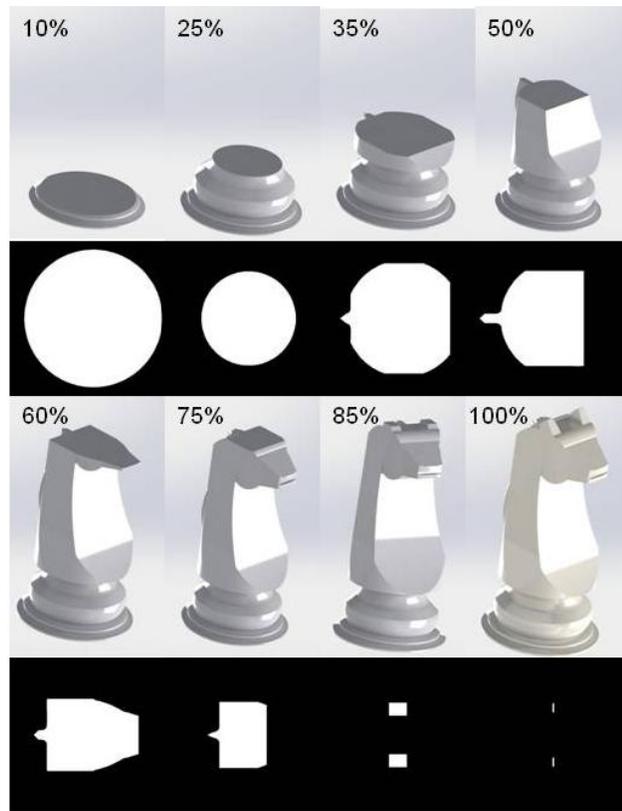


Ilustración 27: Esquema de cortes, para creación de objeto con el software, cada corte es una imagen que consiste en una capa de polimerizado, el cuerpo de color blanco polimeriza mientras que la parte negra no reacciona.

El software comienza en una interfaz que pide ciertos parámetros para la impresión, los parámetros son los siguientes:

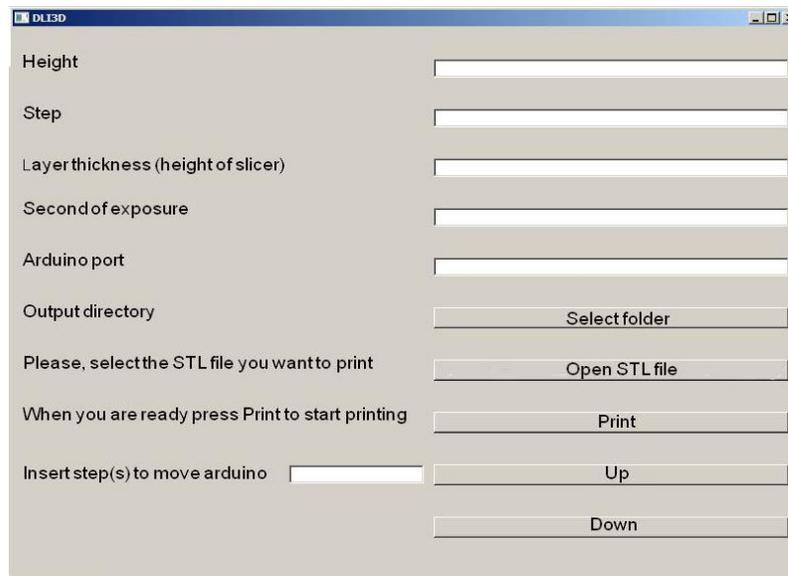


Ilustración 28: DLI3D interfaz.

Height: Consiste en la altura que debe ser impresa (eje Z con 0 como inicio), si se requiere que todo el objeto se imprima, se debe colocar la altura máxima del objeto

Step: Consiste en el espesor de cada capa de impresión, mientras más pequeño sea el número mejor es la resolución de impresión.

Layer thickness: Consiste en el espesor del cortador, es decir si el objeto está siendo cortado, este número sería el espesor del cuchillo con el cual se está cortando. Es un % del tamaño del objeto, el valor por default es 10%, se recomienda poner 0.01% para tener un espesor muy delgado y no haya interposición de capas. El nombre de este botón quizás no fue el mejor, ya que se puede confundir con el espesor de capa de impresión (el cual acá vendría siendo "Step").

Exposition time: consiste en el tiempo que cada imagen estará estática antes de cambiar de altura y de imagen. Es el tiempo necesario para que el material cure en cada capa, este número es de vital importancia para el correcto funcionamiento de la máquina y dependerá del fotopolímero que se esté usando.

Arduino port: Se debe indicar el puerto donde está conectado el Arduino.

Directorio de imágenes: Luego de haber llenado los 4 parámetros anteriores, el programa pide un directorio donde se aparecerán las imágenes generadas por el cortador del objeto, se recomienda hacer una carpeta nueva donde poner estas imágenes.

Open STL: seleccionar el archivo STL que desea ser impreso.

Luego, el programa tendrá un tiempo de carga donde generará las imágenes en JPG en la carpeta especificada.

Print: luego que las imágenes sean generadas, mostrará la opción "Print", que consiste en iniciar la impresión. Dadas las características del software actualmente, la bandeja debe partir en posición 0 (es decir la posición más baja posible pegado a la piscina).

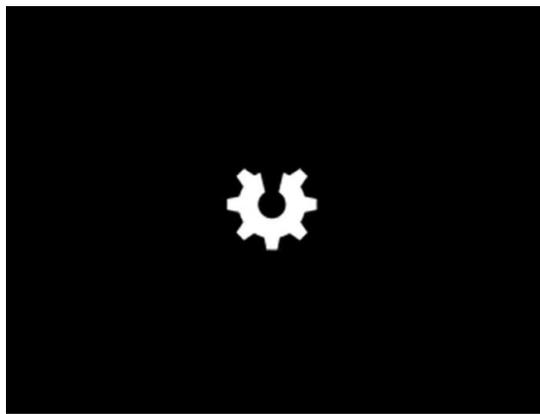


Ilustración 29: Imagen generada por el cortador, la figura es el símbolo de Open Hardware.

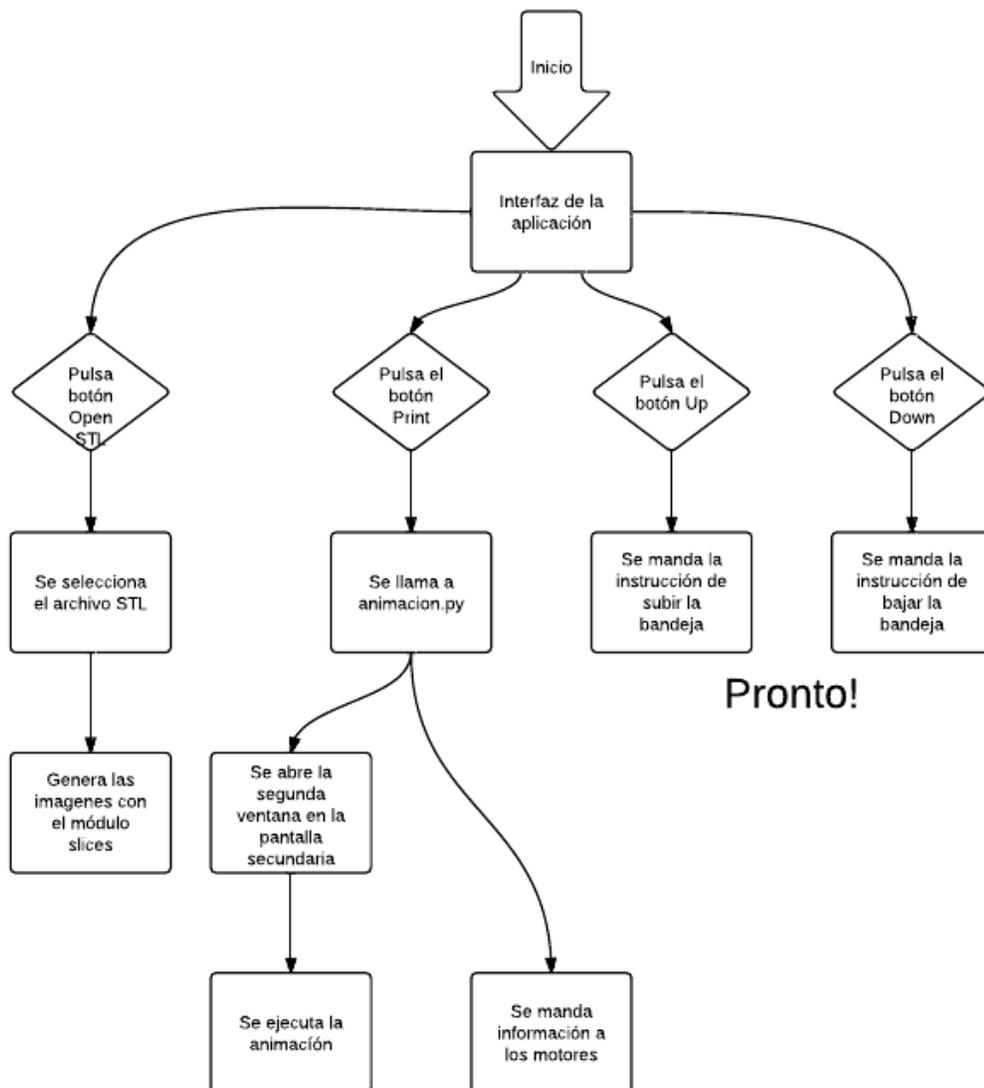


Ilustración 30: Flujo de funcionamiento del software.

El software no quedo 100% terminado, pero al menos quedó una versión lo suficientemente acabada, para hacer pruebas. Se espera que en el futuro sea tomado por otro curso o por algún memorista que quiera terminar el software, las partes del software se presentan en Anexos.

### 3.3 Manufactura de la impresora

Se comienza la etapa de compra y manufactura de partes, ésta se realiza en etapas en las cuales se aseguraba el buen funcionamiento de cada parte por separado.

#### 3.3.1 Motor y bomba

Se compra un motor paso a paso con un Torque mayor al requerido (en Chile no hay demasiados puntos de venta, por lo que se compra lo más cercano al requerimiento real). El motor tiene un paso de  $1,8^\circ$  por lo que para girar una vez, debe dar 200 pasos. Esta medida es de mucha importancia para lograr una buena resolución de la impresora (con el tornillo que se utilizará la resolución máxima es de 0,025 mm por paso).

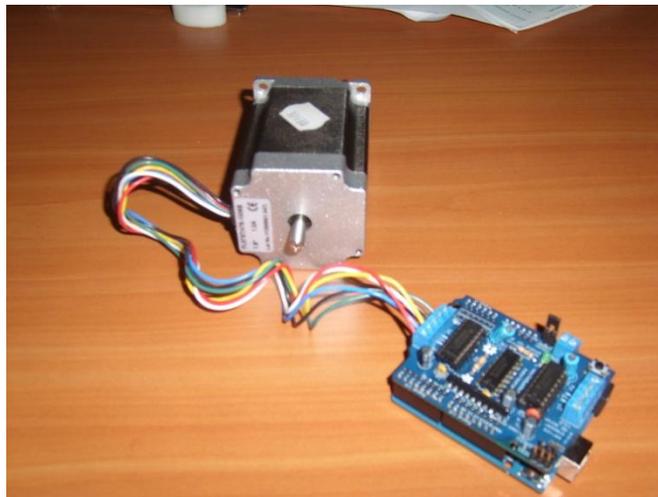


Ilustración 31: Motor paso a paso junto a controlador ARDUINO.

Se utiliza una bomba (limpiaparabrisas de auto) que funciona a 12 V, su objetivo consiste en alimentar de material a la impresora, de tal manera que cuando los niveles de fotorolímtero bajen, la bomba parte y entregue más fotorolímtero desde una fuente externa a la piscina de fotorolimerización.



Ilustración 32: Bomba limpiaparabrisas.

### 3.3.2 Controlador

El control de la impresora se hizo mediante Arduino. Una placa controladora que se usa mucho para proyectos Open Hardware, a ésta placa le serán conectados 2 componentes, el motor que maneja el eje Z y una bomba, que se utilizará para mover el fotopolímero desde una fuente hasta la piscina donde el material polimeriza (ambos vistos en el punto anterior).

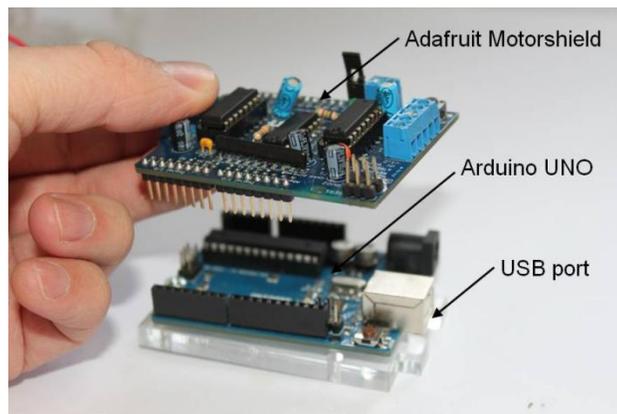


Ilustración 33: Arduino Uno con adafruit motorshield que se utiliza para facilitar el cableado con los motores, la conexión al computador se hace mediante un puerto USB.

### 3.3.3 Cuerpo de acrílico y pernos con sus tuercas

El cuerpo principal de la impresora es hecho de acrílico, el cual es cortado mediante el cortador láser que dispone la facultad. Como ya fue dicho anteriormente los planos se obtienen del diseño 3D hecho en Solid Works.

### 3.3.4 Tornillo de bolas recirculantes y acople a motor

El tornillo actual de la impresora es conseguido mediante una empresa que importa este tipo de piezas. Ellos disponían de inmediato de un tornillo de 16 mm de diámetro, la impresora idealmente funcionaba con uno de 8 a 12 mm, pero el precio de los más pequeños es demasiado superior al de 16 mm (además que se le deben sumar los costos de envío a Chile), por lo que se compra el disponible.

Sus características son 16 mm de diámetro con paso 5 mm. La pieza debe ser maquinada en uno de sus extremos para poder introducir el acople que lo unirá al motor.



Ilustración 34: Tornillo de bolas recirculantes con extremo maquinado.

Para acoplar al motor se utiliza un acople flexible, el acople viene con las medidas de "entrada x salida" de 1/4' x 10 mm (el motor usa un eje de 1/4'), Por lo que el maquinado del tornillo es de 10 mm, el acople se asegura mediante 4 pernos prisioneros (2 por eje).



Ilustración 35: Acople MOTOR-TORNILLO

### 3.3.5 Ejes, rodamientos y cuerpo soporta rodamiento

Se utilizaron Ejes de Acero plata de 10 mm, debido a que tienen una terminación excelente para ser utilizados como ejes.

Se seleccionan rodamientos lineales de 10 mm (por la geometría del movimiento), la geometría de estos rodamientos viene normada.

El cuerpo que fijará el rodamiento a la bandeja, es diseñado e impreso en ABS con la impresora FDM 3D Touch disponible en el FabLab. La impresión nunca queda idéntica al diseño CAD debido a limitaciones de resolución que se presenta en las impresoras FDM, y como la pieza no debe tener juego con su rodamiento, se hacen pruebas para observar el error de la impresora, así finalmente se logró construir la pieza sin juego.



Ilustración 36: Eje con rodamiento lineal



Ilustración 37: Eje con su rodamiento lineal ubicado en el soporte de rodamiento impreso por impresora 3D Touch.

### 3.3.6 Espejo

Inicialmente se utiliza un espejo normal, con lo que se tuvo que la imagen reflejada tenía un efecto llamado "ghosting", que consiste en que la imagen tiene sombras debido a que el espejo refleja la imagen en su cara trasera, esto hace que el haz de luz refracte en el acrílico y el espejo emita la imagen deformada.

Luego de hacer impresiones con este espejo, queda claro que el objeto impreso queda contaminado, por esto se busca una solución.

La solución consiste en usar un First surface mirror (FSM), es un espejo que refleja en su cara delantera (de ahí su nombre), se utilizan en óptica para telescopios y caleidoscopios, con esto se logra una imagen con la resolución suficiente.

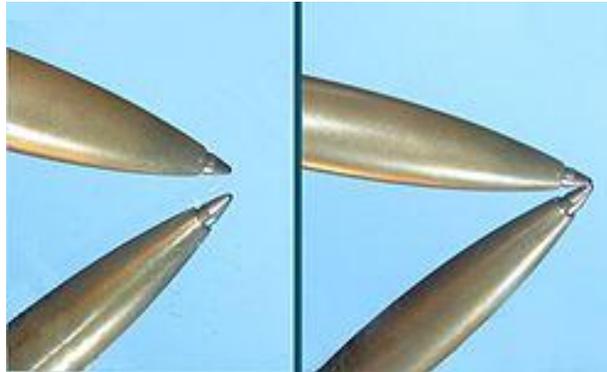


Ilustración 38: Izquierda reflejo que se observa en un espejo normal, se observa una distancia entre el reflejo y el objeto, ya que la imagen se refleja en la cara de posterior, mientras que en la derecha, reflejo de un espejo de primera superficie (FSM) donde el reflejo es en la cara delantera.

### 3.3.7 Armado

El armado tarda alrededor de unas 2 horas, pero esto debido a colocar los insertos metálicos en las piezas. Si sólo se cuenta el tiempo de unir los elementos, el tiempo es de más o menos 30 minutos.

Gracias al diseño, el armado es una tarea muy fácil, sólo poner pernos y tuercas, lo más complicado fueron los insertos de bronce que fueron adheridos con cautín.



Ilustración 39: Colocando los insertos con cautín, son en total 11 insertos, 3 en los pies de la impresora y 8 en las piezas sujetoras de los ejes.

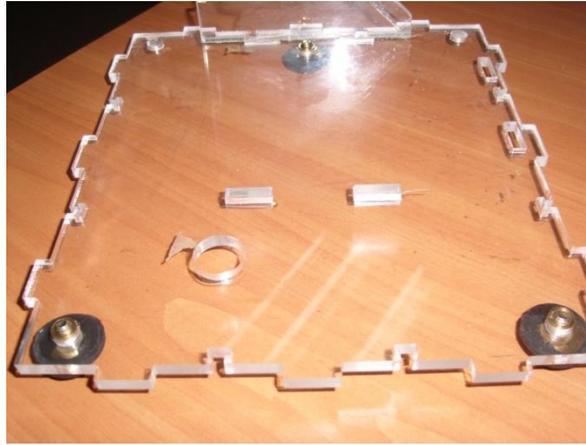


Ilustración 40: Pies a la impresora con los Pernos cabeza de botón, que sirven de patas de la máquina, gracias a que son nivelables, la impresora puede estar en una posición horizontal aunque la mesa donde esté puesta no sea horizontal.

En Anexos se encuentra el plano principal de la impresora con su lista de materiales, además de los planos de impresión de las piezas acrílicas, en ese plano no hay medidas ni centros marcados ni ninguna línea que no sea de la pieza. Ya que las medidas u otros textos harían que la cortadora láser hiciera líneas indeseadas.

También en Anexos se presenta el plano de la piscina con sus medidas correspondientes.

Luego del armado se tiene a BeamMaker lista para comenzar las pruebas.

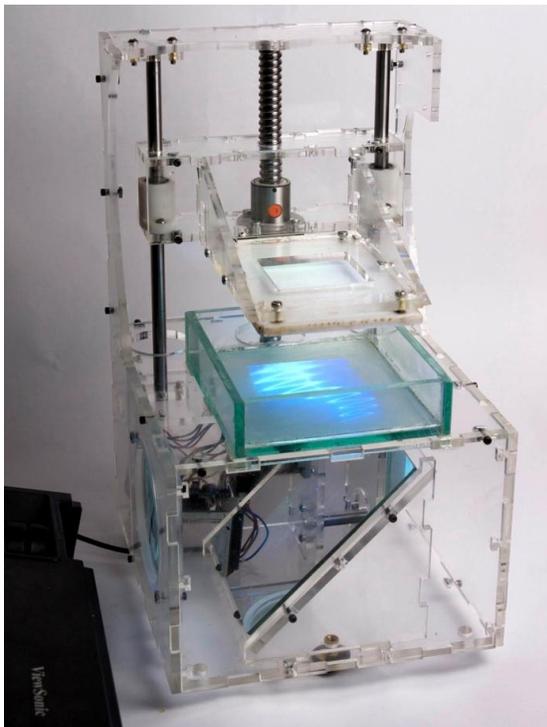


Ilustración 41: BeamMaker armada con proyector a un costado emitiendo una imagen.

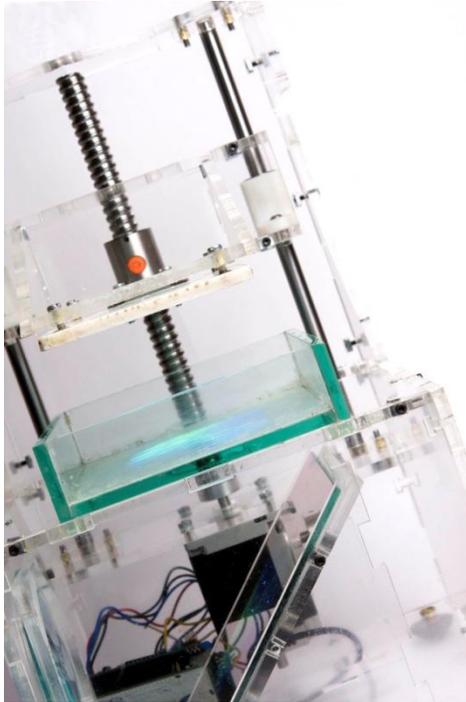


Ilustración 42: Acercamiento a BeamMaker,

### 3.4 Pruebas de curado, Impresiones básicas y calibrado

Para lograr obtener una impresión de buena calidad, es necesario tener un control de los distintos factores que podrían alterar la calidad de la figura a generar, los factores son los siguientes:

- Tiempo de exposición.
- espesor de capa.
- Potencia proyector.

En base a esto se hacen variadas pruebas de impresión, dónde se varían los parámetros mencionados, excepto potencia de proyector ya que se utiliza siempre el mismo de 2400 lúmenes del proyector ViewSonic PJD6210.

#### 3.4.1 Múltiples pruebas erróneas

Pese a que se había hecho una prueba de curado previa (impresión de figura Lego), se observaron problemas de impresión, esto debido a que se hace en el sentido contrario que las pruebas de curado hechas en un comienzo. En las siguientes imágenes se muestran pruebas fallidas:

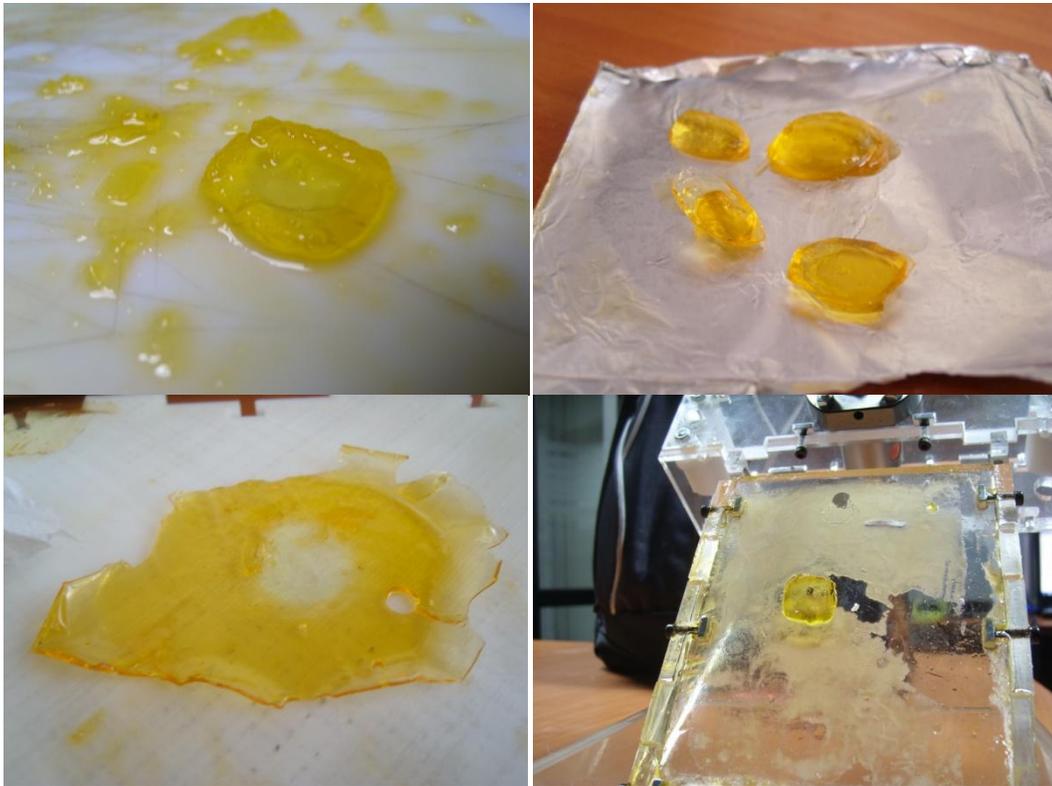


Ilustración 43: Impresiones fallidas hubieron muchas durante el desarrollo

De las pruebas hechas, se observa una serie de problemas, para los cuales se debían hacer modificaciones a la impresora para lograr solucionarlos.

Los problemas fueron los siguientes:

#### **Adherencia de la piscina de polimerización (Vat)**

Se observa que las piezas quedaban adheridas a la piscina en vez de a la bandeja de elevación, esto arruina por completo la impresión. Para que esto no ocurra, la base de la piscina tendría que estar recubierta con un material antiadherente, así obligándolo a fijarse a la parte superior (bandeja).

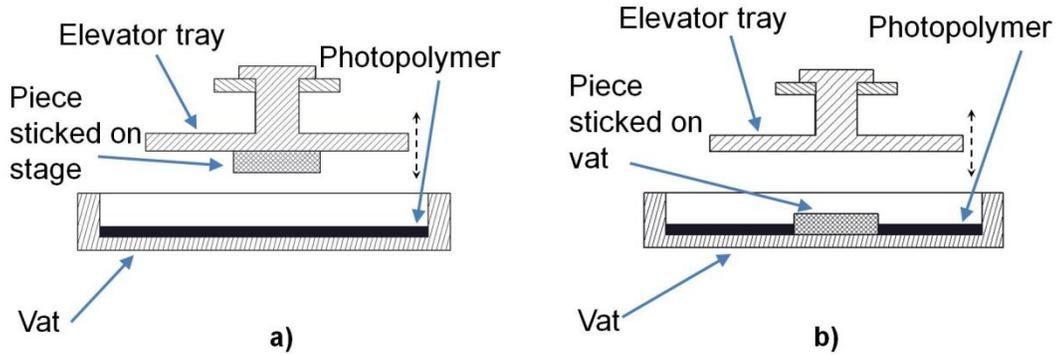
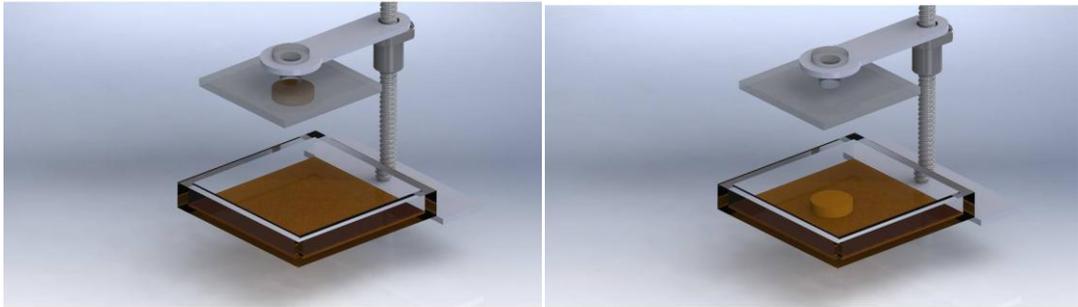


Ilustración 44: Esquema de impresión a) objeto siendo impreso queda fijo correctamente a la bandeja de elevación (elevator tray); b) objeto queda adherido a la piscina lo que arruina la impresión

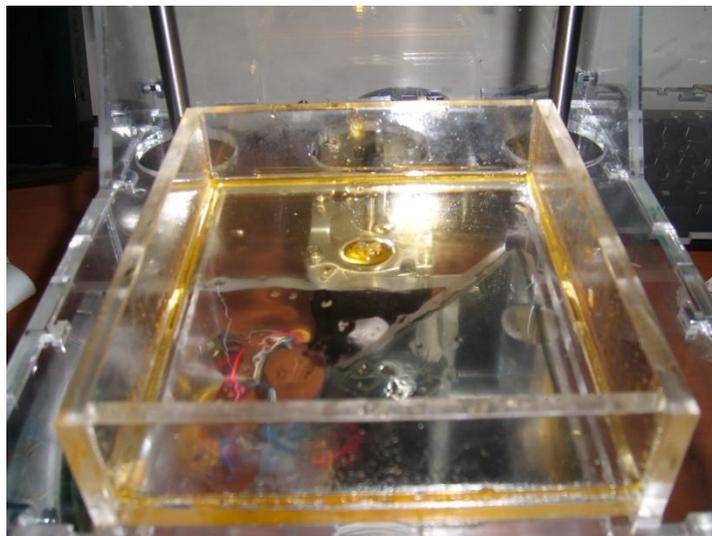


Ilustración 45: Ejemplo de impresión fallida debido a adherencia con la piscina

### Adherencia en la bandeja de impresión (Elevator Tray)

Posteriormente se observó que luego de 2,5 mm de altura impresa, la pieza perdía adherencia con la parte superior, debido a su peso y área de contacto. Si la siguiente capa tiene una superficie de impresión mayor o igual que la capa adherida a la bandeja, la pieza tiende a despegarse de la bandeja y nuevamente quedar adherida a la piscina.

### Falta de material para capa nueva debido a viscosidad del material

Al curarse una capa y adherirse a la pieza, queda el espacio o hueco de material que es utilizado, la viscosidad del material hace que este "vacío" no sea rellenado inmediatamente, por lo que las impresiones a veces quedan con faltas de material en algunas capas.

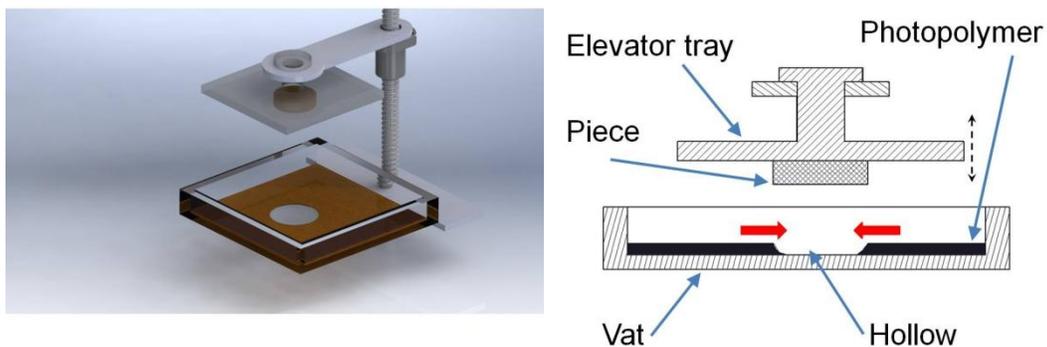


Ilustración 46: Error observado debido a viscosidad, aparece un vacío debido al plano recién curado, si se intenta curar otra capa sobre nada, o sobre menos material que debiera, aparecerá en la capa una falta de material.



Ilustración 47: Ejemplos de Impresión fallida debida a falta de material, se puede apreciar que la superficie no está plana , debido a que hubo lugares donde no había suficiente material, por lo que no se generaron capas planas de curado

### 3.4.2 Resolviendo el problema de la antiadherencia

Para resolver el problema de antiadherencia se busca como solución recubrir la base de la piscina con un material antiadherente.

Se debe buscar un material tal que fuera antiadherente, transparente para dejar pasar la luz (desde la fuente hasta el polímero) y además que fuera fácil de utilizar para recubrir la piscina de vidrio.

De la literatura se llegó a que habían 2 materiales que son muy utilizados por sus propiedades de antiadherencia: la silicona y el teflón, de éstos materiales el más fácil y económico de utilizar era la silicona, debido a que se puede comprar en gel lo que facilita la aplicación. Se hizo una cama de silicona sobre la piscina de vidrio, luego se procedió a continuar con las

pruebas y el resultado fue exitoso, el objeto se quedo adherido a la cama superior.

Lamentablemente las impresiones perdieron calidad ya que la silicona al no ser plana, deformaba la luz que llegaba al fotopolímero, formando objetos de pésima resolución.

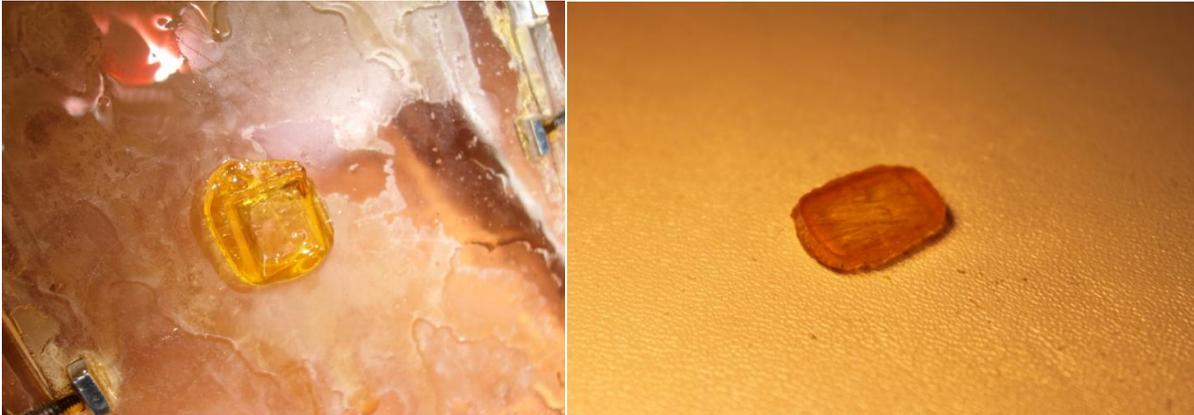


Ilustración 48: Impresiones fallidas debido a la deformación de la imagen con la cama de silicona, al menos las piezas quedaban adheridas a la bandeja, lo cual fue un gran paso.

### 3.4.3 Resolviendo el problema de la pérdida de calidad

Se buscan soluciones con siliconas que produjeran una cama plana, dentro de éstas soluciones se encuentran:

Silicona de auto: Se hace la prueba, pero lamentablemente no deja la superficie lo suficientemente antiadherente, por lo que el objeto igual queda adherido en la piscina.

Micas de plástico antiadherente y transparente: De las pruebas que se realizan con este sistema, se llega a que debido a la dificultad de poner correctamente la mica, las figuras se quedaban arriba y abajo aleatoriamente.

Finalmente nace la idea de usando la misma cama de silicona inicial, pero lijando su superficie con lija al agua, para así convertirla en una cama plana. El proceso no es de gran dificultad, fácil de replicar y posteriormente se comprueba que es de alta durabilidad.

Se realizan pruebas con este tipo de cama, y se observa que las figuras quedaban adheridas a la cama superior a menos que los objetos a imprimir tuvieran una altura mayor a los 2,5 mm, esto ya fue explicado anteriormente.

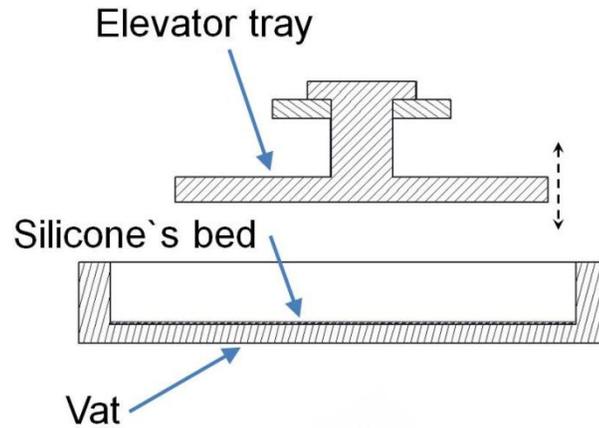


Ilustración 49: Cama de silicona se sitúa en la base de la piscina, para disminuir la adherencia, recordar que se hace con silicona transparente y se debe hacer un lijado al agua posterior hasta que quede una superficie lisa.

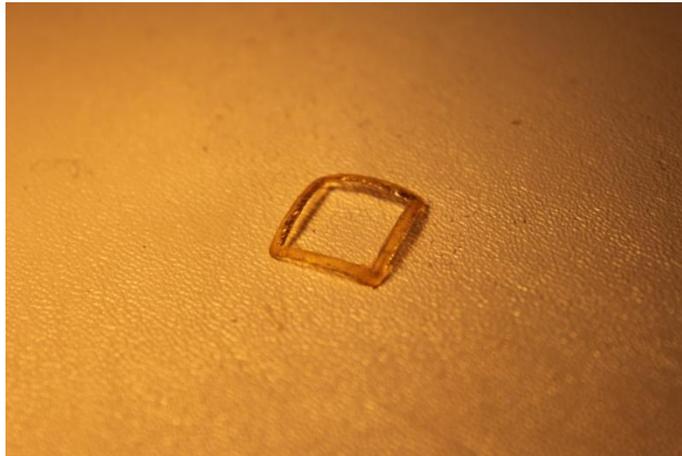


Ilustración 50: La calidad de impresión mejoró, notablemente luego de esto.

### 3.4.4 Resolviendo el problema de la adherencia con impresiones de más de 2.5 mm.

En base a este problema se pensó en 2 soluciones:

#### 1-Mejora en la rutina del software

Inicialmente la rutina consiste en lo siguiente:

- Proyección de imagen correspondiente a esa capa con la bandeja estática

- Imagen se va a negro y comienza a elevarse la bandeja hasta altura de la siguiente capa
- Repetir

Este sistema no deja un tiempo suficiente para que el polímero no escurra, por lo que quedan vacíos (de los problemas explicado anteriormente), además un mayor movimiento del polímero, impide que haya polimerización indeseada, a modo de refrescar el material. Por lo que fue implementado un cambio en la rutina. El cambio fue hecho desde el software, la nueva rutina es la siguiente:

- Proyección de imagen correspondiente a esa capa con la bandeja estática
- Imagen en negro y comienza a elevarse la bandeja hasta una altura igual a 15 mm sobre la altura anterior.
- Tiempo de espera para que el polímero escurra durante 2 segundos.
- Bandeja baja hasta que la altura corresponda a la siguiente altura de la siguiente capa a formar.
- Repetir

## **2-Adherir una base de soporte a las impresiones.**

Como los objetos más largos se desprenden, Se implementa la idea de previamente a hacer el objeto, formar una capa soporte de mayor área que todas las capas del objeto a imprimir. Bajo esta superficie se debe imprimir el objeto, esta base hace de soporte de la figura y asegura que siempre exista mayor agarre en la parte superior que en la inferior, debido a que la superficie de contacto es siempre mayor gracias a esta figura.

En el siguiente diagrama se explica cómo se utiliza el soporte cama, este sistema es utilizado por muchas impresoras 3D de fotopolímeros. Luego de la cama se deberían crear soportes para que sea más fácil separar la cama del objeto, la generación de soportes queda a cargo del software, esto es una tarea que puede ser tomada por otras personas en el futuro de la investigación.

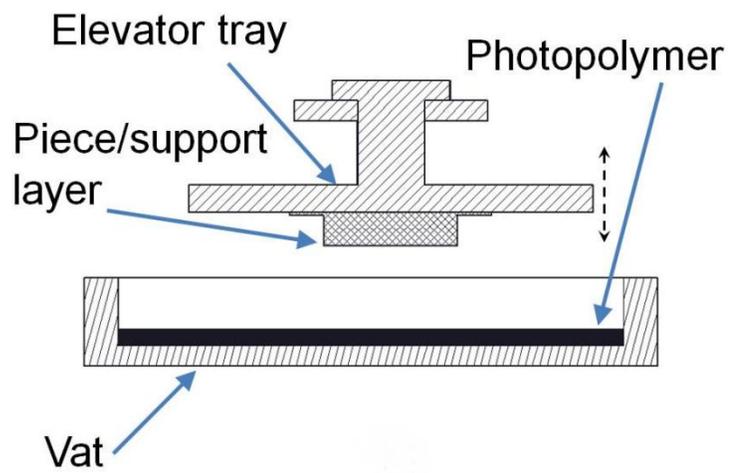


Ilustración 51 Antes de comenzar la impresión se hace una capa/cama de soporte, de área mayor que todas las capas del objeto, de este modo, la superficie de contacto de la bandeja será siempre mayor que la de la piscina.

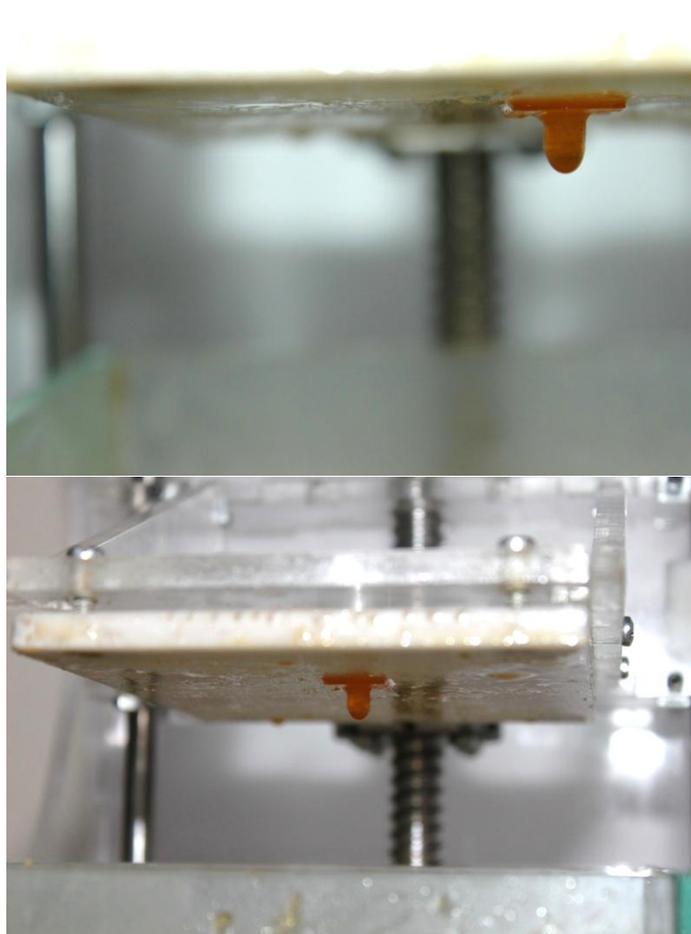


Ilustración 52: Objeto recién impreso con soporte, fue un gran éxito ya que mide casi 1 cm de largo.

Con estos nuevos métodos se hacen las pruebas nuevamente y el resultado es exitoso, finalmente se obtienen objetos de alturas 4, 6 y 10 mm, y no sólo eso sino que también los objetos impresos mejoraron aun más su resolución.

## 4 Resultados

De las pruebas hechas se concluye la siguiente tabla, que describe las condiciones por capa donde el polímero cura correctamente en BeamMaker.

Tabla 3: Condiciones de funcionamiento del polímero en BeamMaker

Condición	Valor
tiempo de curado	7 seg
espesor de capa	0.1 mm
potencia proyector	2400 lum.
Área de impresión	100 x 75 mm
Luz ambiente	Día y noche
longitud de onda sensible	418 nm

### 4.1 Evolución en la calidad de impresión

Aquí se expone la evolución en la calidad de la impresión a medida que se obtenía mayor control de la impresión:

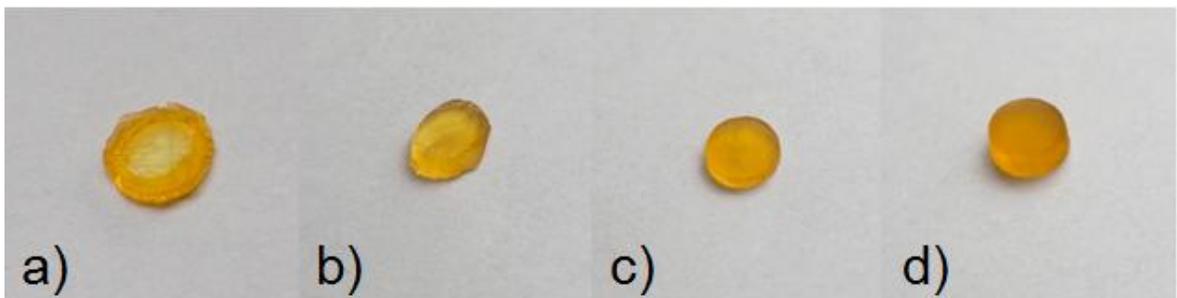


Ilustración 53: Evolución en calidad de impresión a) Impresiones no tenían buena resolución debido al espejo y la silicona, además se observa una deformación en la imagen; b) Se obtuvieron mejoras mediante el cambio del espejo ,pero la cama de silicona aun mostraba problemas. El material polimerizaba descontroladamente y con vacíos por lo que no quedaban los planos completamente curados; c) Si bien la resolución es buena no se podían crear objetos de mayor largo de 2 mm; d) objeto de 4 mm, con una excelente acabado.

## 4.2 Comparación de resolución con otras impresoras

Como se dispone de impresoras 3D en el laboratorio, se compara imprimiendo la misma pieza para diferentes impresoras, la figura será muy simple pero muy pequeña, las figuras pequeñas son las que en general más complican a las impresoras 3D.

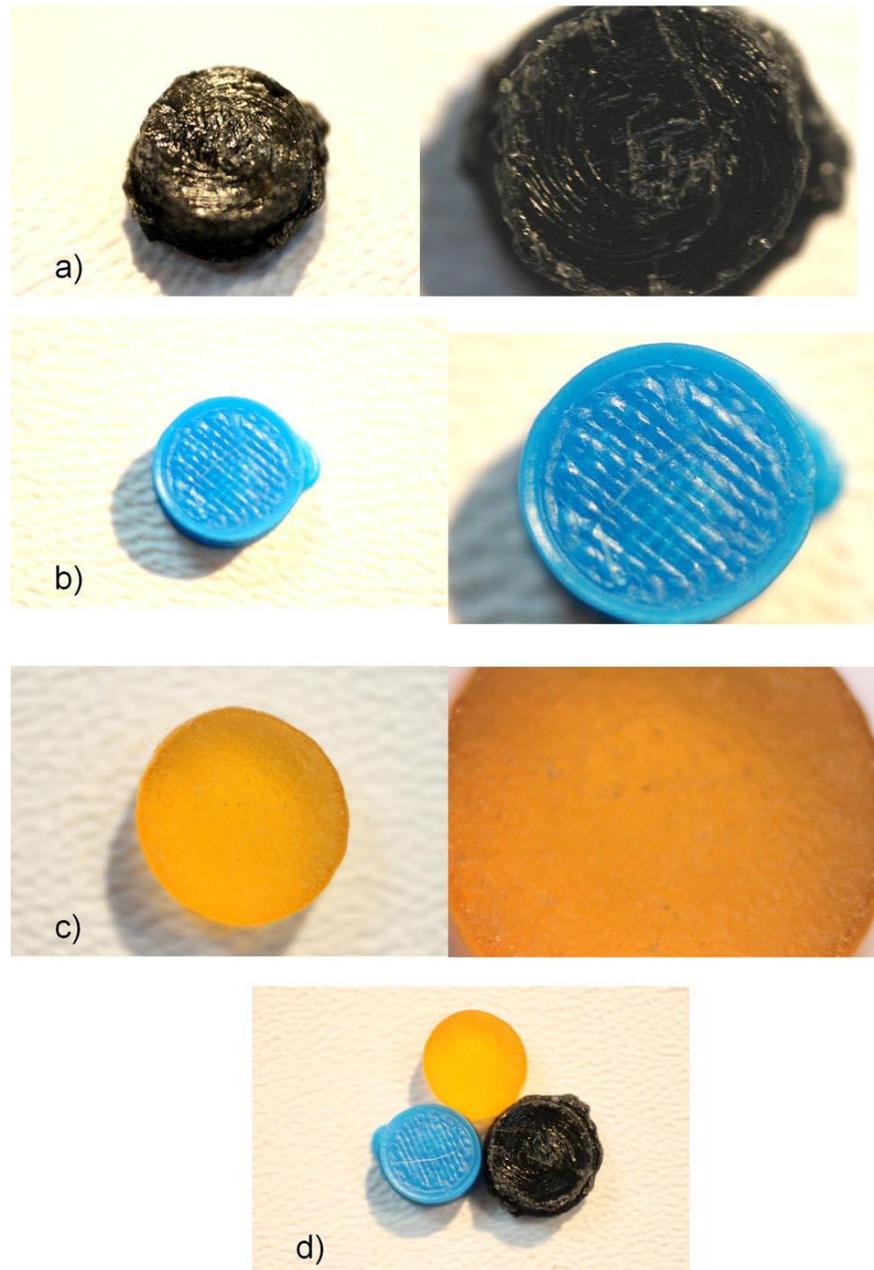


Ilustración 54: a) Impresión hecha con 3D Touch de Bits From Bytes, se puede apreciar la resolución y terminaciones que dejan mucho que desear, b) Figura impresa en replicador de MakerBot, se puede observar una mejor calidad que en a , pero se puede ver las limitaciones de la tecnología FDM al dibujar línea por línea c) Objeto construido por BeamMaker la calidad de la superficie es notoriamente superior d) las 3 juntas para notar que fueron hechas a la misma escala.

Como resultados cuantitativos de las impresiones se presenta esta tabla que muestra las dimensiones de los objetos impresos comparándolos con las medidas del objeto CAD, de esta forma se observa el error porcentual que tiene cada una.

Tabla 4 Comparación de medidas de un disco impreso en 2 impresoras y BeamMaker

Medidas	Digital	3D Touch	Replicator	BeamMaker
Alto	2,5	2,91 mm	2,82 mm	2,55 mm
Diámetro	6,85	6,95 mm	6,3 mm	6,86 mm
Error en altura		0.41	0,32	0,05
Error en diámetro		0.1	0.55	0.01

De las medidas obtenidas se puede apreciar que no sólo hay una mejora en cuanto a la visual de la figura, sino también respecto a las medidas del objeto. Mostrando que la tecnología de fotopolímero logra crear objetos más fieles al objeto digital, se calculó el error medio cuadrático para las 3 impresoras, obteniendo el siguiente gráfico:

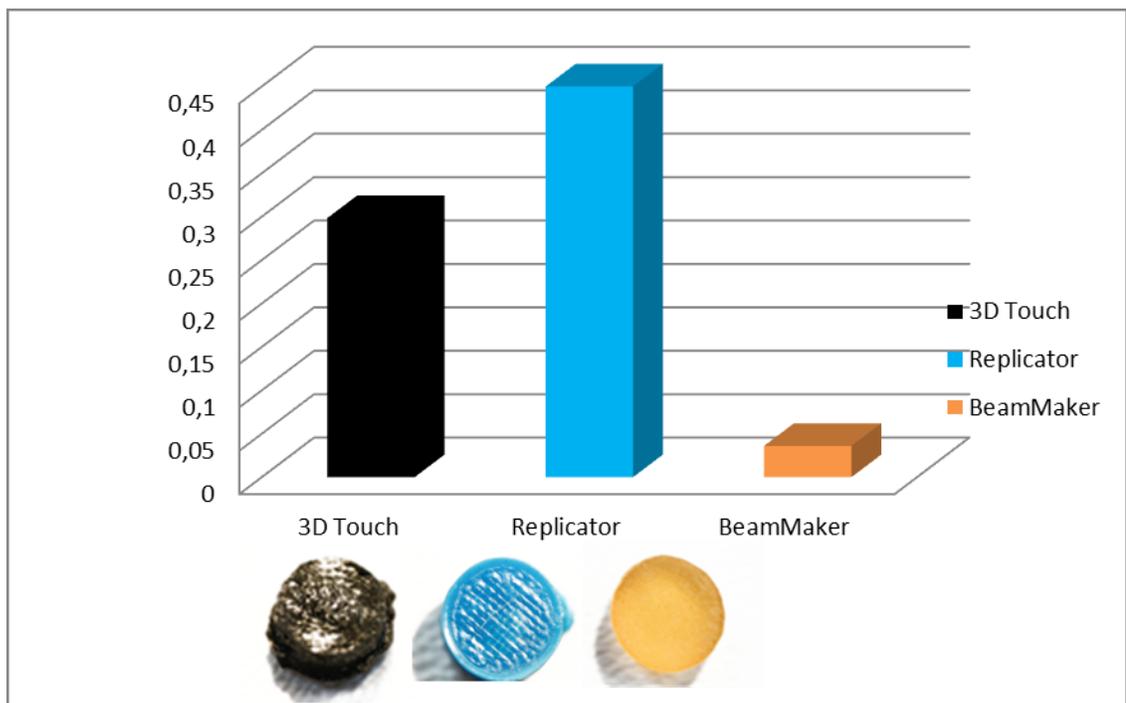


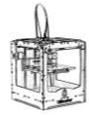
Ilustración 55: Gráfico del error medio cuadrático de 2 impresoras comparadas con BeamMaker.

El gráfico muestra una mejora cuantitativa tangible respecto a otras tecnologías, es importante destacar que se comparó con estas impresoras porque se encuentran disponibles en el FabLab de la universidad, por otro lado, estas impresoras tienen un precio comparable con BeamMaker.

### 4.3 Comparación de características con otras impresoras

Con el objetivo de hacer más objetiva la comparación, se enlista una serie de impresoras de diferente procedencia. En la tabla se observan características como el precio de la impresora, precio del material, tamaño, resolución, etc.

Tabla 5 Tabla comparativa Final entre múltiples impresoras y BeamMaker

3D Printer	Technology	Printer Resolution	Printer Cost	Printing Material Cost	Machine Complexity	Volume/Weight	Schematic
Fab@Home[6], Since 2007.	Robocasting	X/Y : -0.2 Z: 0.3	2,000[\$US]	Varies	Motors:4	490x385x330 mm/12kg	
Makerbot Replicator, Since 2011	Fused deposition modeling	X/Y: 0.125 Z: 0.2 -0.3	1,750[\$US]	43[\$US/g]	Motors:5	320 x 467 x 381 mm /14kg	
Ultimaker, Since 2011.	Fused deposition modeling	X/Y: 0.125 Z: 0.3	1,567[\$US]	43[\$US/g]	Motors:4	340 x 355 x 390 mm/5kg	
Cube 3D Printer, Since 2012.	Fused deposition modeling	X/Y: 0.25 Z: 0.25	1299[\$US]	50[\$US/g]	Motors:4	260x260x340/4.3kg	
RapMan, Since 2007	Fused deposition modeling	X/Y: 0.125 Z: 0.125	1,700[\$US]	55[\$US/g]	Motors:4	650x570x510mm/17kg	
RepRap, [3], Since 2006	Fused deposition modeling	X/Y: 0.3 Z: 0.3	1,350 [\$US]	42[\$US/g]	Motors:4	400x400x400 mm/7kg	
ProJet 1500, Since 2011	Photopolymer	X/Y: 1024x768 DPI Z: 0.1	10,900[\$US]	240[\$US/kg]	Motors:2	622x1003x775 mm/68kg	
B9Creator, Since 2012	Photopolymer	X/Y: 1024x768 DPI Z: 0.1	3345[\$US]	100[\$US/kg]	Motors: 2	790x470x305mm/13.5 kg	
BeamMaker, Since 2012	Photopolymer	X/Y: 1024x768 DPI Z: 0.1	700[\$US]	60 [\$US/kg]	Motors: 1	220x250x370 /~4kg	

#### 4.4 Otros usos encontrados

La tecnología de impresión 3D, tiene un norte donde se pudieran generar objetos funcionales electrónicos listos desde la impresora, una limitante es cómo hacer circuitos con una impresora 3D.

Existe un método de hacer circuitos donde se aplica a una placa de cobre líneas con un plumón y luego se pasa por un baño de percloruro férrico que corroe el cobre excepto por los lugares donde se marcó con plumón, aquí unas imágenes explicativas



Ilustración 56: Proceso para hacer circuitos caseros, donde primero se marca con plumón las pistas deseadas, luego se baña en percloruro férrico, el ácido corroe el cobre que no tenga plumón encima, dejando intacto lo demás, así finalmente obtener la placa.

Se tuvo la idea de probar si el fotopolímero podría hacer el mismo efecto que el plumón y el resultado fue el siguiente:



Ilustración : prueba hecha con fotopolímero y percloruro férrico, esto demuestra que si se imprime las pistas sobre la lámina de cobre se pueden crear circuitos con BeamMaker,

Las pruebas muestran que el fotopolímero posee la misma propiedad que el plumón por lo que es posible hacer circuitos con BeamMaker.

Se hicieron algunas pruebas para lograr crear un circuito, el mayor problema es la adherencia al cobre, lamentablemente el polímero se acabó en esta fase, por lo que no se pudo depurar la técnica. De todos modos se logró hacer un Arduino de fotopolímero.

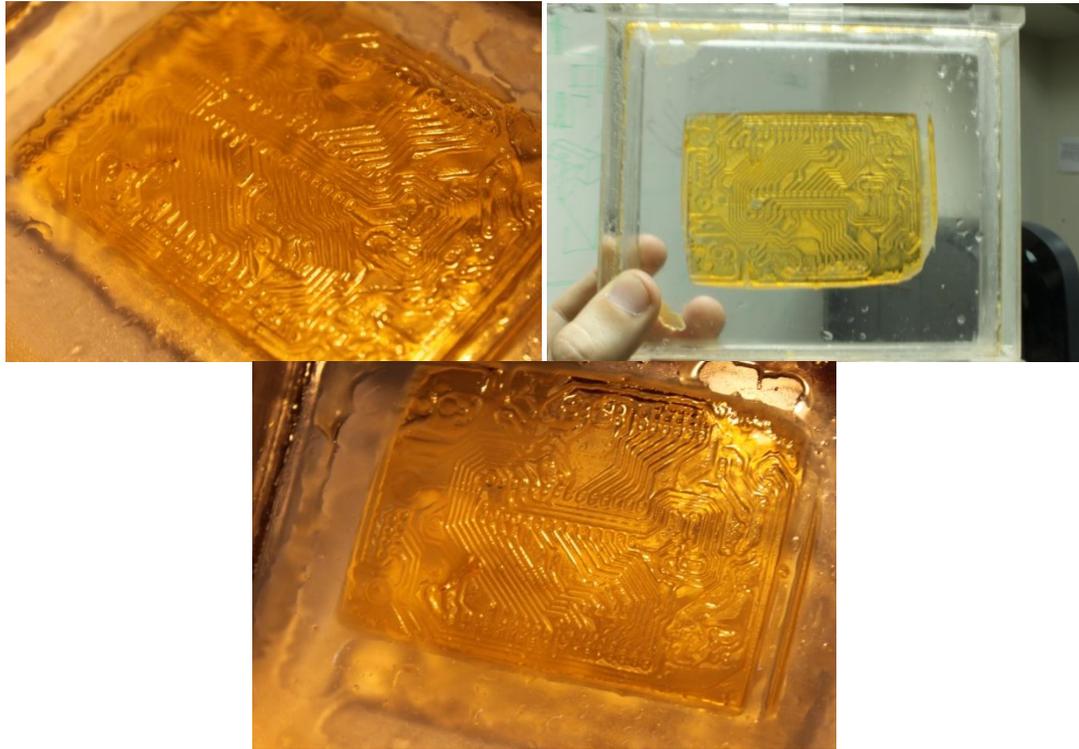


Ilustración 57: Arduino en fotopolímero, si se depura la técnica se podría lograr imprimir circuitos con la impresora , lo cual sería una gran revolución para la impresión 3D.

#### 4.5 Limitaciones

Existen geometrías que para el actual método de impresión es imposible realizar, ya que para que una capa se cree requiere un soporte anterior donde polimerizar. Este problema es algo normal para la tecnología SLA, y la solución consiste en crear soportes del mismo polímero para crear todo tipo de figuras. Los softwares de las impresoras SLA comerciales poseen la opción de agregar material de soporte, característica que el actual software de BeamMaker no posee, en el futuro puede ser mejorado el software para imprimir todo tipo de piezas.

Entre las figuras imposibles de crear están las figuras huecas o geometrías de ángulos demasiado abiertos.

## 5 Análisis y discusión de resultados

### 5.1 Sistema de impresión final

Después de haber hecho múltiples pruebas y observar los errores que tiene la tecnología, BeamMaker hace uso del siguiente sistema para lograr crear objetos.

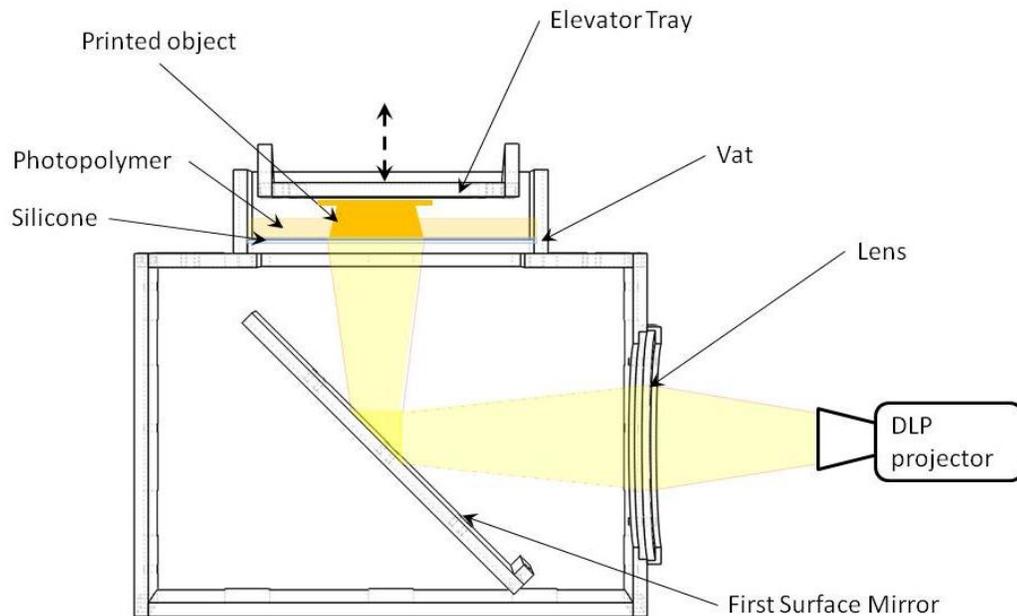


Ilustración 58: Sistema de proyección curado utilizado por BeamMaker

El proyector emite la imagen a polimerizar, el haz proyectado es enfocado por un lente de 5x para enfocar correctamente la imagen a esa distancia. Luego el haz rebota en el espejo de primera superficie que está a 45°, esto hace que la imagen llegue hasta la piscina de polimerización (Vat), para así lograr polimerizar el material. La piscina cuenta con una capa plana de silicona para bajar la adherencia entre la piscina y el objeto imprimiéndose. La impresión posee un soporte para aumentar la adherencia con la bandeja de elevación (Elevator tray). Luego de haber pasado el tiempo de curado, la bandeja se levanta y espera un tiempo para que el polímero refresque y no queden vacíos de polímero, finalmente la bandeja baja hasta la altura de la nueva capa a polimerizar y el proyector comienza nuevamente con la siguiente imagen.

## **5.2 El fotopolímero**

Las propiedades del fotopolímero estudiado si bien permiten crear objetos, no son de una calidad muy alta debido a su carácter frágil. Muchas de las figuras se quebraron inmediatamente después de haber sido impresas o en las manos de personas que no las tomaron con suficiente cuidado.

Finalmente se logró obtener impresiones correctas, éstos resultados sólo sirven para el material analizado, y BeamMaker busca mucho más que eso. La idea sería continuar con el ensayo de otros fotopolímeros que fueran sensibles a longitudes de onda cercanas a la de la luz visible. La investigación puede ser continuada por otros alumnos de la Universidad, así como cualquier otra persona en el mundo que lo desee, debido a que su carácter Open Hardware lo permite.

Más allá de los resultados de la máquina que fueron exitosos, los resultados reales se verán si se aparece una comunidad de usuarios que construyan sus propias BeamMakers y que prueben con otros materiales.

## **5.3 El proyector**

Las impresoras 3D de fotopolímeros usan proyectores especiales de longitudes de onda ultra violeta, junto con BeamMaker apareció otra impresora que usaba igualmente un proyector casero, pero requería uno en específico(que se vende junto con la impresora), BeamMaker funciona con cualquier proyector que tenga una potencia superior a 2000 lúmenes , esto es muy común en los proyectores actuales , en general los proveedores de proyectores recomiendan potencias mayores a los 2000 lúmenes, para que las proyecciones puedan ser vistas aun en cuartos no oscuros.

La hipótesis de utilizar un proyector normal fue correcta y con ello bajar considerablemente el costo de la máquina.

## **5.4 Arduino**

Uno de los factores que encarecen y complican cualquier máquina electrónica es su controlador. Diversas placas de altos costos, complejas formas de programar, necesidad de conocimientos de soldadura y otros problemas, hacen que no puedan ser usadas por cualquier persona, lo que distancia a la personas del mundo de la tecnología. Arduino rompió ese canon permitiendo que personas sin grandes conocimientos puedan crear sus inventos. El objetivo de usar Arduino en BeamMaker fue que cualquier persona pueda hacer funcionar la máquina con un pequeño instructivo,

recordando que BeamMaker es una máquina para el hogar no para personas de grandes conocimientos electrónicos.

## **5.5 El software**

Con la ayuda de un grupo de estudiantes del departamento de computación y del profesor Agustín Villena, se logró diseñar un software que tenía las características suficientes para probar la impresora. El software de por sí tiene muchas limitantes que pueden ser depuradas, esto no es problema, ya que éste software también es de carácter Open Source y con esto atraer a personas que tengan conocimiento en estos temas, para que libremente mejoren el software. En la etapa final de la memoria, apareció en internet un proyecto que consistía en crear un software universal para impresoras 3D (proyecto de procedencia norteamericana), donde cualquier persona podía colaborar ayudando en la programación, otras personas podían utilizar el software y así reportar errores del programa.

Esto muestra el crecimiento que está teniendo la comunidad de proyectos Open Source y Open Hardware, así como también que la comunidad está muy interesada en la tecnología de impresión 3D. Se podría poner en contacto con la gente de este proyecto, para que el software soportara BeamMaker.

## **5.6 BeamMaker**

Como impresora en sí, BeamMaker se diferencia y supera a sus competidoras en los aspectos más relevantes de este tipo de tecnología.

### **5.6.1 Costo**

El costo de una BeamMaker (sin contar el proyector) es de alrededor de 400 dólares, las impresoras 3D que utilizan la misma tecnología son muy costosas. Durante el trabajo de esta memoria, salió al mercado una impresora 3D de similares características (y se supone que igualmente Open Source) , pero su precio es de alrededor de los 2500 dólares. Si bien este precio está muy por debajo de los más de 10000 dólares que cuestan en general las impresoras 3D de fotopolímeros, es un precio aun alto comparativamente con BeamMaker.

### **5.6.2 Resolución**

En cuanto a resolución se observó que la tecnología es dependiente del polímero más que de los motores utilizados. El fotopolímero utilizado en esta memoria, puede generar un espesor de capa mínimo de 0.1 mm, esto

concuenda con la bibliografía de donde se obtuvo el polímero, en donde se mencionaba que el mínimo era 0,2 mm. Si bien se logró una espesor más delgado , puede ser debido a que en esta memoria se utilizaron motores paso a paso para controlar la altura , mientras que en el paper lo hacían manualmente, así como también la potencia del proyector utilizada en esta memoria es mayor.

Cabe mencionar que existen otros fotopolímeros con la misma sensibilidad a la luz visible y que son capaces de polimerizar con espesores de capas menores, de todas maneras el espesor de capa de 0.1 mm es el estándar para impresoras 3D de fotopolímeros, por lo que la resolución fue satisfactoria.

Comparativamente con otras tecnologías (ver tabla de resultados), se observa que ésta resolución es una de las más altas actualmente, lo que deja a BeamMaker con la capacidad de competir con las impresoras actuales. Por otro lado de los resultados obtenidos, se observa que la tecnología de fotopolimerización permite obtener piezas más fieles a las digitales, el error medio cuadrático observado de los resultados fue de 0.03 mm lo cual es mucho mejor a las impresoras FDM con las cuales se comparó.

### 5.6.3 Portabilidad

El tamaño de BeamMaker es comparable a las impresoras convencionales de tinta, esto no se ve en las impresoras de fotopolímeros actuales, que son de grandes dimensiones, así creando el concepto de impresora 3D de escritorio.

## 5.7 Democratización de la tecnología (Open Hardware)

La impresora tendrá una patente creative commons de tipo software libre, lo que significa que legalmente cualquier persona puede replicar la impresora para hacer sus propias investigaciones y mejoras, la patente contiene los siguientes puntos muy importantes:

**Reconocimiento (Attribution):** El material patentado puede ser distribuido, copiado y exhibido por terceras personas si se muestra a su creador en los créditos.

**No Comercial (Non commercial):** El material original y los trabajos derivados pueden ser distribuidos, copiados y exhibidos mientras su uso no sea comercial.

**Licenciar Igual (Share alike):** El material creado puede ser modificado y distribuido pero bajo la misma licencia que el material original.

Se eligieron estos puntos con la idea que otros usuarios hagan mejoras de BeamMaker, a modo de feedback, este tipo de modalidad es muy utilizado en los proyectos Open Hardware.

## 5.8 Futuro

Las características de la máquina la hacen dueña de un potencial muy grande. Si se publicita de manera correcta, futuros trabajos en conjunto con otras universidades podrían generar una versión 2.0 con mejoras suficientes para que funcione de mucho mejor forma. Impresoras Open Source como Fab@Home y las MakerBot, tuvieron sus prototipos no 100% funcionales además de diseños muy toscos, pero la continuación del trabajo tanto como del equipo creador, como la adición de nuevos grupos entusiastas hizo posible la aparición de versiones mejoradas.

Si se hace un trabajo parecido, se puede convertir a BeamMaker en una impresora muy utilizada y que haga grandes cambios en la impresión digital, ya que aun no existe una impresora 3D de alta resolución con costes realmente bajos y con un funcionamiento simple.

Existen ciertos puntos que serían importante mejorar en futuras versiones y estos son los siguientes:

Elevador de mayor calidad para asegurar 90° con piscina, probablemente se tendrá que utilizar otro material que no sea acrílico, ya que este se deforma.

- Búsqueda de nuevos polímeros que tengan propiedades mecánicas interesantes, sería ideal que las propiedades fueran parecidas al ABS y PLA muy utilizados en las impresoras 3D de tipo FDM.
- Uso de tornillo más económico, Makerbot vende un stepper motor con tornillo y tuerca por un precio bastante bajo (alrededor de los 70 dólares), sería interesante probar con este motor, ya que así se podría bajar aun mas los costos de la impresora sin perder resolución
- Se está desarrollando un software Open Source universal para todo tipo de impresoras 3D, dentro de esto está la posibilidad de imprimir con impresoras de tipo SLA, sería interesante ponerse de acuerdo con los diseñadores de este programa para que BeamMaker también sea compatible. Si bien el software actual es funcional, el software diseñado por ellos posee características muy superiores.
- El diseño de BeamMaker aun puede mejorar, sobre todo en el aspecto estético, quizás tener el apoyo de diseñadores industriales sería perfecto para que BeamMaker no sólo sea funcional sino que además estéticamente atractiva.

## 6 Conclusiones

Los objetivos de esta memoria fueron exitosamente logrados ya que se diseñó, desarrollo y construyó una impresora 3D Open Source de tipo SLA. Las pruebas de impresión muestran que la impresora imprime exitosamente, sin embargo el desarrollo no está 100% completo, aun se pueden hacer muchas mejoras y pruebas con otros polímeros que posean mejores propiedades mecánicas, para así obtener objetos funcionales. Este desarrollo puede ser hecho por un siguiente memorista que quiera continuar con la investigación de la impresora, lo interesante es que quedará On-line la información para que futuros desarrollos sean logrados sin necesidad de caer en repeticiones de lo que ya fue hecho en esta memoria.

El precio de la impresora es de alrededor de los 200.000 pesos chilenos (400 dólares), sin contar el proyector, lo que es un precio muy por debajo, de las impresoras 3D de su tipo, lo que cumple los objetivos iniciales de una impresora de bajo costo.

El fotopolímero creado tiene características excelentes en cuanto al curado, ya que su sensibilidad permite que con una cantidad de lúmenes promedio (en cuanto a los proyectores comerciales) sea posible la curación en un tiempo corto, pese a esto, el polímero tiene problemas con las propiedades mecánicas, es extremadamente quebradizo, muchas figuras impresas se quebraban con tan solo tocarlas, esto hace que las figuras que son impresas con este material no tengan mucha variedad en uso. Materiales como el PLA y ABS (materiales que utilizan impresoras 3D de tipo FDM) tienen propiedades tales que permiten utilizarlos en múltiples usos, además de tener una temperatura de trabajo bastante grande (hasta 60°C). Una solución a esto consiste en utilizar un fotopolímero que se vende en Europa de una empresa llamada SPOT-A-MATERIAL, el código del polímero es SPOT-HT, tiene propiedades bastante cercanas al ABS Y PLA y tiene buenas características de curación ( tiempo de curado de 4 segundos con 2000 lúmenes para espesor de capa 0.1 mm).

En cuanto al diseño se logró obtener uno que fuera posible compatibilizar con los requerimientos Open Source que se necesitaban, cabe recordar que otro objetivo era democratizar la invención 3D con fotopolímeros y justamente para ello es necesario la creación de una máquina de bajo costo, fácil construcción y posible de recrear sin grandes conocimientos de mecánica ni electrónica, para esto fue creada BeamMaker impresora que es posible obtener los planos y software mediante internet y comprar los materiales (electrónicos y mecánicos) desde múltiples proveedores, permitiendo que cualquier persona pueda crear una de éstas

impresoras en su casa , el armado es tan simple que puede ser hecho a base a seguir la guía de armado , el tiempo de armado es de alrededor de 30 minutos y el software muy fácil de usar.

La comparación con impresoras FDM mostraron que existe una mejora no sólo en cuanto a la resolución en Z donde la tecnología de fotopolimerización es claramente mejor, sino que mostró que en X-Y, es capaz de lograr medidas más cercanas que de los objetos con una impresora FDM. Uno de los grandes problemas cuando se diseña en impresora FDM, es que debes conocer el error de la impresora y deformar tu objeto digital para así llegar a las medidas correctas en la figura real, obviamente nunca se logra llegar a la medida exacta, por lo que hay aplicaciones en donde realmente la tecnología FDM , no se puede utilizar.

Para la construcción se utilizó tecnología de fabricación digital, esta tecnología ha estado desarrollándose y creciendo durante los últimos años, ésta permite el diseño, personalización y creación de objetos funcionales en la comodidad del hogar, dejando atrás el periodo donde la industria tenía el control de la fabricación y las personas sólo pueden elegir del stock que las empresas ofrecen, por esto, a este desarrollo se le proclama como la revolución de las fabricación digital ( a modo de compararlo con la revolución industrial). En el futuro se espera que todas las personas tengan impresoras 3D de escritorio, donde podrán echar a volar su imaginación en la creación de objetos, también existirá un negocio de objetos virtuales, donde se podrá comprar el archivo en internet, para luego imprimirlo con tu impresora. El desarrollo de este tipo de máquinas, ha producido tal baja en el precio de las impresoras que ya podrían llegar a verse en los hogares, se puede comparar el fenómeno a lo ocurrido con el primer computador personal (que costaba en dinero actual unos 2500 dólares), actualmente los computadores se encuentran en casi todas las casas y se pueden comprar por precios de menos de 500 dólares, esto mismo se espera que suceda con las impresoras 3D, la creación de BeamMaker es un pequeño paso para que esto ocurra.

## 7 Bibliografía

- [1] G. Stemp-morlock, "Personal fabrication," *Technology*, vol. 53, no. 1, pp. 2–3, 2009.
- [2] C. Mota, "The rise of personal fabrication," in *Proceedings of the 8th ACM conference on Creativity and cognition*, 2011, p. 279.
- [3] S. H. Masood, "Intelligent rapid prototyping with fused deposition modelling," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 24–33, 1996.
- [4] B. Betts, "Bringing the factory home [personal fabrication technology]," *Engineering Technology*, vol. 5, no. 8, p. 56, 2010.
- [5] H. Lipson and M. Kurman, "Factory @ Home: The Emerging Economy of Personal Fabrication One of a Series of Occasional Papers in Science and Technology Policy Hod Lipson and Melba Kurman," *Science and Technology*, p. 103, 2010.
- [6] N. Hopkinson and P. Dickens, "Rapid prototyping for direct manufacture", *Rapid Prototyping Journal*, vol. 7, no. 4, pp. 197–202, 2001.
- [7] D. Holland, G. BENNETT, and G. O'DONNELL, "Open Design and the Reprap Project," in *27th International Manufacturing Conference*, 2010, pp. 97 – 106.
- [8] P. E. Ceruzzi, *A History of Modern Computing*, vol. 2nd, no. 3, MIT Press, 2003, p. 445.
- [9] J. Muskin, M. Ragusa, and T. Gelsthorpe, "Three-Dimensional Printing Using a Photoinitiated Polymer", *Journal of Chemical*, vol. 87, no. 5, pp. 4–6, 2010.
- [10] R. Knoppers and R. Hague, "CAD for Rapid Manufacturing," *Rapid Manufacturing*, pp. 39–54, 2006.

# Anexos

## Software

Fue separado en diferentes partes:

### Arduino\_Motor\_control

```
import serial
import time
from time import sleep
class ArduinoMotorControl():
    def __init__(self, arduino_port):
        try:
            self.ser = serial.Serial(arduino_port, 9600)
        except Exception:
            print "Arduino no conectado"
    def move_up(self):
        try:
            self.ser.write("200u")
            self.ser.write("192d")
        except Exception:
            print "Arduino no conectado: subiendo bandeja un step"
    def move_down(self):
        try:
            self.ser.write("-")
        except Exception:
            print "Arduino no conectado: bajando bandeja un step"
    def move_up_steps(self, steps):
        try:
            self.ser.write(str(steps)+"u")
        except Exception:
            print "Arduino no conectado: subiendo bandeja "+str(steps)+" steps"
    def move_down_steps(self, steps):
        try:
            self.ser.write(str(steps)+"d")
        except Exception:
            print "Arduino no conectado: bajando bandeja "+str(steps)+" steps"
    def close_valve(self):
        try:
            self.ser.write("c")
        except Exception:
            print "Arduino no conectado: cerrando bandeja"
    def open_valve(self):
        try:
            self.ser.write("o")
        except Exception:
            print "Arduino no conectado: abriendo bandeja"
    def open_close_valve(self, time_open):
        self.open_valve()
        time.sleep(time_open)
        self.close_valve()
```

## Animación

```
import os
from time import sleep
from PyQt4 import QtCore, QtGui
from PyQt4.Qt import QRect
from PyQt4.QtGui import QWidget, QPainter, QApplication
import PIL
from PIL import Image
from volumeAcumulator import accumulator

def is_image(filename):
    """ File is image if it has a common suffix and it is a regular file """

    if not os.path.isfile(filename):
        return False

    for suffix in ['.jpg', '.png', '.bmp']:
        if filename.lower().endswith(suffix):
            return True

    return False

def load_file_list(folder):
    """ Find all images """
    if folder[-1]!=" /":
        folder = folder + "/"
    files = []
    images = []
    index = 0
    for filename in os.listdir(folder):
        files.append(folder+filename)
        #print filename
    return files

#Volumen de activacion de la valvula
ACTIVATION_VOLUME = 40
#Velocidad en mililitros por segundos
SPEED = 1
#Calcula la cantidad de segundos que se debe abrir la valvula dado un volumen
def getTimeFromVolume(volume):
    time = volume/SPEED
    return time

class Display_images(QWidget):#QWidget:

    __pyqtSignals__ = ("timeChanged(QTime)", "timeZoneChanged(int)")

    def __init__(self, folder = './animacion/', parent = None, seconds = 1, height = 1, arduino = None):

        #QtGui.QWidget.__init__(self, parent)
        #QtGui.QDialog.__init__(self, parent)
        QWidget.__init__(self)
        pDesktop = QApplication.desktop ()

        self.folder = folder
        self.time_to_change = int(seconds*1000)
        self.black_time = 5000
        self.delay_time = 10 #seconds

        self.arduino = arduino
        print "t = ",self.time_to_change, " tb = ", self.black_time
        self.timeZoneOffset = 0
```

```

self.i = 0
self.num_imagen = 0
self.para_blanco = 1
self.time = QtCore.QTime.currentTime()

timer = QtCore.QTimer(self)
self.connect(timer, QtCore.SIGNAL("timeout()"), self, QtCore.SLOT("update()"))
self.connect(timer, QtCore.SIGNAL("timeout()"), self.updateTime)
timer.start(1)

self.imagenes = load_file_list(self.folder)

self.label = QtGui.QLabel(self)
self.label.setStyleSheet("QLabel { background-color : black;}");
self.label.setScaledContents(True)

self.screen = None
self.black_screen = QtGui.QPixmap()

self.setWindowTitle(QtCore.QObject.tr(self, "DLI3D"))
self.resize(800, 600)

grid = QtGui.QGridLayout()
grid.setContentsMargins(0,0,0,0)
grid.addWidget(self.label, 1,0)

self.setLayout(grid)

RectScreen0 = pDesktop.screenGeometry (1);
# Se conecta a proyectores -> importa la relacion de sus resoluciones.
self.setGeometry(QRect(RectScreen0.left(), RectScreen0.top(), RectScreen0.width(), RectScreen0.height())) # x, y, w, h

#Se crea un acumulador de volumen
self.acumulador = acumulador(height)

self.show()

def paintEvent(self, event):

time = QtCore.QTime.currentTime()
ahora = time.hour()*60*60*1000+time.minute()*60*1000+time.second()*1000+time.msec()

anterior = self.time.hour()*60*60*1000+self.time.minute()*60*1000+self.time.second()*1000+self.time.msec()

#time = time.addSecs(self.timeZoneOffset * 3600)
#time = time.addMsecs(self.timeZoneOffset * 3600000)
#now = time.second()

#print "ahora = ", ahora, "anterior = ", anterior

if self.para_blanco%2 == 1:
    #print "para blanco: ", self.para_blanco
    if (anterior + self.black_time < ahora ) and (self.num_imagen < len(self.imagenes)):
        #print 'se cambia imagen'
        #print "cambia: ", self.imagenes[self.num_imagen]
        self.screen = QtGui.QPixmap(self.imagenes[self.num_imagen])
        self.label.setPixmap(self.screen)
        sleep(self.delay_time)
        self.para_blanco += 1
        self.num_imagen += 1
        self.time = time
    else:
        #print "para blanco: ", self.para_blanco
        if (anterior + self.time_to_change + self.delay_time*1000 < ahora ):
            #print "borrar"

```

```

self.screen = self.black_screen
self.label.setPixmap(self.screen)
self.arduino.move_up()
self.para_blanco += 1
self.time = time

#Control de la valvula con Arduino
self.acumulator.acumulate(self.imagenes[self.num_imagen-1])

if self.acumulator.getVolume() >= ACTIVATION_VOLUME:
    #openTime = getTimeFromVolume(self.acumulator.getVolume())
    #self.acumulator.reset()
    self.arduino.open_close_valve(0.5)

if self.num_imagen >= len(self.imagenes):
    self.label.clear()

def minimumSizeHint(self):

    return QtCore.QSize(50, 50)

def sizeHint(self):

    return QtCore.QSize(100, 100)

def updateTime(self):

    self.emit(QtCore.SIGNAL("timeChanged(QTime)"), QtCore.QTime.currentTime())

# The timeZone property is implemented using the getTimeZone() getter
# method, the setTimeZone() setter method, and the resetTimeZone() method.

# The getter just returns the internal time zone value.
def getTimeZone(self):

    return self.timeZoneOffset

# The setTimeZone() method is also defined to be a slot. The @pyqtSignature
# decorator is used to tell PyQt which argument type the method expects,
# and is especially useful when you want to define slots with the same
# name that accept different argument types.

@QtCore.pyqtSignature("setTimeZone(int)")
def setTimeZone(self, value):

    self.timeZoneOffset = value
    self.emit(QtCore.SIGNAL("timeZoneChanged(int)"), value)
    self.update()

# Qt's property system supports properties that can be reset to their
# original values. This method enables the timeZone property to be reset.
def resetTimeZone(self):

    self.timeZoneOffset = 0
    self.emit(QtCore.SIGNAL("timeZoneChanged(int)"), 0)
    self.update()

# Qt-style properties are defined differently to Python's properties.
# To declare a property, we call pyqtProperty() to specify the type and,
# in this case, getter, setter and resetter methods.
timeZone = QtCore.pyqtProperty("int", getTimeZone, setTimeZone, resetTimeZone)

if __name__ == "__main__":

```

```

import sys

app = QtGui.QApplication(sys.argv)
clock = Display_images()

sys.exit(app.exec_())

```

## Get\_volume

```

from PIL import Image

def countWhitePixels(image):
    img_I = Image.open(str(image)).getdata()
    whitePixels = 0
    for pixel in list(img_I):
        if pixel == (255,255,255):
            whitePixels += 1
    return whitePixels

```

## Slices #Corta los objetos en rebanadas

```

import os
import subprocess

def createSlices(height,output,path,step,layer_thickness):

    dir=output[:(-len(output)+output.find('.'))]
    os.chdir(os.path.join('.', 'bin', 'slicer'))
    print os.getcwd()
    cmd ="slice "+path+" -z0,"+str(height)+","+str(step)+" -l "+str(layer_thickness)+" --width=800 --height=600 --background=black --core=white -o
"+output
    print cmd
    os.system(cmd)

```

## Volume accumulator

```

from getVolumeFromPixels import countWhitePixels
import math

PIXELS_IN_A_MILIMETER = 8

class acumulator:
    def __init__(self, height):
        self.totalVolume = 0
        self.height = float(height)

    def getVolume(self):
        return self.totalVolume
    def reset(self):
        self.totalVolume = 0
    def acumulate(self, imagePath):
        pixels = countWhitePixels(imagePath)
        #print pixels
        area = pixels*math.pow((1.0/PIXELS_IN_A_MILIMETER),2.0)
        #print area
        #print self.height
        volume = area*self.height
        self.totalVolume += volume
        #print self.totalVolume

```

## Control Arduino #programa que va al interior del Arduino

```

#include <AccelStepper.h>
#include <AFMotor.h>
#include <Servo.h>

AF_Stepper motor1(200, 2);
Servo myservo;
int pos = 0;
int SPEED = 50;
int STEP = 5;
int MAXPOS = 90;
String inString = "";
String steps = "";

// you can change these to DOUBLE or INTERLEAVE or MICROSTEP!
void forwardstep() {
  motor1.onestep(FORWARD, SINGLE);
}
void backwardstep() {
  motor1.onestep(BACKWARD, SINGLE);
}

// use functions to step
AccelStepper stepper(forwardstep, backwardstep);

void setup()
{
  // set up Serial library at 9600 bps
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Stepper program!");
  stepper.setMaxSpeed(200.0);
  stepper.setAcceleration(100.0);
  myservo.attach(9);
  myservo.write(pos);
}

void loop()
{
}

void open_valve(){
for(pos = 0; pos < MAXPOS; pos += 1) // goes from 0 degrees to 180 degrees
{
  // in steps of 1 degree
  myservo.write(pos); // tell servo to go to position in variable 'pos'
  delay(1); // waits 15ms for the servo to reach the position
}
}

void close_valve(){
for(pos = MAXPOS; pos >=1; pos -=1) // goes from 180 degrees to 0 degrees
{
  myservo.write(pos); // tell servo to go to position in variable 'pos'
  delay(1); // waits 15ms for the servo to reach the position
}
}

void serialEvent() {
  while (Serial.available()) {
    int inChar = Serial.read();
    Serial.print("Echo:");
    Serial.write(inChar);
    Serial.println();
    if (isDigit(inChar)) {
      steps += (char)inChar;
    }
    if (inChar == 'u') {
      Serial.print("Up:" + steps);
      Serial.println();
    }
  }
}

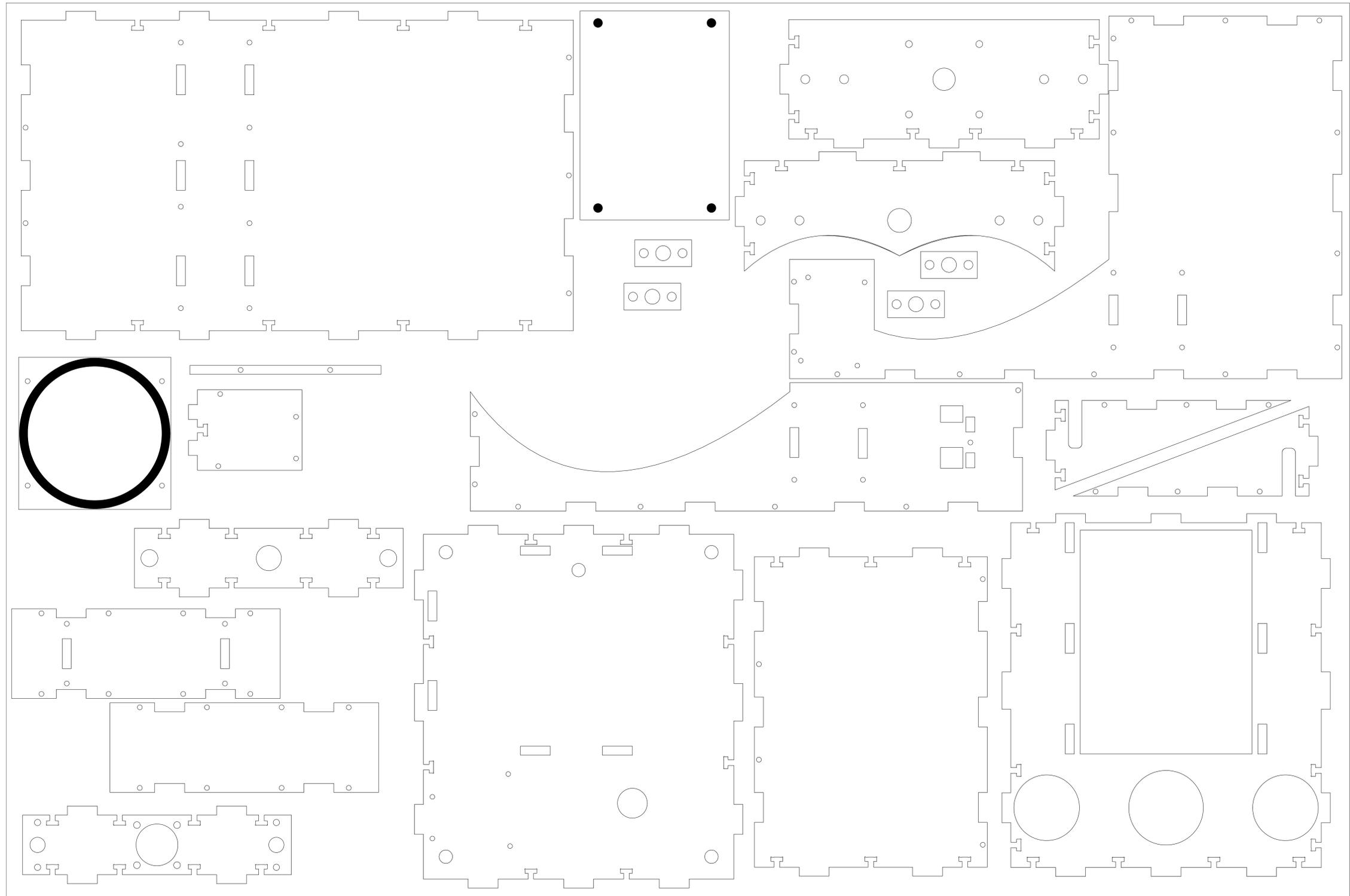
```

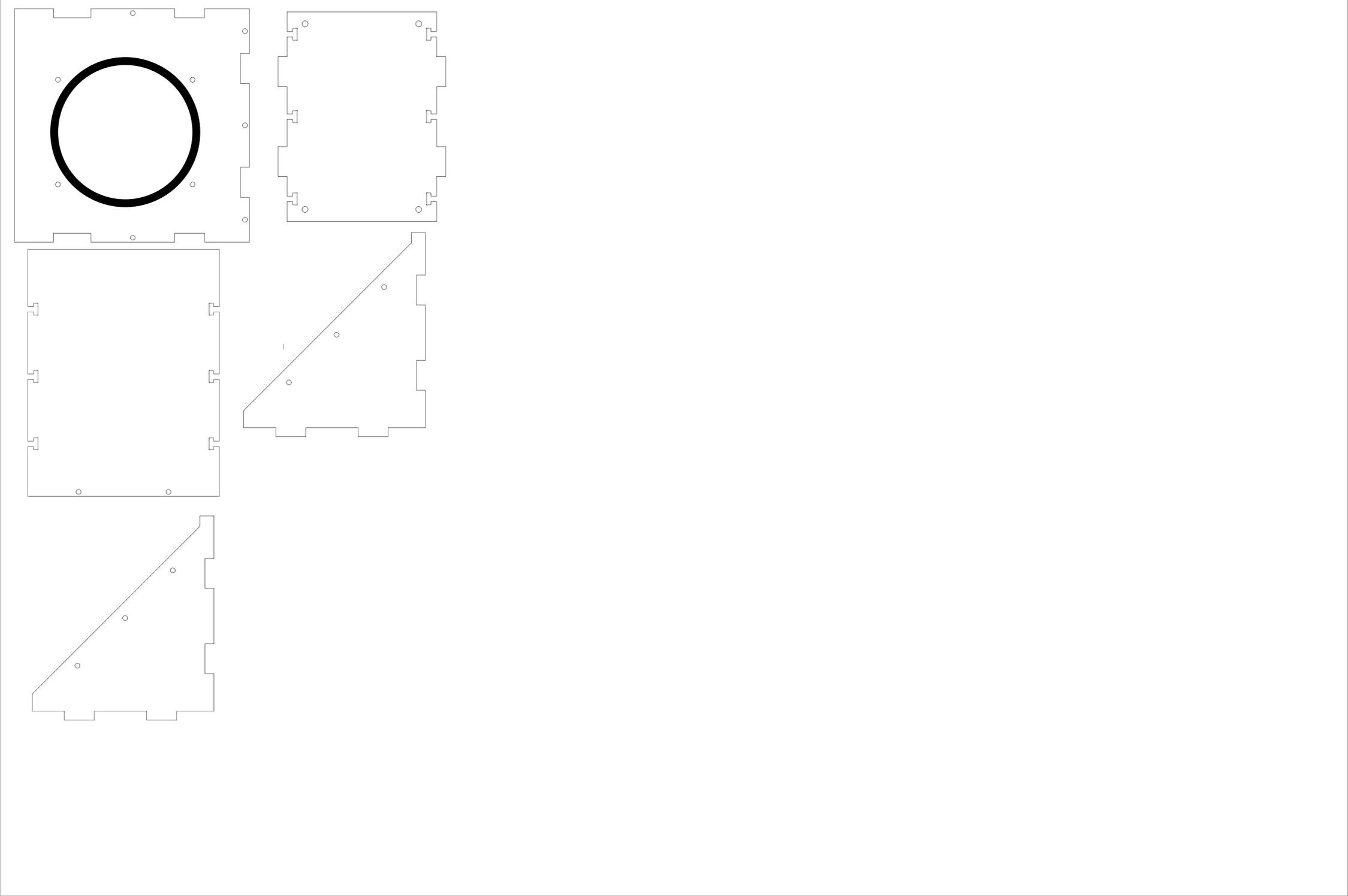
```

    long POSITION = stepper.currentPosition()+steps.toInt();
    stepper.runToNewPosition(POSITION);
    steps= "";
}
if (inChar == 'd') {
    Serial.print("Down:"+steps);
    Serial.println();
    long POSITION = stepper.currentPosition()-steps.toInt();
    stepper.runToNewPosition(POSITION);
    steps= "";
}
if (inChar == '.') {
    long POSITION = stepper.currentPosition()+STEP;
    stepper.runToNewPosition(POSITION);
}
if (inChar == '-') {
    long POSITION = stepper.currentPosition()-STEP;
    stepper.runToNewPosition(POSITION);
}
if (inChar == 'o') {
    if(!pos){
        open_valve();
    }
}
if (inChar == 'c') {
    if(pos){
        close_valve();
    }
}
}
}
}

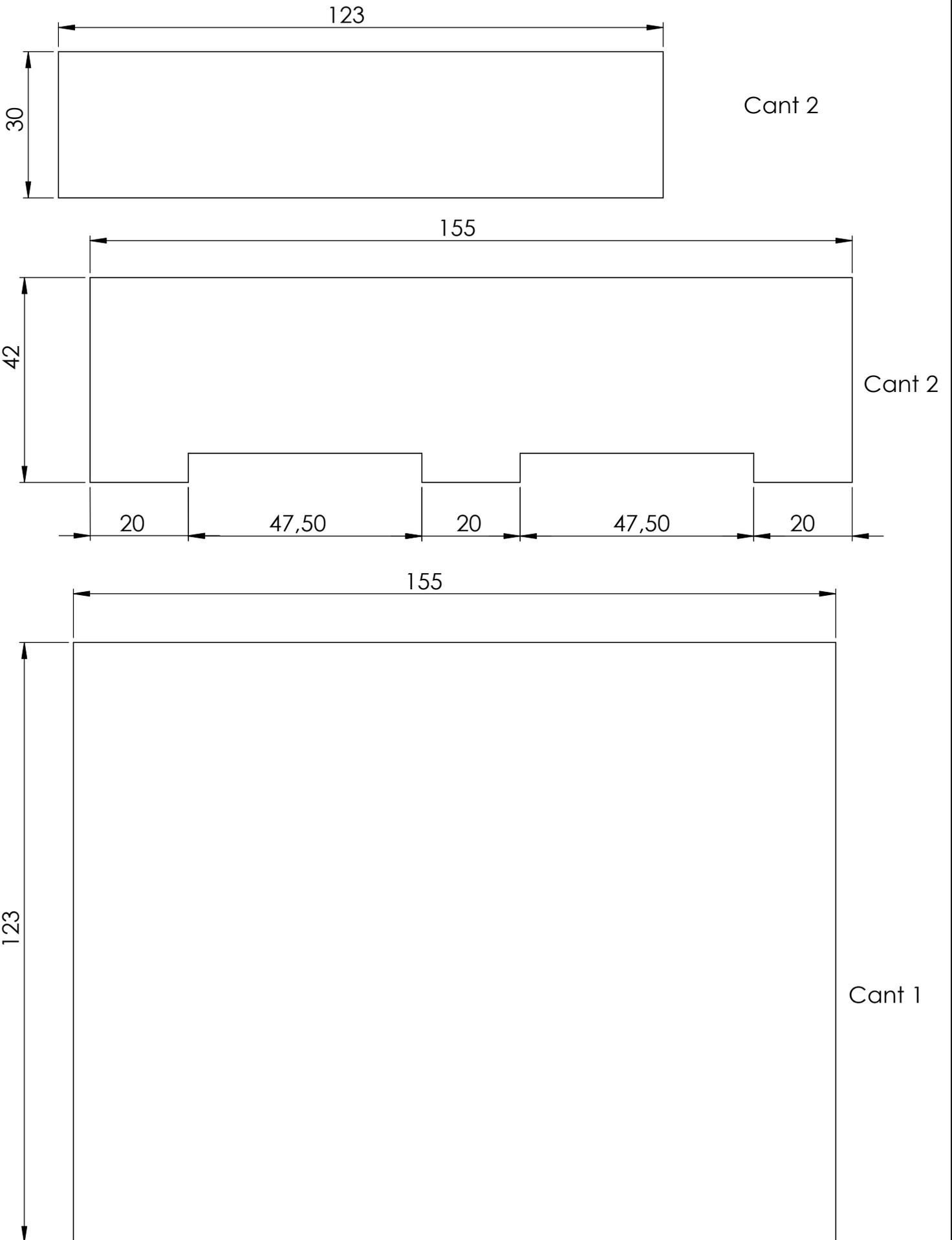
```

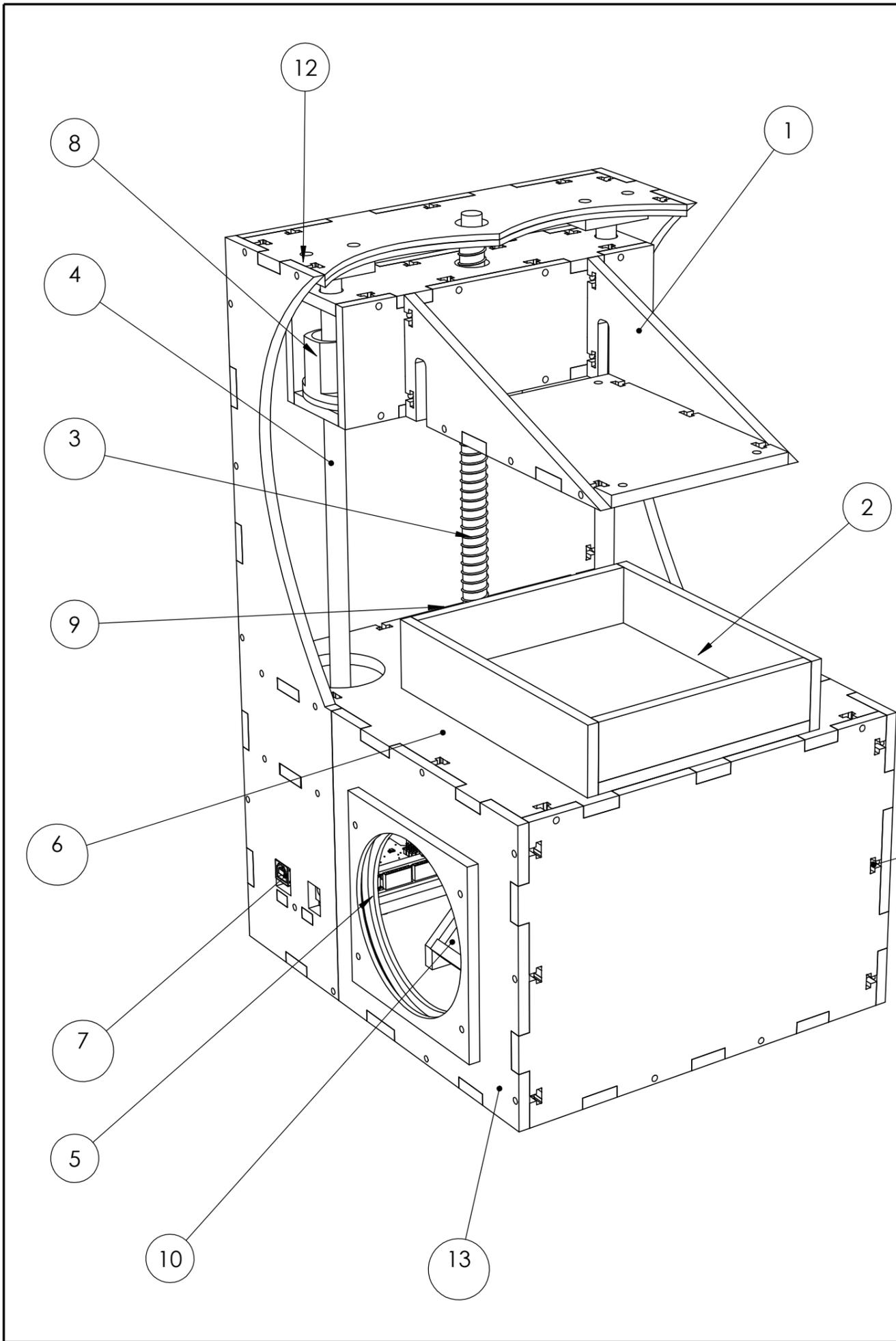






Planos Piscina , espesor 6 mm.  
escala 1:1





Nº Elemento	Nº de pieza	Descripción	Cantidad
1	Piezas acrílicas Varias	desde 2 planchas de 900x600, espesor 6 mm	27
2	Piscina	Medidas desde archivo	1
3	Tornillo de bolas recirculantes	5mm de paso	1
4	Ejes	Acero plata 10 mm	2
5	Lupa	5x ;ø90 mm	1
6	Motor paso a paso	0,24N/m, 200 steps, 1,8º, hasta 1 Amp.	1
7	Arduino	UNO	1
8	Buje soporta rodamiento	Imprimir desde impresora 3D	2
9	Acople motor- tornillo	3/8 x 1/4	1
10	Espejo FSM		1
11	Pernos	6-32	68
12	Insertos	6-32 cant 8 y 1/4- 20 cant 3	11
13	Perno botón	Para pies 1/4	3

NOMBRE				FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ.				Ariel Calderón		24/09/2012		<h1>BeamMaker</h1>			
VERIF.											
APROB.											
FABR.											
CALID.											
						MATERIAL:		<h1>Varios</h1>			
						PESO: 4 kg					
								N.º DE DIBUJO		<h1>1</h1>	
								ESCALA:1:5		<h1>A3</h1>	
								HOJA 1 DE 1			