



## Proyecto Fin de Carrera

DISEÑO DE SISTEMA DE FABRICACIÓN ADITIVA Y  
CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE FOTOCURADO DE  
RESINA MEDIANTE TECNOLOGÍA DLP

Autor

José Juan Vicente Martínez

Director y ponente

María Esther Cascarosa Salillas

Jorge Santolaria Mazo

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

2013



---

# DISEÑO DE SISTEMA DE FABRICACIÓN ADITIVA Y CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE FOTOCURADO DE RESINA MEDIANTE TECNOLOGÍA DLP

---

## RESUMEN

El proyecto consistirá en el diseño de la función de curado de una máquina de fabricación aditiva basada en tecnología DLP (Digital Light Processing). Para ello se hará un estudio de los elementos que intervienen en dicha función: resinas, fotoiniciadores, fuentes de luz y superficies de cama.

El estudio constará del análisis de los elementos, diseño de experimentos, experimentos, interpretación de los resultados obtenidos y selección de los elementos más adecuados. Se completará con el prediseño de una impresora 3D, lo que implicará a su vez el prediseño de los componentes mecánicos y eléctricos relacionados con los experimentos realizados.

### -Análisis de los elementos:

Se buscará una serie de candidatos según las características deseadas para el funcionamiento de la máquina. Finalmente, se elaborará una lista de todos los candidatos para cada uno de los elementos. Se recopilarán las características básicas de cada uno de ellos y se justificará su elección según propiedades. Los elementos a analizar son resinas, fotoiniciadores, fuentes de luz y superficies de cama.

### - Diseño de experimentos:

El objetivo es conocer mejor el comportamiento de los distintos elementos y hacer una primera selección entre los candidatos. Teniendo en cuenta estos objetivos se diseñarán los distintos experimentos.

### -Experimentos:

Realización de los experimentos diseñados y toma de resultados para su posterior tratamiento, análisis e interpretación. Esta fase ayudará a familiarizarse con el futuro funcionamiento que tendrá el prediseño final.

### -Interpretación de resultados:

Con los datos obtenidos en los experimentos se analizarán y se interpretarán para conocer la influencia de las variables en el prediseño de la máquina.

### -Selección:

Con los datos y su interpretación se seleccionarán los candidatos finales a incluir en el prediseño, justificando su elección en los datos obtenidos.

-Prediseño:

Se prediseñará una impresora con tecnología DLP, consistente en una fuente de luz activada mediante máscara proyectada desde la parte inferior a una cama translúcida que albergará la resina en la que se producirá capa por capa la pieza soportada por una bandeja con movimiento ascendente.

---

# ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.2. ESTRUCTURA DE ESTE PROYECTO .....	1
1.2. PASOS SEGUIDOS EN LA REALIZACIÓN DE ESTE PROYECTO. ....	2
2. FUNDAMENTOS .....	3
2.1. FABRICACIÓN ADITIVA .....	3
2.2. PROTOTIPADO RAPIDO .....	6
2.3. TECNOLOGÍA DLP .....	7
3. ELEMENTOS DEL SISTEMA.....	9
3.1. CAMA .....	9
3.1.1. Depósito de material.....	9
3.1.2. Superficie transparente .....	9
3.1.3. Superficie antiadherente. ....	10
3.1.4. Tilt. ....	11
3.2. PROTECCIÓN ULTRAVIOLETA.....	11
3.3. PROYECTOR DLP.....	12
3.3.1 Distancia de enfoque. ....	13
3.3.2 Definición de la imagen.....	13
3.3.3 Espectro electromagnético.....	13
4. RESINAS Y FOTOINICIADORES .....	17
4.1. POLIMERIZACIÓN .....	17
4.2. RESINAS .....	19
4.2.1. Selección de resinas.....	20
4.3. FOTOINICIADORES .....	20
4.3.1. Selección de fotoiniciadores.....	21
4.3.2. Funcionamiento del fotoiniciador.....	21
4.3.3. Seguridad. ....	23
4.4. COLORANTES.....	23
5. EXPERIMENTOS .....	25
5.1. EXPERIMENTO 1.....	25
5.2. EXPERIMENTO 2.....	25
5.3. EXPERIMENTO 3.....	26
5.4. EXPERIMENTO 4.....	27
5.5. EXPERIMENTO 5.....	28
6. PREDISEÑO .....	31

6.1. ESTRUCTURA.....	31
6.2. CAMA .....	32
6.3. COLUMNA.....	33
7. ANÁLISIS ECONÓMICO.....	35
7.1. ANÁLISIS DE LAS MEZCLAS. ....	35
7.2. PRECIO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA. ....	36
8. CONCLUSIONES FINALES .....	37
8.1. CONCLUSIONES.....	37
8.2. LÍNEAS FUTURAS.....	38
BIBLIOGRAFÍA .....	41
ANEXO A. Hojas técnicas de los elementos de la impresora.....	45
ANEXO B. Hojas técnicas de las resinas y fotoiniciadores .....	67
ANEXO C. Montaje, preparación y procedimiento de los experimentos. ....	81
ANEXO D. Modificación del utilaje.....	87
ANEXO E. Experimento 1.....	89
ANEXO F. Experimento 2 .....	91
ANEXO G. Experimento 3.....	99
ANEXO H. Experimento 4.....	107
ANEXO I. Experimento 5 .....	117
ANEXO J. Planos del prediseño.....	135

---

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

<b>Figura 2.1.- Diferencia sustracción y adición .....</b>	3
<b>Figura 2.2.- Pieza de forma complicada .....</b>	4
<b>Figura 2.3.-Protección de muñeca fabricada mediante impresión 3D .....</b>	4
<b>Figura 2.4.-Detalle transformación de CAD a STL.....</b>	5
<b>Figura 2.5.-Fotografía del sistema SLA-1 .....</b>	6
<b>Figura 2.6.-Detalle de los cristales de un chip DMD.....</b>	7
<b>Figura 2.7.-Esquema de un sistema DLP con rueda de color .....</b>	7
<b>Figura 2.8.-Esquema de un sistema DLP de tres chips .....</b>	7
<b>Figura 3.1.-Trasnmitancia de vidrio de sosa y cal, y de vidrio común .....</b>	9
<b>Figura 3.2.-Efecto de la capilaridad entre capas .....</b>	11
<b>Figura 3.3.-Modelos de impresora 3D, B9 creator y Veloso 3D.....</b>	12
<b>Figura 3.4.-Modelos de proyector acer x1311kw (izqda.) y asus P1M (drcha.) .....</b>	12
<b>Figura 3.5.-Espectro electromagnético .....</b>	14
<b>Figura 3.6.-Espectros de emisión de diferentes lámparas.....</b>	14
<b>Figura 3.7.-Espectros de emisión de distintas fuentes de luz .....</b>	15
<b>Figura 3.8.-Esquema detallado del interior de un proyector DLP .....</b>	15
<b>Figura 4.1.- Fotografía de diapositiva de una estrella.....</b>	17
<b>Figura 4.2.-Curación de una pieza con forma de estrella .....</b>	18
<b>Figura 4.3.-Pieza curada con forma de estrella .....</b>	18
<b>Figura 4.4.-Espectro de absorción de fotoiniciadores de la industria dental .....</b>	21
<b>Figura 4.5.-Espectro de absorción de H-NU 147 LT .....</b>	22
<b>Figura 4.6.-Espectro de absorción de N-NU 400 IL a concentración del 1% y 10% .....</b>	22
<b>Figura 6.1.-Trimetrico del prediseño .....</b>	31
<b>Figura 6.2.- Estructura del sistema de fabricación aditiva .....</b>	32
<b>Figura 6.3.- Cama del sistema de fabricación aditiva.....</b>	33
<b>Figura 6.4.- Columna del sistema de fabricación aditiva .....</b>	34
<b>Figura C.1.-Herramientas utilizadas en los experimentos. ....</b>	81
<b>Figura C.2.-Pasos en la elaboración de la minicuba. ....</b>	83
<b>Figura C.3.-Fotografía del utilaje .....</b>	84
<b>Figura D.1.-Comparación de las minicubas, primera versión y su modificación.....</b>	87
<b>Figura E.1.-Estado de la jeringuilla tras su exposición a la luz .....</b>	89
<b>Figura E.2.-Primera pieza obtenida. ....</b>	90
<b>Figura F.1.-Muestra BAPO RI, 30 segundos. ....</b>	91
<b>Figura F.2.-Muestra BAPO RII, 30 segundos. ....</b>	92
<b>Figura F.3.-Muestra BAPO RIII, 30 segundos. ....</b>	93
<b>Figura F.4.-Muestra HNU 170 IL RI, 30 segundos. ....</b>	93
<b>Figura F.5.-Muestra HNU 170 IL RII, 30 segundos. ....</b>	94
<b>Figura F.6.-Muestra HNU 170 IL RIII, 30 segundos. ....</b>	95
<b>Figura F.7.-Muestra HNU 170 LT RI, 30 segundos. ....</b>	96
<b>Figura F.8.-Muestra HNU 170 LT RII, 30 segundos. ....</b>	96
<b>Figura F.9.-Muestra HNU 170 LT RIII, 30 segundos. ....</b>	97
<b>Figura F.10.-Fotografía muestras experimento 2. ....</b>	98
<b>Figura G.1.-Muestra BAPO RI, 8 segundos. ....</b>	100
<b>Figura G.2.-Muestra BAPO RII, 8 segundos. ....</b>	101
<b>Figura G.3.-Muestra BAPO RII, 8 segundos. ....</b>	101
<b>Figura G.4.-Muestra HNU 470 IL RI, 8 segundos. ....</b>	102
<b>Figura G.5.-Muestra HNU470 IL RII, 8 segundos. ....</b>	103

<b>Figura G.6.-Muestra HNU470 LT RI, 8 segundos.</b> .....	104
<b>Figura G.7.-Muestra HNU470 LT RII, 8 segundos.</b> .....	104
<b>Figura G.8.-Muestra HNU470 LT RIII, 8 segundos.</b> .....	105
<b>Figura G.9.-Muestra experimento 3.</b> .....	106
<b>Figura H.1.-Muestra BAPO RI 2%, curado con luz visible.</b> .....	108
<b>Figura H.2.-Curva espesor-tiempo BAPO RI 2%, curado con luz visible.</b> .....	109
<b>Figura H.3.-Muestra BAPO RII 2%, curado con luz visible.</b> .....	110
<b>Figura H.4.-Muestra BAPO RII 5%, curado con luz visible.</b> .....	111
<b>Figura H.5.-Muestra BAPO RII 8%, curado con luz visible.</b> .....	112
<b>Figura H.6.-Curvas espesor-tiempo BAPO RII. Curadas con luz visible.</b> .....	113
<b>Figura H.7.-Muestra HNU470 IL RII 2%, curado con luz visible.</b> .....	114
<b>Figura H.8.-Muestra HNU470 IL RII 5%, curado con luz visible.</b> .....	114
<b>Figura H.9.-Muestra HNU470 IL RII 8%, curado con luz visible.</b> .....	115
<b>Figura H.10.-Curvas espesor-tiempo HNU 470ILL RII, curadas con luz visible.</b> .....	116
<b>Figura I.1.-Carcasa exterior con el filtro ultravioleta de la lámpara.</b> .....	119
<b>Figura I.2.-Utilaje para curación con ultravioleta</b> .....	120
<b>Figura I.3.-Caja exterior para el utilaje con radiación ultravioleta.</b> .....	120
<b>Figura I.4.- Muestra BAPO RI 2%. Curada con UV.</b> .....	121
<b>Figura I.5.-Curva espesor-tiempo de BAPO RI 2% curada con UV.</b> .....	122
<b>Figura I.6.-Compracion curvas espesor-tiempo de BAPO RI 2%.</b> .....	122
<b>Figura I.7.-Muestra BAPO RII 2% curada con UV</b> .....	123
<b>Figura I.8.-Comparación curvas BAPO RII 2%.</b> .....	124
<b>Figura I.9.-Muestra BAPO RII 5% curada con UV</b> .....	125
<b>Figura I.10.-Curva espesor-tiempo BAPO RII 5% curada con UV.</b> .....	125
<b>Figura I.11.-Comparaciónn curvas BAPO RII 5%.</b> .....	126
<b>Figura I.12.Muestra BAPO RII 8% curada con UV.</b> .....	126
<b>Figura I.13.-Curva espesor-tiempo BAPO RII 8% curada con UV.</b> .....	127
<b>Figura I.14.-Comparación curvas espesor.tiempo BAPO RII 8%.</b> .....	127
<b>Figura I.15.-Curvas BAPO RII curadas con UV.</b> .....	128
<b>Figura I.16.-Muestra HNU 470 IL RII 2% curada con UV.</b> .....	129
<b>Figura I.18.-Muestra HNU470 L RII 5% curada con UV.</b> .....	129
<b>Figura I.19.-Curva espesor-tiempo HNU470 IL RII 5% curada con UV.</b> .....	130
<b>Figura I.20.- Comparación curvas espesor-tiempo HNU470 IL RII 5%.</b> .....	131
<b>Figura I.21.-Muestra HNU470 IL RII 8% curada con UV.</b> .....	132
<b>Figura I.22.-Curva espesor-tiempo HNU470 IL RII 8% curada con UV.</b> .....	133
<b>Figura I.23.- Comparación curvas espesor-tiempo HNU470 IL RII 8%.</b> .....	133
<b>Figura I.24.-Curvas HANU470 IL RII curadas con UV.</b> .....	134

---

# ÍNDICE DE TABLAS

---

<b>Tabla 2.1.</b> -Métodos de fabricación por adición según el tipo de lecho.....	6
<b>Tabla 3.1.-</b> Propiedades ópticas del teflón. ....	10
<b>Tabla 5.1.-</b> Concentración de mezcla experimento 1. ....	25
<b>Tabla 5.2.-</b> Concentraciones de mezcla experimento 2. ....	26
<b>Tabla 5.3.-</b> Concentraciones de mezcla experimento 3. ....	27
<b>Tabla 7.1.-</b> Precio de resinas, fotoiniciadores y colorantes. ....	35
<b>Tabla 7.2.-</b> Densidades de las resinas. ....	35
<b>Tabla 7.3.-</b> Precio de las mezclas empleadas en el proyecto. ....	35
<b>Tabla 7.4.-</b> Precio de resinas fotocurables. ....	36
<b>Tabla 7.5.-</b> Precio de elementos del sistema. ....	36
<b>Tabla F.1.-</b> Datos experimento 2. ....	98
<b>Tabla G.1.-</b> Datos experimento 3. ....	105
<b>Tabla H.1.-</b> Datos BAPO RI con luz visible. ....	116
<b>Tabla H.2.-</b> Datos BAPO RII con luz visible. ....	116
<b>Tabla H.3.-</b> Datos HNU470 IL RII con luz visible. ....	116
<b>Tabla I.3.-</b> Datos BAPO RI con UV. ....	134
<b>Tabla I.2.-</b> Datos BAPO RII con UV. ....	134
<b>Tabla I.3.-</b> Datos HNU 470 IL RII con UV. ....	134



# **MEMORIA**



---

# **1.INTRODUCCIÓN**

---

## **1.1. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS.**

La realización de este proyecto viene dada por la creciente necesidad de producir prototipos de manera más fiel y rápida, además de poder producir estos a un precio más bajo. El precio también es un factor importante en los sistemas de prototipado rápido, los cuales tienen un coste alto en la actualidad. Otro factor importante en este tipo de sistemas es la calidad de las piezas fabricadas, este factor está estrechamente ligado con el precio, ya que a mayor calidad el precio aumenta considerablemente.

Por otra parte se encuentra la creciente popularidad que han alcanzado un tipo de sistema de fabricación aditiva, las impresoras 3D, apareciendo numerosas versiones y numerosos grupos que se dedican a su desarrollo de forma gratuita o con el fin de un beneficio económico. Algunos de estos novedosos sistemas se comercializan a precios poco elevados, entorno a los 500€, lo que choca profundamente con los sistemas de fabricación aditiva industriales los cuales llegan a costar decenas de miles de euros. Para la comercialización de las impresoras 3D se utilizan nuevos sistemas de ventas y financiación como el *crowdfunding*, lo cual ha ayudado al aumento de su popularidad.

El objetivo de este proyecto es obtener los datos y conocimientos básicos para producir un prediseño de un sistema de fabricación aditiva basada en tecnología DLP. Para ello se analizará el funcionamiento de este tipo de sistemas y de la tecnología DLP, se estudiarán los elementos necesarios en los cuales se basan estos sistemas, y se realizarán las pruebas necesarias para comprender en mayor medida los sistemas de fabricación aditiva, y los factores que tienen influencia en su comportamiento. Con estos análisis se pretende dar las pautas básicas y necesarias, para un futuro diseño más completo de un sistema de fabricación aditiva, que pueda ya no solo fabricarse, sino también plantearse su comercialización.

## **1.2. ESTRUCTURA DE ESTE PROYECTO**

La memoria del proyecto comenzará con una breve explicación de la tecnología en la que está basado, de los sistemas de prototipado rápido y de fabricación por adición.

Seguidamente se explicarán los elementos que serán analizados y de los que se buscarán y seleccionarán candidatos para su estudio y para un prediseño.

A continuación se describirán los experimentos realizados y los resultados que se han obtenido con ellos, estos experimentos se fueron diseñando y planificando según se obtenía información de los realizados anteriormente.

Con los experimentos realizados se hará un prediseño del bloque mecánico con los resultados obtenidos.

## 1. Introducción

Finalmente se extraerán las conclusiones pertinentes y se dejarán indicaciones para posteriores diseños y mejoras.

Adjunto a la memoria están la bibliografía utilizada y los anexos, donde se podrá encontrar toda la documentación que no está contemplada en la memoria y que puede ser necesaria para su comprensión.

## 1.2. PASOS SEGUIDOS EN LA REALIZACIÓN DE ESTE PROYECTO.

El primer paso en la realización del proyecto fue buscar toda la información necesaria para familiarizarse con los sistemas de fabricación aditiva, cómo funcionan, qué son, para qué sirven. Una vez que se habían obtenido los conocimientos necesarios había que profundizar en la tecnología DLP, siguiendo el mismo procedimiento, buscar toda la información necesaria.

Seguidamente se identificaron los elementos a analizar siguiendo las indicaciones del tutor, y se procedió a buscar soluciones e idear experimentos para que puedan realizarse una buena selección.

Por último se prediseñó un sistema de fabricación aditiva que se espera que permita servir como guía para un futuro diseño más completo.

## 2. FUNDAMENTOS

### 2.1. FABRICACIÓN ADITIVA

La fabricación aditiva consiste en la superposición de capas de material de pequeño espesor, del orden de micras, hasta conseguir un objeto deseado. Este tipo de tecnología ha proliferado en la última década, debido a las grandes ventajas que supone y a la evolución de nuevas tecnologías que han hecho posible su mejora.

La fabricación aditiva surge a finales del siglo XX gracias a las tecnologías digitales como los programas de diseño asistido por ordenador (CAD). El método de fabricación de piezas cambió de la conformación y sustracción de material, a la adición, esto supone una ventaja en el ahorro de costes. Se puede comprobar las diferencias entre sustracción y adición de capas en la siguiente imagen:



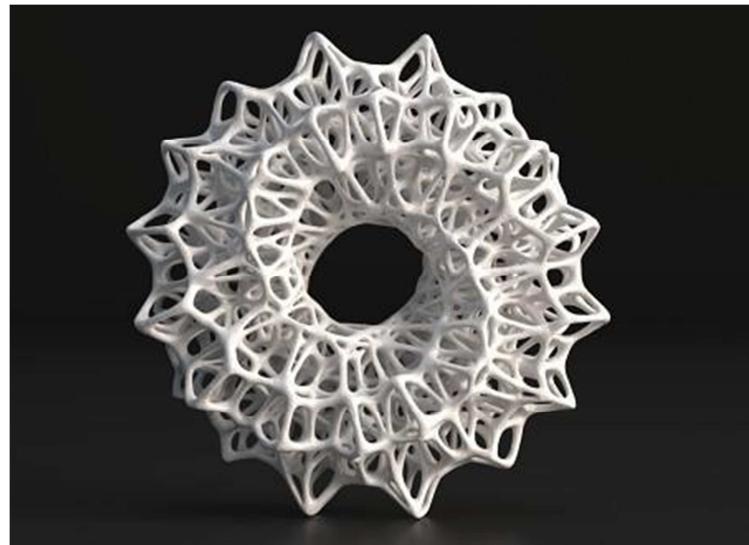
Figura 2.1.- Diferencia sustracción y adición

En los últimos años gracias a los avances en la electrónica y en el procesamiento de datos se ha conseguido un abaratamiento de las máquinas de fabricación aditiva, y su uso ha pasado de estar presente únicamente en el prototipado rápido a pasar a ser un medio de fabricación para piezas funcionales.

Las ventajas de esta forma de fabricación respecto a las otras son:

- La complejidad geométrica permite fabricar sin problemas objetos con elementos geométricos complejos como vacíos interiores, espesores variables, canales internos y formas irregulares. En otras tecnologías se encarece enormemente el precio y el tiempo de fabricación, sin embargo en la fabricación aditiva no hay aumento ni de precio ni de tiempo, cuando se producen dichas formas. Es muy común el uso de la fabricación aditiva para la imitación de formas que aparecen en la naturaleza como puede observarse en la siguiente imagen:

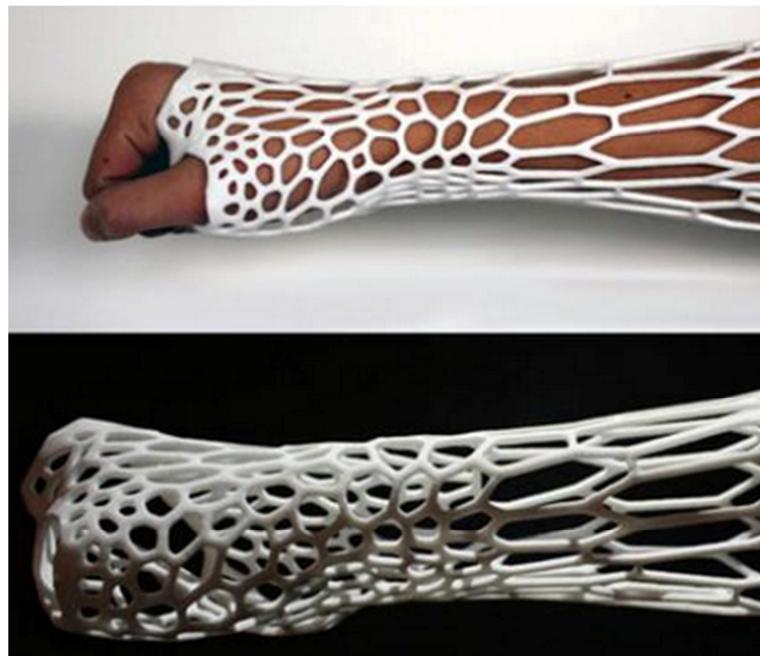
## 2. Fundamentos



**Figura 2.2.- Pieza de forma complicada.**

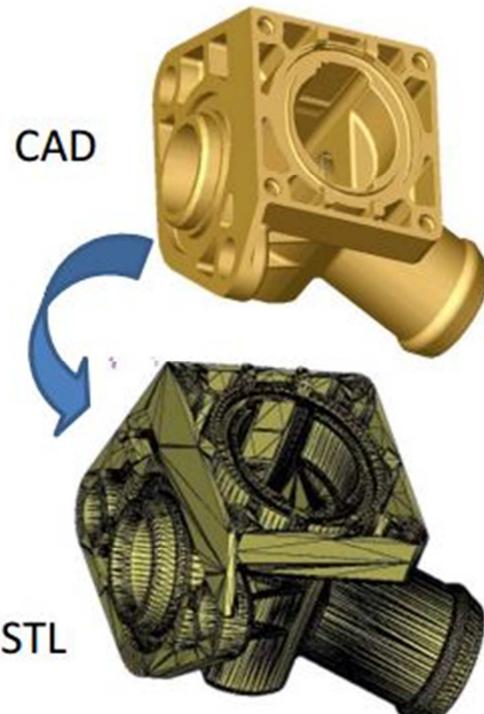
También es posible conseguir la inclusión de mecanismos móviles en las piezas, por ejemplo, se puede construir sistemas complejos de engranajes, sin necesidad de tener que fabricar uno a uno cada engranaje y montarlos posteriormente.

- Fabricación de productos muy diferenciados, ya que se pueden fabricar productos individuales o de baja tirada sin un aumento del precio. Esto permite una alta personalización en los productos fabricados, unido a la posibilidad de crear objetos con geometrías difíciles permite la creación de objetos que se adapten perfectamente, por ejemplo, a la anatomía humana, por lo que se alcanza un alto grado de ergonomía y de personalización.



**Figura 2.3.-Protección de muñeca fabricada mediante impresión 3D.**

- Bajos tiempos de fabricación para prototipos y nuevos productos, esto es posible debido a la reducción del *time to market*, en las fases de diseño, fiabilidad, ingenierización, estudio de la calidad y prototipado.
- Reducción de la cadena logística a una sola máquina, esta ventaja es muy importante cuando las piezas son complejas y necesitan de una maquina diferente para cada proceso.
- Facilidad en la fabricación, muchas de estas máquinas como las impresoras 3D, no requieren de un alto grado de formación para su uso, pudiendo ser utilizadas por cualquier usuario, debido a su simplicidad, ya que un software que procesa los planos en distintos formatos hace todo el trabajo. En la siguiente imagen se puede ver gráficamente una de las conversiones que realiza el software de un modelo CAD a un modelo STL.



**Figura 2.4.-Detalle transformación de CAD a STL.**

- La posibilidad de crear un nuevo mercado basado en activos lógicos como el software, consiguiendo de esta manera mayor flexibilidad.
- Reducción de materiales de desecho, ya que el aprovechamiento en de materia prima en este tipo de máquinas es máximo.

Las principales desventajas de esta tecnología son:

- La disponibilidad y precio de los materiales, ya que actualmente hay un mercado muy reducido de vendedores y los precios son muy caros.
- La velocidad de fabricación, la cual imposibilita la creación de lotes grandes. Aunque es posible fabricar a más velocidad, ésta modifica la calidad superficial de los productos finales.
- Límite de tamaño, esta tecnología está limitada por dimensión de las máquinas, las cuales solo pueden producir hasta un volumen máximo.
- El coste de las máquinas, al ser una tecnología poco usada la demanda es baja y por lo tanto los precios son altos.

## 2. Fundamentos

- Desconocimiento de la técnica, ya que la mayoría de los diseñadores son instruidos solamente en los procesos convencionales, dejando muchas veces de lado esta tecnología.

De cara al futuro la perspectiva es buena, ya que muchas de estas desventajas se esperan corregir debido a la creciente fama que están adquiriendo las impresoras 3D.

Existen numerosas metodologías de fabricación por adición, las más destacables, clasificándolas según los materiales de fabricación pueden observarse en la siguiente tabla:

Lecho en polvos	Lecho Liquido	Lecho sólido
<ul style="list-style-type: none"><li>- Selective Laser Sintering (SLS)</li><li>- Selective Mask Sintering (SMS)</li><li>- Selective Laser Melting (SLM)</li><li>- Electron Beam Melting (EBM)</li><li>- 3DPrinters (3DP)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Stereolithography (SLA)</li><li>- Direct Light Processing (DLP)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Laminated Object Manufacturing (LOM)</li><li>- Fused Deposition Modelling (FDM)</li></ul>

Tabla 2.1. Métodos de fabricación por adición según el tipo de lecho.

## 2.2. PROTOTIPADO RAPIDO

El prototipado rápido es una tecnología, dentro de la fabricación aditiva, que permite la reproducción precisa y rápida de modelos y prototipos a partir de un modelo en 3D, generalmente un archivo STL, realizado por un programa CAD.

El primer sistemas de prototipado rápido estaba basado en la estereolitografía, que fue desarrollado por la empresa estadounidense *3D Systems* en 1986, ésta desarrollo el sistema SLA-1, el cual puede observarse en la figura 2.5. Este sistema evolucionaria en el diseño de la primera máquina de prototipado rápido comercializada, adquiriendo el mismo nombre que el sistema, SLA-1. Más tarde en 1988 y 1989 las empresas japonesas *NTT* y *Sony/DMEC*, y la alemana *Electro Optical Systems* en 1990, lanzaron sus propias versiones de la máquina de prototipado rápido. En los años posteriores se desarrollaron otras tecnologías de fabricación por adición y se aplicaron principalmente al prototipado rápido.



Figura 2.5.-Fotografía del sistema SLA-1.

Estas máquinas pueden fabricar modelos perfectamente iguales a lo que se ha diseñado. Por ello las principales aplicaciones del prototipado rápido son:

- La obtención rápida de un prototipo, disminuyendo tiempo de fabricación al evitar el uso de sistemas comunes de fabricación.

- La disminución del coste de fabricación de los prototipos al sustituir varios procesos por uno solo.
- Estudiar la estética del producto para comprobar su aceptación en el mercado.
- Realización de pruebas funcionales, montaje e interferencias.
- Análisis geométrico, donde incluso se pueden comenzar las pruebas de homologación.
- Como herramienta visual para la comunicación.

Actualmente sus áreas de aplicación son cualquier tipo de industrial, debido a su funcionalidad, aunque donde más se ha expandido es en la automoción, aeronáutica, medicina y paleontología.

## 2.3. TECNOLOGÍA DLP

La tecnología DLP (Digital Light Processing) fue desarrollada por la compañía Texas Instruments a finales del siglo XX, gracias a la labor del Dr. Larry Hornbeck, quien desarrolló el chip DMD (Digital Micromirror Device) en 1987 tras 10 años de estudios sobre la reflexión de la luz.

Lo más importante de un sistema DLP es el funcionamiento del chip DMD, compuesto por una matriz encima de la cual hay miles de microespejos que tienen la capacidad de pivotar para reflejar la luz incidente con mayor o menor intensidad, de tal forma que se producen diferentes escalas de grises, llegando a alcanzar 1024 grises diferentes.

Cada uno de estos espejos equivale a un pixel en la imagen real, siendo muy utilizada esta tecnología para los sistemas de proyección que necesitan gran definición. Para agregar el color se utiliza una rueda de color que tiene la función de

filtrar la luz blanca que proviene de la lámpara.

Los colores a filtrar son tres, rojo, verde y azul, a partir de estos se consigue completar el resto del espectro, llegando a conseguirse 16,7 millones de colores con la tecnología DLP más simple y 35 billones con la más avanzada. Los microespejos están diseñados para reflejar solo el color pretendido, de esta forma cuando se quiere reflejar un color rojo solo se activaran los espejos

que deban reflejar un pixel rojo, esto es posible gracias a que los espejos pueden cambiar de

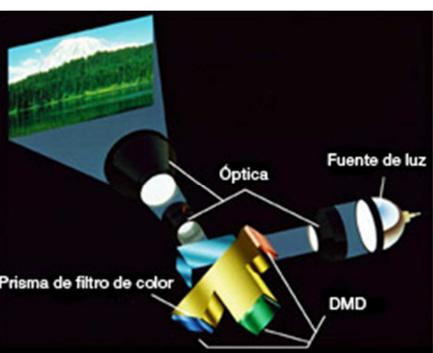


Figura 2.8.-Esquema de un sistema DLP de tres chips.

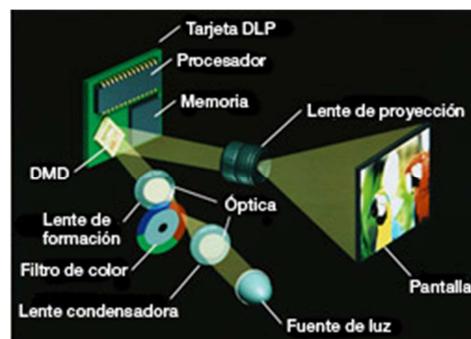


Figura 2.7.-Esquema de un sistema DLP con rueda de color.

posición más de 5000 veces en un segundo. En la figura 2.7. puede verse un esquema de un sistema DLP con rueda de color.

Un sistema más moderno es el de 3 chips DMD, el cual puede verse en la figura 2.8., en dicho sistema se utiliza un chip para cada color. Para ellos se divide la luz en estos tres colores utilizando prismas y enviando cada haz al chip correspondiente, produciéndose la imagen en cada uno y por último

se vuelve a unir para conseguir la tonalidad

## 2. Fundamentos

deseada. Con este sistema se evita incluir la rueda de color y se consigue más brillo en la imagen.

La tecnología DLP se usa en:

- Televisores de alta definición HDTV, con resoluciones 720p y 1080p.
- Proyectores multimedia, como el usado durante este proyecto.
- Picoproyectores.
- Proyectores de cine.
- Proyectores para juegos de luces en aplicaciones de entretenimiento.

Las principales ventajas de este sistema de visión respecto a otros son:

- No se producen saltos en las imágenes en movimiento.
- Alto contraste de colores.
- Alta definición.
- Debido al poco peso de los componentes de los sistemas de proyección pueden reducir su tamaño.

Las principales desventajas de estos sistemas son:

- La existencia del efecto arcoíris, que es la visión de sombras verdes, rojas y azules en las franjas de colores brillantes y claros con los muy oscuros. Este problema ha sido solucionado con los sistemas de 3 chips.

# 3. ELEMENTOS DEL SISTEMA

## 3.1. CAMA

La cama es el elemento sobre el cual reposa el material líquido para curar. Sus funciones son la contención del material y ejercer de superficie sobre la cual se realizará el curado, estas funciones necesitan una serie de características:

- a. Depósito de material
- b. Superficie en la base que deje pasar la luz para el curado.
- c. La superficie donde se realiza el curado debe de ser antiadherente, ya que cuando la resina se solidifica actúa como un adhesivo.
- d. Aporte de material.

### 3.1.1. Depósito de material.

Se resuelve construyendo una cuba en acero inoxidable o en aluminio, el primero aportaría su resistencia a la corrosión y el segundo aportaría ligereza. No es muy importante la elección de material, se sugieren estos dos candidatos debido a la facilidad de obtención en el mercado. Además es interesante que sean materiales inertes con respecto a las resinas que se van a utilizar, ya que existen materiales, generalmente otros polímeros, que influyen en el curado y reaccionan con las resinas.

### 3.1.2. Superficie transparente.

La solución es fácil, ya que sirve cualquier material transparente que deje pasar el espectro electromagnético en un rango de 300-700 nanómetros, lo cual incluye la luz ultravioleta y la visible que son las que nos interesan para producir el curado, a esta propiedad se le llama transmitancia y es la capacidad que tiene los materiales de dejar pasar cierto rango del espectro. La transmitancia tiene que ser la mayor posible porque no se quiere perder intensidad de luz, ya que esta es uno de los factores que permiten que la curación se realice a mayor velocidad. Se puede elegir cualquier vidrio estándar, se proponen las siguientes opciones:

- Vidrio de silicato.
- Vidrio de sosa y cal.
- Vidrio Pyrex.

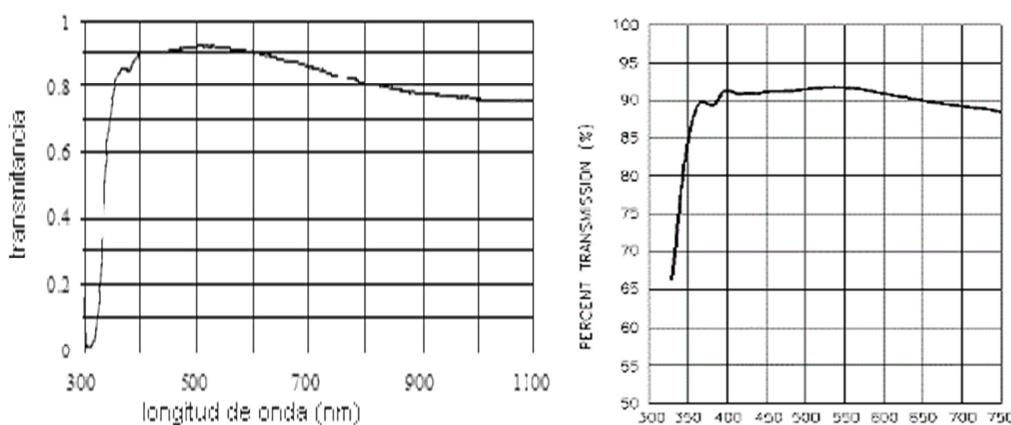


Figura 3.1.-Trasmitancia de vidrio de sosa y cal (izqda.), y de vidrio común (drcha.).

### 3. Elementos del sistema

Como se puede observar en la figura 3.1., la transmitancia de estos vidrios cumpliría con nuestras necesidades, además son una solución muy económica debido a su bajo precio.

Aquí puede surgir la duda de por qué no se utilizan plásticos transparentes, los cuales pueden ser también fáciles de conseguir, más resistentes y muchas veces más económicos. La respuesta radica en que la mayoría de los materiales plásticos transparentes hacen de filtro a los rayos ultravioletas, como por ejemplo el Plexiglás, en nuestra máquina es importante que el curado se realice con la luz ultravioleta por lo que no interesan este tipo de materiales.

#### 3.1.3. Superficie antiadherente.

La labor de este elemento es muy importante, ya que permite liberar al sistema de tener que ejercer una fuerza considerablemente grande. Esto es debido a que las resinas de curado son adhesivas, de hecho, muchas de ellas se utilizan en el mercado por esta característica.

Como en el caso de la superficie transparente también debe poseer la mayor transmitancia posible, las razones son las mismas que se han argumentado en el apartado anterior.

Las soluciones encontradas son dos:

- Superficie de silicona:

Esta solución encontrada en Internet es interesante porque cumple con las necesidades. Es inerte, antiadherente y dependiendo del compuesto deja pasar la radiación ultravioleta y la luz visible. El problema radica en que necesita de un proceso de curación y ser mezclada con un activador para tener una superficie sólida que permita trabajar sobre ella. Este método tiene un alto coste de tiempo y es complicado de elaborar.

Para realizar esta solución se propone el producto Sylgard® 184, éste viene en kits que permiten su conformación en bloques sólidos. En el anexo A se puede encontrar su hoja de características.

- Lámina de teflón:

Son láminas de politetrafluoroetileno comercializadas bajo el nombre de teflón por la empresa DuPont. Las principales características de este material son su bajo coeficiente de rozamiento y su antiadherencia, además al ser láminas transparentes la transmitancia a la luz solar es muy alta, sus principales características ópticas han sido resumidas en la siguiente tabla.

Coefficient of Friction, Kinetic (Film-to-Steel)	ASTM D-1894	0.1–0.3
Refractive Index	ASTM D-542	1.341–1.347
Solar Transmission	ASTM E-424	96%

Tabla 3.1.-Propiedades ópticas del teflón.

Se detallan el resto de sus características en la hoja técnica que viene recogida en el anexo A.

Esta es la opción más recomendable debido a que las láminas son adhesivas y su montaje, mantenimiento y sustitución se realiza a mayor rapidez y con mayor facilidad.

### 3.1.4. Tilt.

Debido a los espesores tan pequeños entre los cuales se realiza el curado surge un efecto negativo a la hora de aportar material para el curado. El material se encuentra entre dos placas una vez curado la placa superior asciende y el material curado se adhiere a ella, despegándose del inferior como se ha comentado anteriormente. El material curado a pesar de que la superficie inferior de la cama sea antiadherente puede pegarse a ella, y además al ascender esto puede ejercer una fuerza que desestabilice el sistema debido a la delgadez de las capas. Por otro lado una vez que la placa ha ascendido y se ha dejado espacio para el nuevo curado surge un problema de capilaridad, y es que la mezcla líquida no curada tendrá problemas para repartirse por el espacio que ha dejado la placa superior al ascender. Puede observarse una representación de este fenómeno en la siguiente figura, donde se representa en negro la capa superior, en azul la inferior, en rojo el material no curado y en amarilla en material curado.



**Figura 3.2.-Efecto de la capilaridad entre capas.**

Para evitar lo descrito anteriormente se realizará un movimiento de *tilt*, que se traduce ladeo. Este movimiento consistirá en ladear una de las placas para favorecer la penetración y el reparto de material entre las placas.

## 3.2. PROTECCIÓN ULTRAVIOLETA.

En este apartado se hablará de un elemento de seguridad. Debido a que el curado puede requerir de luz ultravioleta es necesario instalar algún elemento que haga de filtro entre el usuario y la fuente de luz, y entre la luz ambiente y la resina, ya que ésta también tiene componente ultravioleta y puede producir curado indeseado en el material depositado en la cama. Por contra es necesario que el usuario pueda tener acceso visual a la zona de polimerización, por lo que este material tiene que ser también transparente. Como se ha indicado en el apartado anterior, los plásticos transparentes suelen ser también filtros ultravioletas, por ejemplo el plexiglás, el cual es una buena opción ya que es fácil de mecanizar y barato, rondando un precio entorno a los 60 €/m<sup>2</sup>, y en caso de necesidades estéticas se pueden elegir distintos colores. Esta opción es utilizada en otras máquinas de fabricación aditivas existentes en el mercado, como se puede observar en la siguiente figura:

### 3. Elementos del sistema



**Figura 3.3.-Modelos de impresora 3D, B9 creator (izqda.) y Veloso 3D (drcha.).**

Se puede ver la hoja técnica del Plexiglás en el anexo A, en la cual se muestran las principales características de este material.

### 3.3. PROYECTOR DLP.

El proyector DLP es el instrumento que hace de procesador de la luz en los sistemas de fabricación aditiva. En el segundo capítulo se explicó el funcionamiento de la tecnología DLP, la cual ahora se ve aplicada en un proyector, que hará de fuente de luz y de procesador de imágenes.

Los proyectores utilizados a lo largo del proyecto han sido:

-Acer x1311kw.

-Asus P1M, proyector LED.

Se pueden observar en la siguiente figura:



**Figura 3.4.-Modelos de proyector acer x1311kw (izqda.) y asus P1M (drcha.).**

Se puede encontrar un extracto del manual de instrucción del proyector acer x1311kw en el anexo B, en dicho extracto se encuentra las características principales del proyector.

Este elemento es el encargado de proyectar la capa que se desea curar sobre la resina, para que esta proyección sea óptima. Son varios los aspectos a tener en cuenta, la distancia de enfoque, la definición de la imagen, la intensidad luminosa y el espectro de emisión.

### **3.3.1 Distancia de enfoque.**

La distancia de enfoque viene dada por el fabricante en la hoja técnica. Este aspecto influye en la calidad de la imagen que se puede proyectar en cada capa, y en la capacidad de movimiento de las lentes, que permite disponer de un margen de enfoque. Con esta característica de los proyectores se puede seleccionar la distancia a la que se realizará el curado, siendo esta la mínima posible que permita tener un margen para ajustar el enfoque, es decir, la distancia no debe ser la mínima a la que el proyector enfoque bien, sino que debe ser un poco mayor para permitir ajustar en caso de movimientos en la estructura de la máquina.

Que la imagen esté bien enfocada se verá reflejado en la calidad de las capas proyectadas, ya que los límites del material curado en cada capa tendrán el mismo grado de curación que los interiores de la capa, dando un acabado más uniforme, y por lo tanto obteniéndose una calidad superficial mayor en la pieza final. Este fenómeno se puede observar en los experimentos, donde las piezas curadas acaban en cantos vivos.

### **3.3.2 Definición de la imagen.**

Esta propiedad de los proyectores es dada por el chip DMD, donde cada pixel emitido equivale a un cristal del chip. Cuanto mayor sea el número de píxeles emitidos mayor será la definición.

Esta característica al igual que la distancia de enfoque, permite mejorar la calidad de las capas proyectadas, por lo que interesa que el número de pixel que pueda emitir el proyector sea el mayor posible. Debido a que la zona donde se proyecte no pueda abarcar toda la zona de proyección que da el proyector, hay que intentar que esta zona de curado pueda disponer de la mayor cantidad de píxeles posibles.

### **3.3.3 Espectro electromagnético.**

Se llama espectro electromagnético a la variación energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. El espectro electromagnético se extiende desde longitudes de onda muy pequeñas como los rayos gamma y los rayos X, hasta longitudes de onda grandes como la de las ondas de radio. En la figura siguiente se puede ver un esquema del espectro electromagnético completo, en el que se detalla la franja de la luz visible.

### 3. Elementos del sistema

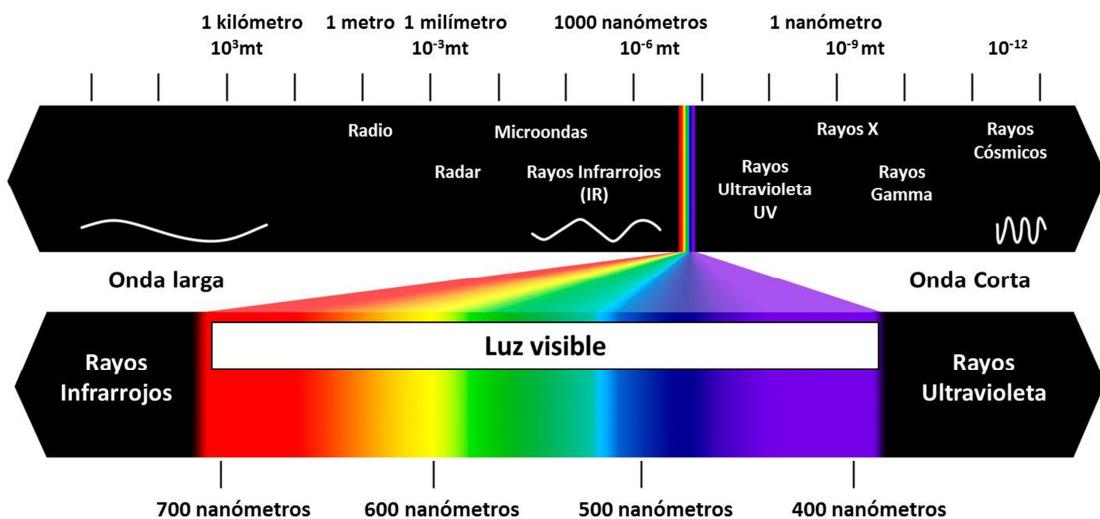


Figura 3.5.-Espectro electromagnético.

Para que la curación sea de la mayor calidad posible hay que adaptar el rango de onda en el que emite el proyector al rango de onda en el cual el fotoiniciador es óptimo, del cual se hablará en el apartado sobre fotoiniciadores con mayor hincapié.

En el caso de los proyectores el rango del espectro en el que emite la fuente luminosa varía desde el ultravioleta hasta el visible. Por ejemplo, para distintos tipos de lámpara el espectro de emisión varía. Se puede ver en la siguiente figura distintos espectros de emisión para distintas fuentes luminosas. En azul aparecen las lámparas halógenas, en rojo las lámparas de arco de mercurio, en verde las de xenón y por último en amarillo las de un vapor metálico.

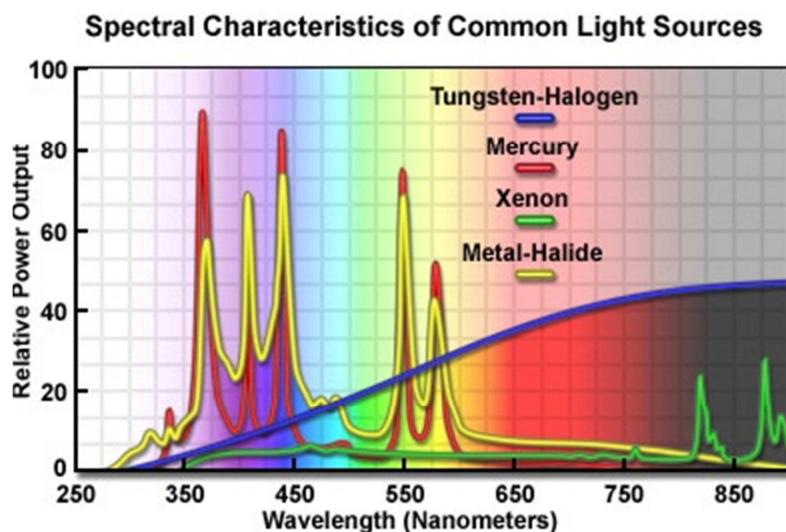
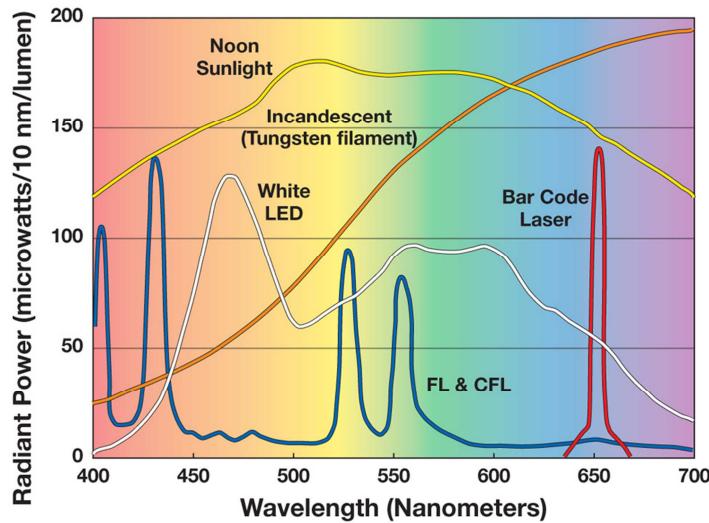


Figura 3.6.-Espectros de emisión de diferentes lámparas.

Para ver mejor una relación se incluye la figura 3.7. en la que se puede comparar algunas fuentes de luz artificiales con la luz solar, referida en la imagen como *noon solar* (luz solar del mediodía), además de otras fuentes de luz, ésta figura dará una perspectiva mejor del espectro de emisión.



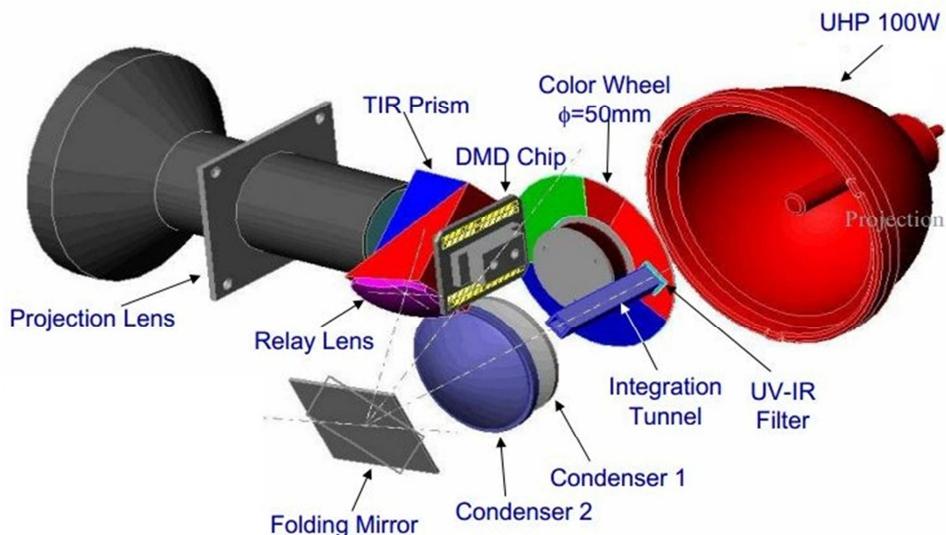
**Figura 3.7.-Espectros de emisión de distintas fuentes de luz.**

En la figura pueden observarse los espectros del LED blanco en color blanco, la luz solar en amarillo, las lámparas fluorescentes y fluorescentes compactas en azul, el láser de los códigos de barras en rojo y las incandescentes en naranja.

Como se verá en el apartado sobre fotoiniciadores, lo interesante es que se produzca el curado en una franja de la radiación ultravioleta, generalmente los proyectores poseen lámparas de arco de mercurio, como se ha podido ver en la figura 3.4., así que la utilización de este tipo de lámparas es positivo para el curado.

El problema en los dispositivos DLP es que poseen filtros ultravioleta para proteger el chip DMD, ya que esta radiación acorta su vida útil. Por lo tanto es interesante tener en cuenta su existencia para una posterior modificación en el proyector eliminando estos filtros.

En la siguiente figura se muestra un sistema DLP, se puede ver donde se encuentra uno de estos filtros. La localización es tras la ruleta de color justo antes del túnel de integración.



**Figura 3.8.-Esquema detallado del interior de un proyector DLP.**

### 3. Elementos del sistema

A parte del filtro mostrado en la figura anterior, las lámparas suelen llevar otro filtro incorporado, para asegurar la protección de los usuarios y del propio sistema DLP.

Con los proyectores DLP que utilizan fuente de luz LED, surge un problema diferente, y es que estos proyectores tienen un espectro de emisión muy limitado. La emisión se produce en tres colores para evitar tener que separarlos. Estos tres colores están distribuidos en rojo entorno a 625nm, verde entorno a 530nm y azul entorno a 470nm. Están bastante distanciados de la radiación ultravioleta (400 nm.) por lo que no se espera que el curado se produzca de forma positiva.

## 4. RESINAS Y FOTOINCIADORES

### 4.1. POLIMERIZACIÓN

La polimerización es el proceso mediante el cual se unen monómeros, moléculas de poco peso atómico, para formar moléculas más grandes y de alto peso atómico llamadas polímeros. Existen numerosos mecanismos de polimerización, pero es campo de este proyecto la fotopolimerización, es decir, el proceso de formación de polímeros en el cual es necesaria una onda electromagnética para formar un producto final.

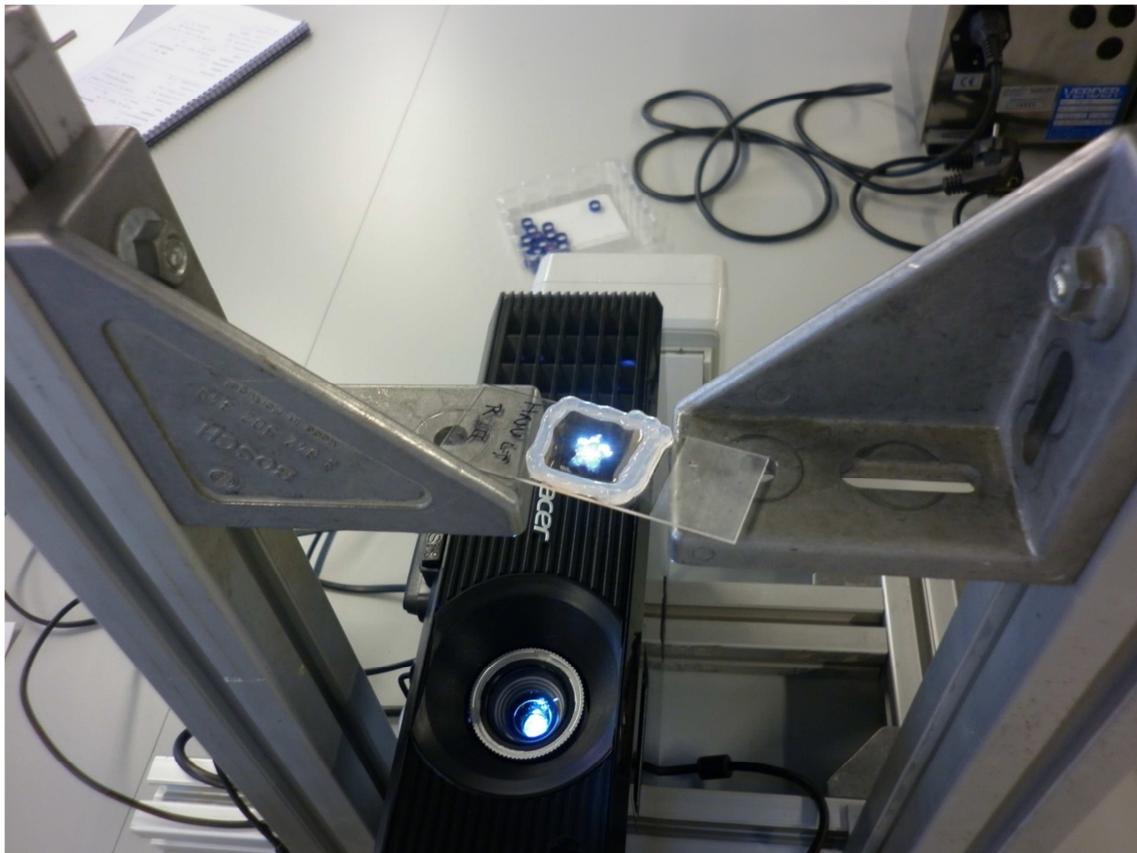
Este proceso es clave para el funcionamiento de la máquina de fabricación aditiva, ya que la tecnología DLP es usada para procesar una imagen en blanco y negro, la cual será la encargada de realizar la polimerización en la zona deseada, esto significa que la reacción se produce en la zona blanca o iluminada. Por ejemplo, si se quisiera que la forma de la pieza fuera una estrella, habría que obtener una capa en la cual la diapositiva tubiera en blanco la estrella y en negro el fondo, se puede observar este procedimiento explicado en las siguientes figuras 4.1., 4.2. y 4.3. donde se muestran fotos realizadas durante los experimentos.



Figura 4.1.- Fotografía de diapositiva de una estrella

En la foto se puede ver como mediante el ordenador se manda al proyector la diapositiva deseada, siguiendo el procedimiento explicado en el anexo C, se proyecta sobre el cristal de microscopio como se ve en la siguiente foto.

#### 4. Resinas y fotoiniciadores



**Figura 4.2.-Curación de una pieza con forma de estrella.**

Y finalmente tras la espera de 60 segundos, para asegurar que el proceso de curado está completo, se obtiene el polímero con la forma que se desea, siguiendo la técnica anteriormente explicada de producir un negativo con la parte luminosa o blanca con la forma objetivo. Se puede observar el resultado en la siguiente foto, donde debido a que el enfoque estaba más ajustado se puede observar que los bordes de la estrella no son regulares.



**Figura 4.3.-Pieza curada con forma de estrella.**

Anteriormente se ha mencionado que son necesarios dos monómeros para formar el polímero final en el proceso de polimerización. En este proyecto se ha estudiado distintos monómeros, pero en concreto para realizar la fotopolimerización necesaria para el funcionamiento de nuestra maquina hacen falta varios elementos:

- Resina.
- Fotoiniciador.
- Colorante.

Aunque se han nombrado tres, para el curado solo hacen falta dos, la resina y el fotoiniciador. Con estos dos elementos el curado se realiza perfectamente, el colorante se añade para controlar otros factores que se explicaran más adelante. Durante los experimentos realizados en este proyecto se procedió a usar distintas combinaciones de resina y fotoiniciador. El elemento que hace posible la curación es el fotoiniciador que hace de catalizador de la reacción.

Para que el curado se realice correctamente hay que tener en cuenta una serie de consideraciones:

- La mezcla final de resina y fotoiniciador, o resina fotocurable debe estar el menor tiempo posible expuesta a la luz ambiente.
- Si es posible la luz ambiente debe ser la menor posible para evitar lo nombrado en el punto anterior. También se puede generar un entorno de luz roja.
- Las mezclas, resinas y fotoiniciadores se guardarán en botes opacos o ámbar para evitar curados innecesarios. Los botes ámbar hacen de filtro de rayos UV.
- La reacción de fotocurado es exotérmica, por lo que la mezcla que es sometida al proceso aumenta de temperatura.
- Generalmente y tal como se ha comprobado en numerosas búsquedas por internet, las mezclas de resina y fotoiniciador tienen una alto contenido en resina y un porcentaje más bajo de fotoiniciador, entorno a un 2%. Esto puede verse en los datos de los experimentos.

## 4.2. RESINAS

La resina es el monómero base con la cual se crea el material de impresión para la máquina. En este tipo de sistemas en los que se utiliza el fotocurado para crear la polimerización, las resinas utilizadas son acrílicas. Como se verá más tarde en los resultados de los experimentos, las resinas son las responsables de las propiedades físicas del material curado, por lo que tendrá que tenerse en cuenta la resina que se quiere seleccionar dependiendo del uso final que se le vaya a dar a la pieza creada.

Algunas resinas son sensibles a la radiación de las fuentes de luz pudiéndose producir curado de forma mínima y al cabo de un tiempo considerable, a pesar de ello existen en el mercado numerosas resinas fotocurables, creadas para evitar la elaboración de mezclas de resina y fotoiniciador por el usuario. Algunas de estas resinas son UV-CAST™ 9663 de la empresa Dymax Corporation, y SOLAREZ 3-D PRINTING RESIN 79901 de la empresa Solarez, estas resinas fueron descartadas para el análisis de este proyecto, debido a que se quería aprender el funcionamiento y las dependencias que tenía el material final de la concentración de resina y fotoiniciador, por lo que se prescindió de mezclas ya preparadas.

## 4. Resinas y fotoiniciadores

### 4.2.1. Selección de resinas.

Para seleccionarlas se realizó una rigurosa búsqueda en la red, encontrando algunas resinas que son muy utilizadas por otros usuarios que investigan sobre el fotocurado para impresión 3D. La lista que se da a continuación está compuesta por las resinas utilizadas en los experimentos, para más información sobre estas resinas se puede consultar el anexo B donde se encuentran las hojas técnicas del fabricante.

- Poly(ethylene glicol) diacrylate, a la cual se le llamará a partir de ahora Resinas I o RI para abreviar.
- Bisphenol A diacrylate, a la que se le llamará resina II o RII.
- 1,6-Hexanediol diacrylate, a la que se le llamará resina III o RIII siguiendo el mismo procedimiento que con las anteriores.

Como se ha mencionado anteriormente con estas resinas se realizaron los experimentos, pero hubo otras candidatas que se mencionan a continuación para que quede constancia, para posibles análisis posteriores a este proyector no incluidos en el mismo:

- Aromatic Urethane Acrylate.
- Aliphatic Urethane Acrylate.
- Polyester Acrylate.
- Epoxy.
- UV-CAST<sup>TM</sup> 9663 (fotocurable).
- SOLAREZ 3-D PRINTING RESIN 79901 (fotocurable).

## 4.3. FOTOUNICIADORES

Los fotoiniciadores son en su mayoría compuestos orgánicos, moléculas que tienen una combinación de grupos funcionales en los que se adsorben una longitud de onda determinada del espectro electromagnético. Una vez que la onda o luz es absorbida se producen cambios en su estructura interna, por ejemplo, la creación de un radical, una molécula cargada eléctricamente, a través de la comutación de la posición de un enlace químico, arrastrando electrones de su forma estable a una inestable. Este radical puede interactuar con otros componentes de resinas para iniciar la polimerización.

La función del fotoiniciador es la de actuar como catalizador que acelera la reacción, y de alargar la vida y duración del radical libre desencadenante de la polimerización, y son necesarios debido a que uno de los objetivos de la máquina de fabricación aditiva es que cada una de las capas sea curada con una considerable rapidez. Este compuesto debe ser añadido en unas determinadas cantidades a la resina, la variación de estas proporciones produce cambios en el comportamiento de la mezcla, lo cual se verá demostrado en los experimentos que se analizaran más tarde en este proyecto. Las cantidades de fotoiniciador que hay que añadir a la resina vienen en muchos casos recomendadas por el fabricante o distribuidor, y para los casos en los que no se tenía recomendación alguna, se buscó en la red las concentraciones más utilizadas por otros usuarios de este tipo de producto, a partir de estas cantidades aconsejadas se procedió a realizar diferentes pruebas como ya se verá.

#### 4.3.1. Selección de fotooiniciadores.

Los fotooiniciadores son un producto que no tiene mucho mercado, por lo que las empresas y distribuidores que los comercializan son escasos, además de existir poca cantidad de productos a la venta. Para este proyecto se encontraron dos productos, además el fabricante de uno de los seleccionados recomendó otro de sus producto por lo que se decidió añadirlo para el estudio. Estos productos se enumeran a continuación:

- Phenylbis (2,4,6-trimethylbenzoyl)phosphine oxide (Irgacure 819), que para abreviar se le llamará a partir de ahora BAPO.
- HNU-470 IL.
- HNU-470 LT, este fotooinicador fue recomendado por la empresa que suministro en anterior de esta lista.

En el anexo B se encuentran las hojas técnicas que suministra el fabricante de estos fotooiniciadores.

#### 4.3.2. Funcionamiento del fotooinicador.

Como se ha explicado anteriormente el fotooinicador hace que sea posible la liberación de un radical para la polimerización, al someter la mezcla de resina y fotooinicador a una fuente de luz o de radiación electromagnética. A pesar de lo que puede pensarse la intensidad de la fuente no es el factor más importante, siendo lo más importante el rango del espectro en el que emite dicha fuente. Este rango se comentó que era importante en el apartado sobre el proyector y la fuente de luz. En este apartado se hablará del espectro de absorción del fotooinicador, que debe corresponderse con el espectro de emisión de la fuente de luz para que el curado se realice de la manera más óptima posible. El espectro del fotooinicador BAPO se puede ver en la siguiente imagen junto con otros fotooiniciadores utilizados en la industrial odontológica.

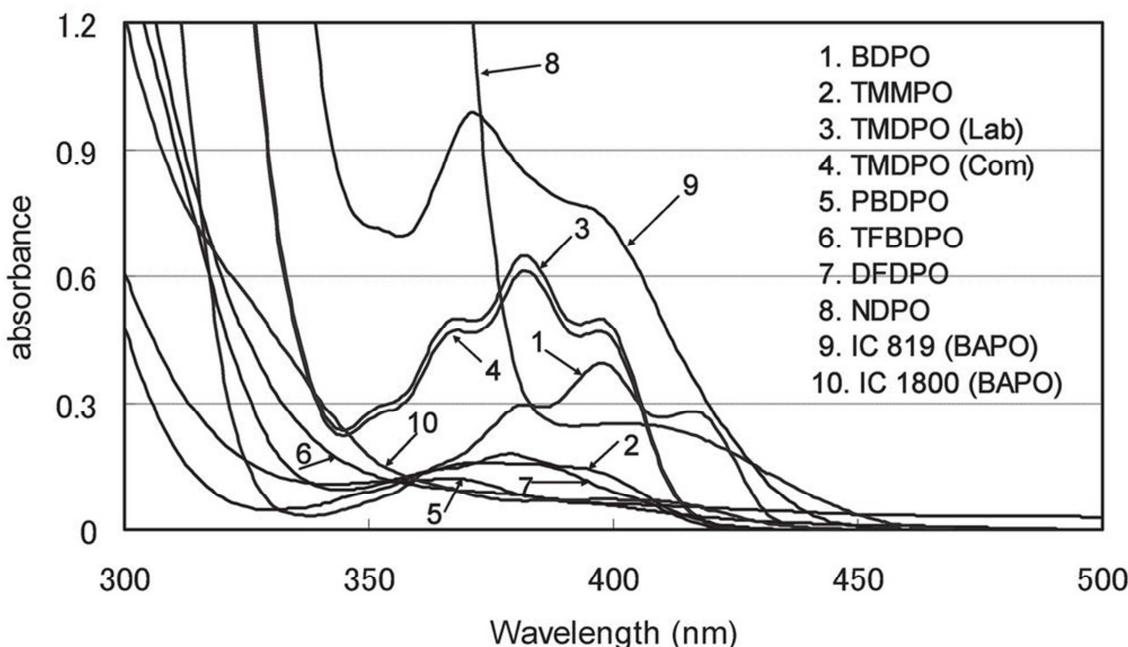


Figura 4.4.-Espectro de absorción de fotooiniciadores de la industria dental.

Como se puede observar el número 9 (IC 819 (BAPO)) hace referencia al fotooinicador que se seleccionó para los experimentos. El pico de absorción se encuentra entorno a los

#### 4. Resinas y fotoiniciadores

380nm de longitud de onda que equivale a la emisión de rayos ultravioleta de tipo A, por lo que para que la curación con este foto iniciador sea óptima se tendrá que poder emitir entorno a este punto lo más cerca posible.

Otro espectro de absorción puede observarse en la siguiente imagen para el foto iniciador HNU-470 LT.

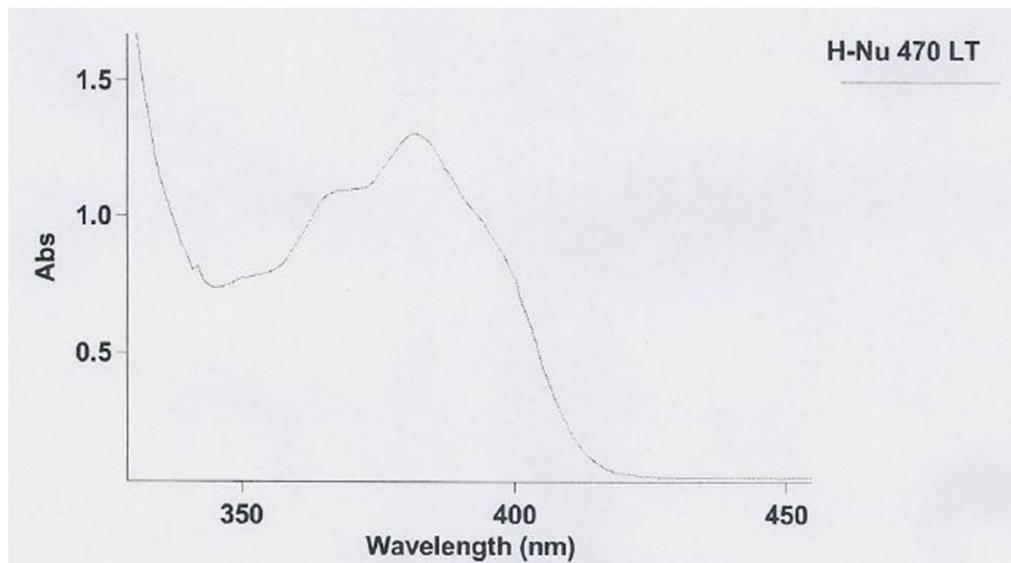


Figura 4.5.-Espectro de absorción de H-NU 147 LT.

Se puede ver un comportamiento similar al BAPO, con un pico de absorbancia en 380nm, estos datos pueden verse contrastados en el anexo B, donde se localiza la hoja técnica del HNU 470 LT suministrada por el fabricante.

También se puede ver en la siguiente imagen el espectro de absorción del foto iniciador 470 IL para concentración del 1% y 10%.

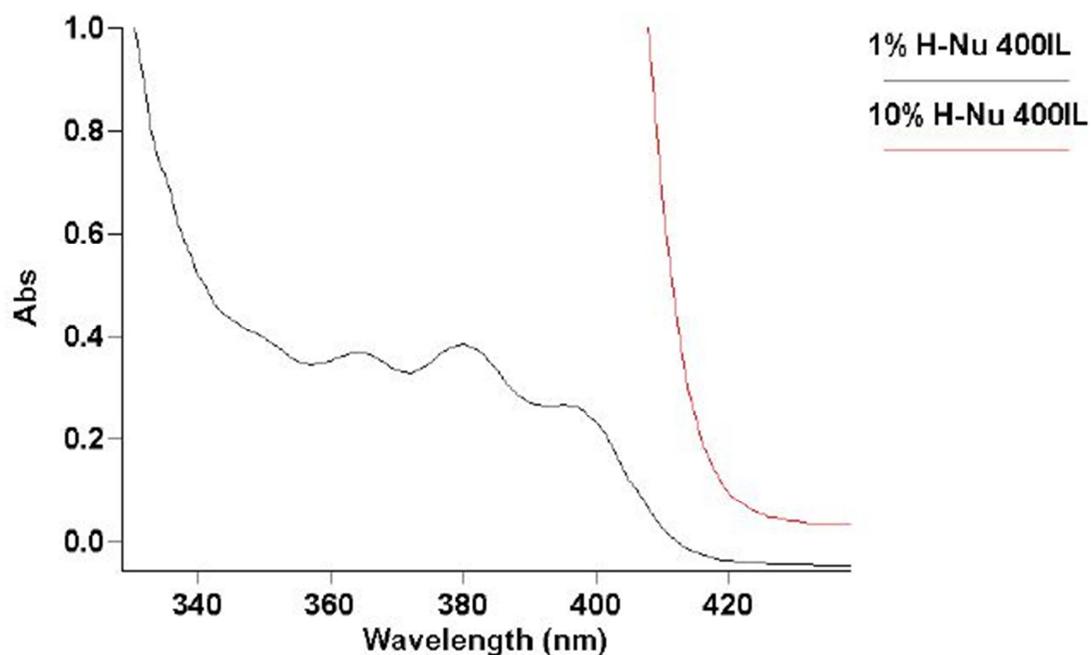


Figura 4.6.-Espectro de absorción de N-Nu 400 IL a concentración del 1% y 10%.

Se observa que una concentración del 10% es óptima para una longitud de onda de 410nm, pero siendo muy sensible a los cambios si no se emite en esta longitud de onda, esto es útil si se pudiera elegir con facilidad el punto de emisión, pero debido a la imposibilidad de realizarlo en el proyecto y al alto precio de los sistemas que los permiten, se descarta esta opción. Por otro lado se ve que para un porcentaje del 1% de fotooiniciador se tiene un poco en 380nm como en el caso del BAPO, y que para bajas longitudes de onda la absorbancia es muy alta, es un comportamiento parecido al del BAPO. Viendo estas dos curvas a distinta concentración cabe preguntarse qué pasaría en una concentración intermedia del 5%, la cual recomienda el fabricante en la hoja técnica de este fotooiniciador.

#### **4.3.3. Seguridad.**

Como la toxicidad de estos elementos es desconocida y el suministrador no daba información sobre ello, se decidió realizar las mezclas de los experimentos en una campana de laboratorio para asegurar la seguridad y evitar posibles accidentes.

## **4.4. COLORANTES**

El colorante como el propio nombre indica es la sustancia que da color a la mezcla de resina y fotooiniciador. Aunque su función no solo es dar color, sino que también es utilizado para controlar el espesor de capa a curar, esto es debido gracias a que esta sustancia vuelve opaca a la muestra una vez se produce el curado.

Hacen falta pocas cantidades de colorante para añadir, oscilando entorno al 0.02% de concentración en peso según recomienda el fabricante.

Tras una búsqueda en la red se encontraron los siguientes colorantes que pueden ser utilizados en las mezclas mencionadas.

-Sudan , es un colorante de color rojo, es utilizado generalmente en comidas aunque en muchos países ha sido prohibido para este uso debido a sus efectos cancerígenos en el cuerpo humano.

- Tartracina, es un colorante que dependiendo de la cantidad añadida puede dar colores que oscilan del amarillo al naranja, también es ampliamente utilizado en la industria alimentaria, y también ha sido prohibido en algunos países como Noruega, debido a que puede provocar hiperactividad en niños.

#### 4. Resinas y fotoiniciadores

## 5. EXPERIMENTOS

En este apartado se detallarán las conclusiones de los experimentos realizados durante el proyecto. Se realizaron 5 experimentos sobre distintos tipos de mezclas de resinas y fotoiniciadores.

### 5.1. EXPERIMENTO 1.

En este primer experimento se buscó entrar en contacto con los mecanismos de curación previamente estudiados, para ello como se siguió el procedimiento detallado en el anexo C. La mezcla utilizada en este experimento se muestra en la siguiente tabla:

BAPO	0.2 gramos.
RESINA I	9.8 mL.

Tabla 5.1.-Concentración de mezcla experimento 1.

Las conclusiones extraídas en este experimento a raíz de las observaciones detalladas en el anexo E son:

- ❖ Usar jeringuillas desechables para verter el material en la probeta en lugar de pipetas, así no se corre el peligro de estropear ninguna pipeta, ya que el material se solidifica.
- ❖ Verter primero el material y luego aplicar la fuente de luz, para evitar curación no deseada.
- ❖ El proyector LED no funciona para curar.
- ❖ No hace falta ninguna modificación en el proyector DLP, ya que la curación se produce. Aunque se recomienda en un futuro experimento extraer los filtros UV para comprobar como se produce el curado y si hay diferencias en éste.
- ❖ El set-up de las probetas con la franja de rotulador permanente negro no funciona, hay que cambiarla. Por lo que se realiza una modificación al anexo C, este cambio se detalla en el anexo D.
- ❖

### 5.2. EXPERIMENTO 2.

En este experimento se analizaron una gama de distintas combinaciones de resinas y fotoiniciadores durante un curado de 30 segundos, aplicando lo aprendido durante el Experimento 1.

Las diferentes mezclas que se utilizaron a lo largo de este experimento se muestran en la siguiente tabla.

BAPO	0,2gramos	RI	9,8 mL
		RII	9,8 mL
		RIII	9,8 mL
HNU-470 IL	5% en peso	RI	95% en peso.
		RII	95% en peso.
		RIII	95% en peso.

## 5. Experimentos

HNU-470 LT	5%en peso	RI	95% en peso.
		RII	95% en peso.
		RIII	95% en peso.

Tabla 5.2.-Concentraciones de mezcla experimento 2.

A partir de las observaciones y datos detallados en el anexo F, se llega a las siguientes conclusiones:

- ❖ Debido a que el espesor de curado era muy cercano al del material vertido, se llega a la conclusión de que habrá que curar piezas de menor espesor que la altura que se consigue vertiendo el material en la probeta. Por lo que habrá que hacer este mismo experimento pero con un tiempo de curado menor. Este tiempo serán 8 segundos, ya que es una posible duración para el curado de las capas de un futuro diseño, por lo que podrá servir de guía.
- ❖ Las mezclas que ofrecen mejores resultados en cuanto a similitud con la forma proyectada, son en las que se ha utilizado la RESINA I y en adición a estas la compuesta por HNU-LT + RESINA II.
- ❖ Las piezas más resistentes son las que están compuestas por la RESINA II, ya que esta resina es la más densa de las tres empleadas.
- ❖ El color de la mezcla y de las piezas depende del fotoiniciador.
- ❖ No se pueden sacar conclusiones de velocidad de curado ni de los espesores medidos.

## 5.3. EXPERIMENTO 3.

Este experimento se realiza a partir de las conclusiones del experimento 2. Se realizará el mismo experimento pero con un tiempo de curación menor, 8 segundos, con el fin de comprobar si a tiempos menores también se produce curado y qué cantidad se consigue curar.

Las mezclas utilizadas son las mismas que en el experimento 2, por lo que vienen representadas en la tabla 5.2.

Las conclusiones de este experimento son las siguientes:

- ❖ Existen mezclas que no son válidas para tiempos tan cortos de curación, estas son las siguientes: BAPO + RESINA III, HNU-IL + RESINA I, II ó III; y HNU-LT III.
- ❖ Se ha corregido el fallo en el aporte de insuficiente material.
- ❖ Para el prediseño de la máquina se recomienda que la mejor solución es controlar el espesor de forma mecánica, es decir, mediante el hueco existente entre 2 placas, curar la mezcla que haya entre ellas. La otra opción para controlar el espesor recaería en su control mediante el uso de colorante.
- ❖ Con una mezcla como BAPO + RESINA I, se podría curar a tiempos menores.
- ❖ La precisión de una máquina de fabricación aditiva es muy dependiente del grosor de las capas a las que construye las piezas, por lo que los resultados obtenidos son muy buenos, ya que muestras que se pueden curar espesor grandes en poco tiempo.
- ❖ A la vista de los resultados se puede suponer que la velocidad de curación no es lineal, y que depende de la penetración de la luz en el material que ya está curado.

También se puede suponer que es muy variante al principio y que conforme pasa el tiempo y el espesor curado aumenta, disminuye su velocidad.

## 5.4. EXPERIMENTO 4.

Este experimento se diseña de tal manera que sea posible comprobar factores distintos como la linealidad de la velocidad y la influencia de la concentración de fotoiniciador en el curado. Para el primer punto se realiza medidas en el curado para tiempos de 10, 15 y 20 segundos, y en el segundo factor se eligen las mezclas que hasta ahora han dado mejores resultados y que interesa estudiar. Estas mezclas se detallan en la siguiente tabla detallando las cantidades empleadas.

		% fotoiniciador	% resina
BAPO	RI	2%	98%
		5%	95%
		8%	92%
HNU-470 IL	RII	2%	98%
		5%	95%
		8%	92%

Tabla 5.3.-Concentraciones de mezcla experimento 3.

Las conclusiones de este experimento son las siguientes, Las tablas de resultados y graficas a las que se hace alusión se encuentran en el anexo H:

- ❖ A la vista de las gráficas ubicadas en el anexo H, se puede decir que la variación de la concentración de sustancia varía el comportamiento de la velocidad de curado.
- ❖ Viendo las tablas de resultados en el anexo H, se comprueba que el porcentaje de fotoiniciador es un factor más influyente que el tiempo de curado.
- ❖ El espesor aumenta con el tiempo de curado pero hasta un límite en muchos casos.
- ❖ En algunas pruebas se ve que la gráfica es lineal, esto puede deberse a que el material aun permite que la luz penetre y el espesor está más alejado de lo que se ha medido.
- ❖ Se pueden descartar las mezclas BAPO+RI al 5% y 8% de concentración de fotoiniciador debido a que la resina satura y no puede absorber todo el añadido.
- ❖ Se pueden descartar para trabajar en estas condiciones la mezcla HNU-470 IL + RII al 2% de fotoiniciador, debido a que en un tiempo de 10 segundos no se consigue curar, se recuerda que el tiempo de curación al que se espera que trabaje la máquina debe ser igual o menor a 8 segundos.
- ❖ Se descartan para trabajar en estas condiciones las mezclas HNU-470 IL + RII al 5% y 8% de fotoiniciador porque aunque se consigue curado, este es muy uniforme

## 5. Experimentos

- ❖ Las mejores candidatas encontradas en estas condiciones de trabajo son BAPO+RI con una concentración del 2% de fotoiniciador y BAPO+RII en todos sus concentraciones.
- ❖ La pruebas realizadas con HNU-470 IL terminan el curado con la superficie algo viscosa, para esta se recomienda proceso de postcurado que permitirá que el material que está en la superficie polimerice dejando ésta con un mejor acabado superficial.
- ❖ La precisión de un sistema de fabricación aditiva es muy dependiente del grosor de las capas a las que construye las piezas, por lo que los resultados obtenidos son muy buenos, ya que muestras que se pueden curar espesores grandes en poco tiempo.
- ❖ A la vista de los resultados se puede presuponer que la velocidad de curación no es lineal, y que depende de la penetración de la luz en el material que ya está curado. La velocidad de curación se puede suponer que es muy variante al principio y que conforme pasa el tiempo y el espesor curado, disminuye su velocidad.

## 5.5. EXPERIMENTO 5.

Este experimento es similar al anterior pero se cambiara la fuente de luz, emitiendo en este caso radiación ultravioleta gracias a la extracción de los filtro. Las mezclas empleadas son las mismas que en el anterior experimento expresadas en la tabla 5.3. Las modificaciones realizadas al experimento 4 y los resultados obtenidos en este caso se encuentran en el anexo I, del cual a continuación se harán referencia a sus tablas y graficas durante el desarrollo de las siguientes conclusiones:

- ❖ A la vista de las gráficas obtenidas se puede decir que la variación de la concentración de sustancia varía el comportamiento de la velocidad de curado.
- ❖ El espesor aumenta con el tiempo de curado pero hasta un límite en la mayoría de los ensayos. Puede suponerse que en los que no se ha alcanzado, el límite se encuentra fuera de los puntos estudiados y solo se puede ver la parte creciente de la curva con las pruebas realizadas..
- ❖ La mezcla BAPO+RII al 2% de fotoiniciador ofrece un comportamiento muy interesante para tiempos pequeños de curado, obtiéndose con ella espesores elevados en tiempos reducidos. Además sus propiedades físicas como la rigidez y la apariencia superficial son interesante a la hora de producir prototipos. Es la mezcla que ha conseguido mayores espesores en el menor tiempo.
- ❖ Las pruebas realizadas con HNU-470 IL terminan el curado con la superficie algo viscosa, para esta se recomienda proceso de postcurado.
- ❖ La precisión de una máquina de fabricación aditiva es muy dependiente del grosor de las capas a las que construye las piezas, por lo que los resultados obtenidos son muy buenos, ya que muestras que se pueden curar espesores grandes en poco tiempo.
- ❖ A la vista de los resultados se puede presuponer que la velocidad de curación no es lineal, y que depende de la penetración de la luz en el material que ya está curado. La velocidad de curación se puede suponer que es muy variante al principio y que conforme pasa el tiempo y el espesor curado, disminuye su velocidad.

## 5. Experimentos

- ❖ Se obtienen mejores resultados con la radiación ultravioleta, obteniéndose mayores espesores de curado para los mismos tiempos. Y en la mayoría de las pruebas realizadas el comportamiento de la curva es similar independientemente de la fuente de luz utilizada. Esto significa que la fuente de luz no es un factor influyente en el comportamiento, pero si en la tasa de curado.
- ❖ Los espesores obtenidos a los 10 segundos han sido mucho mayores en comparación a los obtenidos en 15 y 20 segundos, por lo que se presupone que la radiación ultravioleta favorece el mecanismo de activación de la reacción de polimerización.

## 5. Experimentos

## 6. PREDISEÑO

Con los análisis obtenidos hasta el momento de los elementos y factores de un sistema de fabricación aditiva, se puede elaborar una serie de pautas para el diseño de un sistema de fabricación aditiva en el cual sin entrar en la profundidad que requiere un diseño completo, se pueden comprender las bases necesarias para realizarlo en un futuro.

Los planos de todo el prediseño se encuentran en el anexo J.

La siguiente figura puede servir para obtener una idea del prediseño y de cada una de sus partes, las cuales se desarrollan a continuación.

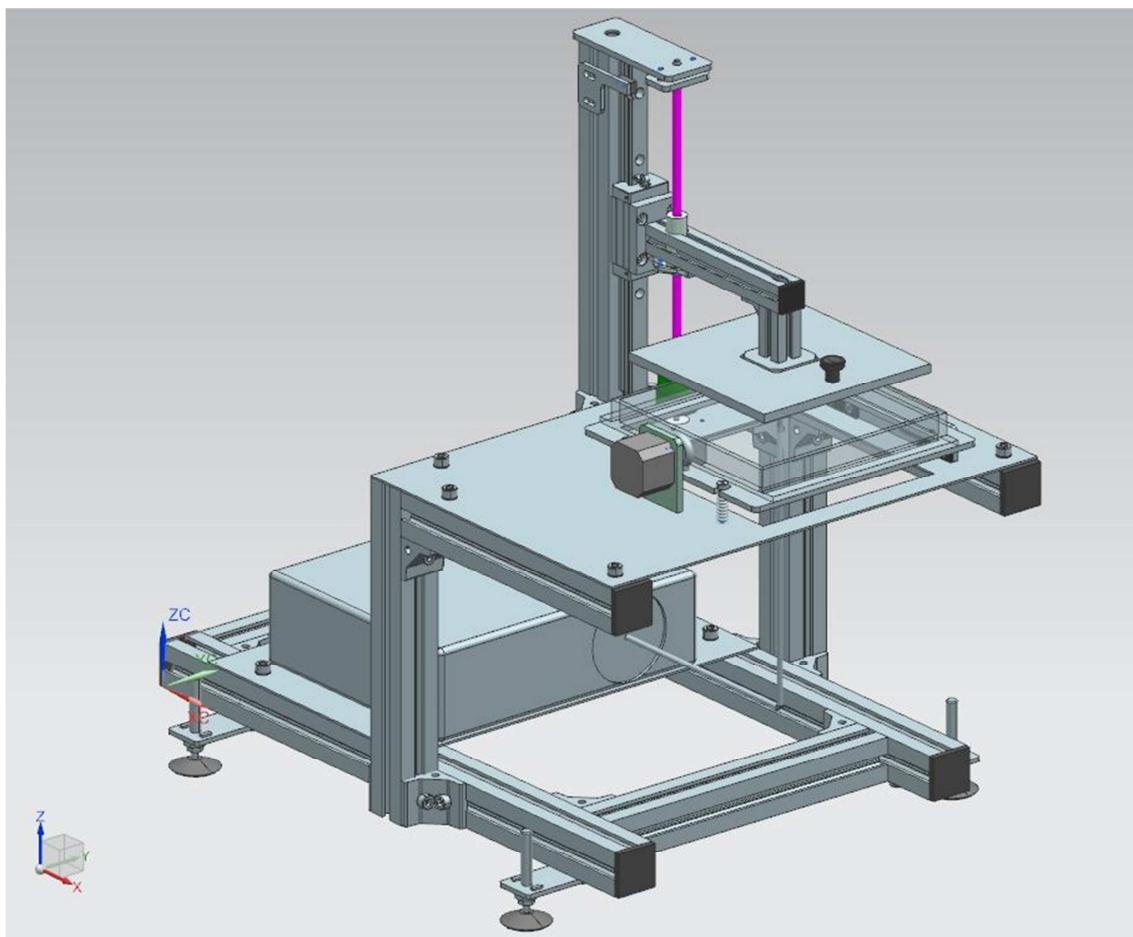


Figura 6.1.-Trimetrico del prediseño.

### 6.1. ESTRUCTURA.

El sistema debe de tener una estructura que permita al proyector enfocar al material desde abajo, debido a que el curado se realiza de abajo-arriba. Además también debe sostener el peso de todo los demás elementos y dar rigidez al conjunto.

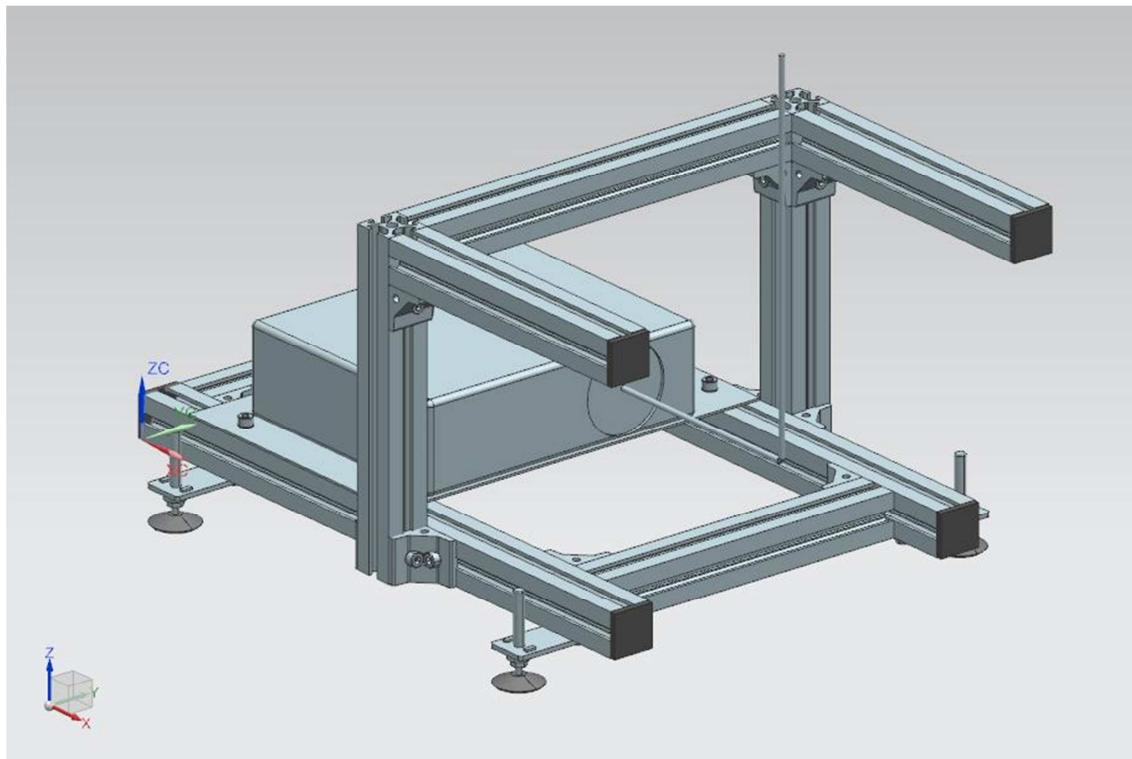
Sobre la estructura se depositaran el proyector, la cuba y la columna, elementos que serán desarrollados seguidamente a este.

## 6. Prediseño

Se ha decidido el uso de elementos comerciales en toda la estructura para que predomine la sencillez y el montaje sea sencillo. Estos elementos son escuadras y perfiles, estos últimos permiten el ajuste de la distancia del proyector, lo cual puede ser necesario según se desarrolló en el capítulo 3 apartado 3.2. La principal ventaja de estos elementos es que son fáciles de encontrar y su precio es reducido.

Puede verse un plano de la estructura en el anexo J con la lista de los elementos que la componen.

En la siguiente figura se puede ver una imagen en detalle de la estructura.



**Figura 6.2.- Estructura del sistema de fabricación aditiva.**

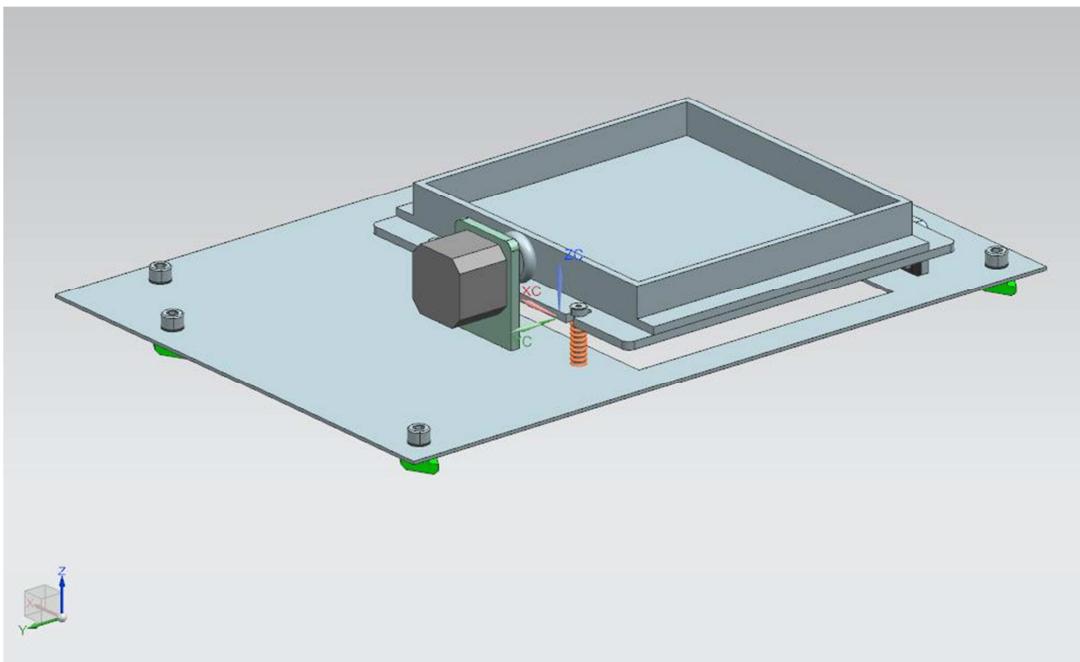
Se omite crear una estructura externa en la que se use los elementos de protección ultravioleta debido a que se entraría en un diseño mucho mas complejo que no es competencia de este proyecto. Pero se recomienda el uso del plexiglás, analizado en el capítulo 3, como elemento de seguridad.

## 6.2. CAMA.

Según se explicó en el capítulo 3, este elemento tiene que cumplir una serie de funciones, ejercer de deposito, dejar pasar la luz y ejercer de base para el curado. Las opciones finales que se toman en el prediseño para lo antes mencionado es:

- Para ejercer de depósito la cama tendrá que tener la forma de dicho depósito y tendrá que estar fabricada en un material inerte para la resina. Puede verse un plano de despiece de este elemento en el anexo J.
- Sobre la cama debe de existir un orificio rectangular para dejar pasar la luz, en este orificio se toma como elección el vidrio estándar.
- Para la base de curado se utilizará una lámina de teflón, la cual se pegará sobre el vidrio anterior para evitar que el material se adhiera.

Puede observarse lo descrito con anterioridad en la siguiente figura.



**Figura 6.3.- Cama del sistema de fabricación aditiva.**

Para el tilt, descrito en el capítulo 3 apartado 3.4. Tilt, se dispondrá de un motor con una leva en su eje, la leva debe estar en contacto con la cama para ejercer el movimiento que la incline. Se utilizarán muelles para favorecer el retorno a la posición origen de la cama y que la superficie se encuentre siempre en una posición origen que este a 180°. El motor deberá estar coordinado con el motor de la guía para ponerse en funcionamiento en el momento preciso, por lo que nuevamente se tendrá que comunicar este motor con el software.

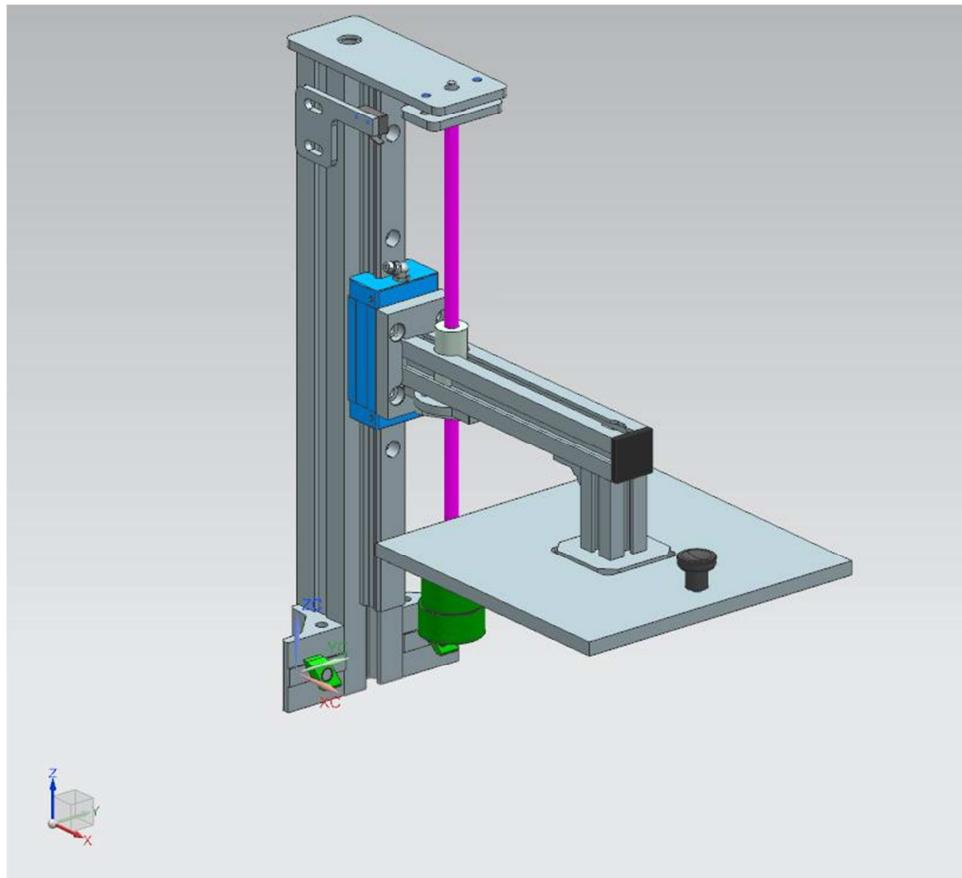
### 6.3. COLUMNA.

Sobre esta columna recorrerá la placa superior, la cual será la encargada de ascender según se vayan produciendo láminas de curado. En esta parte del sistema también se recomienda el uso de elementos comerciales. Para controlar el movimiento se utilizará un motor, el cual deberá estar comunicado con un driver que haga de enlace entre él y el ordenador. Para su control será necesario un software que podría desarrollarse en un futuro estudio.

La placa superior será donde se adhiera el material, ésta debe encajar con la cama. Puede verse un despiece de este elemento en el anexo J.

Para el tilt, descrito en el capítulo 3 apartado 3.4. Tilt, se dispondrá de un motor con una leva en su eje, la leva debe estar en contacto con la cama para ejercer el movimiento que la incline. Se utilizarán muelles para favorecer el retorno a la posición de origen de la cama y que la superficie se encuentre siempre a 180°. El motor deberá estar coordinado con el motor de la guía para ponerse en funcionamiento en el momento preciso, por lo que nuevamente se tendrá que comunicar este motor con el software. Puede verse una imagen en la siguiente figura.

## 6. Prediseño



**Figura 6.4.- Columna del sistema de fabricación aditiva.**

# 7. ANÁLISIS ECONÓMICO

## 7.1. ANÁLISIS DE LAS MEZCLAS.

En este primer apartado se analizan los precios de las distintas mezclas empleadas durante el proyecto. Los precios de estas mezclas se compararan con la de mezclas ya preparadas existentes en el mercado.

En la siguiente tabla se pueden observar los precios de las diferentes sustancias empleadas a lo largo del proyecto:

	Producto	Cantidad en lote	Precio lote [€]	€/litro	€/Kg.
RESINAS	Resina I	0,500 l.	85,60	171,20	152,86
	Resina II	1,000 l.	152,50	152,50	133,07
	Resina III	0,500 kg.	105,50	208,91	211,00
FOTOINCIADORES	BAPO	0,050 kg.	181,50	solido	3630,00
	HNU-470 IL	0,050 kg.	91,61	-	1832,20
	HNU 470 LT	0,050 kg.	91,61	-	1832,20
COLORANTES	SUDAN	0,025 kg.	19,70	solido	788,00

Tabla 7.1.-Precio de resinas, fotoiniciadores y colorantes.

Para realizar la conversión de volumen a masa en la resina I y II, se toman del fabricante sus densidades que vienen expresadas en la siguiente tabla:

Resina I	1,12 g/ml a 25°C
Resina II	1,146 g/ml a 25°C
Resina III	1.010 g/ml a 25°C

Tabla 7.2.-Densidades de las resinas.

En la siguiente tabla se detallan todas las mezclas realizadas durante el proyecto y el coste que tendrían:

		Concentración foto iniciador	Concentración resina	Cantidad Fotoiniciador [mg]	Cantidad Resina [mg]	Precio de la mezcla	Precio [€/Kg]
BAPO	RESINA I	1,79%	98,21%	0,20	10,98	2,40€	215,08
		2,00%	98,00%	0,23	11,18	2,54€	222,95
	RESINA II	1,75%	98,25%	0,20	11,23	2,22€	194,26
		2,00%	98,00%	0,24	11,67	2,42€	203,54
		5,00%	95,00%	0,61	11,59	3,76€	307,92
		8,00%	92,00%	1,01	11,62	5,21€	412,72
	RESINA III	1,98%	98,02%	0,20	9,90	2,81€	278,72
HNU-470 IL	RESINA I	5,00%	95,00%	0,60	11,36	2,84€	237,11
		2,00%	98,00%	0,24	11,68	1,99€	167,28
	RESINA II	5,00%	95,00%	0,62	11,71	2,69€	218,28
		8,00%	92,00%	1,01	11,66	3,40€	268,52
	RESINA III	5,00%	95,00%	0,55	10,44	3,21€	292,13

## 7. Análisis económico

HNU-470 LT	RESINA I	5,00%	95,00%	0,59	11,18	1,71€	145,19
	RESINA II	5,00%	95,00%	0,61	11,68	2,67€	217,41
	RESINA III	5,00%	95,00%	0,59	10,25	3,24€	299,24

Tabla 7.3.-Precio de las mezclas empleadas en el proyecto.

A continuación se pueden ver los precios de las resinas que se comercializan, ya preparadas para máquinas de fabricación aditiva donde se cura el material:

	Cantidad lote	Precio lote	€/litro
<b>UV-CAST™ 9663</b>	1 litro	183,00	183,00
<b>SOLAREZ 3-D PRINTING RESIN 79901</b>	3,786 litros	189,62	50,09

Tabla 7.4.-Precio de resinas fotocurables.

A la vista de los precios mostrados en las tablas anteriores, se considera que comprar una mezcla preparada sale económicamente mejor para el usuario. El problema surge cuando estas resinas no han sido preparadas específicamente para un sistema, y como se ha dicho a lo largo de este proyecto cada máquina tiene unos puntos de trabajo óptimos. Por consiguiente si las resinas preparadas son capaces de trabajar de manera correcta para las especificaciones de la máquina, conviene comprar mezclas preparadas, pero si se quiere un funcionamiento óptimo, lo mejor es elaborar una mezcla ideal para cada sistema.

## 7.2. PRECIO DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA.

A continuación se detallan los precios de los elementos mencionados en el capítulo 3 de esta memoria:

Elemento	Nombre del producto	Cantidad lote	Precio lote
<b>Teflón</b>	DuPont FEP film	0.025 x 305 x 609 mm	1.46 €
<b>Silicona</b>	Sylgard 184 silicone kit	500 gramos	37.27 €
<b>Plexiglás</b>	Plexiglass® GS	3 mm x 1 m <sup>2</sup>	56 €
<b>Vidrio</b>	Vidrio laminado incoloro	3 mm x 1 m <sup>2</sup>	53€
<b>Proyector</b>	Acer x1311kw	1	331.04€

Tabla 7.5.- Precio de elementos del sistema.

De los precios se extrae la conclusión de que es más interesante el uso de láminas de teflón que de silicona, debido al alto precio de la silicona, la cual también necesita de un procesado para la obtención de los bloques sólidos que hagan de base.

---

## **8. CONCLUSIONES FINALES**

---

Se han abordado numerosos temas durante el desarrollo de este proyecto. En la memoria se ha intentado explicar de la manera más precisa, las nociones básicas para comprender este tipo de sistemas.

Uno de los objetivos de este proyecto era el prediseño de un sistema de fabricación aditiva basado en la tecnología DLP. Esto se ha conseguido detallando, explicando y analizando los distintos factores que están involucrados en su funcionamiento. En el capítulo 2 se explicó las tecnologías necesarias para un sistema de esto. Seguidamente en el capítulo 3 se detallaron una serie de elementos básicos, necesarios para el funcionamiento de los sistemas de fabricación aditivos, que realizan curado mediante luz.

Teniendo en cuenta el curado se prosiguió a analizar en el capítulo 4 la función de curado de este tipo de sistemas. En él, se buscó plantear las bases para la caracterización de la función de curado de los sistemas de fabricación aditiva, basados en tecnología DLP, para ello se explicó brevemente en qué consiste el curado y se procedió a desarrollar los elementos que intervienen en él. En el capítulo 5 se mostraron los resultados de los experimentos diseñados, en base a la información que venía recogida en el capítulo anterior.

En el capítulo 6 se abordó el prediseño de un sistema tomando como partida lo descrito en los capítulos anteriores.

En el tema 7 se dieron los datos económicos de los elementos empleados durante el proyecto. Y por otro lado se realizó un análisis de costes sobre las mezcla de resina y fotoiniciador, comparando estos costes con los existentes en el mercado.

Por último, se finalizará exponiendo las conclusiones extraídas a lo largo de este proyecto, y se darán las líneas futuras por la que puede continuar este campo.

### **8.1. CONCLUSIONES.**

Este proyecto sirve como punto de partida para la elaboración el diseño más complejo de un sistema de fabricación aditiva, basado en tecnología DLP, con el cual se puedan realizar más pruebas para conocer su funcionamiento a la perfección. Se han explicado muchos factores sobre estos sistemas, llegando a las conclusiones que se explican en el capítulo 6, en el cual se eligieron los elementos que eran mejor opción para este tipo de sistemas, pero sin olvidar las alternativas, las cuales en un futuro se pueden considerar para otros estudios.

En cuanto al mecanismo de curación se concluye, que es un mecanismo difícil de caracterizar sin un banco de pruebas que simule de manera más precisa el funcionamiento de una máquina de fabricación aditiva. Los factores que influyen en el curado son muy variables, siendo muy importante mantener unas condiciones similares tras cada experimento. Las pruebas realizadas han dejado al descubierto la dificultad de caracterizar el comportamiento de este tipo de mezclas.

Profundizando en la curación, se ha llegado a la conclusión de que muchas mezclas necesitan de un proceso de postcurado una vez finalizada la polimerización. Esto es

## 8. Conclusiones finales

porque una vez que se extraen, las superficies de las piezas están viscosas, debido a que el curado no se ha completado.

Por otro lado, se ha podido comprobar cómo la radiación UV favorece el proceso de curación. Esto indica que un sistema que utilice este tipo de luz podrá curar con mayor velocidad y calidad, obteniendo mejores resultados. Pero existe el problema de que los sistemas DLP reducen su vida útil cuando utilizan la radiación ultravioleta, por lo que quedan enfrentados la calidad final de las piezas con la durabilidad del sistema.

En cuanto a las mezclas con las que se ha experimentado, se llega a la conclusión de que el factor más importante en ellas es el fotoiniciador y su concentración. Esta sustancia es la responsable de que el proceso de curación se realice con velocidad, y su concentración influye en el comportamiento ante el curado más que otros factores como el tiempo de curación. Durante este proyecto se han dado los resultados obtenidos con distintas mezclas. A continuación se darán las que según se ha visto son consideradas las mejores y con las cuales se debería seguir estudiando:

- Bapo+RI para una concentración del 2%. Se utilizó en el experimento 4 y 5 obteniendo unos resultados que mostraban un comportamiento adecuado, tanto a la hora de la curación, como después de esta. También era muy manejable dado que no era muy viscosa. Su precio, como se pudo ver en el capítulo 7 no es muy elevado, aunque era alto en comparación con las existentes en el mercado.
- Bapo+RII para una concentración del 5%. Con ella se conseguía llegar al límite de manera más rápida y su comportamiento es el mejor de todos. Como la mezcla anterior su precio es de los más bajos en comparación a las otras mezclas utilizadas. El problema de esta mezcla radica en su viscosidad, la cual dificulta el trabajar con ella, y produciría problemas de funcionamiento con el tilt explicado en el capítulo 3.

Por último, se concluye haciendo hincapié en la importancia que van a adquirir este tipo de sistemas en el futuro, ya que permiten compatibilizar la calidad de las piezas obtenidas con el precio de las máquinas. Uno de los mayores problemas de estas máquinas es el alto precio que tenían, pudiendo ser solo usuarios las grandes empresas. Estudiando esta tecnología se ha podido comprobar el fuerte tirón que tienen actualmente, el cual en un futuro podrá asentar este tipo de sistemas en un mayor número de usuarios.

## 8.2. LÍNEAS FUTURAS.

La realización de este proyecto abre numerosos caminos para el estudio.

El primero de todo es una mayor caracterización de las resinas y fotoiniciadores. Experimentando su efecto en una franja por debajo de los 8 segundos, comprobando la caducidad de las mezclas y realizando ensayos mecánicos sobre probetas curadas.

Además de estos ensayos se puede plantear la elaboración de una mezcla con una fórmula propia, o el estudio de más resinas existentes en el mercado.

Por otro lado, se puede plantear la fabricación de un banco de pruebas para ensayos con el cual se pueda profundizar en el comportamiento de los sistemas de fabricación aditivo.

Como fin último se puede empezar el diseño completo de una máquina de fabricación aditiva basada en tecnología DLP. Este diseño podrá contener todos los datos necesarios para llegar incluso a plantear una comercialización y el diseño de su proceso productivo.

## 8. Conclusiones finales

---

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 1. William D. Callister, Jr. Editorial Reverté
- [2]Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 2. William D. Callister, Jr. Editorial Reverté
- [3]Foro de Yahoo sobre impresion 3D.  
[http://tech.groups.yahoo.com/group/diy\\_3d\\_printing\\_and\\_fabrication/messages](http://tech.groups.yahoo.com/group/diy_3d_printing_and_fabrication/messages)
- [4]Página web sobre impresion 3D.  
<http://3dprinter.wikitot.com/>
- [5]Artículo en la página de web de la empresa 3D Systems sobre la historia de la tecnología DLP. <http://www.3dsystems.com/30-years-innovation>
- [6]UV & EB Chemistry and tecnology. Jo Ann Arceneaux, Kurt Willard. Cytec.  
<http://72.52.184.8/~radtecho/pdfs/PrinterGuideChemistry.pdf>
- [7] Poly(ethylene glycol) diacrylate. (RESINA I)  
<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/437441?lang=es&region=ES>
- [8] Bisphenol A ethoxylate diacrylate (RESINA II)  
<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/413550?lang=es&region=ES>
- [9] 1,6-Hexanediol diacrylate (RESINA III)  
<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/246816?lang=es&region=ES>
- [10] Phenylbis(2,4,6-trimethylbenzoyl)phosphine oxide (BAPO)  
<http://www.sigmaaldrich.com/catalog/product/aldrich/511447?lang=es&region=ES>
- [11] NNU 470 IL.  
<http://www.sglinc.com/Portals/0/Images/limited/PDFS/photoinitiators/H-NU%20400IL%20blend%20TDS.pdf>
- [12]HNU 470 LT.  
<http://www.sglinc.com/Portals/0/Images/limited/PDFS/photoinitiators/H-Nu%20470%20LT%20TDS.pdf>
- [13]Optical System Design in Projection Display. Hsi-Chao Chen.

