



**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL  
ECUADOR**

**FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**IMPRESORA 3D BASADA EN PROCESAMIENTO DIGITAL DE LUZ**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
MECATRÓNICA**

**MAURICIO XAVIER GONZÁLEZ OSCULLO**

**DIRECTOR: ING. VERÓNICA GREFA**

**D. M. QUITO**

**2019**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS**

Yo Mauricio Xavier González Oscullo, declaro ser autor del presente trabajo de titulación de la carrera de Ingeniería Mecatrónica y eximo expresamente a la Universidad Internacional del Ecuador y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

“La responsabilidad del contenido de esta tesis de grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR”

---

Mauricio Xavier González Oscullo

C. C. 172315978-4

## CERTIFICACIÓN

La docente de la Escuela de Ciencias Exactas y Tecnologías Aplicadas Ingeniera Verónica Grefa

CERTIFICA QUE:

El proyecto de investigación “Impresora 3D basada en procesamiento digital de luz”, fue desarrollado por: Mauricio Xavier González Oscullo y ha sido debidamente revisado y está en condiciones de ser entregado para que siga lo dispuesto por la escuela de Ciencias Exactas y Tecnologías Aplicadas, correspondientemente a la sustentación y defensa del mismo.

---

Ing. Verónica Grefa

C. C. 171762109-6

## AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a Dios por permitirme culminar con éxito mi carrera universitaria, a mi madre Rosa Oscullo quién fue el pilar más importante en toda mi vida, quien supo apoyarme en todo momento sin importar si eran días buenos o malos, a mi hermana Karla González quién con su ejemplo de hermana mayor me ayudo a dar lo mejor de mi y siempre seguir sus pasos y si era posible superarlos.

Gracias a mi Universidad, por haberme permitido formarme en ella, gracias a todas las personas quienes fueron participes durante todo este proceso de estudio, a mi mejor Amiga de la Universidad, Estefanía quién fue un apoyo y un empuje durante los 5 años de carrera, todas esas noches de desveladas por los proyectos, por todas las risas y enojos que sembraron una hermosa amistad.

A mi tutora, Ingeniera Verónica Grefa, quién me guio durante todo este proceso de desarrollo e implementación de la tesis.

A mis amigos/as del colegio, que siempre estuvieron ahí apoyándome y dándome ánimos para seguir adelante y estar ahí desde el inicio hasta la culminación de una meta más en mi vida.

Finalmente, agradezco a mi familia de crossfit, quienes se han convertido en unas de las personas mas representativas en mi vida, que me ayudaron a luchar por mis sueños, quienes me enseñaron que uno siempre puede dar más de lo que piensa y que todo lo que te propongas lo puedes cumplir si existe pasión y sueño.

En fin, muchas gracias a todos quienes han permanecido en mi vida, quienes han aportado con una pequeña semilla para generar frutos buenos y ser el hombre que soy hoy en día.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>FUNDAMENTO TEÓRICO.....</b>	<b>1</b>
1.1 TEMA.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	1
1.2.1 OBJETIVO GENERAL.....	1
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	1
1.3 ALCANCE.....	1
1.4 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA.....	2
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	2
1.5.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA.....	2
1.5.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA.....	3
1.5.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA.....	3
1.6 HIPÓTESIS.....	3
1.7 PARTE TEÓRICA.....	4
1.7.1 PROTOTIPADO RÁPIDO.....	4
1.7.2 IMPRESIÓN 3D.....	5
1.7.3 PROCESAMIENTO DEL DISEÑO 3D.....	5
1.7.4 PROCESOS DE PROTOTIPADO RÁPIDO.....	6
1.7.5 PROYECTOR PARA EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE LUZ (DLP)...	7
1.7.6 RESINA FOTOSENSIBLE.....	7
1.7.6.1 Tipos de resina según su aplicación.....	9
1.8 ESTADO DEL ARTE DEL PROCESAMIENTO DIGITAL DE LUZ.....	17
1.8.1 IMPRESORA 3D CON TECNOLOGÍA DLP COMERCIALES.....	22
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>25</b>
<b>ANÁLISIS, ESTUDIO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....</b>	<b>25</b>
2.1 CASA DE CALIDAD.....	25

2.1.1	VOZ DEL USUARIO .....	25
2.1.2	VOZ DEL INGENIERO .....	27
2.1.3	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS .....	28
2.1.4	ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LA CASA DE LA CALIDAD .....	28
2.2	DISEÑO CONCEPTUAL .....	29
2.2.1	ANÁLISIS FUNCIONAL .....	29
2.2.2	DEFINICIÓN DE MÓDULOS FUNCIONALES .....	31
2.2.3	SOLUCIONES PARA CADA MÓDULO .....	33
2.3	MATRIZ MORFOLÓGICCA .....	36
2.3.1	ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS .....	37
2.3.2	MATRIZ DE CRITERIOS PONDERADOS .....	37
2.3.3	SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA .....	40
<b>CAPÍTULO III .....</b>		<b>41</b>
<b>DISEÑO DE UNA IMPRESORA 3D CON PROCESAMIENTO DIGITAL DE LUZ ...</b>		<b>41</b>
3.1	ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN .....	41
3.2	DISEÑO DEL SISTEMA ÓPTICO .....	42
3.2.1	SELECCIÓN DE PROYECTOR .....	43
3.2.2	DISTANCIA DEL PROYECTOR AL ESPEJO PLANO Y A LA PLATAFORMA .....	45
3.3	DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO .....	49
3.3.1	CÁLCULO DEL ESPESOR DE LA PLANCHA DE ALUMINIO QUE ELEVA LA PLATAFORMA .....	49
3.3.2	SELECCIÓN DE RODAMIENTOS LINEALES .....	57
3.3.3	CÁLCULO DE HUSILLO DE POTENCIA .....	63
3.3.4	CÁLCULO DEL MOTOR EJE Z .....	69
3.3.5	DISEÑO DEL CHASIS .....	71
3.4	DIMENSIONAMIENTO ELECTRÓNICO .....	75

3.4.1	MÓDULO DE CONTROL CENTRAL.....	75
3.4.2	CONTROL DEL DESPLAZAMIENTO EJE Z.....	76
3.4.3	CONTROL DE PROYECCIÓN.....	78
3.4.4	CONTROL DE ELEMENTOS ADICIONALES.....	82
3.5	ALGORITMO DE PROGRAMACIÓN.....	86
3.5.1	ALGORITMO INICIAL-HOME.....	86
3.5.2	ALGORITMO DE IMPRESIÓN.....	87
3.5.3	ALGORITMO DE MANEJO DE IMÁGENES DE IMPRESIÓN.....	88
<b>CAPÍTULO IV.....</b>		<b>89</b>
4.1	CALIBRACIÓN DE LA IMPRESORA.....	89
4.1.1	DISTANCIA DE PROYECCIÓN.....	89
4.1.2	TIEMPO DE PROYECCIÓN.....	93
4.2	RESULTADOS DE LA APLICACIÓN.....	95
4.2.1	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....	95
4.2.2	PRUEBAS Y RESULTADOS.....	97
	CONCLUSIONES.....	104
<b>RECOMENDACIONES.....</b>		<b>105</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>106</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama de roles preponderantes del prototipado rápido .....	4
Figura 1.2. Ejemplo de una impresora 3D y piezas obtenidas .....	5
Figura 1.3. Pasos a seguir para obtener una impresión 3D .....	6
Figura 1.4. Tipos de prototipado 3D de acuerdo al tipo de material prima .....	6
Figura 1.5. Funcionamiento de impresora basada en SLA .....	6
Figura 1.6. Esquema de un sistema DLP con rueda de color .....	7
Figura 1.7. Resina fotosensible .....	8
Figura 1.8. Proceso de Curado de la pieza impresa .....	9
Figura 1.9. Clasificación de la resina según su tipo de aplicación y material .....	9
Figura 1.10. Procesamiento del desarrollo de una pieza con resina de cerámica.....	10
Figura 1.11. Tiempos y temperatura a someter la pieza impresa con resina cerámica .....	10
Figura 1.12. Joyas impresas con resina .....	11
Figura 1.13. Acabado de un modelo dental y modo de desarrollo .....	11
Figura 1.14. Implementación de la resina dental SG.....	12
Figura 1.15. Férula impresa con resina LT clear .....	12
Figura 1.16. Piezas y prototipos impresas con los distintos tipos de resina para ingeniería.....	13
Figura 1.17. Piezas impresas con resina estándar.....	14
Figura 1.18. Alargamiento al impacto IZOD en 4 distintas resinas .....	15
Figura 1.19. Curva de tensión-deformación entre 3 distintas resinas.....	15
Figura 1.20. Grafica de elongación y resistencia última .....	15
Figura 1.21. Módulo de Young y elasticidad de resinas .....	16
Figura 1.22. Valores de temperatura y elongación de resinas .....	16
Figura 1.23. Comparación entre resinas y sus propiedades mecánicas .....	17
Figura 1.24. Tecnología DLP.....	17
Figura 1.25. Patente de tecnología DLP .....	18
Figura 1.26. Resina Fotosensible .....	18
Figura 1.27. Modelo 3D en software de impresión .....	19
Figura 1.28. Resultados de la pieza impresa con tecnología DLP .....	19
Figura 1.29. Impresora 3D con tecnología DLP realizada en la ESPE.....	20

Figura 1.30. Pieza simulada e impresa con la impresora 3D DLP de la ESPE .....	20
Figura 1.31. Impresora 3D DLP desarrollado por ingenieros mexicanos y junto con ejemplares de piezas impresas .....	22
Figura 1.32. Impresora Form 2.....	22
Figura 1.33. Impresora Nobel 1.0.....	23
Figura 1.34. Impresora B9 Creator.....	23
Figura 1.35. Impresora Titan 2 HR.....	23
Figura 1.36. Impresora Ember Autodesk.....	24
Figura 2.1. Módulo Nivel 0.....	30
Figura 2.2. Módulo Nivel 2.....	30
Figura 2.3. Módulo Nivel 3.....	31
Figura 2.4. Tornillo de potencia .....	33
Figura 2.5. Polea y Correa .....	33
Figura 2.6. Final de carrera de conexión .....	34
Figura 2.7. Sensor óptico de barrera infrarroja.....	34
Figura 2.8. Lenguaje de programación Python.....	34
Figura 2.9. Lenguaje de programación Arduino .....	34
Figura 2.10. Shield de Arduino .....	34
Figura 2.11. RAMPS Mega Shield v1.4.....	34
Figura 2.12. Software SparkStudio.....	35
Figura 2.13. Programa DLP creation workshop 3D .....	35
Figura 2.14. Mini proyector HD SONY .....	35
Figura 2.15. Proyector BenQ TH671ST .....	35
Figura 3.1. Esquema de solución .....	41
Figura 3.2. Esquema para la formación del sistema óptico.....	42
Figura 3.3. Esquema de proyección del haz de luz.....	46
Figura 3.4. Representación de Pitágoras .....	47
Figura 3.5. Representación de la proyección del proyector a la pantalla .....	47
Figura 3.6. Proyección del haz de luz a la plataforma.....	48
Figura 3.7. Diagrama de cuerpo libre de la plataforma con sus elementos.....	50
Figura 3.8. Diagrama del cuerpo libre en placa de aluminio, elemento C .....	50
Figura 3.9. Diagrama de fuerza cortante en la planta de aluminio .....	53
Figura 3.10. Diagrama de Fuerza Cortante.....	54

Figura 3.11. Diagrama de Momento Flector .....	54
Figura 3.12. Simulación SolidWorks de la plancha de aluminio a carga distribuida ..	57
Figura 3.13. Desplazamiento eje Z.....	57
Figura 3.14. Rodamiento Lineal .....	59
Figura 3.15. Disposición del motor NEMA eje Z.....	70
Figura 3.16. Representación estructura base.....	72
Figura 3.17. Diagrama de fuerza cortante de la estructura base.....	72
Figura 3.18. Diagrama de Momento de la estructura base .....	73
Figura 3.19. Diagrama del sistema electrónico .....	75
Figura 3.20. Shield CNC Arduino .....	76
Figura 3.21. Driver Pololu 4988.....	77
Figura 3.22. Motor NEMA 23.....	77
Figura 3.23. Lector SD Arduino .....	79
Figura 3.24. Esquema de conexión de tarjetas Micro SD de Arduino .....	80
Figura 3.25. Módulo HDMI .....	81
Figura 3.26. HMI Nextion 7.....	81
Figura 3.27. Sensor óptico de barrera infrarroja.....	82
Figura 3.28. Botón de encendido de la impresora.....	83
Figura 3.29. Botón de paro de emergencia .....	84
Figura 3.30. Fuente de alimentación dual switching.....	85
Figura 3.31. Algoritmo inicial – HOME .....	86
Figura 3.32. Diagrama de Impresión .....	87
Figura 3.33. Algoritmo de manejo de imágenes de impresión .....	88
Figura 4.1. Proyector EPSON EX3240.....	89
Figura 4.2. Calibración del área de proyección .....	91
Figura 4.3. Toma de distancia entre el proyector .....	92
Figura 4.4. Soporte espejo prototipo .....	92
Figura 4.5. Distancia del proyector al soporte del espejo.....	93
Figura 4.6. Tiempo se exposición de 8 segundos .....	95
Figura 4.7. Tiempo de exposición de 12 segundos .....	95
Figura 4.8. Mecanismo de aseguramiento del desplazamiento .....	96
Figura 4.9. Prototipo de impresora .....	97
Figura 4.10. Figura SolidWorks .....	98

Figura 4.11. Prueba a 134 mm.....	98
Figura 4.12. Prueba a 131 mm.....	98
Figura 4.13. Prueba a 130mm.....	98
Figura 4.14. Prueba a 129mm.....	99
Figura 4.15. Prueba de Resolución 01 .....	99
Figura 4.16. Prueba 01, Impresión .....	100
Figura 4.17. Prueba de Resolución 02 .....	100
Figura 4.18. Prueba 02, Impresión .....	101
Figura 4.19. Prueba de Resolución 03 .....	101
Figura 4.20. Prueba 03, Impresión .....	102
Figura 4.21. Prueba de Resolución 04 .....	102
Figura 4.22. Prueba 04, Impresión .....	103

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Patentes relacionadas con el proyecto.....	17
Tabla 1.2. Valores reales y medidos de la pieza impresa .....	21
Tabla 1.3. Impresoras 3D con tecnología DLP Comerciales .....	22
Tabla 2.1 Voz del cliente de la empresa Ingenius 3D .....	26
Tabla 2.2 Agrupación de la voz del usuario .....	27
Tabla 2.3 Voz del Ingeniero.....	27
Tabla 2.4 Especificaciones para el desarrollo del diseño del producto .....	28
Tabla 2.5. Materiales para el nivel 1.....	30
Tabla 2.6. Materiales Nivel 2 .....	31
Tabla 2.7. Energías Nivel 2 .....	31
Tabla 2.8. Soluciones módulo 1 .....	33
Tabla 2.9. Soluciones módulo 2 .....	33
Tabla 2.10. Soluciones módulo 3 .....	34
Tabla 2.11. Soluciones módulo 4 .....	35
Tabla 2.12. Matriz Morfológica .....	36
Tabla 2.13. Ponderación de los criterios .....	38
Tabla 2.14. Análisis de la Función en las diferentes alternativas .....	38
Tabla 2.15. Análisis de Materiales en las diferentes alternativas .....	39
Tabla 2.16. Análisis de Transporte en las diferentes alternativas .....	39
Tabla 2.17. Análisis de Costo y Plazo en las diferentes alternativas.....	39
Tabla 2.18. Análisis de Impacto Ambiental en las diferentes alternativas .....	39
Tabla 2.19. Tabla de Prioridades .....	40
Tabla 3.1. Partes del esquema de la impresora.....	42
Tabla 3.2. Definición de las nomenclaturas para el diseño del sistema óptico.....	43
Tabla 3.3. Resoluciones de proyectores comerciales .....	44
Tabla 3.4. Factor de contacto $f_c$ [37].....	58
Tabla 3.5. Peso del sistema de elevación de la plataforma .....	59
Tabla 3.6. Diámetros y tipos de distintos rodamientos .....	60
Tabla 3.7. Capacidad de carga de distintos rodamientos.....	61
Tabla 3.8. Distintos valores del esfuerzo estático .....	61
Tabla 3.9. Coeficientes estáticos mínimos dependiendo las condiciones de funcionamiento .....	62

Tabla 3.10. Características técnicas del husillo de potencia .....	64
Tabla 3.11. Elementos contribuyentes a la fuerza que levante el husillo .....	64
Tabla 3.12. Valores de resistencia del acero inoxidable .....	69
Tabla 3.13. Torque de motores NEMA comerciales.....	70
Tabla 3.14. Cargas presentes en la base de la impresora .....	71
Tabla 3.15. Especificaciones de elementos electrónicos del desplazamiento Z .....	77
Tabla 3.16. Pasos por vuelta.....	78
Tabla 3.17. Conexión módulo de la tarjeta SD al Arduino.....	79
Tabla 3.18. Especificaciones del sensor ITR8102.....	82
Tabla 3.19. Componentes del esquema electrónico .....	84
Tabla 3.20. Valor de corriente y potencia de la fuente de alimentación .....	85
Tabla 3.21. Especificaciones técnicas de la fuente de alimentación .....	85
Tabla 4.1. Especificaciones del Proyector UNIC Uc46.....	89
Tabla 4.2. Toma de distancias del proyector.....	91
Tabla 4.3. Tiempos de proyección en la resina .....	94
Tabla 4.4. Tiempos de comparación de impresión.....	94
Tabla 4.5. Toma de dimensiones de impresión variando la distancia de proyección	98
Tabla 4.6. Prueba 01, Dimensión exterior .....	100
Tabla 4.7. Prueba 01, Espesor.....	100
Tabla 4.8. Prueba 02, Diámetros Externos.....	101
Tabla 4.9. Prueba 03, Diámetro interior .....	102
Tabla 4.10. Prueba 04, Altura.....	103
Tabla 4.11. Prueba 04, Ancho.....	103

# CAPÍTULO I

## FUNDAMENTO TEÓRICO

EL presente capítulo introduce los precedentes sobre los cuales se desarrolla el diseño y construcción de la máquina.

### 1.1 TEMA

Impresora 3D Basada en Procesamiento Digital de Luz.

### 1.2 OBJETIVOS

#### 1.2.1 OBJETIVO GENERAL

- Diseñar y construir una impresora 3D basada en procesamiento digital de luz (DLP).

#### 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar y documentar los principios del funcionamiento de la tecnología DLP.
- Estudiar los procesos de curado de la resina bajo la luz UV.
- Diseñar y dimensionar los componentes mecánicos y electrónicos de la impresora.
- Seleccionar los materiales, partes y componentes que permitan el funcionamiento adecuado de la impresora.
- Implementar una HMI que permita interactuar con la máquina sin la necesidad de depender de un ordenador.
- Ejecutar un protocolo de pruebas de funcionamiento y calidad de la impresión.

### 1.3 ALCANCE

La máquina propuesta será capaz de realizar figuras sólidas a partir de la inducción de la fotopolimerización de la resina, con un área de trabajo de 150 mm x 150 mm y con una altura de 250 mm, con una precisión de 100 um y una velocidad e intensidad de luz adecuada para lograr el curado de la resina.

## 1.4 PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

La empresa Ingenius 3D, por la demanda de clientes y por el crecimiento exponencial que han tenido las impresiones de piezas en 3D, busca agilizar la impresión mediante la integración de máquinas que utilicen la tecnología DLP junto con materiales fotosensibles, el cual tiene una mejor resolución y rapidez de impresión de figuras complejas en comparación de las impresoras 3D convencionales (FDM) que utilizan PLA. De igual manera por ser una tecnología casi desconocida en el país, Ecuador, no se ha incursionado a fondo nuevos métodos de fabricación de piezas o figuras en 3D y con la habilidad de tener impresiones más sustentables y de mejor resolución.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN

### 1.5.1 JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

La implementación de una impresora 3D con tecnología DLP para la impresión de prototipos, piezas, partes únicas y diseños personalizados sin importar la cantidad de producción por lo que son piezas únicas de alta calidad y funcionales generan ventajas tanto ahorro en tiempo de producción y costo en comparación a las impresoras FDM 3D que utilizan PLA.

Las ventajas del uso de la impresora son las siguientes:

- Reducir el tiempo de impresión de piezas 3D.
- Mejorar la calidad y funcionalidad de las piezas impresas.
- Disminuir los costos en el uso de la materia prima durante el proceso.
- Llegar a imprimir diseños complejos sin ninguna dificultad.

En la construcción de la impresora se toman en cuenta las siguientes áreas:

#### **Mecánica:**

- Análisis estático y dinámico de la estructura de la máquina.
- Diseño y selección del mecanismo apropiado de suspensión de la plataforma donde descansa la pieza a imprimir.
- Diseño y selección del mecanismo óptico apropiado para la proyección de la luz DLP según el área de trabajo.
- Diseño y selección de los elementos mecánicos.
- Planos mecánicos.

#### **Electrónico:**

- Acondicionamiento de señales controladas por el PLC.
- Dimensionamiento adecuado del sistema de control, alimentación de los motores, proyector y sistema de emergencia.
- Elaboración de Planos Electrónicos.

**Control:**

- Controlar el tiempo de iluminación DLP que permite la solidificación de la resina.
- Sincronizar el tiempo de desplazamiento de la plataforma con respecto al tiempo de proyección y solidificación de la pieza.
- Implementación de la interfaz humano-máquina (HMI).

**1.5.2 JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA**

La impresora 3D con tecnología DLP se investigará, recopilará y se analizará información referente a impresoras similares existentes tanto a nivel nacional como internacional; con la finalidad de establecer las dimensiones estructurales, el área de trabajo y la calidad de impresión que poseen, para tener un punto de referencia. Con esta información se analizará las posibles alternativas para analizar el costo-beneficio óptimo de cada una de ellas.

**1.5.3 JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA**

El tiempo de impresión de piezas o diseños en 3D en impresoras FDM que utilizan PLA, tienen un tiempo de impresión entre 40 - 60 minutos en una torre de ajedrez, esto tiempo varía dependiendo del porcentaje de relleno que se quiera tener, en cambio con el uso de la tecnología DLP se tiene un tiempo de impresión de 6 segundos por cada 0,1mm de capa reduciendo el tiempo de impresión hasta un 30% en la misma pieza de ajedrez.

**1.6 HIPÓTESIS**

La impresora 3D con tecnología DLP será capaz de realizar impresiones de prototipos o piezas diseñadas con una velocidad de avance por capa de 0,1mm cada 6 segundos, con la finalidad de tener una tolerancia de  $\pm 100\mu\text{m}$ , obteniendo como resultado un acabado de buena calidad de la pieza, en el caso del tiempo de impresión

de piezas pequeñas o de mayor tamaño serán el mismo por lo que se imprime por capa sin la necesidad de una doble pasada.

## 1.7 PARTE TEÓRICA

### 1.7.1 PROTOTIPADO RÁPIDO

El prototipado rápido es un proceso de manufactura que se utiliza para fabricar prototipos 3D en distintos tipos de materiales como el plástico, metal o cerámico, existiendo distintos métodos de prototipado en 3D como: la extrusión, procesamiento digital, estereolitografiado, sinterizado, proyección aglutinante, etc., utilizando datos de diseño asistido por ordenador (CAD) en tres dimensiones.

El prototipado rápido es utilizado en muchos sectores, permitiendo a las empresas transformar ideas innovadoras en productos de éxito de forma rápida y eficiente, sin involucrar costos altos por rediseño.

El proceso de prototipado rápido afecta directamente a los factores críticos del éxito de una empresa, cumpliendo los siguientes roles que se muestra en la Figura 1.1.

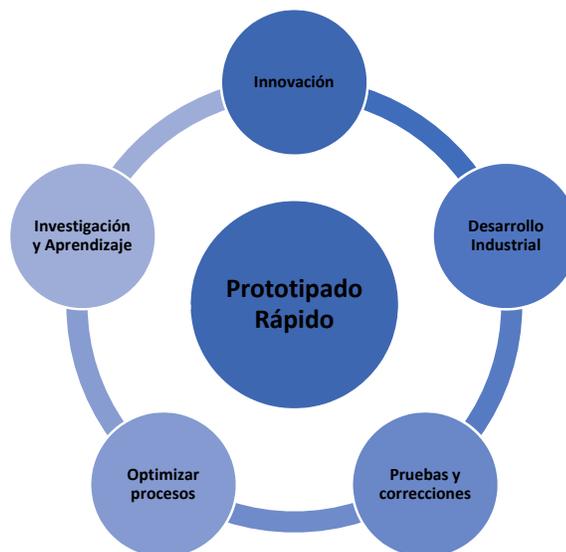


Figura 1.1. Diagrama de roles preponderantes del prototipado rápido

En Ecuador, este tipo de tecnología ha tenido un impacto moderado que está creciendo a medida que aumenta el interés, una de las empresas pioneras instaladas

en Ecuador a partir del año 2013 es Stratasys que ofrece sus impresoras de variedad tecnología y costos distintos. Así mismo hay otras empresas en el Ecuador que están saliendo a flote y siendo reconocidas como es el caso de Innova 3D, 3D printer, etc [1].

### 1.7.2 IMPRESIÓN 3D

La impresión 3D comprende un conjunto de tecnologías de alto grado de automatización y flexibilidad que permiten la obtención de piezas sólidas a partir de modelos o prototipos virtuales creados con casi cualquiera de los programas CAD de modelamiento tridimensional disponibles en el mercado, en tiempo relativamente corto, bajo consumo de energía eléctrica y contaminación casi nula.

La impresión 3D o prototipado rápido es un proceso de manufactura considerado de libre forma, el proceso comienza tomando un diseño virtual a partir de un software de modelado o de diseño asistido por computador (CAD). El equipo de impresión 3D lee datos del dibujo CAD y aplica capas sucesivas de material líquido, en polvo o lámina: fabricando el modelo físico a partir de una serie de secciones transversales. Estas capas, que se corresponden con la sección transversal virtual del modelo CAD se unen automáticamente para crear la forma final [1]. (Figura 1.2).



Figura 1.2. Ejemplo de una impresora 3D y piezas obtenidas

Fuente: B9Creator v1.2 [2]

### 1.7.3 PROCESAMIENTO DEL DISEÑO 3D

En la actualidad se encuentran disponibles distintos tipos de prototipados rápidos, pero los principios básicos de operación de todas las máquinas son similares entre sí, para este caso los pasos de la Figura 1.3, muestra como modelar el desarrollo de impresión un objeto en 3D.

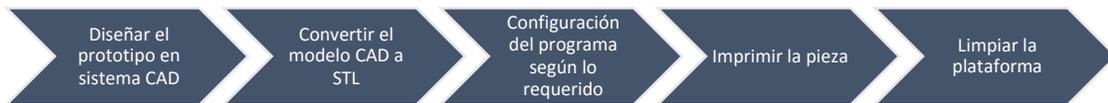


Figura 1.3. Pasos a seguir para obtener una impresión 3D

#### 1.7.4 PROCESOS DE PROTOTIPADO RÁPIDO

Existen distintos tipos de impresoras 3D en el mercado, en la Figura 1.4, se muestran los distintos procesos de prototipado rápido, la subdivisión que se utiliza es dependiendo del tipo de material que utiliza cada proceso.



Figura 1.4. Tipos de prototipado 3D de acuerdo al tipo de material prima

En este caso el prototipado más relacionado al DLP es la estereolitografía (SLA), que en lugar de usar luz UV mediante un proyector, utiliza un láser UV que se proyecta sobre un baño de resina fotosensible líquida. (Figura 1.5).

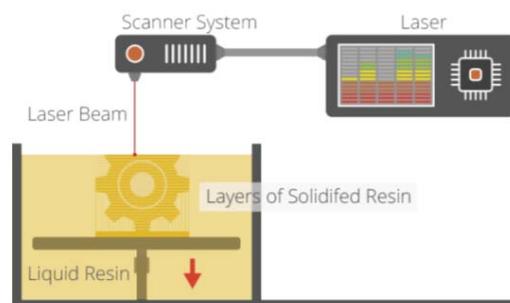


Figura 1.5. Funcionamiento de impresora basada en SLA

Fuente: Tesis ESPE [3]

### 1.7.5 PROYECTOR PARA EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE LUZ (DLP)

Lo importante de un sistema DLP es el funcionamiento del dispositivo de micro-espejos digitales (chip DMD), compuesto por una matriz encima de la cual hay miles de micro espejos que tienen la capacidad de pivotear para reflejar la luz incidente con mayor o menor intensidad, de tal forma que se producen diferentes escalas de grises, llegando hasta 1024 grises diferentes.

Cada uno de los espejos equivale a un pixel en la imagen real, siendo muy utilizada esta tecnología en los sistemas de proyección que necesitan gran definición. Los colores que se filtran son tres: rojo, verde y azul, a partir de esto se consigue completar el resto del espectro, llegando a conseguir 16,7 millones colores con tecnología DLP más simple y 35 millones con la más avanzada [3]. (Figura 1.6).

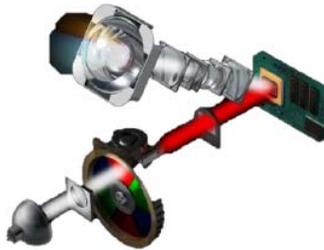


Figura 1.6. Esquema de un sistema DLP con rueda de color

Fuente: Digital AV, Tecnología DLP [3]

### 1.7.6 RESINA FOTOSENSIBLE

La resina es el elemento base (monómero) con el cual se crea el material de impresión, este sistema utiliza el fotocurado que permite realizar la polimerización la cual consiste en la unión de monómeros formando polímeros, (Figura 1.7), el tiempo de exposición donde el porcentaje de fotoiniciador y el porcentaje de inhibidor deben trabajar a la par para crear el espesor de la capa [4], estos tiempos de radiación depende de cuán solido se quiera la pieza a imprimir y el tipo de resina que se esté utilizando. Los tres componentes que forma parte de una resina UV son:

- Fotoiniciador, que es el elemento que se encarga de absorber energía luminosa y transformarla en química, que lleva a cabo una reacción que transforma en

componentes solubles y líquidos en componentes insolubles y resistentes, produciendo que el monómero se endurezca cuando se expone a la luz UV.

- Fotoinhibidor: como su nombre lo indica inhibe que se desarrolle el fotoiniciador evitando que la luz UV de curado entre demasiado profundo y que la resina se solidifique.
- Monómero: Es el material a cristalizarse.

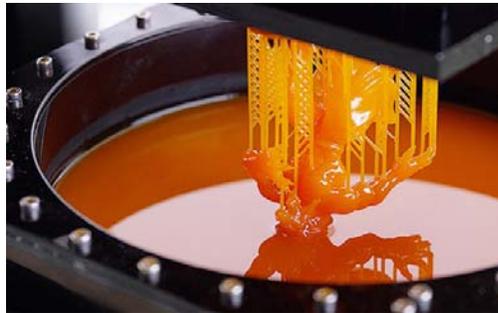


Figura 1.7. Resina fotosensible

Fuente: Digital AV, Tecnología DLP [4]

Una resina fotosensible como su nombre lo indica es una sustancia que sufre cambios en sus propiedades físicas por causa a la reacción de la luz que cruce sobre ella, generalmente luz ultravioleta (UV), generando una diferenciación física entre las partes expuestas y no expuestas.

Estas resinas se utilizan para la fabricación de formas, prototipados rápidos, fabricación de circuitos impresos, la producción de sellos, prótesis dentales y así en muchas más áreas [5].

Para que las propiedades físicas de la resina empiecen a interactuar entre ellas, esta debe ser sometida a una fuente de luz UV de 405nm durante su impresión, y durante el post-curado, (Figura 1.8), para que las propiedades sean superiores y mucho más resistentes debe someterse a una longitud de onda de luz menor, como por ejemplo de 365nm durante un tiempo aproximado de 30 minutos [6].



Figura 1.8. Proceso de Curado de la pieza impresa

Fuente: Digital AV, Tecnología DLP [6]

La resina puede clasificarse según los materiales que lo componen o por el área de aplicación que tenga [7]. (Figura 1.9)

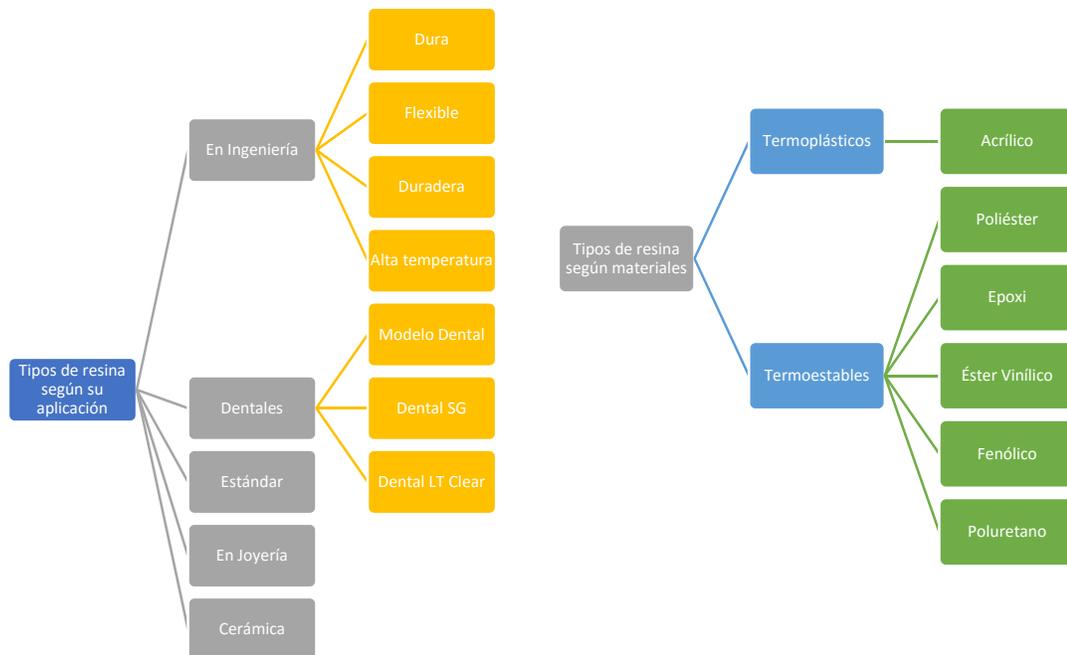


Figura 1.9. Clasificación de la resina según su tipo de aplicación y material

### 1.7.6.1 Tipos de resina según su aplicación

- RESINA CERÁMICA

Este es un material experimental que produce impresiones post-curado muy similar a una cerámica, después de la cocción los estampados llegan a

convertirse en piezas de cerámicas. En la Figura 1.10 se muestra los pasos para trabajar con este tipo de resina.



Figura 1.10. Procesamiento del desarrollo de una pieza con resina de cerámica

En la Figura 1.11, se muestran los tiempos de cocción al que se debe emplear el prototipo en el horno y las temperaturas que debe llegar a alcanzar.

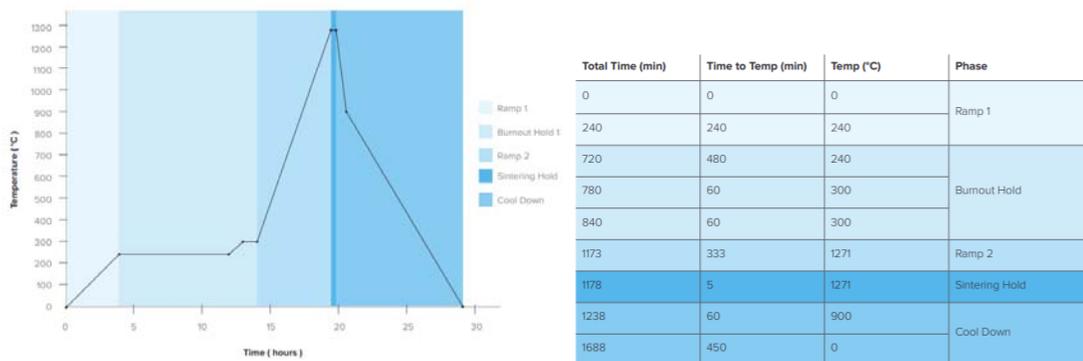


Figura 1.11. Tiempos y temperatura a someter la pieza impresa con resina cerámica

Fuente: formlabs [7]

## • RESINA EN JOYERÍA

Diseñada para captar detalles precisos y superficies lisas, llegando a quemarse de forma limpia sin residuos, facilitando a los joyeros y casas de función para ir directamente desde el diseño digital a una impresión 3D adecuada para la función inversión directa [6]. (Figura 1.12)



Figura 1.12. Joyas impresas con resina

Fuente: formlabs [7]

- RESINA DENTAL

Utilizado para productos dentales como moldes para ortodoncia, férulas e incluyendo guías de cirugía.

- Modelo Dental: Este tipo de resina se utiliza para modelos de coronas y puentes de moldes extraíbles, llegando a ser una resina de alta precisión con un margen de precisión de 35 micras. Su acabado superficial es liso, mate y con un color similar al yeso, que ayuda al cambio de modelos digitales en la producción [6]. (Figura 1.13)

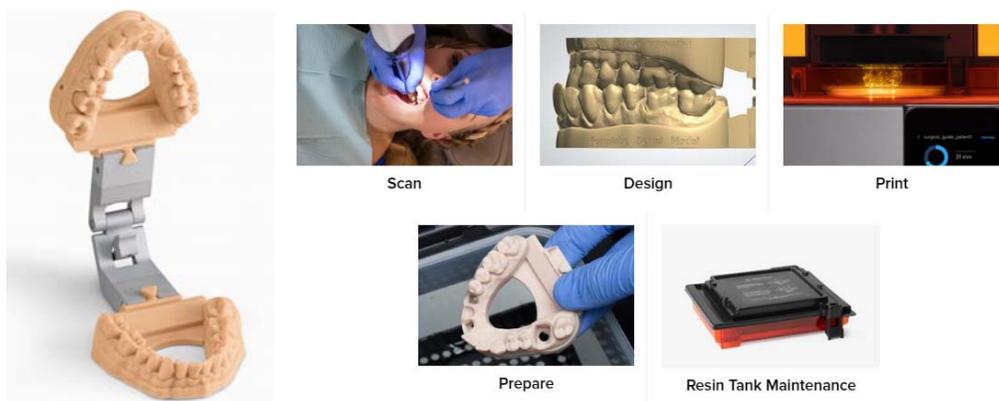


Figura 1.13. Acabado de un modelo dental y modo de desarrollo

Fuente: formlabs [7]

- Resina dental SG: esta es una resina biocompatible de clase 1, auto lavable con el fin de poder imprimir en ellas guías quirúrgicas precisas y dispositivos similares, generalmente se utilizan en cirugías de implantes. (Figura 1.14)

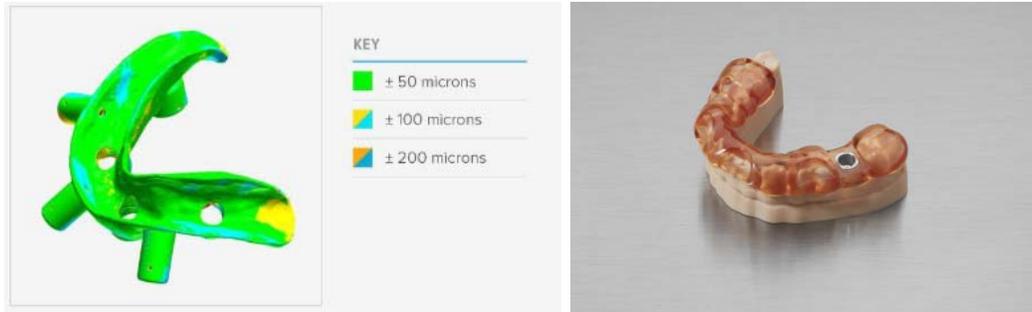


Figura 1.14. Implementación de la resina dental SG.

Fuente: formlabs [7]

- Resina LT clear: esta es una resina biocompatible con gran resistencia a la fractura y al desgaste, en su mayoría se utiliza para férulas, retenedores y otros aparatos de ortodoncia. Tiene un color claro y pulimentos para una alta transparencia óptica [6]. (Figura 1.15)



Figura 1.15. Férula impresa con resina LT clear

Fuente: formlabs [7]

- RESINA EN INGENIERÍA

Como su nombre lo indica este tipo de resina se utiliza para la impresión de prototipos funcionales, lo cual existen diferentes tipos según las características que se requieran aplicar en la pieza como [7]: (Figura 1.16)

- Dura: Esta resina se diseñó para simular el uso del plástico ABS, cuya módulo y resistencia a la tracción son similares. Con lo cual este tipo de resina es perfecta para el desarrollo de prototipados funcionales, al obtener piezas robustas, resistentes al impacto y tensión.

- Flexible o Elástica: Este tipo de resina puede llegar a simular al caucho durométrico de 80A, con un módulo de Young bajo y alto valor de elasticidad. El fin de impresión de este tipo de piezas es para prototipos que requieran doblarse o comprimirse. Esta resina es buena para simular materiales de toque suave y ergonómico.
- Duradera: Diseñada para simular el plástico del polipropileno (PP), con un módulo de Young bajo, pero con una fuerza alto al impacto (siendo la más resistentes de todas las resinas de ingeniería) y alta elongación. Se utiliza para un material que sea dúctil, resistente al desgaste al momento que la pieza es sometida a deformación, con un acabado brillante y liso.
- Alta temperatura: Es utilizado para aplicaciones estáticas que pueden llegar a ser sometidas a temperaturas elevadas, como procesos de fundición y termoconformado. Se utiliza para accesorios resistentes al calor o para prototipados de moldes, por sus propiedades físicas que tienden a tener una temperatura de deformación al calor (HDT) de 289°C a 0.45 MPa.



Figura 1.16. Piezas y prototipos impresos con los distintos tipos de resina para ingeniería

Fuente: formlabs [7]

- RESINA ESTÁNDAR

Diseñada para imprimir piezas de buena calidad, precisión y sin perder fuerza en el material y con un costo en el mercado más accesible para el usuario.



Figura 1.17. Piezas impresas con resina estándar

Fuente: formlabs [7]

### Comparación entre las resinas de ingeniería y estándar

Como se comenta existen distintos tipos de resina en ingeniería dependiendo el uso que se le vaya aplicar con sus respectivas características mecánicas, los cuales las hacen óptimas para un tipo de aplicación en específico. A continuación, se muestran gráficos comparativos entre estos tipos de resina.

En la Figura 1.18, se muestra los valores de elongación obtenidas por pruebas en 4 tipos de resina como es la duradera, dura, estándar y alta temperatura, lo cual se observa que la resina duradera tiende a tener un porcentaje mayor de elongación a comparación a las demás resinas.

En la Figura 1.19, se muestran las gráficas de tensión-deformación obtenidas al aplicar un ensayo de tracción a 3 tipos de resinas distintas (estándar, dura y la duradera), teniendo que la resina dura puede volver a su forma original después de aplicar sobre ella una fuerza durante un breve periodo.

En la Figura 1.20, se observa la gráfica de elongación y la última resistencia entre 3 tipos de resina (Flexible o Elástica, Durable y Dura).

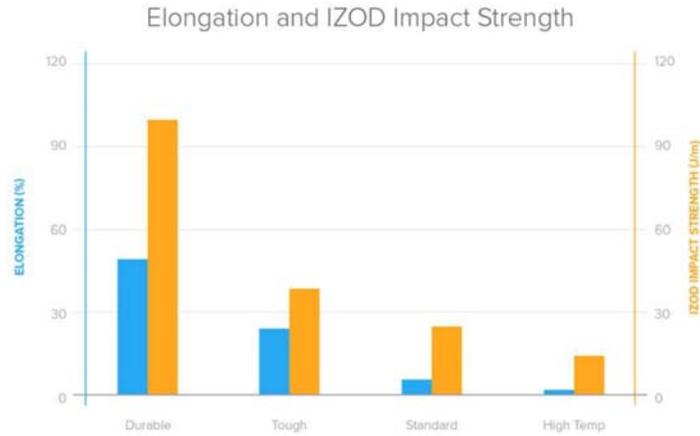


Figura 1.18. Alargamiento al impacto IZOD en 4 distintas resinas

Fuente: formlabs [7]

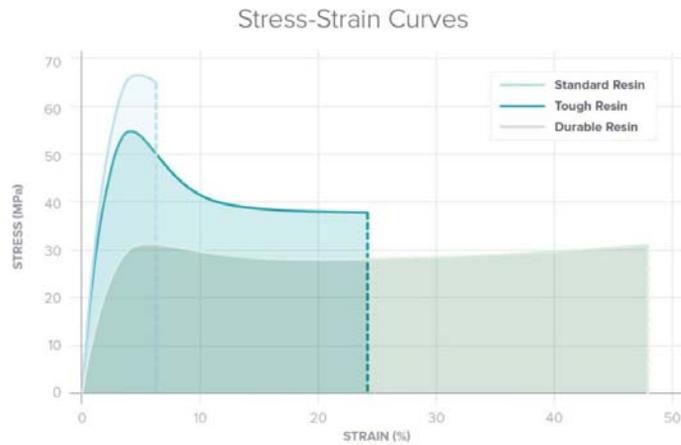


Figura 1.19. Curva de tensión-deformación entre 3 distintas resinas

Fuente: formlabs [7]

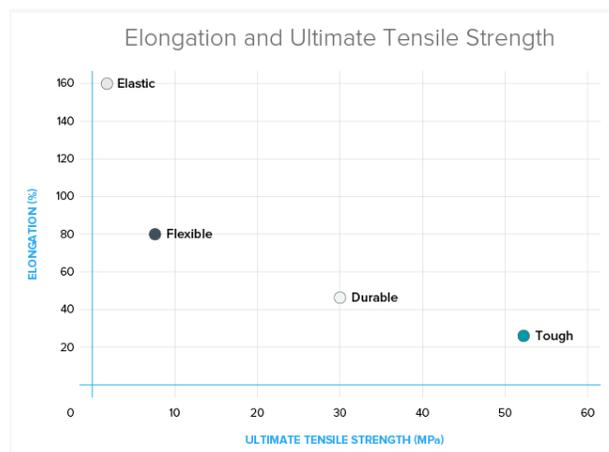


Figura 1.20. Grafica de elongación y resistencia última

Fuente: formlabs [7]

En la Figura 1.21, se compara el módulo de tracción con 4 tipos de resina (flexible, dura, estándar, alta temperatura) y la elongación que tienen.

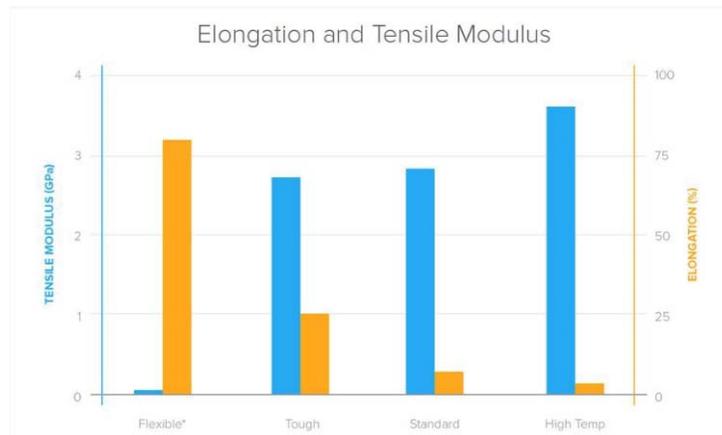


Figura 1.21. Módulo de Young y elasticidad de resinas

Fuente: formlabs [7]

En la Figura 1.22, se tiene la temperatura máxima a 0.45 MPa, y su elongación en la rotura de igual forma en 4 tipos distintos de resina.

MATERIAL	TIEMPO DE DEFLEXIÓN TÉRMICA A 0,45 MPa (POST CURADO) <sup>1</sup>	ELONGACIÓN EN LA ROTURA (POST CURADO) <sup>2</sup>
<b>Alta temperatura</b>	238 ° C	2,3%
<b>Estándar</b>	73,1 ° C	6,2%
<b>Rígido</b>	88 ° C	5,6%
<b>Grey Pro</b>	77,5 ° C	13%
<b>Difícil</b>	48,5 ° C	24%

Figura 1.22. Valores de temperatura y elongación de resinas

Fuente: formlabs [7]

Finalmente, en la Figura 1.23, se observa una gráfica donde se puede resumir lo señalado anteriormente, indicando el punto fuerte de cada una de las resinas y al tener el conocimiento de esto se puede elegir la resina adecuado para las necesidades que se requieran al momento de imprimir la pieza.

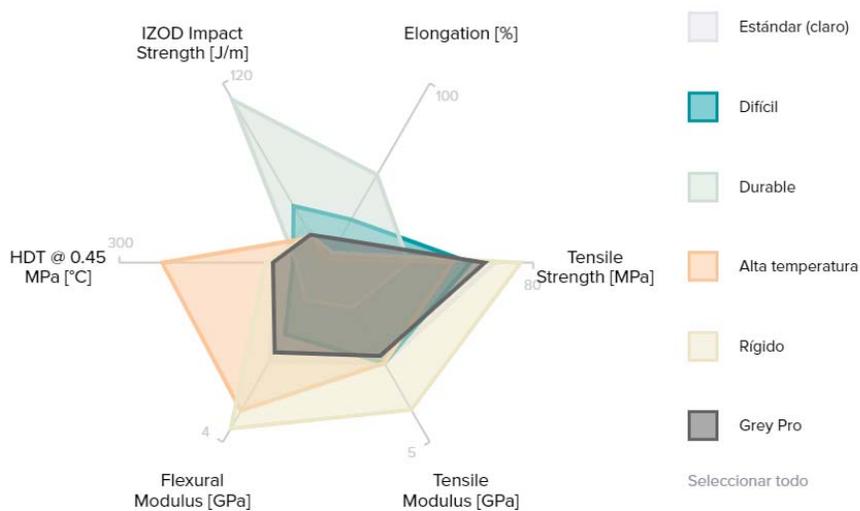


Figura 1.23. Comparación entre resinas y sus propiedades mecánicas

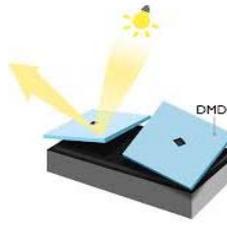
Fuente: formlabs [7]

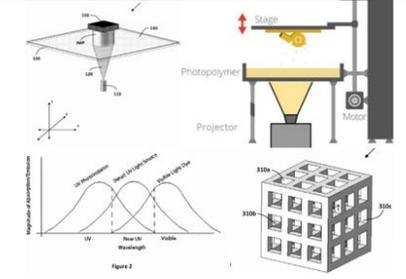
## 1.8 ESTADO DEL ARTE DEL PROCESAMIENTO DIGITAL DE LUZ

Aquí se presentan algunas máquinas comerciales que se encuentran en el mercado, tesis relacionadas y de igual forma patentes que relacionan el proyecto a presentar.

En la presente Tabla 1.1, se ilustran algunas patentes relacionadas con el mecanismo o funcionamiento de la impresora 3D.

Tabla 1.1. Patentes relacionadas con el proyecto

Patentes	Características	Imagen
Tecnología DLP	<p>Patente de la empresa norteamericana Texas Instruments, la cual consiste en un chip compuesto por una matriz de micro espejos y polarización digital, Figura 1.24. Patentado en el año 1993. Código: G02B 26/0825</p>	 <p>DLP technology</p> <p>Figura 1.24. Tecnología DLP</p> <p>Fuente: BenQ CinematicColor Technology [8]</p>

<p>Método para fabricación de piezas mediante Luz digital continua (DLP)</p>	<p>Patentada por la H. David Dean de la universidad de Meryland USA, el cual radica en el uso de la tecnología DLP para la creación de piezas impresas en 3D, Figura 1.25.</p> <p>Patentada en el año de 1993.</p> <p>Código: B29C67/0066</p>	 <p>Figura 1.25. Patente de tecnología DLP</p> <p>Fuente: GooglePatents [9]</p>
<p>Resina Fotosensible</p>	<p>Patente avalada por la oficina española de patentes y marcas en España, donde indica la composición de la resina fotosensible que actúa de forma positiva y elemento de formación de imágenes, Figura 1.26.</p> <p>Patentada en el año 2004.</p> <p>Código: B41M5/36</p>	 <p>Figura 1.26. Resina Fotosensible</p> <p>Fuente: 3D Natives [10]</p>

Entre los proyectos relacionados a nivel nacional e internacional se encuentran las siguientes:

### **Estudio y optimización del uso de estructuras de soporte para impresoras 3D de tecnología DLP**

El proyecto es una tesis realizada en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, del año 2016, en la que se inicia con la inmersión en el mundo de la impresión 3D, explicando su importancia en la actualidad, sus aplicaciones y el gran potencial que ofrece. Posteriormente, se detallan las tecnologías de impresión más importantes, incluyendo, por supuesto, la tecnología en la que se basa este proyecto, la DLP. Esta tecnología de impresión es la empleada por la LUX de BCN3D Technologies, de la que se ha realizado un estudio exhaustivo de sus propiedades, del tipo de material que utiliza, del software y del proceso de impresión que lleva a cabo, con el fin de mejorarlo [11]. (Figura 1.27)

Aquí se realizaron impresiones de piezas de soporte para realizar varios tipos de pruebas, como es la fuerza y tensión, fuerza de separación, tensión debidas a las

fuerzas de separación, fuerzas de compresión, tensiones debidas a la fuerza de compresión, fuerza debida a la recirculación de resina y el tiempo de impresión a comparación de otras impresoras 3D, ver Figura 1.28.

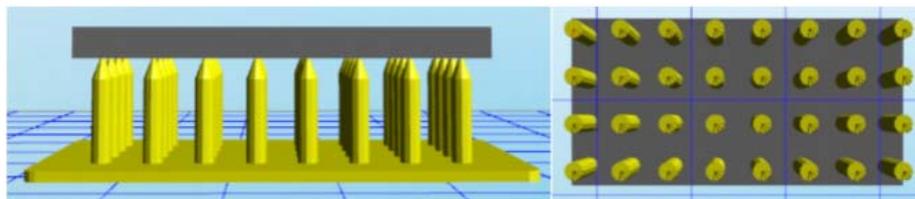


Figura 1.27. Modelo 3D en software de impresión

Fuente: Proyecto fin de grado Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, software [12]

Distancia entre soportes	5 mm	
Número de soportes	32	
Diámetro de punta	0.2 mm	
Área de sección mínima	1 mm <sup>2</sup>	
Relación de áreas teórica	$\frac{800 \text{ mm}^2}{1 \text{ mm}^2}$	

Figura 1.28. Resultados de la pieza impresa con tecnología DLP

Fuente: Proyecto fin de grado Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, pruebas [12]

### **Diseño y construcción de un equipo de impresión 3D con resina fotosensible UV para elaborar prototipos de piezas por medio del proceso DLP**

El proyecto fue realizado como tesis en la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE) Sangolquí, en 2015, donde se propone construir una impresora 3D con tecnología DLP para la creación de prototipos tridimensionales, y se investiga sobre los elementos que intervienen directamente en la funcionalidad de la impresora como lentes, resinas, foto iniciador, proyectores UV, plataforma y la base de la resina. Se escoge los elementos más adecuados para el proyecto de tal forma que la impresora pueda generar prototipos adecuados que sigan las siguientes características. Área de impresión (X=100 mm Y=100 mm Z=100mm), con una resolución de impresión de 100

a 80  $\mu\text{m}$ . Alcanzando como resultado una velocidad de impresión de 6 segundos por cada capa, y cada capa tiene un espesor de 100 $\mu\text{m}$  [3]. (Figura 1.29)



Figura 1.29. Impresora 3D con tecnología DLP realizada en la ESPE

Fuente: Tesis ESPE sangolquí [3]

La impresora desarrollada tiene una dimensión de 727mm de alto, 401mm de ancho y 349 mm de largo.

Los resultados obtenidos con la impresora realizada fueron óptimos, llegando a la precisión requerida y obteniendo piezas impresas de alta calidad y de difícil obtención de otras impresoras, en la Figura 1.30, se observa la pieza simulada y la pieza impresa, y en la Tabla 1.2 los valores reales y medidos.

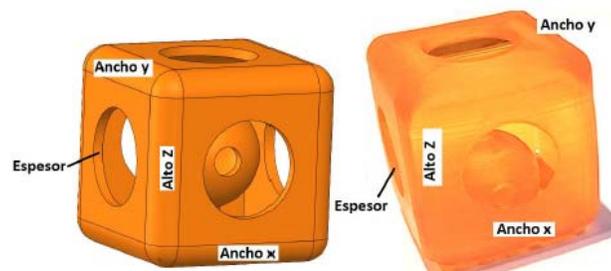


Figura 1.30. Pieza simulada e impresa con la impresora 3D DLP de la ESPE

Fuente: Tesis ESPE sangolquí [3]

Tabla 1.2. Valores reales y medidos de la pieza impresa

	Software	DLP	Error	Tolerancia	Estado Continúa
<b>Espesor</b>	1,5	1,51	0,01	0,1	ok
<b>alto Z</b>	30	30,1	0,1	0,1	ok
<b>ancho x</b>	30	30,1	0,1	0,1	ok
<b>ancho y</b>	30	30,06	0,06	0,1	ok

### Impresora 3d DLP de alta resolución

Desarrollado por ingenieros mexicanos en el año 2014 y mediante pruebas, errores y correcciones se obtuvo el proyecto a inicios del año 2015. Donde sus pruebas iniciales partieron de procedimientos básicos donde la luz ilumina la resina y la resina se endurece, dependiendo la intensidad de luz influyente, esta inducirá la fotopolimerización, se estudiaron los parámetros de la cantidad de energía sobre la resina líquida, en la cual se consideró la energía del fotón, la intensidad de luz, y la duración de la iluminación, obteniendo que por lo general en curado de materiales con la luz UV, la dosis solo se mide para una parte específica del espectro, porque el resto de la luz por lo general se refleja o es absorbida y convertida en calor. La mayoría de las resinas de curado por luz se curan bajo la luz UV con una longitud de onda entre 365nm y 420nm.

El tiempo de iluminación y la intensidad de la iluminación son factores radicales para el tipo de impresión que se va a tener, por lo que cuanto más tiempo se ilumina la resina, más profundo penetra la luz y más dura y gruesa acaba siendo la capa por imprimirse, por lo que la fuente de luz tiene que ser de alta intensidad para que el tiempo de iluminación sea lo más corto posible. Por ahorro de resina se escogió la impresión de abajo hacia arriba para usar únicamente un litro de resina con un costo aproximado de \$60 americanos.

Los resultados obtenidos fueron los requerido en los objetivos del proyecto con un área de impresión máxima de 100 x 100 mm y una altura máxima de 200mm. (Figura 1.31)

El desarrollo de la impresora tuvo un costo de \$1750 solo en materiales [13].



Figura 1.31. Impresora 3D DLP desarrollado por ingenieros mexicanos y junto con ejemplares de piezas impresas

Fuente: Technology, 3D-Printing [13]

A continuación, se presentan impresoras que se encuentran en el mercado, pero con distintas formas de impresión y de precisión.

### 1.8.1 IMPRESORA 3D CON TECNOLOGÍA DLP COMERCIALES

En este apartado se muestran 5 tipos de impresoras comerciales que se pueden ser adquiridos por medio de compras por internet, y de igual forma fabricadas por grandes empresas con reconocimiento internacional, Tabla 1.3.

Tabla 1.3. Impresoras 3D con tecnología DLP Comerciales

Impresora	Imagen	Característica					Costo
		Marca	Resolución de impresión	Dimensiones Exteriores	Volumen de impresión	Velocidad de Impresión	
Form 2	 <p>Figura 1.32. Impresora Form 2</p> <p>Fuente: Formlabs [14]</p>	Formlabs	25-100 $\mu$ m	350 x 330 x 520 mm	145 x 145 x 175 mm	-	\$3350

<p>Nobel 1.0</p>	 <p>Figura 1.33. Impresora Nobel 1.0</p> <p>Fuente: XYZprinting Nobel [15]</p>	<p>XYZprinting Nobel</p>	<p>300 <math>\mu</math>m</p>	<p>280 x 337 x 590 mm</p>	<p>128 x 128 x 200 mm</p>	<p>-</p>	<p>€1899</p>
<p>B9 Creator</p>	 <p>Figura 1.34. Impresora B9 Creator</p> <p>Fuente: B9C [16]</p>	<p>B9C</p>	<p>30<math>\mu</math>m</p>	<p>300 x 250 x 400 mm</p>	<p>104 x 75 x 203 mm</p>	<p>-</p>	<p>\$4595</p>
<p>Titan 2 HR</p>	 <p>Figura 1.35. Impresora Titan 2 HR</p> <p>Fuente: Kudo3d [17]</p>	<p>Kudo3d</p>	<p>50<math>\mu</math>m</p>	<p>410 x 350 x 850 mm</p>	<p>130 x 80 x 250 mm</p>	<p>7cm/h</p>	<p>\$3699 - \$3799</p>

Ember Autodesk	 <p data-bbox="451 499 651 583">Figura 1.36. Impresora Ember Autodesk</p> <p data-bbox="461 611 641 680">Fuente: Kudo3d [18]</p>	Autodesk	50 $\mu$ m	350 x 300 x 450 mm	64 x 40 x 134 mm	6 - 6,5 cm/h	\$5995
-------------------	---	----------	------------	--------------------	------------------	--------------	--------

## **CAPÍTULO II**

### **ANÁLISIS, ESTUDIO Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS**

#### **2.1 CASA DE CALIDAD**

“La primera de estas matrices (o casa de la calidad), traducen las demandas de los usuarios (o voz del cliente) en requerimientos técnicos del producto. Es la de aplicación más frecuente y en ella se distingue 6 paso:” [19].

- 1) Voz del usuario: Describe las demandas de los usuarios.
- 2) Análisis de competitividad: Describe el grado de satisfacción que proporcionan los productos o servicios de la empresa respecto a los de la competencia.
- 3) Voz del ingeniero: Describe los requerimientos técnicos que deberán articularse para satisfacer las necesidades de los usuarios.
- 4) Correlaciones: Establece las correlaciones entre la voz de los usuarios y la voz del ingeniero.
- 5) Comparación técnica: Compara el producto de la empresa con los de la competencia.
- 6) Compromisos técnicos: Establece los compromisos potenciales entre las diferentes características técnicas del producto.

##### **2.1.1 VOZ DEL USUARIO**

En esta sección se presentan las demandas de los clientes, las cuales son de suma importancia para el diseño del producto. Por ende, se presentan la lista de demanda de la empresa Ingenius 3D, Ver Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Voz del cliente de la empresa Ingenius 3D

Número	Requerimiento
1	La impresora sea más rápida que la impresora 3D convencional FDM.
2	Sea fácil de transportar.
3	El peso no sobrepase a los 20Kg.
4	Fácil de usar.
5	Software en lo posible libre.
6	Consumo de energía igual o menos a impreso convencional.
7	Costo de la impresora menor a las comerciales.
8	Ahorro en el material (resina).
9	Fácil mantenimiento.
10	Se vea estético para los clientes.
11	Tener una buena resolución de la pieza impresa
12	La cámara debe encapsular el olor de la resina.
13	Pieza impresa sea lo suficientemente resistente como una de PLA.
14	Evitar colocar soportes en las impresiones.
15	Los costos de impresión no muy elevados.
16	Imprimir varias piezas al mismo tiempo.
17	La resina sea fácil de conseguir.
18	Variedad de colores de resina dependiendo los requerimientos del cliente.
19	Envío del software a la impresora en lo posible no sea por una SD. (USB, WIFI, Bluetooth).
20	Impresora rígida en el caso de accidentes.
21	Piezas mecánicas, eléctricas de fácil adquisición. (llamarme)
22	Recuperar lo invertido dentro de los primeros meses de funcionamiento de la impresora.
23	El tanque de resina se pueda retirar para su limpieza o recoger la resina restante.
24	Las dimensiones exteriores no sean en lo posible más de medio metro.
25	El área de impresión sea de 150 mm x 150 mm y altura de 200 a 250 mm
26	Que no sea muy ruidosa.
27	Se pueda observar la pieza que se está imprimiendo.

Como se observa existen muchos requerimientos de la empresa, pero algunos de ellos son capaces de agruparse, por tener la misma finalidad de requerimientos, ver Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Agrupación de la voz del usuario

#Requerimiento	Número	Requerimiento
1	1,11, 13, 14, 16, 18	La impresora por DLP sea más eficaz y eficiente que la impresora convencional 3D.
2	2,3, 20, 24, 25	La impresora debe permitir su traslado de un lugar a otro con facilidad.
3	4, 5	El programa de la impresora en lo posible sea un software libre.
4	6,7,8	La impresora DLP no tenga un costo de fabricación mayor a \$1500.
5	9, 10, 12, 18, 21, 26	Impresora sea fácil de reparar y desmontar.
6	27	Que encapsule la pieza en un compartimiento donde se pueda observar la pieza a imprimir.
7	15, 22	La impresora no consuma mucha energía.
8	19	No usar tarjeta SD para cargar el archivo a imprimir.

### 2.1.2 VOZ DEL INGENIERO

En esta fase se va a describir los requerimientos técnicos referente a las necesidades del usuario que se mencionaron en el punto anterior, Tabla 2.3:

Tabla 2.3 Voz del Ingeniero

# Requerimiento	Requerimientos Usuario	Requerimiento técnico
1	La impresora por DLP sea más eficaz y eficiente que la impresora convencional 3D.	Mejor resolución de las piezas impresas.
2	La impresora debe permitir su traslado de un lugar a otro con facilidad.	Dimensiones, peso y rigidez.
3	El programa de la impresora en lo posible sea libre.	Software libre
4	La impresora DLP no tenga un costo de mayor al de las impresoras comerciales.	Costo admisible.
5	Impresora sea fácil de reparar y desmontar.	Estructura modular
6	Que encapsule la pieza en un compartimiento donde se pueda observar la pieza a imprimir.	Volumen de impresión con protección de rayos UV.
7	La impresora no consuma mucha energía.	Consumo energético reducido.

<b>8</b>	Usar tarjeta SD para cargar el archivo a imprimir.	Uso de SD para envío de archivo.
----------	--	----------------------------------

### 2.1.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

En la Tabla 2.4 se encuentran las especificaciones técnicas necesarias para el diseño del proyecto, junto con los requerimientos y deseos propuestos por parte del cliente y del diseñador

Tabla 2.4 Especificaciones para el desarrollo del diseño del producto

<b>Empresa:</b> Ingenius 3D		<b>Producto:</b> Impresora 3D con tecnología DLP		Fecha inicial: 03/04/2018
<b>Diseñadores:</b> Mauricio González				Ultima revisión: 26/08/2019
Pagina 1				
Especificaciones				
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Función	26/8/2019	C	R	Uso de tecnología DLP para la reacción de solidificación en la resina fotosensible con eficiencia del 90%
		D	R	Longitud de onda UV entre 365nm a 420 nm
		C+D	R	Tiempo de impresión entre capa aproximada de 6 segundos.
		C+D	R	Dimensión de área de trabajo máximo de 150mm x 150mm.
Materiales	26/8/2019	D	R	Plataforma adherente distinta para cada tipo de resina fotosensible.
		D	R	Porcentaje de transparencia del tanque mayor al 85%.
		D	R	Recubrimiento de vidrio con Sylgard 184, transparente anti-adhesión.
Transporte	26/8/2019	C	R	Fácil transporte de la impresora, con un peso aproximado de 20Kg.
		C	R	Altura máxima de 60cm.
Costo y Plazo	26/8/2019	C	R	Costo de fabricación de \$1500
		D	R	Plazo de 365 días a partir de la aprobación del tema de tesis.
Impacto Ambiental	26/8/2019	C	D	Reducción del consumo energético hasta un 30% a comparación de impresora FDM

### 2.1.4 ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LA CASA DE LA CALIDAD

Una vez conocidas las necesidades del usuario y haberlas transformadas en requerimientos técnicos se desarrolla la casa de la calidad, ver ANEXO 1.

Con esta casa de calidad se observa que el valor de mayor ponderación son las dimensiones, peso y rigidez de la impresora alcanzando un total del 20% de los requerimientos, por lo cual se debe tomar mayor énfasis en estos aspectos al momento de diseñar la impresora.

Uno de los aspectos a considerar para la mejora de la máquina es la implementación de una entrada USB lo cual muchas de las máquinas de la competencia ya lo tienen implementado a igual de la integración de la transferencia de información vía wifi, haciendo que la impresora sea menos competitiva frente a las mencionadas con anterioridad.

La mayor ponderación de correlación es de las dimensiones, peso y rigidez junto con la estructura modular y el volumen de impresión por la razón de que al cambiar uno de estos factores, también harán que los dos restantes varían en un tanto porcentaje.

## **2.2 DISEÑO CONCEPTUAL**

En esta etapa se desarrollan las posibles alternativas en que se basan las especificaciones del sistema escogida de los puntos anteriores.

### **2.2.1 ANÁLISIS FUNCIONAL**

Como herramientas de diseño conceptual se encuentran establecidas la estructura funcional del sistema, en la cual con el uso de diagrama de bloques se deben representar las funciones que deberá realizar el producto, teniendo como entradas los materiales, energías y señales, y como resultado una salida funcional.

En el nivel 0 se va a presentar de manera general el proceso propuesto. (Figura 2.1)

#### **Nivel 0**



Figura 37. Módulo Nivel 0

## Nivel 1

En el nivel 1, se ilustran los procesos que involucran el desarrollo y creación de resultados para la obtención de piezas impresas por solidificación de resina fotosensible, donde se integran todas las partes importantes del sistema, Ver Figura 2.2.

En la Tabla 2.5, se muestra los materiales que intervienen como entradas en cada uno de los bloques del nivel 1.

Tabla 2.5. Materiales para el nivel 1

	Descripción
<b>Materiales 1</b>	Aluminio, pernos, tornillos, perfiles de aluminio, otros.
<b>Materiales 2</b>	Motores, soportes, plataforma, tuercas, tornillos.
<b>Materiales 3</b>	Sensores, finales de carrera, cables, conectores, otros.
<b>Materiales 4</b>	Cable USB, Arduino, alimentación, otros.

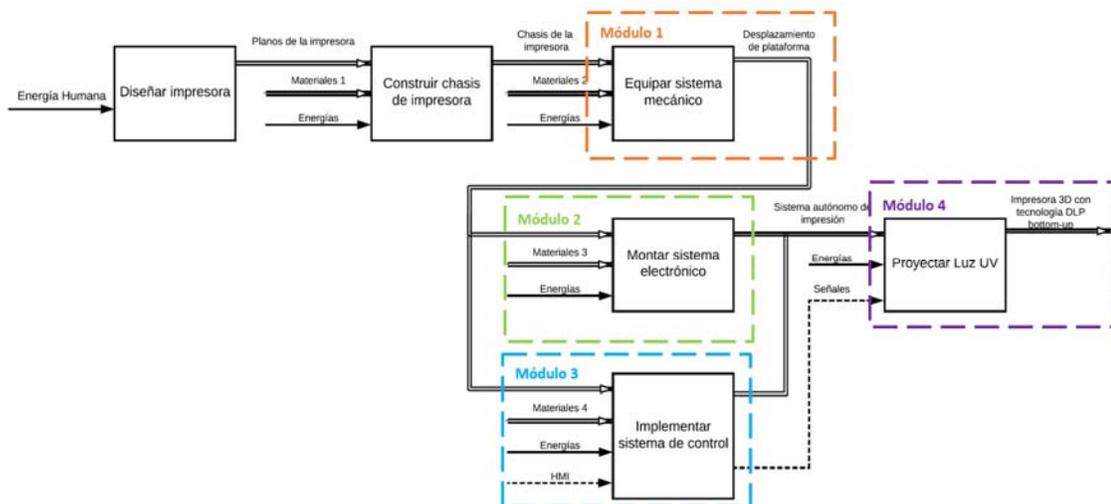


Figura 38. Módulo Nivel 2

## Nivel 2

En el nivel 2 se muestran cada uno de los módulos del nivel 1, se detalla cada uno de sus procesos que intervienen. (Figura 2.3).

En la Tabla 2.6 y Tabla 2.7 se muestran los tipos de materiales y energías que son entradas para cada uno de los bloques del nivel 2.

Tabla 2.6. Materiales Nivel 2

	Descripción
<b>Materiales 5</b>	Rodamiento, plataforma, motor, correa, polea, otros.
<b>Materiales 6</b>	Cables, conectores electrónicos, amarraderas, paro de emergencia, alimentación, estaño.
<b>Materiales 7</b>	Cables de comunicación, conectores, computador.
<b>Materiales 8</b>	Proyector, resina.

Tabla 7 Energías Nivel 2

	Descripción
<b>Energías 1</b>	Energía Eléctrica y Energía Mecánica
<b>Energías 2</b>	Energía Mecánica y Energía Manual
<b>Energías 3</b>	Energía Electrónica, Energía Mecánica y Energía Manual.
<b>Energías 4</b>	Energía Electrónica y Energía Manual

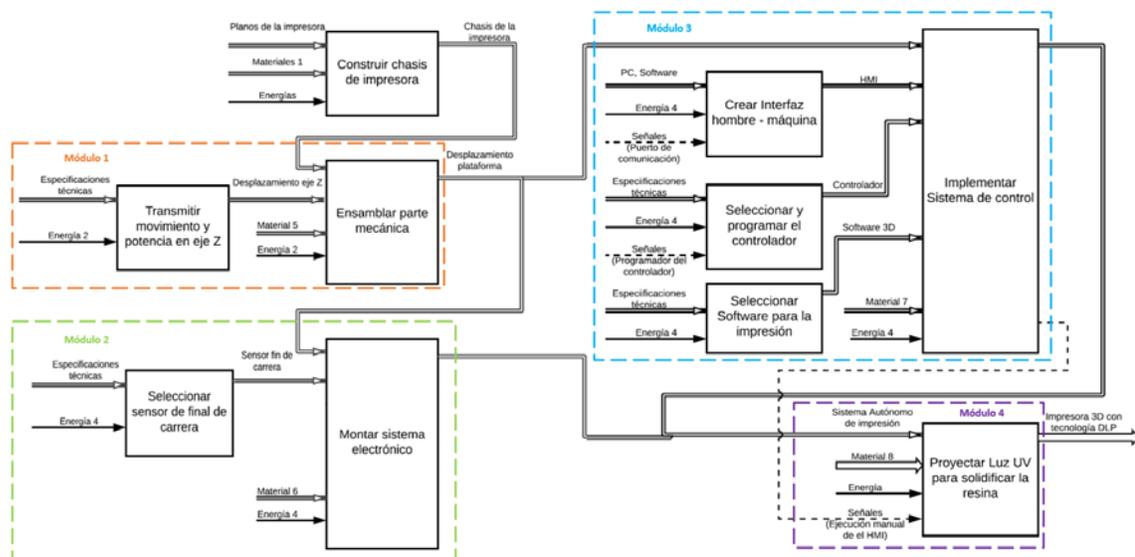


Figura 39. Módulo Nivel 3

### 2.2.2 DEFINICIÓN DE MÓDULOS FUNCIONALES

La definición de los módulos funcionales es una parte importante del diseño conceptual. Este desarrollo es de gran ayuda al momento de realizar el proceso de diseño ya que permite analizar por parte el proceso de desarrollo y funcionamiento de la impresora.

Una vez establecido los niveles del análisis funcional, se señala los módulos para el diseño.

- **Módulo 1:** Equipar sistema Mecánico

En este módulo se tiene como entradas las especificaciones técnicas sobre el tipo de desplazamiento y las energías eléctrica y mecánica para tener como resultado el tipo de desplazamiento requerido de la impresora, una vez realizado todo este procedimiento se añade materiales como pernos, tornillos, arandelas, remaches, plataforma y motor, e ensamblando cada uno de los componentes para tener como resultado el desplazamiento de la plataforma que servirá como base para la pieza a imprimir.

- **Módulo 2:** Montar sistema electrónico

En esta sección se investiga y se selecciona el sensor que sirva como final de carrera para el desplazamiento de la plataforma y junto con energía eléctrica, humana y mecánica tener un sistema que involucre y sincronice la parte mecánica con la electrónica.

- **Módulo 3:** Implementar sistema de control

Una vez realizado el desplazamiento de la plataforma se implementa el sistema de control junto con el módulo 2, teniendo como entradas la interfaz hombre-máquina, el programa del controlador y el software de impresión teniendo como señales de entrada el puerto de comunicación, el programa del controlador y una vez implementado el sistema de control se tiene un sistema autónomo de impresión.

- **Módulo 4:** Proyectar luz UV

El último módulo que es la proyección UV se tiene como entrada el sistema autónomo de impresión y de señal la ejecución manual del HMI para que pueda imprimir la pieza utilizando la energía electrónica del proyector, y teniendo como resultado la impresora 3D con tecnología DLP.

## 2.2.3 SOLUCIONES PARA CADA MÓDULO

En esta sección se busca encontrar las posibles alternativas que permitan el funcionamiento de la impresora y cumplan con los requerimientos tanto del cliente como del ingeniero, con la posibilidad de adquirir cada uno de los productos en lo posible en el mercado nacional para facilitar su construcción y reemplazar sus partes en el caso de que exista un problema o fallo.

### 2.2.3.1 SOLUCIONES MÓDULO 1

En la Tabla 2.8, se indican las posibles soluciones para resolver el funcionamiento presentado en el módulo 1.

Tabla 8 Soluciones módulo 1

<b>Solución módulo 1</b>	
<b>Transmitir movimiento de potencia</b>	
<b>Tornillo de potencia</b>	<b>Polea y Correa</b>
<p>El tornillo de potencia es un elemento utilizado para cambiar el movimiento angular en lineal o viceversa y de esta manera transmitir potencial, este sistema de desplazamiento es el más utilizado para las impresoras 3D por su rigidez.</p>  <p>Figura 40 Tornillo de potencia Fuente: Elementos de máquina [20]</p>	<p>Es un sistema formado por un par de ruedas o poleas que se encuentran a cierta distancia con ejes en paralelo que giran simultáneamente transmitiendo el movimiento desde el eje de entrada hasta el eje de salida mediante una correa.</p>  <p>Figura 41 Polea y Correa Fuente: Sistemas de polea y correa [21]</p>

### 2.2.3.2 SOLUCIONES MÓDULO 2

En la Tabla 2.9, se indican las posibles soluciones para resolver el funcionamiento presentado en el módulo 2.

Tabla 9 Soluciones módulo 2

<b>Solución módulo 2</b>	
<b>Final de Carrera</b>	
<b>Final de Carrera con Conexión</b>	<b>Sensor óptico de barrera infrarroja</b>

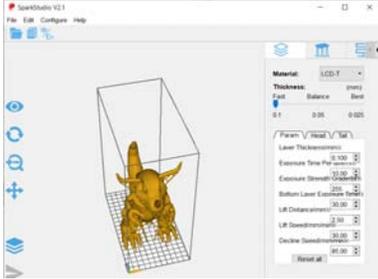
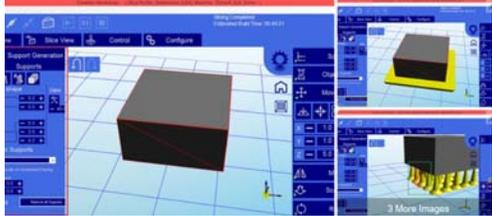
<p>Poseen una carcasa con conexión donde es posible abrirle para poder acceder al bloqueo de terminales, es beneficioso en el caso de que, si sufre de algún tipo de daño, solo basta en retirar el cuerpo del interruptor y enchufar uno nuevo, ni hace falta realizar nuevamente el cableado.</p>	 <p>Figura 42. Final de carrera de conexión</p> <p>Fuente: Direct Industry [22]</p>	<p>Consta de un diodo emisor de infrarrojo y un NPN, con un tiempo de respuesta rápido, el cual al momento de interrumpir el sincronismo por la presencia de algún elemento entre sus ranuras envía una señal por el emisor.</p>	 <p>Figura 43 Sensor óptico de barrera infrarroja</p> <p>Fuente: tostatron [23]</p>
---	--	--	--

### 2.2.3.3 SOLUCIONES MÓDULO 3

En la Tabla 2.10, se indican las posibles soluciones para resolver el funcionamiento presentado en el módulo 3.

Tabla 10 Soluciones módulo 3

Solución módulo 3			
Interfaz hombre-máquina		Controlador	
Python	Arduino	Shield CNC Arduino / Arduino UNO	RAMPS Mega Shield v1.4 / Arduino MEGA 2560
<p>Lenguaje de programación que está orientada a objetos, que utiliza programación dinámica y es de multiplataforma. Su forma de programar es sencilla, ordenada y limpia. Cuenta con librerías que involucran visión artificial y es software libre. En el caso que se desea realizar interfaz gráfico no es muy recomendado.</p>  <p>Figura 44. Lenguaje de programación Python</p> <p>Fuente: Pythonj [24]</p>	<p>Es una plataforma de desarrollo que se basa en un lenguaje de programación sencillo para el usuario, abarcando muchas funcionalidades por los bastos elementos que permiten distintas funcionalidades y trabajos en ella.</p>  <p>Figura 45. Lenguaje de programación Arduino</p> <p>Fuente: Arduino [25]</p>	<p>Es una placa que permite controlar hasta cuatro motores paso a paso de una forma fácil junto con un Arduino Uno y polulu A4988, disponiendo varias conexiones para conectar interruptores de final de carrera, salidas a relé, y diversidad de sensores. Programada en Arduino y su costo es de \$7.</p>  <p>Figura 46 Shield de Arduino</p> <p>Fuente: Arduino [25]</p>	<p>Diseñado para el Arduino Mega 2560, con el soporte para todas las funcionalidades necesarias para una impresora 3D RepRap. Compatible para drivers de motores, conexiones para 6 finales de carrera, conexión a tres termistores. Programado en Arduino y su costo es de \$15.</p>  <p>Figura 47 RAMPS Mega Shield v1.4</p> <p>Fuente: Reprap [26]</p>
<b>Software de Impresión</b>			

SparkStudio	Creation Workshop 3D
<p>Es un software libre que trabaja con importación de archivos STL. Que es estrictamente para impresoras DLP. Y requiere una tarjeta de control que identifique el envío de archivos.</p>  <p>Figura 48 Software SparkStudio</p>	<p>Diseñado para ser un juego de herramientas, los usuarios pueden controlar la impresora. Trabaja con STL, OBJ. Necesita tarjeta controladora para cada tipo de impresora, y no es un software libre.</p>  <p>Figura 49 Programa DLP creation workshop 3D</p> <p>Fuente: Creation Workshop [27]</p>

**2.2.3.4 SOLUCIONES MÓDULO 4**

En la Tabla 2.11, se indican las posibles soluciones para resolver el funcionamiento presentado en el módulo 4.

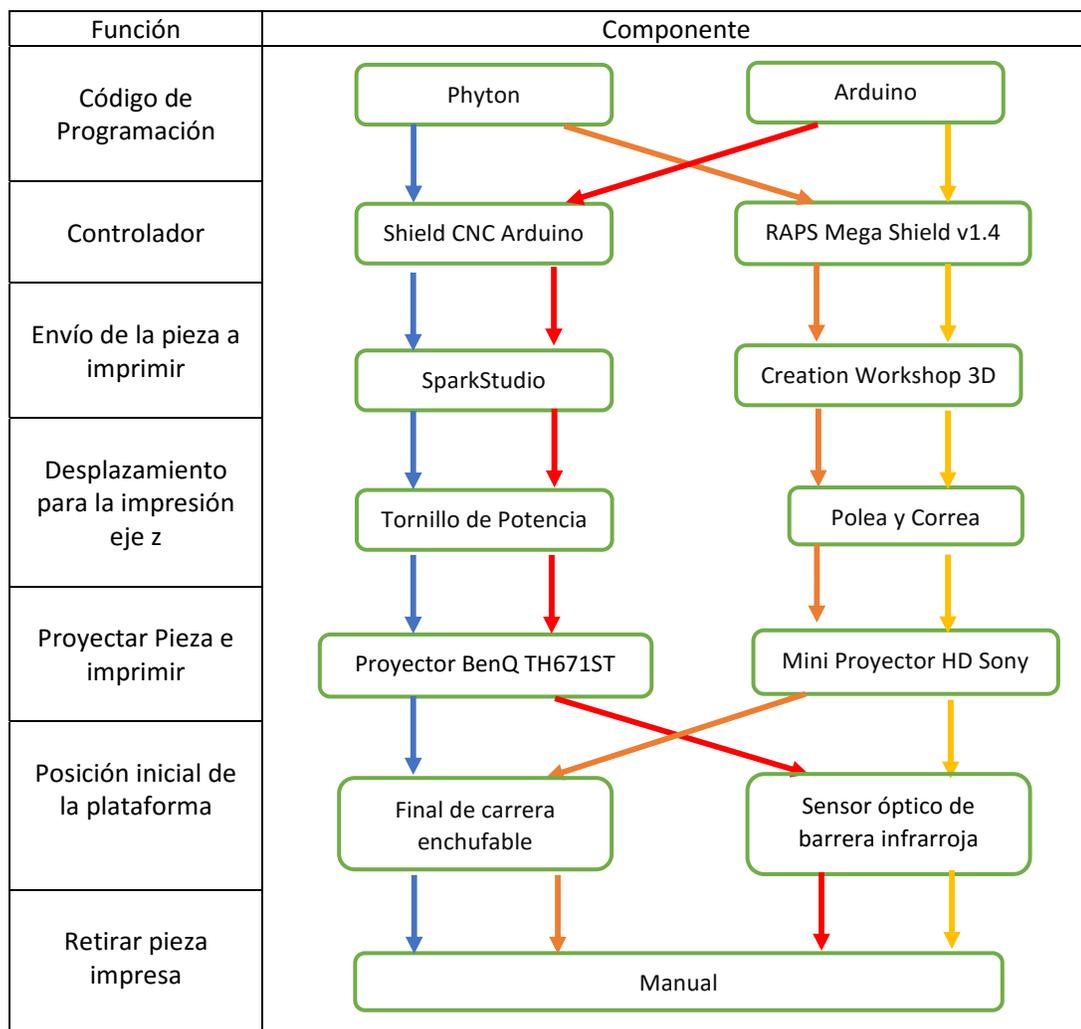
Tabla 11 Soluciones módulo 4

<b>Solución módulo 4</b>	
<b>Proyectores Luz UV</b>	
<b>Mini proyector HD Sony</b>	<b>BenQ TH671ST Full HD DLP</b>
<p>Calidad de imágenes HD con una calidad de 1920 x 720 HD con una relación de aspecto de 16:9 para largo alcance, conexión inalámbrica y puerto USB, tamaño de pantalla hasta 120 pixeles, contraste secuencial de 80.000:1, un peso de 210 gr. Brillo de 700 lúmenes. Altura de proyección desde 40 pulgadas (1m) hasta 120 pulgadas (3m). Dimensiones del producto de 77mm x 150mm x 13mm. Costo en el mercado nacional de \$300.</p>  <p>Figura 50 Mini proyector HD SONY</p> <p>Fuente: SONY [28]</p>	<p>Calidad de imagen Full HD con una resolución nativa de 1920 x 1080 pixeles, relación de aspecto de 0.69 a 0.83: 1 para corto alcance. Brillo de 3000 lúmenes. Puertos USB con un contraste secuencial de 10 000:1. Altura máxima de pantalla de proyección de 14 pulgadas (35cm) y un peso de 5.9 Lb. Dimensiones del producto de 11.7 x 4.6 x 9.5 pulgadas (30 x 12 x 24 cm). Costo en el mercado nacional de \$930.</p>  <p>Figura 51 Proyector BenQ TH671ST</p> <p>Fuente: BENQ [29]</p>

## 2.3 MATRIZ MORFOLÓGICA

Una vez que se hayan establecido las posibles opciones para cada uno de los módulos se desarrolla la matriz morfológica, aquí se representan las diferentes opciones que permitan la construcción de la impresora. Todas las opciones que se generen a partir de la matriz morfológica deberán cumplir con los objetivos de la impresora y posteriormente se utiliza el criterio de residuos ponderados para obtener la mejor opción, ver Tabla 2.12.

Tabla 12 Matriz Morfológica



Alternativa 1, Alternativa 2, Alternativa 3 y Alternativa 4

### 2.3.1 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

En esta sección se profundiza las alternativas seleccionadas en la matriz morfológica, con el fin de seleccionar la mejor alternativa con ayuda del método de criterios ponderados, donde el diseñador debe cuantificar las características de cada una de las alternativas seleccionadas, comparando su efectividad y que cumpla con las especificaciones y objetivos de la impresora a desarrollar.

Aquí se desarrollan tablas donde cada una de las soluciones se comparan y se ponderan con las alternativas restantes, y se asignan valores según su importancia.

Para el desarrollo las matrices de criterios ponderados se asignaron los siguientes valores:

- 1 si el criterio o solución de las filas es superior o mejor que el de las columnas.
- 0.5 si el criterio o solución de las filas es equivalente al de las columnas.
- 0 si el criterio o solución de las filas es inferior o peor que el de las columnas.

“Luego, para cada criterio (o solución), se suman los valores asignados en relación a los restantes criterios (o soluciones) al que se le añade una unidad (para evitar que el criterio o solución menos favorable tenga una valoración nula); después, en otra columna se calculan los valores ponderados para cada criterio (o solución). Finalmente, la evaluación total para cada solución resulta de la suma de productos de los pesos específicos de cada solución por el peso específico del respectivo criterio [30].”

### 2.3.2 MATRIZ DE CRITERIOS PONDERADOS

Para utilizar el método de criterios ponderados es importante evaluar los criterios seleccionados en la Tabla 2.4, para el funcionamiento de la impresora.

a) Función:

Utilizar tecnología DLP para la reacción de salificación de la resina fotosensible con un área de trabajo establecida.

b) Materiales:

Son importantes ya que se requiere que la impresora sea resistente y que los materiales utilizados tanto en el tanque como en la plataforma de sujeción puedan soportar la resina y la reacción de los rayos UV.

c) Transporte:

La impresora no debe sobrepasar un peso específico para que sea fácil de transportar y de igual forma sus dimensiones deben ser factibles para que el usuario pueda manipularlo sin ninguna dificultad.

d) Costo y Plazo:

Esta impresora deberá estar dentro del costo competitivo y del capital dado por parte de la empresa representante, y de igual forma el plazo de fabricación deberá respetar el tiempo establecido por la universidad.

e) Impacto Ambiental:

Reducción en el tiempo de impresión por la facilidad de impresión por capaz reduciendo así el consumo de energía.

En la Tabla 2.13 se realiza la ponderación de los criterios mencionados anteriormente.

Tabla 13 Ponderación de los criterios

Criterios	Función	Materiales	Transporte	Costo y Plazo	Imp. Amb.	$\Sigma+1$	Ponderación
Función		1	1	1	1	5	0,33333333
Materiales	0		0,5	0	1	2,5	0,16666667
Transporte	0	0,5		0,5	1	3	0,2
Costo y Plazo	0	1	0,5		0,5	3	0,2
Imp. Amb.	0	0	0	0,5		1,5	0,1
<b>Suma</b>						15	1
<b>Función &gt; Transporte = Costo y Plazo &gt; Materiales &gt; Impacto Ambiental</b>							

En la Tabla 2.14 al 2.18 se evalúan cada una de las alternativas de solución en función de cada criterio.

Tabla 14 Análisis de la Función en las diferentes alternativas

Criterios	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0	0,5	2,5	0,25
Alternativa 2	0		0	0,5	1,5	0,15
Alternativa 3	1	1		1	4	0,4
Alternativa 4	0,5	0,5	0		2	0,2
<b>Suma</b>					10	1
<b>Alternativa 3 &gt; Alternativa 1 &gt; Alternativa 4 &gt; Alternativa 2</b>						

Tabla 15 Análisis de Materiales en las diferentes alternativas

Criterios	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	0,5	1	3	0,3
Alternativa 2	0,5		0	0,5	2	0,2
Alternativa 3	0,5	1		1	3,5	0,35
Alternativa 4	0	0,5	0		1,5	0,15
<b>Suma</b>					10	1
<b>Alternativa 3 &gt; Alternativa 1 &gt; Alternativa 2 &gt; Alternativa 4</b>						

Tabla 16 Análisis de Transporte en las diferentes alternativas

Criterios	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	0	0	1,5	0,15
Alternativa 2	0,5		0	0,5	2	0,2
Alternativa 3	1	1		0,5	3,5	0,35
Alternativa 4	1	0,5	0,5		3	0,3
<b>Suma</b>					10	1
<b>Alternativa 3 &gt; Alternativa 4 &gt; Alternativa 2 &gt; Alternativa 1</b>						

Tabla 17 Análisis de Costo y Plazo en las diferentes alternativas

Criterios	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		1	0,5	1	3,5	0,35
Alternativa 2	0		0	0,5	1,5	0,15
Alternativa 3	0,5	1		1	3,5	0,35
Alternativa 4	0	0,5	0		1,5	0,15
<b>Suma</b>					10	1
<b>Alternativa 3 = Alternativa 1 &gt; Alternativa 2 = Alternativa 4</b>						

Tabla 18 Análisis de Impacto Ambiental en las diferentes alternativas

Criterios	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa 1		0,5	0	0	1,5	0,15
Alternativa 2	0,5		0	0	1,5	0,15
Alternativa 3	1	1		0,5	3,5	0,35
Alternativa 4	1	1	0,5		3,5	0,35
<b>Suma</b>					10	1
<b>Alternativa 3 = Alternativa 4 &gt; Alternativa 2 = Alternativa 1</b>						

Una vez analizado y comparado cada una de las posibles alternativas se realiza una tabla de prioridades, la cual permite identificar cual es la mejor alternativa en comparación a los demás criterios, ver Tabla 2.19.

Tabla 19 Tabla de Prioridades

Conclusión	Función	Materiales	Transporte	Costo y Plazo	Imp. Amb.	$\Sigma$	Prioridad
Alternativa 1	0,08	0,05	0,03	0,07	0,015	0,25	2
Alternativa 2	0,05	0,03	0,04	0,03	0,015	0,17	4
Alternativa 3	0,13	0,06	0,07	0,07	0,035	0,37	1
Alternativa 4	0,07	0,03	0,06	0,03	0,035	0,22	3

### 2.3.3 SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA

Con la selección de la prioridad en la Tabla 2.19, utilizando el método de criterio ponderado se puede concluir que la mejor alternativa es la tercera, que está constituida por el programa Arduino, y como medio de control el Shield CNC de Arduino. EL software para la interpretación del formato de la pieza a imprimir es el SparkStudio por ser un software libre y fácil de usar. El sensor que identifique la ubicación de la plataforma en el tanque de la resina es el sensor óptico de barrera infrarroja y para el desplazamiento de la plataforma hasta el nivel de la resina se utiliza un tornillo de potencia por su rigidez. El proyector que se elige es el Proyector BenQ TH671ST por sus características técnicas, resolución, luminosidad permitiendo proyectar las capas de la pieza con una buena precisión, finalmente al terminar la pieza de imprimirse se debe desprender de la plataforma de manera manual y se coloca la pieza en un post-curado que puede ser bajo la luz del sol o en una cámara de curado UV.

## CAPÍTULO III

### DISEÑO DE UNA IMPRESORA 3D CON PROCESAMIENTO DIGITAL DE LUZ

#### 3.1 ESQUEMA DE LA SOLUCIÓN

Se realiza un esquema de la alternativa seleccionada en el Capítulo II e indicando cada uno de los módulos que forman parte de las alternativas, siendo esta solo una idea inicial para el diseño de la impresora. (Figura 3.1)

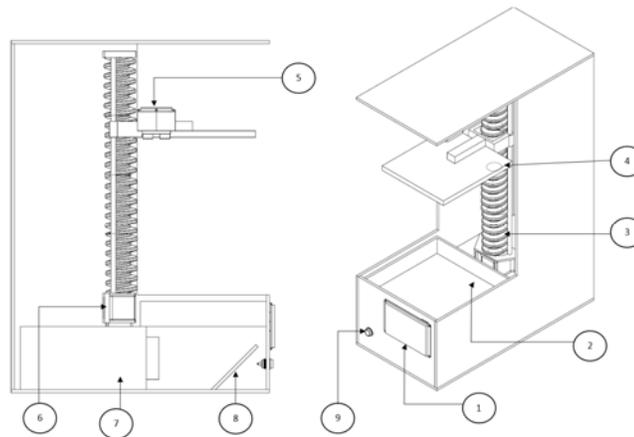
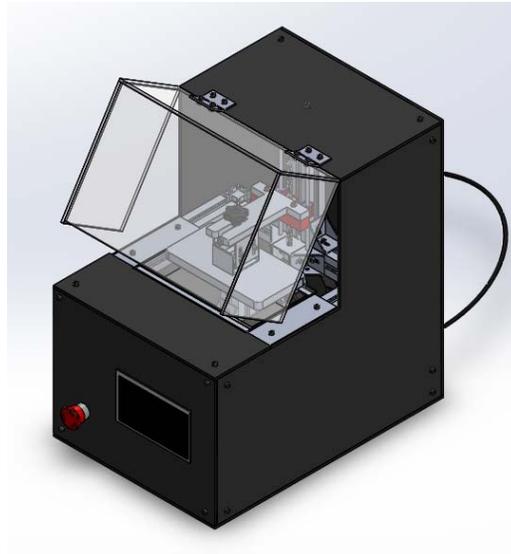


Figura 52 Esquema de solución

En la Tabla 3.1 se describe cada una de los módulos señalados de la Figura 3.1.

Tabla 20 Partes del esquema de la impresora

Número	Descripción
1	HMI
2	Cubeta que almacene la resina
3	Tornillo de potencia
4	Plataforma de adherencia de la pieza impresa.
5	Motor
6	Proyector
7	Reflector de luz UV
8	Paro de emergencia.

### 3.2 DISEÑO DEL SISTEMA ÓPTICO

La base fundamental de la impresora es el sistema óptico, donde se basa el funcionamiento de la impresión de la pieza. En la Figura 3.2 se ilustra el diseño del sistema de funcionamiento óptico, junto a las variables resultantes que se necesitan [31].

La parte funcional para la proyección de la imagen en la plataforma se basa en: el proyector, un espejo plano con un ángulo de inclinación para cambiar la dirección de proyección de horizontal a vertical y finalmente el tanque o recipiente que contenga la resina.

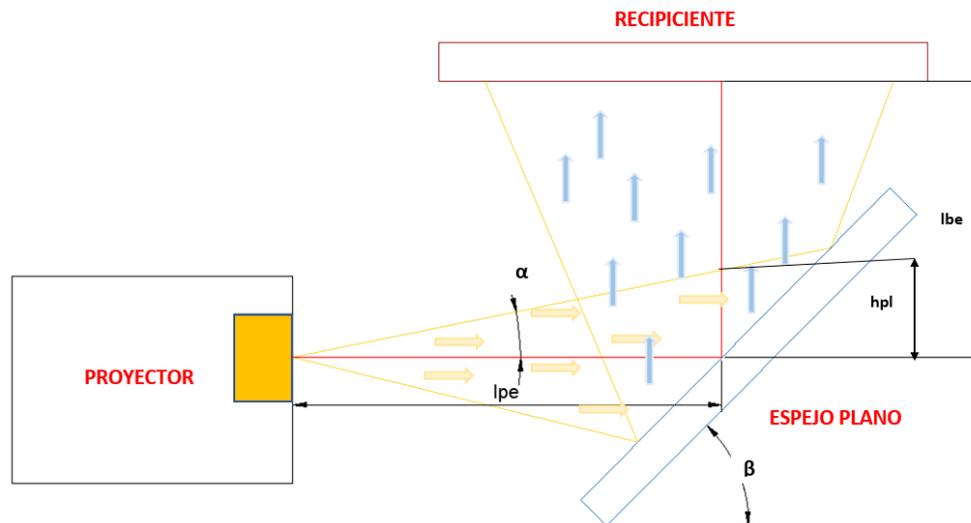


Figura 53 Esquema para la formación del sistema óptico

En la Tabla 3.2 se muestra cada una de las definiciones de las nomenclaturas mostradas en la Figura 3.2.

Tabla 21 Definición de las nomenclaturas para el diseño del sistema óptico

Nomenclatura	Descripción
<b>Lpe</b>	Longitud entre el lente del proyector hasta la superficie del espejo plano
<b>Leb</b>	Longitud entre el espejo plano hasta la base de la plataforma.
<b>hpl</b>	Altura de proyección entre el haz de luz saliente del proyecto y su reflexión en el espejo.
<b><math>\alpha</math></b>	Angulo de proyección.
<b><math>\beta</math></b>	Ángulo de posición del lente plano.

### 3.2.1 SELECCIÓN DE PROYECTOR

Para seleccionar el proyector que se necesita se debe considerar los parámetros de diseño para que se efectúe la impresión, en este caso se requiere una resolución de 100  $\mu\text{m}$ , y que tenga un área de impresión de 200mm x 200mm.

Como la solución para que se efectúe la impresión es la resina también se debe conocer los lúmenes necesarios para que se active la solidificación de esta, para este caso se analiza una resina comercial fácil de encontrar en el mercado, ver Anexo 2.

Aquí se observa que la resina que se escoge necesita un curado UV con una longitud de onda de 405nm, pero la característica de los proyectores que existen en el mercado señala el valor de lúmenes que aporta, por lo cual se debe convertir el valor de curado en lúmenes. Este se resuelve de la siguiente manera:

$$1 \text{ nm} = 1 \frac{\text{watt}}{\text{cm}^2} = 6830000 \frac{\text{lumen}}{\text{m}^2} \quad (1)$$

Conocido la ecuación (1) de conversión de nm a lúmenes se reemplaza el valor de 405nm y los  $\text{m}^2$  a  $\text{mm}^2$ , por la razón que la onda luminosa se tiene en  $\frac{\text{lumen}}{\text{mm}^2}$ .

$$\text{lúmenes} = 405 \left( 6830000 \frac{\text{lumen}}{\text{m}^2} * \frac{(1\text{m})^2}{(1000\text{mm})^2} \right)$$

$$\text{lúmenes} = 2766,15 \frac{\text{lumen}}{\text{mm}^2}$$

Entonces ya este es uno de los datos que deberá poseer el proyector a elegir.

Como se conoce el detalle de proyección y las dimensiones a donde se quiere proyectar, que en este caso es el soporte, se puede calcular la resolución del proyector necesaria [32].

La ecuación es la siguiente:

$$\text{Resolución} \left( \frac{\text{pixel}}{\text{mm}} \right) = \frac{NP}{HFOV} \quad (2)$$

Donde:

HFOV campo de visión en función de la distancia focal del lente.

NP número de pixeles o también conocida como resolución nativa.

En este caso el valor de HFVO es la longitud a donde se va a proyectar que puede tanto ser en el eje horizontal como en el vertical. Entonces se calcula para los dos casos utilizando la ecuación (2), conocido que la resolución que se quiere llegar es de 100um que es igual a 0,1mm.

$$\text{Resolución} \left( \frac{\text{pixels}}{\text{mm}} \right) = \frac{NP}{HFOV} = \frac{HFOV}{NP} \left( \frac{\text{mm}}{\text{pixel}} \right) \quad (3)$$

$$0.1 \frac{\text{mm}}{\text{pixel}} = \frac{200\text{mm}}{NP}$$

$$NP = \frac{200\text{mm}}{0.1 \frac{\text{mm}}{\text{pixel}}}$$

$$NP = 2000 \text{ pixels}$$

El número de pixeles es de 2000 tanto para el valor X y Y, por lo tanto, se debe buscar un proyector en el mercado que cumpla con estos requisitos.

En la Tabla 3.3 se observan los distintos tipos de resolución de proyectores que se encuentran en el mercado [33].

Tabla 22 Resoluciones de proyectores comerciales

<b>Resolución</b>	<b>Píxel Horizontal</b>	<b>Píxel Vertical</b>
<b>SVGA</b>	800	600
<b>XGA</b>	1024	768
<b>HD</b>	1280	720
<b>FULL HD</b>	1920	1080
<b>2K</b>	2560	1440
<b>4K</b>	3840	2160

Con esto se observa que el proyector que cumpliría con la resolución necesaria es la de 4K, como en nuestro país de difícil adquisición de este tipo de proyectores y de igual forma el costo de este tipo de proyectores se encuentran alrededor de los \$ 2300

americanos, se elige un proyector más factible en el mercado y que cumpla de cierta manera el tamaño de impresión de la pieza, en este caso se escogería un proyector FULL HD, con esto se recalcula la dimensión de la pieza manteniendo la resolución de impresión, usando la ecuación (3).

$$\text{Resolución } X = \frac{HFOV}{NP} = \frac{HFOV}{1920 \text{ pixel}} = 0,1 \text{ mm}$$

$$HFOV_x = 192 \text{ mm} \approx 19 \text{ cm}$$

$$\text{Resolución } Y = \frac{HFOV}{NP} = \frac{HFOV}{1080 \text{ pixel}} = 0,1 \text{ mm}$$

$$HFOV_y = 108 \text{ mm} \approx 10 \text{ cm}$$

Como en ambos casos se mantiene la resolución de 100um se tiene que el área de la pieza máximo a imprimir será de 192 mm x 108 mm, teniendo en cuenta esto se señalan las propiedades del proyector que debe poseer.

Propiedades del Proyector:

Resolución Nativa:	1920 x 1080 pixeles.
Luminosidad:	2766 lúmenes
Proyección:	Corto alcance

Se escoge el proyector el cual cumpla con estas dos características y que exista en el mercado, el proyector que se escoge es el Proyector BenQ TH671ST, ver ANEXO 3.

### 3.2.2 DISTANCIA DEL PROYECTOR AL ESPEJO PLANO Y A LA PLATAFORMA

Una vez conocido el proyector con sus características técnicas y físicas, se calcula las variables del esquema de formulación óptica, Figura 3.2. En este caso se quiere conocer las distancias  $L_{pe}$  y  $L_{eb}$ .

Como se observa en la Figura 3.3, se requiere una proyección vertical de  $90^\circ$ , esto quiere decir que se cambia de una posición horizontal a vertical.

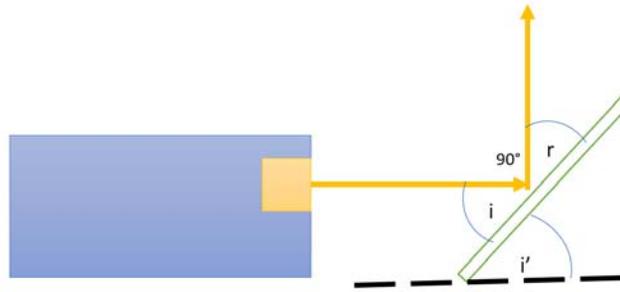


Figura 54 Esquema de proyección del haz de luz

Para esto se debe conocer el ángulo de inclinación que deberá poseer el espejo plano para que se respete la ley de la reflexión de la luz, el cual indica que el ángulo de rayo incidente ( $i$ ) y de reflexión ( $r$ ) son iguales.

$$i = r \quad (4)$$

Mediante ley de ángulos se tiene:

$$180^\circ = i + 90^\circ + r \quad (5)$$

Igualando (4) en (5):

$$180^\circ = i + 90^\circ + i$$

$$90^\circ = 2i$$

$$i = 45^\circ$$

Y con el valor de " $i$ " conocido y mediante la ley de ángulos alternos internos se define de igual modo el valor de " $i'$ " donde :

$$i = i' = 45^\circ$$

Conocido el ángulo de inclinación del espejo se calcula las distancias.

*Calcular  $L_{pe}$ :*

Para conocer el valor de  $L_{pe}$  se observa la Figura 3.4, donde se establece una ecuación de Pitágoras por la razón que se forma un triángulo perfecto entre la luz de proyección y el lente.

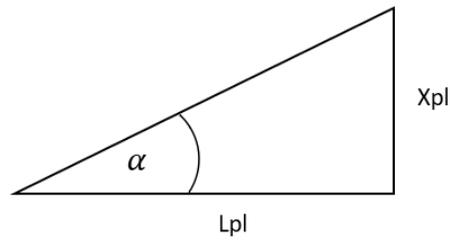


Figura 55 Representación de Pitágoras

Para conocer el valor del ángulo de proyección se observa en el ANEXO 3, los datos del proyector donde señala el ratio del lente y el tamaño de la pantalla.

Ratio lente                      0.69 – 0.83 :1

Tamaño de la Pantalla    1m

Para el valor del ratio lente se escoge un valor promedio de lo señalado en este caso es de 0.76.

*Distancia = tamaño de pantalla \* ratio lente*

$$Distancia = 1m * \frac{0.76}{1}$$

$$Distancia = 0.76 m \quad (6)$$

Con esto se puede conocer la distancia que deberá poseer el proyector de la pantalla para alcanzar estas condiciones, ver Figura 3.5.

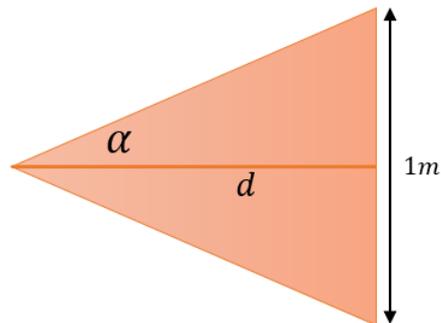


Figura 56 Representación de la proyección del proyector a la pantalla

Donde:

$\alpha$     ángulo de proyección

d distancia del proyector a la pantalla

Utilizando Pitágoras se tiene:

$$\tan \alpha = \frac{y}{x}$$

El valor de 'y' es la mitad de la longitud de la pantalla, y 'x' es la distancia resuelta en (6).

$$\tan \alpha = \frac{0.5 \text{ m}}{0.76 \text{ m}}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{0.5 \text{ m}}{0.76 \text{ m}}$$

$$\alpha = 33.34^\circ \quad (7)$$

El valor (7) por dos representa el ángulo de proyección que tiene el proyector, en este caso es de aproximadamente  $66.68^\circ$ .

Conocido el ángulo de proyección y la longitud de la plataforma donde se quiere proyectar la imagen se tiene, (Figura 3.6):

Datos:

Plataforma: 192mm

Ángulo de Proyección:  $33.34^\circ$

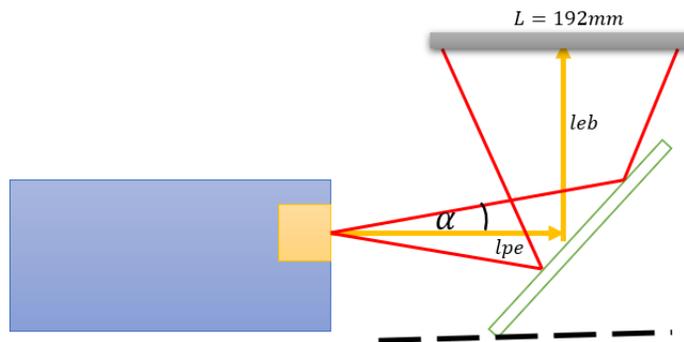


Figura 57 Proyección del haz de luz a la plataforma

Para conocer la distancia total se utiliza el Teorema de Pitágoras entonces se tiene:

$$\tan \alpha = \frac{\frac{L}{2}}{lpe + leb}$$

$$l_{pe} + l_{eb} = \frac{\frac{L}{2}}{\tan \alpha}$$

$$l_{pe} + l_{eb} = \frac{\frac{192 \text{ mm}}{2}}{\tan 33.34^\circ}$$

$$l_{pe} + l_{eb} = 145.92 \text{ mm}$$

Se puede establecer que tanto  $l_{pe} = l_{eb}$ , por ende, tienen la misma distancia de separación:

$$l_{pe} = l_{eb}$$

$$2l_{pe} = 145.92 \text{ mm}$$

$$l_{pe} = 72.96 \text{ mm} \cong 73 \text{ mm}$$

Una vez conocido la distancia que debe existir entre el proyector, el espejo y el tanque, se puede conocer las dimensiones del espejo, en este caso como se indica que " $l_{pe} = l_{eb}$ ", señala que las dimensiones de proyección es la mitad de la que se proyecta en el tanque, ver la Sección 3.2.1, donde el área de impresión es de 192mm x 108mm. Para evitar cualquier problema futuro al momento de colocar el espejo a las distancias señaladas y el ángulo establecido se sugiere tener un espejo plano cuadrado con una capacidad reflectora del 95% o superior, con la mayor dimensión de proyección en este caso 192mm que se puede aproximar a un área de 200mm x 200mm.

### 3.3 DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO

#### 3.3.1 CÁLCULO DEL ESPESOR DE LA PLANCHA DE ALUMINIO QUE ELEVA LA PLATAFORMA

Una de las propiedades dominantes en el diseño es la deflexión que posee la plataforma y la estructura que la soporta, en la que actúa sobre ella la fuerza del peso del material y de la resina solidificada.

Entonces en la Figura 3.7 se presenta las secciones que se toman en cuenta cuya carga y reacciones permiten conocer el espesor del material.

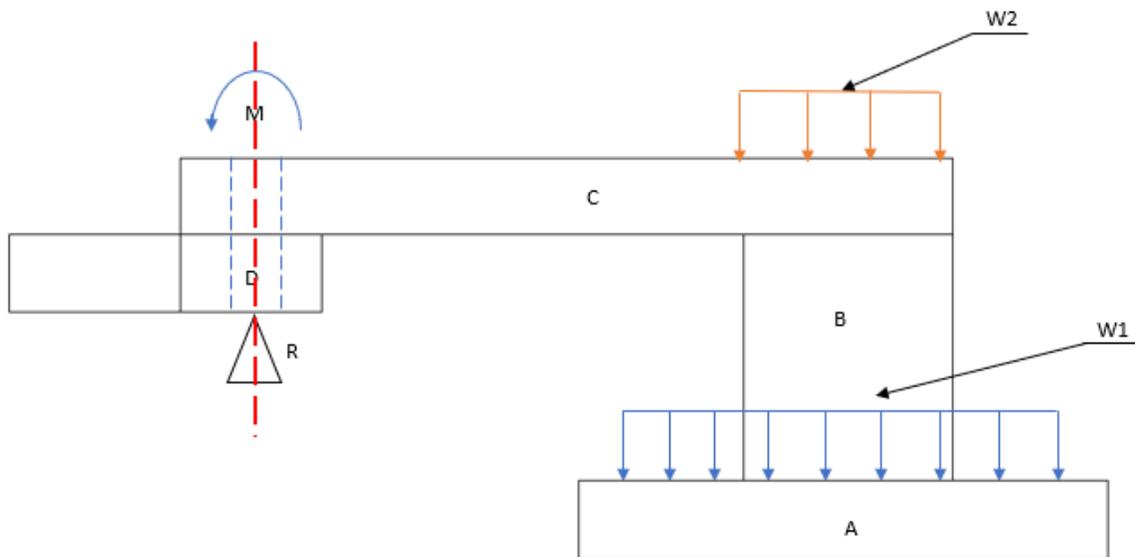


Figura 58 Diagrama de cuerpo libre de la plataforma con sus elementos

### Cálculo del elemento C

Como se observa en la Figura 3.7 el elemento que tiene más carga es el elemento C, cuyo material es una aleación de aluminio 6061, por la razón que esta soporta el peso de la plataforma y el de la resina solidificada, con esto se realiza el diagrama de fuerza de esta placa, ver Figura 3.8.

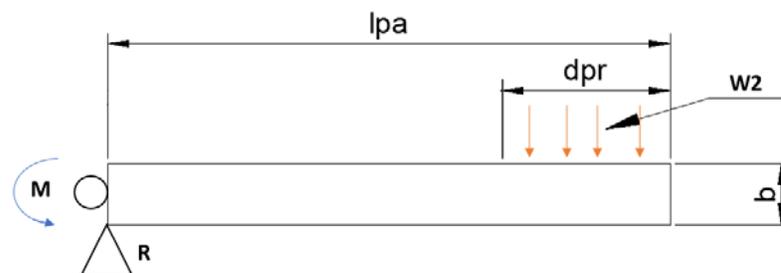


Figura 59 Diagrama del cuerpo libre en placa de aluminio, elemento C

Donde:

$b$  es el espesor de la placa de aluminio.

$h$  es el ancho de la placa que es de 50mm.

$d_{pr}$  es la distancia de la carga distribuida junto con el peso de la plataforma igual a 50mm.

$w_2$  es la fuerza ejercida por la gravedad, el peso de la plataforma y la resina.

$l_{pa}$  es la longitud de la base igual a 130mm.

$E$  módulo de elasticidad para aleación de aluminio 6061 es de 71.7 GPa.

$Y_{max}$  es la deformación máxima permitida.

$F_s$  factor de seguridad

Para conocer la ( $Y_{m\acute{a}x}$ ) que es la deformación máxima, se tiene que dividir la resolución para 10, esto se debe ya que en metrología el error o la relación de incertidumbre y tolerancia debe ser menos o igual a 0.1 que es igual al 10% para instrumentos de precisión, entonces se tiene una precisión de 100um. [50]:

$$\frac{6U}{T} \leq 0.1$$

Donde:

$T$  Intervalo dentro del cual debe estar comprometida la magnitud que se mide,

$U$  Incertidumbre asociada a un sistema de medición.

$$Y_{m\acute{a}x} = -\frac{100um}{10} = -10um = -0.01 \times 10^{-3}m$$

Como este proyecto no va a ser sometido a condiciones ambientales severas, y por lo cual se le considera como un material altamente confiable por la velocidad de traslación que tiene y donde el peso es una consideración importante [34], se tiene que:

$$F_s = 1.3 \text{ a } 1.5$$

Aplicando el diagrama de fuerzas, se llega a conocer la fuerza cortante  $V$  (8) y el momento cortante  $M$  (9) de la Figura 3.8.

$$V = Wl \quad (8)$$

Justificado en (8)

$$V = w2 * dpr$$

$$M = \frac{wl^2}{2} \quad (9)$$

Justificado en (9)

$$M = \frac{w_2 * (dpr)^2}{2}$$

Para calcular  $w_2$ , se debe conocer el peso de la plataforma y la resina.

**Calculo para  $w_2$ :**

$$w_2 = (w_{pt} + w_{res}) * g \quad (10)$$

Donde:

$w_{pt}$  masa de la plataforma que es aproximado de 1.5 Kg

$w_{res}$  masa de resina en todo el volumen de impresión

$g$  gravedad que es  $9.8 \frac{m}{s^2}$

$$w_{res} = \delta_{res} * V_{res} \quad (11)$$

Donde:

$\delta_{res}$  densidad de la resina que es de  $1.184 \frac{g}{cm^3}$

$V_{res}$  volumen de impresión (área total de impresión en la plataforma y su altura máxima) que es  $192mm * 108mm * 250mm$ .

$$V_{res} = 192mm * 108mm * 250mm = 5\,184\,000 \text{ mm}^3$$

$$V_{res} = 5184 \text{ cm}^3 \quad (12)$$

Sustituyendo (12) en (11) se tiene

$$w_{res} = 1.184 \frac{g}{cm^3} * 5184 \text{ cm}^3$$

$$w_{res} = 6\,137.856 \text{ g} \cong 6.14 \text{ Kg}$$

Conocido esto, se reemplaza el valor de las masas en la ecuación (10)

$$w_2 = (1.5 \text{ Kg} + 6.14 \text{ Kg}) * 9.8 \frac{m}{s^2}$$

$$w_2 = 74.87 \text{ N}$$

El valor  $w_2$  se divide por la distancia de la fuerza que actúa sobre ella ( $dpr$ ) por la razón que es una carga uniforme.

$$\frac{w2}{dpr} = \frac{74.87 \text{ N}}{0.05 \text{ m}} = 1497.4 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Para conocer el valor de la reacción se utiliza sumatoria de fuerzas:

$$\Sigma F_x = 0$$

Donde:

$$\Sigma F_y = R - w2 = 0$$

$$\Sigma F_y = R - 74.87 \text{ N} = 0$$

$$R = 74.87 \text{ N}$$

Para el cálculo del momento se tiene (13)

$$M = R(x - 0) - 1497.4 \frac{(x-0.08)^2}{2} + 1497.4 \frac{(x-0.13)^2}{2} \quad (13)$$

$$M = 74.87 x - 748.7(x^2 - 0.16x + 0.0064) + 748.7(x^2 - 0.26x + 0.0169)$$

$$M = 7.86135 \text{ Nm}$$

Con el valor de la reacción se grafica el diagrama de fuerzas cortantes, ver Figura 3.9.

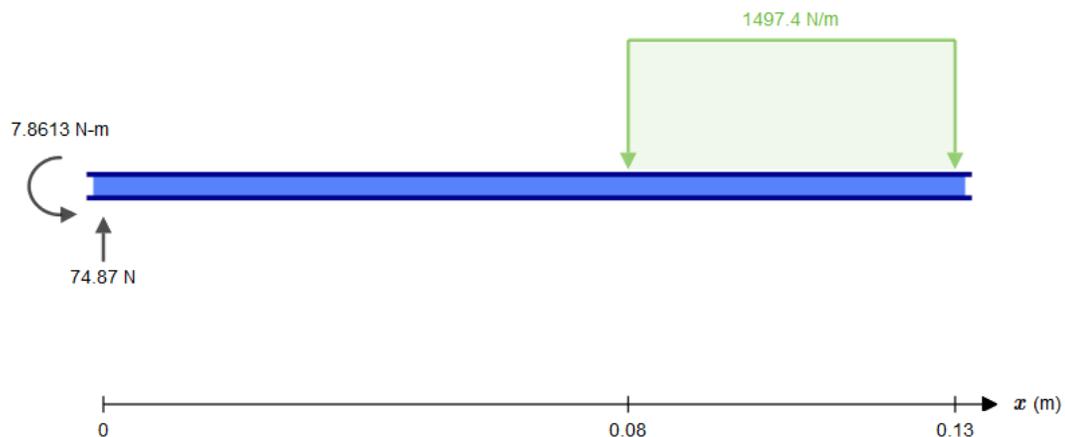


Figura 60 Diagrama de fuerza cortante en la planta de aluminio

Se realiza el análisis de fuerzas cortantes Figura 3.10, y momento cortante Figura 3.11.

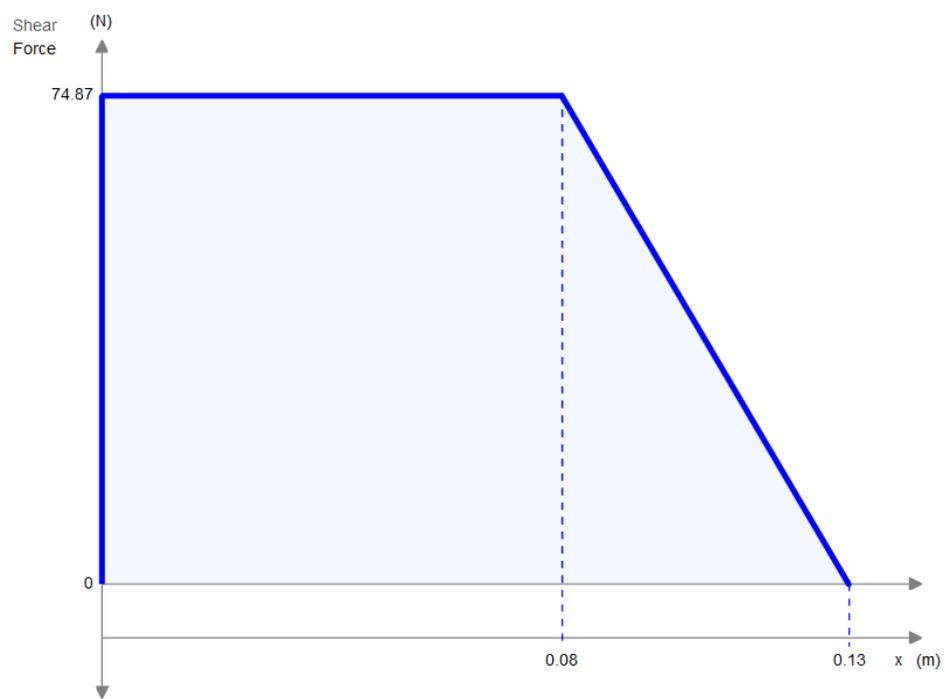


Figura 61 Diagrama de Fuerza Cortante

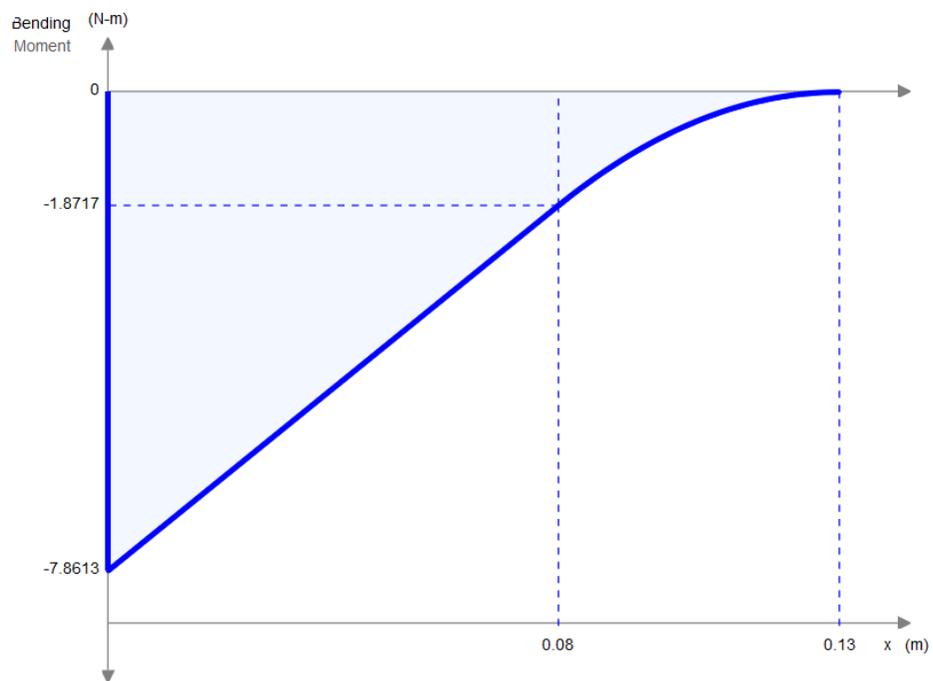


Figura 62 Diagrama de Momento Flector

**Cálculo del valor b:**

El cálculo de la inercia de una placa rectangular se observa la ecuación del ANEXO 4, que representa las propiedades geométricas de un rectángulo y de un voladizo en carga uniforme, con lo cual se tiene:

$$Y_{m\acute{a}x} = -\frac{w*L^4}{8*E*I} \quad (14)$$

$$I = \frac{b*h^3}{12} \quad (15)$$

Donde:

w es la fuerza ejercida sobre la placa de aluminio igual a  $1\,497.4 \frac{N}{m}$

L es la longitud de la placa 130mm

I es el momento de inercia

E módulo de elasticidad, 71.7 GPa

Despejando el valor de la inercia y multiplicando el factor de seguridad de (14) se tiene:

$$I = -\frac{w*L^4}{8*Y_{m\acute{a}x}*E} * FS \quad (16)$$

$$I = -\frac{1\,497.4 \frac{N}{m} * (0.13m)^4}{8 * (-0.01x10^{-3}m) * 71.7 \text{ GPa}} * 1.5$$

$$I = 1.118 x 10^{-7} m^4 \quad (17)$$

Reemplazando el valor (17) en (15), para despejar el valor de “b” se tiene:

$$I = \frac{b * h^3}{12}$$

$$b = \frac{12 * I}{h^3} = \frac{12 * 1.118x 10^{-7} m^4}{(0.05m)^3}$$

$$b = 0,01074m = 10.74 \text{ mm}$$

Con esto se busca en el manual del ANEXO 5, las planchas de aluminio existentes en el mercado y se observa y se escoge cuál de ellos es el más cercano a este valor, en

este caso es la plancha de ½ pulgada que es de 12.7mm. Con este se realizan nuevamente los cálculos de forma inversa para comprobar el factor de seguridad.

$$I = \frac{b * h^3}{12}$$

$$I = \frac{0.0127m * (0.05m)^3}{12}$$

$$I = 1.323 \times 10^{-7} m^4$$

$$Y_{m\acute{a}x} = -\frac{w * l^4}{8 * I * E}$$

$$Y_{m\acute{a}x} = -\frac{1497.4 \frac{N}{m} * (0.13m)^4}{8 * 1.323 \times 10^{-7} m^4 * 71.7 \text{ GPa}}$$

$$Y_{m\acute{a}x} = 5.656 \times 10^{-6} m$$

Conocida la deformación máxima permitida se calcula el factor de seguridad que llegaría a tener al usar una plancha de ½ pulgada.

$$F_s = \frac{Y_{m\acute{a}x} \text{ esperado}}{Y_{m\acute{a}x} \text{ práctico}}$$

$$F_s = \frac{0.01 \times 10^{-3} m}{0.005656 \times 10^{-3} m}$$

$$F_s = 1.77$$

Este factor de seguridad asegura que una placa de ½ pulgada es adecuada para este trabajo. En la Figura 3.12 se muestra el análisis de la plancha de aluminio en el simulador SolidWorks, lo cual indica que la plancha es capaz de soportar la carga teniendo un máximo de deformación de 0.003783 mm.

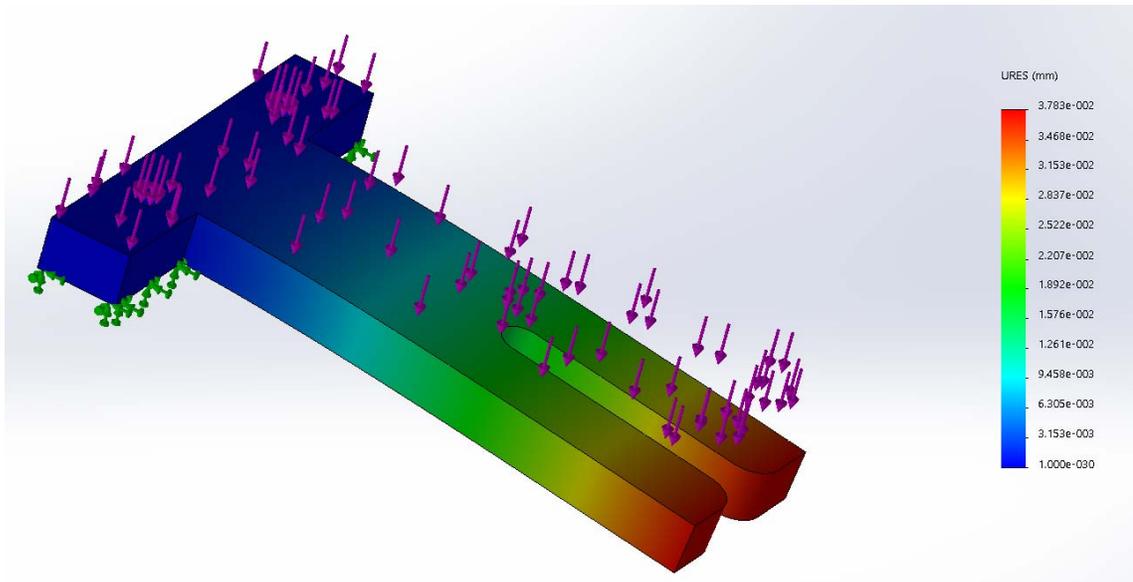


Figura 63 Simulación SolidWorks de la plancha de aluminio a carga distribuida

### 3.3.2 SELECCIÓN DE RODAMIENTOS LINEALES

En la Figura 3.13 se ilustra la forma del desplazamiento de la plataforma por el eje Z, con lo que se debe considerar el tipo de carga que se requiere en este caso son cargas estáticas y dinámicas.

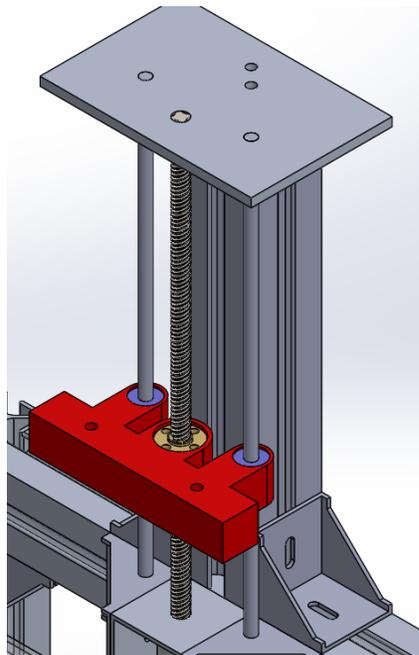


Figura 64 Desplazamiento eje Z

Para el cálculo de la carga dinámica se debe conocer el factor de esfuerzos dinámicos (18), este se toma como valor de seguridad contra deformaciones demasiado elevadas en los puntos de contacto de los cuerpos de rodamientos. Para rodamientos que giran con gran suavidad y facilidad, se debe elegir un “ $f_s$ ” mayor, en el caso que las exigencias de suavidad de giro son menores, se escoge un factor de seguridad menor [36]. En general se requiere tener los siguientes valores:

$f_s = 1.5 \dots 2.5$  para exigencias elevadas

$f_s = 1.0 \dots 1.5$  para exigencias normales

$f_s = 0.7 \dots 1.0$  para exigencias reducidas

$$f_s = f_c * \frac{C}{P} \quad (18)$$

Donde:

$f_s$  factor de esfuerzos estáticos,

$f_c$  factor de contacto

$C$  capacidad de carga dinámica básica, en N

$P$  carga dinámica equivalente del rodamiento, en N

El valor del factor de contacto “ $f_c$ ”, se toma en cuenta cuando se montan dos o más patines en una misma guía, la vida útil se ve afectada por la falta de uniformidad en la distribución de las cargas aplicadas sobre los patines de estos, ver Tabla 3.4. [37]

Tabla 23 Factor de contacto  $f_c$  [37]

Número de patines por cada guía <i>Number of blocks for single rail</i>	$f_c$
1	1.0
2	0.81
3	0.72
4	0.66
5	0.61

La ilustración de un rodamiento lineal en un eje se tiene en la Figura 3.14.



Figura 65 Rodamiento Lineal

Fuente: Rodamientos Lineales [38]

Para el cálculo del P se tiene (19), donde

$$P = F_{pl} \quad (19)$$

Donde:

$F_{pl}$  Fuerza total de la plataforma, en N

La carga dinámica que se ejerza sobre el rodamiento es el peso total de la estructura que sostenga el sistema de elevación de la plataforma y este valor se multiplica por un factor de seguridad de 1.2 de acuerdo con su aplicación que en este caso es maquinaria de impacto ligero, ver Tabla 3.5.

Tabla 24 Peso del sistema de elevación de la plataforma

Elemento	Peso Unitario (Kg)	Cantidad	Peso Total (Kg)
Resina Solidificada	6.14	1	6.14
Plataforma	1.5	1	1.5
<b>Total</b>			<b>7.64</b>

$$m_{pl} = 1.2 * 7.64 = 9.2 \text{ Kg} \quad (20)$$

Para determinar la fuerza o peso de la plataforma se debe multiplicar el valor (20) por la fuerza de la gravedad.

$$F_{pl} = m_{pl} * a$$

$$F_{pl} = 9.2 \text{ Kg} * 9.8 \frac{m}{s^2}$$

$$F_{pl} = 90.16 N$$

Conocido el valor del peso de la plataforma se conoce la carga dinámica equivalente (21):

$$P_o = 90.16 N \quad (21)$$

Con el valor (21) se reemplaza en (18), y como se observa en la Tabla 3.4, se tiene que el factor de contacto “ $f_c$ ” es igual a 1, por la razón que solo tiene un rodamiento por cada grúa.

$$f_s = 1 * \frac{C}{90.16 N} \quad (22)$$

Para conocer el valor de la carga estática ( $C_o$ ), depende del rodamiento que se elija, para ello se tiene la Tabla 3.6 y Tabla 3.7

Tabla 25 Diámetros y tipos de distintos rodamientos

Fuente: NBS [37]

Tipología Type	Nº recirc. bolas Number of ball rows	Peso Weight [kg]	d [mm]	d Tolerancia Tolerance [ $\mu$ m]	D [mm]	D Tolerancia Tolerance [ $\mu$ m]	L [mm]	L Tolerancia Tolerance [mm]
KB 05 22	4	0.012	5	+8 ÷ 0	12	0 ÷ -8	22	0 ÷ -0.2
KB 08 25	4	0.018	8	+8 ÷ 0	16	0 ÷ -8	25	0 ÷ -0.2
KB 10 29	4	0.024	10	+8 ÷ 0	19	0 ÷ -8	29	0 ÷ -0.2
KB 12 32	4	0.041	12	+8 ÷ 0	22	0 ÷ -9	32	0 ÷ -0.2
KB 16 36	5	0.055	16	+9 ÷ -1	26	0 ÷ -9	36	0 ÷ -0.2
KB 20 45	5	0.091	20	+9 ÷ -1	32	0 ÷ -11	45	0 ÷ -0.2
KB 25 58	6	0.205	25	+11 ÷ -1	40	0 ÷ -11	58	0 ÷ -0.3
KB 30 68	6	0.310	30	+11 ÷ -1	47	0 ÷ -11	68	0 ÷ -0.3
KB 40 80	6	0.680	40	+13 ÷ -2	62	0 ÷ -13	80	0 ÷ -0.3
KB 50 100	6	1.030	50	+13 ÷ -2	75	0 ÷ -13	100	0 ÷ -0.3
KB 60 125	6	2.010	60	+13 ÷ -2	90	0 ÷ -15	125	0 ÷ -0.4

Tabla 26 Capacidad de carga de distintos rodamientos

Fuente: NBS [37]

Tipología Type	L <sub>1</sub> [mm]	L <sub>1</sub> Tolerancia Tolerance [mm]	W [mm]	D <sub>1</sub> [mm]	Excentricidad máx Max eccentricity [μm]	Tolerancia juego radial Radial clearance tolerance [μm]	Capacidad de Carga Load capacity rating [N]	
							C	C <sub>0</sub>
KB 05 22	14.5	0 ÷ -0.2	1.1	11.5	12	-5	210	270
KB 08 25	16.5	0 ÷ -0.2	1.1	15.2	12	-5	270	410
KB 10 29	22	0 ÷ -0.2	1.3	18	12	-5	370	470
KB 12 32	22.9	0 ÷ -0.2	1.3	21	12	-7	520	790
KB 16 36	24.9	0 ÷ -0.2	1.3	24.9	12	-7	590	910
KB 20 45	31.5	0 ÷ -0.2	1.6	30.3	15	-9	880	1400
KB 25 58	44.1	0 ÷ -0.3	1.85	37.5	15	-9	1000	1600
KB 30 68	52.1	0 ÷ -0.3	1.85	44.5	15	-9	1600	2800
KB 40 80	60.6	0 ÷ -0.3	2.15	59	17	-13	2200	4000
KB 50 100	77.6	0 ÷ -0.3	2.65	72	17	-13	3900	8100
KB 60 125	101.7	0 ÷ -0.4	3.15	86.5	20	-16	4800	10200

Para conocer los valores del esfuerzo dinámico, se realiza las distintas iteraciones con los valores de capacidad de carga de los rodamientos de la Tabla 3.6, esto se observa en la Tabla 3.8.

Tabla 27 Distintos valores del esfuerzo estático

d (interno)	D (externo)	Co	Po	fs
5	12	270	90,16	2,99
8	16	410	90,16	4,55
10	19	470	90,16	5,21
12	22	790	90,16	8,76
16	26	910	90,16	10,09
20	32	1400	90,16	15,53
25	40	1600	90,16	17,75

Por la posibilidad de que existan fallas o vibraciones durante el movimiento de la plataforma y dado los datos en la Tabla 3.9, se tiene que deberá tener un coeficiente aproximado entre 3 a 5, con lo cual se observa que es el rodamiento de 8mm.

Tabla 28 Coeficientes estáticos mínimos dependiendo las condiciones de funcionamiento

Fuente: NBS [37]

Condiciones de funcionamiento <i>Working conditions</i>	$a_s$ mínimos <i>a<sub>s</sub> minimum</i>
Estático <i>Static</i>	1.0 + 2.0
Dinámico <i>Dynamic</i>	2.0 + 4.0
Dinámico con impactos y vibraciones <i>Dynamic with impacts and vibrations</i>	3.0 + 5.0

El valor de la carga dinámica para el rodamiento de 8mm, se tiene en la Tabla 3.7, donde se denota que es de 270N, lo cual es fundamental para conocer la vida útil del rodamiento.

### Vida útil nominal

Para determinar el recorrido teórico que poseerá el rodamiento antes que se presente la fatiga se tiene (23)

$$L_{10} = L = \left(\frac{C}{P}\right)^K [10^5 m] \quad (23)$$

Donde:

$L_{10}$  vida útil nominal (con probabilidad de fallo de 10%), en km

C capacidad de carga dinámica, en N

P carga estática equivalente, en N

K exponente de vida

$$L = \left(\frac{270 N}{90.16 N}\right)^3 [10^5 m]$$

$$L = 2685.65 Km$$

### Vida útil de servicio

Para este cálculo se debe ciertas consideraciones, como es la velocidad media que en este caso es de 100um en 1 segundo, esto se debe a la precisión de la impresora, con lo cual se tiene en (24) la forma de conocer la vida útil de servicio.

$$Lh = \frac{L}{Vm * 3600 \frac{s}{h}} \quad (24)$$

Donde:

$Lh$  Vida útil de servicio, en h

$L$  Vida útil nominal, en m

$Vm$  Velocidad media equivalente, en  $\frac{m}{s}$

$$Lh = \frac{2\ 685\ 651.05\ m}{\left(0.01 \frac{m}{s} * 3600 \frac{s}{h}\right)}$$

$$Lh = 74\ 601.33\ h$$

$$Lh \approx 8\ \text{años}$$

Este valor se tiene en el caso que se trabajara todos los días del año y por las 24h del día, lo que es un uso exagerado de la impresora, por lo cual indica que la vida útil del rodamiento es algunos años más dependiendo el tiempo de uso que se lo tenga.

### 3.3.3 CÁLCULO DE HUSILLO DE POTENCIA

La parte móvil de la impresora es el desplazamiento de la plataforma en el eje Z, por lo cual entre las alternativas vista en el Capítulo II, la más óptima que se escoge para la traslación es el uso del tornillo de potencia, junto con dos rodamientos los cuales se desplazan mediante dos ejes, que aseguran la estabilidad de desplazamiento, ver Figura 3.12.

#### Cálculo del husillo de potencia

Aquí se representan los cálculos a realizar para la selección del husillo de potencia del mecanismo de translación del eje Z que permite elevar la plataforma mediante se realiza la impresión de la resina. Como se tiene en cuenta que el husillo de potencia permite la transformación de un movimiento rotacional a un movimiento rectilíneo con la finalidad de transmitir fuerza o potencia.

Para facilitar la obtención en el mercado del husillo, se escoge la información disponible en el mercado local, en este caso el más usual son los husillos trapezoidales, ver Tabla 3.10.

Tabla 29 Características técnicas del husillo de potencia

<b>Características Técnicas</b>	
Diámetro exterior (d)	8mm
Paso (p)	2mm
Número de entradas de rosca (n)	4
Material	Acero inoxidable
Hilo, avance o paso del husillo (L)	8mm
Longitud	300mm
Ángulo de rosca ( $\varphi$ )	30°
Coefficiente de fricción ( $\mu$ )	0.18
Diámetro de raíz (dr)	6.59 mm

La carga que el husillo deberá transportar es igual al peso de los elementos que conformen la parte a movilizar, ver Tabla 3.11.

Tabla 30 Elementos contribuyentes a la fuerza que levante el husillo

<b>Elemento</b>	<b>Peso Unitario (Kg)</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Peso Total (Kg)</b>
Rodamientos Lineales	0,018	2	0,036
Resina Solidificada	6.14	1	6.14
Plataforma	1.5	1	1.5
<b>Total</b>			<b>7.68</b>

El total de la masa se multiplica por un factor de dos, como un factor de carga, en este caso tendrá un total de masa de 15.36 Kg. Para determinar la fuerza ejercida se debe multiplicar por el valor de la gravedad que es de  $9.8 \frac{m}{s^2}$ .

$$F = m * a$$

Donde:

F fuerza ejercida

m masa total a desplazar

a gravedad

$$F = 15.36 \text{ Kg} * 9.8 \frac{m}{s^2}$$

$$F = 150.53 N$$

Una vez obtenida la fuerza que deberá ejercer el husillo de potencia, se debe calcular el torque de este, con (25) se determina el torque ideal del husillo que permite fijar la eficiencia global del mismo [39].

$$T_o = \frac{F * L}{2\pi} \quad (25)$$

Donde:

$T_o$  torque ideal, en Nm

$F$  fuerza total, en N

$L$  paso del husillo, en m

Estos valores se tienen en la Tabla 3.10, con lo cual se reemplazan en (25).

$$T_o = \frac{150.53 N * 0,008m}{2\pi}$$

$$T_o = 0.192 Nm$$

Como se tiene que la dirección del husillo es lineal en forma vertical, se debe calcular el torque de subida del husillo, con lo cual se tiene (26)

$$T_s = \frac{F * dm}{2} * \left( \frac{\cos\varphi * \tan\alpha + \mu}{\cos\varphi - \mu * \tan\alpha} \right) \quad (26)$$

Donde:

$T_s$  torque de subida, en Nm.

$\varphi$  ángulo de rosca, en grados

$\alpha$  ángulo de avance, en grados

$\mu$  coeficiente de fricción, adimensional

$dm$  diámetro de paso, en m

De igual forma el valor de los ángulos y el coeficiente se encuentran en la Tabla 3.10. pero se desconoce el valor del ángulo de avance, pero se puede calcular mediante (27)

$$\tan \alpha = \frac{L}{\pi * dm} \quad (27)$$

El diámetro paso se calcula en (28) junto con los datos de la Tabla 3.4

$$dm = d - \frac{p}{2} \quad (28)$$

$$dm = 8mm - \frac{2mm}{2} = 7mm$$

$$dm = 0.007m \quad (29)$$

Con (29) se reemplaza en (27) y se tiene:

$$\tan \alpha = \frac{0.008m}{\pi * 0.007m}$$

$$\alpha = 20^\circ \quad (30)$$

Con el valor de (30) se calcula el torque de subida (26)

$$T_s = \frac{150.53 N * 0,007m}{2} * \left( \frac{\cos 30^\circ * \tan 20^\circ + 0.18}{\cos 30^\circ - 0.18 * \tan 20^\circ} \right)$$

$$T_s = 0.3259 Nm$$

Conocido el torque de subido se calcula el torque de bajada, por la razón que este par de torsión debe superar un par de fricción al bajar la carga [39], esto se observa en (31)

$$T_b = \frac{F * dm}{2} * \left( \frac{\mu - \cos \phi * \tan \alpha}{\cos \phi + \mu * \tan \alpha} \right) \quad (31)$$

Donde:

Tb torque de bajada, en Nm

$$T_b = \frac{150.53 N * 0,007m}{2} * \left( \frac{0.18 - \cos 30^\circ * \tan 20^\circ}{\cos 30^\circ + 0.18 * \tan 20^\circ} \right)$$

$$T_b = 0.0765 Nm$$

Para conocer la eficiencia de transmisión se tiene (32)

$$e = \frac{T_o}{T_s} \quad (32)$$

Donde:

$e$  eficiencia de transmisión, en %

$T_o$  torque ideal, en Nm.

$T_s$  torque de subida, en Nm.

$$e = \frac{0.192 \text{ Nm}}{0.3259 \text{ Nm}}$$

$$e = 0,588 \approx 59\%$$

Se tiene una eficiencia baja por la razón que los husillos de potencia de rosa Acme presentan una fricción adicional que provoca la acción de cuña.

### **Esfuerzos en el Tornillo de potencia**

Para conocer el esfuerzo cortante nominal de torsión en el tornillo se expresa en (33), donde se debe escoger el valor de torque más alto calculad en este caso es el torque de subida " $T_s$ ", y los demás valores se encuentran en la Tabla 3.10

$$\tau = \frac{16 * T_s}{\pi * d r^3} \quad (33)$$

Donde:

$\tau$  esfuerzo cortante, en MPa

$T_s$  torque de subida, en Nm

$d r$  diámetro de raíz, en m

$$\tau = \frac{16 * 0.3259 \text{ Nm}}{\pi * (0.00659 \text{ m})^3}$$

$$\tau = 5.8 \text{ MPa}$$

Una vez calculado el esfuerzo cortante se calcula el esfuerzo axial (34), donde el área sería el área de la raíz del tornillo.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi * \left(\frac{dr}{2}\right)^2} \quad (34)$$

Donde:

$\sigma$  esfuerzo axial, en MPa

$F$  fuerza total, en N

$dr$  diámetro de raíz, en m

$$\sigma = \frac{150.53 \text{ N}}{\pi * \left(\frac{0.000659}{2}\right)^2}$$

$$\sigma = 4.413 \text{ MPa}$$

Con esto se puede calcular el factor de seguridad del husillo mediante (35)

$$\frac{1}{N^2} = \left(\frac{\sigma}{S_y}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{S_{ys}}\right)^2 \quad (35)$$

Donde:

$N$  factor de seguridad

$S_y$  resistencia a la fluencia, en MPa

$S_{ys}$  resistencia a la fluencia corregida, en MPa

El valor de la resistencia a la fluencia se observa en la Tabla 3.12, porque se conoce el tipo de material del tornillo que en este caso es acero inoxidable.

Tabla 31 Valores de resistencia del acero inoxidable

Número	Material	Condición	Resistencia (a la tensión)				Resistencia a la deformación, exponente $m$	Resistencia a la fractura $\epsilon_f$
			Fluencia $S_y$ MPa (kpsi)	Última $S_u$ MPa (kpsi)	A la fractura, $\sigma_f$ MPa (kpsi)	Coficiente $\sigma_0$ MPa (kpsi)		
1018	Acero	Recocido	220 (32.0)	341 (49.5)	628 (91.1) <sup>†</sup>	620 (90.0)	0.25	1.05
1144	Acero	Recocido	358 (52.0)	646 (93.7)	898 (130) <sup>†</sup>	992 (144)	0.14	0.49
1212	Acero	HR	193 (28.0)	424 (61.5)	729 (106) <sup>†</sup>	758 (110)	0.24	0.85
1045	Acero	TyR 600°F	1 520 (220)	1 580 (230)	2 380 (345)	1 880 (273) <sup>†</sup>	0.041	0.81
4142	Acero	TyR 600°F	1 720 (250)	1 930 (210)	2 340 (340)	1 760 (255) <sup>†</sup>	0.048	0.43
303	Acero inoxidable	Recocido	241 (35.0)	601 (87.3)	1 520 (221) <sup>†</sup>	1 410 (205)	0.51	1.16
304	Acero inoxidable	Recocido	276 (40.0)	568 (82.4)	1 600 (233) <sup>†</sup>	1 270 (185)	0.45	1.67
2011	Aleación de aluminio	T6	169 (24.5)	324 (47.0)	325 (47.2) <sup>†</sup>	620 (90)	0.28	0.10
2024	Aleación de aluminio	T4	296 (43.0)	446 (64.8)	533 (77.3) <sup>†</sup>	689 (100)	0.15	0.18
7075	Aleación de aluminio	T6	542 (78.6)	593 (86.0)	706 (102) <sup>†</sup>	882 (128)	0.13	0.18

$$\frac{1}{N^2} = \left(\frac{\sigma}{S_y}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{0.577 * S_y}\right)^2$$

$$\frac{1}{N^2} = \left(\frac{4.413 \text{ MPa}}{276 \text{ MPa}}\right)^2 + \left(\frac{5.8 \text{ MPa}}{0.577 * 276 \text{ MPa}}\right)^2$$

$$N = 25.14$$

Como se observa el factor de seguridad es alto a pesar de que se añadan sobrecargas imprevistas a la hora del funcionamiento de la impresora, esto se debe por el tipo de material del tornillo, sus propiedades mecánicas y la carga ejercida sobre ella, se tiene un sobredimensionamiento del tornillo pero esto se debe a la disponibilidad de los tornillos de potencia que existen en el mercado.

### 3.3.4 CÁLCULO DEL MOTOR EJE Z

Para este eje se debe considerar la disposición del motor, Figura 3.15.

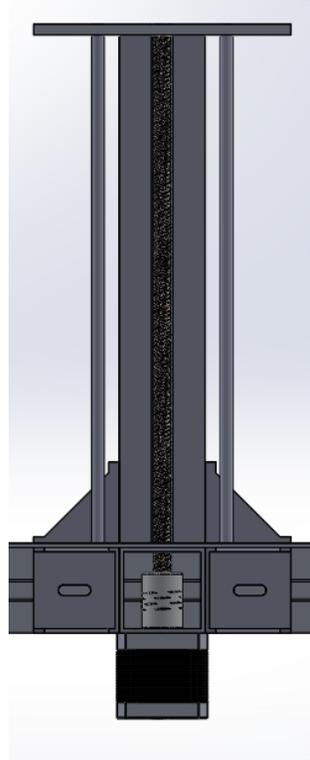


Figura 66 Disposición del motor NEMA eje Z

En los torques calculados de la sección del husillo de potencia, el torque de mayor valor es el torque de subida que es de 0.3259 Nm, pero para no sobrecargar el motor se recomienda escoger uno que tenga el doble del torque calculado necesario en este caso sería un torque de 0.65 Nm, con este valor se escoge del catálogo de motores NEMA [40], cuál de ellos soportan esa cantidad de torque, ver Tabla 3.13.

Tabla 32 Torque de motores NEMA comerciales

Motor NEMA	Torque (Ncm)	Torque (Nm)
NEMA 16 MODEL HY 200 1607	8.7	0.087
NEMA 17 MODEL HY 200 1713	13.7	0.137
NEMA 17 MODEL HY 200 1717	23.1	0.231
NEMA 17 MODEL PERFORMANCE MODEL HS 200 1714	26	0.26
NEMA 17 MODEL PERFORMANCE MODEL HS 200 1716	33	0.33
NEMA 17 MODEL PERFORMANCE MODEL HS 200 1720	50	0.50
NEMA 23 MODEL HY 200 2215	70	0.70
NEMA 23 MODEL HY 200 2226	109	1.09
NEMA 23 HIGH PERFORMANCE MODEL HS 200 2216	180	1.8
NEMA 34 MODEL HN 200 3226	280	2.8

Como se identifica en la tabla anterior, los valores del torque de los motores en el mercado y del torque necesario, se puede escoger desde los motores NEMA 23, los cuales son comunes y fáciles de encontrar en el mercado nacional.

### 3.3.5 DISEÑO DEL CHASIS

Esta sección permite identificar el espesor que debe tener el chasis de la impresora, basándose en todos los componentes que contenga la máquina, en la Tabla 3.14 se pueden observar todos los elementos que lo conforman.

Tabla 33 Cargas presentes en la base de la impresora

Elemento	Material	Peso Unitario (Kg)	Cantidad	Peso (Kg)
Perfiles	Aluminio	0.5	8	4
Planchas	Aluminio	1.4	1	1.4
Ángulo esquinero	Aluminio	0.01	13	0.13
Espejo	Vidrio	0.5	1	0.5
Proyector	Varios	1	1	1
HMI	Varios	0,4	1	0,4
Cableado	Varios	0,5	1	0,5
Tornillos	Acero	0,025	30	0,75
Motor NEMA 17	Varios	0.3	1	0.3
Rodamientos	Varios	0.018	2	0.036
Ejes de 8 mm	Acero	0.09	2	0,18
Tornillo de Potencia	Acero inoxidable	0.05	1	0.5
Tuerca	Bronce	0.03	1	0.03
Circuito electrónico	Varios	0,25	1	0,25
Plataforma	Aluminio	1.5	1	1.5
Resina Solidificada	Resina	6.14	1	6.14
Tanque	Vidrio	1.1	1	1.1
Adicional (20%)	Varios	2.76	1	2.76
<b>TOTAL</b>				<b>17.15</b>

Calculado el total de peso que debe soportar la base, se transforma esta carga en fuerza multiplicándola por la gravedad (36),

$$F = m * a \quad (36)$$

$$F = 17.15 \text{ Kg} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = 168 \text{ N}$$

Se reemplaza la estructura base por una representación de viga, ver Figura 3.16.



Figura 67 Representación estructura base

Con esta representación se puede observar el diagrama de fuerzas cortantes, Figura 3.17 y de momento, Figura 3.18.

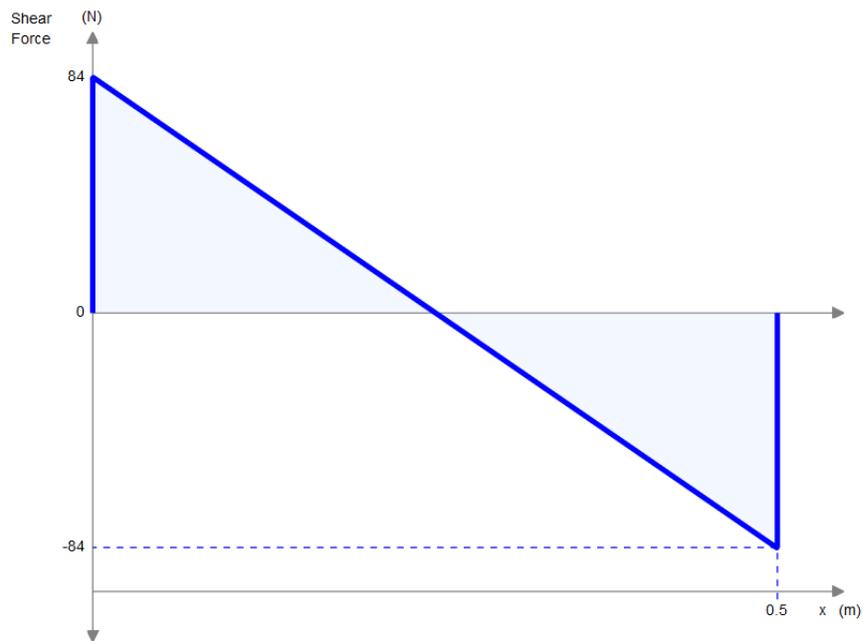


Figura 68 Diagrama de fuerza cortante de la estructura base

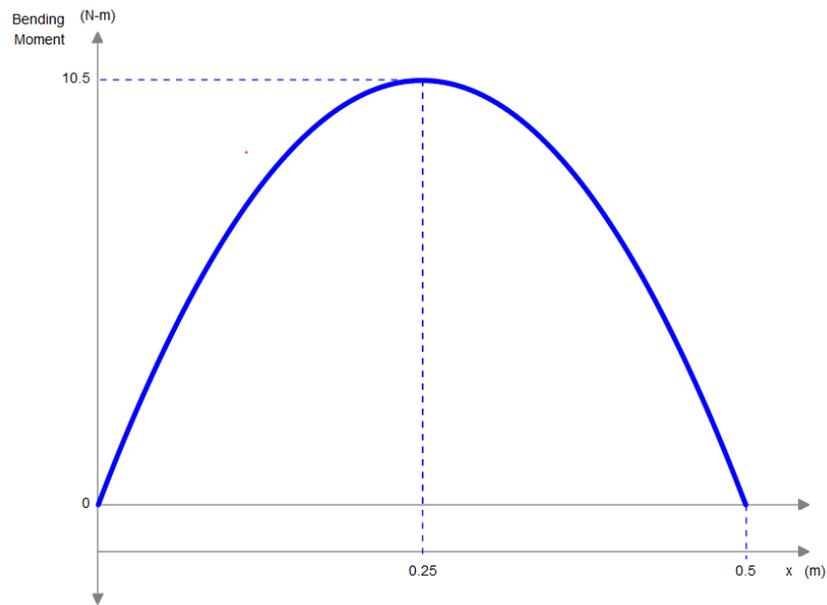


Figura 69 Diagrama de Momento de la estructura base

Con esto se puede conocer el espesor que deberá tener la estructura base, en este caso el material a escoger son planchas de aluminio por su ligereza y su buen nivel de refracción de la luz y del calor.

Para el cálculo de la inercia de una placa rectangular con apoyo simples y carga uniforme se observa la ecuación del ANEXO 6, con lo cual se tiene:

$$Y_{m\acute{a}x} = -\frac{5 \cdot w \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (37)$$

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (38)$$

Donde:

w es la fuerza ejercida sobre la placa de aluminio igual a  $336 \frac{N}{m}$

L es la longitud de la base 500mm

I es el momento de inercia, en  $m^4$

H es el ancho de la plancha que es 350mm

E módulo de elasticidad del acrílico es de 71.7 GPa. [40]

De igual forma se tiene la deflexión máxima y mínima permisible en este elemento (39), al ser una máquina de precisión se tiene [41]:

$$Y_{m\acute{a}x} = 0.00001 \text{ a } 0.0005 \frac{\text{in}}{\text{in}} \text{ o } \frac{\text{mm}}{\text{mm}} \text{ de longitud de la viga} \quad (39)$$

Se coloca la longitud de la viga que es de 500mm y se obtiene de esta manera el límite superior e inferior respectivamente.

$$Y_{min} = \frac{0.00001 \text{ mm}}{\text{mm}} * 500\text{mm}$$

$$Y_{min} = -0.005 \text{ mm}$$

$$Y_{m\acute{a}x} = \frac{0.0005 \text{ mm}}{\text{mm}} * 500\text{mm}$$

$$Y_{m\acute{a}x} = -0.25 \text{ mm}$$

Con el valor de  $Y_{m\acute{a}x}$ , se reemplaza en (37), y se obtiene (40)

$$I = -\frac{5 * w * l^4}{384 * Y_{m\acute{a}x} * E} \quad (40)$$

$$I = -\frac{5 * 336 \frac{\text{N}}{\text{m}} * (0.5\text{m})^4}{8 * (-0.25 * 10^{-3}\text{m}) * 71.7 \text{ GPa}}$$

$$I = 7.32 * 10^{-7} \text{ m}^4 \quad (41)$$

Reemplazando el valor (41) en (38), para despejar el valor de "b" se tiene:

$$I = \frac{b * h^3}{12}$$

$$b = \frac{12 * I}{h^3} = \frac{12 * 7.32 * 10^{-7} \text{ m}^4}{(0.35\text{m})^3}$$

$$b = 0,002189\text{m} = 2.19 \text{ mm}$$

Con esto se busca en la tabla del ANEXO 7 [42], los espesores y dimensiones de las planchas de aluminio liso existentes en el mercado y se escoges el más cercano a este valor, en este caso es la plancha de 2.5 mm de espesor.

### 3.4 DIMENSIONAMIENTO ELECTRÓNICO

El sistema cuenta con 4 partes electrónicas principales que son:

- Módulo de control del motor del eje Z
- Módulo de control Central.
- Módulo de control de elementos adicionales, sensor.
- Módulo de control de Proyección.

En la Figura 3.19 se puede observar un esquema del funcionamiento del sistema electrónico.

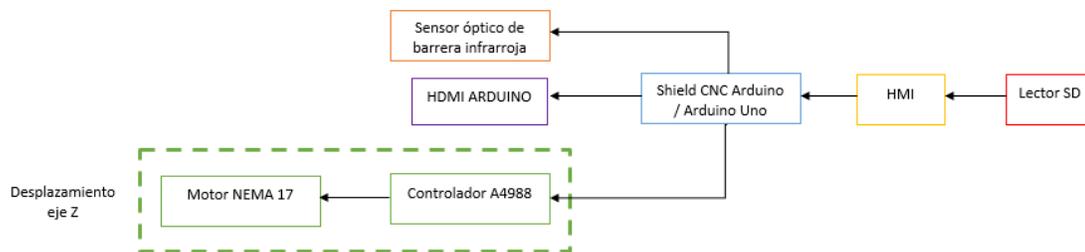


Figura 70 Diagrama del sistema electrónico

#### 3.4.1 MÓDULO DE CONTROL CENTRAL

Para llegar a controlar las funciones de la impresora, que en este caso son muy pocas las señales de entrada y salida, se utiliza un Shield CNC Arduino, ver Figura 3.20:

Este cuenta con las siguientes características [43]:

- Cuenta con 4 ranuras para módulos de accionamiento de motor paso a paso.
- 8 puertos de entrada y salida.
- Mismos pines que un Arduino UNO con pines adicionales como:
  - El doble de pines para finales de carrera para cada eje.
  - Estos pines se pueden conectar a un interruptor de parada de emergencia.
  - Pines de comando GRBL: permite agregar botones para pausar, detener, reanudar y abortar.
  - Los pines de serie (D0-1) y los pines I2C (A4-5) tienen sus propios pines extraíbles para futuras extensiones.

- La versión. 3m00 de la placa se agrega un puente de configuración para un 4to eje (clonar el otro eje o ejecutar desde el pin D12-13), el encabezado de comunicaciones (RX +TX, I2C) y un encabezado de control paso a paso.
- Voltaje de entrada es de DC 12V-36V (tener precaución que todos los elementos que interactúen con el controlador también soporten el voltaje de entrada de Arduino)



Figura 71 Shield CNC Arduino

Fuente: Industrial Shields [43]

La funcionalidad que tiene la placa controladora shield en la impresora es controlar e interpretar las señales de control al motor a pasos para que de esta manera ejercer el avance de la plataforma, de ahí el Arduino UNO es el encargado de interpretar las señales recibidas y controlar las entradas generadas por el sensor óptico, botón de encendido, botón de paro de emergencia y el sensor infrarrojo para calibrar la posición de la plataforma con respecto al tanque.

### 3.4.2 CONTROL DEL DESPLAZAMIENTO EJE Z

Como su nombre lo indica, en este módulo se ejecuta el desplazamiento el eje Z, esto quiere decir poder elevar o descender la plataforma para permitir de esta manera la impresión de la pieza, contando con la ayuda de un motor a pasos (NEMA 17), driver de control A4988 y el husillo de potencia unido a la plataforma. En la Tabla 3.15 se detallan las especificaciones técnicas de estos elementos.

Tabla 34 Especificaciones de elementos electrónicos del desplazamiento Z

Imagen	Nombre	Especificaciones
 <p data-bbox="305 661 625 745">Figura 72 Driver Pololu 4988 Fuente: tecnopura [44]</p>	<p data-bbox="667 443 891 556">Controlador / Driver motor a paso a paso Pololu A4988</p>	<p data-bbox="922 317 1398 653">Funcionamiento: 3.3V a 5V Corriente máxima: +- 2A Detección de caída de corriente automático Protección de corriente-crossover Circuito de protección térmica interna Circuito de falla a tierra protección de cortocircuito 5 modos de trabajo: full, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16.</p>
 <p data-bbox="313 1081 613 1165">Figura 73 Motor NEMA 23 Fuente: BricoGeek [45]</p>	<p data-bbox="670 892 886 961">Motor paso a paso, Nema 23</p>	<p data-bbox="922 764 1398 1100">Paso por vuelta: 200 (1.8°/paso) Corriente: 1 A Voltaje: 12 V ( 8V a 32 V) Resistencia: 5.7 Ohm por bobina Torque: 6.9 Kg/cm (0,7 Nm) Inducción: 2.8 mH por bobina Peso: 450 gr Diámetro del eje: 6mm</p>

Para poder determinar el desplazamiento que se tendrá en la plataforma se requiere las especificaciones técnicas del motor a pasos, Tabla 3.15, como es el número de pasos y de igual forma las especificaciones del tornillo de potencia, Tabla 3.10, con esto se utiliza (42) para determinar el número de pasos de avance:

$$d_{pm} = \frac{n_p}{n_e * p} \quad (42)$$

Donde:

$d_{pm}$  Número de pasos de avance, en pasos/mm

$n_p$  Número de pasos del motor

$n_e$  Número de entradas o paso del tornillo de potencia

$p$  Pasos del tornillo de potencia, en mm

$$d_{pm} = \frac{200 \text{ pasos}}{4 * 2 \text{ mm}}$$

$$d_{pm} = 25 \frac{\text{pasos}}{\text{mm}}$$

Esto quiere decir que para recorrer 1 mm se deben realizar 25 pasos, y para la precisión de 0,1mm que tiene la impresora se deberán avanzar 2,5 pasos.

Como no se puede tener el valor en 2,5 pasos, entonces aquí interviene el modo de trabajo del driver con los micro pasos, ver Tabla 3.16.

Tabla 35 Pasos por vuelta

Pasos	Driver (Pasos por vuelta)	Total de pasos por vuelta
200	1	200
200	1/2	400
200	1/4	800
200	1/8	1600
200	1/16	3200

Volviendo a utilizar (42) y con una precisión de  $\frac{1}{2}$  de pasos por vuelta, se tiene:

$$d_{pm} = \frac{400 \text{ pasos}}{4 * 2 \text{ mm}}$$

$$d_{pm} = 50 \frac{\text{pasos}}{\text{mm}}$$

Para una precisión de 0,1mm se tiene 5 pasos el cual ya es un factor entero.

### 3.4.3 CONTROL DE PROYECCIÓN

#### 3.4.3.1 Lector SD

Este lector SD es de la marca Arduino para guardar y escribir datos utilizando la librería SD Arduino que solo soporta FAT16 y FAT32, esto quiere decir que no se puede formatear en NTFS de Windows, HPFS de Apple o extN de Linux, sino

solamente en FAT. En su mayoría para la interacción de este módulo se utiliza el protocolo de comunicación SPI. Ver Figura 3.23.

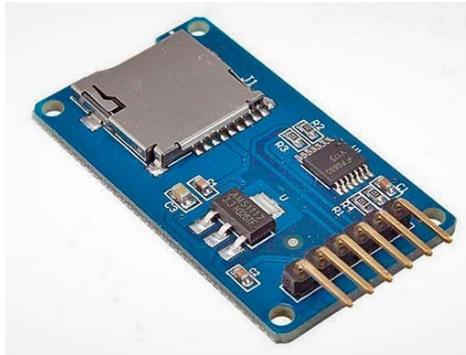


Figura 74 Lector SD Arduino

Fuente: SD SPI [49]

En la Tabla 3.17 y Figura 3.24 se ilustra la forma en la que se debe conectar dependiendo el controlador que se utilice en este caso Arduino.

Tabla 36 Conexión módulo de la tarjeta SD al Arduino

<b>Módulo de Tarjeta SD</b>	<b>Cableado Arduino UNO</b>	<b>Cableado Arduino MEGA</b>
VCC	3.3V a 5V	3.3V a 5V
CS	4	53
MOSI	11	51
CLK	13	52
MISO	12	50
GND	GND	GND

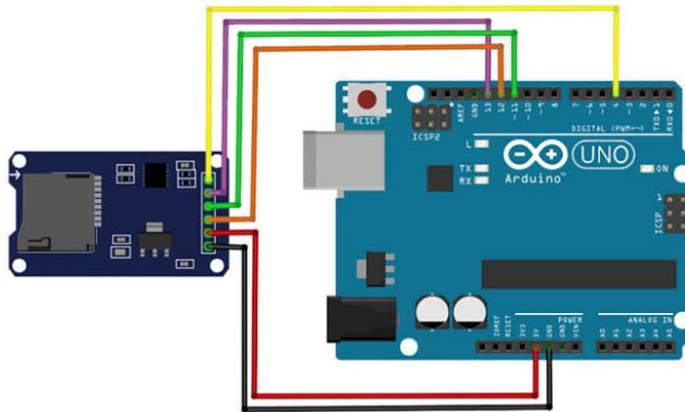


Figura 75 Esquema de conexión de tarjetas Micro SD de Arduino

Fuente: SD SPI [49]

### 3.4.3.2 Módulo HDMI Arduino

Este módulo o también conocido como HDMI Shield, es una placa de desarrollo compatible con Arduino para la comunicación entre el MCU y un televisor, proyector, etc. Para que pueda funcionar con tranquilidad esta requiere un reloj de pixeles de 148MHz.

Utiliza un controlador TFT RA8876 para generar video RGB en formato 8:8:8, incluyendo un SPI de 4 hilos, 8080 de 16/8 bits e I2C.

El codificador HDMI CH7035B se utiliza para convertir el video RGB a señales diferentes (TMDS) requeridas para la especificación HDMI, este codificador tiene un buffer de cuadro interno para aumentar 8:8:8 RGB a Full HD 1080p (1920 x 1080) a 60Hz máximo (Figura 3.25). [50]



- Pantalla TFT con panel táctil resistivo integrado de 4 hilos.
- Interfaz serial TTL de 4 pines.
- Memoria Flash de 16M para código de aplicación de usuario y dato.
- Ranura para tarjeta micro SD integrada para actualización de firmware.
- Fuente de alimentación de 5V a 2A.

### 3.4.4 CONTROL DE ELEMENTOS ADICIONALES

En estos elementos adicionales se tiene:

- Interruptores, conmutadores, sensores y pulsadores.
- Conductores.
- Fuente de alimentación.

#### 3.4.4.1 Sensor óptico de Barrera Infrarroja

Uno de los sensores más utilizados con la funcionalidad de detectar la presencia de objeto, es el sensor ITR8102, Figura 3.27. Este consta de un diodo emisor de infrarrojo y un NPN, con un tiempo de respuesta rápido [46], sus especificaciones se encuentran en la Tabla 3.18 [47].



Figura 78 Sensor óptico de barrera infrarroja

Fuente: tostatroni [23]

Tabla 37 Especificaciones del sensor ITR8102

Nombre	Especificación
Voltaje	5 V
Corriente	50 mA
Potencia	75 mW
Colector corriente	30 mA
Voltaje colector-emisor	30 V

Voltaje del emisor-colector	5 V
Temperatura de funcionamiento	-25° +85° C

### 3.4.4.2 Botones

La impresora consta con dos botones: uno q el encendido y apagado de la impresora colocado en la parte posterior de la impresora, ver Figura 3.28, y otro para el paro de emergencia ubicado en la parte delantera de la impresora (esquina inferior izquierda), ver Figura 3.29

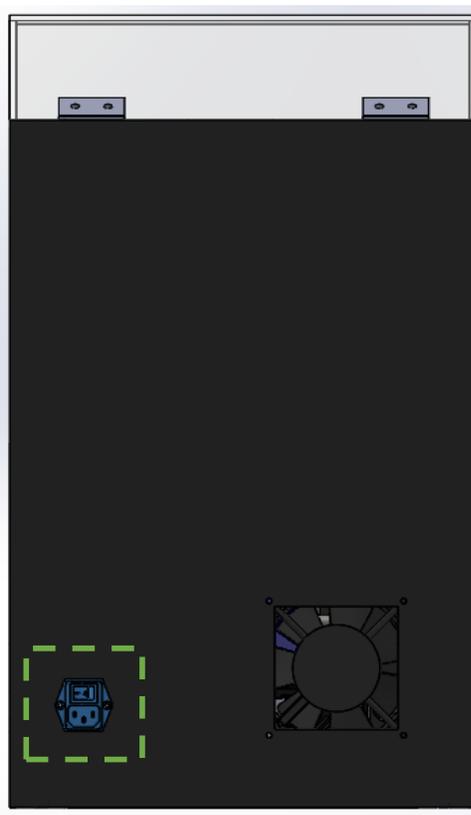


Figura 79 Botón de encendido de la impresora

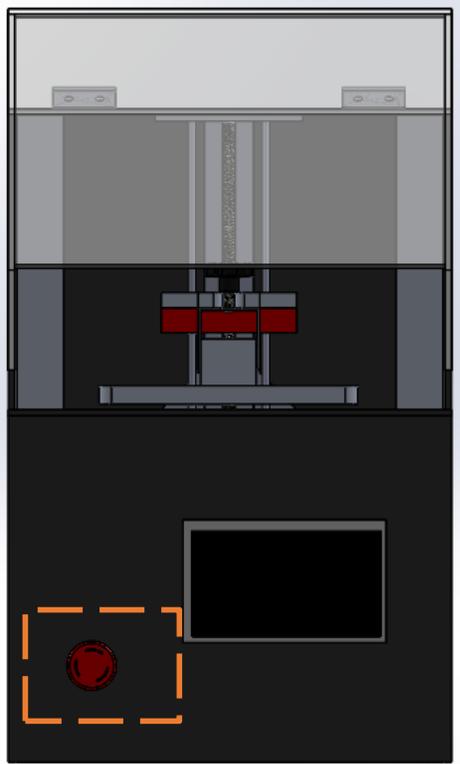


Figura 80 Botón de paro de emergencia

### 3.4.4.3 Fuente de Alimentación

Se debe identificar todos los elementos electrónicos que requieren alimentación para su funcionamiento, en la Tabla 3.19, se identifican cada uno de los elementos y sus valores de alimentación.

Tabla 38 Componentes del esquema electrónico

Elemento	Cantidad	Voltaje (V)	Corriente (mA)
Shield Arduino	1	5 a 24	500
Sensor óptico	1	5	50
Driver A4988	1	5	300
Motor NEMA 23	1	8 A 32	1000
Botones	2	5	100
Lector SD	1	3.5 a 5	500
Módulo HDMI	1	5	500
HDMI Nextion 7	1	5	2000

En el caso del Arduino y del Motor Nema 23, los rangos de trabajo son similares por lo cual se escoge un valor de voltaje común el cual es de 12 V. Conocido esto se

suman todos los valores de corriente que trabajen con 5V y los que trabajen con 12V, con un factor de seguridad de 2 al valor de la corriente en el caso que existan caída o elevaciones de tensión, ver Tabla 3.20.

Tabla 39 Valor de corriente y potencia de la fuente de alimentación

Voltaje (V)	Corriente (mA)	Factor de seguridad	Potencia (W)
5	3450	2	34.5
12	1500	2	36

Con los datos obtenidos en la Tabla 3.19, se busca una fuente que pueda contar con salida de voltaje de 5 y 12 voltios, como es la Fuente de poder dual switching 12V (3A) y 5V (4A) [48], Figura 3.30, sus especificaciones técnicas se encuentran en la Tabla 3.21.



Figura 81 Fuente de alimentación dual switching

Fuente: MCI Electronics [48]

Tabla 40 Especificaciones técnicas de la fuente de alimentación

Nombre	Especificaciones
Potencia de salida	1 a 36 W
Corriente de salida	3 A para 12V y 4 A para 5 V
Voltaje de salida	12 V y 5 V
Frecuencia	50 – 60 Hz
Voltaje de entrada	110 – 120 VAC / 200 – 240 VAC / 50 – 60 HZ
Dimensiones	160 x 98 x 39 mm
Peso	0.4Kg

Como la fuente de alimentación cuenta ya con protecciones internas no es necesario colocar fusibles o de algún tipo de protección para los elementos electrónicos.

### 3.5 ALGORITMO DE PROGRAMACIÓN

La impresora es programada con un algoritmo inicial y con un algoritmo funcional que permiten el funcionamiento y objetivos de la máquina. A continuación se detallan cada uno de ellos:

#### 3.5.1 ALGORITMO INICIAL-HOME

Cuando la impresora se enciende por primera vez para regular la plataforma con respecto al tanque esta debe desplazarse de manera manual hasta posicionarse al nivel de la base del tanque donde empieza a imprimir la pieza. Esta posición es captada por el sensor óptico infrarrojo, a continuación, se presiona en la pantalla HMI el botón que indique al programa donde debe iniciar siempre la impresora para imprimir. Observar Figura 3.31

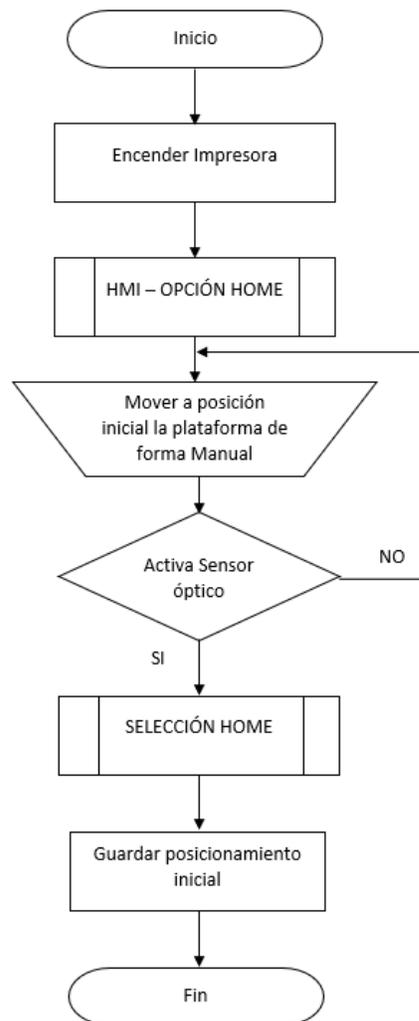


Figura 82 Algoritmo inicial – HOME

### 3.5.2 ALGORITMO DE IMPRESIÓN

En la Figura 3.32, se muestra el funcionamiento de la máquina desde que se enciende, Primero detecta la tarjeta SD en el puerto para leer su contenido, una vez detectada la tarjeta el usuario debe presionar el botón de inicio de impresión de la pieza, esto da comienzo al desplazamiento de la plataforma hasta la ubicación inicial que es dentro del tanque de resina y empieza a imprimir la pieza.

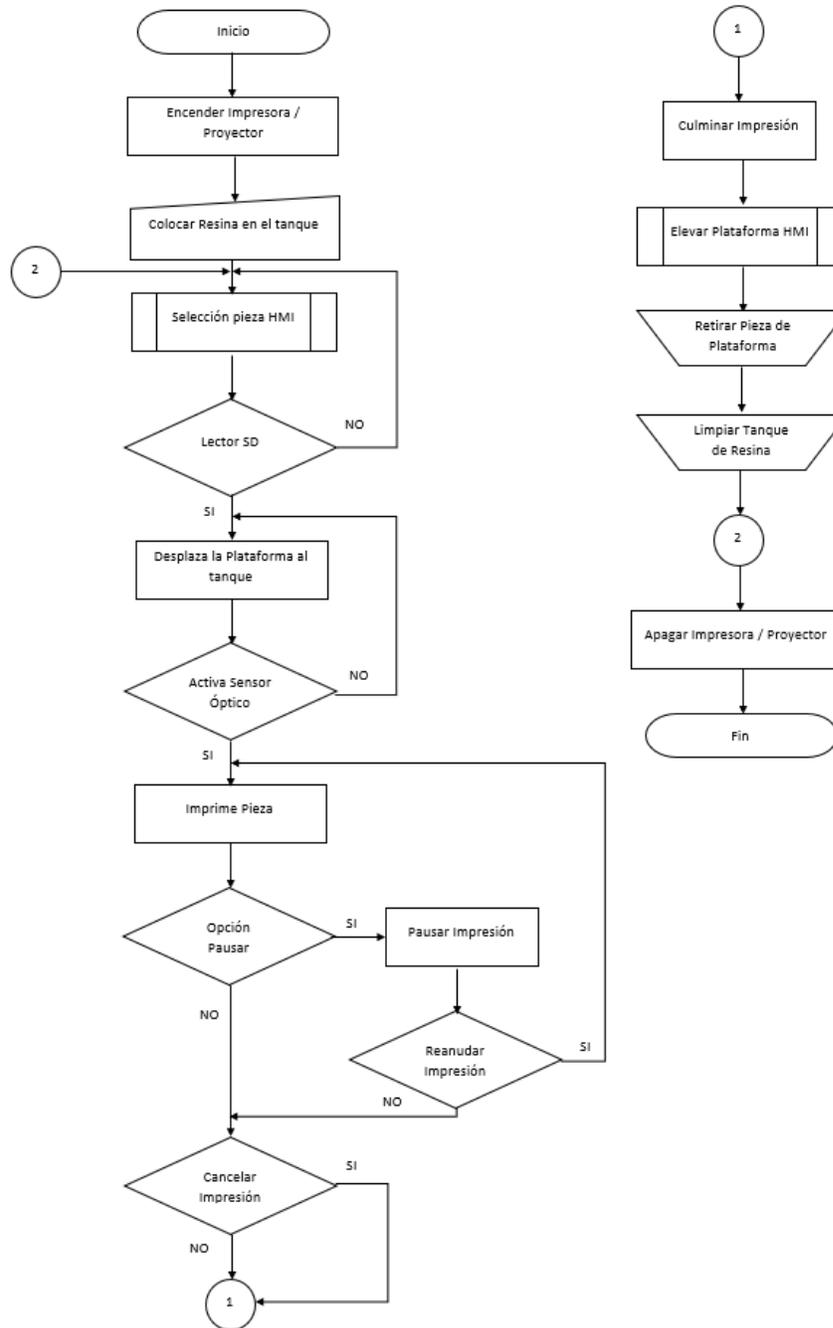


Figura 83 Diagrama de Impresión

### 3.5.3 ALGORITMO DE MANEJO DE IMÁGENES DE IMPRESIÓN

En la Figura 3.33 se muestra el funcionamiento del manejo de imágenes para la proyección por capa de impresión. Inicialmente transforma el formato Slicer (.wow) el archivo de la pieza a guardar en la SD, el programa SparkStudio transforma el STL a este.

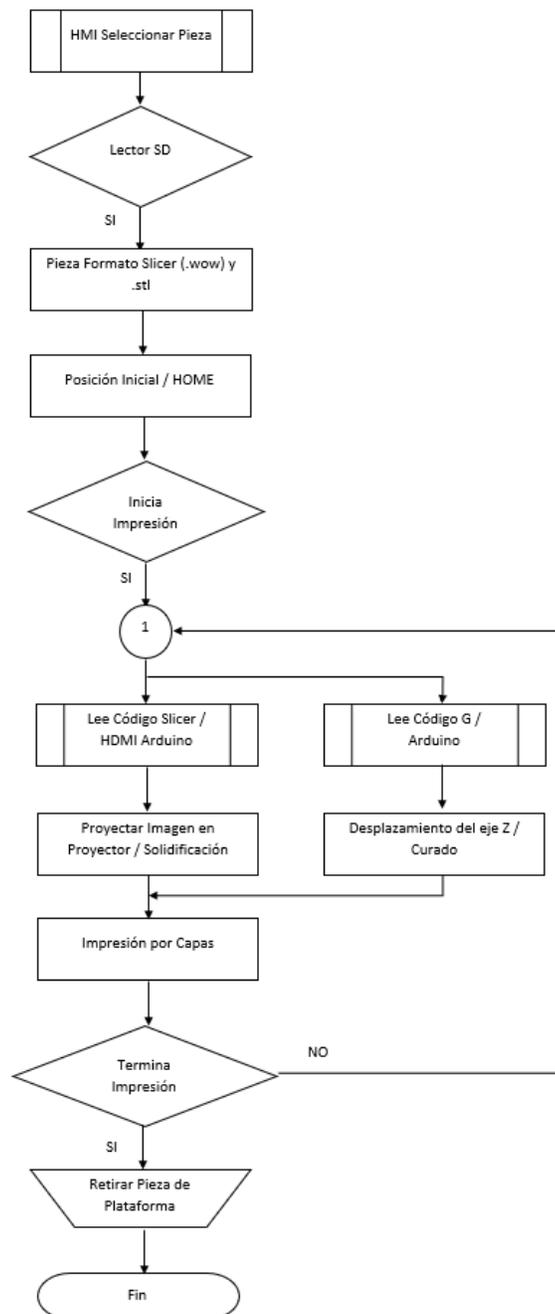


Figura 84 Algoritmo de manejo de imágenes de impresión

## CAPÍTULO IV

### 4.1 CALIBRACIÓN DE LA IMPRESORA

Como en todo prototipo al momento de aplicar los datos calculados tanto para la ubicación del proyector al espejo, del espejo al tanque y el ángulo de inclinación del espejo, se realizaron varias pruebas partiendo de estos para llegar así a imprimir la pieza deseada y con las dimensiones requeridas.

#### 4.1.1 DISTANCIA DE PROYECCIÓN

Unos de los problemas más presentes fue la distancia a colocar el proyector para tener el área de impresión deseada en este caso 192mm x 108mm. Para la construcción del prototipo se escoge un proyector económico en este caso el Proyector EPSON EX3240. (Figura 4.1). Sus características se pueden observar en la Tabla 4.1.



Figura 85 Proyector EPSON EX3240

Fuente: EPSON [49]

Tabla 41 Especificaciones del Proyector UNIC Uc46

Nombre	Especificación
Resolución nativa	800 x 600 píxeles
Máxima Resolución	1080p
Ratios de contraste	15000:1
Lúmenes	1600
Distancia de proyección	1m a 3.8 m
Precio mercado nacional	\$200
Dimensiones	200 x 151 x 90 mm
Peso	1.105 Kg

Con estas especificaciones se tiene que el área máxima de impresión es de 80mm x 60mm, como se requiere una resolución de 100 micras y para ello se había señalado en el capítulo 3, que es necesario 2770 lúmenes, este valor sobre pasa los lúmenes

que ofrece el proyector que se tiene, por lo cual el tiempo de proyección en la resina debe ser prolongada.

Como es un distinto proyector y posee especificaciones técnicas diferentes se debe calcular la distancia para este tipo de proyector.

Ratio lente                      5 :3

Tamaño de la Pantalla    1m

$$\text{Distancia} = \text{tamaño de pantalla} * \text{ratio lente}$$

$$\text{Distancia} = 1m * \frac{5}{3}$$

$$\text{Distancia} = 1.67 m$$

Utilizando la Figura 3.5 se tiene:

$$\text{Tan } \alpha = \frac{0.5 m}{1.67 m}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{0.5 m}{1.67 m}$$

$$\alpha = 16.67^\circ$$

Con este ángulo y teniendo la Figura 3.6, se calcula la nueva distancia:

$$\text{Tan } \alpha = \frac{\frac{L}{2}}{lpe + leb}$$

$$lpe + leb = \frac{\frac{L}{2}}{\text{Tan } \alpha}$$

$$lpe + leb = \frac{\frac{80 mm}{2}}{\text{Tan } 16.67^\circ}$$

$$lpe + leb = 133.6 mm$$

$$lpe = leb$$

$$lpe = 66.8 mm$$

Calculado las distancias de ambos se dibuja en una hoja de papel un rectángulo con las dimensiones anteriormente señaladas, y se observa si la proyección abarca toda el área del rectángulo, (Figura 4.2). Una vez calibrado esto, y midiendo la distancia entre el rectángulo y el proyector se tiene, la Tabla 4.2 donde se toman los distintos valores de distancias y si abarcan el área del rectángulo dibujado.



Figura 86 Calibración del área de proyección

Tabla 42 Toma de distancias del proyector

Distancia (mm)	Cumple
140	NO
138	NO
135	NO
134	NO
133.6	NO
133.5	NO
133	NO
132.5	NO
132	SI
131.5	SI
131	SI
130.5	SI
130	SI
129.5	NO
129	NO
128.5	NO
128	NO
125	NO



Figura 87 Toma de distancia entre el proyector

Con la toma de datos de la Tabla 4.2, se identifica que las distancias que llegan a abarcar toda el área del rectángulo son entre 131.5mm hasta 130mm, con lo cual se deben realizar las pruebas con respecto a estas distancias, (Figura 4.3). Cabe recalcar que la distancia del espejo con respecto al lente debe ser de igual forma que del espejo a la plataforma. Por ende, se realiza un soporte para espejo el cual se pueda desplazar y movilizar con facilidad, (Figura 4.4). Este consta con un ángulo de inclinación de  $45^\circ$  con respecto al eje X y con una apertura máxima para un espejo cuadrado de 100mm x 100mm y un espesor máximo de 10mm

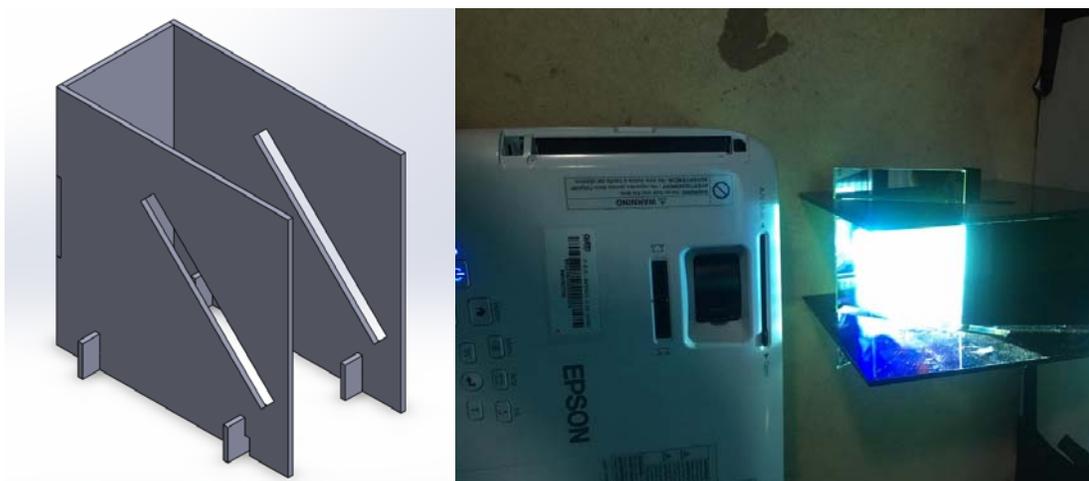


Figura 88 Soporte espejo prototipo

En la Figura 4.5 se ilustra la colocación del soporte con respecto al proyector, se realizan pruebas de funcionamiento para conocer los tiempos de exposición de la resina y la precisión de impresión.



Figura 89 Distancia del proyector al soporte del espejo

#### 4.1.2 TIEMPO DE PROYECCIÓN

Una vez tomada la distancia de proyección que es de 131mm y el ángulo de inclinación del espejo de  $45^\circ$ , se realizan las primeras impresiones. Para los tiempos de exposición y de secado de la resina, se toman como referencia las impresoras comerciales y las impresoras realizadas por estudiantes, donde la Impresora Form 2 [14] tiene un tiempo de impresión de 4 segundos por capa (sin explicar el tiempo de exposición y el tiempo de secado), otros proyectos como la impresora realizada por la ESPE [3] explica como conclusión que el tiempo de impresión es de 6 segundos dividido en: 4 segundos para el secado y 2 segundos para estabilizar la resina por el movimiento de la plataforma.

Los datos de tiempo de exposición y secado más los datos de luminosidad calculados con el proyector de 2770 lúmenes sugieren que al usar un proyector de 1600 lúmenes se requiere un tiempo mayor de exposición. En la Tabla 4.3. se realizan pruebas con los tiempos de exposición y de secado de la resina.

Tabla 43 Tiempos de proyección en la resina

Número de Prueba	Velocidad (Segundos por capa)	Tiempo expuesto (Segundos)	Tiempo secado (Segundos)	Estado	Observación
1	4	3	1	NO	
2	5	3	2	NO	
3	6	4	2	NO	
4	7	4	3	NO	
5	8	5	3	NO	
6	9	6	3	NO	
7	10	6	4	NO	
8	10	7	3	SI	Pieza flácida
9	11	7	4	SI	
10	11	8	3	SI	Pieza más sólida
11	12	8	4	SI	Pieza Sólida
12	12	9	3	SI	
13	13	10	3	SI	

En la Tabla 4.3 se muestran los distintos tiempos de exposición, donde se observa que a partir del tiempo de exposición de 8 segundos se llega a solidificar la resina, pero no tiene una estructura muy sólida (Figura 4.6). Para obtener un mejor resultado el tiempo de exposición recomendado es de 12 segundos (Figura 4.7), tres veces más que el tiempo de impresión por capa que la impresora Form 2 y el doble que la impresora realizada por los estudiantes de la ESPE, ver Tabla 4.4. Con estas pruebas realizadas de tiempos de proyección se imprimen las piezas para verificar la resolución de proyección que se tiene.

Tabla 44 Tiempos de comparación de impresión

Nombre	Tiempo de Exposición	Tiempo de Secado
Form2	4 segundos	
Impresora DLP ESPE	4 segundos	2 segundos
Prototipo	8 segundos	4 segundos

En el ANEXO 8, se pueden observar más ejemplares fallidos al momento de probar los tiempos de exposición y secado de la resina.

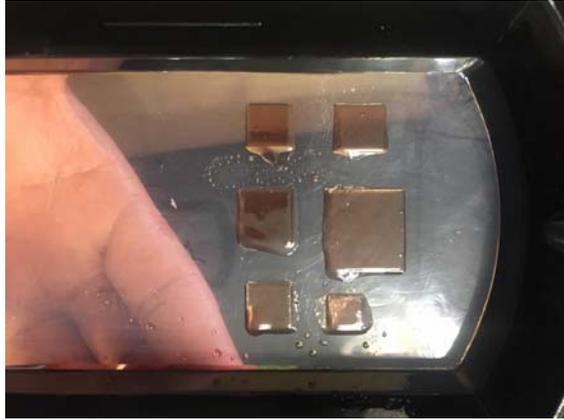


Figura 90 Tiempo de exposición de 8 segundos

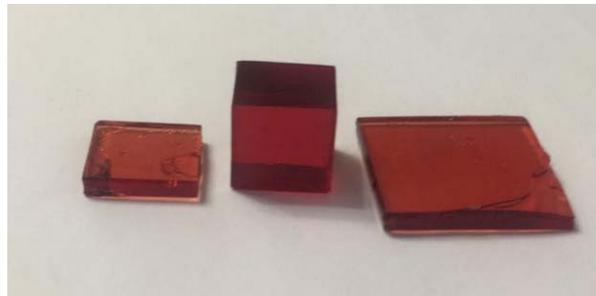


Figura 91 Tiempo de exposición de 12 segundos

## 4.2 RESULTADOS DE LA APLICACIÓN

### 4.2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El funcionamiento de la impresora se realiza de la siguiente manera:

#### CALIBRACIÓN INICIAL

- Si es la primera vez que se utiliza se debe configurar el posicionamiento inicial de la plataforma con respecto al tanque, con lo cual el usuario debe conectar el cable de alimentación a una red de 110V–60Hz y presionar el botón de encendido que se encuentra en la parte posterior (Figura 3.24). Ajustar el tornillo de perrilla estrella, (Figura 4.8), que junta el desplazamiento del eje Z con la plataforma, una vez hecho esto se mueve la plataforma hasta el nivel del tanque, y el sensor óptico infrarrojo detectará la presencia de la plataforma en esa ubicación, realizado esto se ajustan los pernos socket, (Figura 4.8). De esta manera se regula la altura de la plataforma con respecto al tanque.

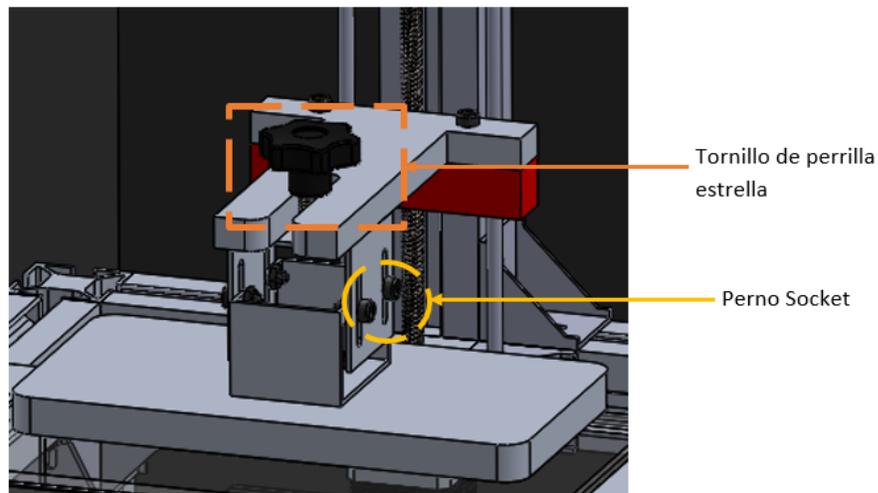


Figura 92 Mecanismo de aseguramiento del desplazamiento

### **IMPRESIÓN DE PIEZAS**

- Al haber realizado la calibración de la plataforma con respecto al tanque ya no se debe realizar esto a menos que se desarme el mecanismo de desplazamiento.
- Para empezar la impresión, encienda la impresora procurando que el tanque se encuentre limpio y sin ningún tipo de residuo para evitar futuros conflictos al momento de iniciar la impresión.
- Coloque suficiente resina dentro del tanque respecto a la pieza que se quiera imprimir y cierre la ventana protectora UV, (Figura 3.25).
- En la ranura SD se debe ingresar la tarjeta con el programa de la pieza, en este caso se utiliza el SparkStudio y el archivo a leer es de tipo Slicer (.wow). Al detectar la SD, el usuario debe acercarse al HMI y buscar el archivo que desea imprimir, una vez ubicado el archivo se debe presionar en él y aceptar las condiciones para dar comienzo a la impresión.
- Si se desea parar la impresión existe un comando que lo permite dentro de las opciones de las funcionalidades del HMI.
- Tanto el programa (SparkStudio) y la impresora indican el tiempo aproximado de impresión con respecto a las características que se hayan dado a la pieza, esto depende de la resolución, el tiempo de proyección por capa y el tiempo de curado de la resina. Finalmente, al terminar la impresión se debe aflojar el tornillo de perrilla estrella para de esta forma desacoplar la plataforma y separar

la pieza impresa de esta. Para el post-curado se necesita una cámara de curado UV.

#### 4.2.2 PRUEBAS Y RESULTADOS

Con el prototipo que se construyó para validar el funcionamiento y resolución de impresión, (Figura 4.9), se realizaron pruebas para determinar cuan precisa es la impresora, el tiempo que tarda en imprimir y su resolución con respecto al programa STL que se carga.



Figura 93 Prototipo de impresora

#### Pruebas iniciales de la distancia del proyector

Se realizan las pruebas con respecto a los valores de la Tabla 4.2, donde son las distancias del proyector con respecto al espejo y del tanque, se realiza un ejemplo básico de impresión que consta de un cuadrado de 10mm por lado y con un espesor de 3mm, esto se diseña en el programa SolidWorks, (Figura 4.10)

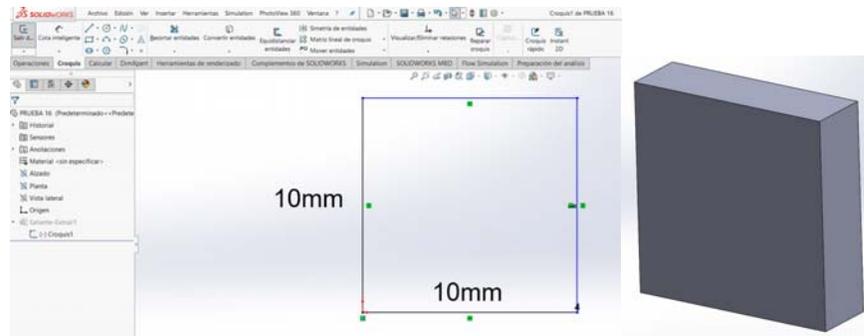
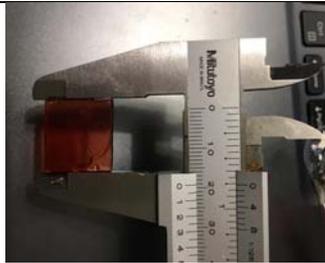
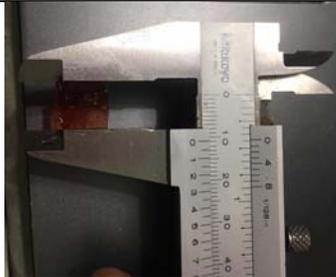


Figura 94 Figura SolidWorks

En la Tabla 4.5, se muestran los resultados obtenidos con respecto a las distintas distancias:

Tabla 45 Toma de dimensiones de impresión variando la distancia de proyección

Distancia (mm)	Dimensiones (mm)	Imagen
134	19.3 x 19.3	 <p>Figura 95 Prueba a 134 mm</p>
131	11.8 x 11.8	 <p>Figura 96 Prueba a 131 mm</p>
130	10 x 10	 <p>Figura 97 Prueba a 130mm</p>

129	8.5 x 8.5	 <p data-bbox="930 514 1234 541">Figura 98 Prueba a 129mm</p>
-----	-----------	---

Con los datos recopilados en la tabla anterior se observa que la distancia existente entre el proyector y el tanque de resina es de 130mm aproximadamente. Conocido esto se realizan más pruebas para comprobar la resolución de la impresión.

### Pruebas de resolución y tiempo de impresión

Para las primeras impresiones que se realizan se toma en cuenta los espesores que se asignen a la pieza en este caso en la Figura 4.15, se tiene cuadrados con distintos tipos de medidas y de espesores, y en La Figura 4.16 se tiene los cuadrados impresos. En la Tabla 4.6 y Tabla 4.7 se ilustran las mediciones de cada cuadrado y sus errores con respecto a las dimensiones establecidas en el 3D.

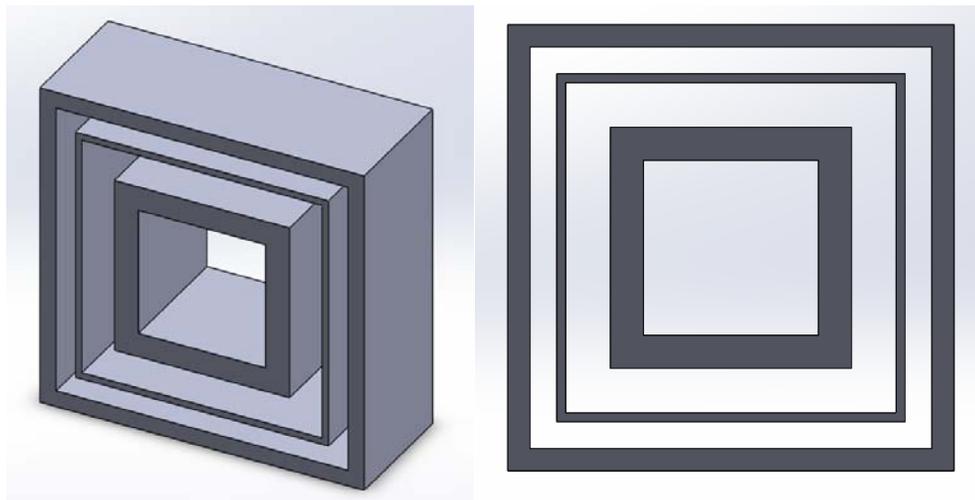


Figura 99 Prueba de Resolución 01

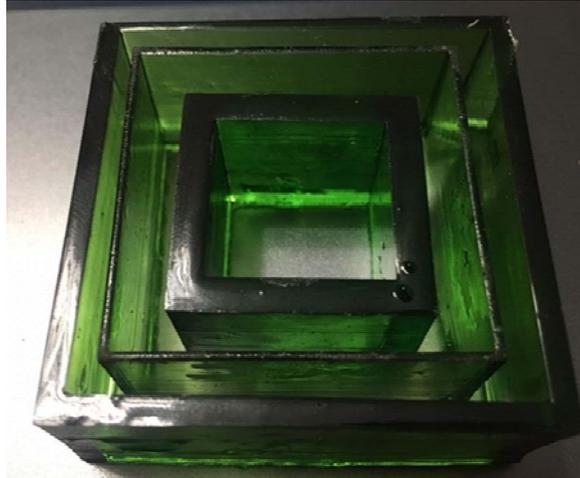


Figura 100 Prueba 01, Impresión

Tabla 46 Prueba 01, Dimensión exterior

Dimensión Exterior						
Cuadrado	Software	DLP	Error	Tolerancia	Estado	Tiempo
Exterior	50	50	0	0,1	ok	50 min
Medio	38,5	38,6	-0,1	0,1	ok	50 min
Interno	27	27	0	0,1	ok	50 min

Tabla 47 Prueba 01, Espesor

Espesor						
Cuadrado	Software	DLP	Error	Tolerancia	Estado	Tiempo
Exterior	3	3,1	-0,1	0,1	ok	50 min
Medio	1	1	0	0,1	ok	50 min
Interno	4	3,9	0,1	0,1	ok	50 min



Figura 101 Prueba de Resolución 02

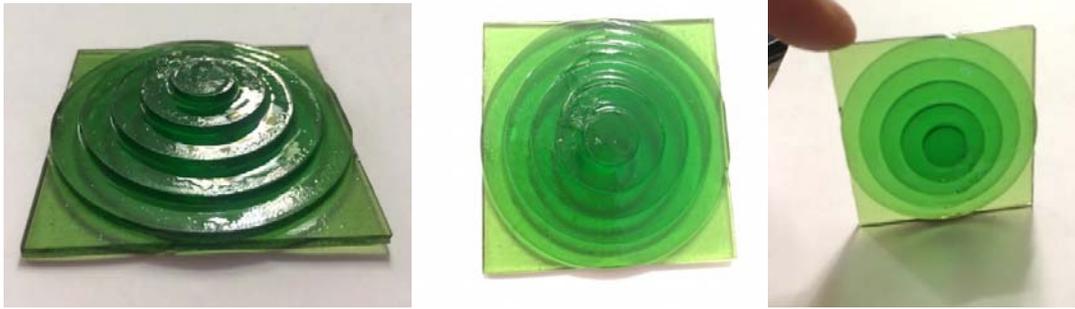


Figura 102 Prueba 02, Impresión

Tabla 48 Prueba 02, Diámetros Externos

Diámetros Externo						
Círculo	Software	DLP	Error	Tolerancia	Estado	Tiempo
1	50	50	0	0,1	ok	27 min
2	40	40	0	0,1	ok	27 min
3	30	30,1	-0,1	0,1	ok	27 min
4	20	20	0	0,1	ok	27 min
5	10	10,1	-0,1	0,1	ok	27 min

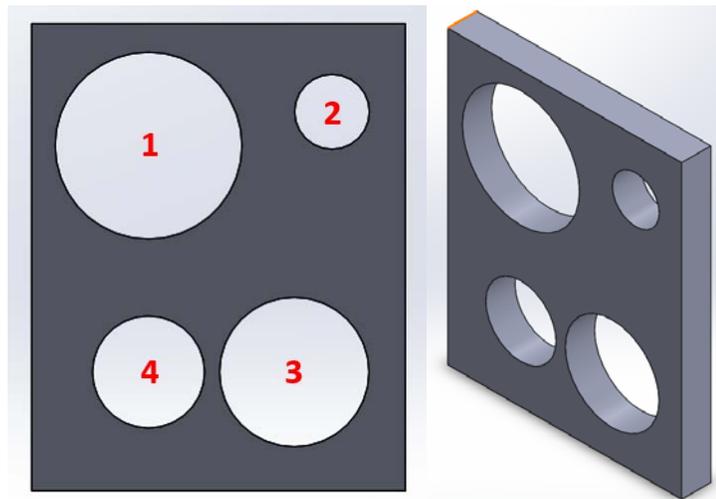


Figura 103 Prueba de Resolución 03



Figura 104 Prueba 03, Impresión

Tabla 49 Prueba 03, Diámetro interior

Diámetros Internos						
Círculo	Software	DLP	Error	Tolerancia	Estado	Tiempo
1	19,5	19,5	0	0,1	ok	13 min
2	6,5	6,5	0	0,1	ok	13 min
3	15,5	15,5	0	0,1	ok	13 min
4	11,5	11,6	-0,1	0,1	ok	13 min

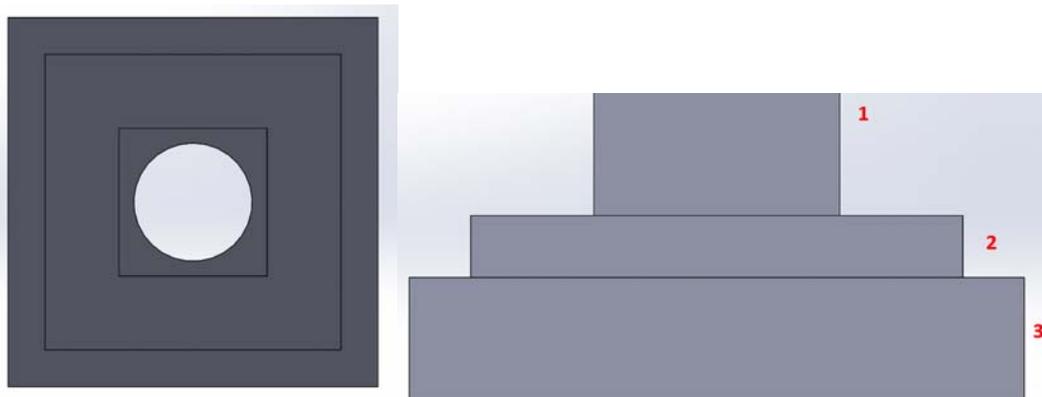


Figura 105 Prueba de Resolución 04

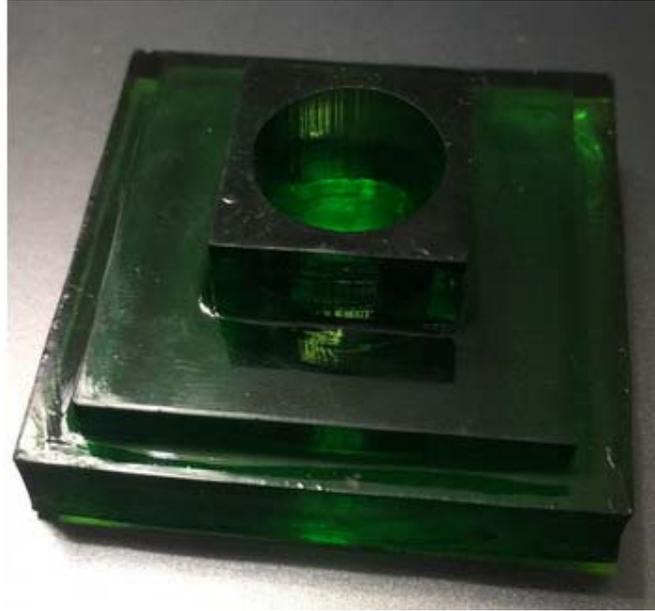


Figura 106 Prueba 04, Impresión

Tabla 50 Prueba 04, Altura

Altura						
Cuadrado	Software	DLP	Error	Tolerancia	Estado	Tiempo
1	9	9	0	0,1	ok	46 min
2	5	5	0	0,1	ok	46 min
3	10	9,7	0,3	0,1	no	46 min

Tabla 51 Prueba 04, Ancho

Ancho						
Cuadrado	Software	DLP	Error	Tolerancia	Estado	Tiempo
1	20	20,1	-0,1	0,1	ok	46 min
2	40	40	0	0,1	ok	46 min
3	50	50,1	-0,1	0,1	ok	46 min

En en ANEXO 9, se encuentran más ejemplares y figuras impresas.

## CONCLUSIONES

Se implementó un prototipo inicial para mostrar el funcionamiento de la impresión 3D con procesamiento digital de luz y se puede concluir que:

- La impresora puede llegar a imprimir piezas con una resolución de 100 micras.
- El tiempo de exposición al haz de luz en este prototipo debe ser mayor de 10 segundos, para que exista solidificación de la resina,
- El tiempo de impresión es mayor a impresoras similares por que el proyector utilizado tiene menor cantidad de lúmenes.
- El tipo de resina que se escogió, en este caso estándar, tiene un buen curado a un haz de luz de 405nm.
- La máquina diseñada no sobrepasa los 20Kg, el prototipo tiene un peso de 10Kg y es de fácil transporte.
- La calibración de la distancia entre el proyector y el espejo es fundamental y empieza con el cálculo de la distancia dependiendo de las especificaciones técnicas del proyector.
- Con la toma de medidas de las piezas impresas, con un total de 21 mediciones y con un fallo de 1 de ellas que no se encuentran dentro de la resolución planteada de 100 micras, se tiene que la impresora tiene una efectividad del 95,3%.

## RECOMENDACIONES

Estas recomendaciones se hacen con la finalidad de trabajos futuros.

- En el caso de que se requiera un área de impresión más grande y manteniendo la resolución se debe adquirir la impresora indicada o similares en sus especificaciones técnicas.
- Para tener un tiempo menor de impresión el proyector debe poseer mayor cantidad de lúmenes.
- Para incrementar la reflexión del haz de luz se recomienda que el espejo sea sometido a un evaporador térmico o por pulverización catódica.
- Para regular el desplazamiento de la plataforma y poder retirar la pieza, se podría programar en el HMI y no usar un Sumble de Control (Botón y potenciómetro integrado) como el que se usa en este prototipo.
- Cubrir todas las partes donde trabaje el haz de luz, de preferencia aislar dentro de una cámara todo este proceso.
- Unificar las redes de alimentación de la impresora y el proyector para tener un solo cable de red.
- Utilizar otro tipo de tanque de resina, ya que el tanque que se utiliza tiene una película muy delicada y al momento de limpiarlo se desgasta y esto perjudica la siguiente impresión que se realice, reduciendo la resolución o simplemente no imprimiendo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1]. M, Derré, Diseño impresora 3d DLP, Zaragoza, 2014.
- [2]. B9Creations, B9Creator v1.2, a powerful 3D that allows to print as creativity as they design.. 2018.
- [3]. Pavón, L. Cruz, W. Geovanny, Trabajo de Titulación: Diseño y Construcción de un equipo de impresión 3D con resina fotosensible UV para elaborar prototipos de piezas por medio del proceso DLP, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, Ecuador, 2015.
- [4]. J. Martínez, Trabajo de Titulación: Diseño de un sistema de fabricación aditiva y caracterización del proceso de fotocurado de resina mediante tecnología DLP, Zaragoza, 2013.
- [5]. Solidperfil3d.com. (2019). [En Línea] Disponible en at: <https://solidperfil3d.com/wp-content/uploads/2017/03/How-Mechanical-Properties-of-SLA-3D-Prints-Are-Affected-by-UV-Curing-redu.-ES.pdf>
- [6]. I. Valls, D. Pozo, Trabajo de Titulación: Impresora 3D de resina por estereolitografía, Universidad Politécnica de Catalunya, 2018
- [7]. Formlabs. Formlabs resin library, (2017). [En Línea] Disponible en at: <https://formlabs.com/materials/>.
- [8]. Ece.usu.edu. (2018). [En Línea] Disponible en at: [http://www.ece.usu.edu/ece\\_store/spec/DLPFLASH.pdf](http://www.ece.usu.edu/ece_store/spec/DLPFLASH.pdf)
- [9]. Raquo; (2018). *How to Use Creation Workshop V1.0.0.75 for DLP Printers*. [En Línea] Instructables.com. Disponible en at: <http://www.instructables.com/id/How-to-Use-Creation-Workshop-V10075-for-DLP-Printe/>
- [10]. Sony, P. (2018). *Sony Proyector portátil MP-CL1 de Sony*. [En Línea] Sony. Disponible en at: <https://www.sony.com.ec/electronics/proyector/mp-cl1>
- [11]. C, Saravia, En la arquitectura, es l impresión en 3D de la nueva normalidad, ArquiNoticias, 2012.
- [12]. W3.siemens.com. (2018). *PLC Control systems - Control systems - Siemens*. [En Línea] Disponible en at: <https://w3.siemens.com/mcms/industrial-automation-systems-simatic/en/plc-control-system/pages/default.aspx>
- [13]. F, Liou, Rapid Prototyping and Engineering Applications, Boca Ratón: Taylor y Francis group, 2007.

- [14]. Formlabs. (2018). *Form 2: Desktop Stereolithography (SLA) 3D Printer*. [En Línea] Disponible en at: <https://formlabs.com/3d-printers/form-2/>
- [15]. Eu.xyzprinting.com. (2018). *Nobel 1.0 | Impresora 3D SLA | Producto - XYZprinting | Modelos de impresoras 3D | Impresoras 3D domésticas | Impresoras 3D*. [En Línea] Disponible en at: [http://eu.xyzprinting.com/eu\\_es/Product/Nobel-1.0](http://eu.xyzprinting.com/eu_es/Product/Nobel-1.0)
- [16]. B9c.com. (2018). *B9Creator v1.2 | High-resolution 3D printer | B9Creations | B9Creations*. [En Línea] Disponible en at: <http://www.b9c.com/products/b9creator>
- [17]. Kudo3D Inc. (2018). *Titan 2 and Titan 2 HR - Kudo3D Inc.*. [En Línea] Disponible en at: <https://www.kudo3d.com/titan2-and-titan2-hr/>
- [18]. Ember.autodesk.com. (2018). *Precision Desktop 3D Printer | Autodesk - Ember*. [En Línea] Disponible en at: <https://ember.autodesk.com/>
- [19]. C. Riba, Diseño Concurrente, ETSEIB-UPC, 2002.
- [20]. Foro.metalaficion.com. (2018). *Introduccion al Diseño De Elementos De Maquinas*. [En Línea] Disponible en at: <http://www.foro.metalaficion.com/index.php?topic=20493.0>
- [21]. Edu.xunta.es. (2018). *4.2.- Sistemas de polea y correa.*. [En Línea] Disponible en at: [https://www.edu.xunta.es/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947673/contido/42\\_sistemas\\_de\\_polea\\_y\\_correa.html](https://www.edu.xunta.es/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947673/contido/42_sistemas_de_polea_y_correa.html)
- [22]. Directindustry.es. (2018). *Final de carrera enchufable / rectangular / láser / compacto - E3ZM-C - OMRON*. [En Línea] Disponible en at: <http://www.directindustry.es/prod/omron/product-15954-545764.html>
- [23]. ITR8102, S. (2019). *Sensor óptico de herradura ITR8102 - Tostatronic*. [En Línea] Tostatronic. Disponible en at: <https://tostatronic.com/store/optoelectronica/680-fotosensor-de-barrera-sensor-de-herradu.html>
- [24]. Python.org. (2018). *Welcome to Python.org*. [En Línea] Disponible en at: <https://www.python.org/>
- [25]. Arduino.cc. (2019). *Arduino - Home*. [En Línea] Disponible en at: <https://www.arduino.cc/>
- [26]. Reprap.org. (2016). *RAMPS 1.4 - RepRap*. [En Línea] Disponible en at: [https://reprap.org/wiki/RAMPS\\_1.4](https://reprap.org/wiki/RAMPS_1.4)

- [27]. Raquo; (2018). *How to Use Creation Workshop V1.0.0.75 for DLP Printers*. [En Línea] Instructables.com. Disponible en at: <http://www.instructables.com/id/How-to-Use-Creation-Workshop-V10075-for-DLP-Printe/>
- [28]. Sony, P. (2018). *Sony Proyector portátil MP-CL1 de Sony*. [En Línea] Sony. Disponible en at: <https://www.sony.com.ec/electronics/proyector/mp-cl1>
- [29]. Bhphotovideo.com. (2019). BenQ TH671ST Full HD DLP Home Theater Projector. [En Línea] Disponible en at: [https://www.bhphotovideo.com/c/product/1368370-REG/benq\\_th671st\\_1080p\\_3000lm\\_projector.html](https://www.bhphotovideo.com/c/product/1368370-REG/benq_th671st_1080p_3000lm_projector.html)
- [30]. C. Riba, Diseño concurrente, ETSEIB-UPC, 2002.
- [31]. E. Gómez, Guía Básica de Conceptos de óptica Geométrica, V2.0. Universidad de Sevilla. Julio 2006.
- [32]. M. Peterson. (2009). How to calculate image resolution, VP Advanced Technology. [En Línea] Disponible en at: [https://static1.squarespace.com/static/551ecf1ae4b0b101cf72bfa3/t/55412684e4b0512f43caa5de/1430333060072/Resolution\\_calculation.pdf](https://static1.squarespace.com/static/551ecf1ae4b0b101cf72bfa3/t/55412684e4b0512f43caa5de/1430333060072/Resolution_calculation.pdf)
- [33]. Resolución de proyectores | Nativa vs Máxima", *Proyecta Gato - Encuentra el proyector ideal al mejor precio*, 2019. [En Línea]. Disponible en: <https://www.proyectagato.com/caracteristicas-proyector/tipos-de-resolucion/>.
- [34]. "Factors of Safety", *Engineeringtoolbox.com*, 2019. [En Línea]. Disponible en: [https://www.engineeringtoolbox.com/factors-safety-fos-d\\_1624.html](https://www.engineeringtoolbox.com/factors-safety-fos-d_1624.html).
- [35]. CONTI, HUSILLOS TRAPEZOIDALES, 2019. [En Línea]. Disponible en: <http://www.contigroup.it/Catalogo/Catalogo-ES.pdf>.
- [36]. FAG, "Rodamientos FAG", *Ingemecanica*, 2019. [En Línea]. Disponible en: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/figutut214/FAG.pdf>.
- [37]. NBS. "Sistema de guiado lineal Catálogo Técnico General". (24;89) 2012. [En Línea]. Disponible en: <https://www.eurobearings.es/wp-content/uploads/2019/02/Cat%C3%A1logo-ISBN-NBS-Sistemas-Lineales.pdf>
- [38]. G. Perez. "Manual Rodamiento, recopilación de datos". 2016. [En Línea]. Disponible en: <https://www.slideshare.net/gerardostuardoperez/manual-de-rodamientos>.
- [39]. J. K. N. Richard G. Budynas, "Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley", México D. F.: McGraw-Hill Interamericana, Octava, Ed. 2008.

- [40]. AMETEK. "MAE Stepper Motors, Product Catalog". 2012. [En Línea]. Disponible en: <https://logismarketes.cdnwm.com/ip/elmeq-motor-motores-paso-a-paso-catalogo-de-motores-paso-a-paso-mae-ametek-795548.pdf>
- [41]. R. L. Mott, Diseño de Elementos de Máquinas, México D. F.: University of Dayton, Pearson Educación, Cuarta, Ed. 2006
- [42]. "Plancha de aluminio Liso", *DISMETAL*, 2019. [En Línea]. Disponible en: <https://dismetal.ec/productos/planchas/aluminio-liso>.
- [43]. C. Arduino, "CNC Shield para Arduino", *Rambal.com*, 2019. [En Línea]. Disponible en: <https://rambal.com/shields-arduino/20-cnc-shield-para-arduino.html>.
- [44]. J. Gómez Pindado, "Diseño e implementación del control de motor paso mediante dispositivos embebidos", *UNIVERSIDAD DE VALLADOLID ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES*, 2018. [En Línea]. Disponible en: <http://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/32887/TFG-I-1007.pdf;sequence=1>.
- [45]. BricoGeek, "Motor paso a paso 3.2 kg/cm, Nema 23", 2019. [En Línea]. Disponible en: <https://tienda.bricogeek.com/motores-paso-a-paso/546-motor-paso-a-paso-nema-17-32kg-cm.html>.
- [46]. "Sensor óptico de herradura ITR8102 - Tostatronic", *Tostatronic*, 2019. [En Línea]. Disponible en: <https://tostatronic.com/store/optoelectronica/680-fotosensor-de-barrera-sensor-de-herradu.html>.
- [47]. "Datasheet", *Everlight*, 2019. [En Línea]. Disponible en: <http://www.everlight.com/file/ProductFile/ITR8102.pdf>.
- [48]. Datsheet. "Fuente de poder dual switching 12V (3A) y 5V (4A)", 2015. [En Línea]. Disponible en: [https://www.mcielectronics.cl/website\\_MCI/static/documents/Datasheet\\_D-60A.pdf](https://www.mcielectronics.cl/website_MCI/static/documents/Datasheet_D-60A.pdf)
- [49]. "Lector de Memoria Arduino", *Arduino*, 2019. [En Línea]. Disponible: <https://www.tarjetasdememoria.info/guia-tarjeta-memoria-micro-sd-arduino/>
- [50]. "HDMI Shield", *Arduino*, 2019. [En Línea]. Disponible: [https://github.com/techtoys/HDMI-Shield/tree/master/Ra8876\\_Lite](https://github.com/techtoys/HDMI-Shield/tree/master/Ra8876_Lite)
- [51]. "Nextion NX8048T070- Generic 7.0' HMI TFT LCD Touch Display", *ITEAD.CC*, 2019. [En Línea]. Disponible: <https://www.itead.cc/nextion-nx8048t070.html>

- [52]. "EX3240 SVGA 3LCD Projector", *EPSON*, 2019. [En Línea]. Disponible: <https://epson.com/For-Work/Projectors/Portable/EX3240-SVGA-3LCD-Projector/p/V11H719020>
- [53]. Canteli, J., Cantero, J. and González, I. 2017. Metrología. Sistema y técnicas de medida para el control de calidad. [En Línea] Universidad Carlos III de Madrid. Disponible en: <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/sistemas-de-produccion-y-fabricacion/material-de-clase-1/tema-6>