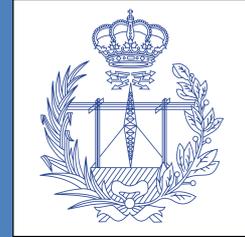




UNIVERSIDAD DE VALLADOLID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN

# TRABAJO FIN DE GRADO

---

*Fabricación de Material de laboratorio con  
impresora 3D*

GRADO EN INGENIERÍA TECNOLOGÍAS ESPECÍFICAS DE TELECOMUNICACIÓN  
MENCION SISTEMAS ELECTRÓNICOS

AUTOR: María Parro Fijo  
TUTOR: Juan Carlos García Escartín

Julio 2016

---



TÍTULO: Fabricación de material de laboratorio con impresora 3D

AUTOR: María Parro Fijo

TUTOR: Juan Carlos García Escartín

DEPARTAMENTO: Teoría de la Señal y Comunicaciones e Ingeniería Telemática

Miembros del tribunal

PRESIDENTE: Pedro Chamorro Posada

VOCAL: María Jesús González Morales

SECRETARIO: Julio Sánchez Curto

FECHA LECTURA: 25 Julio 2016

CALIFICACIÓN:



## Resumen del proyecto

Este proyecto tiene como objetivo la fabricación de un banco óptico mediante una impresora en 3D, con la finalidad última de llevar a la práctica, mediante el material fabricado, experimentos tales como el cálculo del ángulo de Brewster y el cálculo del índice de refracción de un material en concreto. Este trabajo engloba todos los pasos de un proceso de fabricación al completo, dado que se ha tenido que realizar el diseño, fabricación y modificación de cada una de las piezas que se han utilizado para llevar a cabo los experimentos antes expuestos. Para concluir, cabe destacar que los resultados obtenidos han sido muy precisos y satisfactorios en cada uno de ellos.



## Abstract

The main objective of this project is the construction of an optical bench with the use of a 3D printer. The essential aim is to perform several experiments such as the calculus of the Brewster angle and the calculus of the refraction index of different material. This project involves all the steps required in the whole process of manufacturing: design, construction and modification of all the different pieces used to carry out the experiments named before. To conclude, it is remarkable that the obtained results have been quite accurate and satisfying in each of them.



## Palabras clave

Impresión 3D, refracción, reflexión, difracción, Brewster, Snell, Fresnel.



## Agradecimientos

*Este es el segundo proyecto fin de carrera que realizo, siendo ya titulada en Ingeniería Técnica de Sistemas de Telecomunicación.*

*Ha sido un periodo de mi vida dónde lectivamente, aunque suene paradójico, he recuperado el tiempo "perdido", ya que he estudiado una especialidad más acorde a mis gustos, he podido seguir aprendiendo sobre el basto mundo de las telecomunicaciones y en el que creo que he crecido profesionalmente gracias al esfuerzo personal desarrollado.*

*Pero a pesar de este esfuerzo y mi motivación por sacar esta carrera de la mejor forma posible en relación calidad/tiempo, nada de ello sería posible si no tuviese la enorme suerte de tener, personalmente, la vida que tengo.*

*Me emociono al escribir esto y eso que llevo 5 horas sin despegarme de la silla con un calor asfixiante, y me emociono porque realmente lo siento como lo bailo, y tal y tal.*

*Gracias a la vida en general por todo lo que tengo, por la enorme suerte de ser hija de quien soy, un gran hombre detrás de una gran mujer, y por haberme encontrado con todas y cada una de las personas y situaciones a lo largo de estos 30 años.*

*Gracias, gracias y mil veces gracias.*

*P.D: No cesaré en mi empeño de intentar aplicar todo lo que he aprendido, por poco que sea, en hacer de esta, una vida mejor gracias a la tecnología.*

## ÍNDICE DE IMÁGENES

|   |    |
|---|----|
| Imagen 1. Detalle del proceso de impresión de un modelo 3D.....   | 4  |
| Imagen 2. Flujo de trabajo de impresión 3D inicial hasta obtener la pieza final impresa.....                | 4  |
| Imagen 3. Fragmento de código Gcode .....   | 5  |
| Imagen 4. Tipos de materiales imprimibles.....  | 7  |
| Imagen 5. Clasificación de los principales métodos de impresión 3D y los materiales que se pueden usar..... | 8  |
| Imagen 6. Principio de funcionamiento de tecnología FF.....   | 9  |
| Imagen 7. Esquema general de una máquina tipo FFF.....  | 10 |
| Imagen 8. Posicionamiento relativo del cabezal extrusor respecto de la plataforma.....                      | 10 |
| Imagen 9. Posicionamiento de los ejes cartesianos de una impresora 3D FFF.....                              | 11 |
| Imagen 10. Fotografía de impresora 3D Darwin, primera RepRap.....   | 13 |
| Imagen 11. Izquierda, impresora Legio. Derecha, impresora original Prusa i3.....                            | 14 |
| Imagen 12. Impresora Legio 3D.....  | 16 |
| Imagen 13. Conjunto de los distintos elementos del eje X ya montados en la máquina. Vista 1.....            | 17 |
| Imagen 14. Conjunto de los distintos elementos del eje X ya montados en la máquina. Vista 2.....            | 17 |
| Imagen 15. Detalle de los distintos elementos del eje Y ya montados en la máquina.....                      | 18 |
| Imagen 16. Detalle de los distintos elementos del lado izquierdo del eje Z.....                             | 19 |
| Imagen 17. De izquierda a derecha. Barras cromadas, husillos roscados y acopladores husillo-motor.....      | 20 |
| Imagen 18. Cabezal de extrusión montado y los distintos elementos que lo forman.....                        | 21 |
| Imagen 19. Soporte de filamento y bobina transparente de impresora Legio.....                               | 22 |
| Imagen 20. Pantalla LCD Legio.....  | 22 |
| Imagen 21. Rollos de filamento de distintos termoplásticos para impresión 3D.....                           | 23 |
| Imagen 22. Características de los materiales I.....   | 26 |
| Imagen 23. Características de los materiales II.....  | 26 |
| Imagen 24. Impresora Legio. Vista frontal.....  | 27 |
| Imagen 25. CAPA 1. Montaje.....   | 29 |

|   |    |
|---|----|
| Imagen 26. Capa 2. Montaje.....                                       | 30 |
| Imagen 27. Capa 3. Montaje.....                                       | 30 |
| Imagen 28. Despiece del montaje de extrusor (1).....                  | 31 |
| Imagen 29. Despiece del montaje de extrusor (2).....                  | 32 |
| Imagen 30. Despiece del montaje del eje X.....                        | 32 |
| Imagen 31. Montaje del montaje del eje X.....                         | 33 |
| Imagen 32. Despiece del montaje de la cama caliente.....              | 33 |
| Imagen 33. Despiece del montaje de la cama caliente con eje Y.....    | 34 |
| Imagen 34. Montaje de cama caliente con eje Y.....                    | 34 |
| Imagen 36. Despiece del montaje del eje Z.....                        | 35 |
| Imagen 37. Ensamble de todos los ejes.....                            | 36 |
| Imagen 38. Colocación de fuente y soporte bobina.....                 | 37 |
| Imagen 39. Colocación pantalla LCD.....                               | 38 |
| Imagen 40. Esquema electrónico de placa de impresora.....             | 39 |
| Imagen 41. Colocación tapas electrónica.....                          | 40 |
| Imagen 42. Reflexión de la luz.....                                   | 42 |
| Imagen 43. Refracción de la luz.....                                  | 43 |
| Imagen 45. Refracción de la luz (2).....                              | 43 |
| Imagen 46. Reflexión de la luz (2).....                               | 44 |
| Imagen 47. Polarización ondas electromagnéticas.....                  | 46 |
| Imagen 48. Descomposición del campo eléctrico en dos componentes..... | 46 |
| Imagen 49. Tipos de Polarización.....                                 | 47 |
| Imagen 50. Filtro Polarizador.....                                    | 48 |
| Imagen 51. Mecanismo de polarización.....                             | 49 |
| Imagen 52. Ángulo de Brewster.....                                    | 50 |
| Imagen 53. Geometría de la difracción.....                            | 51 |
| Imagen 54. Módulos de la pieza Tablero.....                           | 54 |

|  |    |
|--|----|
| Imagen 55. Primeras medidas muescas Tablero.....   | 56 |
| Imagen 56. Impresión de las 4 muescas Tablero.....   | 56 |
| Imagen 57. Tablero completo. Unión 4 módulos.....  | 57 |
| Imagen 58. Láseres utilizados para realizar los experimentos.....  | 57 |
| Imagen 59. Soportes láseres.....   | 58 |
| Imagen 59. Pulsador láser pequeño.....   | 58 |
| Imagen 60. Diseño original de pantalla.....  | 59 |
| Imagen 61. Diseños finales de la pieza Pantalla.....   | 59 |
| Imagen 62. Diseño original del disco de Hartl.....   | 60 |
| Imagen 63. Pieza de unión entre disco y tablero.....   | 60 |
| Imagen 64. Diseño mejorado de disco de Hartl.....  | 61 |
| Imagen 65. Segundo modelos disco Hartl.....  | 61 |
| Imagen 66. Diseño final del disco de Hartl.....  | 61 |
| Imagen 68. Soporte final para cristal.....   | 62 |
| Imagen 69. Mismo diseño de rendija fabricada con 2 colores diferentes.....   | 62 |
| Imagen 70. Soporte final rendija.....  | 63 |
| Imagen 71. Diseño original disco de Brewster.....  | 64 |
| Imagen 72. Diseño final disco de Brewster.....   | 64 |
| Imagen 73. Pieza Pyramid.....  | 65 |
| Imagen 74. Pieza Anubis.....   | 65 |
| Imagen 75. Pieza Pharaoh.....  | 65 |
| Imagen 76. Piezas fabricadas durante el desarrollo del proyecto.....   | 66 |
| Imagen 77. Montaje de los experimentos. Izquierda cálculo de índice de refracción. Derecha práctica ángulo Brewster..... | 67 |
| Imagen 78. Máxima longitud de onda visible ojo humano.....   | 68 |
| Imagen 79. Máximos diferentes colores y longitudes de onda.....  | 68 |
| Imagen 80. Dispersión de Rayleigh .....  | 69 |
| Imagen 81. Disco Brewster. Muesca a $56.3^\circ$ y otra a $41.8^\circ$ .....   | 69 |

|   |    |
|---|----|
| Imagen 82. Tablero completo.....  | 70 |
| Imagen 83. Láser usado en el experiment.....  | 70 |
| Imagen 84. Soporte láser.....   | 71 |
| Imagen 85. Disco Brewster con cristal a $56.3^\circ$ .....                          | 71 |
| Imagen 86. Soporte polarizador.....   | 72 |
| Imagen 87. Pantallas.....   | 73 |
| Imagen 88. Puesta en práctica del experimento ángulo Brewster.....                  | 73 |
| Imagen 89. Montaje experimento cálculo del índice de refracción de un material..... | 74 |
| Imagen 90. Tablero completo.....  | 75 |
| Imagen 91. Láser usado en el experimento.....                                       | 76 |
| Imagen 92. Soporte láser grande.....  | 76 |
| Imagen 93. Soporte cristal para disco Hartl.....                                    | 77 |
| Imagen 94. Soporte rendija.....   | 77 |
| Imagen 95. Pantallas.....   | 78 |
| Imagen 96. Refracción.....  | 79 |
| Imagen 97. Puesta en práctica del experimento.....                                  | 79 |
| Imagen 98. Reflexión interna total.....   | 80 |
| Imagen 99. Puesta en práctica de la reflexión interna total.....                    | 81 |
| Imagen 100. Posiciones iniciales del KHET.....                                      | 84 |



|                |   |           |
|----------------|---|-----------|
| 3.3.4          | Obtención de luz polarizada.....                                | 50        |
| 3.4            | Ángulo de Brewster.....   | 51        |
| 3.5            | Patrones de difracción de Fresnel.....                          | 53        |
| <b>4.</b>      | <b>DISEÑO DE LAS PIEZAS Y AJUSTES.....</b>                      | <b>55</b> |
| 4.1            | Piezas comunes.....   | 55        |
| 4.1.1          | Tablero.....  | 55        |
| 4.1.2          | Soporte de Láser.....   | 58        |
| 4.1.3          | Pantallas.....  | 59        |
| 4.2            | Piezas particulares.....  | 60        |
| 4.2.1          | Experimento cálculo de índice de refracción de un material..... | 60        |
| 4.2.1.1        | Disco de Hartl.....   | 60        |
| 4.2.1.2        | Soporte para cristal.....                                       | 62        |
| 4.2.1.3        | Rendija.....  | 63        |
| 4.2.2          | Experimento cálculo ángulo de Brewster.....                     | 64        |
| 4.2.2.1        | Disco de Brewster.....  | 64        |
| 4.2.3          | KHET. Laser chess.....  | 65        |
| 4.2.3.1        | PYRAMID.....  | 65        |
| 4.2.3.2        | ANUBIS.....   | 65        |
| 4.2.3.3        | PHARAOH.....  | 66        |
| <b>5.</b>      | <b>ENUNCIADO PRÁCTICAS.....</b>                                 | <b>67</b> |
| 5.1            | Teoría aplicada a los experimentos.....                         | 67        |
| 5.2            | Cálculo del ángulo de Brewster.....                             | 68        |
| 5.3            | Cálculo de índice de refracción de un material.....             | 74        |
| Experimento A. | Refracción de la luz.....                                       | 78        |
| Experimento B. | Reflexión interna total.....                                    | 80        |
| 5.4            | KHET. Laser Chess.....  | 82        |
| <b>6.</b>      | <b>CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....</b>                       | <b>85</b> |
|                | <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>                                       | <b>87</b> |

ANEXO I: FICHEROS .STL DE TODAS LAS PIEZAS

## 0. OBJETIVOS

El objetivo de este proyecto es fabricar mediante una impresora 3D, un banco óptico útil para la enseñanza tratando de realizar la demostración de diferentes tipos de experimentos. En relación al objetivo del proyecto se pueden destacar los siguientes puntos:

- Introducción al mundo de la impresión 3D y del hardware libre.
- Construcción de una impresora 3D, modelo Legio.
- Puesta en funcionamiento de la impresora 3D: calibración y ajuste de elementos concretos del hardware (motores paso a paso, extrusor y cama caliente) y parámetros del software. Se imprimirán piezas de prueba para detectar y corregir errores.
- Diseño y modelado de piezas de bajo coste para ensayos y/o experimentos de carácter libre.
- Fabricación de piezas para un banco óptico con carácter educacional.
- Documentación de las sesiones de trabajo, a modo de diario de laboratorio, indicando los pasos seguidos para la construcción de la impresora, posibles problemas y dificultades que surjan durante estas, así como las soluciones encontradas para remediarlos.
- Puesta en práctica de los experimentos ópticos para los que se desarrollaron las piezas.

Este documento puede dividirse a grandes rasgos en 2 etapas claramente diferenciadas, por un lado, la etapa inicial se concentra en poner en funcionamiento la impresora, la cual se tuvo que montar completamente.

Una vez se hubo alcanzado el nivel óptimo de impresión por parte de la impresora, se pasó a la etapa de estudio, diseño y construcción de un banco óptico de carácter educacional apto para la implementación de los experimentos o ensayos seleccionados.

Las razones por las que decidí elegir este proyecto como Trabajo Fin de Grado, fueron varias. La principal fue que el mundo de la impresión en 3D, en mi opinión, es un sector con grandes campos potenciales por explorar, con mucho camino por delante en los que seguir avanzando y de gran utilidad.

Estas fueron las principales razones que me llevaron a aceptar la oferta propuesta por mi tutor de aprovechar este potencial de la impresión 3D, para darle un uso abierto y educacional surgiendo así la idea de fabricar un banco óptico con el objetivo de que cualquier centro docente pudiera crear el suyo propio para su uso en las aulas, con un bajo coste y un fácil mantenimiento, ya que todas las piezas podrán ser reconstruidas a través de la propia

impresora.

Por último, por qué no decirlo, otra razón por la que elegí este proyecto la posibilidad de fabricar objetos que se ajusten a mis necesidades, entre los que se incluyen piezas para la construcción de nuevas impresoras 3D. Con práctica, el usuario puede diseñar con un software de modelado 3D objetos y piezas, contando con que en Internet existen gran número de páginas web que recopilan modelos tridimensionales, muchos de ellos gratuitos.

Esta situación presenta dos ventajas principales: por un lado está el tema de la personalización, ya que se puede buscar el modelo que mejor se adapte a nuestros gustos y/o necesidades o incluso, a partir de un modelo inicial, hacer las modificaciones que se necesiten. Por otro lado está la cuestión del coste. El consumible que utilizan se suelen vender en bobinas de 1 o 2 kilogramos y tienen un precio que resulta barato en relación a la cantidad de objetos que podemos fabricar con él.

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Introducción a la Impresión en 3D

A partir de un modelo 3D digital, ya haya sido creado este mediante un software de CAD 3D o partir de un escáner 3D, existen en el mercado múltiples posibilidades para materializarlo de forma física. Así, entre los procedimientos que pueden ser empleados tenemos, de forma muy general:

- Métodos de construcción por conformado.
- Métodos sustractivos.
- Métodos aditivos.
- Métodos indirectos.

Dentro de las técnicas aditivas, que son aquellas en las que el objeto se construye como la unión de distintas partes, por ejemplo, mediante soldaduras, pegados o mediante uniones mecánicas, partes que a su vez pueden ser construidas por separado a partir de cualquiera de los otros métodos citados en esta clasificación, se encuentra la impresión en 3D.

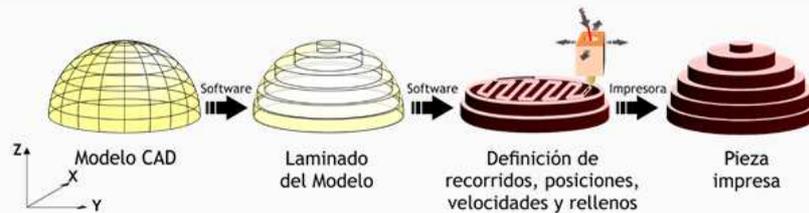
La forma habitual en las que las impresoras 3D construyen un objeto es por la agregación sucesiva de material según una serie de capas (“layers”) predefinidas.

### 1.1.1 Ventajas de la impresión en 3D

Como ventajas de la impresión 3D sobre otros métodos, podemos remarcar de forma general estos puntos:

- Se eliminan prácticamente todos los desperdicios, ya que sólo se aporta el material exclusivamente necesario para fabricar las piezas, y aquellas con defectos pueden ser recicladas completamente.
- Se puede optimizar el material empleado mediante modificaciones de diseño, lo que permite conseguir incluso piezas más resistentes y ligeras
- Se pueden reducir conjunto de piezas, reduciendo el número de operaciones de ensamblaje finales y aumentando la fiabilidad del producto resultante.
- Se pueden sustituir ciertos materiales tradicionales por otros nuevos que pueden imprimirse y que igualan o mejoran las prestaciones de los empleados anteriormente.

Sea cual sea la tecnología de impresión 3D escogida, todas tienen en común una etapa previa, que consiste en laminar (“slice”) el modelo 3D digital. Esta laminación deberá ser la adecuada para que el objeto pueda ser construido por el tipo de impresora 3D seleccionado. Para este proceso de laminado y del posterior control del proceso de adición del material, se requiere de software específicamente desarrollado para ello.



**Detalle del proceso de impresión de un modelo 3D, desde su laminado en capas, la elaboración de las ordenes de control y, finalmente, la pieza impresa definitiva**

Imagen 1. Detalle del proceso de impresión de un modelo 3D [1]

A partir del laminado definitivo, el software elabora un fichero de control que será enviado a la impresora 3D, en forma de código G análogo al empleado en máquinas de control numérico (“G-codes”), que contiene las distintas órdenes a ejecutar de forma secuencial por las partes de impresora 3D para crear la pieza (movimientos de motores, rutas, on-off de inyectores, tiempos, velocidades, etc.). Un ejemplo de este código puede verse a continuación con algunas líneas extraídas de un fichero G-code común.

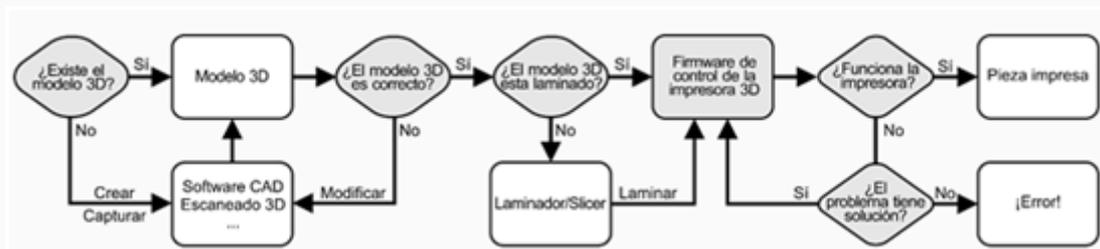


Imagen 2. Flujo de trabajo de impresión 3D inicial hasta obtener la pieza final impresa [1]

### Ejemplo de código de un fichero G-code

```
G21;          set units to millimeters
M107
G28;          Home all axes
G90;          Absolute positioning
M107;         Start with fan off
G92 E0;       Zero the extruder length
G1 F200 E2    Extrude 2mm
G92 E0;       Zero the extruder length
G90;          use absolute coordinates
G92 E0
M82;          use absolute distances for extrusion
G1 F15000.000 E-1.00000
G1 Z0.600 F60000.000
G92 E0
G1 X66.116 Y90.905 F60000.000
G1 Z0.300 F60000.000
G1 E1.00000 F15000.000
G1 X66.930 Y90.346 E1.03124 F2880.000
G1 X67.592 Y89.935 E1.05589
...
G1 E1.00000 F15000.000
G1 X83.471 Y103.089 E1.09857 F2057.573
G1 F15000.000 E0.09857
G1 Z2.805 F60000.000
G92 E0
```

Imagen 3. Fragmento de código Gcode [1]

Los parámetros de configuración (espesor de capa, velocidades, temperaturas, tiempos, etc...) a partir de los que se crean estos ficheros dependerán en gran medida de la tecnología de impresión 3D, de los parámetros de configuración de la propia impresora en particular, de los materiales empleados y de las características deseadas para la pieza (acabados superficiales, resistencias mecánicas, etc.).

### 1.1.2 Clasificación de las Tecnologías de impresión 3D

La variedad de métodos aditivos desarrollados para impresión 3D es realmente grande y continuamente aparecen nuevas innovaciones en el sector. La principal clasificación de los métodos aditivos responde a la similitud de la técnica que es empleada para crear y procesar las capas del material que darán lugar al objeto final. Así, podemos distinguir los siguientes tipos de tecnología de impresión 3D:

- *Método fundido por calentamiento:* Métodos en los que se usa fundido por calentamiento de un material (caso de los termoplásticos) o su ablandamiento bajo ciertos tratamientos (caso de hormigones, pastas aglutinantes...) para llevarlos hasta

un estado de fluidez adecuado que permita utilizarlos en un proceso de inyección. La deposición sucesiva de capas de material unas sobre otras y su posterior consolidación en condiciones ambiente para formar un único bloque sólido, da lugar al producto final.

- *Método polímero fotosensible:* Métodos en los que un material dado, usualmente un polímero fotosensible en estado líquido situado dentro de un recipiente, es depositado para formar la pieza en un proceso de curado sobre la propia superficie de la misma. El proceso de curado se produce al someter al polímero a algún tipo de radiación específica (foto polimerización, láser) localizada en esas zonas, de forma que la pieza crece capa a capa inmersa en un polímero sin curar.

- *Métodos por inyección o aerosol:* Métodos por inyección o aerosol, similares a la impresión por chorro de tinta en impresoras 2D, en los que el material fotopolimérico es lanzado por un inyector en forma de finos chorros. Estos crean una matriz de pequeñas gotas pulverizadas sobre la superficie del objeto en crecimiento, para solidificarse de inmediato a continuación al aplicar una radiación localizada en esa zona (luz ultravioleta, laser...). Variantes del método utilizan chorros de aglutinante (ceras, epoxy...) que son proyectados sobre una base de polvo (yeso, celulosa...) de forma que la mezclarse se solidifican y forman una nueva capa.

- *Métodos de sinterizado:* Métodos por sinterizado, en los que un material en forma de polvo o pequeñas bolitas (termoplásticos, nylon...) a veces, previamente compactado, se funde al aplicar de forma localizada una fuente de calor o de luz intensa, como un láser. Cada pasada del proceso da lugar a una capa sólida con una forma predefinida y que queda adherida en el proceso a la capa formada previamente.

- *Métodos cada capa es tratada y cortada por separado:* Métodos en los que cada capa es tratada y moldeada/cortada por separado para ser posteriormente unidas mediante algún tipo de tratamiento que permita componer el objeto final (pegado con adhesivos, uniones metálicas, soldaduras térmicas...)

### 1.1.3 Materiales de impresión 3D

Un criterio secundario que pueden usarse para clasificar las diferentes tecnologías sería el de los materiales que pueden ser empleados para construir las piezas en función de la técnica empleada. Así, la variedad de materiales que pueden usar en impresión 3D va desde:

#### Materiales que se pueden usar en impresión 3D

- **materiales plásticos**, ya sean termoplásticos por fusión o plásticos termoestables a partir de procesos de polimerización
- **materiales metálicos**, como acero para herramientas, aluminio, y múltiples tipos de aleaciones metálicas, como níquel-cromo, cromo-cobalto, aleaciones de oro, titani, etc...
- **materiales cerámicos**
- **papel, celulosas**
- **ceras**, combinadas con otros materiales de sustrato, como **arenas, yesos**, etc...
- materiales de construcción, como **hormigones** y otras pastas
- **materiales biológicos**, como células, colágenos, etc...
- **alimentos**

Imagen 4. Tipos de materiales imprimibles [1]

El tipo de materiales que pueden utilizarse no deja de evolucionar a medida que se innova en la búsqueda de nuevas técnicas de impresión 3D y sus aplicaciones prácticas.

Finalmente, un aspecto muy a tener en cuenta es que cada una de las técnicas de impresión 3D presenta tanto una serie de ventajas y de desventajas. Hoy por hoy no hay una tecnología que sea netamente superior a las demás en todos los aspectos. Por ello es necesario decidir, si tenemos la posibilidad de escoger entre las diversas técnicas, cuál de ellas será a priori la más adecuada para elaborar una pieza. La decisión dependerá en gran medida de aspectos como:

- *Material de impresión.*
- *Forma de la pieza:* Hay técnicas que presentar ciertas dificultades a la hora de ejecutar ciertos tipos de características como voladizos, etc.
- *Calidad:* Tanto en lo referente al nivel de detalle como de acabado superficial y dimensional.
- *Requerimientos mecánicos y de durabilidad.*
- *Tiempo disponible.*
- *Factor económico.*

### 1.1.4 Principales tecnologías

La siguiente tabla presenta una clasificación resumida de las principales tecnologías de Impresión 3D, en función del método de adición de material y del material que puede ser empleado en cada uno de ellos. En la parte inferior, se ofrece indicación orientativa sobre la adaptación de las técnicas a cada uno de los posibles criterios de selección.

|                 |                         | Tecnologías   |   |   |   |
|-----------------|-------------------------|---|---|---|---|
| Proceso aditivo | Materiales de impresión | Piezas construidas por polimerización   | Piezas construidas mediante el uso de un agente aglutinante   | Piezas construidas mediante fusión  |   |
|                 | Cerámicas               |   |  <b>BJ</b><br>Binder Jetting<br>(Inyección de aglutinante) |  <b>SLM</b><br>Selective Laser Melting<br>(Sinterizado selectivo por láser)       |   |
|                 | Metal                   |   |   |  <b>EBM</b><br>Electron Beam Melting<br>(Fusión por haz de electrones)           |   |
|                 | Arena                   |   |   |   |   |
|                 | Plásticos               |  <b>SL</b><br>Stereolithography<br>(Estereolitografía) |  <b>PJ</b><br>Poly Jet<br>(Inyección de polímeros)       |  <b>FFF</b><br>Fused Filament Fabrication<br>(Fabr. mediante Filamento Fundido) |  <b>LS</b><br>Laser Sintering<br>(Sinterizado por Láser) |
|                 | Ceras                   |   |   |  <b>MJ*</b><br>Material Jetting<br>(Inyección de material)                     |   |
|                 | Durabilidad             | Baja  |   | Alta  |   |
|                 | Acabado superficial     | Suave   |   | Rugoso  |   |
|                 | Nivel de detalle        | Alto  |   | Bajo  |   |
|                 | Aplicabilidad           | Prototipos   Fabricación Indirecta   Moldes   |   | Piezas funcionales  |   |

\* Material Jetting (Inyección de material) produce piezas de acabado superficial suave y alto nivel de detalle

Imagen 5. Clasificación de los principales métodos de impresión 3D y los materiales que se pueden usar [1]

Hay que tener en cuenta que para cada uno de estos tipos de tecnologías de impresión existen múltiples variaciones, cuya diferencia es a veces difícilmente apreciable en la práctica, pero que reciben nombres comerciales diferentes por parte de los fabricantes. En este documento, la atención se centrará sobre la técnica más utilizada entre las impresoras 3D a nivel de iniciación particular, entre la comunicad “maker” y el sector semi profesional, la conocida como Modelado por Deposición Fundida (“Fused Deposition Modeling - FDM”) o a

veces también como Fabricación mediante Filamento Fundido (“Fused Filament Fabrication - FFF”).

El material empleado suele ser un termoplástico, mayoritariamente tipo PLA o ABS, que por lo general resultan bastante económicos. Este material se suministra habitualmente en forma de un filamento enrollado en forma de bobina (con diámetros del orden de milímetros, 3mm o 1.75, normalmente). Este filamento se funde al forzarle a pasar a través de un extrusor calentado a la temperatura adecuada, dando lugar a un flujo de material fundido de grosor calibrado mucho menor (diámetro de un orden de micras).

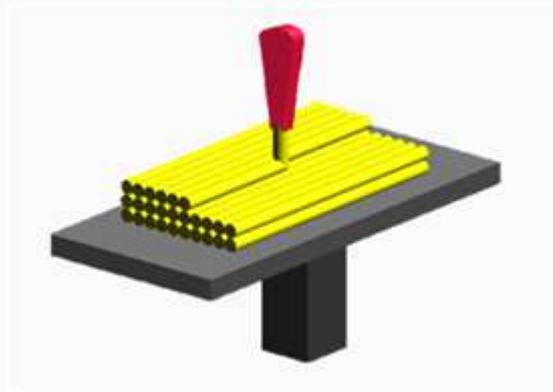


Imagen 6. Principio de funcionamiento de tecnología FF [1]

El control de la velocidad de extrusión y del movimiento relativo del extrusor respecto de la base de impresión (en los tres ejes posibles X, Y y Z) permite depositar el material en forma de sucesivas capas planas de un espesor predefinido. Al contactar con el material previamente depositado, el material de la nueva capa se fusiona con él antes de solidificarse por completo. El proceso se repite hasta completar la altura del objeto. La selección y control de los diferentes parámetros, como el diámetro del extrusor, velocidades, temperaturas, materiales, alturas de capa, densidad y tipos de mallados para los rellenos internos, etc., va a influir directamente sobre las características de la pieza obtenida (calidad de acabados, características mecánicas, etc...).

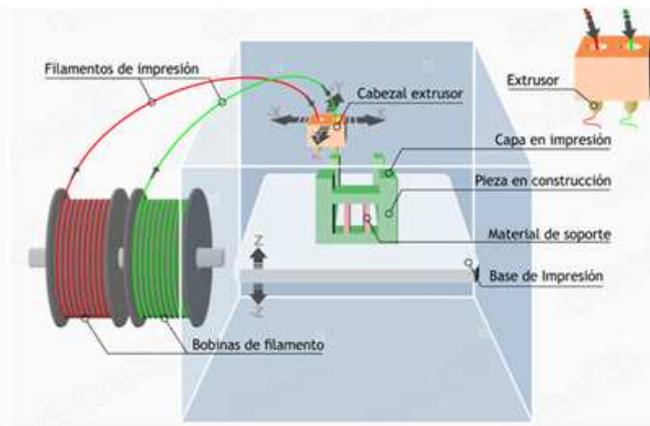


Imagen 7. Esquema general de una máquina tipo FFF [1]

Las máquinas más evolucionadas incorporan varios extrusores para diferentes materiales, que si bien no se pueden usar de forma simultánea sino alternativa, sí permiten la impresión de piezas con ciertas características adicionales, como diferentes colores, diferentes características mecánicas por zonas, el uso de materiales solubles en soportes para piezas complejas que desaparecen al sumergir la pieza en agua, etc.

Al tratarse de termoplásticos, el material del objeto impreso conserva, en principio, las características mecánicas y térmicas intrínsecas del material original y puede volver a ser reciclado y fundido de nuevo.

## 1.2 Estructura de una impresora 3D FFF

La tecnología de impresión 3D llamada Modelado por Deposición Fundida (“Fused Deposition Modeling - FDM”), también conocida como Fabricación mediante Filamento Fundido (“Fused Filament Fabrication - FFF”), parte de filamentos de materiales, generalmente termoplásticos, que son fundidos y depositados por capas hasta formar la pieza final partiendo de su modelo CAD en 3D.

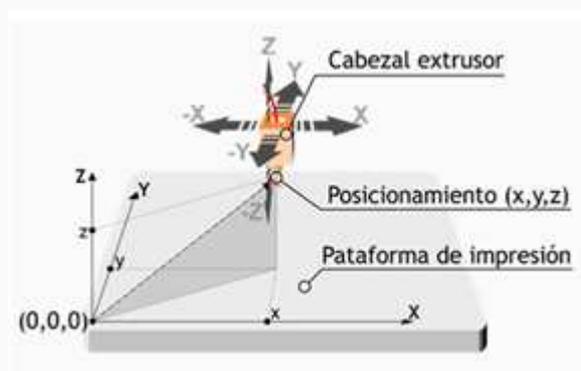


Imagen 8. Posicionamiento relativo del cabezal extrusor respecto de la plataforma [1]

El matiz “relativo” es importante porque, como se verá a continuación, no tiene por qué ser el extrusor el que realice los movimientos en los tres ejes cartesianos, sino que alguno o varios de ellos pueden ser realizados por la propia plataforma de impresión. Esto da lugar a que sean posibles múltiples configuraciones para una impresora 3D FFF. Antes de enumerarlas es necesario describir cómo se identifican los ejes de una impresora 3D.

Con la máquina situada en posición frontal respecto del usuario, la identificación de los ejes cartesianos de una máquina de impresión 3D FFF sería la siguiente:

- Eje X: Es el eje longitudinal, esto es, el correspondiente a los desplazamientos de izquierda a derecha.
- Eje Y: Es el eje transversal, esto es, el responsable de los desplazamientos en sentido adelante - atrás.
- Eje Z: Es el eje vertical, esto es, el correspondiente de los desplazamientos de arriba abajo.

Se suele tomar como origen de coordenadas ((X, Y, Z)=(0,0,0)) el punto más cercano al usuario situado a su izquierda donde es posible la impresión con la máquina. La siguiente figura ilustra este sistema de ejes.

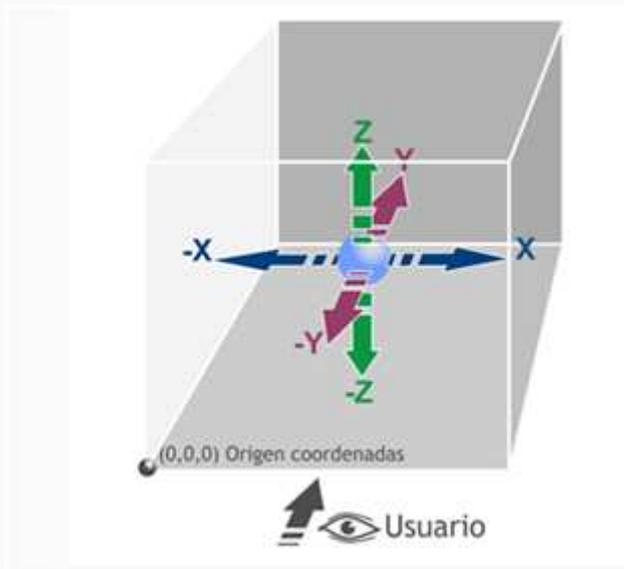


Imagen 9. Posicionamiento de los ejes cartesianos de una impresora 3D FFF [1]

Los tipos de configuraciones posibles son: (El término “head” hace referencia al cabezal del extrusor y “bed” a la cama o la plataforma de impresión)

- X, Y, Z Head.
- X, Y Head / Z Bed.
- X, Z Head / Y Bed.

- X Head / Y, Z Bed.
- X, Y, Z Bed.

En todo caso, e independientemente de la configuración que sea seleccionada, lo que se requiere para el buen funcionamiento de la máquina es un control correcto del movimiento relativo del extrusor respecto de la cama de impresión. Conseguido esto, desde el punto de vista teórico, los resultados obtenidos deberían ser independientes de la configuración elegida.

Sin embargo, en la práctica, esto no tiene por qué ocurrir así y, a la hora de decantarse por una configuración u otra, entran en juego criterios de diseño y de ingeniería. Criterios como los relacionados con las características de los materiales empleados para construir las partes de la máquina (materiales del chasis, distribución de los motores, transmisiones etc.), con las inercias que generan las masas en movimiento de las distintas piezas, con la facilidad de calibrado de las distintas partes, etc. Por ello cada configuración presentará ciertas ventajas y desventajas en función de estos criterios.

En este caso se trabajará con una impresora Legio, cuya configuración es la misma que las impresoras convencionales (X, Z Head / Y Bed).

Estas máquinas resultan más sencillas en su fabricación y control, pero pueden presentar, por el contrario, la desventaja de que muchos de los elementos que componen los ejes de la máquina, incluyendo motores, guías, etc. deben ser desplazados en bloque. Esto hace que se tengan masas importantes en movimiento que pueden dar lugar a fuerzas inerciales considerables y que deben ser consideradas en su diseño. Esto hace más difícil afinar el diseño si se desea trabajar con altas velocidades y aceleraciones, obligando, por ejemplo, a recurrir a motores de mayor potencia, a reforzar la estructura fija, etc. Por otra parte, también puede afectar a la calidad de los resultados obtenidos en la impresión debido a problemas relacionados con la aparición de vibraciones, ligeros flexamientos en ciertas partes de la estructura, etc.

Así, a modo de ejemplo, es fácil concluir que, en general, desplazar el cabezal extrusor implicará menos masa en movimiento (y además de valor fijo conocido), que tener que desplazar la plataforma de impresión, donde además podría encontrarse una pieza de gran volumen y masa (volumen variable). Menos masa en movimiento implica menos requerimientos mecánicos para el chasis, motores, sistemas de transmisión, menos vibraciones, etc. Esta es, entre otras, la razón de que las configuraciones donde la plataforma realiza desplazamientos en más de un eje sean las menos habituales.

### 1.2.1 Proyecto RepRap

Para explicar más en detalle las partes generales de una impresora 3D FFF, este documento se basará en uno de los proyectos más extendidos, el llamado RepRap, un

proyecto de arquitectura abierta (“*open source*”), que surgió con el objetivo de crear una máquina de prototipado rápido empleando impresión 3D que pudiese utilizarse para replicarse a sí misma (al menos las partes plásticas).

En la práctica, la filosofía de este tipo de máquinas se traduce en intentar incorporar el mayor número de piezas posible que pueda ser realizado por la propia máquina, y que sólo cierto número de piezas (generalmente aquellas con función estructural, como barras, chapas, husillos, etc.) sean componentes metálicos o electrónicos (motores, sensores, cableados, placas electrónicas, etc.), entre los que además se intenta ser lo más genérico y estandarizado posible. A partir del modelo base, la comunidad de desarrolladores y adeptos del movimiento “*maker*” es libre de realizar sus modificaciones y mejoras, lo que hace que la variedad de máquinas sea muy grande, aunque en esencia su funcionamiento sea el mismo.

La familia RepRap se ha ido extendiendo desde la máquina primigenia (del año 2006, llamada “*Darwin*”) hasta prácticamente abarcar todos los tipos de configuración vistos anteriormente, incluyendo las tipo delta.

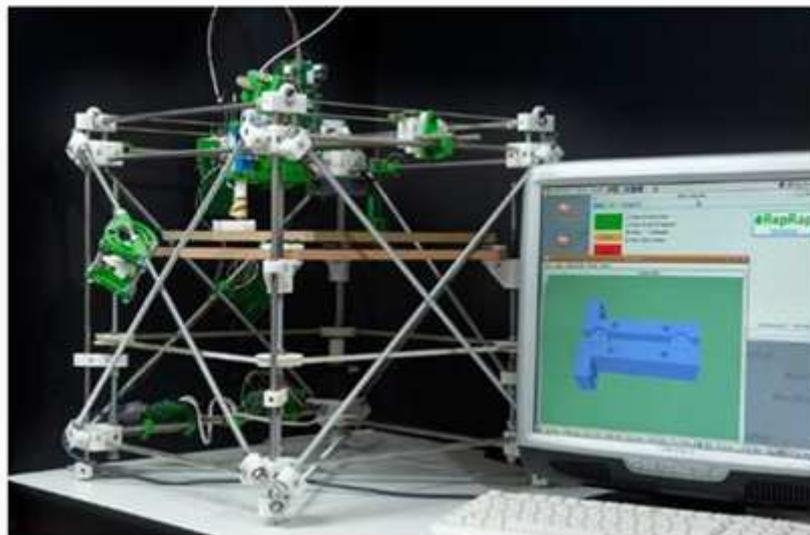


Imagen 10. Fotografía de impresora 3D Darwin, primera RepRap [2]

### 1.2.2 Modelo Prusa i3

De todos los desarrollos del proyecto nos centraremos en el tipo de impresoras derivadas del modelo **Prusa i3**, una de las configuraciones más extendidas entre la comunidad de usuarios “*maker*” de impresoras 3D FFF. Su configuración es tipo (X, Z Head / Y Bed). La impresora 3D utilizada en los ejemplos ilustrativos es la Legio, del fabricante Leon3D, que incorpora destacables mejoras sobre el modelo Prusa i3 original.

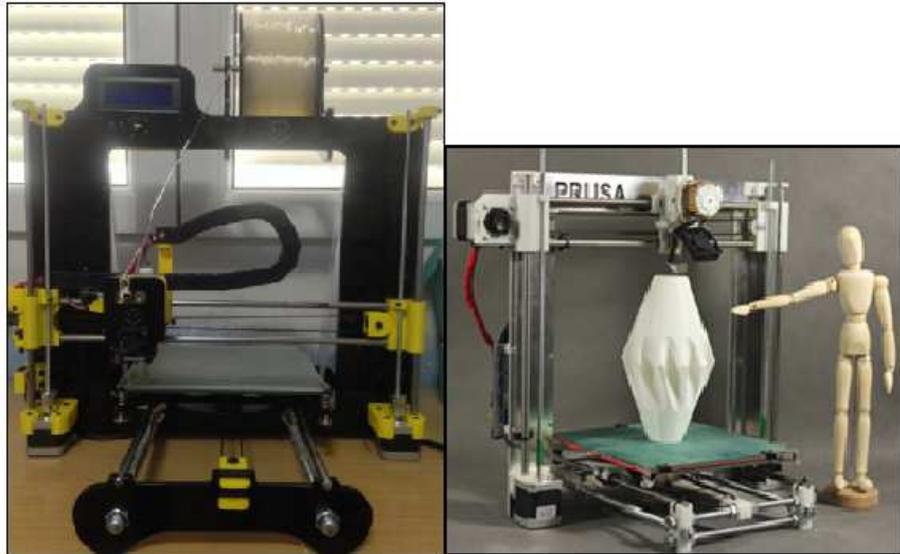
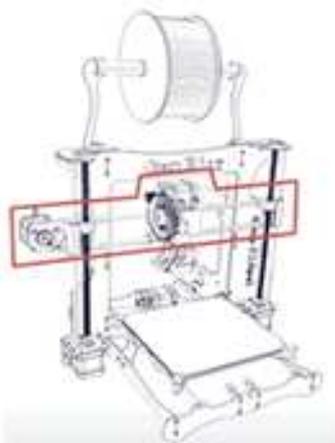
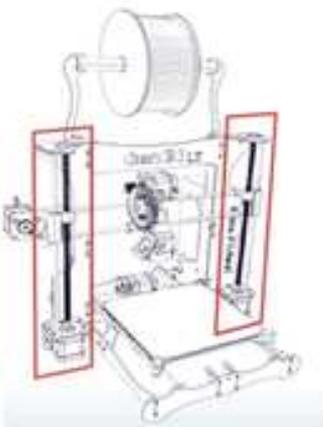


Imagen 11. Izquierda, impresora Legio. Derecha, impresora original Prusa i3 [1]

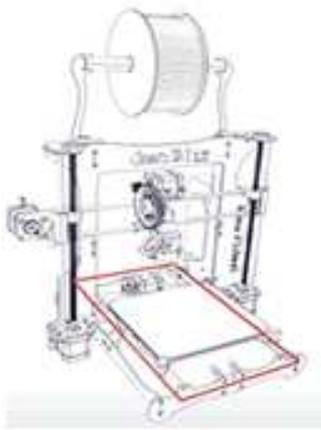
### 1.2.3 Partes generales de una impresora 3D tipo FFF convencional



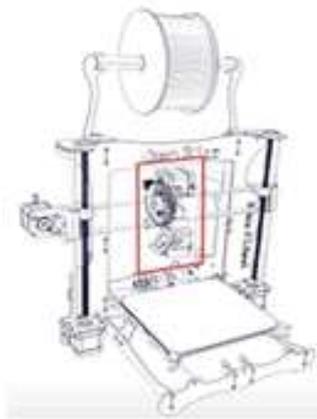
Eje X: Conjunto de elementos necesarios para lograr el movimiento del extrusor en el eje longitudinal de la máquina.



Eje Z: Conjunto de elementos necesarios para lograr el movimiento del extrusor en el eje vertical de la máquina.



Eje Y: Conjunto de elementos necesarios para lograr el movimiento en el eje longitudinal de la máquina, en este caso, de la plataforma o cama de impresión.



Cabezal de extrusión: Está formado por el conjunto de elementos necesarios para la alimentación, fundido y deposición del material de impresión.

Estas partes se ensamblan mediante la utilización de una combinación de piezas específicamente desarrolladas para la máquina, realizadas en plástico y que de hecho pueden volver a ser fabricadas con la impresora 3D, junto con materiales y otros componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que suelen ser lo más estándar posible. Hablamos de elementos como varillas metálicas, motores de paso a paso, sensores, cableados, placas electrónicas, el extrusor, etc. Estos elementos son empleados para realizar el chasis de soporte, los sistemas motrices y de transmisión, así como el sistema de alimentación eléctrica y el sistema de control electrónico de la impresora 3D.

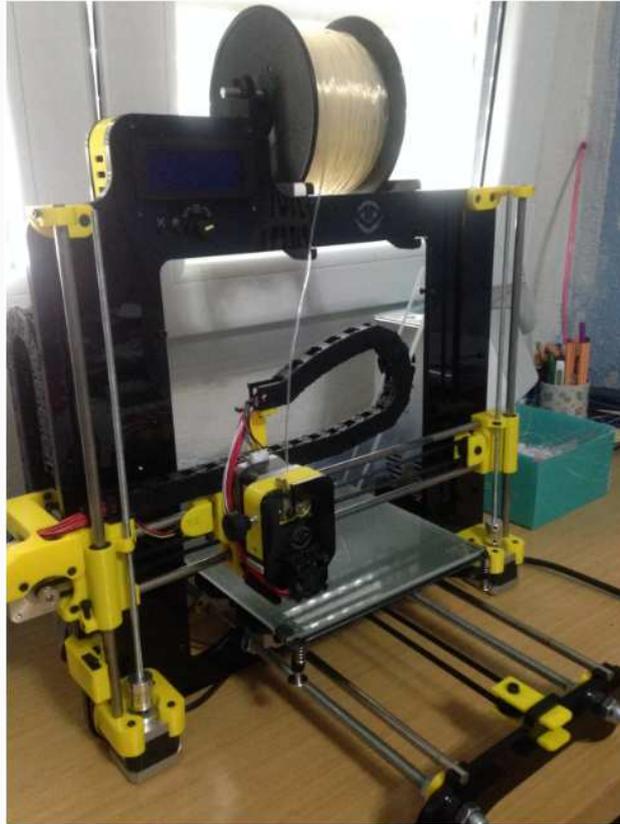


Imagen 12. Impresora Legio 3D [3]

Identificaremos a continuación cada una de estas partes generales en la impresora 3D FFF que hemos tomado como base para este documento, describiendo cómo se configuran estas partes a partir de la combinación de los distintos materiales y componentes.

### 1.2.3.1 Eje X – eje de movimiento longitudinal del extrusor

Dentro de los componentes de una impresora 3D FFF tipo Prusa i3, el llamado de forma general como eje X de la máquina es el conjunto de piezas que se va a encargarse de la transmisión de movimiento del carro que soporta el extrusor (la herramienta de trabajo) situándolo de forma precisa a lo largo del eje X cartesiano (movimientos izquierda-derecha).

En las máquinas tipo Prusa i3 se implementa mediante un “sistema guía” lineal formado por dos barras paralelas, generalmente con acabado cromado, unidas por dos piezas en los extremos. Estas piezas, además de asegurar ese paralelismo, sirven de soporte para el motor de este eje X, incluyen un sistema de control de la tensión en el sistema de transmisión por correa, así como elementos del fin de carrera para el control del desplazamiento longitudinal del extrusor.

Además, estas piezas de plástico laterales van a estar compartidas con el eje Z de la máquina. De hecho, será el propio eje X de la máquina el que se desplazará verticalmente en

bloque para dotar de desplazamiento en el eje Z al cabezal extrusor.

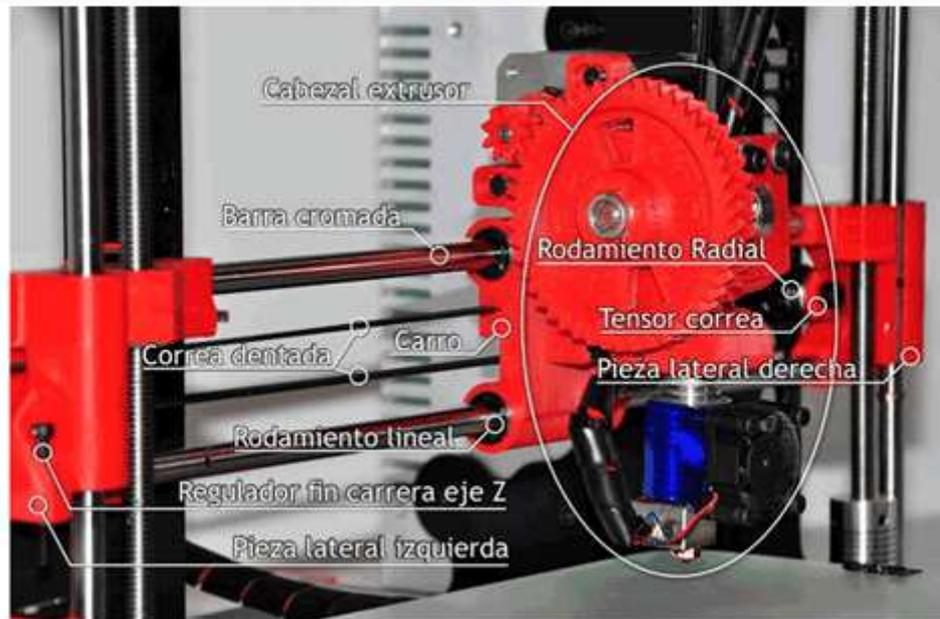


Imagen 13. Conjunto de los distintos elementos del eje X ya montados en la máquina. Vista 1 [1]

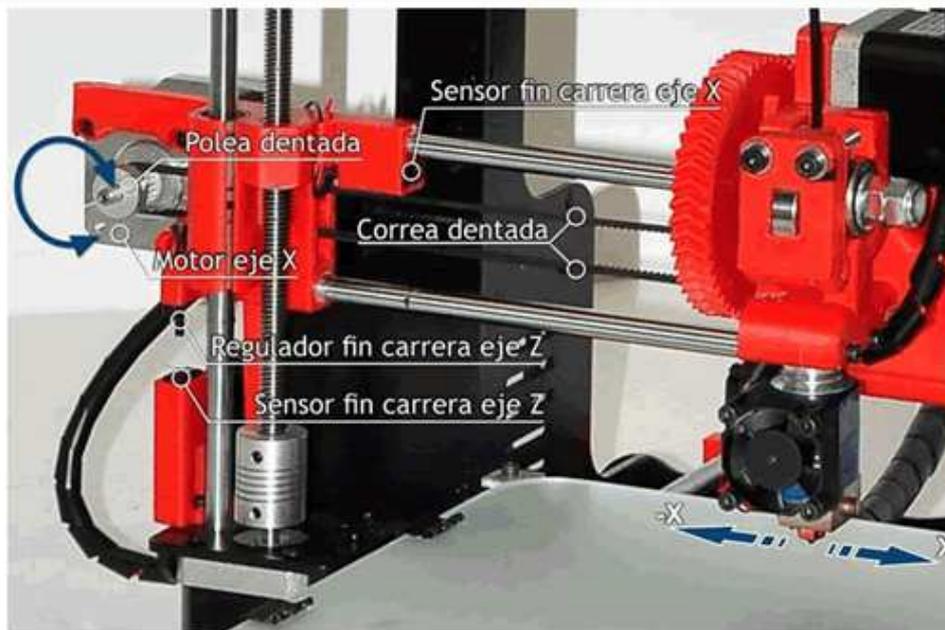


Imagen 14. Conjunto de los distintos elementos del eje X ya montados en la máquina. Vista 2 [1]

### 1.2.3.2 Eje Y – eje de movimiento transversal de la base de impresión

En las máquinas tipo Prusa i3 el movimiento relativo del extrusor respecto de la plataforma de impresión en el eje cartesiano Y lo proporciona el desplazamiento de la propia base de impresión, al contrario de lo que ocurre con los otros dos ejes X y Z, que es el extrusor

el que realiza el movimiento.

De este modo, el “eje Y” de la máquina es el conjunto de piezas que se va encargar de la transmisión de movimiento a la plataforma que soporta la pieza en impresión, situándola de forma precisa a lo largo del eje Y cartesiano (movimientos adelante<>atrás).

El funcionamiento del eje Y es similar al del eje X, donde el carro del extrusor es ahora sustituido por un soporte al que se fija la base de impresión. El resto de elementos es también análogo, es decir, por una parte se tiene un “sistema de guía” formado por dos varillas cromadas situadas en paralelo, en este caso fijadas directamente al chasis. Sobre estas varillas se deslizan unos rodamientos lineales a los que se fija el soporte sobre el que ira la base de impresión. Los rodamientos garantizan un deslizamiento suave y sin holguras. El soporte de la cama de impresión se engancha a su vez a una correa dentada, de manera que no exista posibilidad de desplazamiento relativo entre la correa y el soporte. El movimiento de la correa forzará el desplazamiento de la base de impresión.

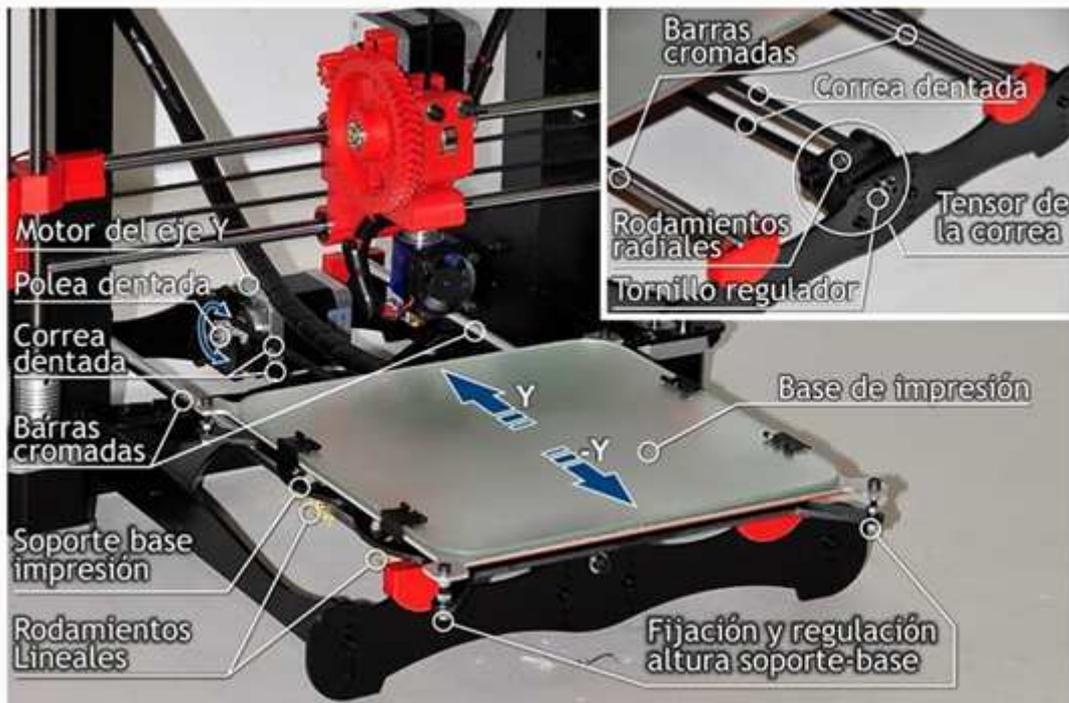


Imagen 15. Detalle de los distintos elementos del eje Y ya montados en la máquina [1]

La correa dentada forma parte del sistema de transmisión, que convierte el movimiento de giro de un motor paso a paso en un desplazamiento lineal. La conversión se realiza mediante una polea dentada conectada directamente al eje del motor y que engrana en un lateral de la correa, mientras que en el lateral opuesto se sitúa el sistema tensor de la correa, que incluye varios rodamientos radiales y un tornillo de regulación.

Por último, un sensor de final de carrera ayuda al sistema de control a precisar

correctamente el posicionamiento real de la cama de impresión en el eje cartesiano Y.

Una fijación rígida del soporte de la base de impresión a la correa, junto con el correcto ajuste de la tensión de esta última, son fundamentales para asegurar la precisión en el desplazamiento de la base impresión.

### 1.2.3.3 Eje Z – Eje de movimiento vertical del extrusor

Continuando con los componentes de una impresora 3D FFF tipo Prusa i3, el llamado eje Z de la máquina es el conjunto de piezas que se va a encargar de realizar el movimiento vertical del cabezal extrusor, situándolo de forma precisa a lo largo del eje Z cartesiano (movimiento arriba  $\hat{U}$  abajo). Como veremos a continuación, en realidad el movimiento en el eje Z cartesiano se transmite al conjunto del eje X de la máquina, lo que incluye al propio extrusor.

Así, el eje Z de la impresora 3D está formado por un “sistema guía” lineal formado por dos barras paralelas verticales, generalmente con acabado cromado, unidas en sus extremos al chasis de la máquina. Cada barra se sitúa en uno de los extremos longitudinales de la máquina y sobre cada una de ellas va a deslizar la pieza plástica lateral compartida con el eje X correspondiente. Estas piezas incorporan unos rodamientos lineales que aseguran un deslizamiento vertical suave y sin holguras del conjunto del eje X.

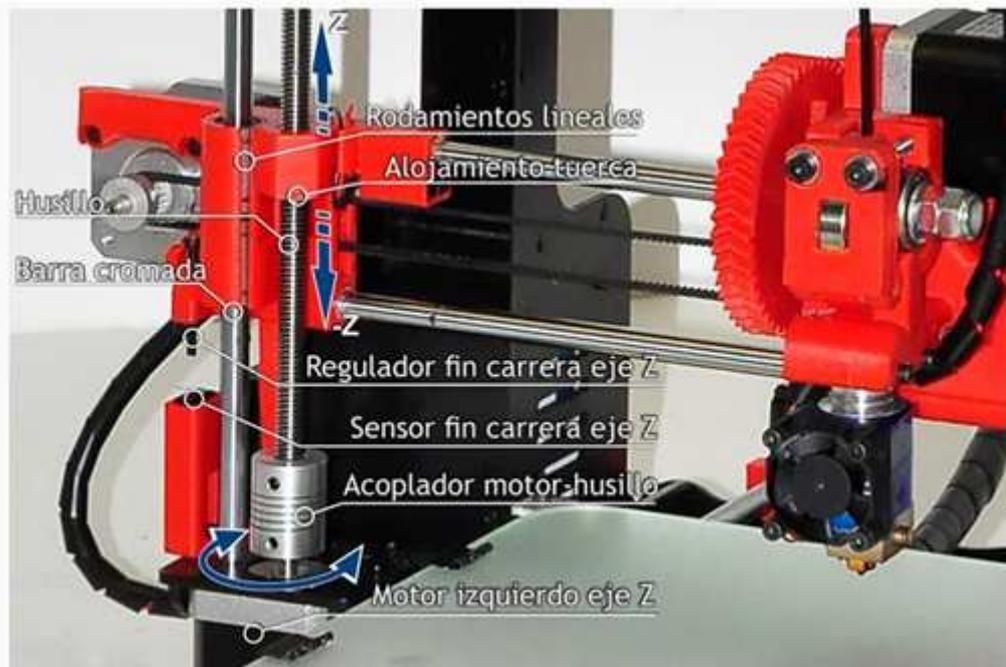


Imagen 16. Detalle de los distintos elementos del lado izquierdo del eje Z [1]

El movimiento vertical del eje X lo proporcionan dos motores paso a paso, uno para la

vertical izquierda y otro para la derecha, a cada uno de los cuales se acopla un husillo (barra roscada) situado en vertical y paralelo a la barra correspondiente, con su correspondiente tuerca. La unión motor-husillo se realiza mediante unos acopladores mecánicos flexibles específicos de forma cilíndrica. Estos acopladores son capaces de amortiguar y suavizar tanto las aceleraciones bruscas propias del accionamiento de un motor eléctrico paso a paso, como los ligeros desajustes que puedan producirse en el eje del husillo respecto del eje del motor.



Imagen 17. De izquierda a derecha. Barras cromadas, husillos roscados y acopladores husillo-motor [1]

El funcionamiento del sistema de transmisión de movimiento en este eje Z es el siguiente. En cada husillo se coloca una tuerca del paso adecuado. Estas tuercas deben encajar perfectamente y sin holgura en las piezas plásticas del eje correspondiente. Al girar los motores, estos hacen girar a su vez a los husillos unidos de forma solidaria a su eje. Como la tuerca situada en estos ejes roscados no puede girar, ya que se lo impiden las piezas plásticas en las que se encajan, sobre ellas se va a generar un empuje vertical cuyo sentido dependerá del sentido de giro del motor. Este empuje fuerza el desplazamiento de la tuerca a lo largo de su husillo y, con ello, de la pieza de plástico a la que está unida. De este modo el giro de los motores se transforma en un movimiento lineal suave a lo largo del eje z cartesiano de las piezas de plástico laterales del eje X y, por tanto, del propio Extrusor.

Es importante que el funcionamiento de ambos motores esté coordinado desde el sistema de control de la impresora para asegurar la horizontalidad del eje X durante sus desplazamientos verticales. También es importante mencionar que el sistema requiere de una buena lubricación en los husillos para que el deslizamiento sea lo más suave posible y sin ruidos ni vibraciones asociados.

La precisión dimensional obtenida con este sistema de transmisión “tuerca de bolas-husillo” es en general muy alta y va a depender, fundamentalmente, de la calidad de los motores paso a paso utilizado (número de pasos por giro de 360°) y del paso del husillo empleado. Estas dos magnitudes limitan la variación de altura mínima posible que se puede conseguir en el posicionamiento del extrusor, y con ello, la altura mínima teórica de la capa de impresión que puede ofrecer la impresora 3D. Esta altura mínima es uno de los factores implícitamente relacionados con la calidad de acabados que la impresora 3D puede

proporcionar.

Por otra parte, la calidad dimensional de las barras y husillos empleados (diámetros, rectitud, holguras, etc.), así como su colocación (verticalidad, paralelismos, etc.), está ligada directamente con la bondad del movimiento vertical que se obtendrá para el conjunto del eje X, y con ello, con la calidad superficial obtenida en las piezas impresas y, en especial, de sus superficies verticales.

#### 1.2.3.4 Cabezal extrusor

El cabezal de extrusión va a estar formado:

- El propio extrusor, lo que incluye los elementos adicionales para su calentamiento, sondas para el control térmico, elementos de ventilación, etc...
- Los elementos necesarios de alimentación de material de impresión, que hacen que éste llegue en forma de filamento hasta el extrusor, y que incluyen un motor, una serie de engranajes de transmisión, un eje metálico con un moleteado específico, rodamientos radiales, etc.
- Los elementos de soporte que son necesarios para portar los elementos anteriores y unirlos de forma solidaria al carro del eje X de la impresora y que, generalmente, son piezas impresos en plástico por una impresora 3D.

En la siguiente fotografía de detalle se identifican cada una de los elementos del cabezal de extrusión ya montado en una máquina.

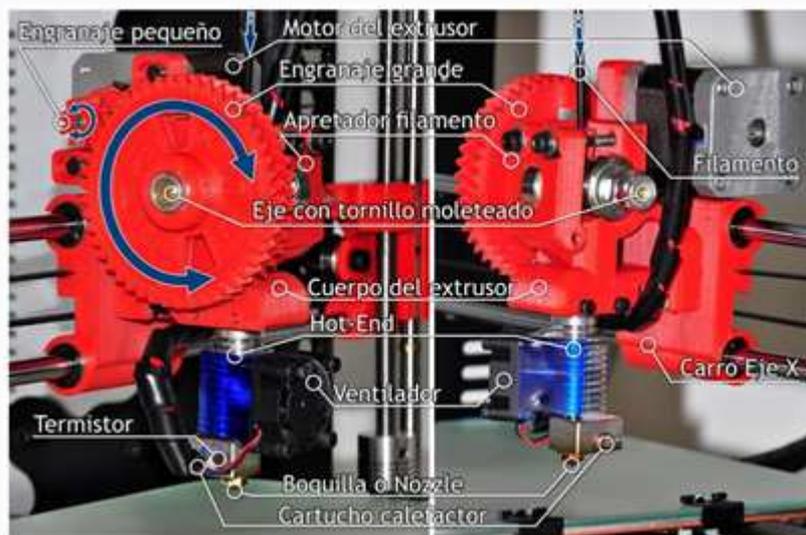


Imagen 18. Cabezal de extrusión montado y los distintos elementos que lo forman [1]

### 1.2.3.5 Soportes para bobina de filamento

Las impresoras FFF suelen incorporar algún tipo de soporte que permita la fijación de las bobinas de filamento y que faciliten la alimentación del extrusor a medida que éstas se desenrollan. En el caso de la impresora Legio, se utiliza un sistema formado por dos soportes desmontables que se encajan en la parte superior del chasis y que soportan un eje en el que se introduce la bobina de material imprimible.



Imagen 19. Soporte de filamento y bobina transparente de impresora Legio [3]

### 1.2.3.6 Pantalla LCD con selector rotativo y pulsadores

Esta es una de las mejores que incorpora la impresora Legio con relación a la Prusa i3 original. Gracias al control directo de la impresora mediante una pantalla LCD situada en su parte superior, se pueden conseguir operaciones de extrusión, movimiento de los ejes, calentamiento de extrusor o cama (pudiendo ajustar también la temperatura durante la impresión) e impresiones directas de piezas. Esto es posible gracias a la incorporación de una tarjeta microSD en la electrónica de la impresora, dónde se pueden guardar los archivos GCode de cada uno de los productos que se quieren imprimir.



Imagen 20. Pantalla LCD Legio [3]

## 1.3 Materiales usados para la impresión de las piezas

Antes de nada, hay que indicar que todo material usado en impresión 3D mediante la tecnología de deposición de filamento fundido (FFF) para la fabricación de piezas ha de poseer la cualidad de material termoplástico. Los materiales termoplásticos son aquellos que, una vez conformados por temperatura, pueden ser calentados de nuevo a la temperatura de fusión y recuperar el estado fluido tantas veces como los calentemos a dicha temperatura. [1]



Imagen 21. Rollos de filamento de distintos termoplásticos para impresión 3D [1]

Los termoplásticos más extendidos para impresión 3D son el *PLA* y el *ABS*, pero realmente existe una gran variedad de materiales termoplásticos que puede utilizarse con este tipo de tecnologías. Cabe destacar que ni los materiales metálicos, ni las resinas, ni los polímeros termoestables son materiales termoplásticos.

Para la impresión de las piezas de este proyecto se decidió hacer uso del material *PLA*, principalmente, y como se verá más adelante, porque su impresión es más sencilla que la del *ABS*, y también debido a que estas piezas no tienen por qué verse sometidas a ningún esfuerzo mecánico. [1]

### 1.3.1 Propiedades de los materiales termoplásticos

- Propiedades mecánicas, químicas y estéticas

Cada termoplástico tiene unas propiedades mecánicas, químicas y estéticas características. Estas propiedades se transmitirán a las piezas impresas con dichos materiales. Un adecuado conocimiento de las propiedades de cada material permite escoger el más adecuado para cada pieza según la finalidad a la que esté destinada.

- Temperatura de extrusión

Cada termoplástico tiene un rango de temperaturas de extrusión para su impresión 3D. La temperatura óptima depende de cada material, fabricante y color, principalmente. Aumentar o disminuir esta temperatura variará la fluidez de cada material en el extrusor y su expulsión por la boquilla o nozzle.

- Ventilador de capa

El ventilador de capa, presente en la impresora utilizada para este proyecto, Legio, genera un flujo de aire dirigido a las últimas capas que se van imprimiendo durante la fabricación de una pieza, siendo por lo tanto adecuado o inadecuado en función del material que se use.

- Adherencia a la base

Con este concepto se hace referencia a la facilidad con la que un material impreso se mantiene pegado a la base de impresión. La adherencia a la base varía en función del termoplástico seleccionado y al material con el que está fabricada la superficie de impresión. El material más habitual para las bases es el vidrio. El problema de la no adherencia a la base por parte de la pieza fabricada tiene el nombre de warping.

- Adherencia entre capas

Este concepto se utiliza para especificar la fuerza con la que se adhiere el hilo extruido a las anteriores capas del mismo material. Normalmente es buena, pero es más fuerte en unos materiales que en otros, y existen factores que pueden empeorarla (como la temperatura de la sala de impresión). Una mala adherencia entre capas puede provocar que las distintas capas de la pieza fabricada se separen entre si parcial o totalmente, este problema tiene el nombre de delaminación.

Se trata de una propiedad inherente al método de fabricación por impresión 3D, por capas sucesivas. Debido a la forma en la que se construyen las piezas con la tecnología FFF, las piezas no presentan una resistencia isotrópica, es decir, no aguantan esfuerzos de manera homogénea en todas las direcciones, siendo generalmente más frágiles en la dirección de fabricación en función de cómo se hayan adherido las capas. Una buena adherencia entre capas homogeneiza los esfuerzos que una pieza imprimida en 3D puede resistir en las distintas direcciones espaciales.

### 1.3.2 PLA (ÁCIDO POLILÁCTICO)

Este ha sido el material escogido para la impresión de las piezas de este proyecto, a continuación explicaremos el por qué describiendo cada una de sus características.

El *poliácido láctico*, *ácido poliláctico* o *PLA* es un polímero termoplástico formado por moléculas de ácido láctico. Se obtiene a partir de almidón de productos vegetales (almidón de maíz, yuca o caña de azúcar) y es biodegradable. Tiene propiedades semejantes al tereftalato de polietileno (PET). Es un material que se degrada fácilmente en agua y óxido de carbono.

Se utiliza habitualmente en el sector alimentario debido a su ausencia de toxicidad, siendo ideal para envases y recipientes en contacto con alimentos. También se utiliza para la fabricación de utensilios y juguetes para niños pequeños, sujetos a tener contacto con la piel o ser ingeridos.

Es uno de los termoplásticos más fáciles de imprimir, por lo que su uso está muy generalizado en el mundo de la impresión 3D.

#### Propiedades mecánicas:

Sus propiedades mecánicas son peores que otros termoplásticos como el ABS. Su módulo elástico típico es de 3.63GPa. Es mayor que en otros plásticos, lo que significa que ante la misma fuerza recibida experimenta menos deformación elástica. Por ello es una material menos flexible, menos dúctil, y es capaz de resistir cargas menores. Presenta una resistencia limitada ante cargas de flexión y tracción. Es un material frágil y tiene menor resistencia ante impactos y colisiones. Su valor típico de impacto Charpi es de 4,32 J/cm<sup>2</sup>. [1]

Es un material poco aconsejable para piezas mecánicas funcionales sometidas a esfuerzos o cargas. Sin embargo, es un material muy útil para piezas estéticas o que vayan a estar en contacto con alimentos o partes del cuerpo.

#### Propiedades estéticas y de post-procesado

El acabado estético del PLA es normalmente brillante y semi-transparente. Este tipo de aspecto lo hace más atractivo que otros materiales para aplicaciones más estéticas que mecánicas. Permite la aplicación de tratamientos químicos relativamente sencillos. Es soluble en sosa cáustica, tratamiento que también mejora la fusión entre capas, mejorando así las características mecánicas de la pieza.

#### Temperaturas

El rango de temperaturas de extrusión del PLA se sitúa entre los 180°C – 210°C. El color es también un condicionante de esta temperatura, debido a que cada color lleva unos aditivos químicos que pueden hacer variar el valor óptimo dentro de este rango.

#### Ventilador de capa

El PLA se debe imprimir preferiblemente con el ventilador de capa siempre activado, ya que tiene un tiempo de enfriado más lento que otros plásticos. En piezas grandes es menos importante, debido a que el material depositado tiene más tiempo para enfriarse hasta que se vuelva a adherir otra capa en ese punto.

#### Adherencia a la base

El PLA es un material mucho menos elástico y menos dúctil que otros plásticos, lo que provoca contracciones menores del material. Como consecuencia, la adherencia del PLA a la cama suele ser buena y se consigue de una manera mucho más sencilla que con otros materiales, ya que tiene menos tendencia a despegarse y doblarse.

El calentamiento de la cama deberá estar entre los 40°C y 90°C (según tamaño y complejidad en la geometría de los modelos) facilita la adherencia de la primera capa de las piezas. El uso de espráis fijadores suele ser necesario.

#### Adherencia entre capas

La adherencia entre capas es muy buena. No es necesario elevar demasiado la

temperatura para disminuir el peligro de separación entre capas a posteriori.

Otros

El PLA tiene una cierta higroscopicidad, lo que significa que absorbe la humedad que pueda haber en el ambiente. Este efecto no es muy fuerte y sólo podría notarse si se almacena plástico en lugares muy húmedos durante largos periodos de tiempo, lo cual, provocaría una disminución notable de la calidad de las impresiones.

Es un plástico biodegradable y su olor tras la fundición es más agradable que el de otros materiales.

Para terminar este capítulo de introducción, se ha realizado una tabla resumen con las principales características de cada uno de los materiales termoplásticos imprimibles hasta el momento.

| Plásticos                               | PLA                           | ABS                                      | NYLON 618                                | HIPS                                     |
|---|-------------------------------|--|--|--|
| Temperatura de extrusión                | 180 - 220 °C                  | 225 - 270 °C                             | 240 - 260 °C                             | 240 - 260 °C                             |
| Temperatura necesaria en base de vidrio | 40 - 70 °C                    | 80 - 120 °C                              | > 120 °C                                 | 80 - 120 °C                              |
| Máxima temperatura de trabajo           | ~ 60 °C                       | ~ 85 °C                                  | ~ 120 °C                                 | ~ 70 °C                                  |
| Flexibilidad                            | Baja                          | Media                                    | Alta                                     | Media                                    |
| Resistencia mecánica                    | Media                         | Alta                                     | Alta                                     | Alta                                     |
| Producto adherencia a la base           | Espray fijador (recomendable) | Espray fijador (obligatorio)             | Espray fijador (obligatorio)             | Espray fijador (recomendable)            |
| Ventilador de capa                      | Ventilación continua          | Sólo en puentes y perfiles muy estrechos | Sólo en puentes y perfiles muy estrechos | Sólo en puentes y perfiles muy estrechos |
| Solubles en:                            | Sosa Cáustica (Al 90%)        | Acetona                                  | Ácido fórmico (Al 85%)                   | Limneno                                  |

Imagen 22. Características de los materiales I [1]

| Plásticos                               | PVA                                      | Filamentos madera         | Laybrick                  | Filamentos flexibles                     |
|---|--|---------------------------|---------------------------|--|
| Temperatura de extrusión                | 160 - 190 °C                             | 180 - 240 °C              | 180 - 220 °C              | 190 - 230 °C                             |
| Temperatura necesaria en base de vidrio | 80 - 120 °C                              | No                        | No                        | No                                       |
| Máxima temperatura de trabajo           | ~ 65 °C                                  | ~ 60 °C                   | ~ 60 °C                   | ~ 100 °C                                 |
| Flexibilidad                            | Alta                                     | Media                     | Baja                      | Alta                                     |
| Resistencia mecánica                    | Media                                    | Baja                      | Baja                      | Alta                                     |
| Producto adherencia a la base           | Espray fijador (obligatorio)             | Espray fijador (opcional) | Espray fijador (opcional) | Espray fijador (opcional)                |
| Ventilador de capa                      | Sólo en puentes y perfiles muy estrechos | Ventilación continua      | Ventilación continua      | Sólo en puentes y perfiles muy estrechos |
| Solubles en:                            | Agua                                     | -                         | -                         | -  |

Imagen 23. Características de los materiales II [1]

## 2. CARACTERÍSTICAS Y MONTAJE DE LA IMPRESORA

### 2.1 Características de impresora Legio

Esta impresora fue desarrollada por la empresa León 3D. Su montaje es rápido y eficaz. Desarrollada con un software 100% libre y gratuito, se puede actualizar sin ningún tipo de límite. Innovación tecnológica: Imprime piezas en dos colores o dos materiales con un solo extrusor y puedes utilizar prácticamente todos los materiales existentes en el mercado: ABS, PLA, Nylon, PET, Co-poliéster termoplástico, filamento de cerámica, madera, cobre, bronce, filamentos flexibles, etc. [3]

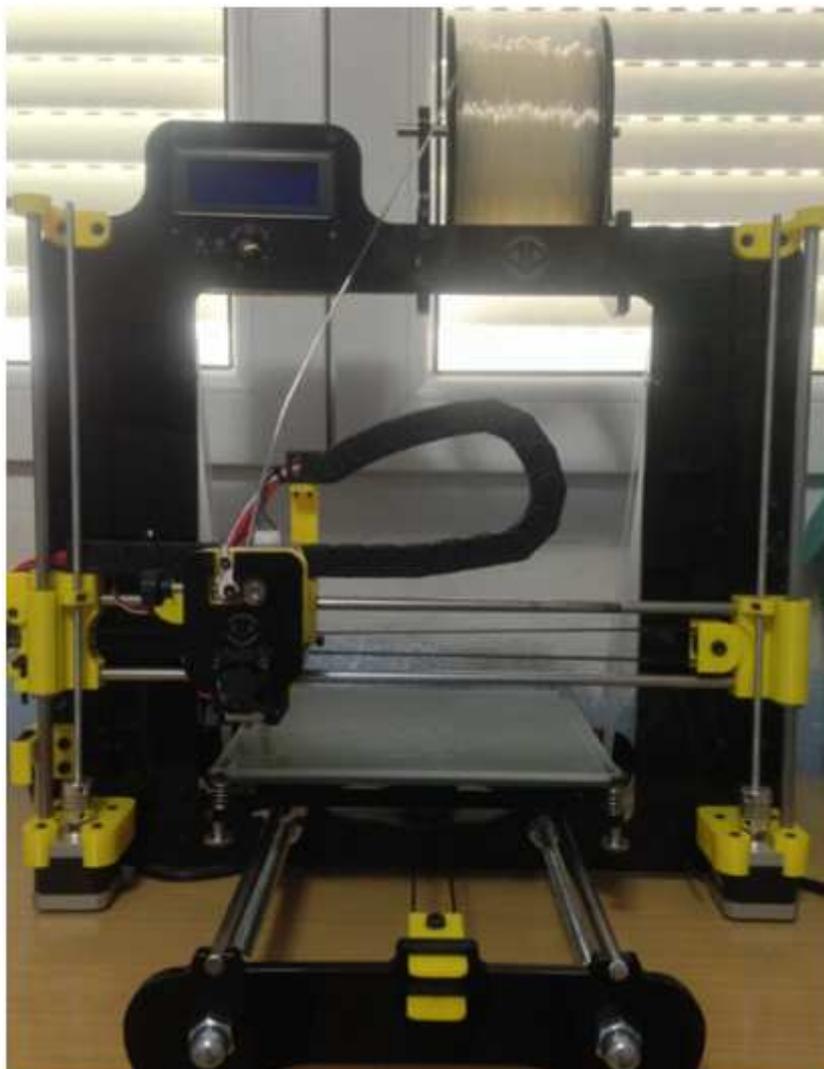


Imagen 24. Impresora Legio. Vista frontal [3]

## 2.2.1 Características técnicas

En este apartado se van exponer las características técnicas más importantes de la impresora con la que se ha realizado este proyecto. [3]

*Velocidad de impresión:* 50 – 250 mm/s (Dependiendo del material, perfil y software)

*Resolución:* 0.05 mm

*Materiales:* Filamentos de 1.75 mm de diámetro: ABS, PLA, Nylon, PET, Co-poliéster termoplástico, Polipropileno, Nylon con fibra de carbono, TPU, Poliuretano, filamento de Cerámica, Madera, Bronce, Cobre, etc Imprime el 96% de los filamentos existentes en el mercado.

*Dimensiones:*

|                         |                    |
|-------------------------|--------------------|
| Base de impresión:      | 200 x 200 x 200 mm |
| Impresora sin bobina:   | 520 x 430 x 500 mm |
| Impresora con bobina:   | 520 x 430 x 570 mm |
| Impresora con embalaje: | 500 x 490 x 135 mm |

*Mecánica General:*

Estructura reforzada de metacrilato con marco para LCD integrado  
Soporte para bobina y pletinas base realizadas en metacrilato

Varillas metálicas en los ejes X, Y y Z  
Coupling flexibles en el eje Z  
Rodamientos lineales en los ejes X, Y y Z  
Cadenas Portacables IGUS  
Base de cristal 200 x 200 mm  
Sistema de nivelado rápido mediante 4 reguladores  
Sistema de cambio rápido (colocación y extracción) del cristal de la base de impresión

*Mecánica Extrusora:*

Hot-End de tipo All-metal LEONZZLE V2, fácil mantenimiento  
Direct Drive ventilado para filamento de 1.75 mm  
Diámetro del extrusor: Boquilla de 0.4 mm  
Temperatura del extrusor: 265°C  
Tiempo de calentamiento: 2 min aprox.  
Cartuchos cerámicos 12V / 40W

*Electrónica:*

Placa de control LIONHEART PRO  
Pantalla LCD con selector rotativo y pulsadores (4 líneas)  
Termistores EPCOS 100K en el Hot-End  
Temperatura base de impresión: 120°C  
Heated Bed con indicador de estado, alimentado a 12V

Fuente de alimentación 220V-12V / 360W  
Cableado optimizado mediante cadenas

*Software:*

Nivelado asistido: Fácil, rápido y cómodo nivelado asistido de la base de impresión  
Posibilidad de cambio de filamento durante la impresión. Imprime en 2 o más colores y / o materiales: Maximice las posibilidades de sus proyectos imprimiendo en múltiples colores y / o materiales.

LCD de control intuitiva  
Desconexión automática  
Software recomendado: Repetier Host  
Archivos compatibles: .gcode  
Sistema operativo: Windows / Linux / Mac OS X

*Comunicaciones:*

PC USB, MicroSD

*Otros:*

Botón parada de emergencia

*Peso:*

8.9 Kg (embalaje incluido)

## 2.1.2 Inventario de elementos para montaje

Es una impresora considerada de carácter educacional ya que es una herramienta que ha de montarla el propio usuario, gracias a guías de montaje tanto en papel como en vídeo, no es un trabajo excesivamente difícil, y permite aprender todo sobre los componentes de la impresora, su electrónica, su mecánica, etc. [4]

A continuación se pueden ver todos los componentes necesarios en el montaje de esta impresora.

- CAPA 1  
Marco metacrilato  
Soporte de la cama metacrilato  
Varilla bobina  
Platina tensor metacrilato



Imagen 25. CAPA 1. Montaje

- CAPA 2

Pletina motor metacrilato  
 Tapa LCD metacrilato  
 Tapa E1 metacrilato  
 Tapa electrónica metacrilato  
 Soporte filamento metacrilato  
 Placa térmica  
 Cristal de la cama  
 Cable termistor cama  
 FIX Rodamientos  
 FIX Cama  
 FIX Bobina  
 FIX Electrónica y Fuente  
 FIX Tirantes  
 Tornillería EJE Y  
 Placa electrónica  
 Bridas



Imagen 26. Capa 2. Montaje

- CAPA 3

Bolsa EJE X  
 Bolsa EJE Y  
 Bolsa EJE Z  
 Bolsa Z6  
 Tornillería Auxiliar  
 Llaves Allen, des, plano y fija de 17  
 Bolsa extrusor E1  
 Bolsa extrusor E3 + E4  
 Bolsa ventiladores  
 Bolsa LEONNOZZLE  
 Fuente alimentación  
 Protector fuente de alimentación  
 Cable fuente de alimentación  
 Cable fuente a electrónica  
 Varillas EJE X  
 Varillas EJE Y  
 Varillas EJE Z  
 Varillas roscadas  
 Cadena porta cables X  
 Cadena porta cables Z  
 Cables motores (X, Y, Z1 y Z2)  
 Motores a pasos  
 Rodamiento SC8UU  
 Polea GT 2 (montados en motores)  
 Tarjeta SD  
 Pantalla SD  
 Fragmento filamento  
 Tirantes metacrilato



Imagen 27. Capa 3. Montaje

## 2.1.3 Montaje impresora Legio

### PASO 1 y 2. Montaje extrusor

El montaje de esta impresora, se comenzó por la parte del extrusor, en un primer paso lo que es la pieza del extrusor en sí, es decir, las uniones entre el motor de paso encargado de transformar la energía eléctrica en mecánica y así poder tanto extruir como extraer el plástico, uniendo este con el nozzle y la electrónica necesaria para que todo funcione, mediante la tornillería adecuada, como se ve a continuación. [5]

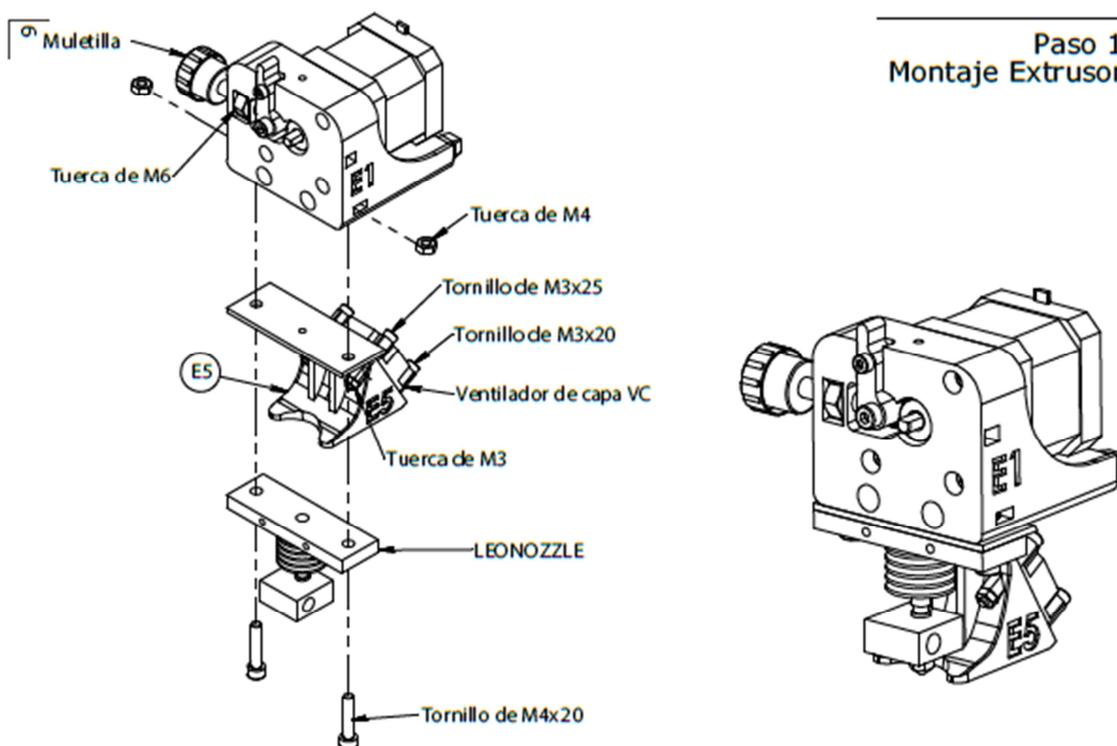


Imagen 28. Despiece del montaje de extrusor (1) [5]

Procediendo después al ensamblaje de todas las protecciones de la pieza, además de ventiladores, quedando así un bloque unitario que será el extrusor al completo. En este ensamblaje se puede ver que, como no puede ser de otra manera, se tienen los huecos y muescas necesarias para la unión con el eje X como se verá más adelante.

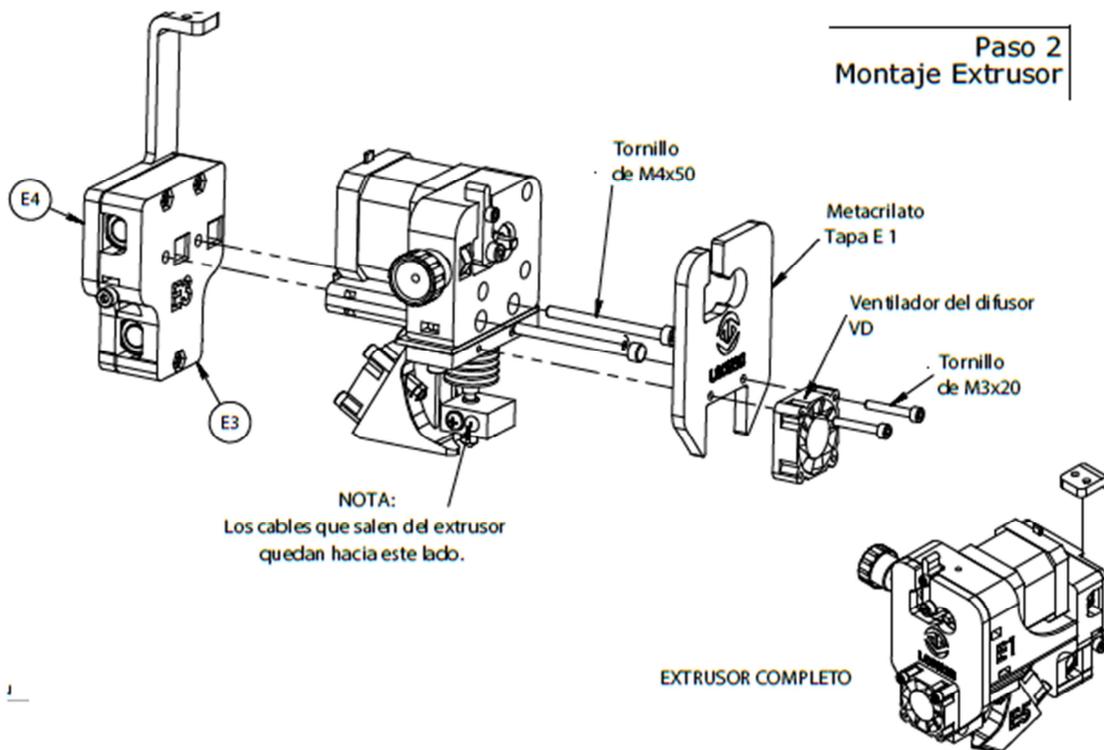


Imagen 29. Despiece del montaje de extrusor (2) [5]

### PASO 3. Montaje eje X

Por tanto, como se acaba de comentar, lo siguiente será montar el eje X, formado por la pieza unitaria del extrusor, su motor de paso correspondiente y un par de varillas paralelas, por dónde el extrusor realizará el movimiento longitudinal característico de este tipo de impresoras (X,Z Head / Y Bed), comentado en el apartado de introducción.

#### Paso 3 Montaje Eje X

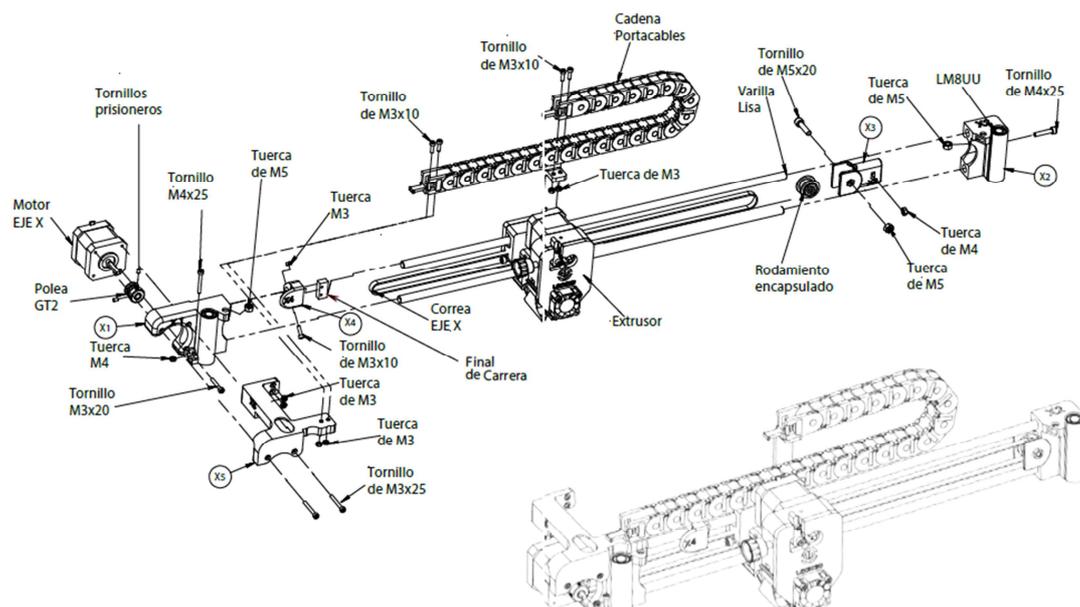


Imagen 30. Despiece del montaje del eje X

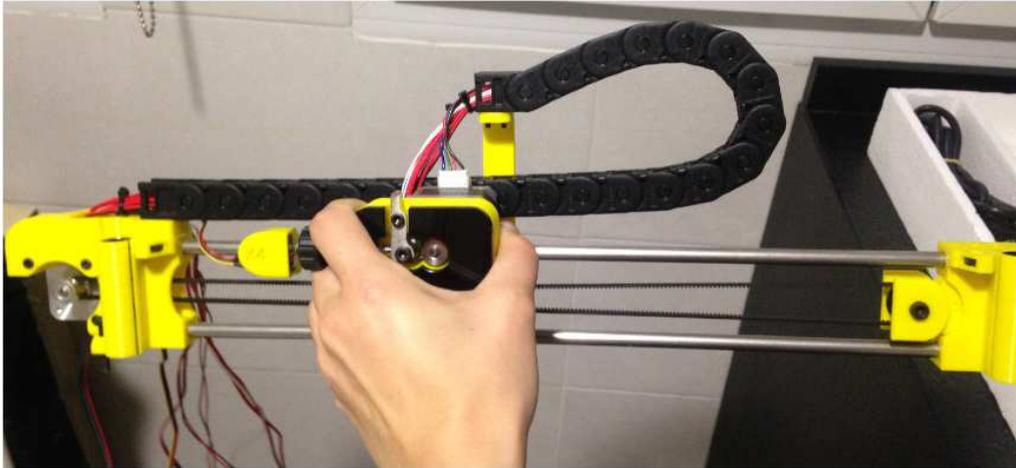


Imagen 31. Montaje del montaje del eje X

Una de las ventajas que se pudieron observar al montar la impresora fue la incorporación de los porta cables, con lo que así se puede llevar toda la electrónica perteneciente a cada una de las partes que forman la impresora por un mismo camino, aumentando así la sección de los mismos y evitando que la presencia de estos cables puede plantear problemas a la hora de imprimir.

#### PASO 4 y 5. Montaje cama caliente

Una vez se tenga la parte de extrusor ensamblada con el eje X por donde realizará su recorrido, se comienza a montar la cama caliente, como elemento por ahora independiente, siguiendo el esquema que se ve a continuación.

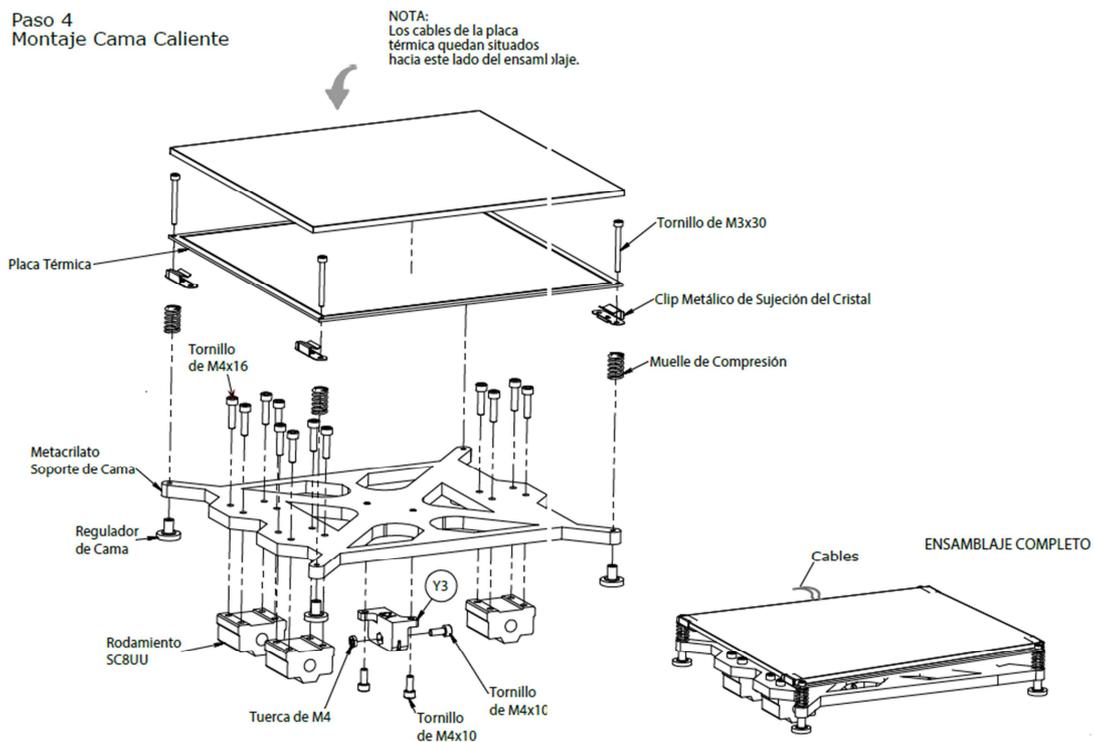


Imagen 32. Despiece del montaje de la cama caliente [5]

Esta cama caliente forma parte del eje Y, y como ya se ha comentado, este eje Y será el encargado de realizar los movimientos transversales de la impresión, por tanto, una vez se tenga montada la cama, se procede al ensamblaje con el eje Y, según la siguiente imagen.

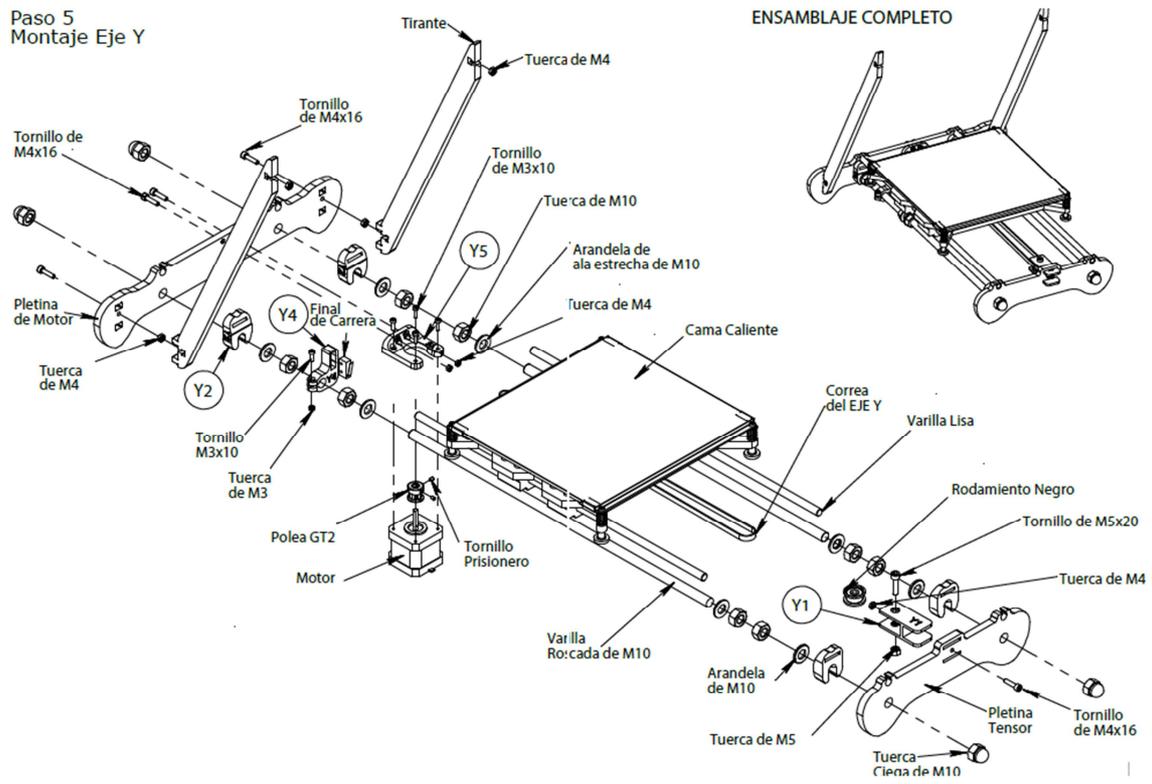


Imagen 33. Despiece del montaje de la cama caliente con eje Y [5]

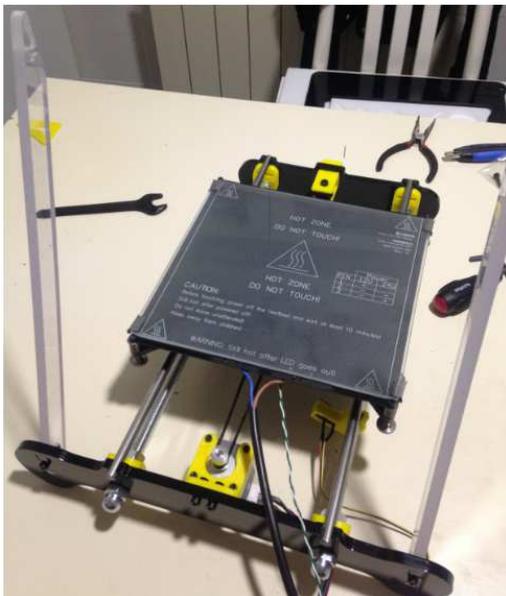


Imagen 34. Montaje de cama caliente con eje Y [5]

Otra de las características que llamaron la atención en comparación con el resto de impresoras que se conocían hasta ahora, es la incorporación de tirantes de metracrilato,

haciendo de unión entre todo el montaje del eje Y y el resto de armadura de la impresora, dándole mayor robusted al bloque y evitando desajustes entre sus ejes.

### PASO 6. Montaje eje Z

Una vez montados los ejes X e Y, ya sólo queda el montaje del eje Z que será el conjunto de elementos necesarios para lograr el movimiento del extrusor en el eje vertical de la máquina.

En este punto, lo que más problema causó fue el montaje de las varilla verticales, encargadas del movimiento vertical al estar unidas a los motores de paso por uno de sus extremos, ya que fue difícil conseguir que estuvieran perfectamente alineadas.

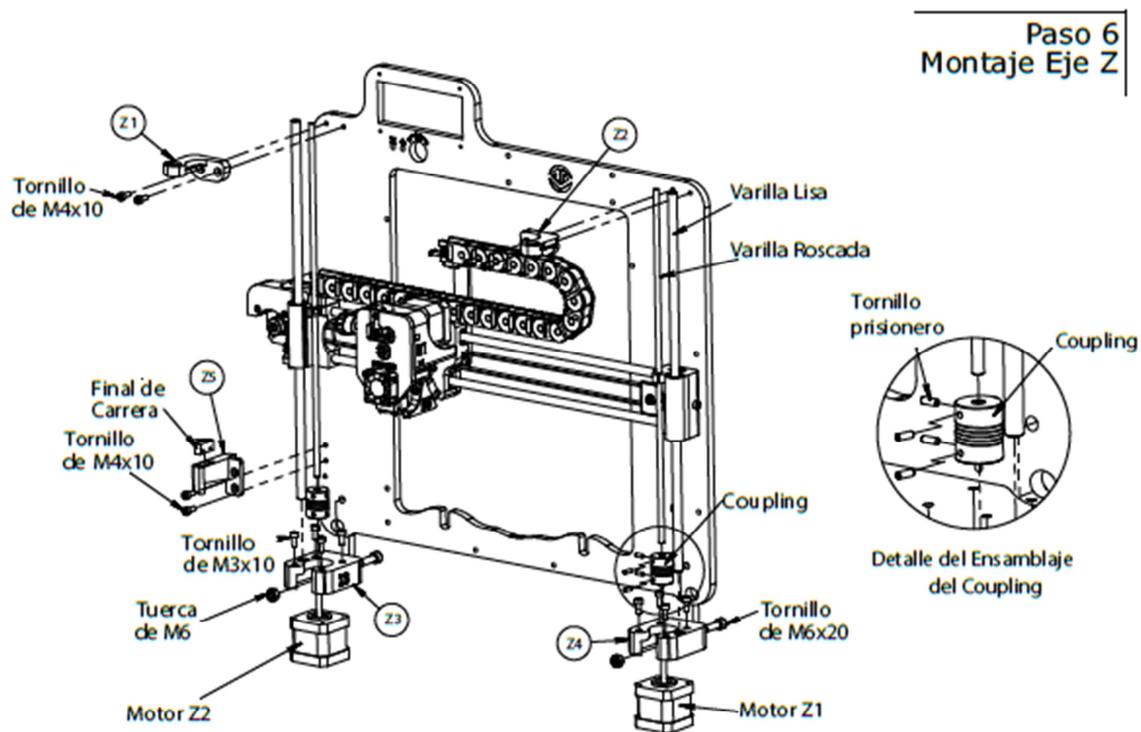


Imagen 36. Despiece del montaje del eje Z [5]

### PASO 7. Unión de los 3 ejes

Como es lógico, una vez que produjese el correcto montaje de los 3 ejes que componen la impresora, se pasó a la unión de todos ellos para ir dando forma al bloque unitario que forma la máquina.

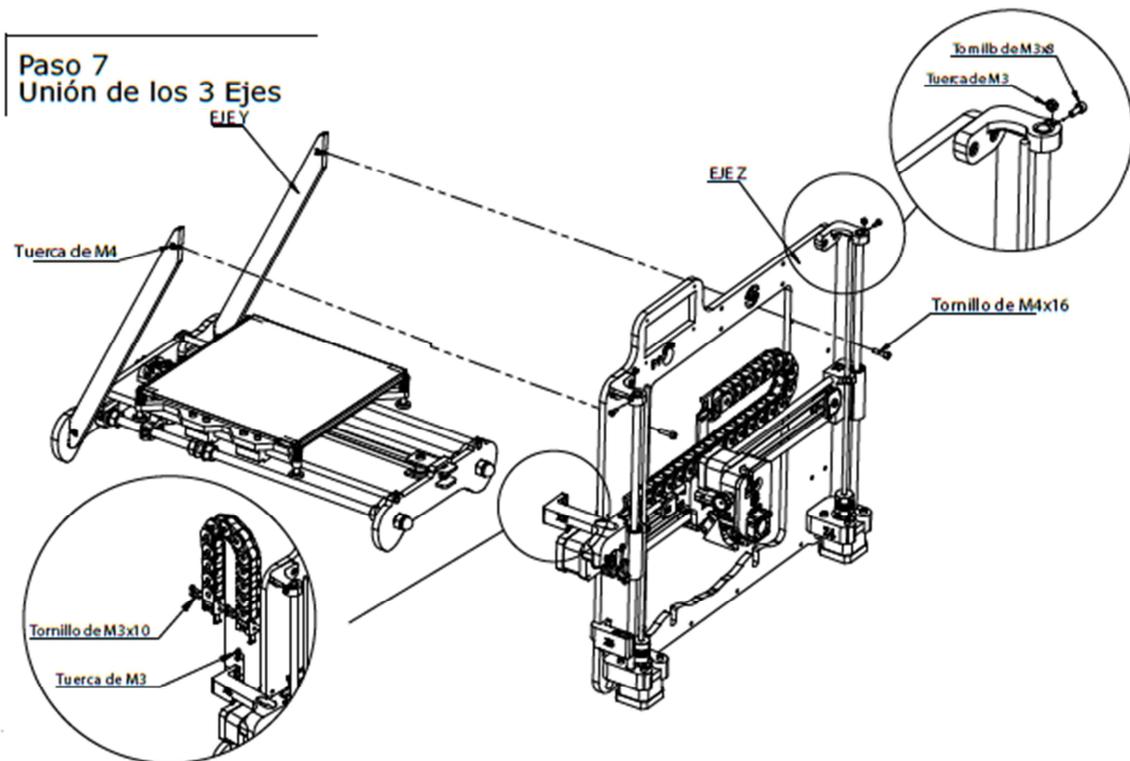


Imagen 37. Ensamble de todos los ejes [5]

En este punto, lo complicado fue ajustar correctamente los tirantes y la tornillería perteneciente al eje Y, para que la cama caliente quedara en la posición correcta, y una vez ahí, todos los elementos hiciesen su función absorbiendo vibraciones y evitando una defectuosa impresión.

#### **PASO 8.** Colocación Fuente Soporte Bobina

Con todo el bloque principal bien ajustado, se pasa a la colocación tanto del soporte para el filamento del material, como de la fuente de alimentación que será la encargada de suministrar la potencia a la electrónica.

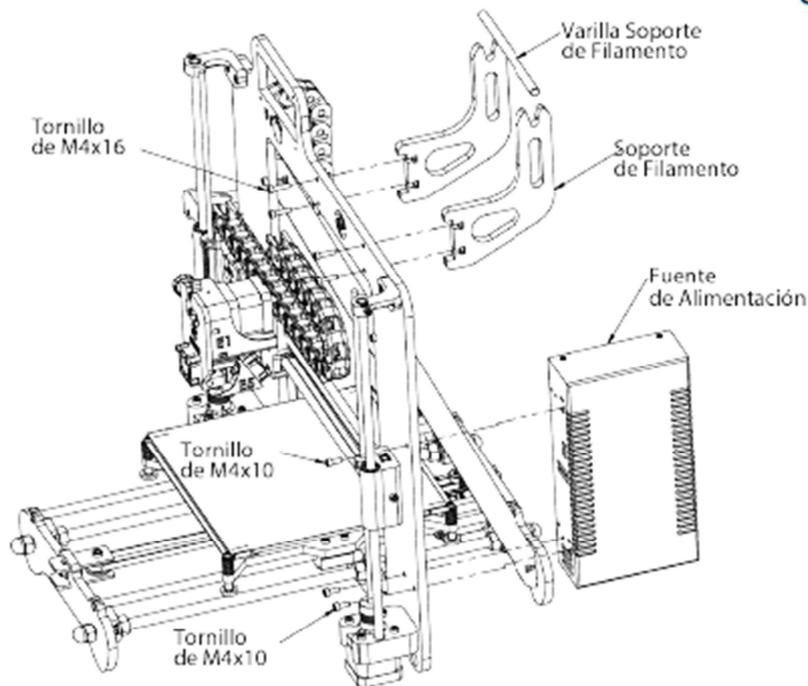


Imagen 38. Colocación de fuente y soporte bobina [5]

En este punto he de emitir una opinión negativa acerca de la fuente de alimentación, ya que para apagar la impresora hay que desenchufar desconectando el cable, y no a través de un interruptor sencillo que simplificaría su manejo y además evitaría el deterioro progresivo del cable de la alimentación.

#### PASO 9. Pantalla Cubrecables Fuente

Otras de las novedades de esta impresora con respecto a las vistas anteriormente es su pantalla LCD, que fue lo que se incorporó en este paso, además de la protección correspondiente.

Esta pantalla, como ya se ha comentado anteriormente, se considera una gran ventaja, principalmente porque el usuario puede imprimir de una forma mucho más directa todos sus diseños, únicamente habiéndolos grabado con anterioridad en la tarjeta SD.

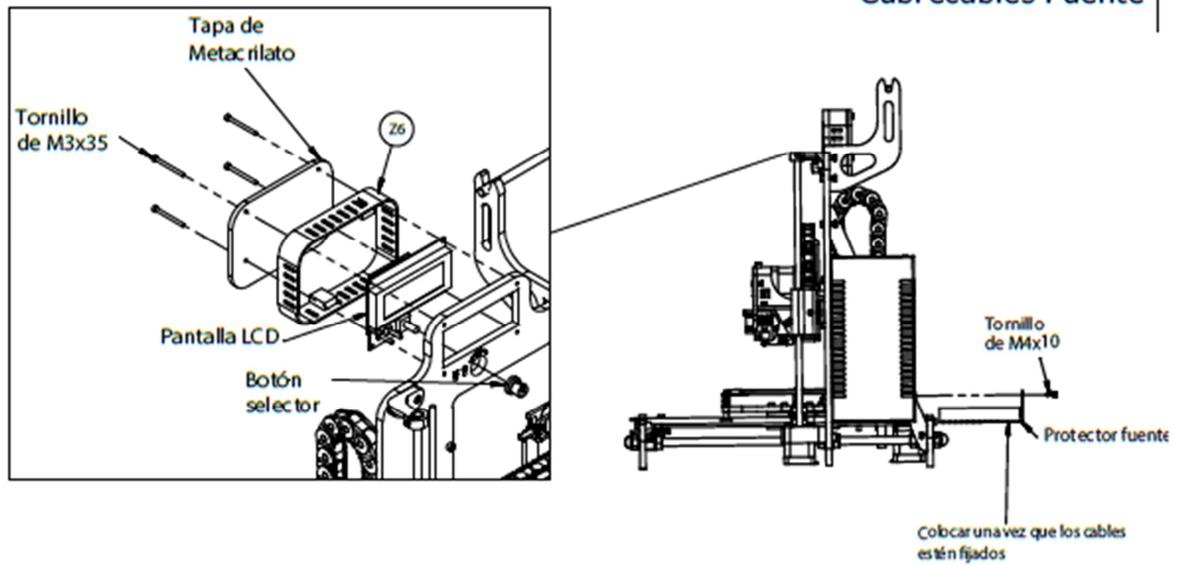
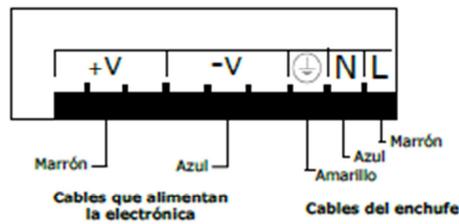


Imagen 39. Colocación pantalla LCD [5]

## PASO 10. Electrónica

En este esquema vienen referenciados todos los puntos dónde la impresora ha de conectar cada uno de los conectores relacionados con cada parte de la misma. Es un esquema de gran utilidad, que no hay que perder de vista.

### Fuente Alimentación



### Conexión Electrónica

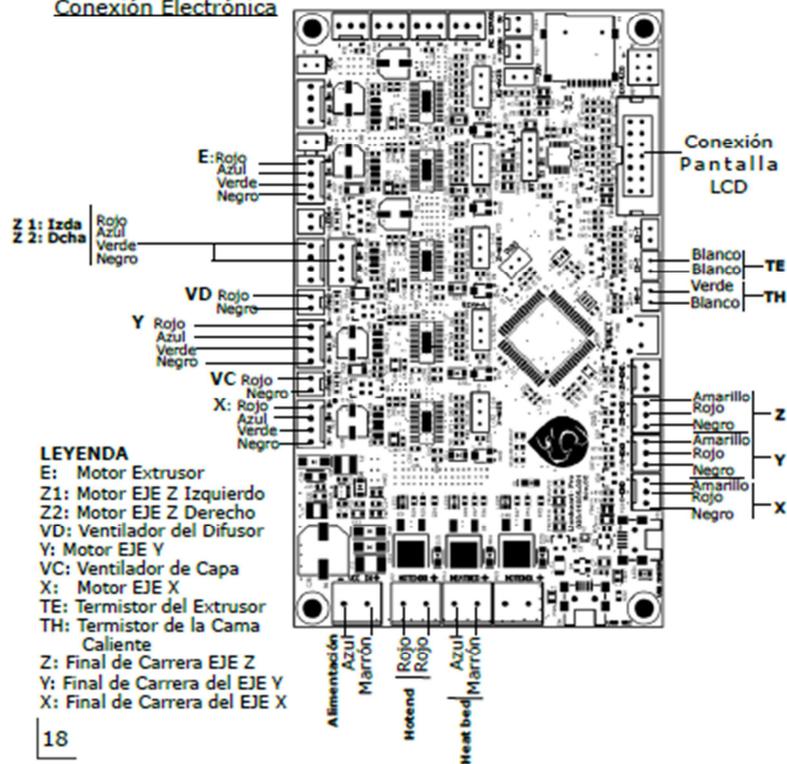


Imagen 40. Esquema electrónico de placa de impresora [5]

### PASO 11. Colocación tapas electrónica y cubre cables fuente

Por último y para que la impresora no tenga problemas con las conexiones eléctricas de la placa, se realiza la colocación de todas las tapas correspondientes y se ultiman los detalles necesarios para poder comenzar a imprimir a un gran nivel.

A parte de todas las conexiones indicadas, en la zona superior derecha, también puede verse el lugar dónde irá la tarjeta micro USB, de fácil acceso para poder extraerla y grabar los archivos .gcode que se quieran imprimir.

## Colocación Tapas Electrónica Cubrecables Fuente

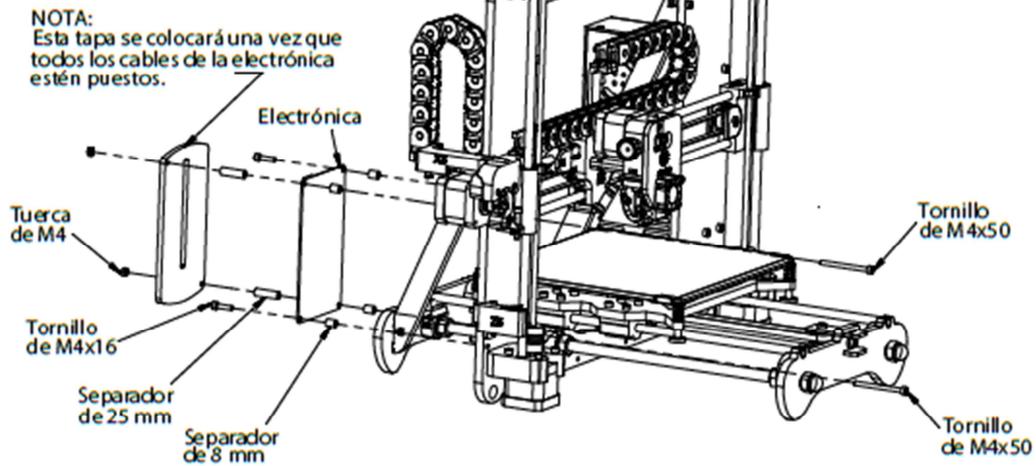


Imagen 41. Colocación tapas electrónica [5]

**PASO 12.** Una vez terminado el montaje de la impresora se procedió a un paso muy importante antes de realizar cualquier impresión, que es la nivelación de la cama caliente. Dados unos parámetros de ajuste y con la ayuda de los tornillos pertenecientes al eje Y que permiten nivelar la cama, este proceso no supuso ningún problema.

### 3. CONCEPTOS DE ÓPTICA

En este apartado se van a presentar las leyes ópticas necesarias para poder entender con claridad el objetivo de este trabajo. Los experimentos que se quieren realizar mediante la impresión de las piezas en 3D están basados en conceptos básicos de la óptica, como son:

- Óptica de rayos.
- Leyes de Snell.
- Polarización.
- Ángulo de Brewster.
- Patrones de difracción de Fresnel.

#### 3.1 Óptica de rayos

El estudio de las imágenes, producidas por la reflexión o refracción de la luz, se llama óptica geométrica o de rayos. La óptica geométrica se ocupa de las trayectorias de los rayos luminosos, despreciando los efectos de la luz como el movimiento ondulatorio o las interferencias. Estos efectos se pueden despreciar cuando el tamaño la longitud de onda es muy pequeña en comparación de los objetos que la luz encuentra a su paso.

Como se indicó anteriormente, en la óptica geométrica, la luz se propaga como una línea recta a una velocidad aproximada de  $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ . La naturaleza ondulatoria de la luz puede ser despreciada debido a que aquí la luz es como un chorro lineal de partículas que pueden colisionar y, dependiendo del medio, se puede conocer cuál es su camino a seguir. [5]

##### 3.1.1 Concepto de reflexión

El fenómeno más sencillo de esta teoría es el de la reflexión, si se piensa unos minutos en los rayos luminosos que chocan mecánicamente contra una superficie que puede reflejarse. La proporción entre los rayos que chocan y los que salen expedidos está regulada por los ángulos de éstos en relación con una línea perpendicular a la superficie en la que se reflejan, denominada, la normal. Entonces la ley de reflexión nos dice que el ángulo incidente es igual al ángulo reflejado con la perpendicular al espejo.

La segunda ley de la reflexión nos indica que el rayo incidente, el rayo reflejado y la normal con respecto a la superficie reflejada están en el mismo plano.

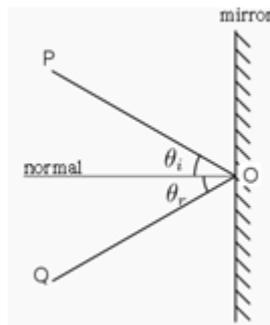


Imagen 42. Reflexión de la luz [5]

Donde,

$$\theta_r = \theta_i$$

### 3.1.2 Concepto de refracción

Por otro lado se tiene la ley de la refracción que fue descubierta experimentalmente en 1621 por Willebrord Snell. [5]

La refracción es el cambio de dirección y velocidad que experimenta una onda al pasar de un medio a otro con distinto índice refractivo o de refracción. Sólo se produce si la onda incide oblicuamente sobre la superficie de separación de los dos medios y si estos tienen índices de refracción distintos. La refracción se origina en el cambio de velocidad de propagación de la onda señalada.

En la refracción el rayo de luz que atraviesa un medio transparente a otro, se denomina rayo incidente. El rayo de luz que se desvía al ingresar al segundo medio transparente se denomina rayo refractado. El ángulo con el que el rayo incidente, al ingresar al segundo medio, forma con la perpendicular al mismo, se denomina ángulo de incidencia. El ángulo que el rayo incidente, al desviarse, es decir, el rayo refractado, forma con la perpendicular, se denomina ángulo de refracción o ángulo indeterminado. Este último varía directamente en relación a la diferencia entre los índices de refracción de ambas superficies (dependientes a su vez de la diferencia de la velocidad de la luz a través de distintos materiales).

Los espejismos son el resultado de un caso extremo de la refracción de la luz, denominado reflexión total, que se explicará más adelante.

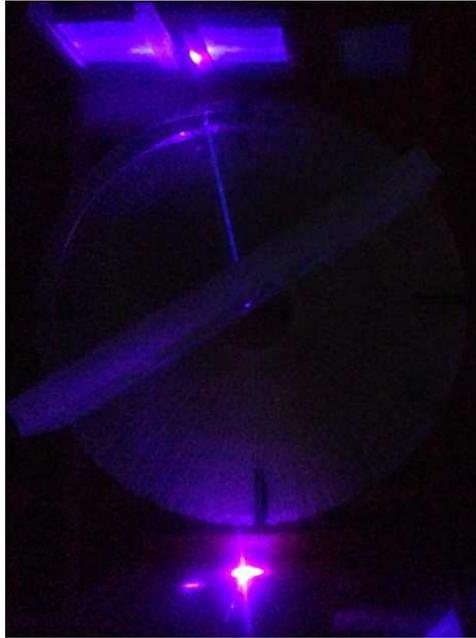


Imagen 43. Refracción de la luz

### 3.1.3 Concepto de difracción

La difracción es un fenómeno característico de las ondas que se basa en la desviación de estas al encontrar un obstáculo o al atravesar una rendija. La difracción ocurre en todo tipo de ondas, desde ondas sonoras, ondas en la superficie de un fluido y ondas electromagnéticas como la luz visible y las ondas de radio. También sucede cuando un grupo de ondas de tamaño finito se propaga, por ejemplo, por causa de la difracción, el haz colimado de ondas de luz de un láser debe finalmente divergir en un rayo más amplio a una cierta distancia del emisor.

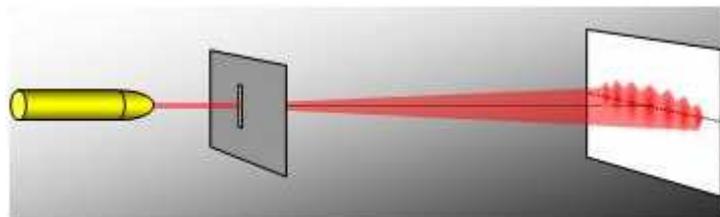


Imagen 44. Difracción de la luz [6]

## 3.2 Leyes de Snell

En este trabajo las leyes de Snell servirán para explicar dos experimentos diferentes.

Por una lado, la ley de Snell es una fórmula utilizada para calcular el ángulo de refracción de la luz al atravesar la superficie de separación entre dos medios de propagación de la luz (o cualquier o cualquier onda electromagnética) con índice de refracción distinto.

Por otro se tiene el concepto de reflexión total. Lo que se va a intentar observar es como un rayo de luz se propaga por un medio con índice de refracción  $n_1$ , incidiendo con un

ángulo  $\theta_1$  sobre la superficie de un medio con índice  $n_2$  con  $n_1 > n_2$  y se refleja totalmente en el interior del medio de mayor índice de refracción. [7]

A continuación se explica cada situación por separado.

### 3.2.1 Refracción de la luz

Como ya se ha dicho, la ley de Snell es una fórmula utilizada para calcular el ángulo de refracción de la luz al atravesar la superficie de separación entre dos medios de propagación de la luz (o cualquier o cualquier onda electromagnética) con índice de refracción distinto.

La misma afirma que la multiplicación del índice de refracción por el seno del ángulo de incidencia respecto a la normal es constante para cualquier rayo de luz incidiendo sobre la superficie separatriz de dos medios. Es decir, el componente del índice de refracción paralelo a la superficie es constante.

Hay que considerar dos medios caracterizados por índices de refracción y separados por una superficie  $S$ . Los rayos de luz que atraviesen los dos medios se refractarán en la superficie, variando su dirección de propagación dependiendo del cociente entre los índices de refracción  $n_1$  y  $n_2$ .

Para un rayo luminoso con un ángulo de incidencia  $\theta_1$  sobre el primer medio, ángulo entre la normal a la superficie y la dirección de propagación del rayo, se tendrá que el rayo se propaga en el segundo medio con un ángulo de refracción  $\theta_2$ , cuyo valor se obtiene por medio de la Ley de Snell, la cual tiene en cuenta todos los factores hasta ahora descritos: [7]

$$n_1 * \text{sen}\theta_1 = n_2 * \text{sen}\theta_2$$

$$n = \frac{c}{v}$$

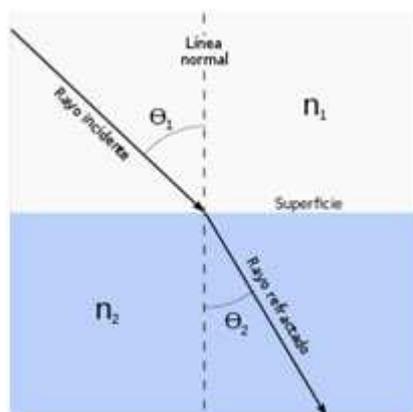


Imagen 45. Refracción de la luz (2) [7]

Aclarando conceptos, hasta ahora se tiene:

$n_1$  = Índice de refracción del primer medio.

$\theta_1$  = ángulo que forma la onda incidente con la normal.

$n_2$  = índice de refracción del segundo medio.

$\theta_2$  = ángulo que forma la onda refractada con la normal.

$c$  = velocidad de la luz ( $3 \cdot 10^8$  m/s).

$v$  = velocidad de la luz en el medio.

Obsérvese que para el caso de  $\theta_1 = 0$  (rayos incidentes de forma perpendicular a la superficie) los rayos refractados emergen con un ángulo  $\theta_2 = 0$  para cualquier  $n_1$  y  $n_2$ .

La simetría de la Ley de Snell implica que las trayectorias de los rayos de luz son reversibles. Es decir, si un rayo incide sobre la superficie de separación con un ángulo de incidencia  $\theta_1$  se refracta sobre el medio con un ángulo de refracción  $\theta_2$ , entonces un rayo incidente en la dirección opuesta desde el medio 2 con un ángulo de incidencia  $\theta_2$  se refracta sobre el medio 1 con un ángulo  $\theta_1$ .

Una regla cualitativa para determinar la dirección de la refracción, es que el rayo en el medio de mayor índice de refracción se acerca siempre a la dirección de la normal de la superficie. La velocidad de la luz en el medio de mayor índice de refracción es siempre menor.

La ley de Snell se puede derivar a partir del principio de Fermat, que indica que la trayectoria de la luz es aquella en la que los rayos de luz necesitan menos tiempo para ir de un punto a otro.

En una analogía clásica propuesta por el físico Richard Feynman, el área de un índice de refracción más bajo es substituida por una playa, el área de un índice de refracción más alto por el mar, y la manera más rápida para un socorrista en la playa de rescatar a una persona que se ahoga en el mar es recorrer su camino hasta ésta a través de una trayectoria que verifique la ley de Snell, es decir, recorriendo mayor espacio por el medio más rápido y menor en el medio más lento girando su trayectoria en la intersección entre ambos.

### 3.2.2 Reflexión interna total

Un rayo de luz propagándose por un medio con índice de refracción  $n_1$ , incidiendo con un ángulo  $\theta_1$  sobre la superficie de un medio con índice  $n_2$  con  $n_1 > n_2$  puede reflejarse totalmente en el interior de un medio de mayor índice de refracción.

Este fenómeno se conoce como reflexión interna total o ángulo límite y se produce para ángulos de incidencia  $\theta_1$  mayor que un valor crítico, estableciendo el valor de este ángulo crítico mediante la siguiente relación.

$$\theta_1 = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

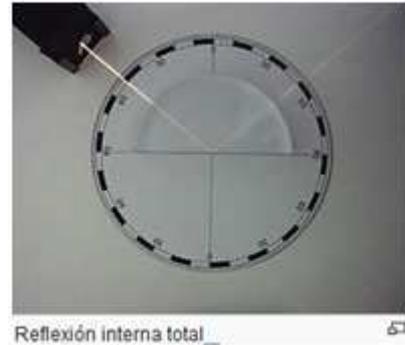
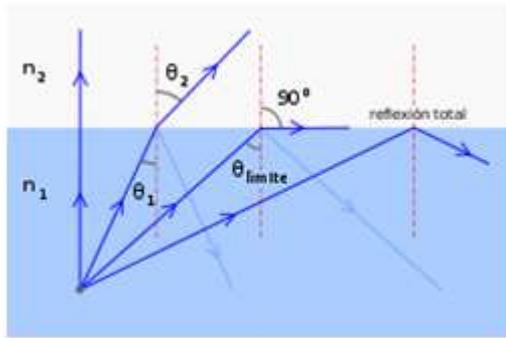


Imagen 46. Reflexión de la luz (2) [7]

Si  $n_1 > n_2$ , según la Ley de Snell mencionada anteriormente,

$$n_1 * \text{sen}\theta_1 = n_2 * \text{sen}\theta_2.$$

Entonces,  $\theta_2 > \theta_1$ . Eso significa que cuando  $\theta_1$  aumenta,  $\theta_2$  llega a  $\frac{\pi}{2}$  radianes ( $90^\circ$ ) antes que  $\theta_1$ .

El rayo refractado (o transmitido) viaja en paralelo a la superficie separatriz de los medios.

Si  $\theta_1$  aumenta aún más, como  $\theta_2$  no puede ser mayor que  $\frac{\pi}{2}$ , no hay transmisión al otro medio y la luz se refleja totalmente.

Hasta ahora y con lo que se ha comentado, se podría realizar uno de los experimentos que se van a presentar más adelante, como es el del cálculo del índice de refracción, tanto su parte A como la B.

Por tanto, antes de entrar a explicar el principio del otro experimento a realizar, se explicará que es la polarización y a qué tipo de ondas afecta, y por otro los filtros polarizadores (usados en el experimento) y qué se quiere conseguir con el uso de los mismos.

### 3.3 Polarización

La polarización electromagnética es una propiedad de las ondas que pueden oscilar con más de una orientación. Esto se refiere normalmente a las llamadas ondas transversales, en particular se suele hablar de las ondas electromagnéticas, aunque también se puede dar en otras ondas longitudinales. Por otra parte, las ondas de sonido en un gas o líquido son ondas exclusivamente longitudinales en la que la oscilación va siempre en la dirección de la onda, por lo que no se habla de polarización en este tipo de ondas. [8]

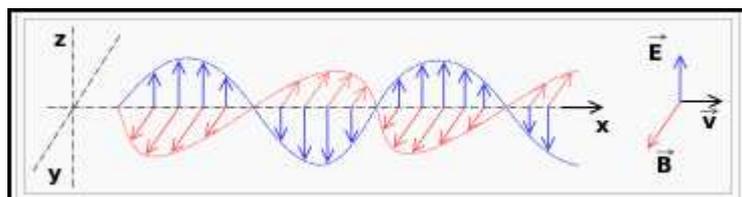


Imagen 47. Polarización ondas electromagnéticas

En una onda electromagnética, tanto el campo eléctrico como el campo magnético son oscilantes, pero en diferentes direcciones. Ambas perpendiculares entre si y perpendiculares a la dirección de propagación de la onda, las ecuaciones de Maxwell modelan este comportamiento. Por convención, el plano de polarización de la luz se refiere a la polarización del campo eléctrico.

### 3.3.1 Polarización de ondas planas

Una onda plana, es una buena aproximación de una onda luminosa.

En un punto determinado la onda del campo eléctrico puede tener dos componentes vectoriales perpendiculares (transversales) a la dirección de propagación. Las dos componentes vectoriales transversales varían su amplitud con el tiempo, y la suma de ambas va trazando una figura geométrica. Si dicha figura es una recta, la polarización se denomina lineal, si es un círculo, la polarización es circular, y si es una elipse, la polarización es elíptica.

Si la onda electromagnética es una onda armónica simple, como en el caso de una luz monocromática, en que la amplitud del vector de campo eléctrico varía de manera sinusoidal, los dos componentes tienen exactamente la misma frecuencia. Sin embargo, estos componentes tienen otras dos características de definición que pueden ser diferentes. Primero, los dos componentes pueden no tener la misma amplitud. Segundo, los dos componentes pueden no tener la misma fase, es decir, pueden no alcanzar sus máximos y mínimos al mismo tiempo. [8]

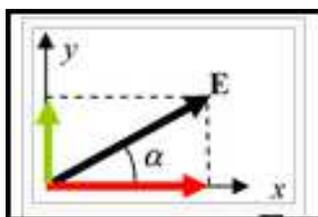


Imagen 48. Descomposición del campo eléctrico en dos componentes [8]

### 3.3.2 Tipos de polarización

Cada uno de los siguientes ejemplos que se pueden ver en la siguiente figura, corresponde a un tipo de polarización: [8]

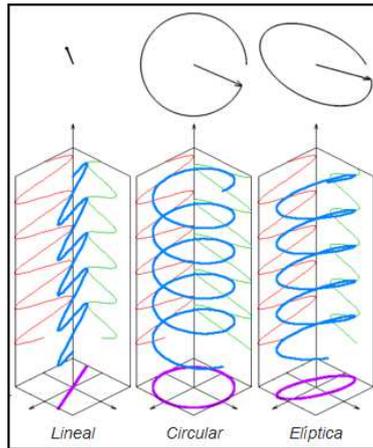


Imagen 49. Tipos de Polarización [8]

- **Polarización Lineal:** La oscilación del plano perpendicular a la dirección de propagación se produce a lo largo de una línea recta.

Se puede representar cada oscilación descomponiéndola en dos ejes X e Y.

La polarización lineal se produce cuando ambas componentes están en fase (con un ángulo de desfase nulo, cuando ambas componentes alcanzan sus máximos y mínimos simultáneamente) o en contrafase (con un ángulo de desfase de  $180^\circ$ , cuando cada una de las componentes alcanza sus máximos a la vez que la otra alcanza sus mínimos). La relación entre las amplitudes de ambas componentes determina la dirección de la oscilación, que es la dirección de la polarización lineal.

- **Polarización Circular:** Las dos componentes ortogonales tienen exactamente la misma amplitud y están desfasadas exactamente  $90^\circ$ .

En este caso, una componente se anula cuando la otra componente alcanza su amplitud máxima o mínima. Existen dos relaciones posibles que satisfacen esta exigencia, de forma que la componente x puede estar  $90^\circ$  adelantada o retrasada respecto a la componente Y. El sentido (horario o antihorario) en el que gira el campo eléctrico depende de cuál de estas dos relaciones se dé.

- **Polarización Elíptica:** Este tipo de polarización corresponde a cualquier otro caso diferente a los anteriores, es decir, las dos componentes tienen distintas amplitudes y el ángulo de desfase entre ellas es diferente a  $0^\circ$  y a  $180^\circ$  (no están en fase ni en contrafase).

### 3.3.3 Filtro Polarizador

Un filtro polarizador o polarizador es un material con transmitancia selectiva a una determinada dirección de oscilación del campo eléctrico de una onda electromagnética como la luz. Por lo general se trata de una película polimérica a base de Iodo estirada y emparedada

entre dos vidrios. [10]

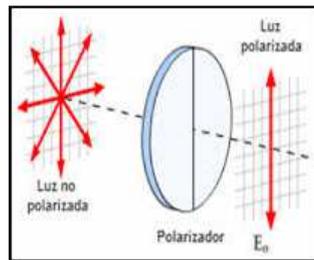


Imagen 50. Filtro Polarizador [9]

Podemos imaginar, el filtro polarizador es como una rejilla que permite únicamente el paso de la luz que oscila en el plano paralelo al vector normal a la superficie de la reja. La luz transmitida al otro lado del polarizador se considera luz polarizada. En realidad el filtro polarizador comercial consiste en una cadena de polímero estirada al límite, de modo que las moléculas actúan como una rejilla que absorbe fuertemente una componente polarizada de luz y es muy transparente a la otra componente, como describe la Ley de Malus.

Con todo lo visto hasta ahora, ya se podría analizar una onda plana y estudiarla para determinar su polarización. Esto se realizará usando la teoría siguiente:

Para averiguar el tipo de polarización de una onda, es necesario analizar el campo (magnético y eléctrico). Este análisis es idéntico, por tanto será suficiente con analizar tan solo uno de ellos. En este caso se ha elegido el campo eléctrico.

El campo eléctrico será de la forma:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cdot e^{j \cdot (\vec{k} \cdot \vec{r} \pm \omega \cdot t)}$$

La amplitud de la onda  $\vec{E}_0$ , va siempre en la dirección de polarización de la onda. Es por ello, que el análisis de esta amplitud dirá qué tipo de polarización se tiene.

El vector  $\vec{E}_0$  se puede descomponer como suma de un vector en paralelo a la incidencia con un vector perpendicular a dicho plano:

$$\vec{E}_0 = E_{0\parallel} \cdot e^{j \cdot \theta_{\parallel}} \cdot \vec{u}_{\parallel} + E_{0\perp} \cdot e^{j \cdot \theta_{\perp}} \cdot \vec{u}_{\perp}$$

Dónde el símbolo  $\parallel$  hace referencia a las componentes paralelas, mientras que  $\perp$  es

para las componentes perpendiculares.

Los vectores  $u$ , son vectores unitarios en la dirección que indican sus subíndices (paralela o perpendicular al plano de incidencia).

Por tanto, para saber qué tipo de polarización se tiene, se hace la diferencia entre las fases:

$$\theta_{||} - \theta_{\perp}$$

Y dependiendo de este resultado, se sabrá la polarización de la onda:

- Polarización Lineal: Si la diferencia es 0 o un múltiplo entero (positivo o negativo) de  $\pi$
- Polarización Circular: Si la diferencia es un múltiplo entero impar (positivo o negativo) de  $\frac{\pi}{2}$ . En este caso se cumple además que,  $E_{0||} = E_{0\perp}$ .
- En el resto de casos se producirá, Polarización Elíptica.

### 3.3.4 Obtención de luz polarizada

A continuación se explicarán brevemente algunos de los procedimientos experimentales que permiten la obtención de luz polarizada a partir de una emisión de luz natural. Para obtener luz polarizada linealmente se hace que el vector eléctrico vibre en un único plano (plano de polarización) de los que contienen la dirección de propagación. [9]

- Polarización por absorción selectiva:

Algunos materiales absorben selectivamente una de las componentes transversales del campo eléctrico de una onda. Esta propiedad se denomina dicroísmo. Esta propiedad tiene dos acepciones ópticas, pero sólo una está relacionada con aquellos materiales capaces de absorber, en distinta proporción, las diferentes polarizaciones que le llegan cuando un rayo luminoso incide sobre ellos.

Por tanto, mediante este experimento se podrá probar como la luz experimenta una absorción en ciertos estados de polarización.

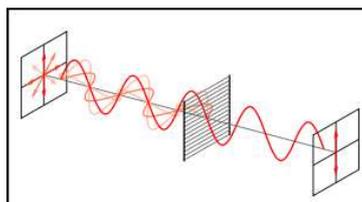


Imagen 51. Mecanismo de polarización

- Polarización por reflexión:

Al reflejarse un haz de luz no polarizado sobre una superficie, la luz reflejada sufre una polarización parcial de forma que el componente del campo eléctrico perpendicular al plano de incidencia (plano que contiene la dirección del rayo de incidencia y el vector normal a la superficie de incidencia) tiene mayor amplitud que el componente contenido en el plano de incidencia. [8]

### 3.4 Ángulo de Brewster

En física óptica, el ángulo de Brewster corresponde al ángulo de incidencia de luz sobre una superficie que anula la componente con polarización paralela al plano de incidencia. [10]

El resultado cuando se aplica un rayo de luz no polarizada sobre una superficie bajo el ángulo de Brewster es la obtención de un rayo reflejado de luz polarizada en una dirección (cuyo vector de polarización es perpendicular al plano de incidencia).

Cuando la luz incide sobre una superficie no absorbente con un determinado ángulo, el componente del campo eléctrico paralelo al plano de incidencia no es reflejado. Este ángulo, conocido como ángulo de Brewster, se alcanza cuando el rayo reflejado es perpendicular al rayo refractado. La tangente del ángulo de Brewster es igual a la relación entre los índices de refracción del segundo y el primer medio.

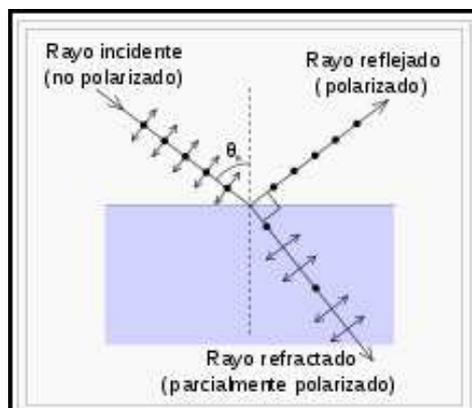


Imagen 52. Ángulo de Brewster [10]

En concreto la Ley de Brewster dice que cuando un haz de luz incide sobre la superficie que separa dos medios no conductores caracterizados por distintas permitividad eléctrica  $\epsilon$  y permeabilidad magnética  $\mu$ , parte del mismo se refleja de vuelta al medio de origen, y parte se transmite al mismo medio. En 1812, Brewster observó que cuando las direcciones de los haces transmitido y reflejado forman un ángulo de  $90^\circ$ , el haz de luz reflejado resulta polarizado linealmente.

Dicho de otra manera: *La polarización por reflexión es máxima cuando la tangente del ángulo de incidencia es igual al índice de refracción de la sustancia. La polarización es nula para la incidencia normal.*

Esto tiene una explicación, ya que al incidir un haz de luz con el ángulo de Brewster, la componente polarizada paralela al plano de incidencia se anula en el haz reflejado.

Por este motivo, el haz que vemos reflejado posee una polarización lineal, justamente en la dirección perpendicular al plano de incidencia, independientemente del tipo de polarización propia del haz incidente. Se debe notar que en el caso particular de incidir con un haz linealmente polarizado en la dirección paralela al plano de incidencia, el haz reflejado se anula en el ángulo de Brewster. En este caso, se produce una transmisión total del haz entre ambos medios.

En general, el ángulo de Brewster entre dos medios depende de las características electromagnéticas de los mismos (permitividad eléctrica y permeabilidad magnética). En el caso en que las permeabilidades magnéticas de ambos medios no varían (el caso más frecuente), el ángulo de Brewster se puede calcular a partir de los índices de refracción de ambos medios.

$$\tan(\theta_B) = \frac{n_2}{n_1}.$$

A continuación, se verá como se ha llegado a esta conclusión.

Cuando el haz que incide lo hace con el ángulo de polarización, el haz reflejado es perpendicular al haz transmitido.

Por lo tanto, el ángulo de refracción  $\theta_1$  es el ángulo complementario al ángulo de polarización  $\theta_2$ :

$$\sin(\theta_2) = \cos(\theta_1).$$

Haciendo uso de la Ley de Snell vista al principio de este capítulo:

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2).$$

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \cos(\theta_2).$$

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\cos(\theta_1)} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Usando la relación matemática encontrada por Brewster, se tiene:

$$\tan(\theta_1) = \frac{n_2}{n_1}.$$

Por lo tanto, la ley de Brewster permite calcular el ángulo de polarización, que se denomina, en su nombre, Ángulo de Brewster:

$$\tan(\theta_B) = \frac{n_2}{n_1}.$$

O lo que es lo mismo:

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right).$$

### 3.5 Patrones de difracción de Fresnel

La difracción de Fresnel o también difracción del campo cercano es un patrón de difracción de una onda electromagnética obtenida muy cerca del objeto causante de la difracción (a menudo una fuente o apertura). Más precisamente, se puede definir como el fenómeno de difracción causado cuando el número de Fresnel es grande y por lo tanto no puede ser usada la aproximación Fraunhofer (difracción de rayos paralelos). [6]

Este número de Fresnel se define como sigue.

El número de Fresnel  $F$ , llamado así por el físico Augustin-Jean Fresnel, es un número adimensional que se utiliza en óptica, particularmente en la difracción de las ondas electromagnéticas.

Para una onda electromagnética que atraviesa una apertura e impacta sobre una pantalla, el número de Fresnel  $F$  se define cómo:

$$F = \frac{a^2}{L\lambda}$$

Dónde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $a$  es el tamaño (en este caso la amplitud de la rendija rectangular) de la apertura, y  $L$  es la distancia desde la apertura hasta la pantalla.

Dependiendo del valor de  $F$ , la difracción puede ser de dos tipos (o casos) especiales:

- Difracción de Fraunhofer para  $F \ll 1$
- Difracción de Fresnel para  $F \geq 1$

Valores intermedios requieren un análisis más detallado basado en la teoría de la difracción escalar.

La condición de validez es algo débil y permite que los parámetros de dimensión del obstáculo tengan valores comparables: la apertura es pequeña comparada con el camino óptico. De esta forma es interesante investigar en el comportamiento del campo eléctrico sólo en una pequeña porción de área cercana al origen de la fuente luminosa, es decir para valores de  $x$  e  $y$  mucho más pequeños que  $z$ , en este caso se puede asumir que  $\theta \approx 0$ , esto viene a significar que:  $\cos\theta \approx 1$ .

De esta forma, al igual que la difracción de Fraunhofer, la difracción de Fresnel ocurre debido a la curvatura del frente de onda.

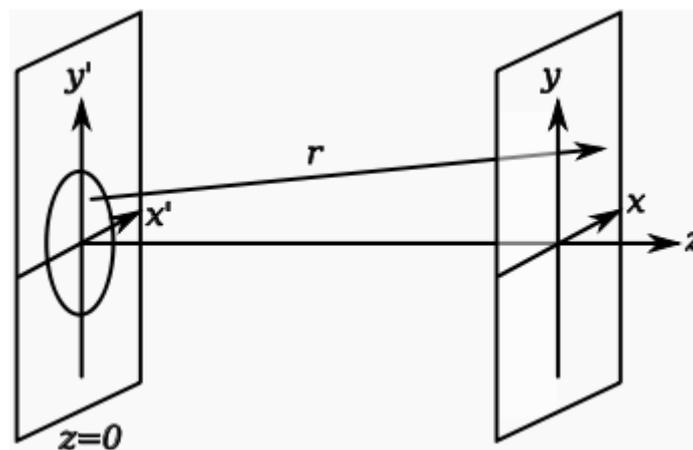


Imagen 53. Geometría de la difracción [8]

## 4. DISEÑO DE PIEZAS Y AJUSTES

En este apartado se van a describir todas las piezas finales y el objetivo para el que fueron fabricadas. En este trabajo hay 3 grandes finalidades para las cuales cada pieza es necesaria, intentando siempre estandarizar los diseños al máximo, consiguiendo con esto que una misma un mismo diseño pueda servirnos para cuantas más pruebas o experimentos mejor.

Todos los archivos .stl para su posible impresión en 3D se encuentran en el ANEXO I de este trabajo.

Los experimentos finales a destacar son:

- Cálculo del ángulo de Brewster y su puesta en práctica
- Cálculo del índice de refracción de un material mediante la toma de medidas
- KHET o Laser Chess, con un enfoque menos educacional pero más entretenido de la óptica. [16]

### 4.1 Piezas comunes

Pieza común se denomina al diseño de la pieza válida para usar en cualquiera de los 3 casos antes mencionados.

#### 4.1.1 Tablero

El tablero es quizá la pieza que desde un principio se tuvo más claro que debía de valer para cualquier prueba, experimento o modificación que se quisiera realizar. La principal razón es que es la pieza más grande de todas, y por tanto la que más gasto de material conlleva, y ya que este trabajo está pensado para que educacionalmente se lo pueda permitir cualquier bolsillo, fue la primera que se diseñó y estandarizó para todos los casos.

A raíz de las medidas de sus divisiones se fueron diseñando el resto de elementos.

Hay que decir, que, hasta ahora y también más adelante, las fotos que se vean de esta pieza darán la impresión de que es una pieza única y fija, pero nada más lejos de la realidad.

Por un lado se necesitaba toda la pieza con dimensiones de 10x8 divisiones para poder jugar al KHET, pero debido a que la base de impresión no daba cabida a esa superficie, siendo la base de medidas 200 x 200 x 200 mm y el tablero completo 230 x 185 mm (teniendo la altura de la pieza como un factor sin importancia), se tuvo que modular de la siguiente forma.

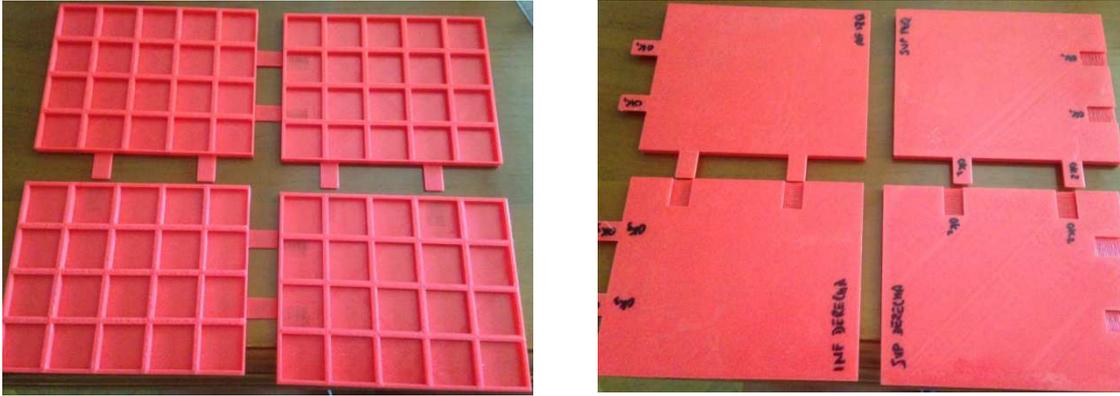


Imagen 54. Módulos de la pieza Tablero [11]

En las imágenes se pueden ver una serie de pestañas, que son las que dan estabilidad a toda la pieza en su conjunto. Este fue uno de los primeros puntos de diseño que tuvo sus complicaciones, debido a varios factores como la precisión de la impresión dependiendo de la configuración del Repetier, o las diferentes propiedades de cada color a la hora de las medidas, etc.

El hecho, es que idealmente en el diseño con el programa Catia no tendría que haber ningún problema, dado que las piezas de este trabajo no son piezas geoméricamente complejas, pero están condicionadas a una serie de factores relacionados directamente con la impresión en 3D que hicieron que se tuvieran que hacer varias pruebas como se ve en las siguientes imágenes.

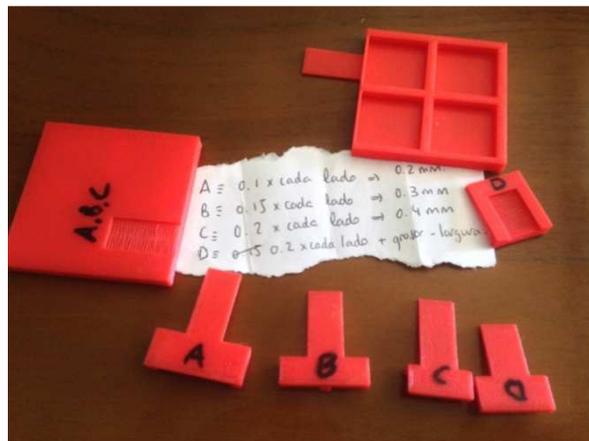


Imagen 55. Primeras medidas muescas Tablero

Una vez encontrada la medida adecuada, el siguiente paso fue imprimir las 4 muescas a la vez, dado que en un principio el tablero iba a ser modular pero sólo en dos partes.

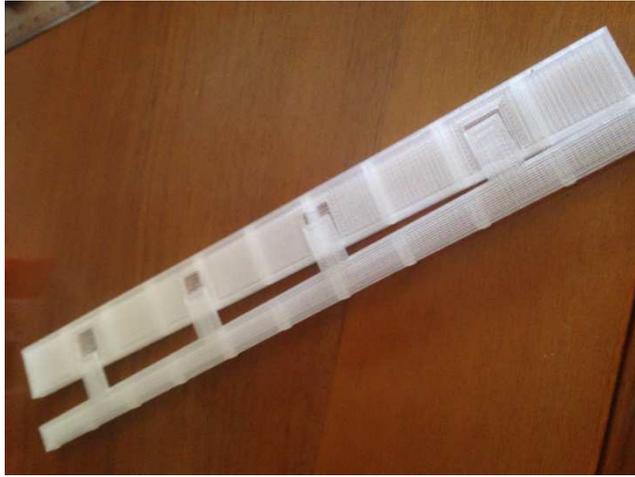


Imagen 56. Impresión de las 4 muescas Tablero

Cuando se realizó la impresión de las 2 piezas iniciales, se pudo ver que al cambiar de color de plástico la configuración del Repetier debía de ser otra, y esto podría ocasionar más modificaciones, por eso se decidió que el color del tablero fuera el inicialmente elegido, además de porque al ser más opaco se evitaría cualquier problema con la luz.

Finalmente se consiguieron 4 bloques sólidos que unidos entre si formaban el tablero con divisiones equidistantes necesario tanto para nuestro banco óptico como para la práctica del juego de óptica.

Hay que decir, que hubo que realizar un último retoque, lijando levemente las muescas para que encajaran a la perfección con el resto de las partes.

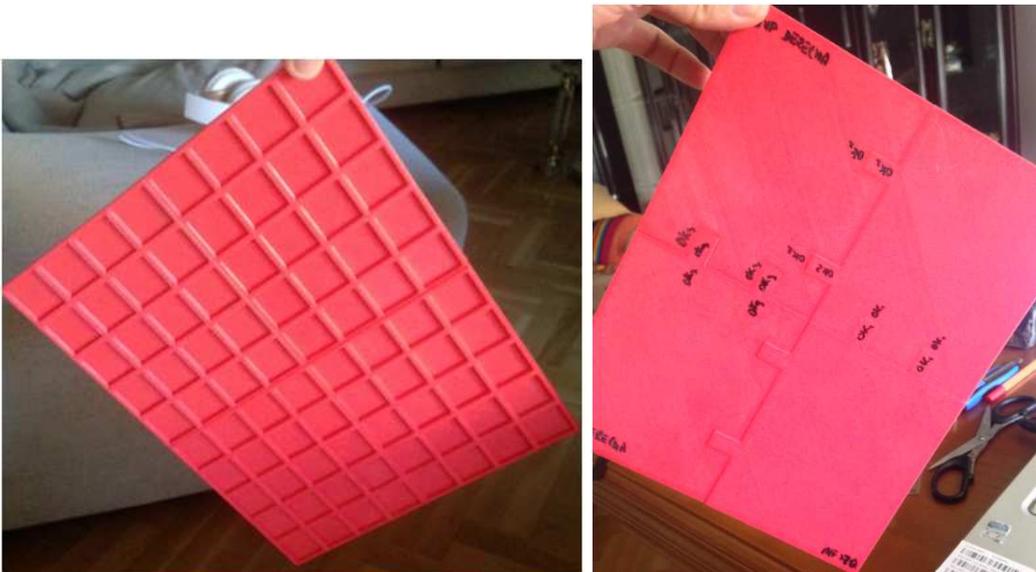


Imagen 57. Tablero completo. Unión 4 módulos [11]

### 4.1.2 Soporte de láser

El soporte del láser es otro de los diseños más estándar que se han conseguido, con la particularidad de que en lo últimos días del desarrollo del proyecto, se decidió incorporar otro láser distinto para realizar los experimentos del cálculo del índice de refracción del disco de Hartl.

Esta decisión vino a raíz de que la longitud de onda de este último hacía que los haces de luz se apreciaran mejor dentro del material, pero llevaba como consecuencia que las medidas de este segundo láser fuesen muy diferentes al primero, como se ve en las imágenes.



Imagen 58. Láseres utilizados para realizar los experimentos

Por tanto, aunque el diseño del soporte tanto para uno como para otro es muy parecido, cambia el diámetro del pasante y la fijación al tablero, ya que este último pesa más y hay que fijarlo bien para mantener un línea recta.

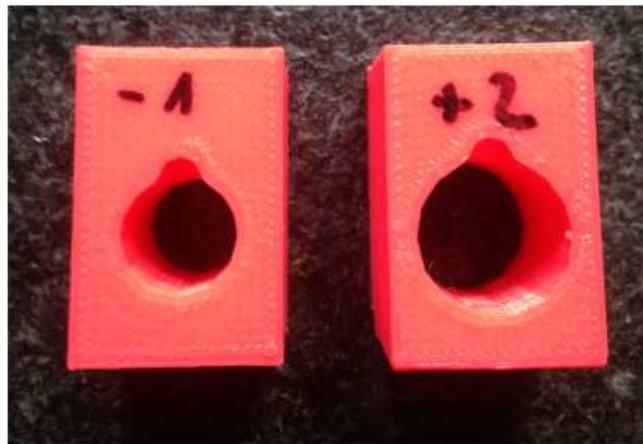


Imagen 59. Soportes láseres [11]

El diseño inicial se puede ver a continuación, que fue válido, después de muchas modificaciones para el láser más pequeño, contando también con pulsador que hace que el

láser pueda mantenerse encendido para realizar las modificaciones que se necesiten.



Imagen 59. Pulsador láser pequeño [11]

Esto no pudo conseguirse para el láser de mayor tamaño, debido a que no hubo tiempo de diseñar un pulsador acorde con las medidas, tanto del láser en si, como de la forma del botón del propio láser.

#### 4.1.3 Pantallas

Las pantallas han sido otras de las piezas con las que se ha conseguido una gran estandarización, sin resultar muy difícil, debido a que el objetivo de estas piezas es sencillo. Están diseñadas para soportar una lámina, ya sea cartulina blanca, cristal o polarizador, verticalmente.

Se tuvo la idea de este diseño gracias a la pieza perteneciente al conjunto de Laser Chess, (SCARAB), [16] que lo que hace es soportar una lámina vertical con una inclinación de  $45^\circ$  para que el rayo sea reflejado y cambie de camino. Se realizaron cambios en las medidas iniciales en relación al tablero diseñado.

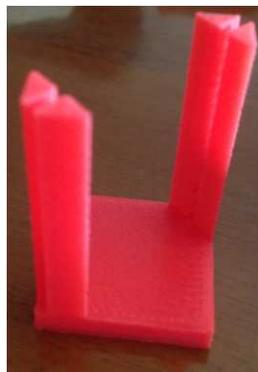


Imagen 60. Diseño inicial de pantalla [11]

A partir de esta pieza, se pensó que podría ser útil fabricar más tipos de soportes como este para usarlos como pantallas, ya fuese para ver el haz de luz reflejado o refractado, tanto como para colocar el polarizador justo enfrente del láser y poder polarizar el haz emitido.

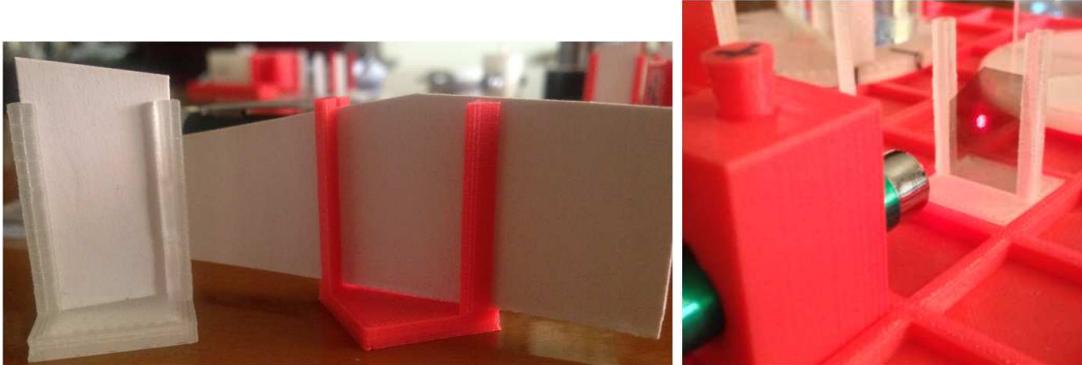


Imagen 61. Diseños finales de la pieza Pantalla [11]

Por tanto, como piezas finales de estas pantallas se tienen dos tipos, uno de ellos con una inclinación de  $45^\circ$  y otro totalmente horizontal.

## 4.2 Piezas particulares

Ahora se describirán las piezas pertenecientes a cada uno de los experimentos, ya que para llevarlos a cabo, se han tenido que diseñar elementos con diferentes características.

### 4.2.1 Experimento cálculo de índice de refracción de un material

#### 4.2.1.1 Disco de Hartl

Al elegir este como uno de los experimentos que se iban a fabricar con la impresora, lo primero que se tuvo que diseñar fue un disco, con diferentes graduaciones para tener de la manera más precisa posible una medida del ángulo refractado o reflejado en cada caso.

En un principio no se sabía muy bien la forma, ni el tamaño, ni hasta qué punto la impresora iba a ser capaz de imprimir la distancia entre diferentes ángulos.

Por eso se comenzó con un diseño como este, en el cual, tanto base como disco son una pieza unitaria y se realizaron las primeras muescas para marcar los ángulos cada  $30^\circ$ .



Imagen 62. Diseño inicial del disco de Hartl

El siguiente paso fue separar, por un lado el disco y por otro la base que hacía de unión entre la pieza y el tablero. Aumentando también el diámetro del disco, pero manteniendo el diseño como una separación de  $30^\circ$  entre las muescas.

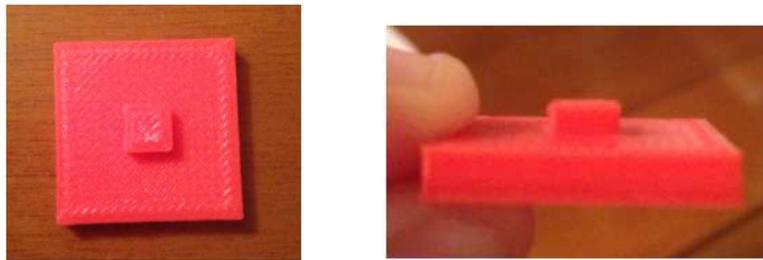


Imagen 63. Pieza de unión entre disco y tablero

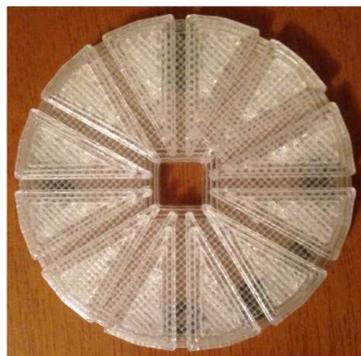


Imagen 64. Diseño mejorado de disco de Hartl

Uno de los últimos cambios que se realizaron fue el de disminuir la separación entre muescas, para comprobar si la impresora podría ser capaz de imprimir con tanta precisión, y el resultado fue de lo más satisfactorios.

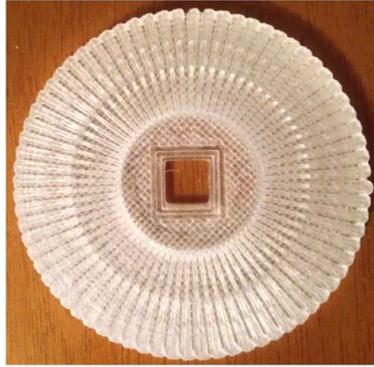


Imagen 65. Segundo modelos disco Hartl

Ya por último, y al haber comprobado que la impresora respondía bien a las exigencias que se la pedían, se aumentó el diámetro del disco de 4cm a 8 cm, estableciendo como ancho de cada muesca 0.6mm, por si en un futuro se necesitase anclar algún soporte en algún ángulo en concreto.

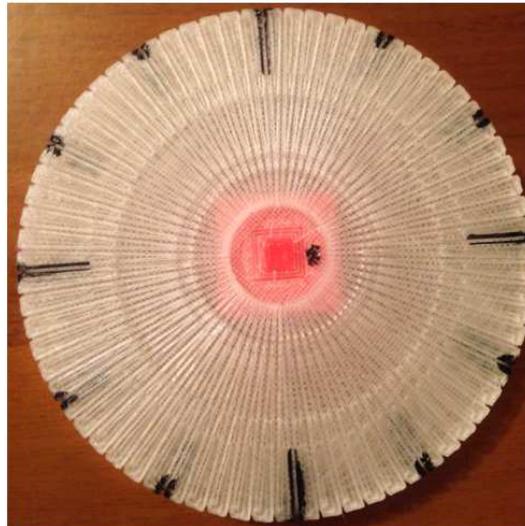


Imagen 66. Diseño final del disco de Hartl [11]

#### 4.2.1.2 Soporte para cristal

Una vez que se tuvo el disco con un diseño apropiado, se pasó a diseñar el soporte para poder fijar el cristal al disco con una graduación adecuada, y no perder precisión en ese aspecto. Fue una de las últimas piezas y no costó tanto hacerla ya que se notaba la soltura en el diseño, como el mayor conocimiento del comportamiento de la impresora, hasta que medidas podía imprimir, que margen había que darla para que el elemento cupiera en el pasante, etc.



Imagen 68. Soporte final para cristal [11]

Gracias a la precisión de esta pieza, se pudieron realizar con gran precisión los dos experimentos relacionados con el índice de refracción en el disco de Hartl, ya que proporciona robustez y exactitud en la toma de medidas.

#### 4.2.1.3 Rendija

Esta pieza se diseñó con el objetivo de simular un patrón de difracción de Fresnel.

Se probaron varios mecanismos que no dieron un buen resultado, como realizar un corte en un patrón de difracción de Fresnel e introducirlo dentro del láser, pero el haz de luz, como mejor se vio fue con el uso de esta rendija, colocándola frente al láser.

Dio la casualidad que cuando se pensó en esta solución, el material con el que se estaba imprimiendo era blanco/transparente, lo cual, fue algo contraproducente para este objetivo en concreto, ya que gracias a su transparencia el frente de ondas no se formaba debidamente para salir por la rendija y no causaba el efecto esperado. Por tanto se tuvo que fabricar el mismo modelo, pero con el color rojo, y color mucho más opaco y que funcionaba mucho mejor.

Probablemente con el uso de un láser de línea, este elemento no hubiese hecho falta, pero no se tuvo margen de conseguir uno a tiempo.

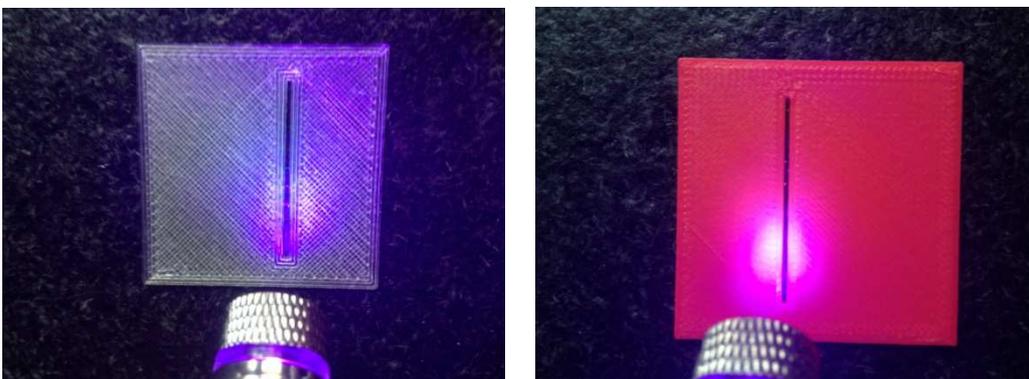


Imagen 69. Mismo diseño de rendija fabricada con 2 colores diferentes [11]

Uno de los miedos que se tenía era que el espesor de esta pieza era relativamente pequeño, 1mm, pero resultó ser de gran consistencia.

El inconveniente de esta solución en relación con las otras, fue que se necesitaría de un soporte para mantener la rendija en posición vertical, por esta razón se tuvo que diseñar un soporte de rendija, partiendo de la base que la unión con el tablero se haría mediante el diseño antes utilizado para el disco.

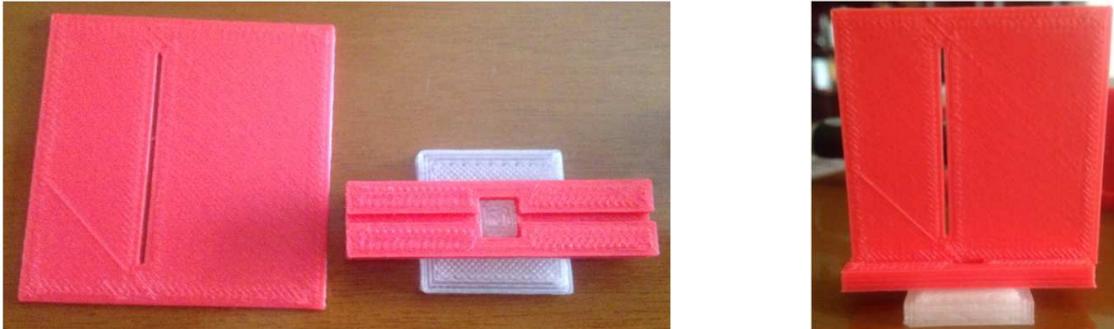


Imagen 70. Soporte final rendija [11]

## 4.2.2 Experimento cálculo de ángulo de Brewster

Este experimento en concreto, requiere de menos elementos no estándares que el experimento anterior. Lo único que se tuvo que diseñar, aparte de elementos comunes o semi-comunes entre los dos experimentos, fue otro disco, de igual dimensión que el anterior pero con la menor necesidad de cantidad de muescas.

### 4.2.2.1 Disco de Brewster

Como se acaba de comentar, las medidas de ambos discos son idénticas, teniendo ambos 4 cm de diámetro y con una unión a la base similar.

La particularidad en este caso es que el número de ángulos que se necesitan era mucho menor, por tanto menor número de muescas, lo que permitía poder hacer estas de un mayor grosor, 1.4mm, dado que la pieza de cristal usada para este experimento es de 1mm.

El proceso de diseño fue parecido al otro disco, pero fue más sencillo al tener menor número de muescas.

Este fue el primer modelo que se imprimió.



Imagen 71. Diseño inicial disco de Brewster

Y este el modelo final, simplemente pasando de 4cm a 8cm de diámetro y aumenta el grosor de las muescas.

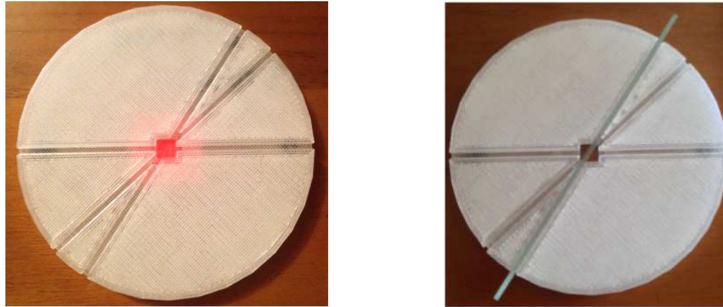


Imagen 72. Diseño final disco de Brewster [11]

### 4.2.3 KHET. Laser Chess

Finalmente, y sólo porque gracias a este juego de óptica salió la idea de todo lo demás, ya que no tienen ningún tipo de complejidad, se mencionarán las piezas que faltan de describir y que son necesarias para echar una buena partida en familia o con amigos.

#### 4.2.3.1 PYRAMID

PYRAMID: Esta pieza tiene la singularidad de que podrá desviar el haz de luz en una dirección u otra,  $90^\circ$ , dependiendo de la posición con la que incida el rayo sobre su superficie y sólo si el rayo incide sobre su parte de cristal. Además puede realizar tanto movimientos de casillas como de giro.



Imagen 73. Pieza Pyramid [12]

#### 4.2.3.2 ANUBIS

ANUBIS: Son los protectores del PHARAOH, ya que no producen ningún tipo de reflexión con la luz y absorben todo cuanto les llega, impidiendo así que el rayo de luz siga su camino. Este pieza puede realizar tanto los movimientos de casillas como de giro.



Imagen 74. Pieza Anubis [11]

### 4.2.3.3 PHARAOH

PHARAOH: Son las piezas que hay que alcanzar con el láser para poder conseguir la victoria en la partida. Este pieza puede realizar tanto los movimientos de casillas como de giro.



Imagen 75. Pieza Pharaoh [11]

Para terminar este capítulo, se va a mostrar una imagen significativa de todos los cambios que se han tenido que realizar para conseguir los objetivos que se necesitaban de cada pieza en concreto, al final, es diseño, es fabricación y por último modificación, así varias veces con cada una de las piezas mostradas, lo que cual requería bastante tiempo antes de poder seguir avanzando.

Al final se obtuvieron las piezas necesarias y a un nivel óptimo para poder realizar los experimentos, ya que estos son el objetivo último de todo este trabajo.



Imagen 76. Número de piezas fabricadas durante el desarrollo del proyecto

## 5. ENUNCIADO PRÁCTICAS

### 5.1 Teoría aplicada a los experimentos

En este capítulo se van a describir los experimentos que se realizarán con el material que se ha fabricado con la impresora 3D. El primero de ellos es el cálculo del ángulo de Brewster, que será realizado con los materiales que se pueden ver en la parte derecha del tablero. Y el segundo, el cálculo del índice de refracción de un material, que se realizará con los de la parte izquierda.

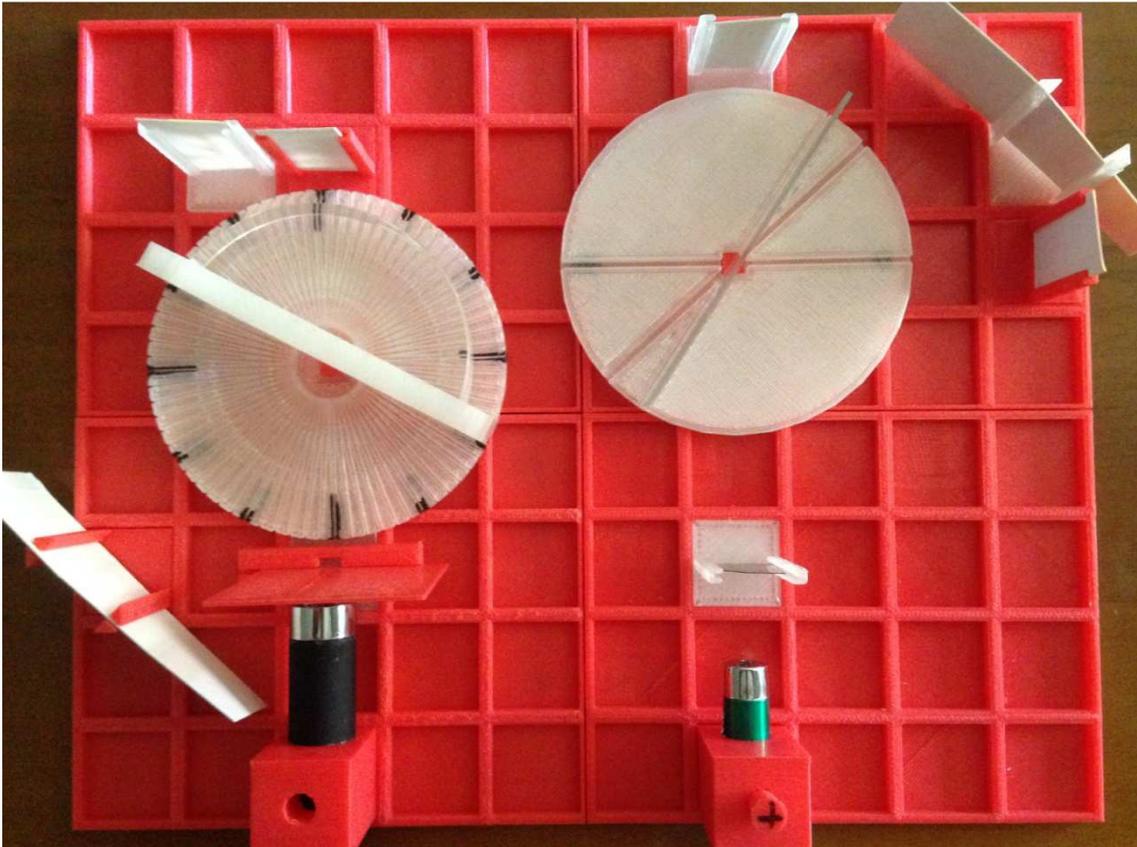


Imagen 77. Montaje de los experimentos. Izquierda cálculo de índice de refracción. Derecha práctica ángulo Brewster [11]

Antes de comenzar la descripción de cada uno de ellos, es importante explicar las diferencias técnicas entre los láseres utilizados en cada caso, y el por qué el ser humano los visibiliza con mayor o menor dificultad.

No sin antes explicar que un láser es técnicamente un dispositivo que emite luz (radiación electromagnética) a través de un proceso conocido como emisión estimulada. El término láser es un acrónimo para la amplificación de luz por emisión estimulada de radiación. La luz láser es generalmente coherente, lo que significa que la luz es emitida en un haz estrecho de baja divergencia, o se puede convertir en uno con la ayuda de componentes ópticos tales como lentes.

Es importante decir que la longitud de onda que el ser humano percibe mejor es la que está entorno a los  $\lambda=550\text{nm}$ .

**Magnitudes radiantes:**  
luz emitida por el LED

**Magnitudes fotométricas:**  
luz recibida por el ojo

Estímulo visual  $\eta_v$

$1\text{ W} = 680\text{ lm en } \lambda=550\text{nm}$

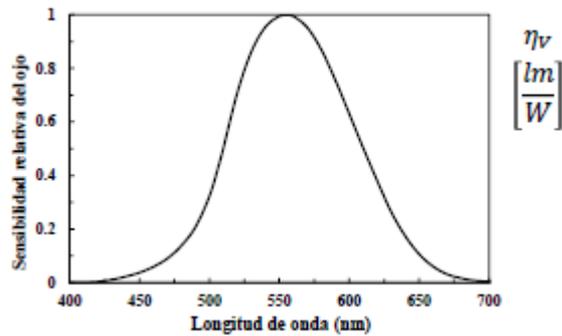


Imagen 78. Máxima longitud de onda visible ojo humano [12]

Esta es una de las razones por las que el haz de luz perteneciente al experimento del ángulo de Brewster se podrá apreciar mucho mejor con mucha menos potencia, que el usado para el cálculo del índice de refracción.

Otra de las razones, es que los colores verde y rojo, como se puede ver en la figura tienen su máximo cerca de la longitud de onda de máxima visibilidad para el ser humano, mientras que el azul, tiene su máximo notablemente más lejos.

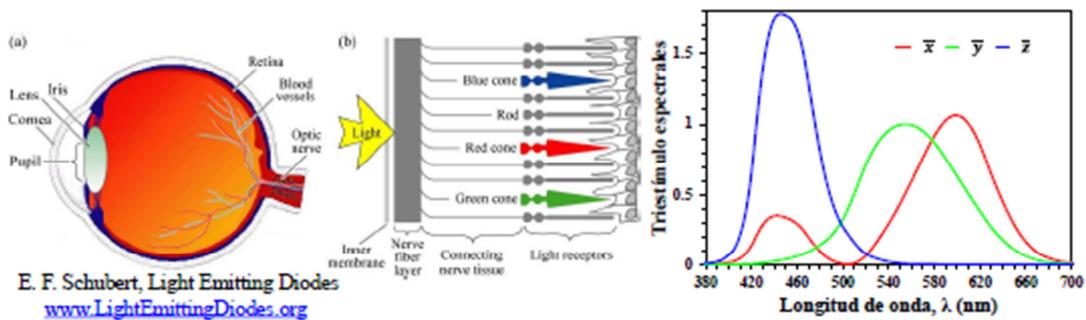


Imagen 79. Máximos diferentes de diferentes longitudes de onda [12]

Es por esto, que en relación con la potencia, los láseres con máximos cerca de los 550nm, como son el rojo y el verde, se van a ver mejor que los láseres azules, aunque su potencia sea mucho menor.

Sin embargo, para el experimento del cálculo del índice de refracción, se optó por usar un láser azul, ya que al atravesar el disco de Hartl y con la oscuridad suficiente, se pudo apreciar como los caminos de refracción y reflexión de la luz se veían mucho más nítidamente que con el láser rojo.

Esto se debe principalmente al fenómeno de dispersión de Rayleigh, el cual indica que la longitud de onda es inversamente proporcional a lo mal o bien que se produce la dispersión de la luz. Es decir, a mayor longitud de onda, peor dispersión de la luz, como se puede ver en la imagen siguiente.

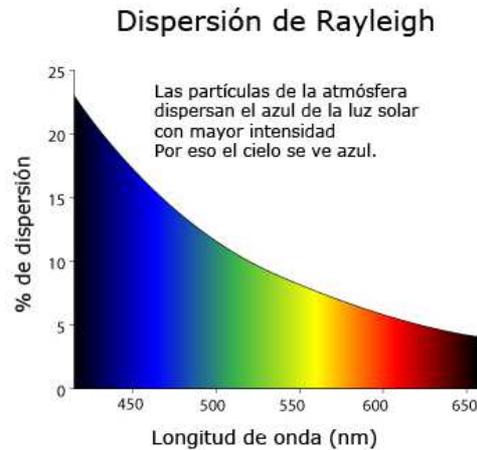


Imagen 80. Dispersión de Rayleigh [13]

#### a. Comprobación Ángulo de Brewster

El objetivo de este experimento es demostrar que si se alcanza el ángulo de Brewster y el haz de luz que índice ya está polarizado linealmente en la dirección paralela al plano de incidencia, el haz reflejado se anula.

Se calcula el ángulo de Brewster, como se ha visto anteriormente, haciendo uso de la siguiente fórmula:

$$\theta_B = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right).$$

Teniendo en este caso,

$n_1$  (aire) = 1

$n_2$  (cristal) = 1.5

El ángulo de Brewster tiene un valor:  $\theta_B=56,3^\circ$

Por tanto, la pieza destinada a cumplir esta condición se diseñó para tener este valor de ángulo entre el rayo incidente y la normal.



Imagen 81. Disco Brewster. Muesca a  $56.3^\circ$  y otra a  $41.8^\circ$

Los elementos necesarios para realizar este experimento han sido:

### 1. Tablero

Se ha construido un tablero lo suficientemente grande para que pudiera dar cabida a los experimentos que se fueran a realizar, siendo poco voluminoso.

Este elemento es imprescindible ya que nos asegura el alineamiento de las piezas y por tanto el buen desarrollo de la prueba.

El tablero al completo tiene unas medidas: 18.5x23 [cm]

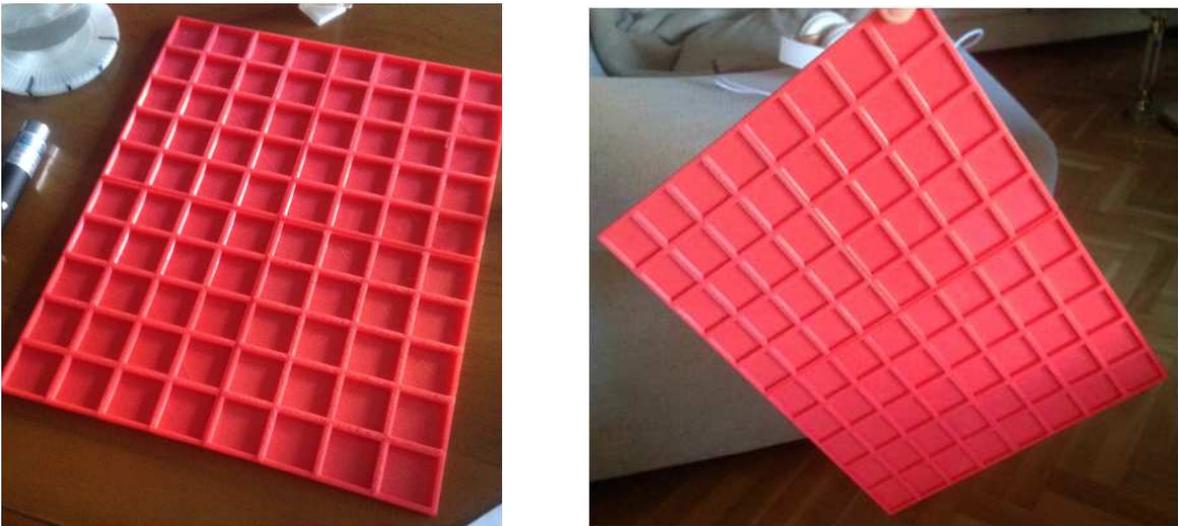


Imagen 81. Tablero completo [11]

### 2. Láser.

El láser utilizado tiene una longitud de onda que el ser humano puede ver muy bien, ya que como se ha comentado anteriormente. Características técnicas son:

- Máxima Potencia de Salida < 5mW
- Longitud de onda: 650nm  $\pm$ 10

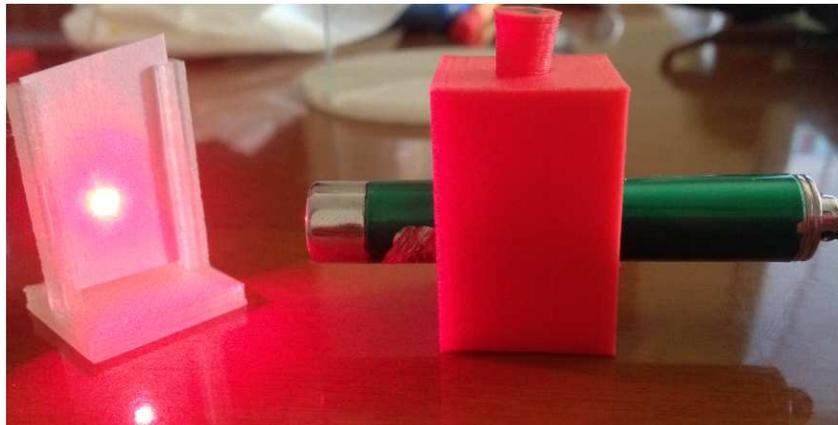


Imagen 82. Láser

### 3. Soporte láser

Este elemento permite mantener pulsado el láser y así poder hacer las variaciones de ángulos que consideremos oportunas para realizar las pruebas, como también asegurar la linealidad y horizontalidad del haz de luz.



Imagen 83. Soporte láser [11]

### 4. Disco Brewster + Cristal

Este instrumento como ya se ha comentado, es el encargado de soportar la lámina de cristal a la graduación que se requiere, en este caso  $56,3^\circ$ . A parte de la muesca con ese ángulo en concreto, también se diseñó con otra más, para poder demostrar que que la lámina de cristal se encuentra en otra graduación, aunque se tenga el polarizador, la onda reflejada no se polarizará debidamente.

Por otro lado, el cristal utilizado, fue una lámina simple lámina de vidrio con un índice de refracción de 1.5.

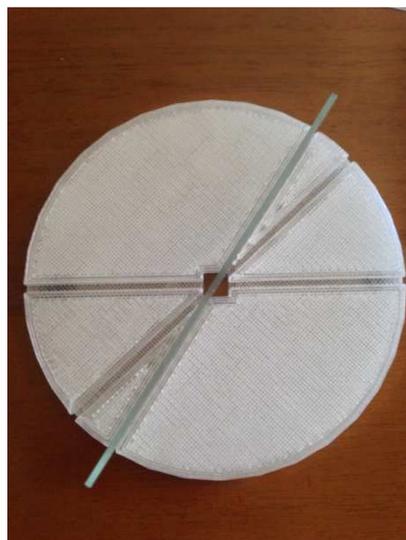


Imagen 84. Disco Brewster con cristal a  $56,3^\circ$  [11]

## 5. Polarizador

Esta fue una de las partes más complicadas de conseguir, más que nada porque a nuestra disposición sólo se tenían polarizadores de  $45^\circ$  y no horizontales y verticales como era necesario. Así que se tuvo que construir un polarizador horizontal a partir de uno de  $45^\circ$

Manualmente se tuvo que realizar un corte lo más preciso posible ya que la variación de décimas de mm hacía que la onda reflejada no se polarizara bien. La precisión que requiere, y la dificultad de encontrar referentes claros para poder realizar este corte, hicieron que se realizaran varias pruebas, tanto con gafas polarizadas, como con pantallas de ordenador, etc.

Al final, mediante una lámina de polarización vertical y horizontal proporcionada por el tutor, se pudo realizar un corte óptimo y como consecuencia el experimento con gran precisión.

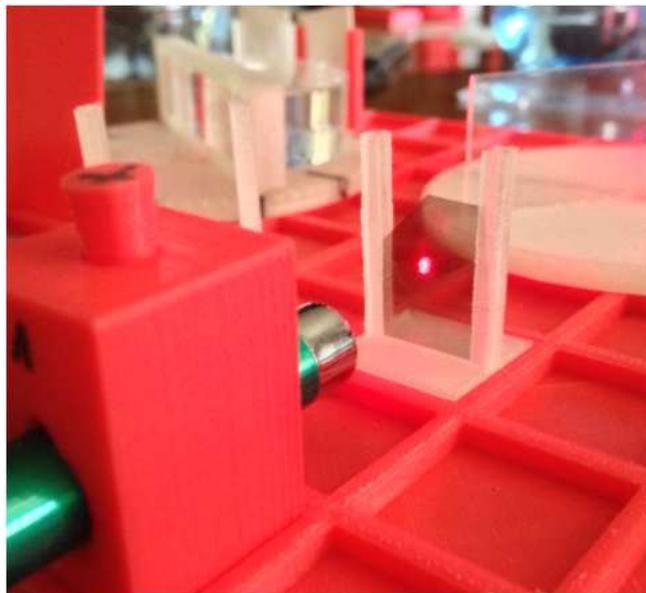


Imagen 85. Soporte polarizador [11]

En uno de los experimentos, se coloca el polarizador frente al láser, con esto se consigue polarizar el haz de luz, en este caso horizontalmente, para poder comprobar que al incidir con un ángulo de  $56,3^\circ$ , la componente reflejada queda eliminada.

Teóricamente se tendría que eliminar en su totalidad, pero debido a la calidad de este polarizador, sí que deja pasar algo de luz.

## 6. Pantallas

Este instrumento que tiene un diseño bastante simple, nos ayuda a poder apreciar con mayor exactitud los fenómenos que se están estudiando, permitiendo ver en sus láminas de cartulina blanca los haces de luz que se analizan en cada momento.

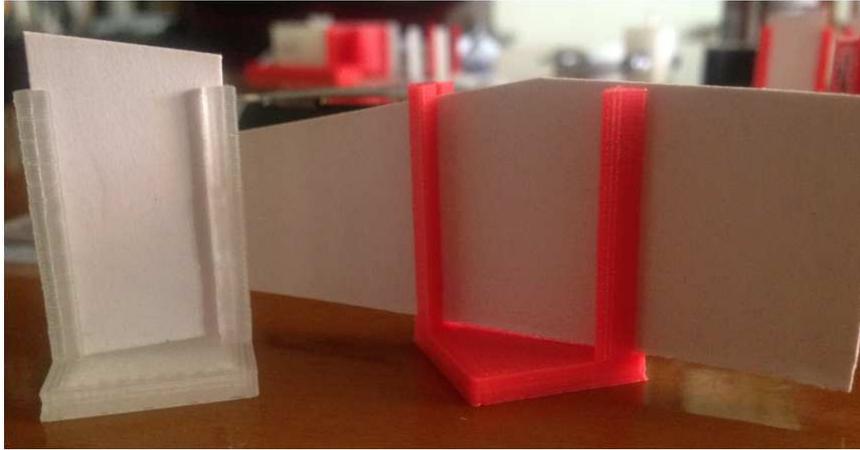


Imagen 86. Pantallas

**EXPERIMENTO:**

Una vez que se tengan tuvieron todos los elementos correctamente alineados y dispuestos, se pasó a realizar la comprobación de que el ángulo de Brewster con el que se había diseñado la pieza central, y que el polarizador situado frente al láser, funcionaban correctamente.

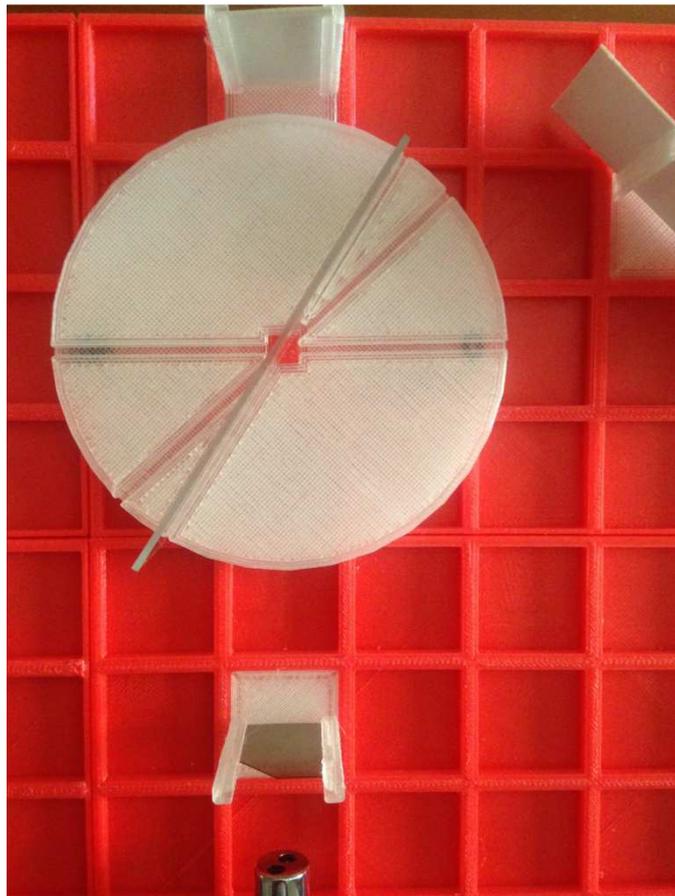


Imagen 87. Montaje experimento ángulo de Brewster

En las imágenes que se ven a continuación, se puede apreciar como en la pantalla de la derecha, dónde se aprecia la onda reflejada, con la posición del vidrio a  $41,8^\circ$  la atenuación de la onda reflejada es mínima, es decir, se aprecia tanto la onda transmitida como la reflejada(imagen de la izquierda).

En cambio, si la graduación es cercana a los  $56,3^\circ$ , determinado como valor del ángulo de Brewster, se ve como prácticamente no se aprecia nada reflejado en la pantalla.

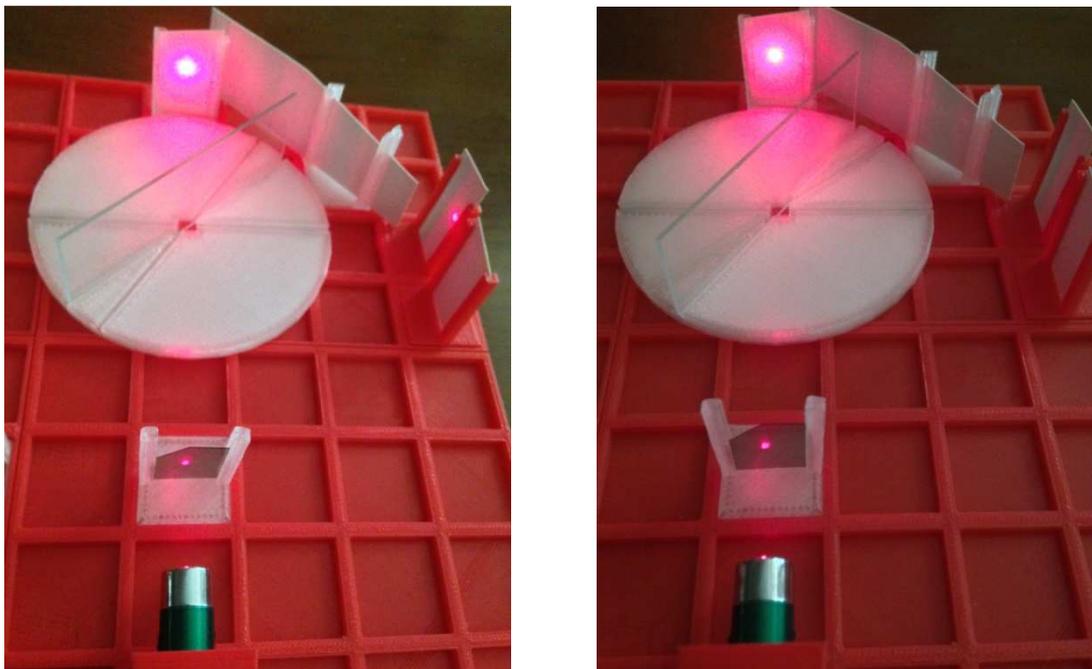


Imagen 88. Puesta en práctica del experimento ángulo Brewster

Conclusión:

Para dos materiales con índices de refracción como los dados anteriormente, el ángulo de Brewster tiene un valor de  $56.3^\circ$ , suponiendo que el cristal tiene un índice de refracción de 1.5.

## b. Cálculo Índice de Refracción de un material

El objetivo de este experimento es calcular el índice de refracción de un material, en este caso el disco de Hartl.

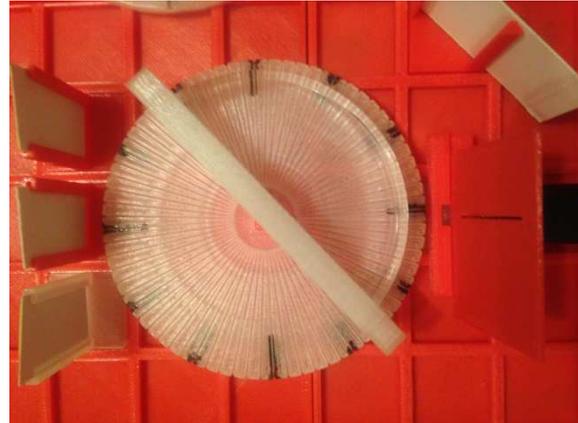
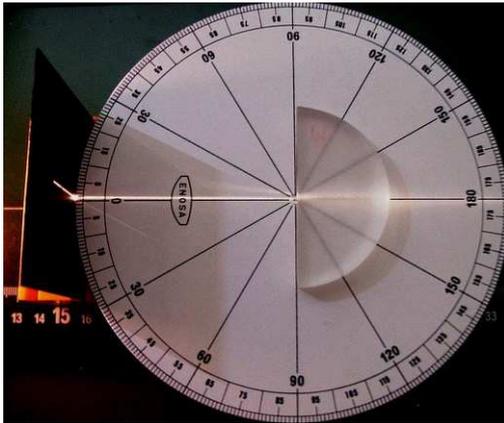


Imagen 89. Montaje experimento cálculo del índice de refracción de un material

Para poder calcular el índice de refracción de este material, se ha procedido a realizar 2 experimentos, basados en el mismo concepto de la ley de Snell. Se ha podido comprobar que el valor numérico resultante del primer experimento era muy próximo al valor numérico del segundo.

En ambas comprobaciones se ha hecho uso de la ley de Snell (también llamada ley de Snell-Descartes) pero de formas diferentes. Por tanto, se tiene por un lado el experimento A y por otro el experimento B.

Importante: La posición del cristal en el experimento A será con la zona plana hacia el haz de luz, dado que hace las veces de frontera entre dos medios con distintos índices de refracción. Por el contrario en el experimento B, la posición será totalmente la opuesta, con la zona curva hacia el haz de luz, debido a que en este caso se simulará la reflexión total dentro del cristal, y es la mejor forma de poder verlo.

Los elementos necesarios para realizar estas medidas han sido:

#### 1. Tablero

Se ha construido un tablero lo suficientemente grande para que diera cabida a los experimentos que se fueran a realizar, siendo estos de carácter no muy voluminoso.

Este elemento es imprescindible ya que nos asegura un buen alineamiento de las piezas y por tanto el buen desarrollo de la prueba.

El tablero al completo tiene unas medidas: 18.5x23 [cm]

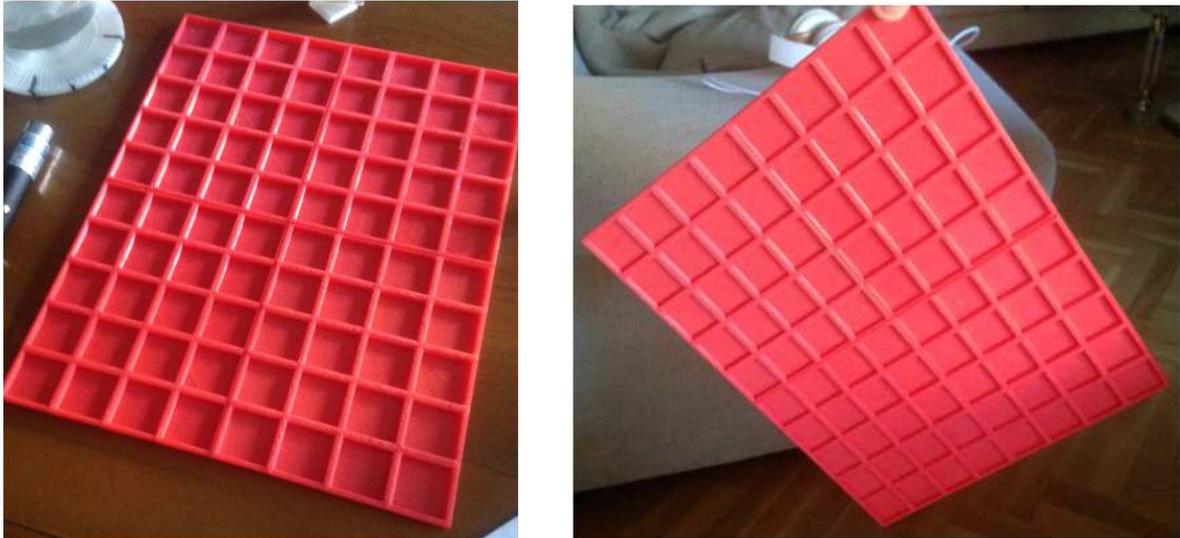


Imagen 90. Tablero completo

## 2. Láser

En concreto este láser tiene unas características especiales, dado que se ha buscado un láser con una longitud de onda que permitiese apreciar la trayectoria de los rayos dentro del disco de Hartl. Por tanto, las características técnicas de este láser son:

- Máxima Potencia de Salida < 100mW
- Longitud de onda: 405nm  $\pm$ 10



Imagen 91. Láser usado en el experimento

## 3. Soporte para el láser

Este elemento nos permite mantener el láser, en este caso de gran envergadura, en una posición totalmente horizontal y alineada, para llevar a cabo una perfecta realización del experimento.

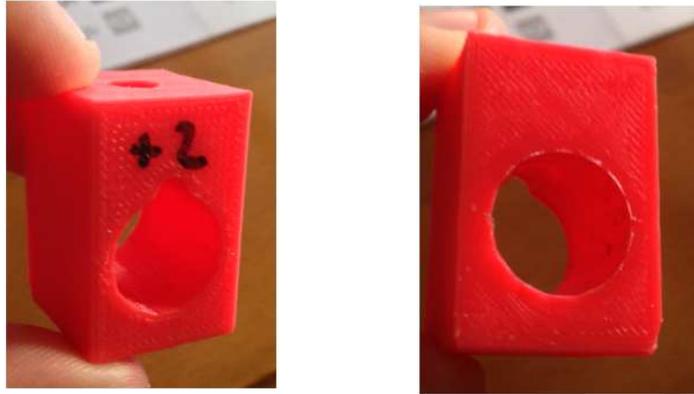


Imagen 92. Soporte láser grande

#### 4. Disco de Hartl + Soporte Cristal

Este soporte se diseñó, básicamente, para lograr más precisión al posicionar el cristal sobre el disco, y fijarlo así como una sola pieza a toda la estructura, de esta forma evitamos posibles medidas erróneas, debido a ángulos incorrectos por culpa del posicionamiento.



Imagen 93. Soporte cristal para disco Hartl

#### 5. Rendija + Soporte Rendija + Soporte Estándar

Gracias a este elemento, se consigue que el camino realizado por el haz de luz se vea con mayor claridad, debido a lo comentado de los patrones de difracción de Fresnel, que hace

que desde la fuente, en este caso un láser, la rendija posicionada justo enfrente forme un frente de ondas que tenga una mejor visibilidad para el ojo humano.

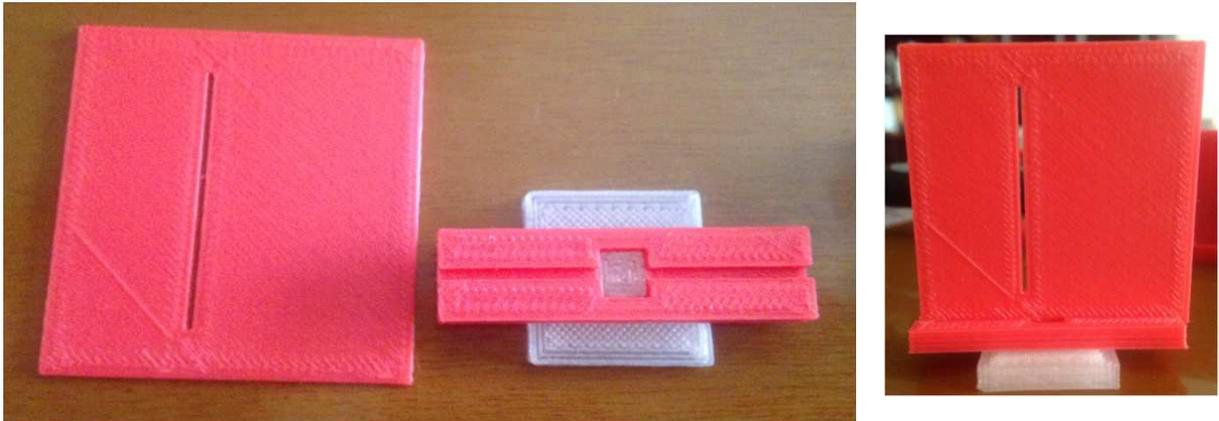


Imagen 94. Soporte rendija

## 6. Pantallas

Este instrumento que tiene un diseño bastante simple, nos ayuda a poder apreciar con mayor exactitud los fenómenos que se están estudiando, permitiendo ver en sus láminas de cartulina blanca los haces de luz que se analizan en cada momento.

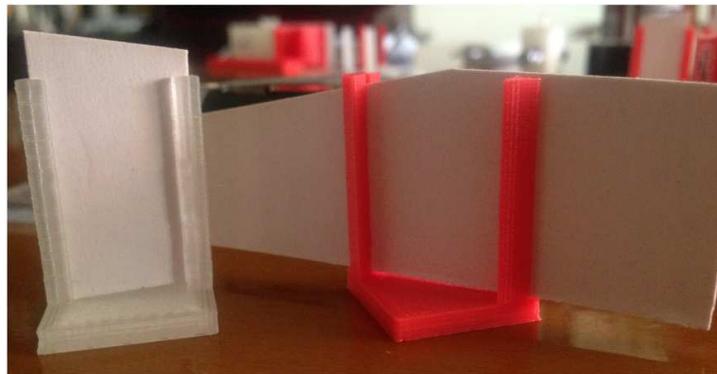


Imagen 95. Pantallas

**EXPERIMENTO A.** Lo primero que se ha comprobado ha sido que el ángulo de refracción al atravesar la superficie de separación entre dos medios de propagación de la luz (o cualquier onda electromagnética) con índice de refracción distinto, varía dependiendo del ángulo incidente.

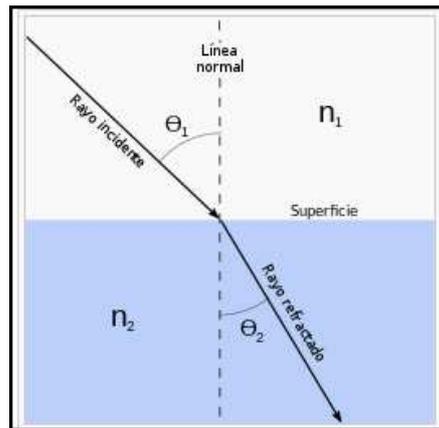


Imagen 96. Refracción

Se han realizado 5 pruebas con diferentes valores de ángulo incidente cada de ellas, y por consiguiente con el resultado de 5 valores diferentes de ángulos refractados, según dictamina la ley de Snell. Gracias a estos valores, aplicando esta fórmula,

$$n_1 * \text{sen}\theta_1 = n_2 * \text{sen}\theta_2.$$

Se ha podido realizar el cálculo del índice de refracción de este material.

Al realizar diferentes medidas, y dado que el disco de Hartl construido por la impresora 3D tiene una precisión de 5 grados, son las muescas más pequeñas que se han podido fabricar, los valores variaban entre sí décimas de mm, realizando por tanto la media aritmética y varianza de todos ellos para poder obtener un valor final.

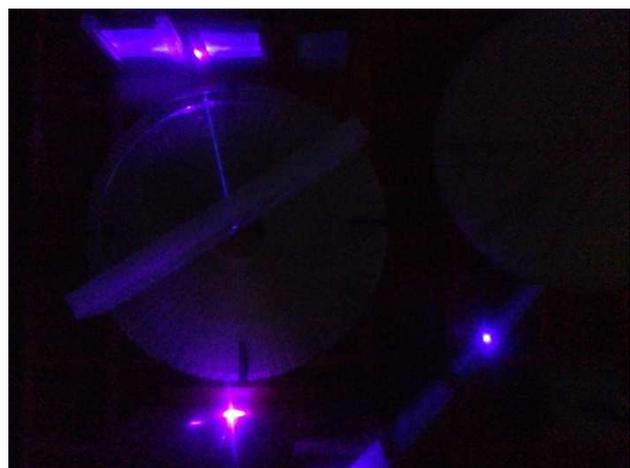


Imagen 97. Puesta en práctica del experimento

Se decidió tomar 5 medidas con diferentes ángulos de incidencia y así realizar la media y la varianza para determinar el valor final.

Toma de medidas:

| Ángulo de incidencia | Ángulo de refracción | Índice de refracción |
|----------------------|----------------------|----------------------|
| 10°                  | 7°                   | 1.42                 |
| 30°                  | 10°                  | 1.46                 |
| 60°                  | 35°                  | 1.50                 |
| 75°                  | 42°                  | 1.44                 |
| 85°                  | 44°                  | 1.43                 |

Después de realizar todas estas medidas, se pasó a realizar el cálculo de la media aritmética y la varianza, como se puede ver a continuación:

- Media aritmética:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

- Varianza:

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 \right) - \bar{X}^2 = \frac{1}{n^2} \sum_{i < j} (X_i - X_j)^2$$

Obteniendo como resultados,

Media → 1.45

Varianza →  $10^{-3}$

Desviación típica → 0.03162

**EXPERIMENTO B.** Como ya se ha comentado, esta vez se ha experimentado con la llamada Reflexión Total, es decir, que el haz de luz puede llegar a reflejarse totalmente dentro del medio de mayor índice de refracción, en caso de que supere el ángulo límite.

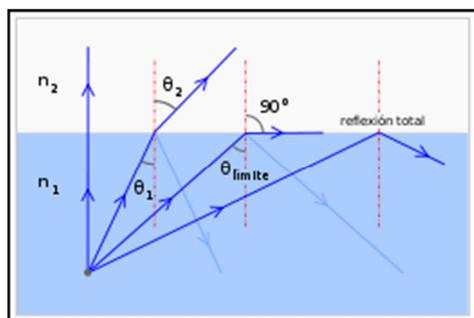


Imagen 98. Reflexión interna total

El valor de este ángulo límite está definido por la siguiente ecuación.

$$n_2 * \text{sen}\theta_T = n_1 * \text{sen } 90^\circ.$$

Por tanto, como en este caso el objetivo no es calcular el valor del ángulo límite, sino, hallar este de una forma experimental para poder calcular el índice de refracción del disco de Hartl, se procederá a reproducir con el banco óptico esa reflexión total e intentar determinar de la forma más precisa posible el valor del ángulo límite.

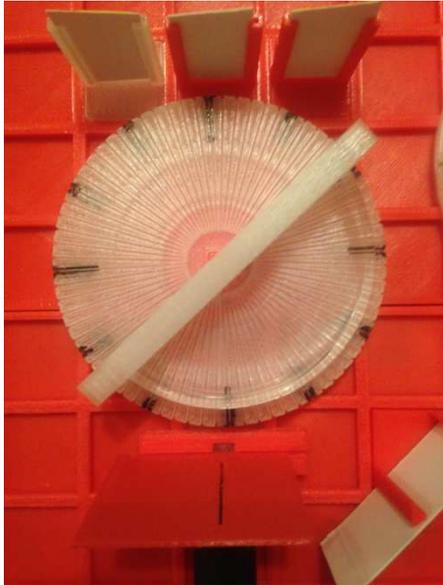


Imagen 99. Puesta en práctica de la reflexión interna total

Experimentalmente el valor obtenido del ángulo límite ha sido:  $\theta_T = 43^\circ$

Por tanto, el valor numérico del índice de refracción buscado será:  $n_2 = 1.466$ .

Conclusión final:

Como se puede ver, teniendo en cuenta la precisión de los materiales con los que se trabaja, los valores numéricos del experimento A y del experimento B son bastante cercanos como para determinar finalmente mediante la media aritmética, que el índice de refracción del disco de Hartl es:

$$n_2 = \frac{1.45 + 1.466}{2} = 1.458$$

## 5.4 KHET (Laser Chess)

Aprovechando la creación de soportes y elementos que relacionados con la óptica geométrica, se han diseñado también las piezas y figuras que forman parte del conocido juego óptico KHET, en definitiva, un Laser Chess. [16]

### 5.4.1 Reglas del juego

Los turnos de cada jugador se rigen por las mismas normas que el ajedrez común, un turno para cada jugador pudiendo realizar en él un único movimiento, aunque aquí es donde empiezan las diferencias entre este y el ajedrez común.

Se pueden realizar movimientos de una casilla hacia delante, atrás, izquierda, derecha o diagonal, o permanecer en la misma casilla pudiendo realizar giros de 90 grados hacia cualquiera de los dos lados. Hay que recordar que esto lo pueden realizar todas las piezas exceptuando SPHINX (láser) ya que es una pieza estática, pudiendo únicamente realizar movimientos de giro de 90 grados.

Después de cada movimiento, el jugador tiene que disparar el láser, con el objetivo de que el haz de luz del láser llegue hasta el PHARAOH del contrincante, siendo esto similar a la jugada de jaque que todos conocemos.

### 5.4.2 Piezas

En este apartado se explica qué cantidad de piezas son necesarias para cada jugador y que características de movimientos tienen cada una de ellas.

1. PHARAOH (x2) → Uno por equipo



2. SCARAB (x4) → Dos por equipo



3. ANUBIS (x4) → Dos por equipo



4. PYRAMID (x14) → Siete por equipo



5. SPHINX (x2) → 1 láser por equipo



6. Tablero → 8 x 10



Descripción de las piezas:

**SPHINX:** Esta pieza se coloca en el extremo superior izquierdo y la misma pieza perteneciente al adversario se colocará por el contra en el extremo inferior derecho, cada uno de ellos del color de cada jugador y con su respectivo láser. Únicamente puede realizar movimientos de 90 grados.

**PHARAOH:** Son las piezas que hay que alcanzar con el láser para poder conseguir la victoria en la partida. Este pieza puede realizar tanto los movimientos de casillas como de giro.

**PYRAMID:** Esta pieza tiene la singularidad de que podrá desviar el haz de luz en una dirección u otra, 90°, dependiendo de la posición con la que incida el rayo sobre su superficie y sólo si el rayo incide sobre su parte de cristal. Además puede realizar tanto movimientos de casillas como de giro.

**SCARAB:** En este caso también usamos la reflexión como mecanismo de ataque o de defensa, pero con la singularidad de que parte de la luz continuará su camino y parte será reflejada, además puede realizar tanto movimientos de casillas como de giro.

**ANUBIS:** Son los protectores del PHARAOH, ya que no producen ningún tipo de reflexión con la luz y absorben todo cuanto les llega, impidiendo así que el rayo de luz siga su camino. Este pieza puede realizar tanto los movimientos de casillas como de giro.

### 5.4.3 Posiciones iniciales de las piezas.

Hay 3 posiciones iniciales de las piezas con las que se comenzaría la partida.



Imagen 100. Posiciones iniciales del KHET [16]

## 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Después de realizar este Trabajo Fin de Grado he podido analizar todos los pasos que lleva un proceso de fabricación como este, porque al final, el fin de cada tarea es obtener algo físico y tangible que funcione.

Básicamente esto último es el condicionante máximo de todos los factores que rodean este proyecto. Como ya se ha comentado en capítulos anteriores estos factores están relacionados tanto con el montaje óptimo de una impresora 3D, como con el diseño industrial y también con el conocimiento de los principios básicos de la óptica de rayos.

Pero la herramienta necesaria para que este proyecto de bajo coste se pudiera llevar a cabo es la impresora en 3D, por eso, después de mucho trabajar con ella me atreveré a valorar su rendimiento.

- PRECISIÓN –

Este es uno de los factores que, desde mi punto de vista, más condicionan el factor precio, ya que durante la realización de este proyecto, donde las piezas tenían una geometría relativamente fácil no eran fabricadas con la misma precisión que se suponía cuando se realizaban los diseños.

A parte de que la pieza pueda no tener la precisión que se obtendría con una impresora mucho más avanzada, pero a su vez mucho más cara, la falta de precisión también es una de las causantes de la pérdida de tiempo, teniendo que modificar cada uno de los diseños iniciales.

La precisión en este caso además está influenciada ya no por el tipo de plástico sino por el color del mismo. Especialmente se puede hablar del factor color en este proyecto, dado que se trabaja con la luz proveniente de dos tipos de láser, por tanto este factor es muy influyente en el comportamiento de esta y se han tenido que repetir varias piezas por esta razón.

Finalmente se le ha considerado factor negativo, debido a que es un factor muy influyente y tecnológicamente difícil de conseguir. Con todo y con eso, los experimentos realizados han tenido resultados muy buenos a un precio bajísimo.

- TIEMPO –

Este también es considerado un factor negativo por detalles que se han podido observar en la realización de este proyecto. Como ya se ha comentado, aparte del tiempo que puede tardar en imprimir una pieza, dependiendo del tamaño de esta y de los patrones de impresión, también se ha invertido mucho tiempo al tener que realizar las modificaciones de cada una de ellas.

El tiempo mínimo de impresión de la pieza más pequeña de este proyecto, el pulsador del láser que no llega a los 2 cm de alto ha sido de 10 minutos más 2 minutos de calentamiento y puesta a punto de la misma. El tiempo máximo es obviamente el invertido en fabricar el

tablero, y no porque sea una pieza complicada, sino por su tamaño.

Todas estas piezas tienen un factor de relleno del 12%, con 6 capas sólidas por debajo y 6 por encima, ahorrando así tiempo de impresión al tener un porcentaje bajo de relleno de la pieza, pero sin perder robustez de la misma.

- PRECIO

El precio es un factor determinante por sí mismo en cualquier proceso de fabricación, y en este caso creo que se compensa lo que puede aumentar el precio de la pieza por la posible falta de precisión en una impresora como esta y el tiempo empleado, con el bajo precio de los materiales termoplásticos que utiliza.

En este caso, se han tenido que hacer muchas modificaciones, muchas piezas distintas, muchas pruebas etc. Pero con todo y con eso, de dos bobinas de PLA de 1 kg a 20 euros aprox. Cada una sigue quedando más del 70% del material para futuros proyectos.

Por tanto considero que la tecnología en este campo se irá desarrollando rápidamente y no dentro de muchos años se tendrán impresoras mucho más precisas, más rápidas y con un coste de consumible aún menor algo muy positivo que hará que cualquier empresa pueda tener acceso al uso de este tipo de herramientas.

- FABRICACIÓN +

Para mí esta característica es la gran valedora de esta tecnología.

Poder diseñar y construir piezas en cuestión de horas.

Es algo a lo que acabaremos acostumbrándonos y quizá se le quite mérito, pero en mi opinión creo que es una revolución tecnológica enorme. Esta tecnología es válida para cualquier ámbito de la vida, y como ya se ha visto durante este trabajo, una gran herramienta para universidades, colegios o institutos, para acercar en este caso la ciencia a cualquier persona por un coste relativamente bajo.

Mi conclusión final creo que es clara. Esta tecnología tiene un potencial de mejora enorme, pero aún como está ahora, yo apostaría mucho por ella de cara al futuro de todos.

Otras posibles mejoras.

- Aumentar el número de prácticas integrando por ejemplo:
  - Parte de electrónica para el posible análisis de los láseres.
  - Detectores de luz que produzcan algún tipo de señal.
- Realizar distintas pruebas de relleno de las piezas para conseguir un menor coste del producto final.
- Diseño de piezas más complejas y ver la respuesta y precisión de las mismas.

## BIBLIOGRAFÍA

[1] Materiales y técnicas de impresión, Curso: Introducción a la impresión en 3D, Fundación General Universidad de Valladolid en colaboración con Dima 3D, 2015/2016.

[2] Proyecto RepRap. Fecha de consulta: 3 Mayo 2016. <http://www.reprap.org/>

[3] Fabricante impresora Legio. <https://www.leon-3d.es/legio/>

[4] Guía Montaje Impresora Legio. Fecha de consulta: 3 Marzo del 2016 <https://drive.google.com/file/d/0B83V1Uvb7gFOOXD2dTIZRVZCLWM/view>

[5] Óptica geométrica. Colaboradores de Wikipedia. *Óptica geométrica* [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2016. Fecha de consulta: 5 de Julio del 2016. Disponible en [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%93ptica\\_geom%C3%A9trica&oldid=91336695](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%93ptica_geom%C3%A9trica&oldid=91336695)

[6] Difracción de la luz. Colaboradores de Wikipedia. *Difracción de Fresnel* [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2016. Fecha de consulta: 7 de Julio del 2016. Disponible en [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Difracci%C3%B3n\\_de\\_Fresnel&oldid=91958467](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Difracci%C3%B3n_de_Fresnel&oldid=91958467)

[7] Leyes de Snell. Colaboradores de Wikipedia. *Ley de Snell* [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2016. Fecha de consulta: 20 de Junio del 2016. Disponible en [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ley\\_de\\_Snell&oldid=92357323](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Ley_de_Snell&oldid=92357323).

[8] Polarización. Colaboradores de Wikipedia. *Polarización electromagnética* [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2016. Fecha de consulta: 1 de julio del 2016. Disponible en [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Polarizaci%C3%B3n\\_electromagn%C3%A9tica&oldid=92115670](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Polarizaci%C3%B3n_electromagn%C3%A9tica&oldid=92115670)

[9] Filtro polarizador. Colaboradores de Wikipedia. *Filtro polarizador* [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2016. Fecha de consulta: 1 de julio del 2016. Disponible en [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Filtro\\_polarizador&oldid=89539852](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Filtro_polarizador&oldid=89539852).

[10] Ángulo Brewster. Colaboradores de Wikipedia. *Ángulo de Brewster* [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2016. Fecha de consulta: 2 de julio del 2016. Disponible en [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%81ngulo\\_de\\_Brewster&oldid=89528199](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%81ngulo_de_Brewster&oldid=89528199).

[11] ANEXO I. Archivos .stl (se adjuntan con CD de la memoria)

[12] Capítulo de sensibilidad del ojo. Fecha de consulta: 15 Julio del 2016. <https://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap16/chap16.htm>

[13] Dispersión de Rayleigh. Colaboradores de Wikipedia. *Dispersión de Rayleigh* [en línea]. Wikipedia, La enciclopedia libre, 2015. Fecha de consulta: 20 de julio del 2016. Disponible en [https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Dispersi%C3%B3n\\_de\\_Rayleigh&oldid=85923728](https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Dispersi%C3%B3n_de_Rayleigh&oldid=85923728).

[14] Printing Platform for Professionals. Fecha de consulta: 2 Junio del 2106. <https://www.additively.com/en/>

[15] Khet Game. Khet (game). (2016, April 25). In *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. Retrieved 17:22, July 20, 2016, from [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Khet\\_\(game\)&oldid=717102619](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Khet_(game)&oldid=717102619)

[16] Diseños 3D (.stl) online. Fecha de consulta: 2 Mayo del 2016. <http://www.thingiverse.com/thing:11782>