

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**



**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA**

**“IMPRESORA 3D POR ESTEREOLITOGRAFÍA”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERÍA EN  
MECATRÓNICA.**

**PEDRO ANDRES HEREDIA LÓPEZ**

**DIRECTOR: Ing. COSME DAMIAN MEJÍA ECHEVERRÍA**

**Ibarra, Agosto 2018**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**  
**AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN**  
**A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA**

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad. Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

<b>DATOS DE CONTACTO</b>			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	1004026744		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Pedro Andrés Heredia López		
<b>DIRECCIÓN:</b>	Tanguarín San Antonio de Ibarra		
<b>EMAIL:</b>	paheredial@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	062-933252	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0982976994

<b>DATOS DE LA OBRA</b>	
<b>TÍTULO:</b>	<b>IMPRESORA 3D POR ESTEREOLITOGRAFÍA</b>
<b>AUTOR:</b>	Pedro Andrés Heredia López
<b>FECHA:</b>	01/08/2018
<b>PROGRAMA:</b>	PREGRADO
<b>TÍTULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero en Mecatrónica
<b>DIRECTOR:</b>	Ing. Cosme Mejía

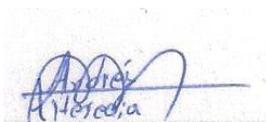
## AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Pedro Andrés Heredia López con cédula de identidad Nro. 1004026744, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

### CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrollo sin violar derechos de autores de terceros, por lo tanto la obra es original, y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, al primer día del mes de agosto de 2018



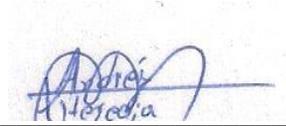
Firma

Nombre: Pedro Andrés Heredia López

Cédula: 1004026744

## DECLARACIÓN

Yo, **Pedro Andrés Heredia López**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí escrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Pedro Andrés Heredia López', is written over a horizontal line.

Nombre: Pedro Andrés Heredia López

Cédula: 1004026744

## CERTIFICACIÓN

En calidad de tutor del trabajo de grado titulado: “IMPRESORA 3D POR ESTEREOLITOGRAFÍA”, certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el señor Pedro Andrés Heredia López, bajo mi supervisión.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Cosme Mejía', is written over a diagonal line. The signature is stylized and somewhat illegible.

Ing. Cosme Mejía

DIRECTOR DEL PROYECTO

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por darme la fuerza y ser la guía para culminar mis estudios y este trabajo.

A mi madre Mariana López por apoyarme cada día con sus consejos, sus palabras de aliento y su constancia en mi formación durante toda mi vida.

A Liseth Pasaguay por brindarme su apoyo incondicional en los buenos y malos momentos compartiendo su tiempo, su amor y sus conocimientos.

Al Ingeniero Cosme Mejía, director de Tesis por su paciencia y su confianza en mis capacidades y así poder culminar este trabajo de la mejor forma.

Pedro Heredia.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mi familia por haberme apoyado incondicionalmente ya que por ellos hoy culmino con éxito este trabajo.

A mi madre Mariana López quien me ha formado para conseguir todo lo que he logrado y por ser el pilar fundamental en mi vida

Pedro Heredia.

## RESUMEN

Una impresión 3D es una alternativa actual de fabricación de objetos físicos, la cual permite construir un sin número de productos en base a un diseño digital.

La finalidad de este proyecto es diseñar y construir una impresora 3D por estereolitografía para la creación de objetos tridimensionales con mayor calidad, en comparación con los objetos impresos con la técnica de deposición de material fundido, y con mayor dureza que los objetos impresos con la tecnología de polvo cerámico.

La impresora 3D permite la impresión de objetos utilizando un proyector DLP el cual mediante la proyección de una imagen monocromática envía rayos UV para solidificar la fotoresina de una manera programada, y con la ayuda de un motor paso se solidifica capa por capa hasta obtener el objeto tridimensional final.

El software que se implementa para el proceso de la impresión 3D, generación del código y separación de la imagen por capas es open Source o código abierto, en este caso el programa utilizado es Nano DLP

El área de impresión es de 200x200 mm con una altura máxima de 400 mm lo que permite imprimir objetos relativamente grandes con respecto a otras impresoras 3D

## ABSTRACT

A 3D printing is a current alternative of manufacturing physical objects, which allows building a number of products based on a digital design.

The purpose of this project is to design and build a 3D printer by stereolithography for the creation of three-dimensional objects with higher quality, compared to objects printed with the technique of deposition of molten material, and with greater hardness than objects printed with technology of ceramic powder.

The 3D printer allows the printing of objects using a DLP projector which by means of the projection of a monochromatic image sends UV rays to solidify the photoresin in a programmed way, and with the help of a step motor solidifies layer by layer until obtaining the object final three-dimensional.

The software that is implemented for the process of 3D printing, code generation and separation of the image by layers is open source or open source, in this case the program used is Nano DLP.

The printing area is 200x200 mm with a maximum height of 400 mm which allows printing relatively large objects with respect to other 3D printers.

## ÍNDICE GENERAL

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA.....	II
AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD .....	III
CONSTANCIAS .....	III
DECLARACIÓN .....	IV
CERTIFICACIÓN.....	V
AGRADECIMIENTO .....	VI
DEDICATORIA .....	VII
RESUMEN .....	VIII
ABSTRACT.....	IX
ÍNDICE GENERAL .....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVI
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	1
EL PROBLEMA.....	1
OBJETIVO GENERAL.....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
ANTECEDENTES.....	2
JUSTIFICACIÓN .....	4

ALCANCE.....	5
Capítulo 1 .....	7
1. Marco Teórico .....	7
1.1. Impresión tridimensional 3D.....	7
1.2. Tecnologías de impresión.....	7
1.2.1. Impresión por deposición de material fundido.....	7
1.2.2. Impresión por inyección de aglutinante. ....	8
1.2.3. Impresión por estereolitografía .....	9
1.3. Tipos de impresoras 3D por estereolitografía.....	9
1.3.1. Impresión 3D SLA .....	10
1.3.2. Impresión 3D DLP .....	10
1.4. Tecnología DLP .....	11
1.5. Proyector DLP® .....	12
1.5.1. Características del proyector DLP .....	12
1.6. La Fioresina .....	14
1.6.1. Componentes de la fotoresina.....	14
1.6.2. Ejemplos de fotoresina.....	15
1.7. Cuba de la impresora 3D.....	17
1.8. Sistema mecánico.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
1.8.1. Motor a pasos o Stepper motor .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Capítulo 2 .....	19
2. Metodología .....	19
2.1. Requisitos de diseño .....	19
2.2. Diseño por análisis funcional.....	19

2.2.1.	Módulo 1 .....	20
2.2.2.	Módulo 2 .....	28
2.2.3.	Módulo 3 .....	33
2.2.4.	Módulo 4 .....	40
2.2.5.	Módulo 5 .....	44
2.3.	Diseño del mecanismo .....	45
2.3.1.	Deslizador Lineal .....	45
2.3.2.	Diseño de la plataforma de construcción .....	51
2.4.	Análisis de elementos finitos .....	51
2.4.1.	Asignación de materiales .....	52
2.4.2.	Esfuerzo Máximo .....	54
2.4.3.	Desplazamientos .....	54
2.4.4.	Factor de seguridad .....	55
2.5.	Diseño de la cuba de la impresora .....	56
2.6.	Sistema de Control .....	59
2.6.1.	Software NANODLP .....	59
2.6.2.	Firmware MARLIN .....	60
2.6.3.	Construcción del prototipo .....	61
2.6.4.	Análisis de costos .....	62
2.7.	Diseño de la cuba de la impresora .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
Capítulo 3	.....	65
3.	Pruebas de funcionamiento .....	65
Capítulo 4	.....	69
4.	Conclusiones y recomendaciones .....	69
4.1.	Conclusiones .....	69
4.2.	Recomendaciones .....	70

Bibliografía ..... 71

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LA SILICONA. . (CARBON, INC. CA, S.F.).....	15
TABLA 1.2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL POLIURETANO RÍGIDO (CARBON, INC. CA, S.F.).....	16
TABLA 1.3. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL ÉSTER DE CIANATO. (CARBON, INC. CA, S.F.) .....	17
TABLA 2.1. ALTERNATIVAS DEL MÓDULO 1.....	24
TABLA 2.2. EVALUACIÓN DE CRITERIOS, MÓDULO 1 .....	25
TABLA 2.3. EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CON RESPECTO A GENERACIÓN DE CÓDIGO G, MÓDULO 1. ....	25
TABLA 2.4. EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CON RESPECTO A GENERACIÓN DE IMÁGENES, MÓDULO 1. ....	26
TABLA 2.5. EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CON RESPECTO A INDEPENDIENTE, MÓDULO 1. ....	26
TABLA 2.6. EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CON RESPECTO A MODIFICACIÓN DEL MODELO, MÓDULO 1. ....	26
TABLA 2.7. EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CON RESPECTO A CONFIGURACIÓN DE RESINAS, MÓDULO 1. ....	27
TABLA 2.8. EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CON RESPECTO A COSTO, MÓDULO 1.....	27
TABLA 2.9. CONCLUSIONES, MÓDULO 1. ....	27
TABLA 2.10. ALTERNATIVAS, MODULO 2. ....	30
TABLA 2.11. EVALUACIÓN DE CRITERIOS, MODULO 2. ....	31
TABLA 2.12. EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CON RESPECTO A COSTO, MÓDULO 2.....	31
TABLA 2.13. EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CON RESPECTO A FACILIDAD DE ADQUISICIÓN, MÓDULO 2. ....	31
TABLA 2.14. EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CON RESPECTO A CONTROL DE VELOCIDAD, MÓDULO 2. ....	32
TABLA 2.15. EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CON RESPECTO A MODULAR, MÓDULO 2.....	32
TABLA 2.16. CONCLUSIONES, MÓDULO 2. ....	32
TABLA 2.17. ALTERNATIVAS MÓDULO 3.....	37
TABLA 2.18. EVALUACIÓN DE CRITERIOS, MÓDULO 3. ....	38
TABLA 2.19. EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CON RESPECTO A COMPLEJIDAD, MÓDULO 3 .....	38
TABLA 2.20. EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CON RESPECTO A COSTO, MÓDULO 3.....	39
TABLA 2.21. EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CON RESPECTO A CALIDAD DE IMPRESIÓN, MÓDULO 3.....	39
TABLA 2.22. EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CON RESPECTO A USO DE RESINA, MÓDULO 3.....	39
TABLA 2.23. EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CON RESPECTO A VELOCIDAD DE IMPRESIÓN, MÓDULO 3 .....	39
TABLA 2.24. CONCLUSIONES, MÓDULO 4. ....	40
TABLA 2.25.EVALUACIÓN DE CRITERIOS, MÓDULO 4. ....	43
TABLA 2.26. EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CON RESPECTO A PRECISIÓN, MÓDULO 4. ....	43
TABLA 2.27. EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CON RESPECTO A EFICIENCIA, MÓDULO 4.....	43
TABLA 2.28. EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CON RESPECTO A COSTO, MÓDULO 4.....	44
TABLA 2.29. EVALUACIÓN DE SOLUCIONES CON RESPECTO A VELOCIDAD, MÓDULO 4. ....	44
TABLA 2.30. CONCLUSIONES MÓDULO 4. ....	44

TABLA 2.31. TABLA DE CONVERGENCIA DE LA SIMULACIÓN DE ELEMENTOS FINITOS. ....	53
TABLA 2.32. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ALUMINIO 6063 T6.....	<b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>
TABLA 2.33. COMPARACIÓN DE MATERIALES PARA LA BASE DE LA CUBA. ....	56
TABLA 2.34. LAMINA DE FEP. ....	57
TABLA 2.35. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE MANUFACTURA. ....	61
TABLA 2.36. COSTOS DE MATERIA PRIMA. ....	62
TABLA 2.37. COSTOS DE INSUMOS.....	62
TABLA 2.38. COSTOS DE PARTES MECÁNICAS.....	62
TABLA 2.39. COSTOS DE PARTES ELECTRÓNICAS. ....	63
TABLA 2.40. COSTOS DE MANO DE OBRA. ....	63
TABLA 2.41. COSTO TOTAL .....	63
TABLA 3.1. DIMENSIONES DEL ESPÉCIMEN PARA EL ESPESOR DE LAS PROBETAS.....	65
TABLA 3.2. RESULTADOS DE LA IMPRESIÓN RESPECTO AL ESPESOR. ....	67
TABLA 3.3. RESULTADOS DE LA IMPRESIÓN RESPECTO AL LARGO. ....	67
TABLA 3.4. RESULTADOS DE LA IMPRESIÓN RESPECTO AL ANCHO. ....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA. 0.1 ANDAMIO DE HIDROGEL ESTRUCTURADO TRIDIMENSIONALMENTE CON ESTRUCTURA DE MADERA USANDO NANOPARTÍCULAS. (PAWAR, Y OTROS, 2016)	3
FIGURA. 0.2. MODELO DE LA IMPRESORA 3D DLP (DERRÉ, 2014)	3
FIGURA. 0.3. IMPRESORA 3D ESTEREOLITOGRAFÍA. (VANEKER, 2015)	4
FIGURA. 1.1. PIEZAS IMPRESAS CON MATERIAL PLA Y ABS. (FERRER, 2014)	7
FIGURA. 1.2. IMPRESORA 3D CON TECNOLOGÍA DE DEPOSICIÓN DE MATERIAL FUNDIDO. (PENALVA, 2014)	8
FIGURA. 1.3. IMPRESIÓN POR INYECCIÓN DE AGLUTINANTE. (C, 2016)	8
FIGURA. 1.4. IMPRESORA 3D PARA PIEZAS DE POLVO CERÁMICO. (IMPRIMALIA, 2016)	9
FIGURA. 1.5. PROCESO DE IMPRESIÓN 3D SLA. (FORMLABS, 2018)	10
FIGURA. 1.6. PROCESO DE IMPRESIÓN 3D DLP. (FORMLABS, 2018)	11
FIGURA. 1.7. TECNOLOGÍA DLP DE TEXAS INSTRUMENTS. (TEXAS INSTRUMENTS, 2017)	12
FIGURA. 1.8. EJEMPLO DEL BRILLO DE LAS IMÁGENES. (TEXAS INSTRUMENTS, 2016)	13
FIGURA. 1.9. EJEMPLO DE IDENTIFICACIÓN DEL CONTRASTE. (THE PROJECTOREXPERT, 2017)	14
FIGURA. 1.10. PRODUCTOS DE SILICONA. (CARBON, INC. CA, S.F.)	15
FIGURA. 1.11. PRODUCTOS DE POLIURETANO RÍGIDO. (CARBON, INC. CA, S.F.)	16
FIGURA. 1.12. PRODUCTOS DE ÉSTER DE CIANATO. (CARBON, INC. CA, S.F.)	17
FIGURA. 2.1. MÓDULO 1.	20
FIGURA. 2.2. INTERFAZ DE USUARIO CREATION WORKSHOP 3D. (HERNÁNDEZ, 2013)	21
FIGURA. 2.3. INTERFAZ DE USUARIO MONKEYPRINT. (BOMKE, 2015)	21
FIGURA. 2.4. INTERFAZ DE USUARIO NANODLP. (NANODLP, 2017)	22
FIGURA. 2.5. INTERFAZ DE USUARIO MATT KEETER DLP SLICER.	23
FIGURA. 2.6. MÓDULO 2.	28
FIGURA. 2.7. TEENSYLU.	28
FIGURA. 2.8. RAMP 1.4.	29
FIGURA. 2.9. 3D MKS BASE V 1.5.	29
FIGURA. 2.10. MÓDULO 3.	33
FIGURA. 2.11. IMPRESIÓN DLP DE ARRIBA HACIA ABAJO.	33
FIGURA. 2.12. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MÉTODO CLIP. (WWW.3DERS.ORG, 2015)	34
FIGURA. 2.13. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MÉTODO DE SEPARACIÓN POR LÁMINA FLEXIBLE. (A) INICIO DE LA SEPARACIÓN, (B) TRANSCURSO DE LA SEPARACIÓN. (UNITED STATES PATENTE Nº US 7,195,472 B2 , 2007)	35

FIGURA. 2.14. MOVIMIENTO HORIZONTAL PARA ELIMINAR LA FUERZA DE VACÍO, (A) VISTA LATERAL ESQUEMÁTICA DE LA POSICIÓN INICIAL DEL DESLIZADOR, (B) VISTA LATERAL ESQUEMÁTICA DEL DESPLAZAMIENTO DEL DESLIZADOR. (UNITED STATES PATENTE Nº US 2013/0292862 A1, 2013)	36
FIGURA. 2.15. MÓDULO 4.	40
FIGURA. 2.16. TORNILLO DE POTENCIA. (GONZALES, 2011)	40
FIGURA. 2.17. HUSILLO DE BOLAS. (SPECIALTY MOTIONS, 2015)	41
FIGURA. 2.18. VARILLA ROSCADA. (FRAX 3D, 2018)	42
FIGURA. 2.19. MÓDULO 5.	44
FIGURA. 2.20. DESLIZADOR LINEAL.	45
FIGURA. 2.21. TRASLACIÓN VERTICAL CON CARGA VERTICAL.	46
FIGURA. 2.22. CÁLCULO DEL PESO DE LA PLATAFORMA DE CONSTRUCCIÓN UTILIZANDO EL SOFTWARE COMERCIAL. SOLIDWORKS®.	47
FIGURA. 2.23. DIMENSIONES PARA EL CÁLCULO DEL MOMENTO TORSOR.	48
FIGURA. 2.24. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE DE FUERZAS Y MOMENTOS PARA LOS EJES DEL DESLIZADOR LINEAL EJE Z.	49
FIGURA. 2.25. APLICACIÓN DE LA FUERZA Y RESTRICCIONES DE LA PLATAFORMA DE CONSTRUCCIÓN.	51
FIGURA. 2.26. APLICACIÓN DE LAS RESTRICCIONES DEL MECANISMO.	52
FIGURA. 2.27. APLICACIÓN DE LA FUERZA DE 29.4 N.	52
FIGURA. 2.28. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS EN LA PLATAFORMA DE CONSTRUCCIÓN.	54
FIGURA. 2.29. DESPLAZAMIENTOS EN LA PLATAFORMA DE CONSTRUCCIÓN.	55
FIGURA. 2.30. FACTOR DE SEGURIDAD MÍNIMO DE LA PLATAFORMA DE CONSTRUCCIÓN.	55
FIGURA. 2.31. CUBA DE LA IMPRESORA.	57
FIGURA. 2.32. PARTES DE LA CUBA DE LA IMPRESORA.	58
FIGURA. 2.33. ESPACIO ENTRE LA CUBA Y LA PLATAFORMA DE CONSTRUCCIÓN. <b>¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.</b>	
FIGURA. 2.34. DIAGRAMA DE BLOQUES DE CONTROL DE LA IMPRESIÓN 3D POR ESTEREOLITOGRAFÍA.	60
FIGURA. 2.35. CONEXIÓN RAMP 1.4.	60
FIGURA. 2.36. PIEZAS CORTADAS POR CHORRO DE AGUA.	61
FIGURA. 3.1. PROBETA CON LAS NORMAS ASTM D 638 - 02A.	65
FIGURA. 3.3. MODELO 3D DE LA PROBETA EN SOLIDWORKS.	66
FIGURA. 3.4. PROBETAS CON SOPORTES.	66
FIGURA. 3.5. PROBETAS IMPRESAS.	67
FIGURA. 3.6. CALIDAD DE LA IMPRESIÓN DE LA PROBETA.	68



## ÍNDICE DE ECUACIONES

ECUACIÓN 2.1. FUERZA 1 DE REACCIÓN. (THOMSON INDUSTRIES, INC, 2017).....	46
ECUACIÓN 2.2. FUERZA 1S DE REACCIÓN. (THOMSON INDUSTRIES, INC, 2017) .....	46
ECUACIÓN 2.3. COMPARACIÓN DE REACCIONES. (THOMSON INDUSTRIES, INC, 2017) .....	46
ECUACIÓN 2.4. FUERZA DE REACCIÓN DEL DESLIZADOR LINEAL. ....	48
ECUACIÓN 2.5. ESFUERZO NORMAL MÁXIMO. (MOTT, 2008).....	49
ECUACIÓN 2.6.ESFUERZO MÁXIMO DEL ACERO DF2. ....	50
ECUACIÓN 2.7. MÓDULO DE RESISTENCIA. (MOTT, 2008).....	50
ECUACIÓN 2.8. VALOR DEL MÓDULO DE RESISTENCIA. ....	50
ECUACIÓN 2.9. DIÁMETRO DEL EJE. ....	50



# INTRODUCCIÓN

## EL PROBLEMA

En la actualidad en el laboratorio de simulación y centro de mecanizado CNC de la Universidad Técnica del Norte existen dos tipos de impresoras 3D, la impresora 3D de polvo cerámico y la impresora 3D con tecnología FDM o por deposición de plástico fundido, el material que usa es PLA o ABS. Dependiendo de la tecnología que utilizan para la impresión ofrecen objetos físicos para diferentes aplicaciones.

Se ha utilizado estas impresoras para realizar un prototipo impreso de prótesis de rodilla en polvo cerámico y un prototipo impreso utilizando tecnología FDM para un rehabilitador de dedos, además diferentes objetos para otras aplicaciones los mismos que permitieron analizar posibles modificaciones a los modelos antes de manufacturar el modelo final. Estas impresiones también permitieron apreciar la calidad de la impresión, la impresora por deposición de plástico no tiene una alta resolución en el acabado superficial de algunas piezas según los resultados que se obtuvieron luego de imprimir con esta tecnología y la impresora de polvo cerámico en cambio crea objetos con mayor resolución en el acabado pero son muy frágiles, por lo que se ve la necesidad de optar por una impresora que permita obtener objetos con características mecánicas diferentes, con mayor resolución en el acabado y con mayor dureza, para diferentes aplicaciones.

Para la solución de este problema se propone diseñar y construir una impresora 3D por estereolitografía ya que este tipo de impresoras mejora la calidad del acabado superficial de la impresión según (Frank, Frank, & Taylor, 2016).

## **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y construir una impresora 3D por estereolitografía para el laboratorio de simulación y centro de mecanizado CNC de la Universidad Técnica del Norte.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar las características de la fabricación de impresoras 3D por estereolitografía.
- Diseñar los elementos mecánicos.
- Construir el prototipo de la impresora 3D.
- Realizar la implementación del software.
- Realizar las pruebas de funcionamiento.

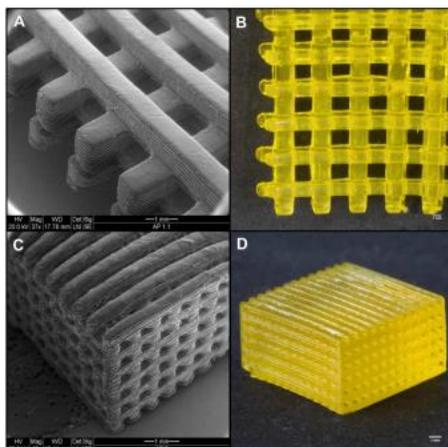
## **ANTECEDENTES**

La impresión tridimensional 3D, es una tecnología utilizada durante décadas en el campo industrial, las impresoras 3D han tenido un desarrollo muy rápido, y se han utilizado en varias aplicaciones, ya que existen impresoras con diferentes tecnologías de impresión 3D, con ventajas y desventajas de cada una. La mayoría de estas impresoras están siendo evaluadas por investigadores en el campo de la medicina para ser aplicadas en la práctica según (AIAI, Griffin, & Butler, 2015).

Las impresoras 3D que utilizan tecnología de estereolitografía ya sea por el método DLP o STL crean objetos a base de capas muy delgadas, usando resina fotosensible la cual es endurecida mediante la emisión de un haz de luz que puede provenir de un láser o de un proyector, por lo que los prototipos son de alta calidad, además el proceso de impresión es muy estable y el tiempo de impresión es menor según (Impresora 3D STL por Estereolitografía, 2016), por esta razón se debe optar por impresoras 3D con esta tecnología ya que dependiendo la resinas utilizadas se puede fabricar piezas pequeñas y con distintas características mecánicas.

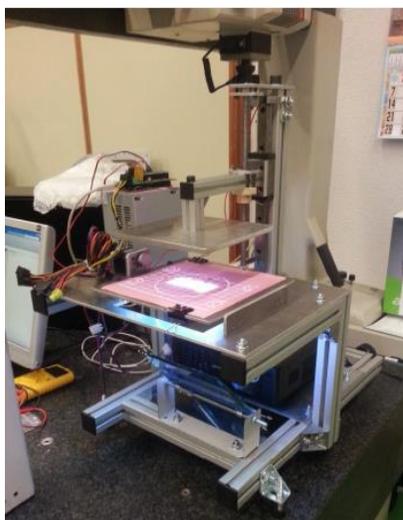
Los autores (Pawar, y otros, 2016), experimentaron con fotoiniciadores solubles en agua lo que permite tener impresiones 3D a base de la misma, soportes a base de hidrogel son de interés específico para la ingeniería de tejidos, ya que proporcionan un entorno con alto contenido de agua. Soportes de hidrogel 3D complejos que tienen una estructura totalmente interconectada

con dimensiones y porosidad predefinidas para la reparación o regeneración eficaz de tejidos y órganos, los objetos impresos utilizando esta tecnología se muestra en la *figura 1*.



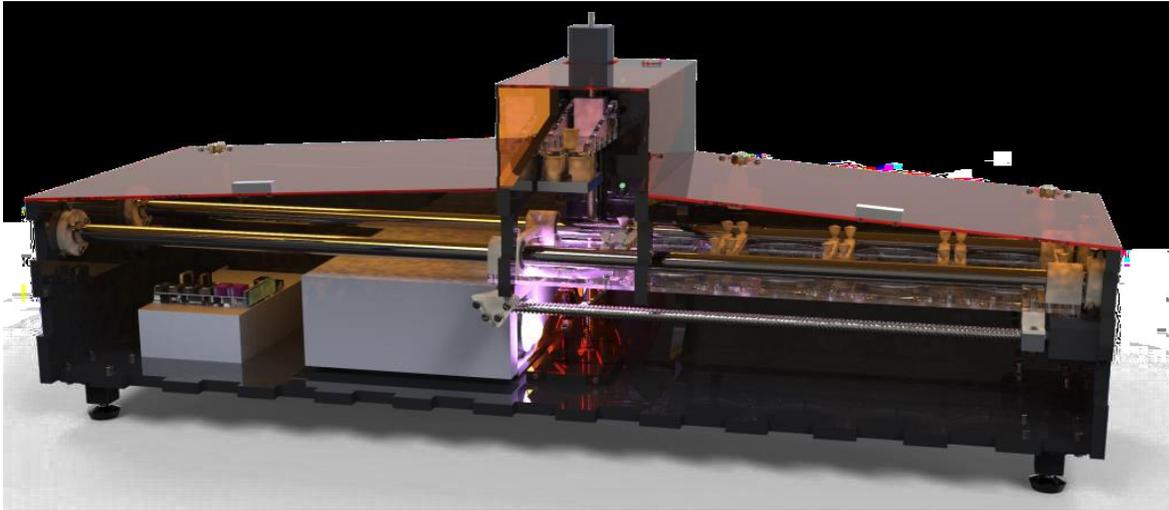
*Figura. 0.1 Andamio de hidrogel estructurado tridimensionalmente con estructura de madera usando nanopartículas. (Pawar, y otros, 2016)*

La escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad Zaragoza, diseñó una impresora 3D por estereolitografía, pero hubo una mala selección del lente por lo que afectó a la calidad de la impresión, además no existe un sistema de circulación de resina, lo que afecta el tiempo de duración de la misma y también la impresión se la realiza de arriba hacia abajo por lo que se debe llenar la cuba de resina para imprimir. El diseño de la impresora se muestra en la *figura 2*.



*Figura. 0.2. Modelo de la impresora 3D DLP (Derré, 2014)*

En el año 2015, la universidad de Twente diseñó una impresora 3D por estereolitografía pero está diseñada para pruebas de materiales por lo que el área de impresión es muy pequeña, además el sistema de elevación no está bien diseñado por lo que existe vibración y esto afecta la calidad de impresión. En la *figura 3* se muestra la impresora 3D Estereolitografía realizada en la universidad de Twente.



*Figura. 0.3. Impresora 3D Estereolitografía. (Vaneker, 2015)*

## **JUSTIFICACIÓN**

Las impresoras 3D son de mucha importancia en proyectos mecatrónicos, ya que permiten la producción de prototipos funcionales en un tiempo corto, además el uso de las tecnologías de impresión 3D promueve las actividades de investigación y desarrollo mecatrónico según (Abreu, y otros, 2014).

La construcción de una impresora 3D por estereolitografía contribuye al desarrollo de prototipos para diferentes ramas de investigación biomecánicas, procesos de manufactura, ciencia de los materiales entre otras, ofreciendo objetos con un acabado de alta calidad y propiedades mecánicas diferentes a los objetos que se imprimen en el laboratorio actualmente, además es un gran aporte para trabajar con las líneas de investigación de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica y de la Universidad Técnica del Norte en general.

Al obtener nuevos prototipos impresos utilizando el método de impresión por estereolitografía se encamina en la creación de nuevas tecnologías apoyando así la transformación de la matriz productiva del país.

## **ALCANCE**

Se diseñará y construirá la impresora 3D para en laboratorio de simulación y centro de mecanizado CNC de la Universidad Técnica del Norte con tecnología de estereolitografía la cual imprime objetos de alta calidad fabricados con fotoresina.

Para la construcción de esta impresora se utilizará algunos elementos fabricados en el laboratorio de manufactura para abaratar costos.

La impresora estará diseñada para fabricar piezas de un máximo de 200x200x400 mm de fotoresina la cual permite dar una mayor resolución a las piezas y por lo tanto un mejor acabado superficial.

El software que se utilizará para la desfragmentación de la imagen 3D por capas y envío al proyector será de código abierto u open Source. Para el control de la parte eléctrica de servomotores y sensores se usará un microcontrolador o una placa de control.



## Capítulo I

### 1. Marco Teórico

#### 1.1. Impresión tridimensional 3D

La impresión 3D, también conocida como manufactura por adición, es un proceso por el cual se crean objetos físicos colocando un material por capas en base a un modelo digital. Todos los procesos de impresión 3D requieren que el software, el hardware y los materiales trabajen en conjunto. (Autodesk®, 2017)

#### 1.2. Tecnologías de impresión

La tecnología de impresión 3D puede utilizarse para crear todo tipo de cosas, desde prototipos y piezas simples hasta productos finales altamente técnicos, como piezas para aeronaves, edificios ecológicos, implantes médicos que pueden salvar vidas e incluso órganos artificiales que se producen con capas de células humanas. (Autodesk®, 2017)

##### 1.2.1. Impresión por deposición de material fundido.

“La tecnología de Modelado de fusión por deposición (FDM) es un método poderoso de fabricación aditiva patentado por Stratasys.” (Stratasys, 2016)

Este método de impresión 3D calienta y extrude materiales plásticos como son en ABS y PLA, en la *figura 1.1* se muestra objetos impresos con estos materiales.



*Figura. 1.1. Piezas impresas con material PLA y ABS. (Ferrer, 2014)*

Las impresoras 3D de tecnología FDM o por deposición fundida fabrican objetos capa a capa calentando un material termoplástico y extrusionándolo según un patrón controlado por ordenador. (Additive 3D 3D printing, 2014). En la *figura 1.2* se muestra una impresora 3D que utiliza tecnología FDM.



*Figura. 1.2. Impresora 3D con tecnología de deposición de material fundido. (Penalva, 2014)*

### **1.2.2. Impresión por inyección de aglutinante.**

“La Inyección de aglutinante es una de las tecnologías de impresión 3D más versátiles, ya que permite imprimir con gran variedad de materiales y colores”. (Piqueras, 2016). En la *figura 1.3* se muestra el proceso de impresión con esta tecnología.



*Figura. 1.3. Impresión por inyección de aglutinante. (C, 2016)*

Esta tecnología puede ser considerada una mezcla entre inyección de material y fusión de lecho de polvo. Estos sistemas consisten en la pulverización de aglutinantes líquidos o resinosos sobre un lecho de polvo, que luego se solidifican en sección transversal. Las capas se imprimen de manera similar a diferencia de las impresoras de papel tradicionales de chorro de tinta, con la diferencia de que, en este caso, la capa de tinta o aglutinante son aplicados sobre un lecho de polvo, capa a capa. (Piqueras, 2016). La *figura 1.4* muestra la impresora 3D que trabaja con este tipo de tecnología.



*Figura. 1.4. Impresora 3D para piezas de polvo cerámico. (Imprimalia, 2016)*

### **1.2.3. Impresión por estereolitografía**

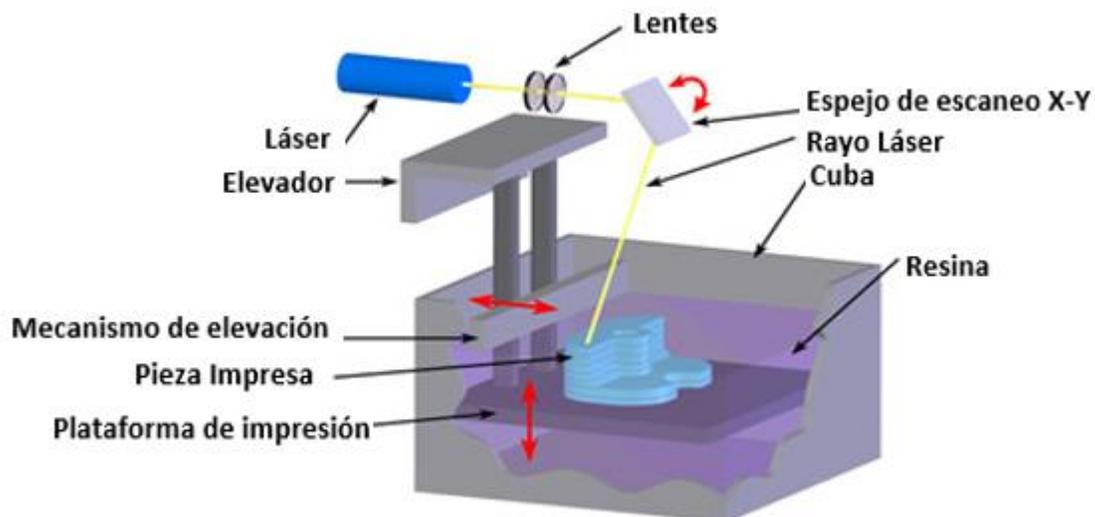
La estereolitografía, también denominada SL o SLA crea las piezas capa por capa mediante un láser ultravioleta que solidifica resinas de fotopolímero líquido. Suele emplearse para producir modelos de concepto, patrones maestros, prototipos de gran tamaño y patrones de moldeado a la cera perdida. (Stratasys Ltd., 2018)

### **1.3. Tipos de impresoras 3D por estereolitografía**

Existen 2 tipos de impresoras 3D por estereolitografía y son la impresión SLA y la impresión DLP, presentan diferencias significativas en la tecnología y por tanto en el producto final.

### 1.3.1. Impresión 3D SLA

En la impresión 3D SLA (StereoLithography Apparatus) un haz de luz ultravioleta se focaliza sobre la superficie de una cuba rellena de líquido fotopolimérico. Los rayos de luz dibujan un patrón en la superficie del líquido capa a capa. Mediante un proceso llamado fotopolimerización, se endurece el patrón dibujado por la exposición del láser ultravioleta de la capa. Una vez endurecida la primera capa, la plataforma de elevación del equipo desciende un poco y se barre la pieza dejando una nueva capa de resina líquida en la superficie de la cubeta, preparada para la siguiente impresión del láser ultravioleta. De esta forma se va creando, capa a capa, la pieza tridimensional. (BLOG DE HXX, 2014). La *figura 1.5* muestra el proceso de impresión 3D del tipo SLA.



*Figura. 1.5. Proceso de impresión 3D SLA. (Formlabs, 2018)*

### 1.3.2. Impresión 3D DLP

“Este proceso es muy parecido al SLA, con la única diferencia que se endurece la resina mediante un proyector de luz DLP, similar a los proyectores de vídeo convencionales.” (BLOG DE HXX, 2014). En la *figura 1.6* se muestra el principio de funcionamiento de la impresión DLP.



Figura. 1.6. Proceso de impresión 3D DLP. (Formlabs, 2018)

DLP usa una pantalla de proyector digital para mostrar una sola imagen de cada capa en toda la plataforma a la vez. Debido a que el proyector es una pantalla digital, la imagen de las capas se compone de píxeles cuadrados, lo que resulta en una capa formada por pequeños ladrillos rectangulares llamados voxels. (Formlabs, 2018)

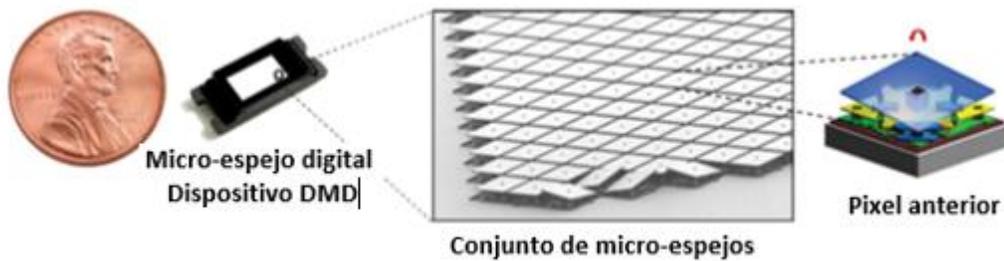
## 1.4. Tecnología DLP

(Texas Instruments, 2017) Afirmó lo siguiente

La tecnología DLP (Digital Light Processing) procesamiento digital de luz fue desarrollada por Texas Instruments esta tecnología es muy usada en aplicaciones de imagen como pantallas estáticas, carteles digitales, dispositivos móviles y otros.

La misma está basada en la tecnología micro-electromecánica la cual utiliza espejos microscópicos ubicados en una matriz en un chip semiconductor DMD (Digital Micromirror Device) dispositivo digital de micro espejos. Cada microespejo es un píxel de la imagen pudiendo contener una matriz de más de 8 millones de microespejos.

Para producir una variedad de escalas de grises los microespejos cambiando su posición más de mil veces por segundo inclinándose hacia la fuente de luz (ENCENDIDO) o lejos de ella (APAGADO). Para proporcionar color a la imagen se utiliza una rueda de color la cual se sincroniza con el chip suministrando una variedad de 16,7 millones de colores, el mismo que se dirigen hacia la lente del proyector para dar como resultado una imagen. En la *figura 1.7* se muestra el proceso de la tecnología DLP.



*Figura. 1.7. Tecnología DLP de Texas Instruments. (Texas Instruments, 2017)*

“Dado que utiliza espejos para redirigir la luz el chip DMD puede trabajar con varias longitudes de onda de luz que incluyen visible, infrarroja y ondas ultravioletas.” (Texas Instruments, 2015)

## 1.5. Proyector DLP®

DLP® es una tecnología desarrollada por Texas Instruments que ha revolucionado la proyección. El corazón de cada proyector es un chip. Este chip puede tener hasta dos millones de espejos microscópicos, cada uno mide menos de un quinto del ancho de un cabello humano y corresponde a un píxel en la imagen proyectada final.

Cuando se combina con una fuente de luz y una lente de proyección, cada espejo en un chip DLP® puede inclinarse hacia la fuente de luz o alejarse de ella, haciendo que el píxel se vuelva blanco o negro. (Texas Instruments, 2018)

### 1.5.1. Características del proyector DLP

Un proyector DLP presenta las siguientes características:

### ***1.5.1.1. Brillo***

El brillo es la cantidad de luz cuando la proyección de la imagen es totalmente blanca, es decir cuando todos los microespejos del chip DLP están en posición de encendido, con esta tecnología se puede cubrir un amplio rango de brillo desde 30 lúmenes a más de 10000 lúmenes para proyectores de lugares muy grandes. (TexasInstruments, 2016)

Entre más brillo posea el proyector se puede notar una mayor diferencia entre el fondo y la imagen proyectada. Para la aplicación del proyector en una impresora 3D entre más sea el brillo menor será el tiempo de curado del fotopolímero disminuyendo así el tiempo de impresión. (Pavón Almeida, 2015). La *figura 1.8* muestra el brillo de la imagen dependiendo la tecnología del proyector, la imagen de la izquierda corresponde a la proyección DLP y la imagen de la derecha corresponde a la proyección de otro tipo de proyector.



*Figura. 1.8. Ejemplo del brillo de las imágenes. (Texas Instruments, 2016)*

### ***1.5.1.2. Contraste***

El contraste del proyector se refiere a la diferencia que existe entre el blanco y negro en una imagen es por esto que un proyector de alto contraste produce una imagen con un nivel de negro muy profundo, da más detalle de sombra y así un mejor detalle de profundidad a la imagen. (Proyector Central, 2018), traducido por autor. En la *figura 1.9* se muestra el contraste en una imagen dependiendo el tipo de proyector.

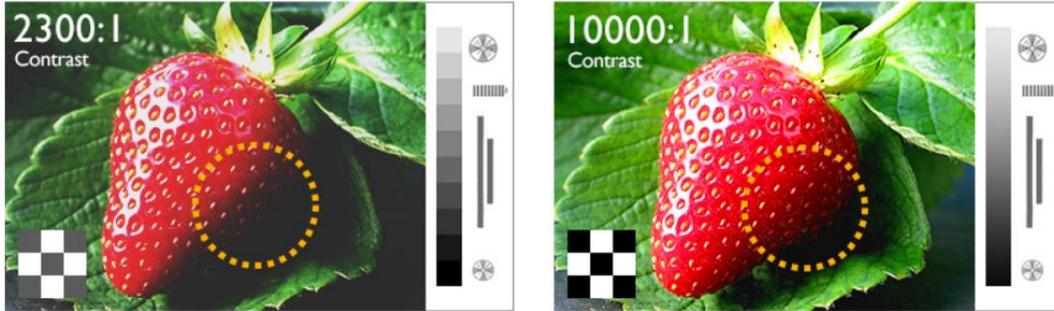


Figura. 1.9. Ejemplo de identificación del contraste. (The ProjectorExpert, 2017)

## 1.6. La Fotoresina

La fotoresina es un polímero el cual cambia sus propiedades físicas cuando es expuesta a la luz, generalmente luz ultravioleta, formando una diferenciación física entre la parte expuesta y no expuesta.

En este caso la fotoresina solo se solidifica en el área que reciba la luz mientras que el área que no la recibe permanece en estado líquido. La incidencia de luz inicia reacciones químicas que cambian la estructura de la resina y modifica sus propiedades físicas y mecánicas. (Pandey, 2014)

### 1.6.1. Componentes de la fotoresina

En el mercado actual existe una gran variedad de fotoresina las mismas están compuestas básicamente por: monómeros, fotoiniciadores y bloqueadores

- Monómero.- Los monómeros son moléculas unidas químicamente que se pueden unir con otros monómeros formando polímeros.
- Fotoiniciador.- Los fotoiniciadores son sensibles a longitudes de onda específicas estos crean los enlaces para que la resina se cure cuando se expone a la luz.
- Bloqueador.- El bloqueador evita que la luz atraviese demasiado profundo, sin bloqueadores la luz pasaría a través de toda la resina. (Vanecker, 2015), traducido por autor.

## 1.6.2. Ejemplos de fotoresina

En el mercado actual existen diferentes tipos de fotoresinas a continuación se muestra algunos ejemplos de la empresa Carbon, Inc. CA., pionera en la investigación de nuevas fotoresinas.

### 1.6.2.1. Silicona

Esta resina tiene las características de ser suave, biocompatible y resistencia a la ruptura. La biocompatibilidad con la piel abre un sin número de posibilidades en la fabricación de objetos de uso diario como manillas, auriculares personalizados y otros objetos portátiles. (Carbon, Inc. CA, s.f.), traducido por autor.

En la *tabla 1.1* se muestra las características mecánicas.

*Tabla 1.1. Características mecánicas de la silicona. . (Carbon, Inc. CA, s.f.)*

<b>Resistencia a la tracción</b>	<b>Resistencia al desgaste</b>	<b>Elongación</b>
<b>3.4MPa</b>	9.6kN/m	330%

En la *figura 1.10* se muestra algunos productos fabricados con esta resina.



*Figura. 1.10. Productos de silicona. (Carbon, Inc. CA, s.f.)*

Esta resina tiene las características de ser versátil, resistente y rígido.

### 1.6.2.2. Poliuretano rígido

Este compuesto es muy versátil dentro de la industria con el cual se imprimen productos de consumo y accesorios automotrices.

Este material tiene las siguientes características mecánicas y se muestra a continuación en la tabla 1.2.

*Tabla 1.2. Características mecánicas del poliuretano rígido (Carbon, Inc. CA, s.f.)*

<b>Resistencia a la tracción</b>	<b>Elongación</b>	<b>Módulo de Young</b>
<b>45 MPa</b>	100%	1900MPa

En la *figura 1.11* se muestra algunos productos con material poliuretano rígido.



*Figura. 1.11. Productos de poliuretano rígido. (Carbon, Inc. CA, s.f.)*

### 1.6.2.3. Éster de cianato

Esta resina tiene la característica de ser resistente a altas temperaturas y rígido. Este compuesto es perfecto para aplicaciones que requieren estabilidad térmica, elementos que se encuentren en contacto con componentes electrónicos que generan calor y productos industriales.

En la *tabla 1.3* se presenta las características mecánicas de este material.

*Tabla 1.3. Características mecánicas del éster de cianato. (Carbon, Inc. CA, s.f.)*

<b>Resistencia a la tracción</b>	<b>Elongación</b>	<b>Módulo de Young</b>	<b>Temperatura de deflexión térmica</b>
<b>92 MPa</b>	3.3%	3870MPa	231°C

En la *figura 1.12* se muestra ejemplos de productos a base de este material.



*Figura. 1.12. Productos de éster de cianato. (Carbon, Inc. CA, s.f.)*

## **1.7. Cuba de la impresora 3D**

Dentro del diseño de la impresora 3D por estereolitografía el diseño de la cuba es esencial para que el objeto no se adhiera a la ventana de contacto, también para que en la separación del objeto no existan grandes esfuerzos que afecten la impresión. (Vaneker, 2015), traducido por autor.



## **Capítulo II**

### **2. Metodología**

#### **2.1.Requisitos de diseño**

Se realizó un análisis de los requisitos que debe tener la impresora 3D DLP para estructurar las distintas soluciones y son las siguientes.

- Área de impresión 200x200x400 mm, de acuerdo al alcance.
- Cantidad de resina 3 kg
- Bajo costo

#### **2.2.Diseño por análisis funcional**

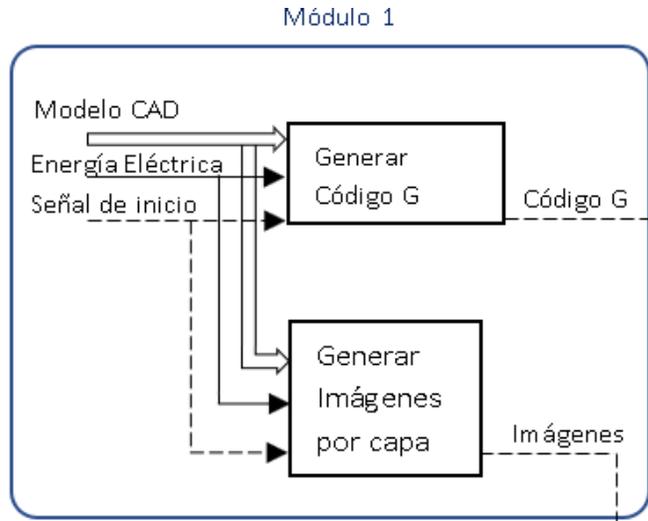
Se analizan todos los sistemas que van a intervenir en el funcionamiento de la impresora 3D para dar solución al problema planteado, se consulta sobre los métodos de impresión por estereolitografía y sobre los métodos de separación no destructivos y se seleccionan los más adecuados para cumplir con el área de impresión de 200x200x400 mm de acuerdo al alcance del proyecto.

Se investigan diferentes opciones de materiales para la carcasa y estructura de la impresora, componentes para el ensamblaje de las partes, mecanismos de transmisión de movimiento, soportes y bases para el circuito de control, sensores y actuadores.

El análisis funcional de un producto o sistema es un método de diseño que permite identificar las distintas funciones que componen el proceso para buscar por individual distintas alternativas para la solución de cada función. (Riba Romera, 2002)

### 2.2.1. Módulo 1

En la *figura 2.1* se indica el análisis funcional del módulo 1.



*Figura. 2.1.Módulo 1.*

Las funciones de este módulo son.

- Generar el código G para el movimiento de los actuadores
- Generar las imágenes para la proyección por capa.

Para que el usuario de la impresora 3D pueda ingresar el modelo CAD se propone la utilización de software, a continuación, se propone las posibles soluciones de este módulo.

#### **Creation Workshop 3D**

Este software es para controlar impresoras 3D del tipo SLA o FDM trabaja con archivos STL y OBJ controla los motores de la impresora mediante el puerto UBS y envía las imágenes por capa por un puerto de salida de video HMI o RGB. (Hernández, 2013)

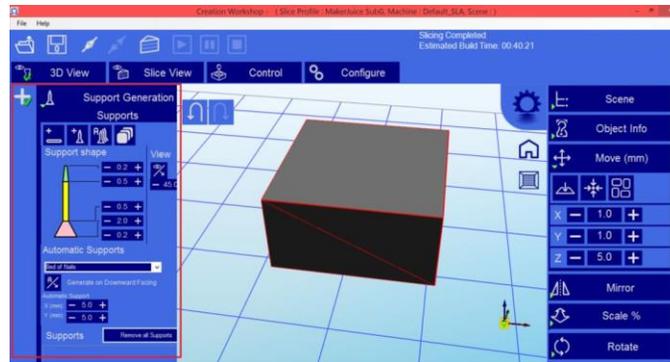


Figura. 2.2. Interfaz de usuario Creation Workshop 3D. (Hernández, 2013)

## Ventajas

- Configuración de capas.
- Creación de soportes.
- Configuración de tiempos de curado.
- Control de motores y salida HDMI al mismo tiempo.

## Desventajas

- Tiene un alto costo.
- Necesita un computador para el control de actuadores y la salida de video.

## Monkeyprint

Es un programa para impresoras del tipo DLP publicado bajo la licencia GPL (General Public License)

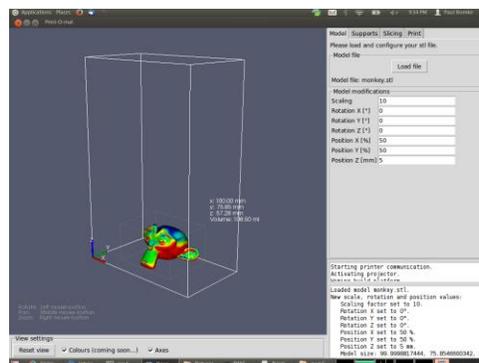


Figura. 2.3. Interfaz de usuario Monkeyprint. (Bomke, 2015)

## Ventajas

- Posicionamiento y orientación del modelo a imprimir.
- Generación de soporte automático con parámetros definidos por el usuario.
- Generar estructuras huecas y de relleno

## Desventajas

- Puede generar errores debido a que está en etapa Beta.
- Necesita un computador con un sistema operativo Ubuntu 12.04 o 16.04.

## NanoDLP

NanoDLP es un programa para el control de una impresora DLP este programa se lo puede ejecutar en una Raspberry Pi, en Windows y el Linux. (NanoDLP, 2017)



Figura. 2.4. Interfaz de usuario NanoDLP. (NanoDLP, 2017)

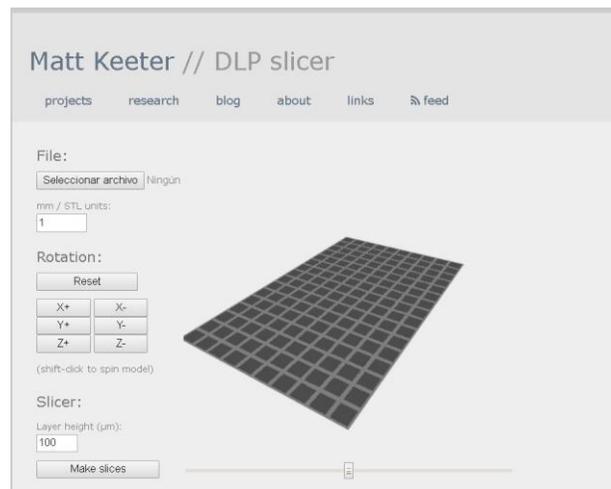
## Ventajas

- Generar vacío en el modelo 3D.
- Aplicar rellenos en 3D.

- Configuración de distintos tipos de resinas.
- Soporta archivos STL / SLC / SVG / PNG.
- Una interface de usuario muy intuitiva.
- Multi lenguaje.
- Generación de soportes.
- Compatibilidad con distintas tarjetas de control de impresoras 3D como por ejemplo Ramps.
- Control de motores y salida HDMI al mismo tiempo.

### **Matt Keeter DLP slicer**

Este software realizado por un grupo de Formlabs es online, para su funcionamiento hay que abrir una página web en donde se puede subir el archivo STL para generar las imágenes por capa.



*Figura. 2.5. Interfaz de usuario Matt Keeter DLP slicer.*

### **Ventajas**

- Grosor de la capa
- Rotación del objeto

### **Desventajas**

- Solo genera las imágenes por capa.

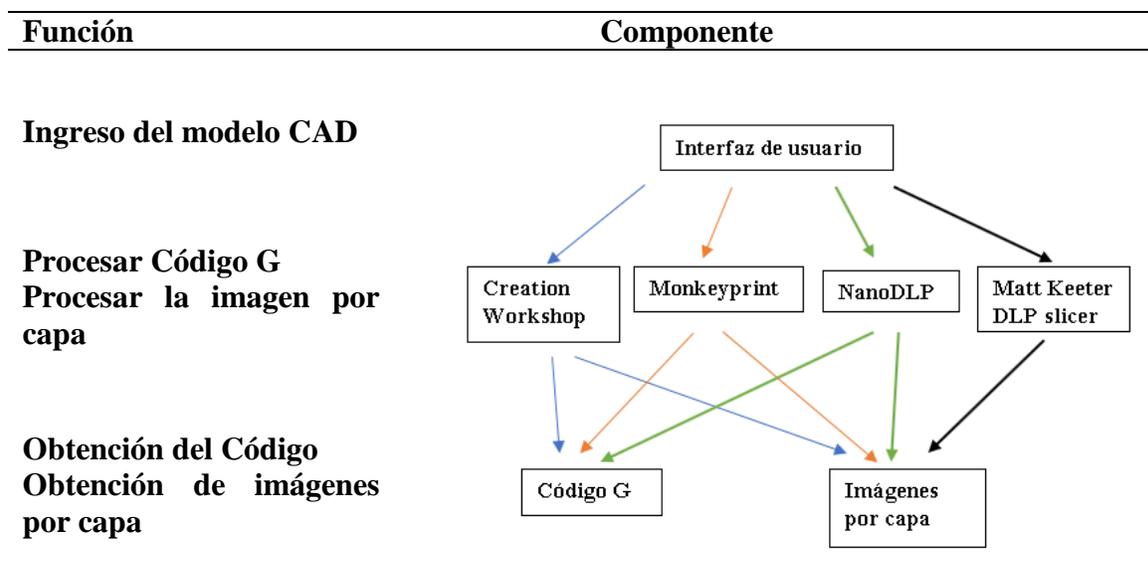
- No tiene interface de usuario entre el computador y la impresora.

Una vez determinadas las alternativas de solución para este módulo la tabla 2.1 muestra la combinación de las posibles soluciones.

Alternativas

1. Creation Workshop 3D
2. Monkeyprint
3. NanoDLP
4. Matt Keeter DLP slicer

Tabla 2.1. Alternativas del módulo 1



Evaluación y selección de la alternativa

Los criterios más importantes para la evaluación son:

- Generación del código G para el movimiento de los motores.
- Generación de las imágenes por capa.
- Que sea independiente es decir que pueda trabajar sin la necesidad de un computador.

- Modificación del modelo CAD: adhesión de soportes, rotación y vaciado.
- Configuración de resinas: Tiempos de curado y altura de capas.
- Costo

A continuación, se evalúa cada criterio como se muestra en las tablas 2.2 a 2.8.

*Tabla 2.2. Evaluación de criterios, módulo 1*

	Generación de código G	Generación de imágenes	Independiente	Modificación del modelo	Configuración de resinas	Costo	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Generación de código G</b>		0,5	1	0,5	1	0,5	4,5	0,225
<b>Generación de imágenes</b>	0,5		1	0,5	1	1	5	0,25
<b>Independiente</b>	0	0		0,5	0	1	2,5	0,125
<b>Modificación del modelo</b>	0,5	0,5	0,5		0,5	0	3	0,15
<b>Configuración de resinas</b>	0	0	1	0,5		0	2,5	0,125
<b>Costo</b>	0,5	0	0	0	1		2,5	0,125
						<b>Suma</b>	20	

Generación Código G<Generación de imágenes>Independiente<Modificación del modelo>Configuración de resina=Costo

A continuación, se evalúan cada solución respecto a los diferentes criterios.

*Tabla 2.3. Evaluación de soluciones con respecto a generación de código G, módulo 1.*

Generación código G	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>		0,5	0,5	1	3	0,3
<b>Solución 2</b>	0,5		0,5	1	3	0,3
<b>Solución 3</b>	0,5	0,5		1	3	0,3
<b>Solución 4</b>	0	0	0		1	0,1
				<b>Suma</b>	10	

Solución 1=Solución 2=Solución 3>Solución 4

Tabla 2.4. Evaluación de soluciones con respecto a generación de imágenes, módulo 1.

<b>Generación de imágenes</b>	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>	<b>Solución 4</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución 1</b>		0,5	0,5	0,5	2,5	0,25
<b>Solución 2</b>	0,5		0,5	0,5	2,5	0,25
<b>Solución 3</b>	0,5	0,5		0,5	2,5	0,25
<b>Solución 4</b>	0,5	0,5	0,5		2,5	0,25
				<b>Suma</b>	10	

Solución 1=Solución 2=Solución 3=Solución 4

Tabla 2.5. Evaluación de soluciones con respecto a independiente, módulo 1.

<b>Independiente</b>	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>	<b>Solución 4</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución 1</b>		0	0	0,5	1,5	0,15
<b>Solución 2</b>	1		0,5	1	3,5	0,35
<b>Solución 3</b>	1	0,5		1	3,5	0,35
<b>Solución 4</b>	0,5	0	0		1,5	0,15
				<b>Suma</b>	10	

Solución 1<Solución 2=Solución 3>Solución 4

Tabla 2.6. Evaluación de soluciones con respecto a modificación del modelo, módulo 1.

<b>Modificación del modelo</b>	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>	<b>Solución 4</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Solución 1</b>		0,5	0,5	1	3	0,3
<b>Solución 2</b>	0,5		0,5	1	3	0,3
<b>Solución 3</b>	0,5	0,5		1	3	0,3
<b>Solución 4</b>	0	0	0		1	0,1
				<b>Suma</b>	10	

Solución 1=Solución 2=Solución 3>Solución 4

Tabla 2.7. Evaluación de soluciones con respecto a configuración de resinas, módulo 1.

Configuración de resinas	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	0	0	1	0,142
Solución 2	0		0	0	1	0,142
Solución 3	1	1		1	4	0,571
Solución 4	0	0	0		1	0,142
				<b>Suma</b>	7	

Solución 1=Solución 2<Solución 3>Solución 4

Tabla 2.8. Evaluación de soluciones con respecto a costo, módulo 1.

Costo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	0	0	1	0,142
Solución 2	1		1	1	4	0,142
Solución 3	1	1		1	4	0,571
Solución 4	1	1	1		4	0,142
				<b>Suma</b>	7	

Solución 1=Solución 2<Solución 3>Solución 4

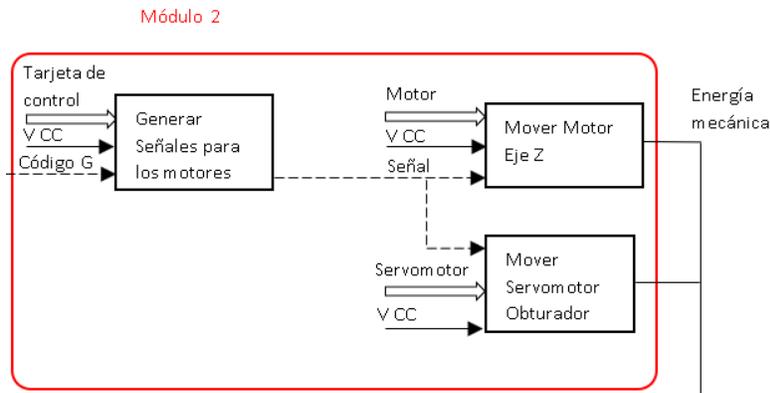
Tabla 2.9. Conclusiones, módulo 1.

	Generación de código G	Generación de imágenes	Independiente	Modificación del modelo	Configuración de resinas	Costo	$\Sigma$	Prioridad
Solución 1	0,067	0,062	0,018	0,045	0,0178	0,009	0,221	3
Solución 2	0,067	0,062	0,043	0,045	0,017	0,038	0,275	2
Solución 3	0,067	0,062	0,043	0,045	0,071	0,038	0,328	1
Solución 4	0,022	0,062	0,018	0,015	0,017	0,038	0,175	4

Como conclusión, la solución que más se ajusta a los diferentes criterios es la solución 4 ya que brinda más posibilidades en cuanto a la generación del código G y la generación de imágenes por capa, además de posibilidades de configuración de algunos aspectos de la impresión.

## 2.2.2. Módulo 2

En la *figura 2.6* se indica el análisis funcional del módulo 2.



*Figura. 2.6. Módulo 2.*

Para el control de movimiento de los motores existen algunas tarjetas de control para impresoras 3D con diferentes características.

### Teensylu



*Figura. 2.7. Teensylu.*

Esta tarjeta contiene el controlador y los dispositivos de potencia en la misma placa en cuanto a los drivers de los motores paso se los puede montar independientemente.

### Ventajas

- Fácil de instalar

- Puede usar el mismo firmware que la Ramp 1.4

### Desventaja

- Difícil de reparar.
- Tiene un alto costo.

### Ramps 1.4



*Figura. 2.8.Ramp 1.4.*

La Ramps 1.4 es una placa que está diseñada para trabajar junto con un Arduino mega 2560 y que sirve para controlar los elementos de potencia de una impresora 3D.

### Ventajas

- Modular se monta sobre un Arduino mega 2560
- Fácil reparación
- Bajo costo

### 3d Mks Base V1.5



*Figura. 2.9. 3D Mks Base V 1.5.*

Es una placa que integra tanto el controlador como la parte de potencia y los drivers de los motores paso a paso en la misma tarjeta.

### Ventajas

- Fácil de instalar.
- Puede usar el mismo firmware que la Ramp 1.4.

### Desventaja

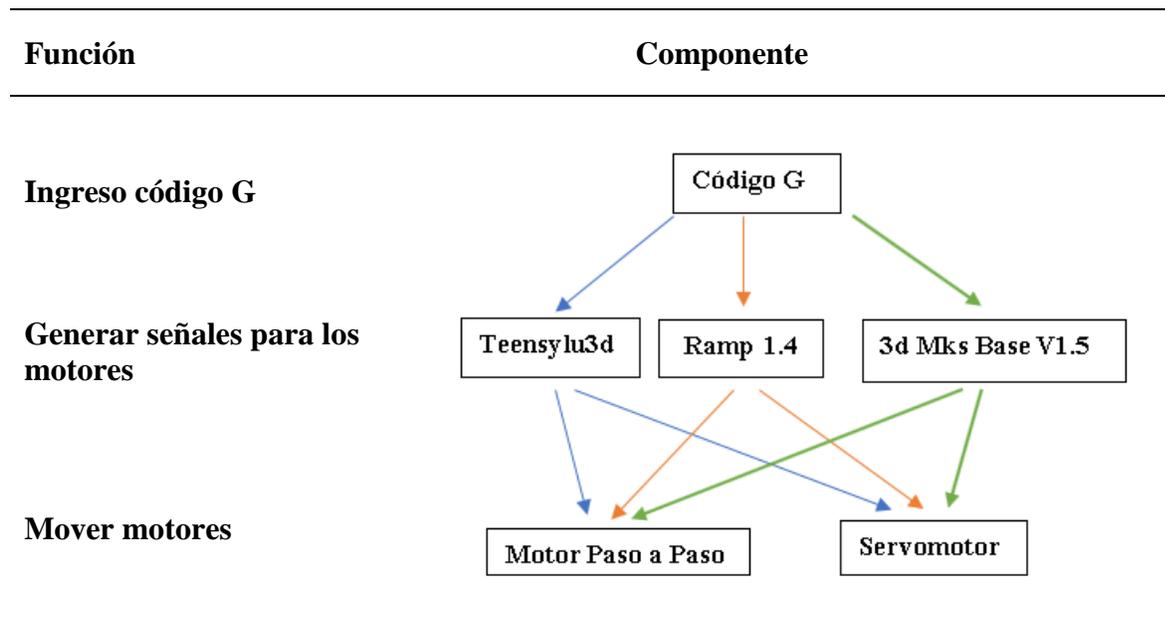
- Difícil de reparar.
- Tiene un alto costo.
- Drivers de motor paso a paso integrados.

Una vez determinadas las alternativas de solución para este módulo la tabla 2.1 muestra la combinación de las posibles soluciones.

### Alternativas

1. Teensylu
2. Ramp 1.4
3. 3d Mks Base V1.5

Tabla 2.10. Alternativas, módulo 2.



## Evaluación y selección de la alternativa

Para la evaluación de las distintas soluciones de módulo 2 a continuación se enlistan los criterios más importantes.

1. Costo
2. Facilidad de adquisición
3. Control de velocidad
4. Que sea modular para facilidad de mantenimiento.

Tabla 2.11. Evaluación de criterios, modulo 2.

	Costo	Facilidad de adquisición	Control de velocidad	Modular	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Costo</b>		0	0,5	0,5	2	0,2
<b>Facilidad de adquisición</b>	1		0,5	1	3,5	0,35
<b>Control de velocidad</b>	0,5	0,5		1	3	0,3
<b>Modular</b>	0,5	0	0		1,5	0,15
				Suma	10	

Costo<Facilidad de adquisición>Control de velocidad>Modular

Tabla 2.12. Evaluación de soluciones con respecto a costo, módulo 2.

Costo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>		0	1	2	0,333
<b>Solución 2</b>	1		1	3	0,5
<b>Solución 3</b>	0	0		1	0,166
			Suma	6	

Solución 1<Solución 2>Solución 3

Tabla 2.13. Evaluación de soluciones con respecto a facilidad de adquisición, módulo 2.

Facilidad de adquisición	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>		0	0,5	1,5	0,25
<b>Solución 2</b>	1		1	3	0,5
<b>Solución 3</b>	0,5	0		1,5	0,25
			Suma	6	

Solución 1<Solución 2>Solución 3

Tabla 2.14. Evaluación de soluciones con respecto a control de velocidad, módulo 2.

<b>Control de velocidad</b>	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>	$\Sigma+1$	<b>Ponderación</b>
<b>Solución 1</b>		0,5	0,5	2	0,333
<b>Solución 2</b>	0,5		0,5	2	0,333
<b>Solución 3</b>	0,5	0,5		2	0,333
			<b>Suma</b>	6	

Solución 1=Solución 2=Solución 3

Tabla 2.15. Evaluación de soluciones con respecto a modular, módulo 2.

<b>Modular</b>	<b>Solución 1</b>	<b>Solución 2</b>	<b>Solución 3</b>	$\Sigma+1$	<b>Ponderación</b>
<b>Solución 1</b>		0	1	2	0,333
<b>Solución 2</b>	1		1	3	0,5
<b>Solución 3</b>	0	0		1	0,166
			<b>Suma</b>	6	

Solución 1<Solución 2>Solución 3

Tabla 2.16. Conclusiones, módulo 2.

	<b>Costo</b>	<b>Facilidad de adquisición</b>	<b>Control de velocidad</b>	<b>Modular</b>	$\Sigma$	<b>Prioridad</b>
<b>Solución 1</b>	0,067	0,087	0,1	0,05	0,304	2
<b>Solución 2</b>	0,1	0,175	0,1	0,075	0,45	1
<b>Solución 3</b>	0,033	0,087	0,1	0,025	0,245	3

Como conclusión la solución que más se ajusta a los diferentes criterios es la número 2.

### 2.2.3. Módulo 3

En la figura 2.10 se indica el análisis funcional del módulo 2.

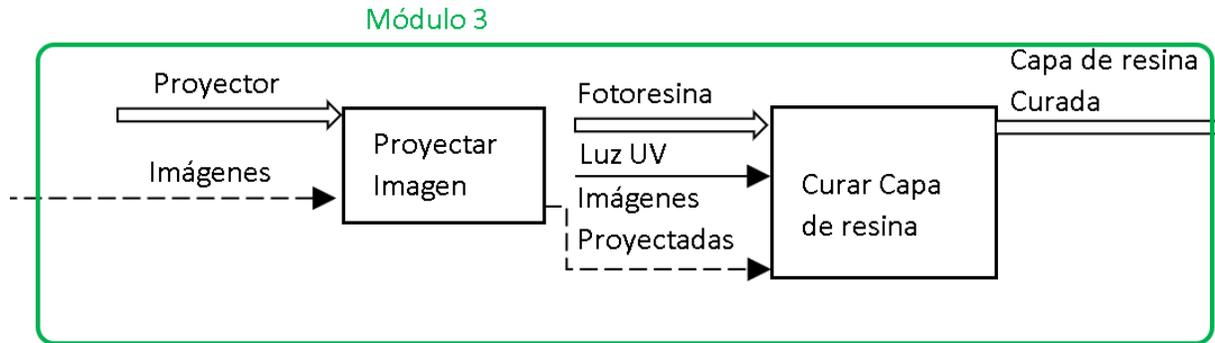


Figura. 2.10. Módulo 3.

Para el curado de la resina existen diferentes métodos que permiten la unión de las distintas capas de para formar un objeto tridimensional.

#### Método de impresión de arriba hacia abajo

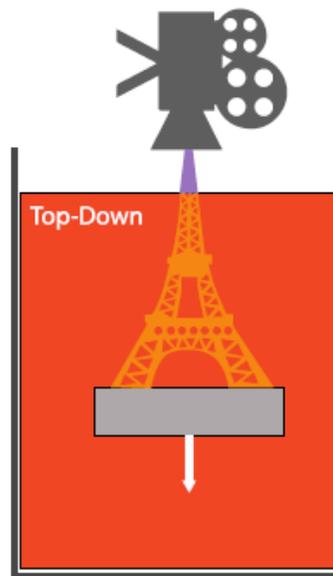


Figura. 2.11. Impresión DLP de arriba hacia abajo. (Vaneker, 2015)

### Características del método.

En este método la impresión de forma sobre plataforma de construcción y se va sumergiendo según se vayan curando las diferentes capas de resina.

### Ventajas

- Facilidad de montaje.
- Pocos componentes
- Tiene una buena calidad de impresión
- Menos riesgo de que la impresión salga con alguna fractura.

### Desventajas

- La altura de la impresión está limitada por la profundidad de depósito de resina.
- En este caso se necesita que todo el depósito este lleno por lo que se utiliza gran cantidad de resina y al no poder controlar por completo el ambiente en que se encuentra la resina se va degradando por lo que en algún momento habrá que cambiarla en su totalidad
- Otra desventaja es que no se puede utilizar la totalidad de la resina.

### Método CLIP

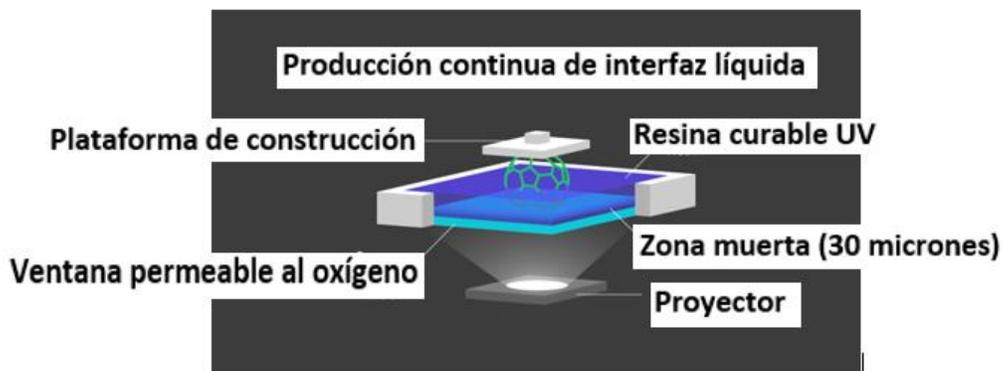


Figura. 2.12. Principio de funcionamiento del método CLIP. ([www.3ders.org](http://www.3ders.org), 2015)

## Características

El método CLIP (continuo liquid interface production) elimina la fuerza tanto de adhesión como la del vacío utilizando una lámina permeable al oxígeno lo que permite que el objeto se forme de forma continua en vez de generarse capa por capa. (www.3ders.org, 2015)

## Ventajas

- Tiempo de impresión muy corto
- Muy buena calidad de impresión
- No utiliza mucha resina

## Desventajas

- Costoso
- Complejo

## Método de lámina flexible

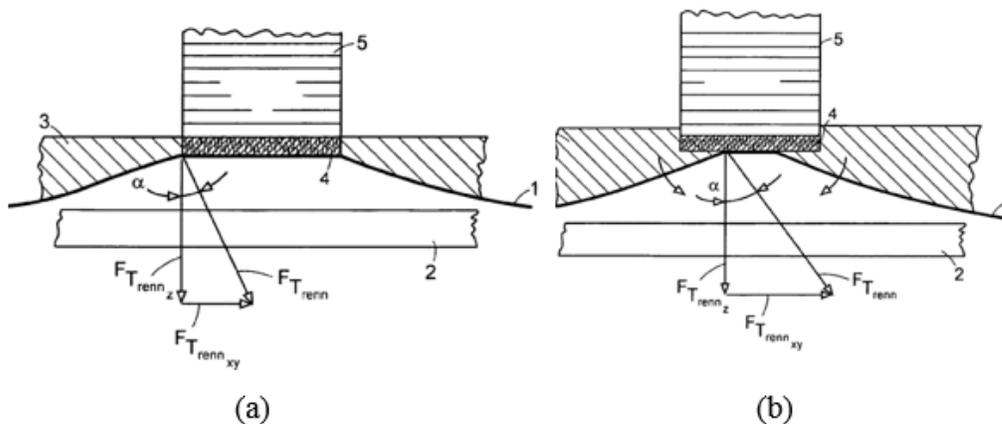


Figura. 2.13. Principio de funcionamiento del método de separación por lámina flexible. (a) Inicio de la separación, (b) Transcurso de la separación. (United States Patente n° US 7,195,472 B2 , 2007)

## Características

Esta capa de material flexible también llamada ventana de contacto se encuentra en el fondo de la cuba debajo de la fotorresina en el plano de construcción. El material líquido fotocurable es endurecido capa por capa mediante la exposición selectiva a rayos UV el problema se produce al querer separar el objeto de la ventana de contacto, para solucionar este problema se utiliza el

efecto de pelado es decir el material flexible se despegar de la capa endurecida de fotoresina con la extracción del objeto

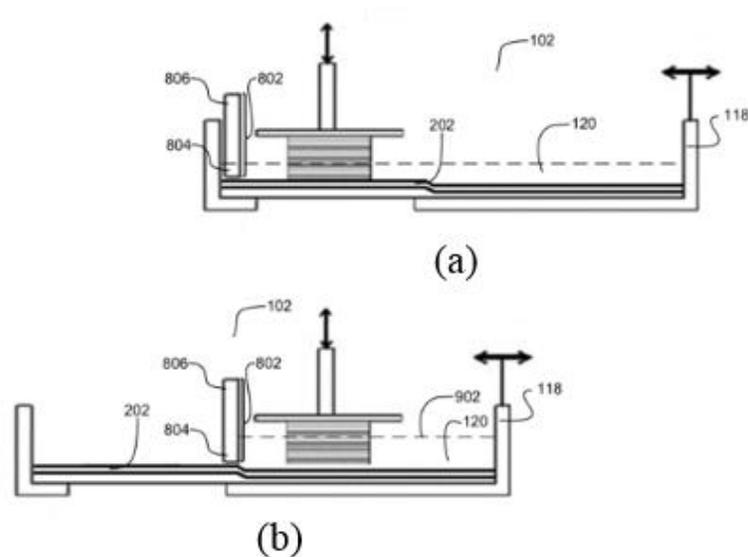
### Ventajas

- Bajo costo
- Fácil de implementar
- No utiliza gran cantidad de resina

### Desventajas

- Tiempo de impresión considerable

### Método de desplazamiento lateral



*Figura. 2.14. Movimiento horizontal para eliminar la fuerza de vacío, (a) Vista lateral esquemática de la posición inicial del deslizador, (b) Vista lateral esquemática del desplazamiento del deslizador.*

*(United States Patente n° US 2013/0292862 A1, 2013)*

### Características

En este método se minimiza la fuerza de adhesión utilizando un material hidrofóbico que reduce la adherencia de la capa del material curado a la ventana de contacto y para eliminar la fuerza

de vacío el deslizador horizontal aleja la pieza de la ventana de contacto eliminando así la fuerza de vacío que se genera entre dos planos unidos por un líquido. La *figura 2.14* muestra en (a) la posición inicial del deslizador y en (b) el desplazamiento del deslizador para eliminar el vacío generado entre la capa curada y la ventana de contacto según (United States Patente n° US 2013/0292862 A1, 2013)

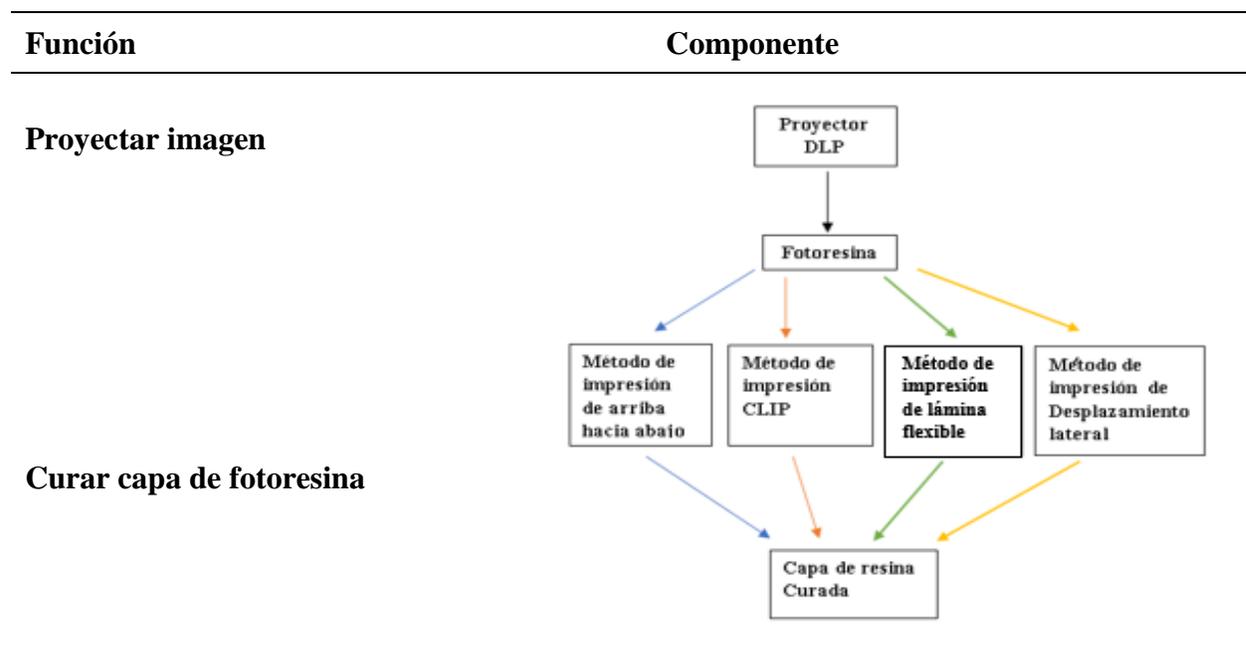
### Ventajas

- Elimina casi por completo las fuerzas de adhesión.
- No utiliza gran cantidad de resina.

### Desventajas

- Tiempo de impresión alto
- Complejo

Tabla 2.17. Alternativas módulo 3.



### Evaluación y selección de la alternativa

Para la evaluación de las distintas soluciones de módulo 3 a continuación se enlistan los criterios más importantes.

1. Complejidad
2. Costo
3. Calidad impresión
4. Uso de resina
5. Velocidad de impresión

Tabla 2.18. Evaluación de criterios, módulo 3.

	Complejidad	Costo	Calidad impresión	Uso de resina	Velocidad de impresión	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Complejidad</b>		0	0	0	0,5	1,5	0,1
<b>Costo</b>	1		0	0	0,5	2,5	0,166
<b>Calidad de impresión</b>	1	1		1	1	5	0,333
<b>Uso de resina</b>	1	1	0		1	4	0,266
<b>Velocidad de impresión</b>	0,5	0,5	0	0		2	0,133
						15	

Complejidad<Costo<Calidad impresión>Uso de resina>Velocidad de impresión

A continuación, se evalúa cada solución respecto a los diferentes criterios.

Tabla 2.19. Evaluación de soluciones con respecto a complejidad, módulo 3

Complejidad	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>Solución 1</b>		1	1	1	4	0,4
<b>Solución 2</b>	0		0	0	1	0,1
<b>Solución 3</b>	0	1		1	3	0,3
<b>Solución 4</b>	0	1	0		2	0,2
				<b>Suma</b>	10	

Solución 1>Solución 2<Solución 3<Solución 4

Tabla 2.20. Evaluación de soluciones con respecto a costo, módulo 3

Costo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1	0,5	1	3,5	0,388
Solución 2	0		0	0	1	0,111
Solución 3	0,5	1		1	3,5	0,388
Solución 4	0	0	0		1	0,111
				<b>Suma</b>	9	

Solución 1>Solución 2<Solución 3>Solución 4

Tabla 2.21. Evaluación de soluciones con respecto a calidad de impresión, módulo 3

Calidad de impresión	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0,5	0,5	0,5	2,5	0,25
Solución 2	0,5		1	1	3,5	0,35
Solución 3	0,5	0		0,5	2	0,2
Solución 4	0,5	0	0,5		2	0,2
				<b>Suma</b>	10	

Solución 1<Solución 2>Solución 3=Solución 4

Tabla 2.22. Evaluación de soluciones con respecto a uso de resina, módulo 3

Uso de resina	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	0	0	1	0,1
Solución 2	1		0,5	1	3,5	0,35
Solución 3	1	0,5		1	3,5	0,35
Solución 4	1	0	0		2	0,2
				<b>Suma</b>	10	

Solución 1<Solución 2=Solución 3>Solución 4

Tabla 2.23. Evaluación de soluciones con respecto a velocidad de impresión, módulo 3

Velocidad de impresión	Solución 1	Solución 2	Solución 3	Solución 4	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	1	1	3	0,3
Solución 2	1		1	1	4	0,4
Solución 3	0	0		0,5	1,5	0,15
Solución 4	0	0	0,5		1,5	0,15
				<b>Suma</b>	10	

Solución 1<Solución 2>Solución 3=Solución 4

Tabla 2.24. Conclusiones, módulo 4.

	Complejidad	Costo	Calidad impresión	Uso de resina	Velocidad de impresión	$\Sigma$	Prioridad
<b>Solución 1</b>	0,04	0,064	0,083	0,026	0,04	0,254	3
<b>Solución 2</b>	0,01	0,018	0,116	0,093	0,053	0,274	2
<b>Solución 3</b>	0,03	0,064	0,066	0,093	0,02	0,291	1
<b>Solución 4</b>	0,02	0,018	0,066	0,053	0,02	0,178	4

Por consiguiente, se selecciona la solución 3 por las ventajas que presenta en cuanto a aprovechamiento y ahorro de la resina. Con este método se utiliza únicamente la cantidad de resina para la impresión de cada objeto, además el tamaño del depósito de la resina no limita el tamaño del objeto que se va a imprimir.

#### 2.2.4. Módulo 4

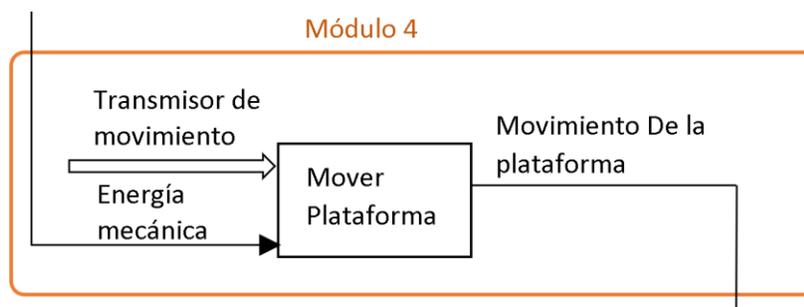


Figura. 2.15. Módulo 4.

Para el movimiento de la plataforma se tiene las siguientes opciones.

#### Tornillo de potencia



Figura. 2.16. Tornillo de potencia. (Gonzales, 2011)

## Características

El tornillo de potencia sirve para transformar un movimiento angular en un movimiento lineal consta de dos piezas un tornillo y una tuerca. En el cual existe un movimiento de traslación de la tuerca y un movimiento de rotación del tornillo respecto al mismo eje.

El tornillo de potencia tiene una precisión estándar de  $\pm 100$  micras cada 300 mm y una eficiencia del 41-50%. (Gonzales, 2011)

## Ventajas

- Costo medio
- Fácil adquisición

## Desventajas

- Eficiencia media
- Precisión media

## Husillo de bolas



*Figura. 2.17. Husillo de bolas. (Specialty Motions, 2015)*

El husillo de bolas es un actuador lineal mecánico sumamente eficiente que no genera pérdidas por fricción debido a que usa rodamientos de bolas que realizan un movimiento basculante entre el eje del husillo y la tuerca ahorrando energía al actuador.

Poseen una precisión estándar de hasta 75 micrómetros cada 300mm de largo y una eficiencia entre 90-95%. (Specialty Motions, 2015)

### **Ventajas**

- Alta precisión
- Alta eficiencia
- Bajo rozamiento
- Paso extenso

### **Desventajas**

- Alto costo.

### **Varilla roscada tuerca**



*Figura. 2.18. Varilla roscada. (FRAX 3d, 2018)*

### **Características**

Las varillas roscadas son barras que son roscadas en ambos extremos o a lo largo de toda su longitud. La precisión estándar del eje roscado es  $\pm 0.5$  mm cada 300 milímetros de largo. Su eficiencia mecánica llega a ser del 25 %. (FRAX 3d, 2018)

### Ventajas

- Bajo costo

### Desventajas

- Paso pequeño
- Poco eficiente
- Sufre desgaste

Tabla 2.25. Evaluación de criterios, módulo 4.

	Precisión	Eficiencia	Costo	Velocidad	$\Sigma+1$	Ponderación
Precisión		0,5	1	1	3,5	0,35
Eficiencia	0,5		0,5	0,5	2,5	0,25
Costo	0	0,5		1	2,5	0,25
Velocidad	0	0,5	0		1,5	0,15
				<b>Suma</b>	10	

Precisión > Eficiencia = Costo < Velocidad

Tabla 2.26. Evaluación de soluciones con respecto a precisión, módulo 4.

Precisión	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	1	2	0,333
Solución 2	1		1	3	0,5
Solución 3	0	0		1	0,167
			<b>Suma</b>	6	

Solución 1 < Solución 2 > Solución 3

Tabla 2.27. Evaluación de soluciones con respecto a eficiencia, módulo 4.

Eficiencia	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	1	2	0,333
Solución 2	1		1	3	0,5
Solución 3	0	0		1	0,167
			<b>Suma</b>	6	

Solución 1 < Solución 2 > Solución 3

Tabla 2.28. Evaluación de soluciones con respecto a costo, módulo 4.

Costo	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		1	0	2	0,333
Solución 2	0		0	1	0,167
Solución 3	1	1		3	0,5
			<b>Suma</b>	6	

Solución 1<Solución 2<Solución 3

Tabla 2.29. Evaluación de soluciones con respecto a velocidad, módulo 4.

Velocidad	Solución 1	Solución 2	Solución 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución 1		0	1	2	0,333
Solución 2	1		1	3	0,5
Solución 3	0	0		1	0,167
			<b>Suma</b>	6	

Solución 1<Solución 2>Solución 3

Tabla 2.30. Conclusiones módulo 4.

	Precisión	Eficiencia	Costo	Velocidad	$\Sigma$	Prioridad
Solución 1	0,117	0,0833	0,083	0,05	0,333	2
Solución 2	0,175	0,125	0,041	0,075	0,416	1
Solución 3	0,0583	0,041	0,125	0,025	0,25	3

En conclusión, la mejor solución es la número 2.

### 2.2.5. Módulo 5

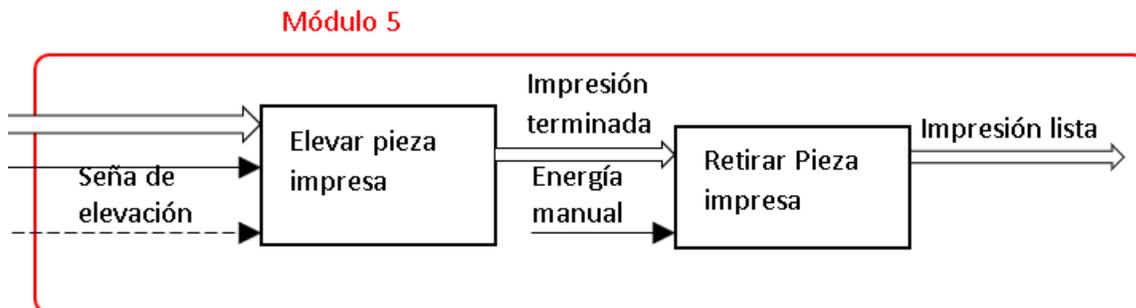


Figura. 2.19.Módulo 5.

En este módulo se prescinde el método de selección por tener una única solución que es retirar la impresión manualmente.

## 2.3. Diseño del mecanismo

### 2.3.1. Deslizador Lineal

De acuerdo al método de impresión seleccionado en la *sección 2.2.4*, se utiliza para su movimiento un husillo de bolas que cumpla con la función de elevar y separar la capa curada de la ventana de construcción.

En la *figura 2.20* se muestra el deslizador lineal con el nombre de los componentes principales con los que se hace referencia a continuación en los resultados.

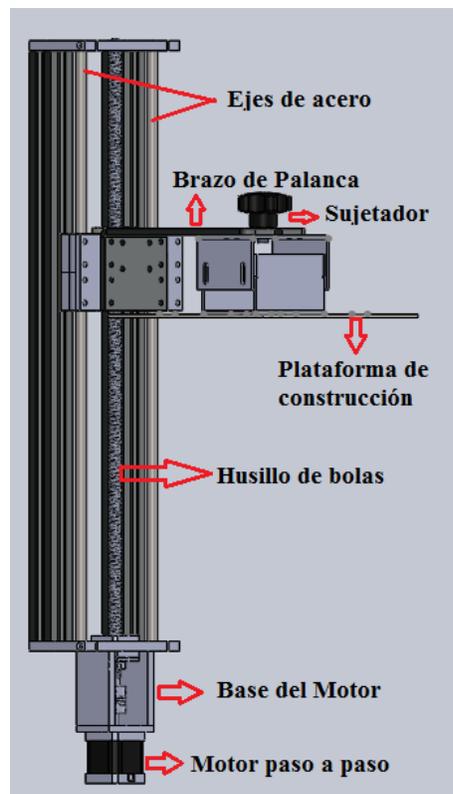
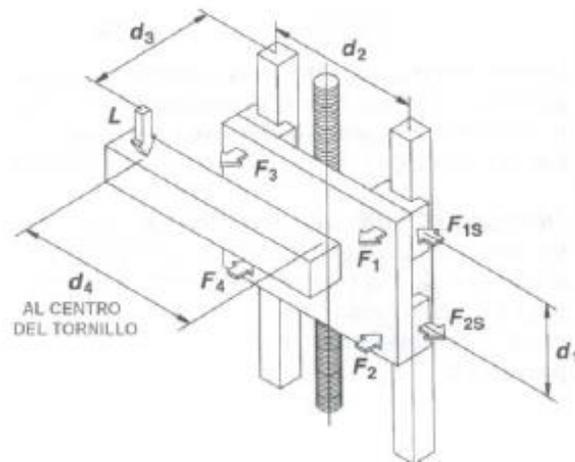


Figura. 2.20. Deslizador Lineal.

Para determinar la fuerza que se está aplicando en los ejes del deslizador se utilizan las siguientes ecuaciones aplicadas para este tipo de mecanismo, considerando el siguiente análisis según (Quinmbita & Sánchez , 2008) que se muestra en la *figura 2.21*.



*Figura. 2.21. Traslación vertical con carga vertical.*

La configuración de carga vertical que se muestra en la figura 2.21 tiene las siguientes ecuaciones para determinar la carga que se aplica en los rodamientos.

*Ecuación 2.1. Fuerza 1 de reacción. (Thomson Industries, Inc, 2017)*

$$F_1 = F_3 = \frac{L}{2} \left( \frac{d_3}{d_1} \right)$$

*Ecuación 2.2. Fuerza 1s de reacción. (Thomson Industries, Inc, 2017)*

$$F_{1s} = F_{3s} = \frac{L}{2} \left( \frac{d_4}{d_2} \right)$$

*Ecuación 2.3. Comparación de reacciones. (Thomson Industries, Inc, 2017)*

$$F_1 = F_3 = \frac{L}{2} \left( \frac{d_4}{d_2} \right)$$

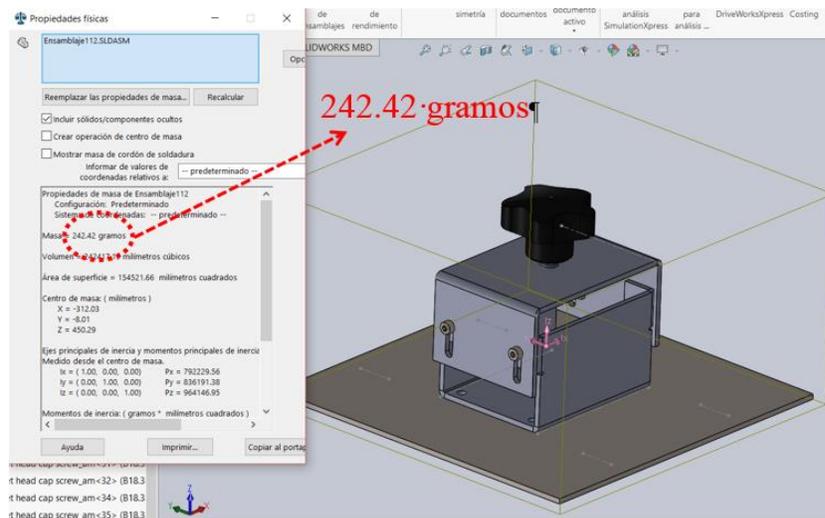
Donde:

\$L = W = \text{Fuerza ejercida en Newton}\$

$d_1, d_2, d_3$  y  $d_4 =$  dimensiones del deslizador lineal

$F_1, F_{1s}, F_{3s}, F_3 =$  Fuerzas de reacción ejercidas sobre la estructura del deslizador lineal

Además, para determinar la fuerza se necesita conocer el peso de la plataforma de construcción, que se obtiene utilizando el software comercial SOLIDWORKS®. La *figura 2.22* muestra los elementos que interviene en la plataforma de construcción y el peso que se obtiene es igual a 242.42 g.



*Figura. 2.22. Cálculo del peso de la plataforma de construcción utilizando el software comercial. SOLIDWORKS®.*

En este caso el peso total ( $W$ ) es igual al peso del objeto más el peso de la resina, sumando los dos parámetros se tienen un peso de 3292.42 g y la fuerza correspondiente al peso total es igual a 32.29 N.

Para calcular las fuerzas de reacción del deslizador lineal se toma los siguientes datos que se muestran a continuación en la *figura 2.23*.

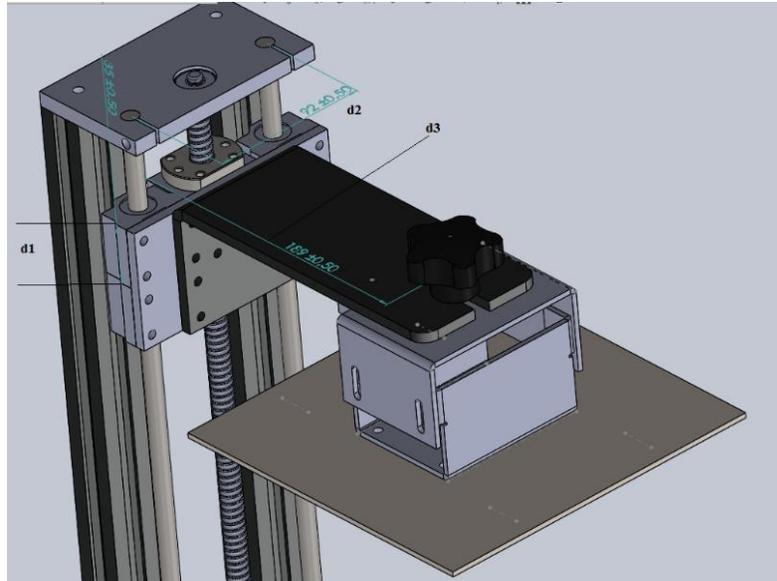


Figura. 2.23. Dimensiones para el cálculo del momento torsor.

$$L = W$$

$$W = 32.29N$$

$$d1 = 35mm$$

$$d2 = 92mm$$

$$d3 = 189mm$$

$$d4 = 0mm$$

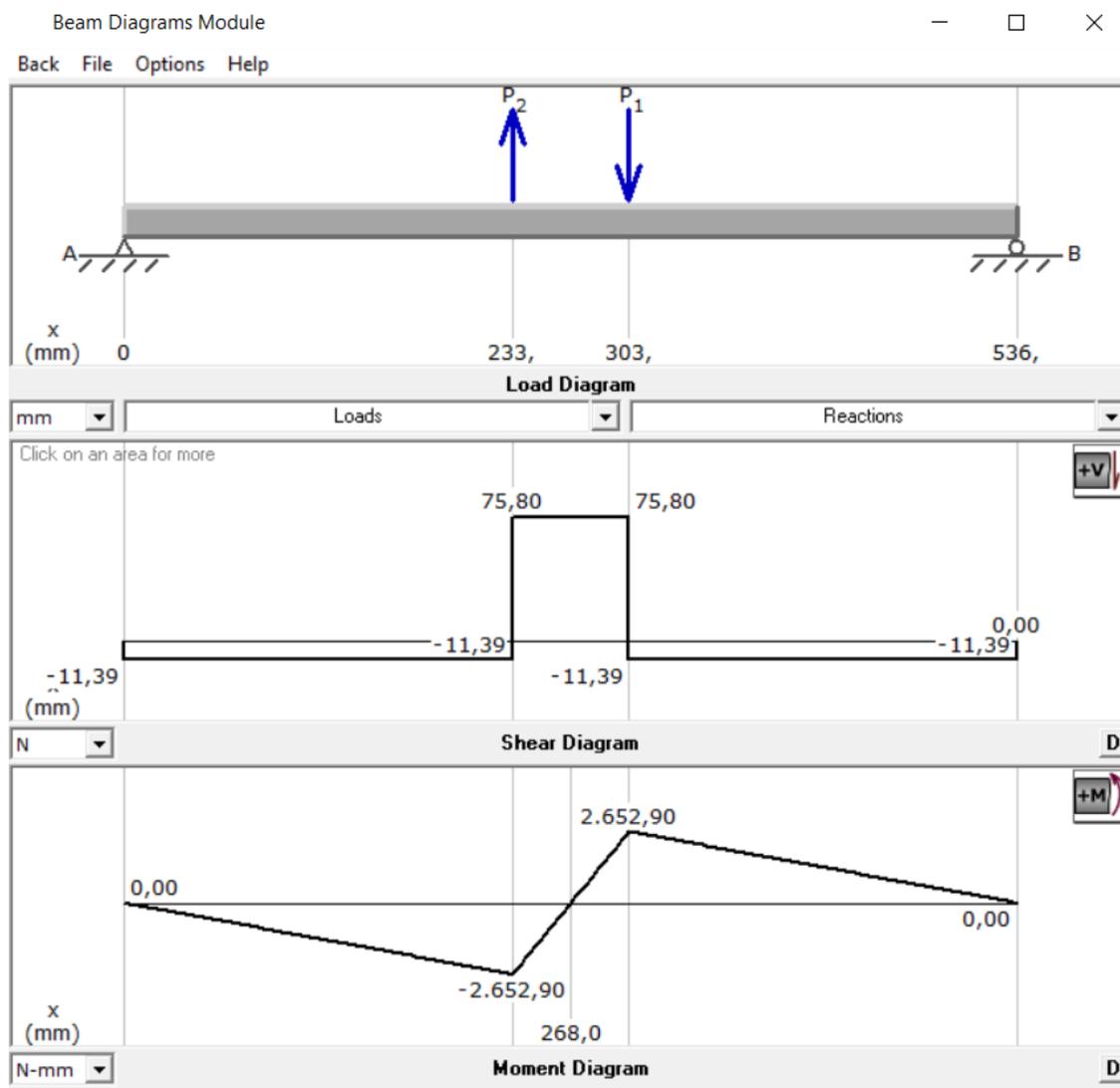
Aplicando la ecuación 2.1 se obtiene el valor de las fuerzas de reacción.

Ecuación 2.4. Fuerza de reacción del deslizador lineal.

$$F_1 = F_3 = \frac{32.29N}{2} \left( \frac{189 \text{ mm}}{35 \text{ mm}} \right) = 87.183N$$

Dado que  $d_4$  es igual a 0 no se obtiene los valores de las fuerzas  $F_{1s}$  y  $F_{3s}$ .

El dato que se obtiene de la *ecuación 2.4* y los datos de la *figura 2.23* se representa en la *figura 2.24* que corresponde al diagrama de cuerpo libre de fuerzas y momentos para los ejes del deslizador lineal eje Z.



*Figura. 2.24.* Diagrama de cuerpo libre de fuerzas y momentos para los ejes del deslizador lineal eje Z.

El momento flector máximo que se obtiene es igual a 2.652,9 N. Se toma este valor para calcular el esfuerzo máximo que soporta el material para esto se utiliza la *ecuación 2.5*.

*Ecuación 2.5.* Esfuerzo normal máximo. (Mott, 2008)

$$\sigma_{max} = \frac{Sy}{n}$$

Donde:

$S_y \left( \frac{N}{mm^2} \right) = 276$  Resistencia a la fluencia del acero inoxidable grado 304.

$n = 2$  Factor de seguridad considerado entre 1.5 y 2.

Entonces se obtiene:

*Ecuación 2.6. Esfuerzo máximo del acero inoxidable grado 304.*

$$\sigma_{max} = 103 \frac{N}{mm^2}$$

El módulo de resistencia para el material seleccionado se calcula con la *ecuación 3.7*

*Ecuación 2.7. Módulo de resistencia. (Mott, 2008)*

$$S = \frac{M}{\sigma_{max}}$$

Donde:

$M (N/mm) = 2.652,9$  Momento flector máximo

$\sigma_{max} (N/mm^2) = 138$  Esfuerzo normal máximo

Entonces:

$$S = \frac{2652.9 N/mm}{103 N/mm^2}$$

*Ecuación 2.8. Valor del Módulo de resistencia.*

$$S = 25.7 mm^3$$

El diámetro del eje se calcula con la *ecuación 3.9* que se muestra a continuación:

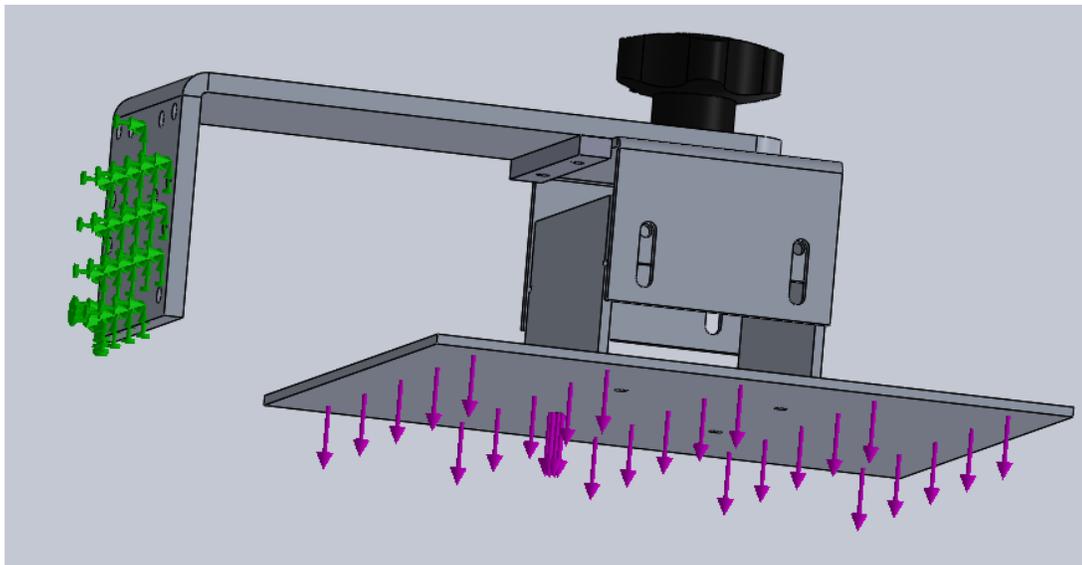
*Ecuación 2.9. Diámetro del eje.*

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot S}{\pi}}$$

Utilizando la *ecuación 3.9* se obtiene el diámetro del ángulo de 6.4 mm, considerando que en el mercado no existe tal diámetro, se escoge uno de 10 mm de amplia comercialización en nuestro medio.

### 2.3.2. Diseño de la plataforma de construcción

La plataforma de construcción es una parte constitutiva del deslizador lineal y en la *figura 2.25* se aplica una fuerza 29,43 N que corresponde a los 3 kg del peso de la resina y la restricción en el lado izquierdo que indica la sujeción con el deslizador lineal.



*Figura. 2.25. Aplicación de la fuerza y restricciones de la plataforma de construcción.*

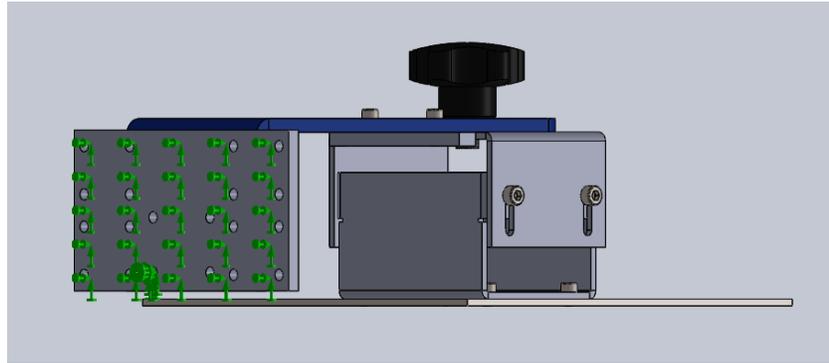
### 2.4. Análisis de elementos finitos

A través del análisis de elementos finitos se determina la distribución de esfuerzos, factor de seguridad y desplazamientos.

Se realiza el análisis de elementos finitos de la plataforma de construcción ya que es la parte más crítica de la estructura de la impresora ya que soporta el peso máximo de la resina conforme se forma el objeto mientras se desliza de abajo hacia arriba.

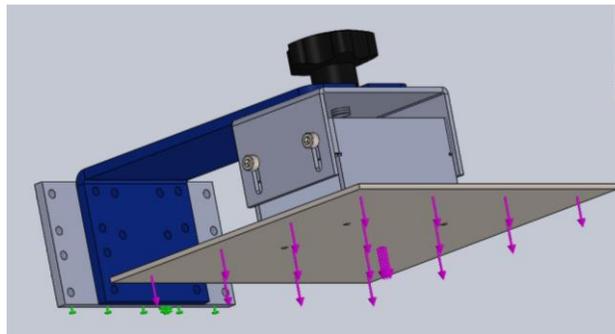
### 2.4.1. Aplicación de la fuerza y restricciones

El mecanismo tendrá una restricción fija en la base inferior que indica que está sujeto al deslizador lineal del eje Z, como se muestra en la *figura 2.26*.



*Figura. 2.26. Aplicación de las restricciones del mecanismo.*

En la simulación realizada con el software comercial SOLIDWORKS®, se aplica la fuerza de 29.4 N en la plataforma de construcción equivalente a 3 kg de fotoresina como se muestra en la *figura 2.27*.



*Figura. 2.27. Aplicación de la fuerza de 29.4 N.*

### 2.4.2. Asignación de materiales

Los materiales empleados en esta parte del mecanismo deben tener las características de ser anticorrosivos y ligeros para no causar esfuerzos innecesarios en el motor en este caso la mejor opción es el aluminio.

## Aluminio

Las propiedades que favorecen la selección del aluminio (Al) y sus aleaciones son su alta relación de resistencia-peso, resistencia a la corrosión y maquinabilidad.

Para la simulación de esta parte de la impresora se utiliza Aluminio 6063-T6, con las siguientes propiedades mecánicas.

*Tabla 2.31. Propiedades mecánicas del aluminio 6063 T6.*

<b>Módulo elástico</b>	69 GPa
<b>Módulo cortante</b>	25,8 GPa
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0,33 Adimensional
<b>Límite de tracción</b>	240 MPa
<b>Densidad de masa</b>	2700 Kg/m <sup>3</sup>

### 2.4.3. Análisis de convergencia de la simulación de elementos finitos

A continuación en la *tabla 2.32* se muestra los datos obtenidos de varias iteraciones del análisis de esfuerzos vs números de elementos finitos.

*Tabla 2.32. Tabla de convergencia de la simulación de elementos finitos.*

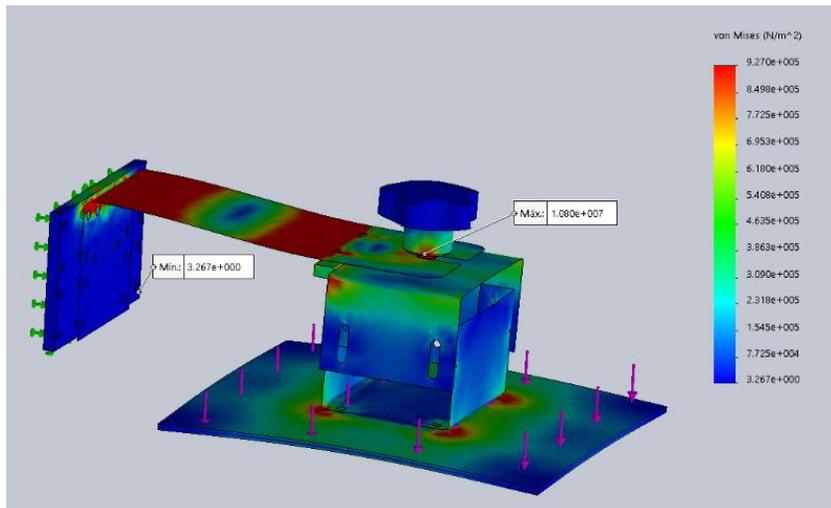
<b>Mallado</b>	<b>Nro. Elementos</b>	<b>Tensión de Von Mises [MPa]</b>	<b>Error Porcentual</b>
1	23125	11,45	
2	24926	10,16	2,53
3	30639	11,58	3,76
4	35847	10,58	3,63
5	38140	10,13	1,41
6	43050	12,57	3,34
7	48058	10,44	2,22
8	54210	10,71	2,58
9	57476	10,8	0,84
10	68281	10,03	2,12

Se realiza un análisis de convergencia con los datos de esfuerzos esto se realiza tomando diferentes mallas en varias iteraciones del análisis de elementos finitos y se obtiene que la malla 9 de la *tabla 2.32* contiene 57476 nodos y posee un error porcentual de 0.84% respecto a la

mallado anterior con 54210 nodos. El error porcentual es menor al 5%, por lo que se toma este mallado como el mejor.

#### 2.4.4. Esfuerzo máximo

En la *figura 2.28* se muestra la distribución de esfuerzos al aplicar la fuerza de 29,43 N y permite observar el lugar donde se concentra la carga. La mayor concentración de esfuerzos ocurre entre el sujetador y el brazo de palanca.



*Figura. 2.28. Distribución de esfuerzos en la plataforma de construcción.*

#### 2.4.5. Desplazamientos

En la *figura 2.29* se muestra los resultados del análisis de desplazamientos, donde se puede apreciar que el desplazamiento máximo es de  $8.845e^{-2} \text{ mm}$ . Lo que se considera adecuado para el diseño, ya que no afecta en la precisión porque la resolución máxima de la impresora 3D es de 0.05 mm y este desplazamiento afectaría de forma mínima a la impresión.

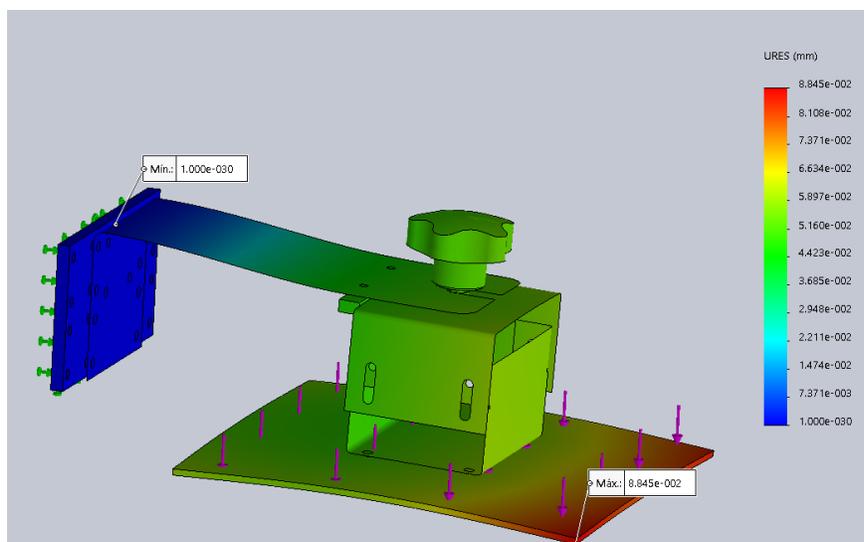


Figura. 2.29. Desplazamientos en la plataforma de construcción.

#### 2.4.6. Factor de seguridad

La figura 2.30 muestra el factor de seguridad mínimo igual a 2.85, lo que indica que el esfuerzo máximo no supera el límite elástico del material. El factor de seguridad se encuentra entre el sujetador y el brazo de palanca.

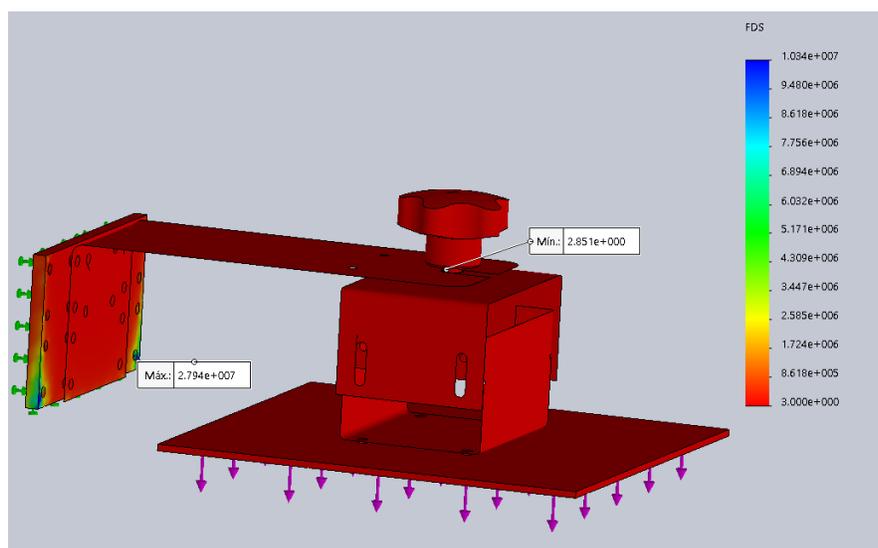


Figura. 2.30. Factor de seguridad mínimo de la plataforma de construcción.

## 2.5. Diseño de la cuba de la impresora

Para el diseño de la cuba de la impresora se selecciona el método según la metodología de la sección 2.2.3 y adicional a esto se utiliza un tensor como se muestra en la *figura 2.32* para estirar la lámina de material antiadherente y evitar que se flexione con el peso de la resina.

### Selección de la lámina para la base de la cuba.

Para la base de la cuba se toma los materiales que cumplan con las características esenciales para que la capa curada de resina no se adhiera a la lámina.

- Alta antiadherencia.
- Alta resistencia química.
- Temperatura máxima de uso continuo de 205° C.
- Lubricación en seco.

En este caso se selecciona dos materiales que cumplen con estos requisitos el FEP e el PFA.

En la *tabla 2.33* se aprecia las características de estos materiales.

*Tabla 2.33. Comparación de materiales para la base de la cuba.*

	<b>Copolímeros de perfluoroalcoxi (PFA)</b>	<b>Etileno-propileno fluorado (FEP)</b>
<b>Propiedades Mecánicas</b>		
Alargamiento a la Rotura (%)	300	300
Resistencia a la tracción (MPa)	25	14 - 30
<b>Resistencia Química</b>		
Ácidos - concentrados	Excelente	Excelente
Ácidos - diluidos	Excelente	Excelente
Álcalis	Excelente	Excelente
Alcoholes	Excelente	Excelente
Cetonas	Excelente	Excelente
Grasas y Aceites	Excelente	Excelente

Halógenos	Excelente	Excelente
Hidrocarburos Aromáticos	Excelente	Excelente

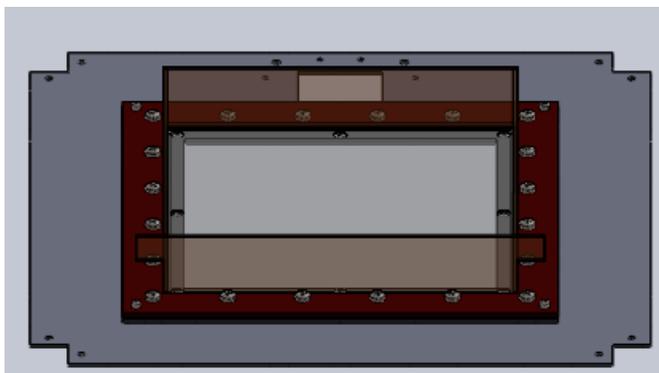
En este caso los dos materiales tienen propiedades mecánicas y una resistencia química similar por lo que se selecciona la lámina de FEP por su facilidad de adquisición y su bajo costo.

Las características de la lámina de FEP son las siguientes.

*Tabla 2.34. Lámina de FEP.*

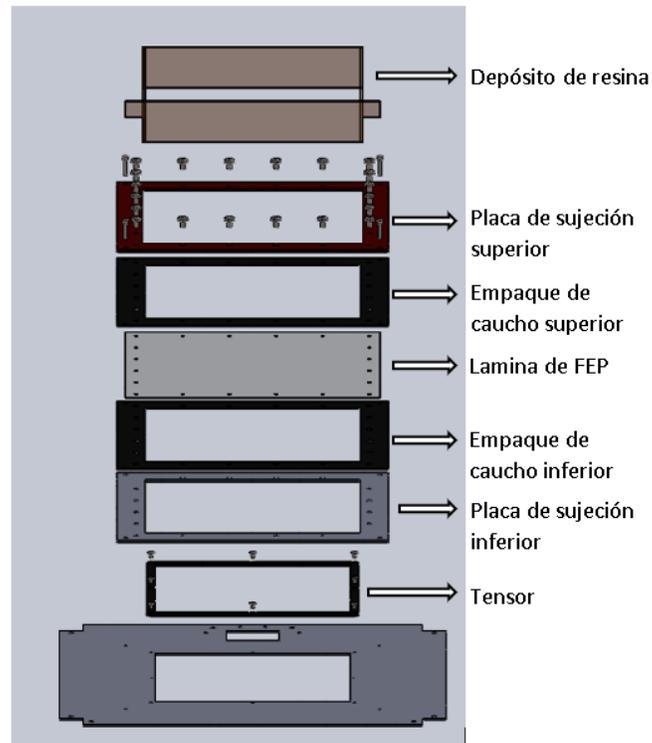
<b>Dimensión</b>	<b>24 in x 24 in</b>
<b>Espesor de la película</b>	.005 "
<b>Elongación%</b>	300%
<b>Transmisión solar</b>	96%

En la *figura 2.31* se muestra el diseño de la cuba de la impresora y la *figura 2.32* muestra el nombre de las capas y el material de cada una, cuya finalidad es sostener y estirar la lámina FEP.



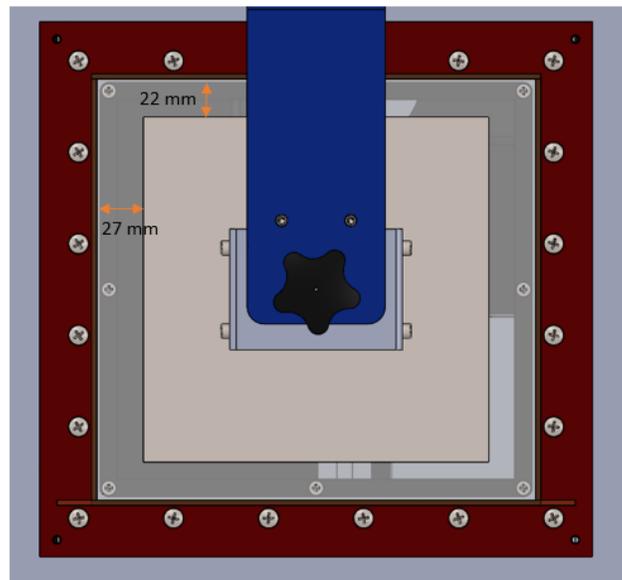
*Figura. 2.31. Cuba de la impresora.*

En la *figura 2.32* se indica las capas que conforman la cuba, la primera parte es el depósito de resina en donde se vierte la misma, la placa de sujeción superior junto a la placa de sujeción inferior aseguran la lámina de FEP mediante el uso de tornillos que comprimen los empaques de caucho para evitar fugas de resina y también que esta se deslice por efecto del movimiento de la plataforma de construcción.



*Figura. 2.32. Partes de la cuba de la impresora.*

La lamina de FEP es la parte esencial de la cuba esta capa hidrofóbica además de flexible es la que reduce la fuerza de separación de la plataforma con la capa curada de resina.



*Figura. 2.33. Espacio entre la cuba y la plataforma de construcción.*

El depósito de resina se diseña con un espacio entre la plataforma y los bordes para permitir que la resina fluya libremente en el interior. Para cada lado se deja un espacio es de 27 mm y 22 mm como se muestra en la *figura 2.33*.

El depósito está diseñado para un máximo de 3 litros de resina por lo cual la altura es de 50mm.

## **2.6.Sistema de Control**

### **2.6.1. Software NANODLP**

Como parte del sistema de control se selecciona el software NanoDLP con base a la sección 2.2.1, este software está basado en el sistema operativo rrasbian que proporciona varias posibilidades con respecto al control de una impresora 3D por estereolitografía. El mismo es Open Source es decir se lo puede utilizar libremente además se lo puede modificar para mejorar y tener un software adecuado para la necesidad de cada usuario. NanoDLP funciona con una tarjeta Raspberry Pi que tiene la función de procesar los archivos STL. Dividirlos en imágenes y enviarlos por la salida HDMI de la misma, a su vez software genera el código G según la programación de los parámetros de la impresión.

El sistema de control principalmente consta de dos partes una que es la Raspberry Pi que en este caso funciona como el computador para enviar la imagen al proyector y también para enviar el código G al Arduino para el control de los actuadores el uso de este software se indica en el anexo B manual de usuario.

En la siguiente figura 2.34 se muestra el diagrama de bloques del funcionamiento de la parte de control de la impresora.

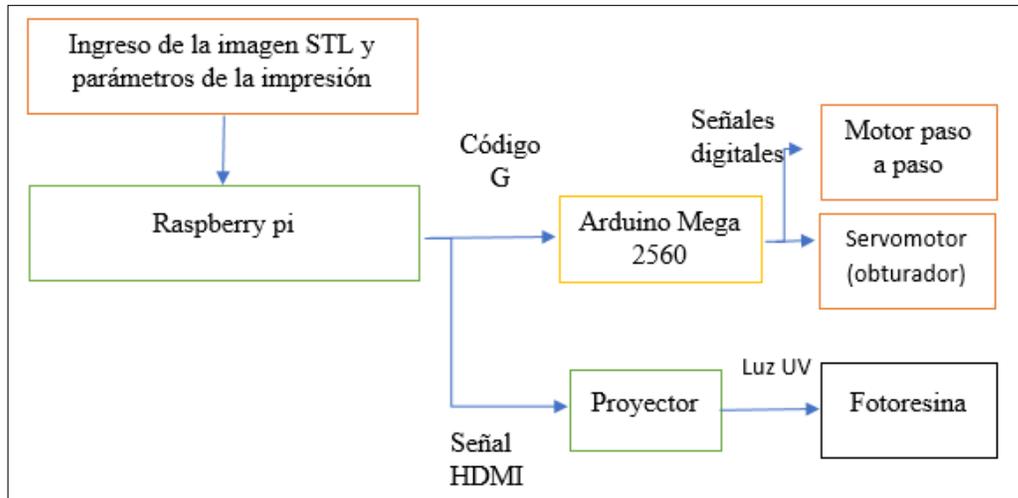


Figura. 2.34. Diagrama de bloques de control de la impresión 3D por estereolitografía.

## 2.6.2. Firmware MARLIN

Para el paso de código G a movimientos de los actuadores se utilizó el Firmware Marlin que es diseñado para impresoras 3D, la función que cumple en esta impresora es la de recibir el código G que envié la tarjeta Raspberry Pi por el puerto USB y activar las salidas digitales para mover tanto el servomotor que sirve de obturador, como para el movimiento del motor paso para formar las capas del objeto en 3D como se muestra en la figura 2.35 la configuración del Firmware Marlin se encuentra en anexo D.

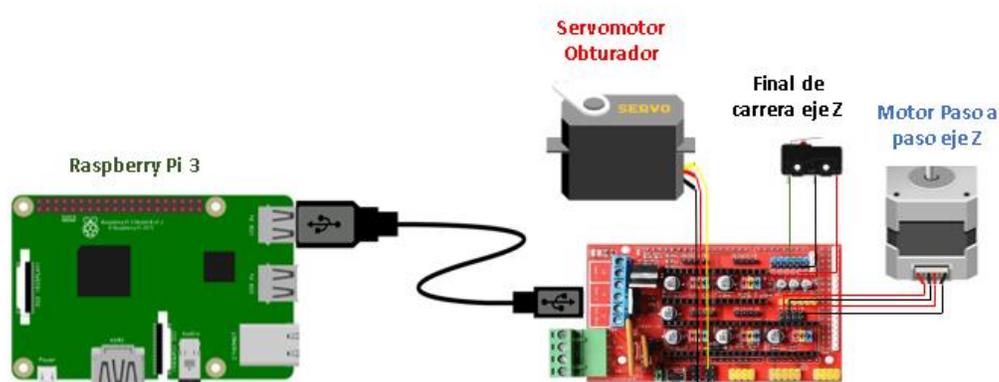


Figura. 2.35. Conexión Ramp 1.4.

### 2.6.3. Construcción del prototipo

Selección del proceso de manufactura.

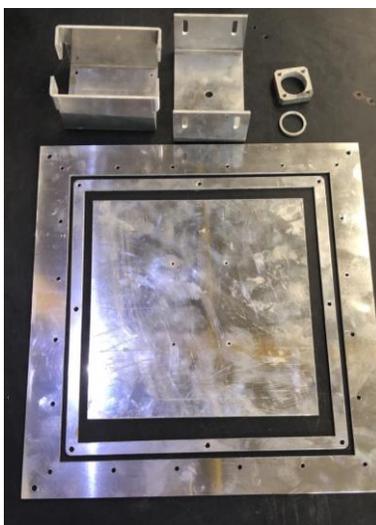
Para la selección del método de manufactura se tomaron en cuenta los siguientes métodos existentes en el mercado.

- Corte plasma.
- Corte por chorro de agua.
- Mecanizado CNC.

*Tabla 2.35. Selección del método de manufactura.*

Parámetros	Ponderación	Corte plasma		Corte por chorro de agua		Mecanizado CNC	
		Valor	Promedio	Valor	Promedio	Valor	promedio
<b>Espesor del corte</b>	50%	3	1,5	3	1,5	3	1,5
<b>Costo</b>	10%	2	0,2	2	0,2	1	0,1
<b>Acabado</b>	10%	1	0,1	3	0,3	3	0,3
<b>Tolerancia</b>	30%	1	0,3	3	0,9	3	0,9
<b>Total</b>			70%		97%		93%

El proceso de manufactura seleccionado es el corte por chorro de agua.



*Figura. 2.34. Piezas cortadas por chorro de agua.*

Las piezas manufacturadas por este método se aprecian en la *figura 2.34*

El ensamblaje de los componentes se encuentra en el Anexo G

#### 2.6.4. Análisis de costos

Para este proyecto se necesitó invertir los siguientes costos.

En la *tabla 2.36* se detallan los costos de la materia prima.

*Tabla 2.36. Costos de materia prima.*

<b>Detalle</b>	<b>Costo</b>
Plancha de aluminio 6 mm	30
Plancha de aluminio 3 mm	25
Plancha de acero inoxidable 6 mm	20
Plancha de acero galvanizado	50
Acrílico color ámbar	25
Acrílico color blanco	23
<b>Total</b>	<b>173</b>

En la *tabla 2.37* se detallan los costos de los insumos.

*Tabla 2.37. Costos de insumos.*

<b>Detalle</b>	<b>Costo</b>
Tornillos	5
Bisagras	14
Pin tura	25
<b>Total</b>	<b>44</b>

En la *tabla 2.38* se indican los costos de las partes mecánicas.

*Tabla 2.38. Costos de partes mecánicas.*

<b>Detalle</b>	<b>Costo</b>
Rodamientos lineales	28
Husillo de bolas	65
Rodamientos	10
<b>Total</b>	<b>113</b>

En la *tabla 2.39* se muestra los costos de las partes electrónicas.

*Tabla 2.39. Costos de partes electrónicas.*

<b>Detalle</b>	<b>Costo</b>
Ramp 1.4	14
Motor paso a paso nema 17	20
Arduino mega 2560	10
Proyector	650
Fuente de PC	15
Final de carrera	2
Driver para motor paso	2
Cable HDMI	10
Cable rj45	3
<b>Total</b>	<b>706</b>

En la *tabla 2.40* se muestra los costos por manos de obra.

*Tabla 2.40. Costos de mano de obra.*

<b>Detalle</b>	<b>Costo</b>
Corte laser piezas de acrílico	30
Corte por chorro de agua	250
Perforado y roscado de piezas	20
Doblado de piezas	10
<b>Total</b>	<b>310</b>

En la *tabla 2.41* se muestra el costo total de la impresora 3D.

*Tabla 2.41. Costo Total*

<b>Detalle</b>	<b>Costo</b>
Materia Prima	173
Insumos	44
Partes mecánicas	113
Partes electrónicas	706
Mano de obra	310
<b>Total</b>	<b>1346</b>



### Capítulo III

## 3. Pruebas de funcionamiento

Para probar el funcionamiento de la impresora 3D DLP se realizó las impresiones de probetas para un ensayo de tracción.

### Probeta

La probeta tiene las siguientes dimensiones basados en la norma ASTM D 638 – 02<sup>a</sup>, como se muestra en la *figura 3.1*.

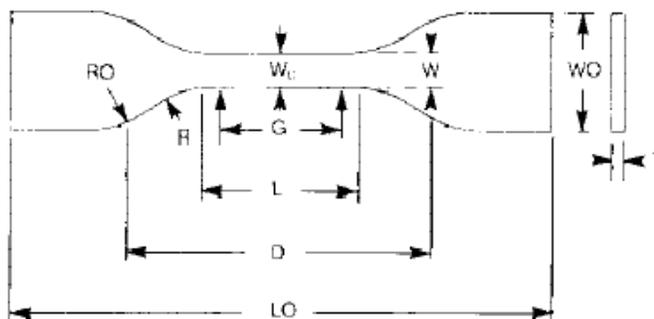


Figura. 3.1. Probeta con las normas ASTM D 638 - 02a.

En la tabla 3.1 se muestra las dimensiones para las probetas según la norma ASTM D 638 -02a.

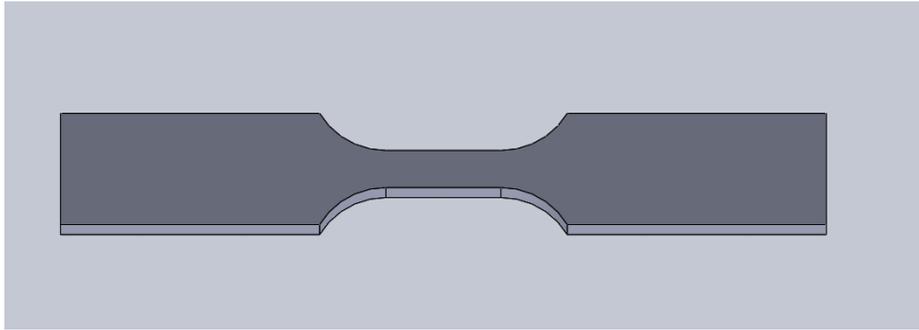
Tabla 3.1. Dimensiones del espécimen para el espesor de las probetas

Dimensions(see drawings)	Specimen Dimensions for Thickness, T, mm (in.) <sup>A</sup>					Tolerances
	7(0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl		4(0.16) or under	
	Type I	Type II	Type III	Type IV <sup>B</sup>	Type V <sup>C,D</sup>	
W- With of narrow section <sup>E,F</sup>	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	±0.5 (±0.02) <sup>B,C</sup>
L-Length of narrow section	50 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	±0.5 (±0.02) <sup>C</sup>
WO-Width overall, min <sup>G</sup>	19 (0.75)	19 (0.75)	29(1.13)	19 (0.75)	.....	+6.4 (+0.25)
WO-Width overall, min <sup>G</sup>	.....	.....	.....	.....	9.53 (0.375)	±3.18 (+0.125)
LO-Length overall, min <sup>H</sup>	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G-Gage length <sup>I</sup>	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	.....	7.62 (0.300)	±0.25 (±0.010) <sup>C</sup>
G-Gage length <sup>I</sup>	.....	.....	.....	25 (1.00)	.....	±0.13 (±0.005)
D-distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) <sup>J</sup>	25.4 (1.0)	±5 (±0.2)
R-Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	±1 (±0.04) <sup>C</sup>
RO-Outer radius(Type IV)	.....	.....	.....	25 (1.00)	.....	±1 (±0.04)

<sup>A</sup>Thickness, T, shall be 3.2 ± 0.4 mm (0.13 ± 0.02in.) for all types of molded specimens, and for other Types I y II specimens where possible. If specimens are machined from sheets or plates, thickness, T, may be the thickness of the sheet or plate provided this does not exceed the range stated for the intended specimen type. For sheets of nominal thickness greater than 14 mm (0.55in.) the specimens shall be machined 14 ± 0.4mm (0.55 ± 0.02in) in thickness, for use with the Type III.

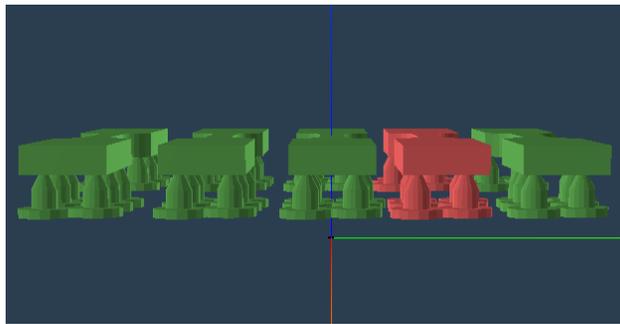
Por la limitación de material para la fabricación de probetas se seleccionó la tipo V.

Una vez seleccionado el modelo se procede a diseñar en el software SolidWorks como se aprecia en la *figura 3.2*.



*Figura. 3.2. Modelo 3D de la probeta en SolidWorks.*

Debido a que la impresión se pega de manera muy fuerte a la plataforma y esto puede afectar al momento de sacarla se añadió soportes en el software NanoDLP para evitar el riesgo de ruptura como se aprecia en la *figura 3.3*.



*Figura. 3.3. Probetas con soportes.*

Para realizar el análisis de resultados de la impresora se realizaron 3 modelos de probetas con diferente número de capas cada una de 5 ejemplares como se aprecia en la *figura 3.4*.



Figura. 3.4. Probetas impresas.

### Tablas de comparación de probetas.

Tabla 3.2. Resultados de la impresión respecto al espesor.

Número de muestra	Número de capas	Software	Impresora	Error(mm)
1	32	3,2	3,2	0
2	110	3,2	3,3	0,1
3	164	3,2	4	0,8

Tabla 3.3. Resultados de la impresión respecto al largo.

Número de muestra	Número de capas	Software	Impresora	Error(mm)
1	32	63,5	62,5	1
2	110	63,5	62,5	1
3	164	63,5	62,5	1

Tabla 3.4. Resultados de la impresión respecto al ancho.

Número de muestra	Número de capas	Software	Impresora	Error(mm)
1	32	9,53	9,5	0,03
2	110	9,53	9,5	-0,1
3	164	9,53	9,5	0,03

Como se aprecia en las probetas no varían las dimensiones en los ejes XY solo varían en el ancho debido a las características de curado de la resina.

Para la validación de la impresión se comparó el acabado superficial de una pieza impresa en la impresora 3D por estereolitografía con el acabado superficial de una pieza impresa en la impresora Cube 3D.



*Figura. 3.5. Impresión 3D, (a) impresión 3D por estereolitografía, (b) impresión 3D por el método de deposición fundido.*

El análisis se lo realizó utilizando un microscopio con una magnificación de 60X, los resultados se muestran la *figura 3.5*, y se observa en la *figura 3.5 (a)* que la impresión por estereolitografía tiene menos rugosidad que la impresa por FDM y por lo tanto un mejor acabado.

Una vez que se realiza la validación de la impresión se sabe que el acabado superficial es excelente utilizando la impresora 3D por estereolitografía. La *figura 3.6* muestra una probeta impresa en esta impresora.



*Figura. 3.6. Calidad de la impresión de la probeta.*

## Capítulo IV

### 4. Conclusiones y recomendaciones

#### 4.1. Conclusiones

- Se determinó en la sección 2.2.2 que la mejor solución para la impresión es la de lámina flexible debido a su costo, baja complejidad, calidad de impresión y velocidad de impresión además de esto se concluyó que el mejor mecanicismo para la elevación de la plataforma de construcción es el husillo de bolas ya que tiene una presión de 75 micrómetros cada 300 mm de largo además de una eficiencia de 0.9%.
- Se concluye que los materiales utilizados para la construcción de la estructura del prototipo son los adecuados, ya que en el análisis de elementos finitos se obtiene un factor de seguridad mínimo de 2.85, y el desplazamiento máximo es de  $8.845e^{-2} \text{ mm}$ , por lo que se puede garantizar que la impresora 3D podrá soportar la máxima carga de 3 kg de fotoresina sin riesgo a falla estructural.
- Debido a la geometría de los elementos mecánicos para su manufactura la mejor opción fue el corte por chorro de agua ya que este tiene un costo de 1 a 2 en comparación con el mecanizado CNC, y tiene una precisión de 0.1mm.
- El software NanoDLP cumple con muchas ventajas en cuanto a la generación del código G y la generación de imágenes por capa además de poder configurar el tiempo de curado y el espesor de capa.
- El software NanoDLP cumple con muchas ventajas en cuanto a la generación del código G y la generación de imágenes por capa además de poder configurar el tiempo de curado y el espesor de capa.

## 4.2.Recomendaciones

- Se recomienda seguir con la investigación de esta tecnología y en un trabajo futuro cambiar la cuba por una que utilice el método CLIP el mismo que permite una mayor velocidad de impresión.
- Realizar un trabajo de investigación de fotoresinas para poder producir nuevas resinas con diferentes características esto abrirá un sin número de posibilidades en diferentes aplicaciones.
- Se recomienda diseñar una cuba y una plataforma de impresión intercambiable para la impresión de piezas pequeñas esto optimizara el uso de resina.
- Las dimensiones de la impresora pueden disminuirse con el uso de lentes para el proyector lo cual ara más óptimo el diseño de la estructura.
- Debido a que la impresora tiene elementos móviles se recomienda lubricarlos según el manual de mantenimiento que se encuentra en el anexo C.

## Bibliografía

- Abreu, P., Restivo, M., Rodrigues, M., Chouzal, M., Santos, B., Rodrigues, J., & Andrade, T. (2014). On the use of a 3D printer in mechatronics projects. *International Conference on Interactive Collaborative Learning*.
- Additive 3D 3D printing*. (2014). Obtenido de <https://www.additive-3d.es/tecnologias-FDM.html>
- AlAli, A., Griffin, M., & Butler, P. (2015). Three-Dimensional Printing Surgical Applications. *Eplasty*, 15(37). doi:PMC4539849
- Arduino. (2017). *Arduino Mega 2560*. Obtenido de <http://www.mantech.co.za/datasheets/products/A000047.pdf>
- Autodesk®. (2017). *Autodesk*. Obtenido de <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/3d-printing>
- BLOG DE HXX. (6 de Diciembre de 2014). Obtenido de Tecnologías de impresión 3D: <http://hxx.es/2014/12/06/tecnologias-de-impresion-3d-fotopolimerizacion/>
- Bomke, P. (2015). *Monkeyprint*. Obtenido de <http://robotsinthesun.org/monkeyprint-an-open-source-3d-print-software/>.
- C, L. (12 de Julio de 2016). *3Dnatives*. Obtenido de <https://www.3dnatives.com/es/inyeccion-aglutinante-te-lo-contamos-23032016/>
- Carbon, Inc. CA. (s.f.). *A Material World*. Obtenido de <https://www.carbon3d.com/materials/>
- Condit, R., & Jones, D. (2004). *Stepping Motors Fundamentals* Microchip AN907. Estados Unidos. Obtenido de <https://homepage.divms.uiowa.edu/~jones/step/an907a.pdf>
- CS Hyde Company. (2016). *WWW.CSHYDE.COM*. Obtenido de <http://catalog.cshyde.com/viewitems/3d-printing-materials/fep-tape-film-sheet>
- Derré, M. (2014). *Diseño de una impresora 3D DLP*. Obtenido de <http://imprimalia3d.com/recursosimpresion3d/dise-una-impresora-3d-dlp>

- Ferrer, J. (15 de Octubre de 2014). *markerShop*. Obtenido de <https://makershopbcn.com/abs-vs-plaque-diferencia-existe-entre-estos-dos-filamentos-para-impresora-3d>
- Formlabs. (2018). *Formlabs*. Obtenido de <https://formlabs.com/blog/3d-printing-technology-comparison-sla-dlp/>
- Frank, J. T., Frank, W., & Taylor, C. (2016). Strategies for creating cardiovascular models with digital. *32nd Southern Biomedical Engineering Conference*. doi:10.1109/SBEC.2016.53
- FRAX 3d. (2018). *Impresión en alta definición: Husillos VS Varillas*. Obtenido de <https://www.frax3d.com/impresion-en-hd>
- Gonzales. (2011). *Mecapedia*. Obtenido de [http://www.mecapedia.uji.es/tornillo\\_de\\_potencia.htm](http://www.mecapedia.uji.es/tornillo_de_potencia.htm)
- Hernández. (2013). *ENVISION LABS. Retrieved from CREATION*. Obtenido de <http://www.envisionlabs.net/about.html>
- Impresora 3D STL por Estereolitografía. (2016).
- Imprimalia. (2016). *Imprimalia3D*. Obtenido de <http://imprimalia3d.com/impresoras3d/zprinter-450>
- John, H. (2007). *United States Patente nº US 7,195,472 B2*.
- Joyce, M. (2013). *United States Patente nº US 2013/0292862 A1*.
- Martinez, J. (s.f.). *Software de Ambiente Virtual*. Obtenido de <http://jhoselynmartinez.onlinewebshop.net/concepto-y-caracteristica-de-un-sistema-mecanico/>
- Mendoza, I. (2015). *www.utel.edu.mx*. Obtenido de <http://www.utel.edu.mx/blog/rol-personal/codigo-abierto/>
- Mott, R. (2008). *Diseño de elementos de máquinas*.
- NanoDLP. (2017). *NanoDLP*. Obtenido de <https://www.nanodlp.com/>
- Pandey, R. (2014). *Photopolymers in 3D printing applications*. Obtenido de [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/80083/pandey\\_ramji.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/80083/pandey_ramji.pdf?sequence=1)

- Pavón Almeida, L. J. (2015). Diseño y construcción de un equipo de impresión 3D con resina fotosensible UV para elaborar prototipos de piezas por medio del proceso DLP. Quito, Ecuador.
- Pawar, A., Saada, G., Cooperstein, I., Larush, L., Jackman, J., Tabaei, S., . . . Magdassi, S. (2016). High-performance 3D printing of hydrogels by water-dispersible photoinitiator nanoparticles. *Science Advances*. doi:10.1126/sciadv.1501381
- Penalva, J. (2014). *Xataka*. Obtenido de <https://www.xataka.com/perifericos/cube-3-una-impresora-3d-para-tener-en-casa>
- Piqueras, F. (2016). *Impresión3D.com*. Obtenido de <http://impresiontresde.com/tecnologias-de-impresion-3d-industrias/>
- Proyector Central. (19 de 2 de 2018). Obtenido de [http://www.proyectorcentral.com/home\\_theater\\_projector\\_buyers\\_guide.htm?page=Contrast](http://www.proyectorcentral.com/home_theater_projector_buyers_guide.htm?page=Contrast)
- Quinmbita, J., & Sánchez, R. (2008). Diseño y construcción de un router cnc para la fabricación de puertas de mdf. Latacunga, Ecuador .
- Riba Romera, C. (2002). *Diseño Concurrente*. Barcelona.
- SKF. (Agosto de 2013). *SKF: la empresa del conocimiento*. Obtenido de [http://www.skf.com/binary/96-149715/Precision-rolled-ball-screws---6971\\_1-ES.pdf](http://www.skf.com/binary/96-149715/Precision-rolled-ball-screws---6971_1-ES.pdf)
- Specialty Motions. (2015). Obtenido de SMI4Motion: [www.smi4motion.com](http://www.smi4motion.com)
- Stratasys. (2016). Obtenido de <http://www.dedutel.com/pdf/STRATASYS.pdf>
- Stratasys Ltd. (2018). *stratasys*. Obtenido de <http://www.stratasys.com/es/impresoras-3d/technologies>
- Texas Instruments. (2015). *Getting Started with TI DLP® Display*.
- Texas Instruments. (2016). *TI DLP® System Design: Brightness Requirements and Tradeoffs*.
- Texas Instruments. (2017). *DLP® Technology for Near Eye Display*.

Texas Instruments. (2018). *Optoma*. Obtenido de <http://www.optoma.es/projectortechnology/DLP>

TexasInstruments. (2016). *TI DLP® System Design: Brightness Requirements and Tradeoffs*.

The ProjectorExpert. (2017). *TheProjectorExpert.com*. Obtenido de <http://www.theprojectorexpert.com/what-is-contrast-ratio/>

THK CO LTD. (2016). *THK*. Obtenido de <http://www.thk.com/?q=mexico/node/7517>

Thomson Industries, Inc. (2017). Linear Motion and control solutions. Obtenido de [https://www.thomsonlinear.com/downloads/z\\_Archived/Linear\\_Motion\\_Control\\_Solutions\\_cten.pdf](https://www.thomsonlinear.com/downloads/z_Archived/Linear_Motion_Control_Solutions_cten.pdf)

Vaneker, T. (15 de Julio de 2015). Desing and contruction of a multi-material 3D DLP printer. Obtenido de <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://essay.utwente.nl/67685/1/Paper%2520Exzeed%2520DLP%2520Reinout%2520Holtrup.pdf>

Virgala, I., Kelemen , M., Gmiterko, A., & Lipták, T. (2015). Journal of Automation and Control. *Journal of Automation and Control*,, 131-134.

www.3ders.org. (9 de April de 2015). *www.3ders.org*. Obtenido de <https://www.3ders.org/articles/20150409-autodesk-backs-carbon3ds-clip-technology-spark-3d-printing-investment-fund.html>