



Universidad de Oviedo

Memoria del Trabajo Fin de Máster realizado por

Adrián Álvarez Rodríguez

Para la obtención del título de

Máster en Ingeniería de Automatización e Informática Industrial

**Control de procesos en la fabricación de electrónica
impresa flexible**

Febrero de 2016

1	INTRODUCCIÓN	4
1.1	DISTRIBUCIÓN LAMBERTIANA.....	4
1.2	DIFUSOR ÓPTICO.....	4
1.3	PARÁMETROS DE UN DIFUSOR ÓPTICO	6
1.4	REFLEXIÓN ESPECULAR Y REFLEXIÓN DIFUSA	7
1.5	CORRECCIÓN GAMMA	7
2	OBJETIVOS	8
2.1	BÚSQUEDA DE ALGORITMO O PARÁMETROS CAPACES DE DEFINIR UN DIFUSOR ÓPTICO	8
2.2	DISEÑO DEL BANCO DE MEDIDA.....	8
2.3	DISEÑO DE LA PROBETA DE ENSAYOS	8
2.4	DISEÑO DEL PROCEDIMIENTO DE ENSAYO	8
2.5	REALIZACIÓN DEL ENSAYO	8
2.6	EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS	9
3	DISEÑO DEL BANCO DE MEDIDA	10
3.1	SOPORTE ÓPTICO.....	10
3.2	ENCAPSULAMIENTO.....	10
3.3	SISTEMA DE CAPTURA DE IMÁGENES.....	11
3.3.1	<i>Cámara BB-500GE</i>	<i>11</i>
3.3.2	<i>Objetivo Estándar 8 mm</i>	<i>13</i>
3.4	ELECCIÓN DEL SOFTWARE.....	13
3.4.1	<i>Image Processing Design Toolbox Version 8.3.2-1</i>	<i>14</i>
3.4.2	<i>Image_Processing_Toolbox_2 Versión 2.0-1.....</i>	<i>14</i>
3.4.3	<i>Scilab Image and Video Processing toolbox Version 0.5.3.2-1</i>	<i>14</i>
3.4.4	<i>Plotting library Version 0.46-3.....</i>	<i>14</i>
3.5	PC	14
3.6	REQUISITOS DEL SISTEMA: WINDOWS®	14
3.6.1	<i>Sistema operativo</i>	<i>14</i>
3.6.2	<i>Hardware</i>	<i>14</i>
3.6.3	<i>Opcional.....</i>	<i>15</i>
4	DISEÑO DEL ENSAYO.....	16
4.1	MATERIALES UTILIZADOS EN LA FABRICACIÓN DE LOS PROTOTIPOS.....	17
4.1.1	<i>Capa reflectante</i>	<i>17</i>
4.1.2	<i>Capa de guía de luz.....</i>	<i>17</i>
4.1.3	<i>Capa difusora inferior</i>	<i>18</i>
4.1.4	<i>Capa difusora superior.....</i>	<i>18</i>
4.2	AJUSTE DEL SISTEMA DE CAPTURA DE IMÁGENES.....	18
5	EXTRACCIÓN DE CARACTERÍSTICAS.....	19
5.1	CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DIFUSOR.....	19
5.1.1	<i>Eficiencia de Transmisión.....</i>	<i>19</i>
5.1.2	<i>Capacidad de Esparcimiento.....</i>	<i>19</i>
5.1.3	<i>Salvado de archivos de la sesión.....</i>	<i>20</i>
6	DISEÑO DE LA PROBETA.....	21
6.1	DISEÑO DEL CIRCUITO ELECTRÓNICO.....	21
6.1.1	<i>Elección de la fuente de luz.....</i>	<i>21</i>

6.1.2	<i>Diseño de la PCB</i>	22
6.1.3	<i>Fabricación de la PCB</i>	22
6.2	DISEÑO DEL SISTEMA DIFUSOR	23
6.2.1	<i>Fabricación de la probeta</i>	24
7	REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS	25
7.1	ENSAYO 1.....	25
7.2	ENSAYO 2.....	26
7.3	ENSAYO 3.....	27
7.3.1	<i>Guía de luz: espesor 2 mm</i>	27
7.3.2	<i>Guía de luz: espesor 4 mm</i>	28
7.4	ENSAYO 4.....	29
7.4.1	<i>Capa difusora inferior: TM3MED – Guía de luz 2mm</i>	30
7.4.2	<i>Capa difusora inferior: TM6MED– Guía de luz 2 mm</i>	31
7.4.3	<i>Capa difusora inferior: TM9MED– Guía de luz 2mm</i>	31
7.4.4	<i>Resultados del ensayo 4</i>	32
7.5	ENSAYO 5.....	32
7.5.1	<i>TM3</i>	32
7.5.2	<i>TM6</i>	34
7.5.3	<i>TM6 + H80</i>	35
7.5.4	<i>TM9</i>	36
7.5.5	<i>Resultados del ensayo 5</i>	37
8	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	39
8.1	INFLUENCIA DEL VOLTAJE EN LA LUMINOSIDAD OBTENIDA	39
8.2	INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA GUÍA DE LUZ.....	39
8.3	INFLUENCIA DE LOS MATERIALES DIFUSORES INFERIORES (TM3, TM6, TM9)	40
8.4	INFLUENCIA DE LOS MATERIALES DIFUSORES SUPERIORES (H30, H55, H80).....	41
9	PRESUPUESTO	44
9.1	RECURSOS HARDWARE	44
9.2	RECURSOS SOFTWARE	44
9.3	RECURSOS HUMANOS	45
9.4	PRESUPUESTO FINAL	45
	45
10	PLANIFICACIÓN	45
11	CONCLUSIONES	47
12	BIBLIOGRAFÍA	48

1 Introducción

De cara a una mejor comprensión de los temas que se tratarán en el desarrollo de este proyecto, es necesario entender determinados términos y fenómenos físicos.

1.1 Distribución Lambertiana

Una superficie mate ideal o superficie reflectante difusa presenta una distribución Lambertiana, esto es: la luminosidad aparente de una superficie Lambertiana a ojos de un observador es independiente del ángulo de visión del observador.

1.2 Difusor óptico

Un difusor óptico es cualquier material capaz de difundir, expandir o dispersar luz de tal qué manera que obtengamos una luz difusa. Principalmente existen distintos tipos de difusores en función de la aplicación a la que están orientados.

- **Difusor Holográfico:** Se fabrican mediante grabado holográfico sobre policarbonato. Estas ópticas se utilizan como elemento difusor en distintos tipos de lámparas, LEDs y otras fuentes de luz. Estos difusores presentan una alta eficiencia de transmisión, superior al 90%.

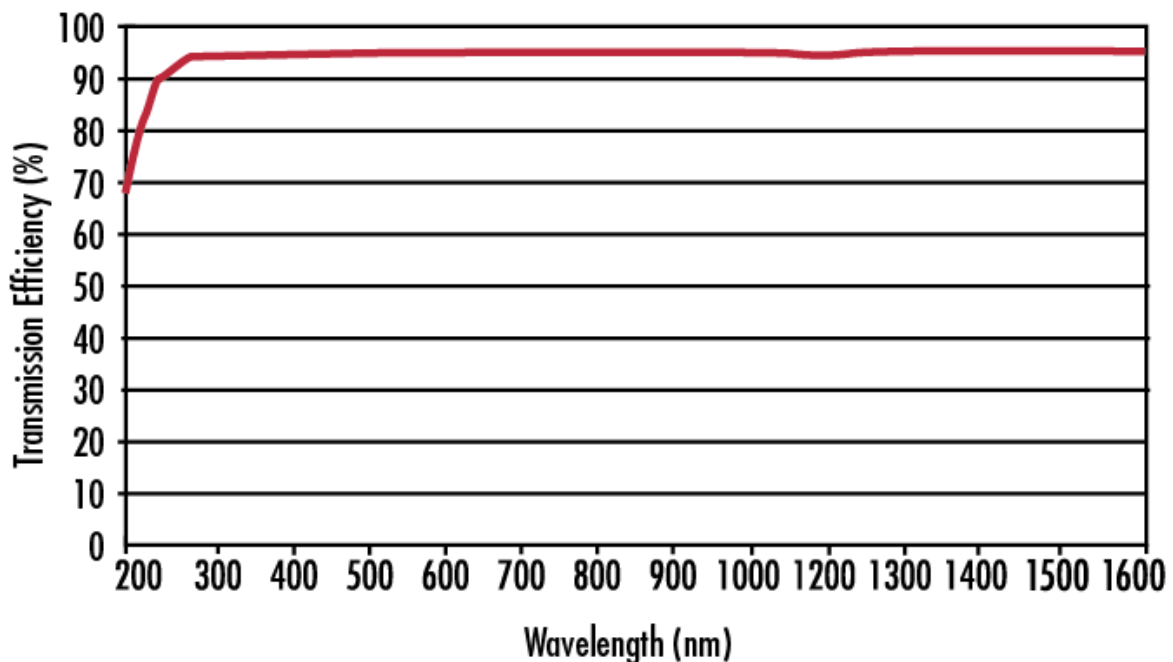


Figura: 1.2-1- Difusor Holográfico

- **Cristal de Ópalo Difusor:** Se fabrican mediante sustrato de vidrio de sosa y cal, recubierto con ópalo. El recubrimiento permite una difusión uniforme, que puede aproximarse a una distribución Lambertiana. Esta buena difusión tiene como inconveniente una muy baja eficiencia de transmisión.

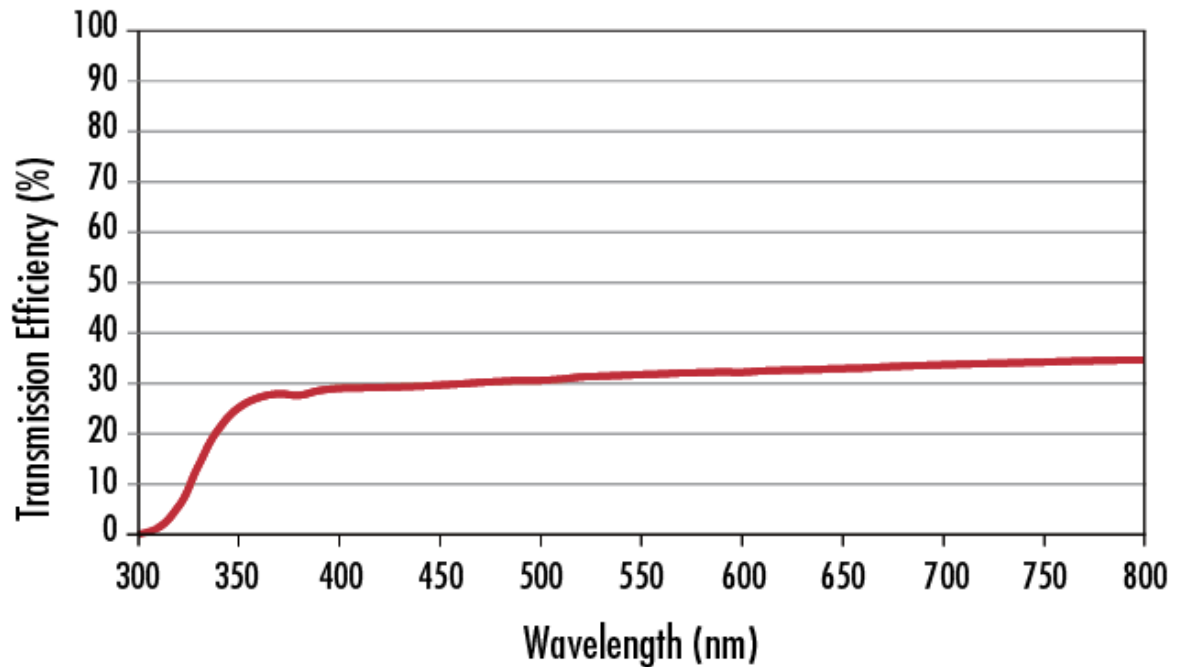


Figura: 1.2-2- Cristal de Ópalo Difusor

- **Ground Glass Diffusers:** Se fabrican mediante la aplicación de un chorro de arena para producir una superficie rugosa capaz de dispersar la luz. Tienen una alta eficiencia de transmisión pero no tan lineal ni tan elevada como la de los “Difusor Holográfico”.

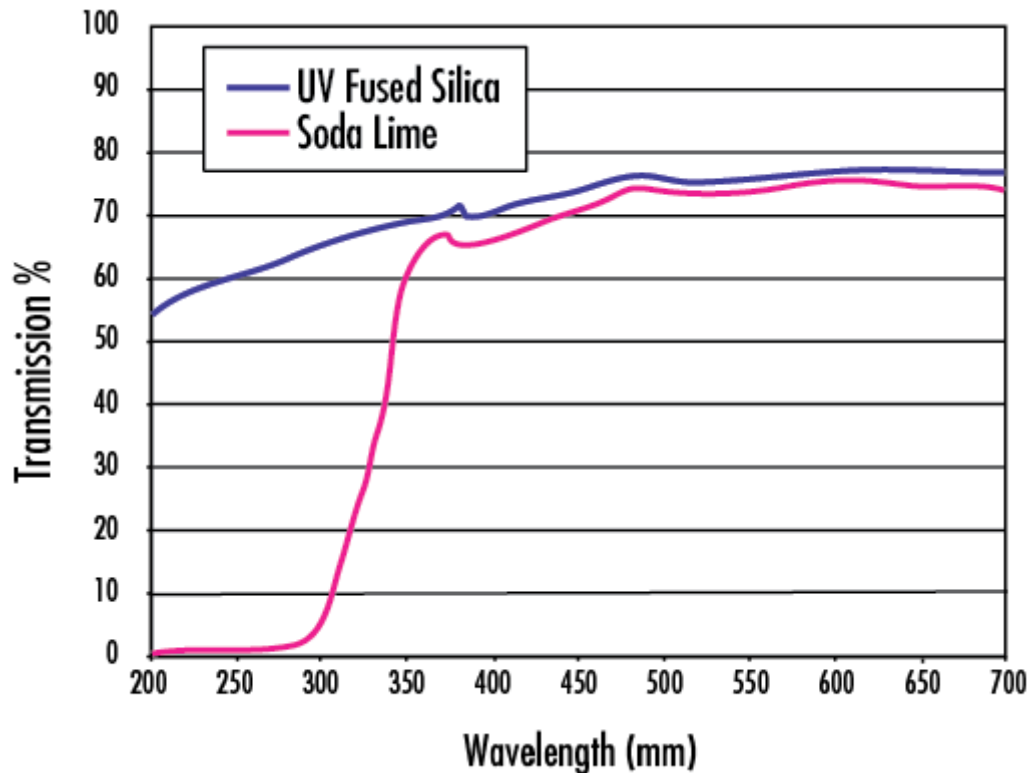


Figura: 1.2-3-Ground Glass Diffuser

1.3 Parámetros de un difusor óptico

Un difusor óptico puede ser definido mediante dos parámetros:

Eficiencia de Transmisión: El porcentaje de luz que lo atraviesa sin ser absorbido, para una determinada longitud de onda. Es un parámetro cuantitativo.

Este concepto tiene una alta importancia a nivel de eficiencia energética ya que nos interesará utilizar un difusor muy eficiente, dado que para conseguir la misma iluminación necesitaremos utilizar una cantidad menor de energía que con un difusor menos eficiente.

Capacidad de Esparcimiento: Indica como de bien difunde la luz, es decir, como de homogénea es la luz que produce.

Tipo de difusor	Eficiencia de Transmisión	Capacidad de Esparcimiento
Holographic	BEST	BEST
Opal	GOOD	BETTER
Ground	BETTER	GOOD

Tabla: 1-1-Características de los distintos tipos de difusores ópticos

1.4 Reflexión especular y reflexión difusa

La reflexión especular es aquella que se produce cuando un haz de luz incide sobre una superficie lisa y pulida. En este caso el ángulo del rayo de luz con la normal a la superficie, es igual al del rayo incidente.



Figura: 1.2-4-Reflexión especular

Por el contrario una reflexión difusa es aquella que se produce sobre una superficie rugosa. Los rayos procedentes de un punto se reflejarán en direcciones aleatorias y por tanto no se generará ninguna imagen especular.

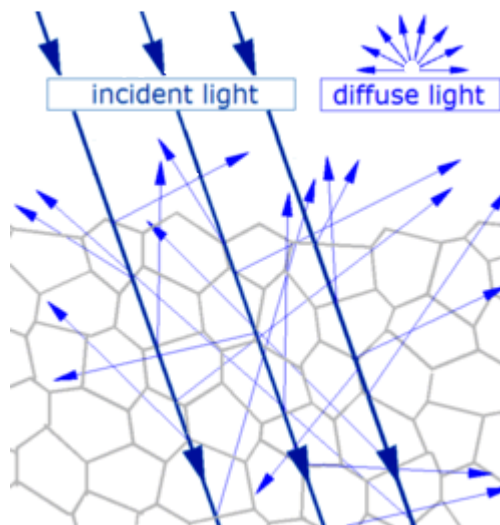


Figura: 1.2-5-Reflexión difusa

En ambos casos, la luz reflejada no tiene la misma energía que la luz incidente, ya que parte de la luz es absorbida por el medio contra el que la luz se refleja.

1.5 Corrección gamma

Gamma define la relación entre el valor numérico de un pixel y su actual luminancia. Sin una corrección gamma las sombras obtenidas por cámaras digitales no aparecerían como lo hacen a nuestros ojos, en un monitor estándar. Una típica corrección gamma es de 0.45.

2 Objetivos

El objetivo del proyecto es diseñar y evaluar un prototipo de sistema de evaluación de calidad en sistemas difusores ópticos. Para llevar a cabo el proyecto será necesario cumplir los siguientes objetivos.

2.1 Búsqueda de algoritmo o parámetros capaces de definir un difusor óptico

Será necesario encontrar un indicador objetivo de calidad en sistemas difusores de luz, por tanto debemos estudiar qué parámetros son comúnmente utilizados para definir un difusor óptico así como posibles algoritmos de evaluación de calidad a implementar.

2.2 Diseño del banco de medida

El diseño del banco de medida es un aspecto fundamental en el desarrollo del proyecto, ya que ha de proporcionarnos unas condiciones adecuadas para realizar los ensayos necesarios. Incluirá aspectos tales como: elección del sistema de soporte óptico de la cámara, elección de la cámara, software necesario para realizar la aplicación, requisitos de hardware, encapsulamiento del sistema de captura de imágenes, etc.

2.3 Diseño de la probeta de ensayos

Se diseñarán y fabricarán varias probetas con las que realizar los ensayos. Estas probetas consistirán en una PCB con un circuito electrónico de iluminación LED, así como una serie de materiales necesarios para la realización de un sistema difusor óptico.

2.4 Diseño del procedimiento de ensayo

El diseño del procedimiento de ensayo consistirá en la planificación en detalle de los aspectos que deseamos estudiar. Esto nos permitirá tener completamente identificado el objetivo de cada ensayo, así como establecer un orden para los distintos ensayos.

2.5 Realización del ensayo

Consistirá en la preparación y ejecución de los distintos ensayos, así como la gestión de los distintos archivos generados en cada ensayo.

2.6 Evaluación de los resultados

Una vez dispongamos de todos los datos recopilados durante los ensayos, procederemos a hacer un estudio en detalle de los resultados obtenidos.

3 Diseño del banco de medida

El objetivo del banco de medida es proporcionar un sistema de captura de imágenes sin perturbaciones lumínicas o mecánicas así como las herramientas de software necesarias para el procesamiento de imagen.

3.1 Soporte Óptico

Soporte óptico para muestras con una base de cristal de 60x80 mm. Estas dimensiones han condicionado el diseño del prototipo ya que la probeta de ensayos se colocará sobre dicha base.

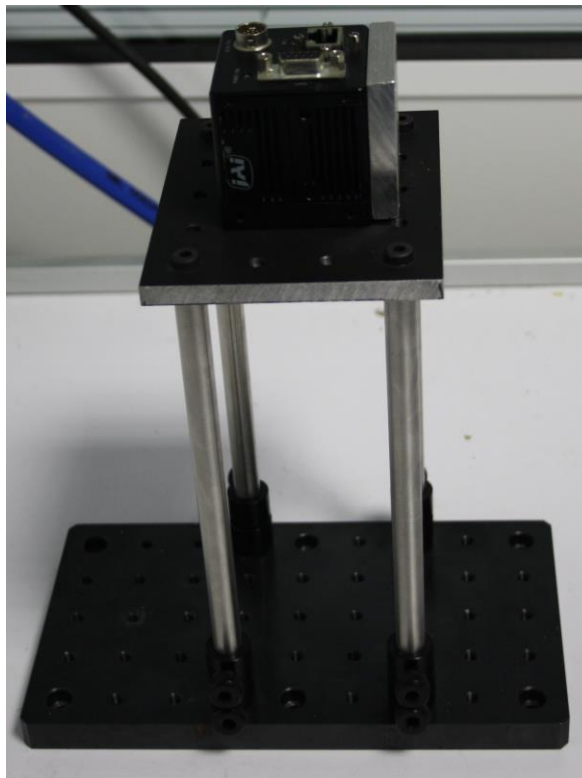


Figura: 3.3-1: Soporte Óptico

3.2 Encapsulamiento

El sistema de encapsulamiento consiste en una caja de cartón pintada de negro (tanto en el interior como en el exterior) para evitar reflejos, con varios orificios para dejar pasar el cable de alimentación de la cámara, el cable de red de la cámara, la alimentación de la PCB, la GND de la PCB y la señal de control de la PCB. Además dispone de dos aperturas, una superior para introducir el soporte óptico y otra lateral, para permitir un fácil acceso al soporte óptico y poder realizar la colocación de la PCB en su posición de reposo.

Todos los orificios cuentan con sus propios prensaestopas para evitar que entre la luz, esto más las condiciones de oscuridad en que se han realizado las capturas de imagen nos proporcionaran un entorno seguro.

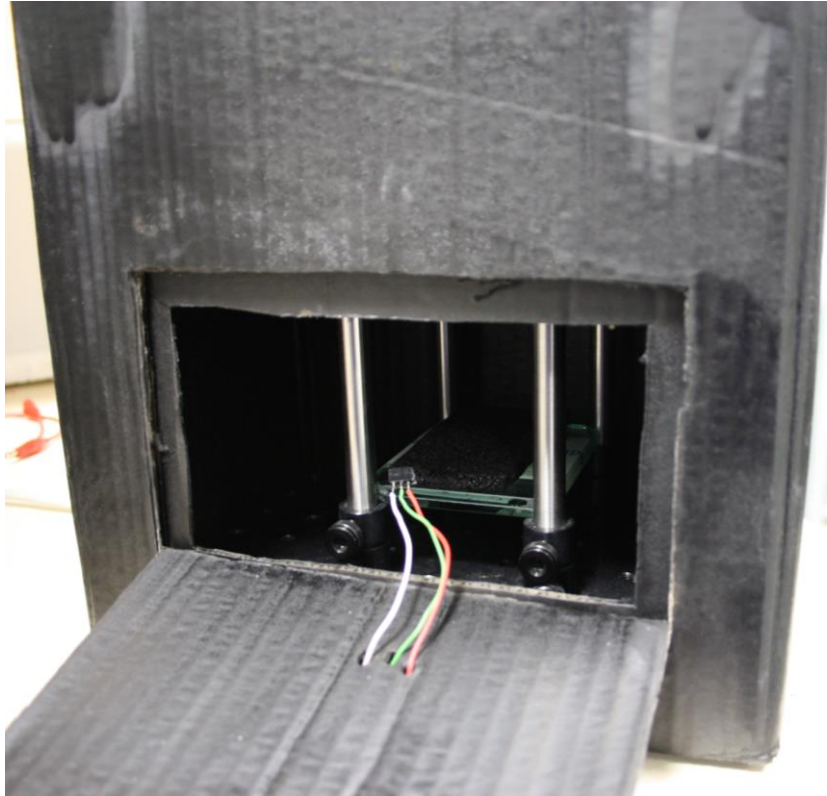


Figura: 3.3-2 Sistema de encapsulamiento

3.3 Sistema de captura de imágenes

El sistema de captura de imágenes es una cámara fotográfica que nos permitirá transferir las imágenes obtenidas a un ordenador para su posterior análisis.

3.3.1 Cámara BB-500GE

La BB-500GE es una cámara de la serie Basic dentro de la familia C3 de JAI. Se trata de una cámara monocroma progresiva con una resolución de 5 millones de píxeles y salida GigE Vision.

La cámara funciona, a su máxima resolución, a 15 imágenes por segundo, pero puede aumentar la velocidad trabajando con barrido variable o binning.

El binning es una técnica de pre-procesamiento ideada para intentar reducir el ruido en la lectura de los píxeles. En un binning de 2x2, una vecindad de 4 píxeles forma un súper píxel que es leído como un único píxel cuyo valor es la media de los 4 vecinos, esta técnica ayuda a reducir el ruido en la imagen, a costa de perder resolución.

La BB-500GE proporciona una excelente disipación térmica y funciones de preprocesamiento tales como: balance de blancos, LUT para compensar las condiciones de iluminación ambientales, y sistemas de compensación de píxeles. Sus principales características técnicas son:

- **Pertenece a la serie C3 Basic de JAI.**
- **Sensor 2/3" CCD progresivo.**
- **Resolución Max: 2456 x 2058 píxeles.**
- **Tamaño de pixel: 3.45 μ m.**
- **Velocidad a resolución máxima: 15 img/s.**
- **Escaneado Parcial y binning vertical.**
- **Sensibilidad: 0,34 Lux (En el sensor).**
- **Relación S/N >50dB (ganancia 0 dB).**
- **Salida Video para lente Auto iris (Salida 0.7 Vp-p, activable con switch interno).**
- **Shutter electrónico: 1/15 a 1/10,000.**
- **Interface GigE Vision con salida de 12, 10 o 8 bit.**
- **Tiempo de exposición desde 64 μ m.**
- **SDK disponible para SO Windows XP/Vista.**
- **Resistencia: Vibración 10 G, Choque 70G.**
- **Normas: CE (EN 61000-6-2, EN-61000-6-3), FCC part 15 class B, RoHS/WEEE.**
- **Alimentación: 12V DC +/-10%. 5.5 W.**
- **Montura: C.**
- **Dimensiones: 55 x 55 x 55 mm.**
- **Peso: 200 g.**



Figura: 3.3-BB-500 GE

3.3.2 Objetivo Estándar 8 mm

Este objetivo está diseñado para aplicaciones industriales, lleva incorporados cristales de calidad y una robusta construcción para poder resistir vibraciones y golpes sin que se desenfoque o cambie la apertura, además de llevar tornillos de fijación para el iris y el enfoque. Sus características técnicas son:

- **Apertura: 1.4.**
- **Tipo: manual.**
- **Montura: C.**
- **Resolución: Estándar.**
- **Espectro: visible.**
- **Distancia focal: 8mm.**
- **Tamaño del sensor: 2/3".**
- **Familia: Standard.**
- **Fabricante: INFAIMON.**



Figura: 3.4- Objetivo Estándar 8 mm

3.4 Elección del software

Para la realización del proyecto se ha optado por el programa informático Scilab (versión 5.5.2) debido al interés del centro donde se realizó el trabajo fin de máster (Fundación PRODINTEC) para que se emplease dicho software. Scilab es un software libre para análisis numérico así como análisis estadístico o visualización 2D y 3D. Se ha optado por esta opción debido a su carácter de software libre así como a la posibilidad de utilizar distintas Toolbox de procesamiento de imagen para llevar a cabo el proyecto.

3.4.1 Image Processing Design Toolbox Version 8.3.2-1

Esta Toolbox proporciona funciones para el diseño y parametrización de algoritmos para el procesamiento de imagen.

3.4.2 Image_Processing_Toolbox_2 Versión 2.0-1

Esta Toolbox proporciona funciones para diferentes tipos de transformaciones en algoritmos de procesamiento de imagen.

3.4.3 Scilab Image and Video Processing toolbox Version 0.5.3.2-1

Esta Toolbox proporciona diferentes funciones la captura de imágenes así como para el tratamiento de imágenes.

3.4.4 Plotting library Version 0.46-3

Esta librería está diseñada para poder mostrar figuras de una forma similar a como lo hace el software Matlab.

3.5 PC

Para poder utilizar el software Scilab, es necesario disponer de un ordenador con las siguientes especificaciones mínimas:

3.6 Requisitos del Sistema: Windows®

3.6.1 Sistema operativo

- Microsoft Windows XP (32 and 64 bits)
- Windows Vista (32 and 64 bits)
- Windows 7 (32 and 64 bits)
- Windows 8 (32 and 64 bits)

3.6.2 Hardware

- Pentium IV class (or equivalent) se precisan instrucciones SSE2
- 2 Gb RAM (1 Gb mínimo)
- 600 Mb libres en el disco duro

3.6.3 Opcional

- Conexión a Internet para Scilab con MKL instalado
- Conexión a Internet para instalar los módulos ATOMS (utilizando un proxy la configuración de los ATOMS debe ser manual)
- Un compilador C (Visual Studio 2010 ó Visual Express 2010) para C C++

4 Diseño del ensayo

El ensayo consistirá en realizar capturas de imágenes de diferentes configuraciones de material en el prototipo de cara a observar cómo afectan estos aspectos a la forma en que se ilumina la muestra, su intensidad de luz, el efecto que produce cada capa de material, etc. La probeta estará fijada a la base de cristal del soporte, de esta forma conseguimos que la probeta siempre esté en la misma posición a la hora de realizar la captura de imágenes.

No analizaremos toda la imagen obtenida, sino que realizaremos un pre-procesamiento para seleccionar la zona central de la probeta, para conseguir esto también nos ayudaremos de un embellecedor que presenta una apertura cuadrada en el que sería el centro de la probeta. El ensayo se realizara en condiciones de oscuridad ambiental, la luz que se medirá es emitida por los LEDs de la probeta.

Para realizar el ensayo utilizaremos dos prototipos, uno con un espesor de 2 mm en la guía de luz y otro con un espesor de 4 mm. Sobre estos prototipos crearemos diferentes configuraciones utilizando diferentes materiales.

A su vez, cada uno de estos prototipos se dividirá en 3 clases de muestras, en función del tipo de capa difusora inferior utilizada.

Por último cada una de estas 3 clases de prototipo se dividirá en otras 3 subclases de prototipo en función de la capa difusora superior que utilizemos.

El resultado de todas estas variantes es un total de 18 tipos distintos muestras de prototipos, lo cual nos permitirá tener un amplio espectro de configuraciones distintas a estudiar.

Tanto la capa difusora inferior como la capa difusora superior se han diseñado de forma que sean intercambiables, debido a las limitaciones en cuanto a material disponible.

Además cada ensayo se realizará a distintas tensiones de alimentación para analizar la influencia del sistema difusor.

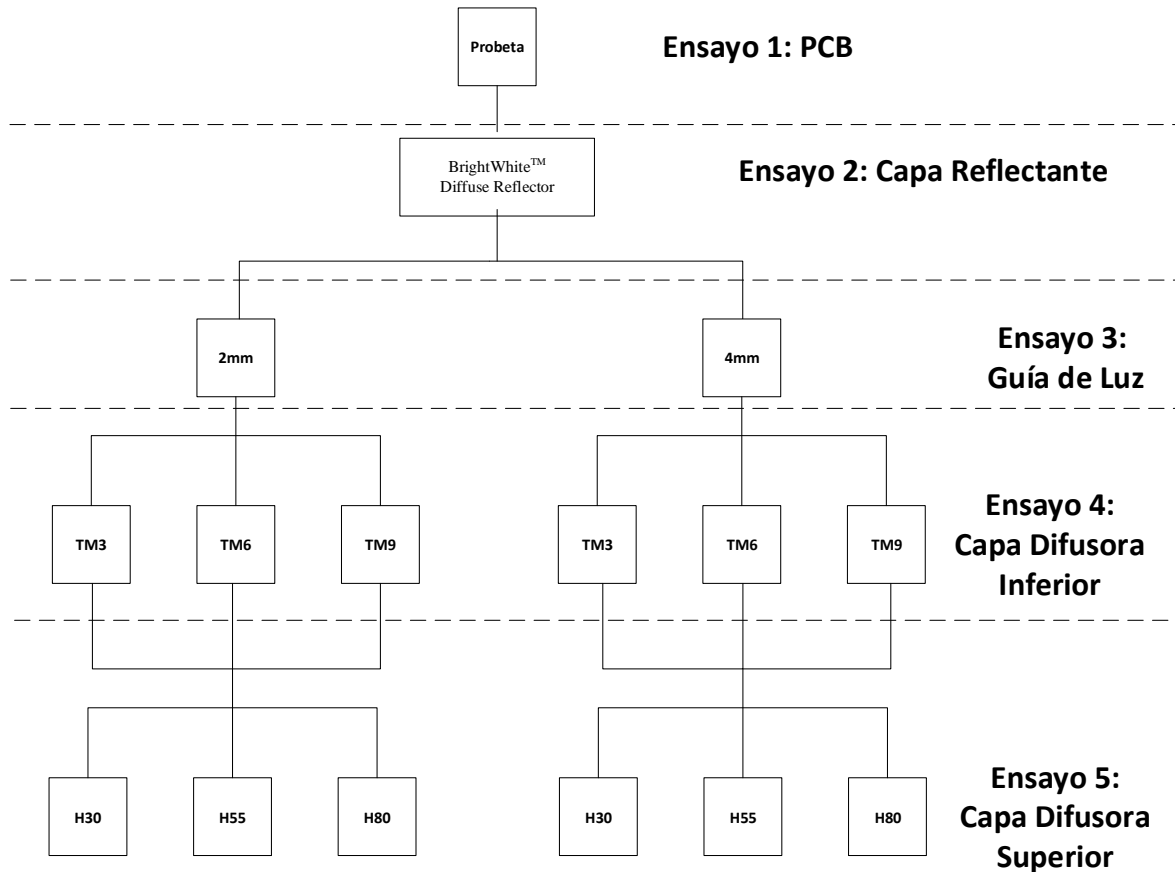


Figura: 4-1 Esquema explicativo de los Ensayos

4.1 Materiales utilizados en la fabricación de los prototipos

En este apartado se detallarán en la medida de lo posible, los materiales utilizados durante el ensayo.

4.1.1 Capa reflectante

Para la capa reflectante se ha utilizado “BrightWhite™ Diffuse Reflector” de la empresa Brightview Technologies.

4.1.2 Capa de guía de luz

Para la capa correspondiente a la guía de luz se ha utilizado, tanto para la versión de espesor 1 mm como la versión de 3 mm, Etilvinilacetato (Goma Eva) experimental.

4.1.3 Capa difusora inferior

Para la capa difusora inferior se han utilizado tres láminas de TPE: TM3MED, TM6MED y TM9MED.

4.1.4 Capa difusora superior

Para la capa difusora superior se han utilizado las siguientes láminas de PET de la empresa Brightview Technologies.

- C-HE80 Wide Diffuser
- C-HE55 Standard Diffuser
- C-HE30 Medium Diffuser

4.2 Ajuste del sistema de captura de imágenes

Para realizar los ensayos fue necesario ajustar la altura del soporte óptico, así como establecer una correcta apertura del obturador. Además fue necesario aplicar una correcta corrección gamma a la cámara (0.45).

5 Extracción de características

Como se ha explicado anteriormente, uno de los objetivos del proyecto es la búsqueda de parámetros que permitan definir un difusor óptico. Por lo tanto mediremos la luz emitida por el sistema de iluminación antes de tener las capas difusoras y después de tenerlas, de tal modo que podamos comparar ambas imágenes y extraer información de ellas.

5.1 Caracterización del sistema difusor

A partir de las imágenes obtenidas durante el ensayo se desea ser capaz de medir principalmente los dos parámetros de un difusor ya mencionados: Eficiencia de Transmisión y Capacidad de Esparcimiento.

5.1.1 Eficiencia de Transmisión

Para medir este parámetro hemos optado por medir el nivel de gris medio en una determinada zona de la imagen del prototipo obtenida antes de incorporar las capas difusoras. A continuación se obtiene el mismo nivel de gris medio para la misma zona, con el prototipo final deseado.

Una vez tenemos los dos valores, realizamos el cociente entre ambos de tal modo que obtenemos el porcentaje de luz que atraviesa el difusor respecto a la luz original.

5.1.2 Capacidad de Esparcimiento

El histograma de un prototipo con un buen esparcimiento, tendrá una forma muy característica, con casi todos los píxeles, en una franja muy estrecha de niveles de gris. Teniendo esto en cuenta, calculamos la cantidad de píxeles en torno al valor de gris con más cantidad de puntos en la imagen.

En función del porcentaje de píxeles en ese rango de niveles de gris respecto al número total de píxeles de la imagen, decidimos como de buen difusor es la configuración del prototipo en cuestión, siendo mejor cuanto mayor proporción presente.

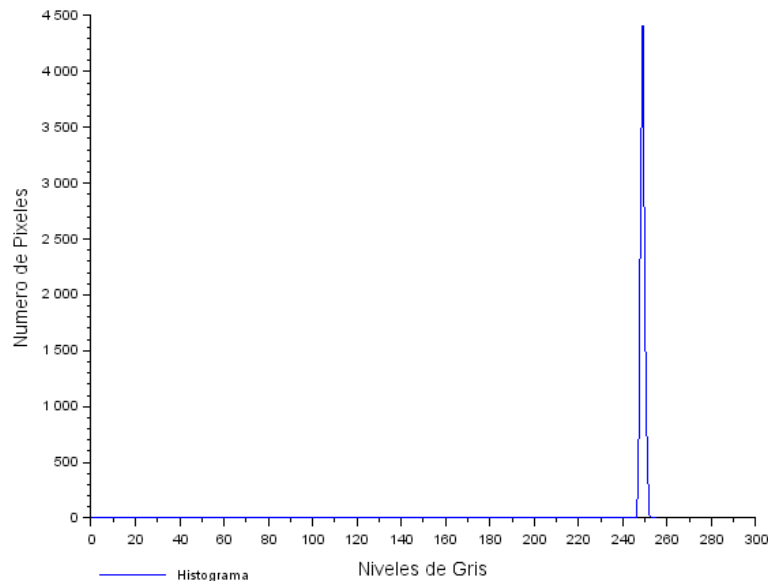


Figura: 5.5-1-Histograma de un prototipo con una capacidad de esparcimiento elevada

5.1.3 Salvado de archivos de la sesión

Durante una sesión de procesamiento de imagen desearemos poner en copia las imágenes en niveles de gris obtenidas, para poder documentar la sesión. Del mismo modo también deseamos generar un archivo.txt que contenga determinados parámetros (mínimo, máximo, media, etc.) así como los histogramas.

Por ello se ha incluido en el script diseñado, una parte relativa a este aspecto, que genera los diferentes archivos ya citados para que los almacenemos. Al terminar cada sesión deberemos copiar todos los archivos de interés y archivarlos donde estimemos oportuno, ya que si no serán sobrescritos en la siguiente sesión de procesamiento de imagen.

- Las imágenes estudiadas se guardan como “CROPX.jpeg”.
- Los histogramas obtenidos se guardan como “histogramaX.jpeg”.
- Los parámetros obtenidos se guardan en un archivo llamado, por ejemplo “30-11-2015_14-37” (día, mes, año, hora, minuto).

El script tiene un número predeterminado de imágenes que es capaz de generar, si vamos a necesitar un número de imágenes mayor a ese durante la sesión que vamos a iniciar, debemos añadir nuevos nombres de imagen al cell-array correspondiente. En el script se especifica, en detalle, que ha de ser modificado.

6 Diseño de la probeta

Para la realización del proyecto ha sido necesario diseñar un prototipo de fuente de luz que proporcione una luz difusa. Para ello se ha diseñado un sistema difusor de luz que ayude a dar homogeneidad a la luz entregada por el sistema de iluminación.

6.1 Diseño del circuito electrónico

El circuito electrónico se ha diseñado en base a 2 objetivos:

- Óptimo brillo de los LEDs
- Facilidad de control en el encendido y apagado.

Se ha optado por un control con transistor de tipo BJT de cara al sistema de encendido y apagado, siendo este un control todo o nada. Para evitar el sobrecalentamiento del circuito se ha optado por una disposición en serie de los LEDs y el valor adecuado en la resistencia serie.

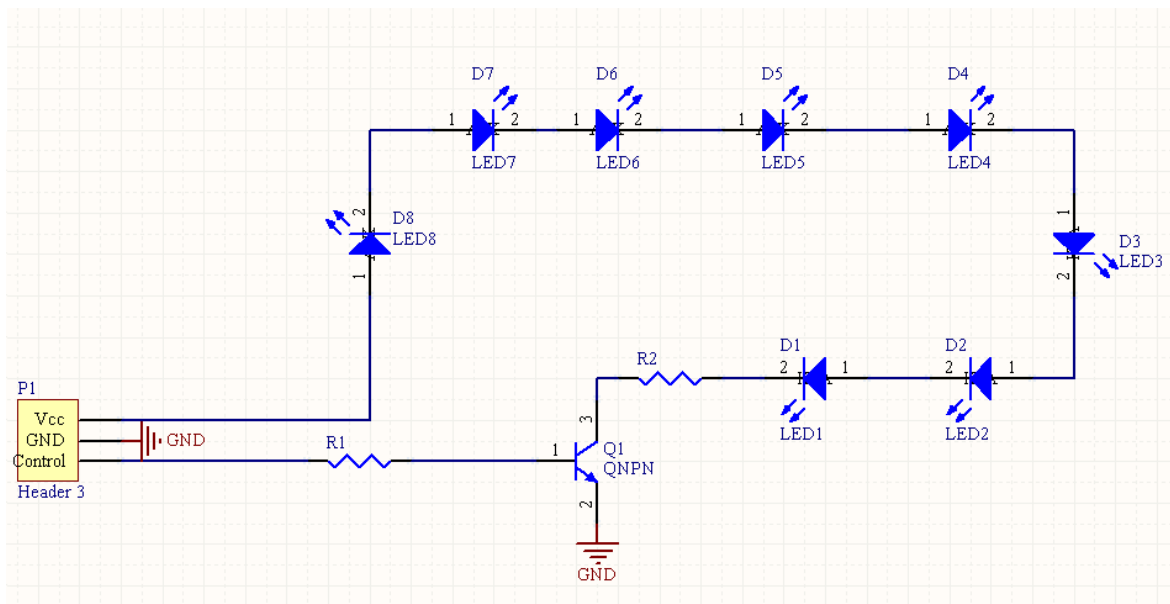


Figura: 6.6-1-Circuito Electrónico

6.1.1 Elección de la fuente de luz

Se ha optado por LEDs como fuente de iluminación debido a su bajo coste, su alta eficiencia, estabilidad luminosa y a una amplia disponibilidad en el mercado. Concretamente se ha elegido un diodo LED “CSL0406WBCW1” de iluminación lateral cuya ficha técnica puede ser consultada en el documento “csl0406wbcw-534715.pdf” adjunto en el CD.

6.1.2 Diseño de la PCB

Una vez diseñado el circuito electrónico ha sido necesario realizar el diseño de la placa de circuito impreso (PCB). El diseño se realizó a una cara, formando los LEDs un cuadrado de 40x40mm de tal forma que produzcan una zona central con una iluminación uniforme. El tamaño de la PCB será de 80x60 mm.

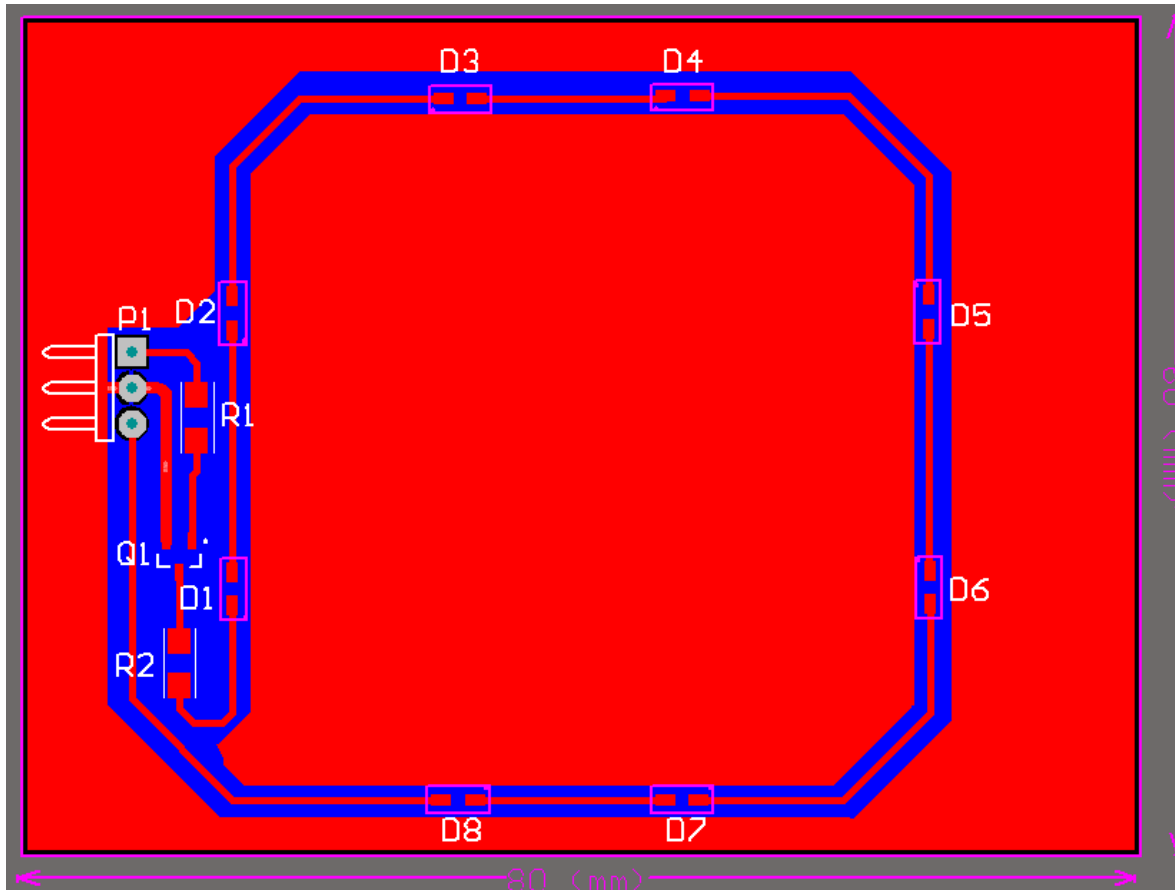


Figura: 6.6-2-Capa TOP de la PCB

6.1.3 Fabricación de la PCB

Para la fabricación de las PCBs de los prototipos hemos optado por realizar la fabricación con una fresadora ProtoMAT S100 (LPKF & Electronics), debido a su disponibilidad y la flexibilidad que nos proporciona para hacer rápidos cambios en el diseño si fuese necesario.



Figura: 6.6-3- LPKF ProtoMAT S100

6.2 Diseño del sistema difusor

El prototipo de sistema difusor de luz se ha construido mediante la superposición de 3 capas de material, cada una con una función diferente:

- **Material reflectante:** Esta primera capa nos proporcionará una recirculación de la luz, incrementando la eficiencia luminosa.
- **Guía de luz:** La segunda capa guiará la luz, haciendo que se distribuya por la zona que nos interesa.
- **Difusor:** La última capa será la del material difusor, que se encargará de difuminar la luz que le llegue de tal manera que la luz que lo atraviese se perciba de forma homogénea.

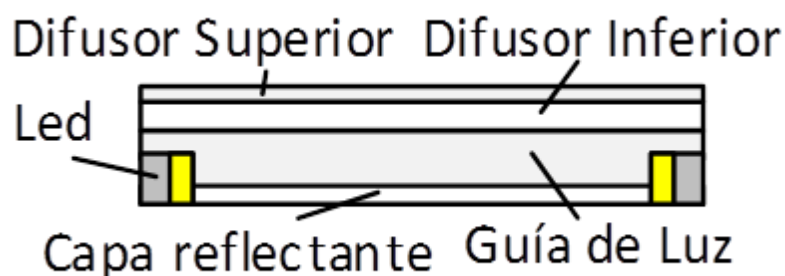


Figura: 6.4- Diseño del Sistema Difusor

6.2.1 Fabricación de la probeta

Para diseñar el sistema difusor de luz ha sido necesario considerar y probar distintos materiales para cada una de las capas a fin de utilizar los materiales más adecuados para la elaboración del mismo.

6.2.1.1 Material reflectante

Esta capa está compuesta por “BrightWhite™ Diffuse Reflector” de la empresa brightview technologies. Este material proporciona más cantidad de luz reflejada que otras opciones probadas, como por ejemplo pintar la base del prototipo de blanco mediante pintura o spray.

6.2.1.2 Guía de luz

Para esta capa se han probado diferentes materiales rígidos, tales como la Ciclolefina, el PMMA o el CPE, pero además de ser rígidos (lo cual dificulta su disposición sobre la PCB), no hacían bien de guía de luz ya que o presentaban zonas de oscuridad (CPE) o eran demasiado transparentes (Cicloléfina, PMMA). La solución encontrada fue optar por Etilvinilacetato (Goma Eva) en láminas, que se disponen sobre la PCB y se funden en un horno de laboratorio Profotflow S (LPKF & Electronics) Laser a 110°C durante unos minutos (la duración del proceso depende del espesor que deseemos conseguir).

6.2.1.3 Capa difusora inferior

Esta capa está formada por una lámina de TPE a partir de unas muestras facilitadas por la empresa KRAIBURG TPE GmbH & Co. Se eligió esta opción debido a la disponibilidad de distintas muestras de TPE con diferentes grados de propiedades mecánicas, lo cual hacía estas muestras muy interesantes para su estudio. Para realizar los ensayos se utilizarán las siguientes láminas de TPE:

- TM3MED: Flexible y blando.
- TM6MED: Semirrígido y dureza intermedia.
- TM9MED: Rígido y duro.

6.2.1.4 Capa difusora superior

Esta capa está formada por una lámina de PET difusor (Brightview Technologies.), esta opción se eligió debido a la disponibilidad de muestras del mismo con distintos tipos de nivel de eficiencia de transmisión. Para realizar el ensayo 5, se utilizarán las siguientes láminas:

- H30: Eficiencia de transmisión del 30%.
- H55: Eficiencia de transmisión del 55%.
- H80: Eficiencia de transmisión del 80%.

7 Realización de los ensayos

Los diferentes ensayos realizados han dado lugar a los siguientes resultados experimentales. Cada ensayo se corresponde con la adición de cada una de las capas de material que forman el sistema difusor.

Debido a la gran cantidad de histogramas obtenidos, solo se mostrará el más representativo de cada ensayo, el resto de imágenes e histogramas obtenidos puede ser consultado en el apéndice.

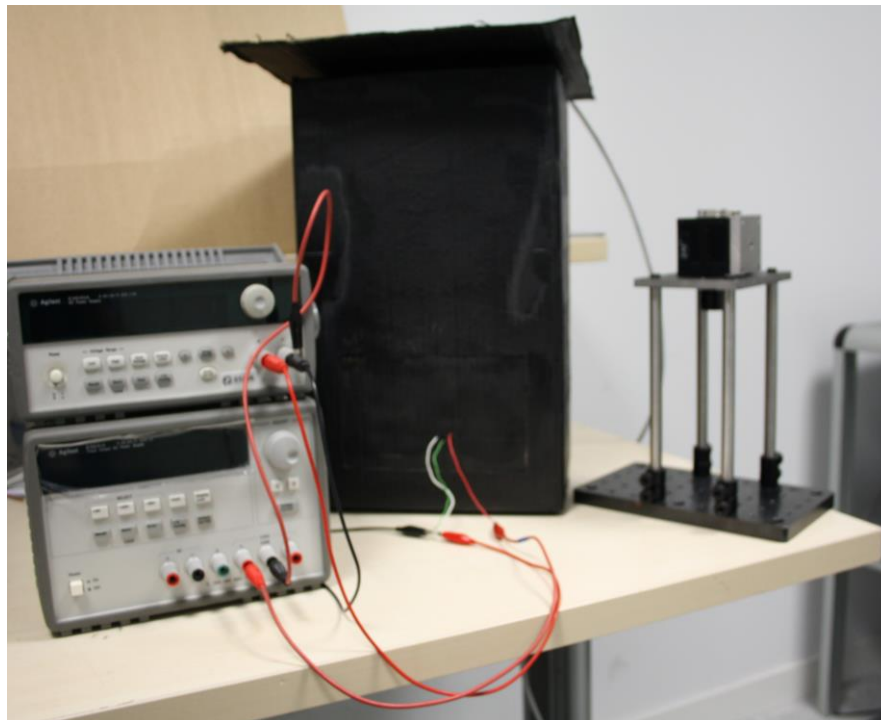


Figura: 7.7-1- Banco de medida

7.1 Ensayo 1

Este ensayo consiste en la captura de imágenes y procesamiento de imagen del prototipo básico sin ninguna capa del sistema difusor.

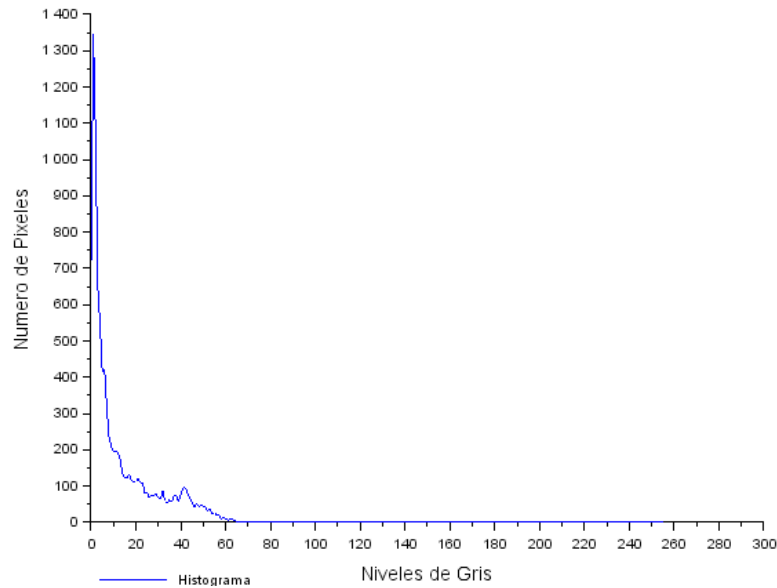


Figura: 7.7-2-Histograma Ensayo 1 - 25V

En el histograma podemos observar que la imagen obtenida es muy oscura dado que los LEDs por si solos no pueden conseguir iluminar la zona de interés.

7.2 Ensayo 2

Este ensayo consiste en la captura de imágenes y procesamiento de imagen del prototipo con la primera capa añadida: la capa reflectante.

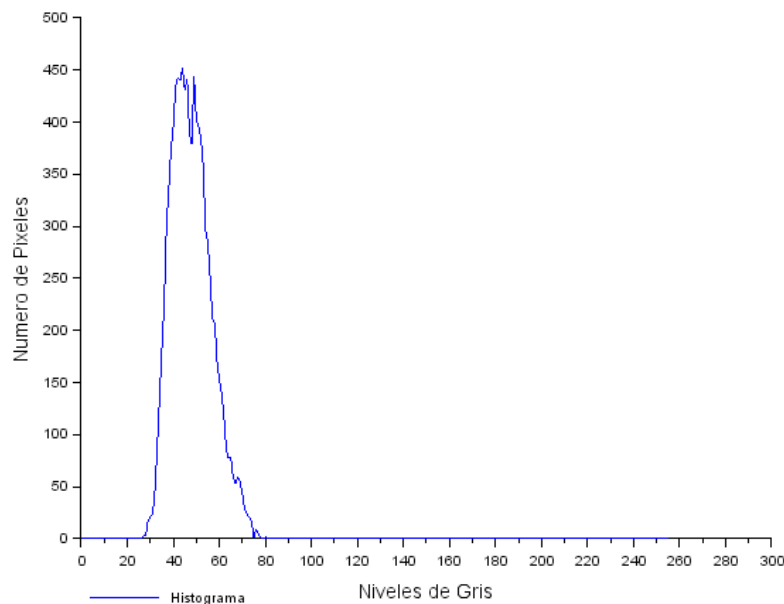


Figura: 7.7-3-Histograma Ensayo 2 - 25V

En el histograma podemos observar que los píxeles de la imagen se han desplazado hacia la derecha del histograma, lo cual evidencia que la imagen ahora está más iluminada.

7.3 Ensayo 3

Este ensayo consiste en la captura de imágenes y procesamiento de imagen del prototipo con la segunda capa añadida: Guía de luz.

7.3.1 Guía de luz: espesor 2 mm

Para conseguir el espesor deseado en la guía de luz utilizamos 5 láminas de goma eva experimental dispuestas sobre la probeta. A continuación se aprisionó el conjunto mediante dos planchas de acero a medida y pinzas para mantenerlo fijado de una forma homogénea.

Una vez fijado el conjunto, se introdujo en un horno de laboratorio 110°C durante unos minutos, hasta que las láminas de goma eva se uniformizan y forman una única capa de material.

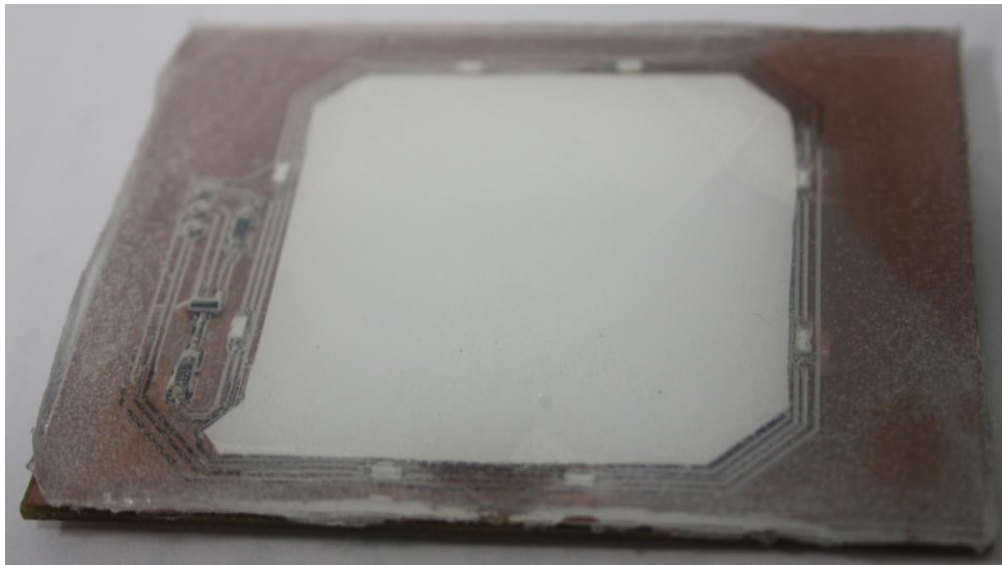


Figura: 7.7-4-Probeta en el ensayo 3 (2mm)

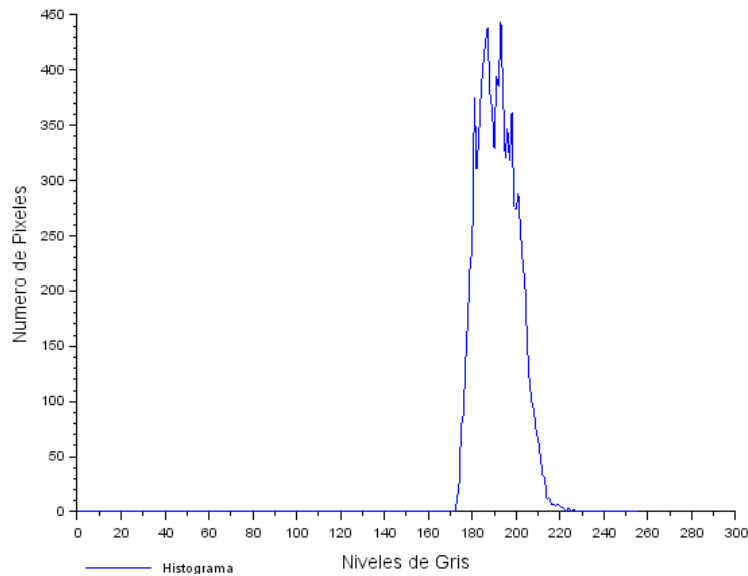


Figura: 7.7-5-Histograma Ensayo 3 (2mm) 25V

En el histograma podemos observar como a medida que aumenta la tensión de alimentación, el histograma se va desplazando hacia la derecha, es decir, los píxeles de la imagen se vuelven más blancos.

Ensayo	Espesor de guía de luz	Voltaje	Capacidad de Esparcimiento	Nivel de Gris Medio
3	2 mm	24.5 V	0,3852	170
3	2 mm	24.7 V	0,3723	179
3	2 mm	24.8 V	0,3673	184
3	2 mm	25 V	0,3284	192

Tabla 7-1: Resultados Ensayo 3

En la tabla podemos observar que a medida que aumenta el voltaje, disminuye la capacidad de esparcimiento: este efecto a priori podría parecer malo, pero no lo es, en tanto que la imagen está dejando de verse oscura (perdiendo uniformidad), para volverse poco a poco más blanca como puede apreciarse en la evolución del valor de gris medio en la imagen.

7.3.2 Guía de luz: espesor 4 mm

Para conseguir el espesor deseado en la guía de luz utilizamos 10 láminas de goma eva experimental dispuestas sobre la probeta. A continuación se aprisionó el conjunto mediante dos planchas de acero a medida y pinzas para mantenerlo fijado de una forma homogénea.

Una vez fijado el conjunto, se introduce en un horno de laboratorio a 110°C durante unos minutos, hasta que las láminas de goma eva se uniformizan y forman una única capa de material.

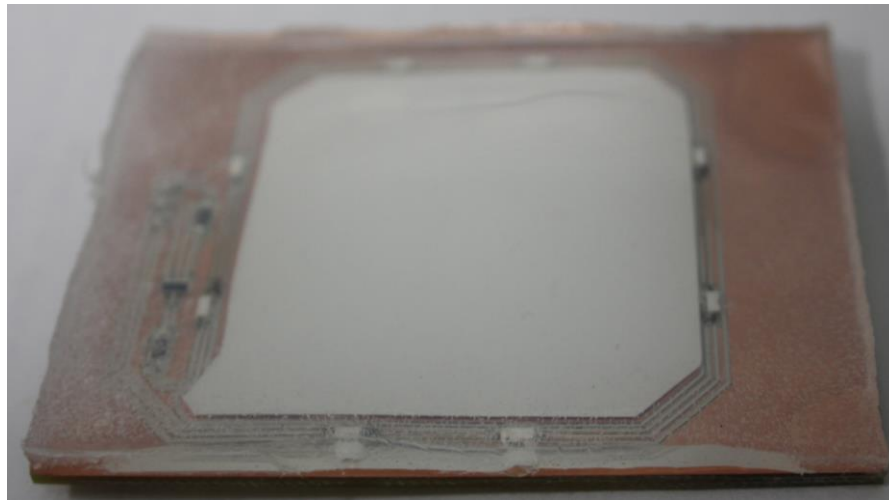


Figura: 7.7-6-Probeta en el ensayo 3 (4mm)

En el histograma podemos observar que el aumento en el espesor de la guía de luz aumenta de forma sustancial el color de la imagen, llegando a saturar el histograma.

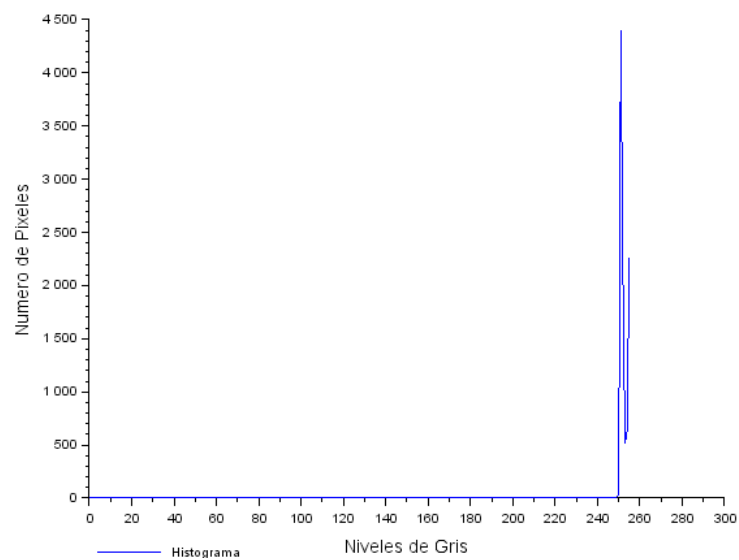


Figura: 7.7-7-Histograma Ensayo 3 (4mm) 24.5V

7.4 Ensayo 4

Este ensayo consiste en la captura de imágenes y procesamiento de imagen del prototipo con la tercera capa añadida: capa difusora inferior.

7.4.1 Capa difusora inferior: TM3MED – Guía de luz 2mm

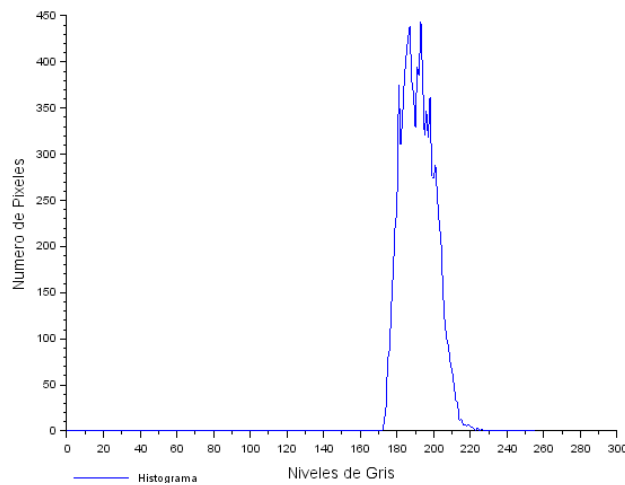
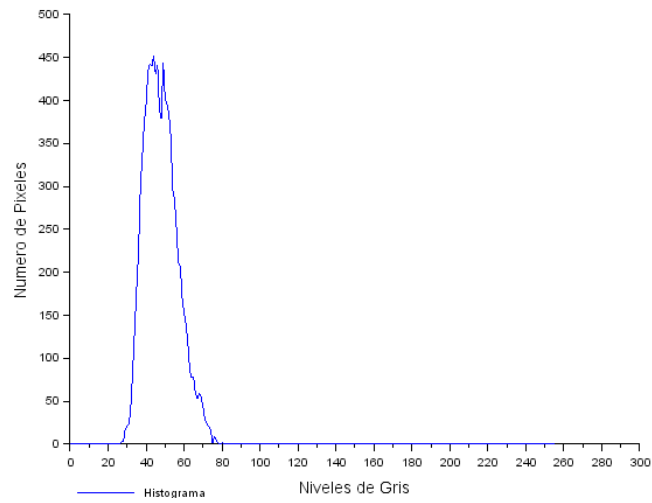


Figura: 7.7-8-Ensayo 2 (izquierda), Ensayo 3 TM3 (derecha) a 25V

En el histograma podemos observar el gran avance hacia el blanco por parte de los píxeles de la imagen, al añadir esta capa difusora, respecto al ensayo 2.

7.4.2 Capa difusora inferior: TM6MED– Guía de luz 2 mm

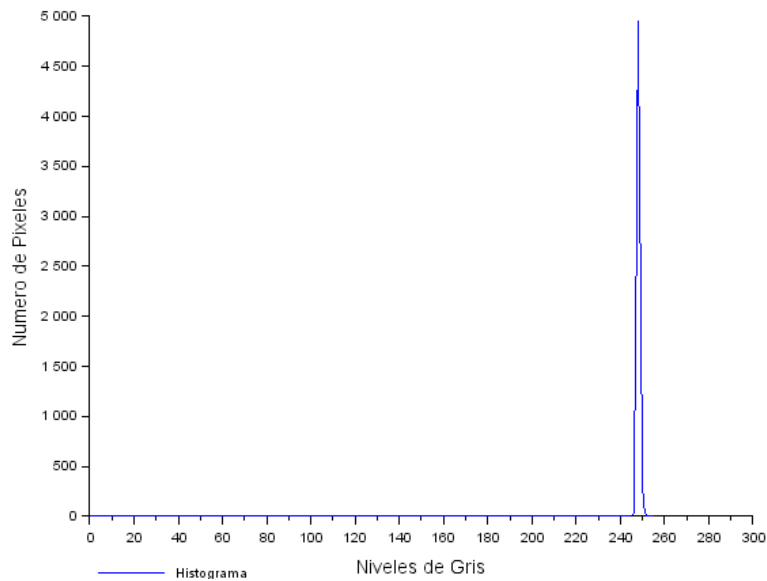


Figura: 7.7-9-Histograma TM6 25V

En el histograma podemos observar que la capacidad de esparcimiento, que representa la uniformidad de la imagen, es mucho mejor que en el TM3MED, además este efecto se acentúa aún más con el voltaje, como puede consultarse en el apéndice.

7.4.3 Capa difusora inferior: TM9MED– Guía de luz 2mm

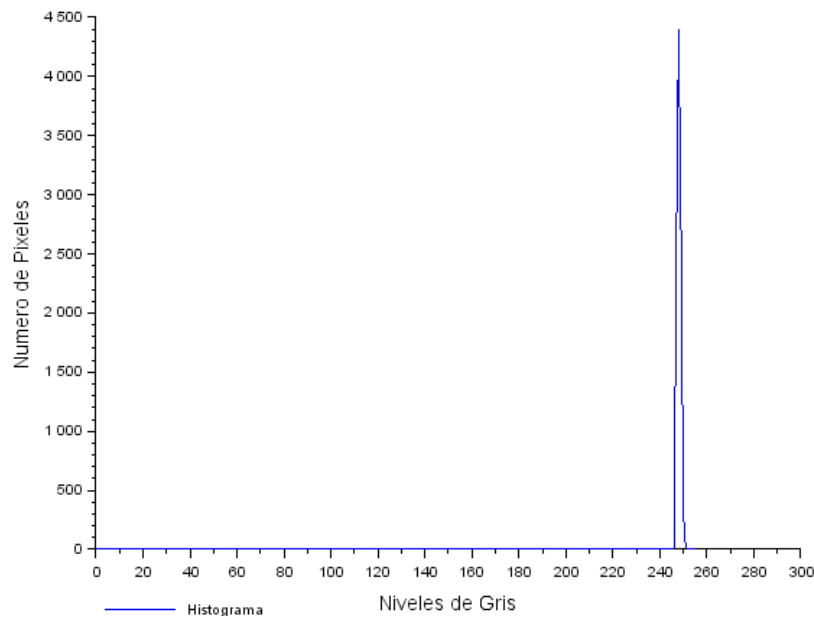


Figura: 7.7-10-Histograma TM9 25V

En el histograma podemos observar un efecto muy similar al del TM9, a medida que aumenta el voltaje, el histograma se va desplazando hacia la derecha y por tanto la imagen toma un color blanco así como una mayor uniformidad.

7.4.4 Resultados del ensayo 4

Ensayo	Espesor de guía de luz	Capa difusora Inferior	Voltaje	Capacidad de Esparcimiento	Nivel de Gris Medio
4	2 mm	TM3	24.5 V	0,5323	213
4	2 mm	TM3	24.7 V	0,2938	225
4	2 mm	TM3	24.8 V	0,3254	232
4	2 mm	TM3	25 V	0,7901	242
4	2 mm	TM6	24.5 V	0,5045	237
4	2 mm	TM6	24.7 V	0,8071	244
4	2 mm	TM6	24.8 V	0,9951	246
4	2 mm	TM6	25 V	1	248
4	2 mm	TM9	24.5 V	0,4993	237
4	2 mm	TM9	24.7 V	0,7753	244
4	2 mm	TM9	24.8 V	0,8826	246
4	2 mm	TM9	25 V	1	248

Tabla 7-2-Ensayo 4: Resultados obtenidos

7.5 Ensayo 5

Este ensayo consiste en la captura de imágenes y procesamiento de imagen del prototipo con la tercera capa añadida: capa difusora superior.

Este ensayo consta de 36 muestras, se analizan 3 difusores inferiores (TM3, TM6 y TM9) con 3 difusores superiores distintos (H30, H55 y H80) a 4 voltajes distintos. (24.5, 24.7, 24.8 y 25 V). Para este ensayo nos interesa principalmente la capacidad de esparcimiento.

7.5.1 TM3

A continuación se muestran los histogramas a partir de las imágenes obtenidas de las probetas con capa difusora inferior TM3 y las distintas configuraciones de capa difusora superior a distintos voltajes.

7.5.1.1 TM3 + H30

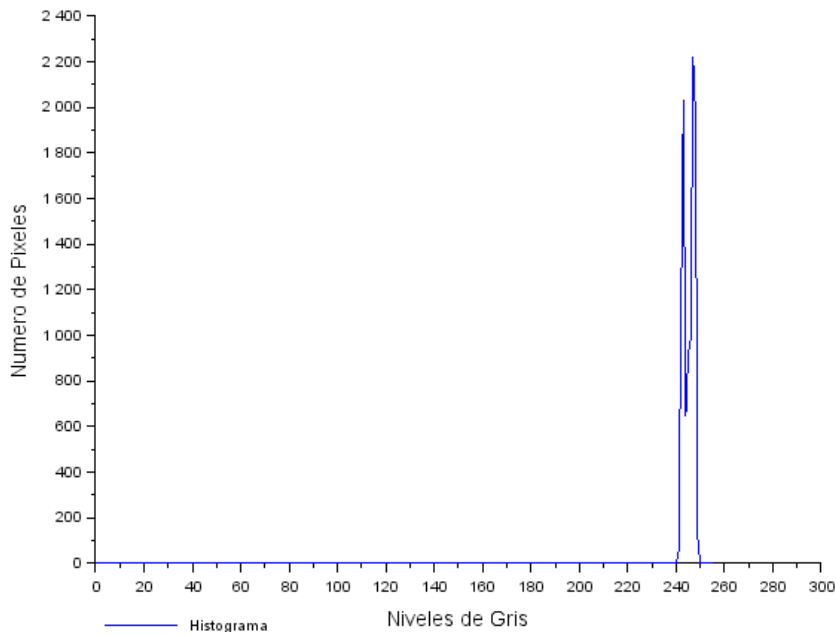


Figura: 7.7-11-Histograma TM3 + H30 25V (2mm)

La disposición de la capa difusora superior, en este caso de H30, supone una gran mejoría en la uniformidad, siendo más evidente a voltajes óptimos como en esta ilustración.

7.5.1.2 TM3 + H55

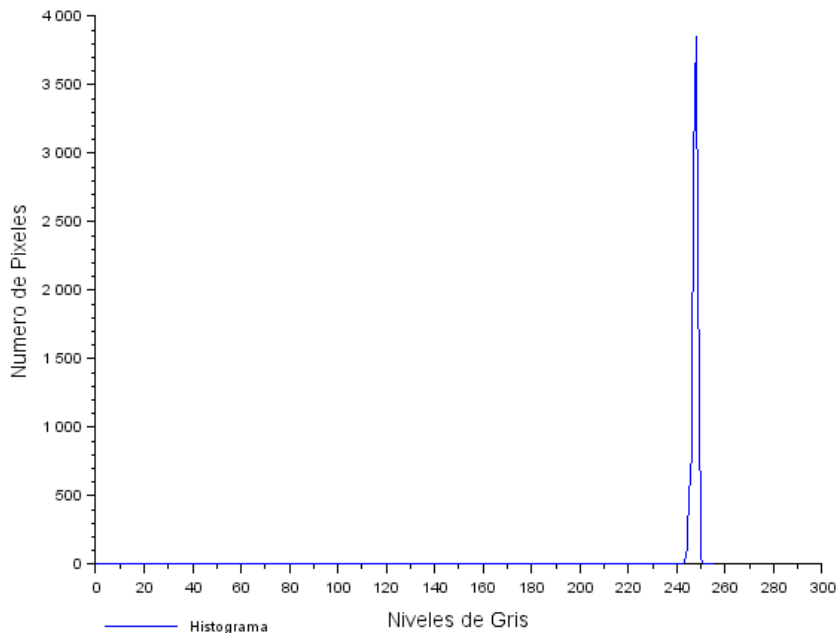


Figura: 7.7-12-Histograma TM3 + H55 25V (2mm)

La lámina difusora H55, uniformiza mejor que la H30.

7.5.1.3 TM3 + H80

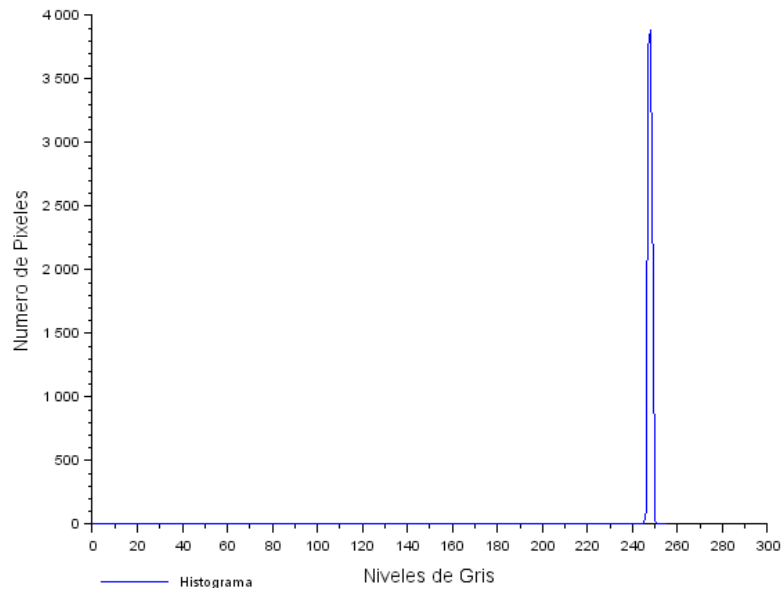


Figura: 7.7-13-Histograma TM3 + H80 25V (2mm)

La lámina difusora H80 tiene un comportamiento similar a la H55

7.5.2 TM6

A continuación se muestran los histogramas a partir de las imágenes obtenidas de las probetas con capa difusora inferior TM6 y las distintas configuraciones de capa difusora superior a distintos voltajes.

7.5.2.1 TM6 + H30

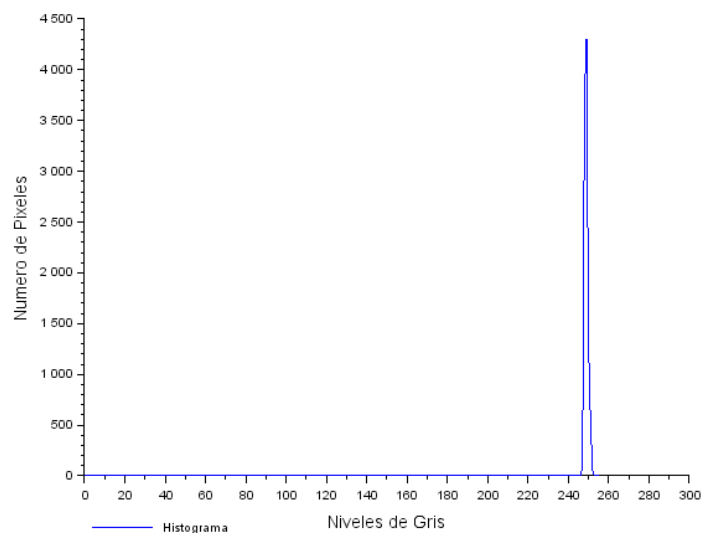


Figura: 7.7-14-Histograma TM6 + H30 25V (2mm)

Debido a que el material difusor inferior TM6 presenta mejores propiedades que el TM3, al colocar la lámina H30, obtenemos un mejor resultado de uniformidad.

7.5.2.2 TM6 + H55

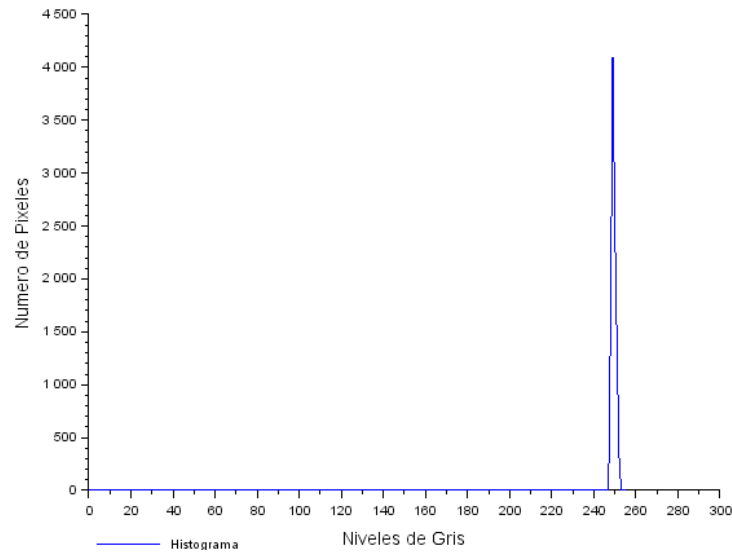


Figura: 7.7-15-TM6 + H55 25V (2mm)

7.5.3 TM6 + H80

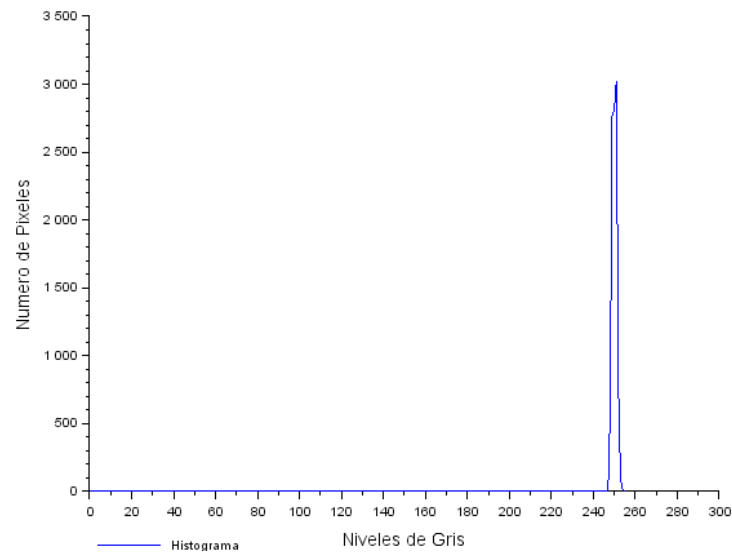


Figura: 7.7-16-TM6 + H80 25V (2mm)

Las láminas H80 y H55 no presentan una mejora sustancial respecto a la H30 para el caso concreto del TM6. Esto es debido a que la uniformidad del TM6 a 25V ya era muy buena, por lo tanto el margen de mejora era escaso.

7.5.4 TM9

A continuación se muestran los histogramas a partir de las imágenes obtenidas de las probetas con capa difusora inferior TM9 y las distintas configuraciones de capa difusora superior a distintos voltajes.

7.5.4.1 TM9 + H30

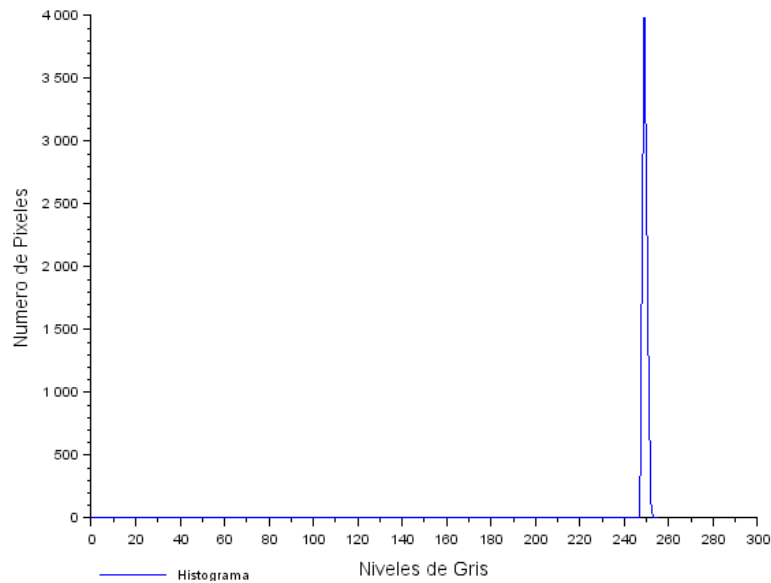


Figura: 7.7-17-Histograma TM9 + H30 25V (2mm)

7.5.4.2 TM9 + H55

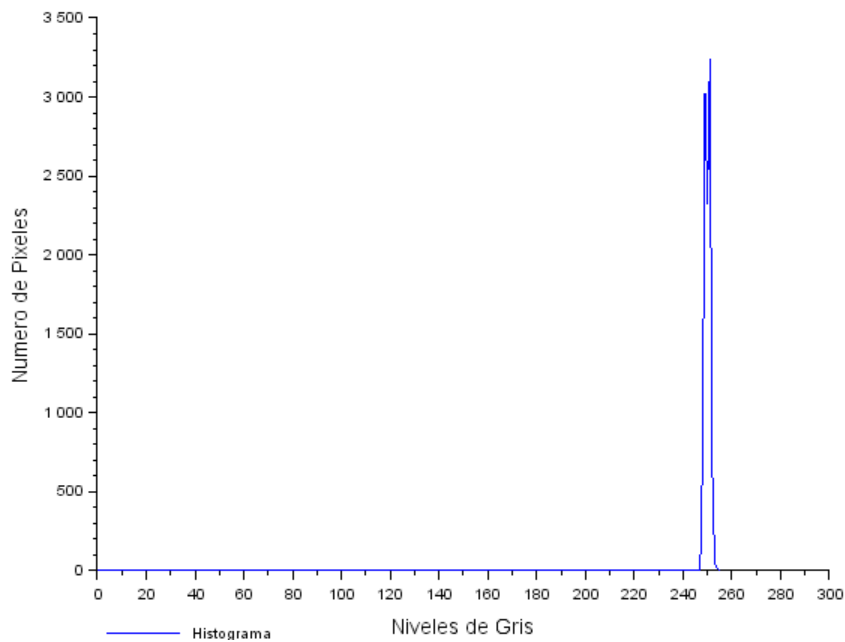


Figura: 7.7-18-Histograma TM9 + H55 25V (2mm)

7.5.4.3 TM9 + H80

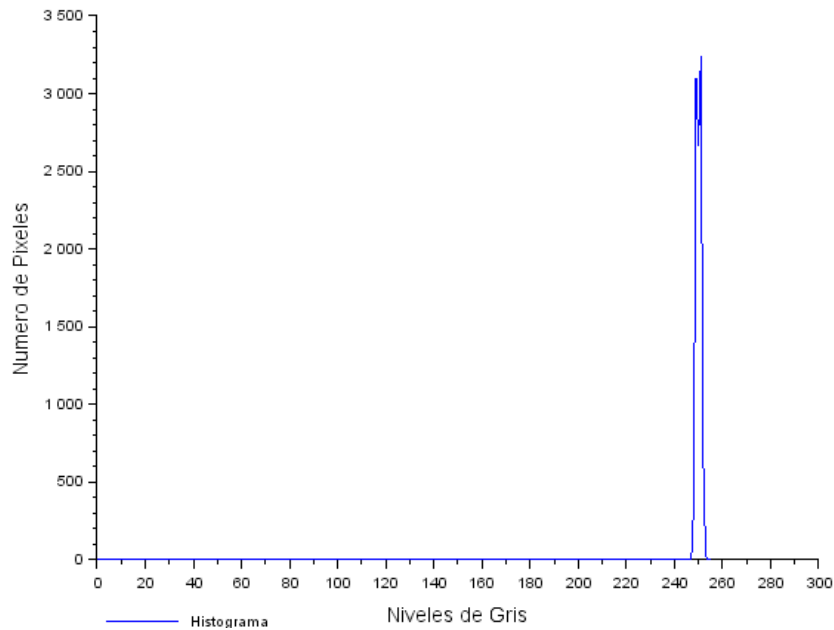


Figura: 7.7-19-Histograma TM90 + H80 25V (2mm)

Al igual que ocurre con el TM6, el TM9 no consigue una mejora sustancial en la uniformidad, debido a que los valores de uniformidad previos ya era muy satisfactorios.

7.5.5 Resultados del ensayo 5

Espesor	Capa difusora Inferior	Capa difusora Superior	Voltaje	Capacidad de Esparcimiento	Nivel de Gris Medio
2 mm	TM3	H30	24.5 V	0,4087	216
2 mm	TM3	H30	24.7 V	0,3348	231
2 mm	TM3	H30	24.8 V	0,5765	238
2 mm	TM3	H30	25 V	0,8872	245
2 mm	TM3	H55	24.5 V	0,3465	230
2 mm	TM3	H55	24.7 V	0,697	241
2 mm	TM3	H55	24.8 V	0,8478	244
2 mm	TM3	H55	25 V	0,9984	248
2 mm	TM3	H80	24.5 V	0,2945	229
2 mm	TM3	H80	24.7 V	0,7249	241
2 mm	TM3	H80	24.8 V	0,8751	245
2 mm	TM3	H80	25 V	1	248

Tabla 7-3: Resultados de las probetas con TM3

Espesor	Capa difusora Inferior	Capa difusora Superior	Voltaje	Capacidad de Esparcimiento	Nivel de Gris Medio
2 mm	TM6	H30	24.5 V	0,5852	240
2 mm	TM6	H30	24.7 V	0,8409	246
2 mm	TM6	H30	24.8 V	1	248
2 mm	TM6	H30	25 V	1	249
2 mm	TM6	H55	24.5 V	0,5988	244
2 mm	TM6	H55	24.7 V	1	248
2 mm	TM6	H55	24.8 V	1	249
2 mm	TM6	H55	25 V	0,9998	249
2 mm	TM6	H80	24.5 V	0,995	247
2 mm	TM6	H80	24.7 V	1	249
2 mm	TM6	H80	24.8 V	1	249
2 mm	TM6	H80	25 V	1	250

Tabla 7-4: Resultados de las probetas con TM6

Espesor	Capa difusora Inferior	Capa difusora Superior	Voltaje	Capacidad de Esparcimiento	Nivel de Gris Medio
2 mm	TM9	H30	24.5 V	0,6389	245
2 mm	TM9	H30	24.7 V	1	248
2 mm	TM9	H30	24.8 V	1	248
2 mm	TM9	H30	25 V	1	249
2 mm	TM9	H55	24.5 V	0,9994	247
2 mm	TM9	H55	24.7 V	1	249
2 mm	TM9	H55	24.8 V	1	249
2 mm	TM9	H55	25 V	1	250
2 mm	TM9	H80	24.5 V	0,9992	247
2 mm	TM9	H80	24.7 V	1	249
2 mm	TM9	H80	24.8 V	1	249
2 mm	TM9	H80	25 V	1	250

Tabla 7-5: Resultados de las probetas con TM9

8 Análisis de los resultados

En este apartado analizaremos como afecta la disposición de cada una de las capas del sistema difusor diseñado a las imágenes obtenidas así como estableceremos comparativas entre las distintas configuraciones realizadas.

8.1 Influencia del voltaje en la luminosidad obtenida

Si observamos algunos de los histogramas obtenidos (independientemente del ensayo) podemos observar como los píxeles de la imagen se encuentran desplazados más hacia la derecha, es decir hacia el blanco. Esto es debido al punto de funcionamiento elegido para los LEDs es de 25V y conforme ese voltaje disminuye, también lo hace la luminosidad.

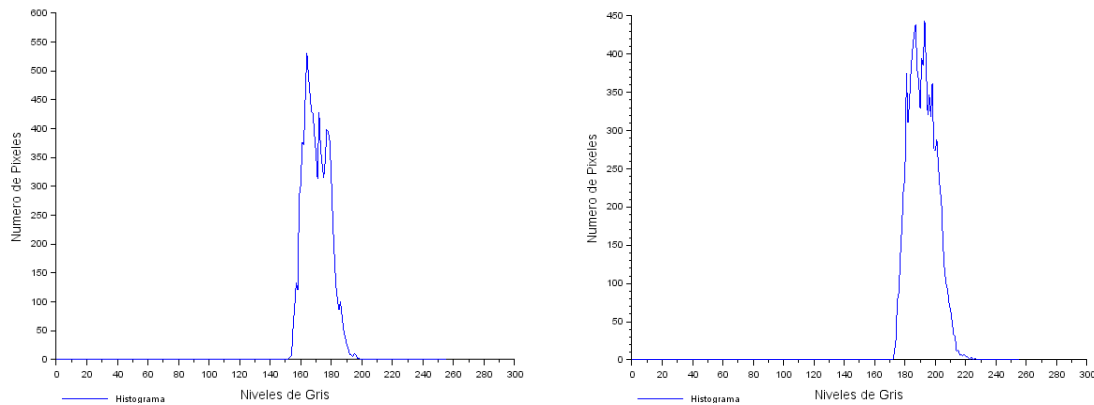


Figura: 8.8-1-Ensayo 3 (2mm) a 24,5V y 25V respectivamente

No obstante es posible obtener buenos resultados de luminosidad gracias al sistema difusor diseñado, incluso con voltajes inferiores al punto de funcionamiento de 25V, como veremos más adelante.

8.2 Influencia del espesor de la guía de luz

Uno de los parámetros que estábamos interesados en estudiar, era la influencia del espesor de la capa correspondiente a la guía de luz en la luminosidad obtenida.

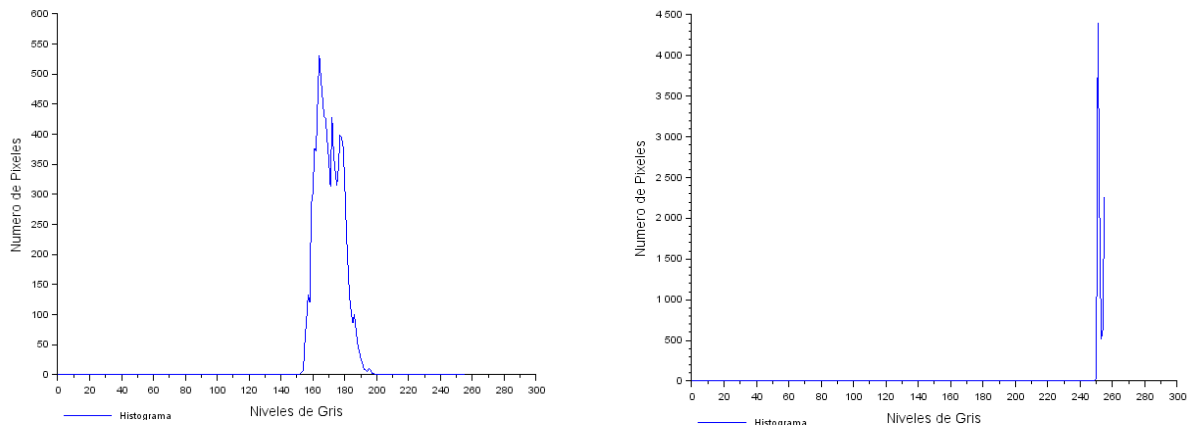


Figura: 8.8-2-Histograma del ensayo 3 con 2 mm de espesor (izquierda) y 4 mm de espesor (derecha)

Podemos ver en el histograma como el color de la imagen es mucho más blanco en la probeta con un mayor espesor en la guía de luz, llegando incluso a saturar el histograma.

Este aspecto es muy importante ya que nos permitirá seleccionar el espesor que necesitamos en función de la aplicación que vayamos a realizar. Este efecto aspecto puede ser observado de forma más grafica en la siguiente comparativa.

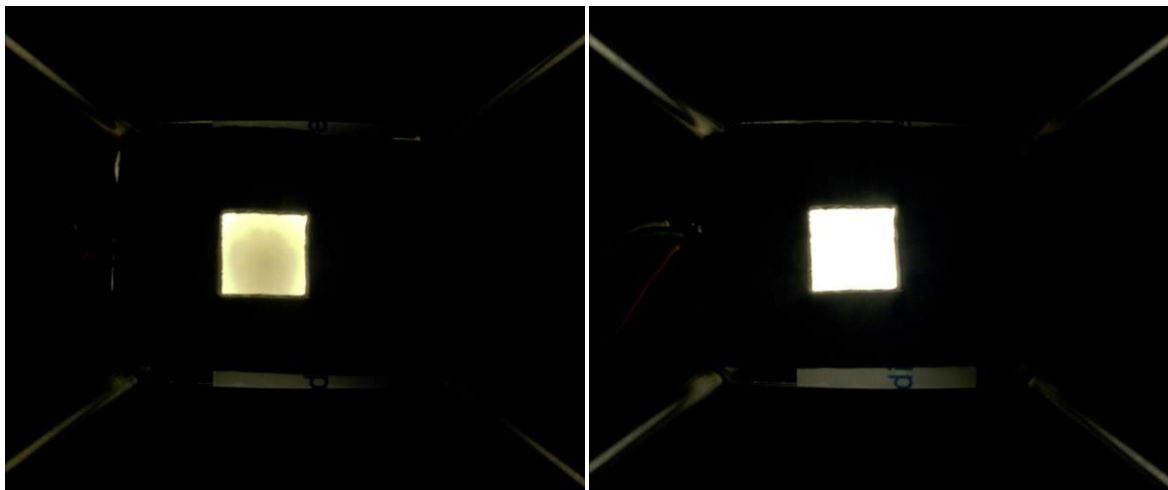


Figura: 8.8-3-A la izquierda 2 mm a la derecha, 4 mm de espesor

Como puede observarse, el color obtenido gracias al mayor espesor, es mucho mejor.

8.3 Influencia de los materiales difusores inferiores (TM3, TM6, TM9)

Para realizar la capa difusora inferior, se han utilizado 3 materiales, el TM3, TM6 y TM9, como se ha explicado anteriormente. Con ello buscamos estudiar qué efecto provoca el material utilizado en la uniformidad de la luz obtenida, así como el color obtenido.

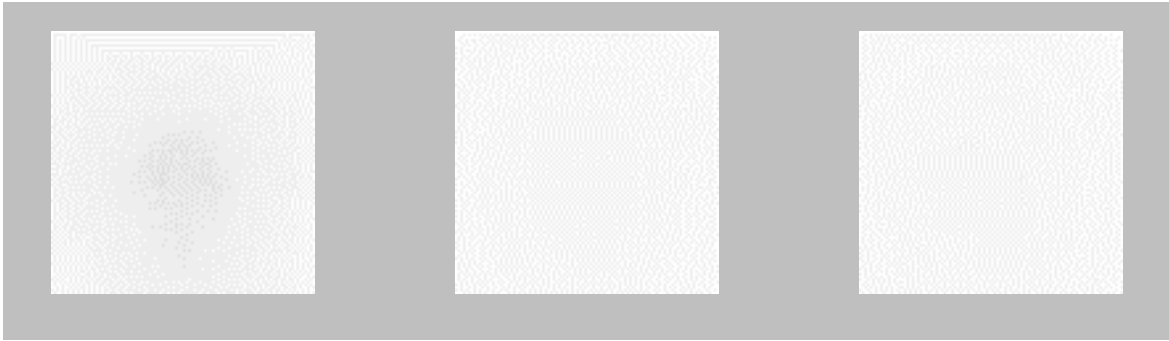


Figura: 8.8-4 – TM3, TM6 y TM9

Esta comparativa se corresponde con el ensayo 4, a 25V, como puede verse, el color obtenido en la probeta con TM6 y TM9 es más blanco que la probeta con TM3, además de presentar una mayor uniformidad. Los histogramas correspondientes a este ensayo pueden ser consultados en el apéndice.

La diferencia entre los difusores de TPE utilizados en estas pruebas, estriba principalmente en su dureza y rigidez, siendo el TM3 la muestra más flexible y blanda y el TM9 la muestra más rígida y dura.

Por tanto podemos concluir que la rigidez proporciona mejores propiedades difusoras.

8.4 Influencia de los materiales difusores superiores (H30, H55, H80)

Para realizar la capa difusora inferior, se han utilizado 3 láminas de PET, el H30, H55 y H80, como se ha explicado anteriormente. Con ello buscamos estudiar como mejoran estas láminas de PET, la respuesta obtenida por la capa difusora inferior.

Las probetas con TM6 y TM9 a voltaje alto presentan una muy buena uniformidad y un color blanco muy puro, por tanto la influencia de las láminas de PET será en muchos casos imperceptible y por tanto no merece la pena. Sin embargo, a voltajes inferiores a 25V, la respuesta obtenida era peor, por tanto nos centraremos en ese escenario, ya que es el que presenta un mayor rango de mejora y por tanto es donde el efecto de las láminas de PET podrá ser mejor aprovechado.

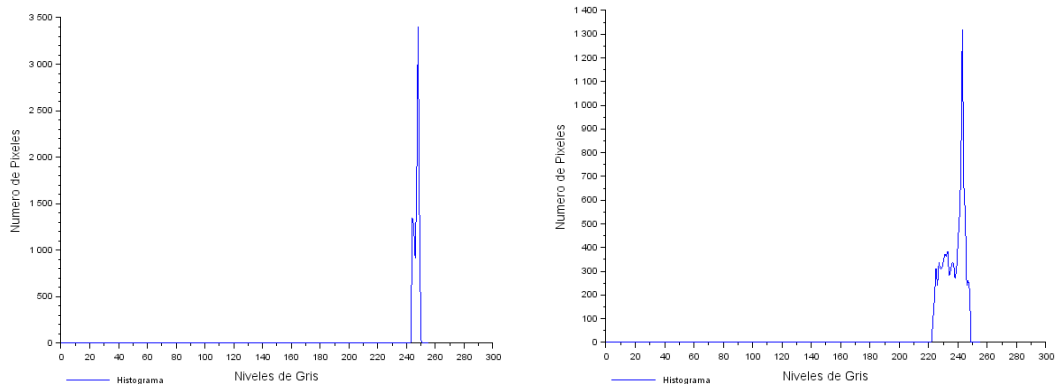


Figura: 8.8-5-TM9 a 24,5V (izquierda) y TM9+H80 a 24,5V (derecha)

En la probeta con TM3, la respuesta es peor a cualquier voltaje, por tanto el margen de mejora es mayor por lo que nos interesan muchas estas muestras para estudiar el efecto de las láminas de PET.

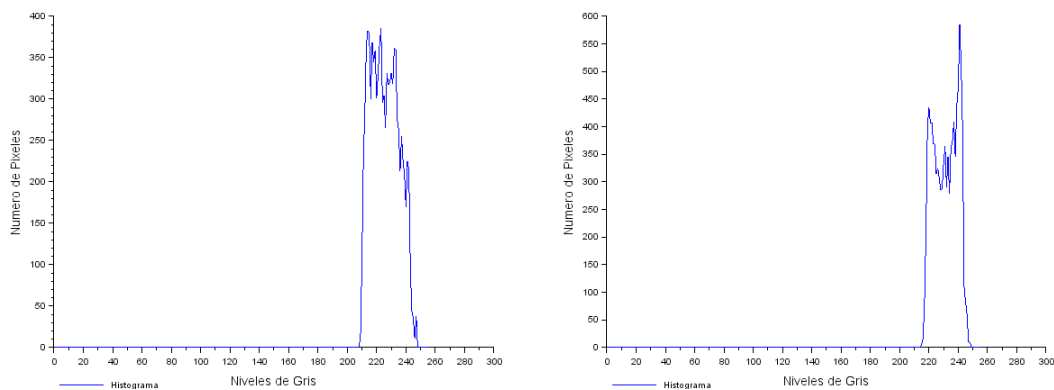


Figura: 8.8-6-Ensayo 4 TM3 (izquierda), ensayo 5 TM3+H30 (derecha) a 24,7V

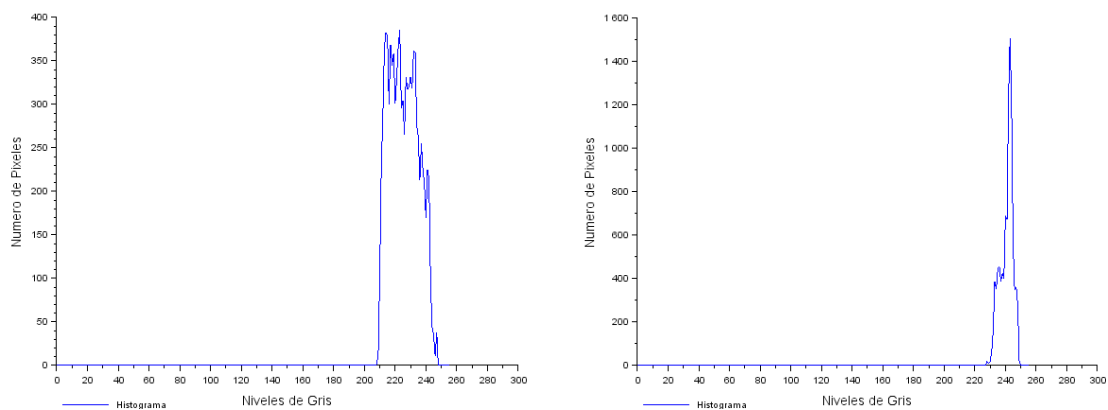


Figura: 8.8-7-Ensayo 4 TM3 (izquierda), ensayo 5 TM3+H55 (derecha) a 24,7V

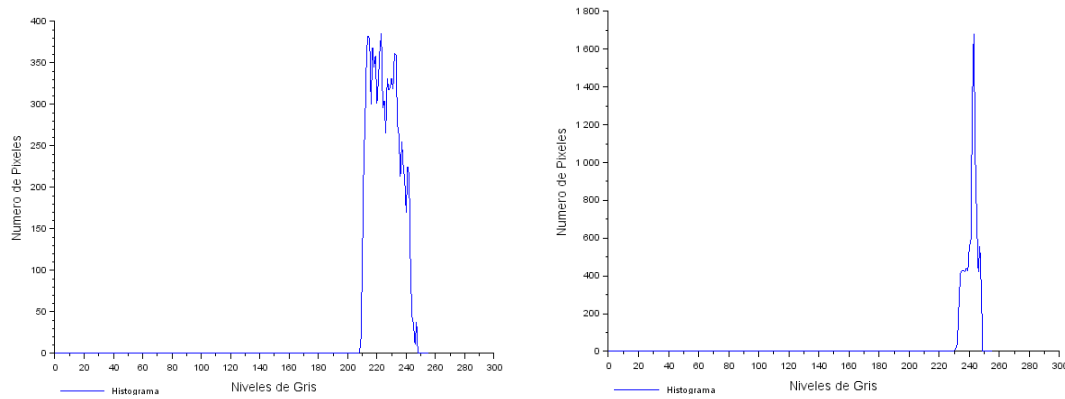


Figura: 8.8-8-Ensayo 4 TM3 (izquierda), ensayo 5 TM3 + H80 a 24,7V

Como podemos ver, la uniformidad obtenida en la probeta es mucho mayor al utilizar las láminas de PET (Ensayo 5), que sin ellas (Ensayo 4). Además este efecto se acentúa conforme aumenta la calidad de la lámina de PET, siendo la lámina H30 la menos eficiente y la H80 la más eficiente.

9 Presupuesto

9.1 Recursos Hardware

En este apartado se muestra la lista de materiales utilizados para el montaje del sistema así como su coste

Descripción	Unidades	Precio Unitario (€)
Ordenador tipo PC	1	980
Monitor LCD de 28"	1	209
Cámara BB-500GE	1	600
Objetivo Estandar 8 mm	1	259
Cable de Red	1	43,41
Soporte óptico con base de cristal	1	15,6
Prensaestopa	2	2,99
LED CSL0406WBCW1	100	36,9
Transistor BJT	2	0,1
Conector 3x1	1	2,5
Materiales difusores	1	150
Total		2299,5

9.2 Recursos Software

En este apartado se hace referencia a los recursos software utilizados para realizar el desarrollo del sistema.

Descripción	Unidades	Precio Unitario (€)
Microsoft Windows XP	1	160,8
Microsoft Office XP	1	420,2
Total		581

9.3 Recursos Humanos

En este apartado se hace referencia a los recursos humanos utilizados para realizar el desarrollo del sistema.

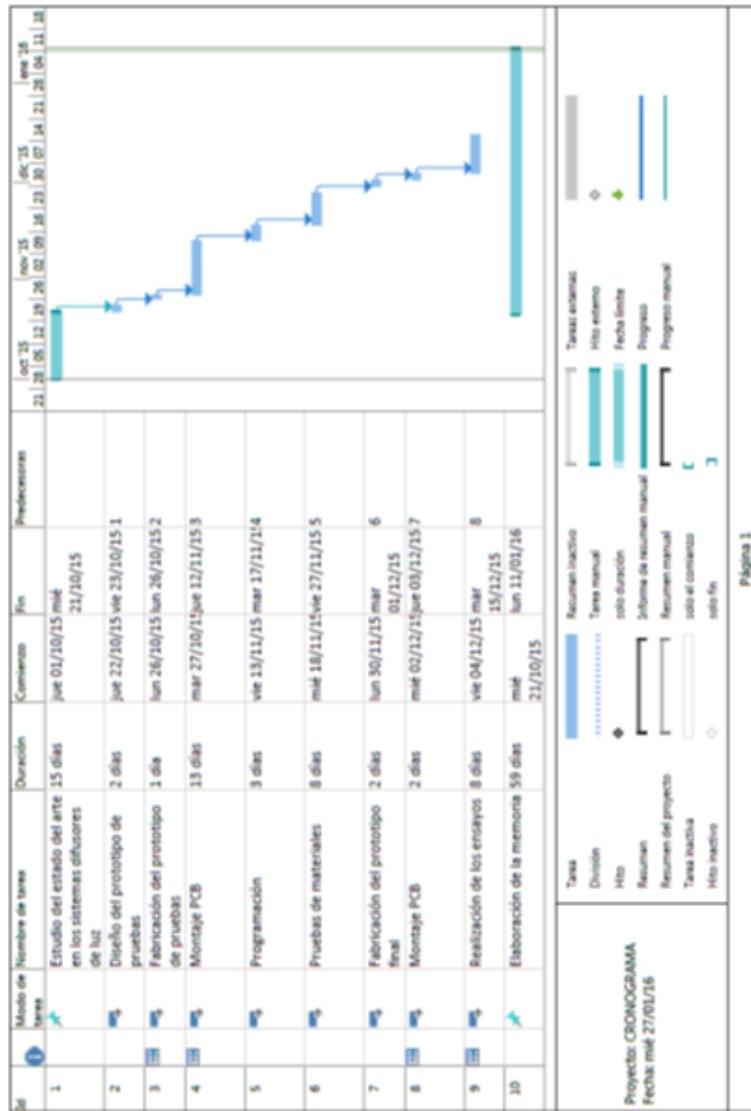
Descripción	Tiempo estimado (Horas)	Precio Unitario (€)
Análisis de los sistemas difusores y su evaluación de calidad	40	60
Diseño, fabricación y montaje de los prototipos de prueba	20	20
Diseño del software de evaluación de calidad	20	60
Realización de los ensayos	48	20
Dirección	15	60
Total		5860

9.4 Presupuesto Final

Descripción	Precio (€)
Recursos Totales	8.740,50 €
Beneficio Industrial (6%)	524,43 €
Costes Generales (15%)	1.311,08 €
Suma de Gastos y Beneficios	10.576,01 €
I.V.A (21%)	2.220,96 €
Total	12.796,97 €

10 Planificación

La ejecución de las distintas tareas realizadas se corresponde con la siguiente



11 Conclusiones

A raíz del análisis de los resultados hemos obtenido las siguientes conclusiones:

- Para obtener la uniformidad y el color deseado, la selección del voltaje adecuado es parte fundamental, ya que podemos obtener un buen resultado para nuestra aplicación sin tener que añadir capas difusoras, no obstante la capa de reflectante y de guía de luz son imprescindibles.
- El espesor de la guía de luz es un parámetro determinante ya que a mayor espesor, mayor uniformidad y mejor color blanco obtendremos, independientemente del voltaje seleccionado.
- En caso de estar limitados en cuanto al voltaje de alimentación o de espesor permitido en la guía de luz, la combinación adecuada de los distintos materiales difusores estudiados, será una solución adecuada.
- La rigidez y dureza del material de TPE estudiado influye de manera notable en la uniformidad y el color obtenidos, siendo mejor cuanto más duro y rígido sea el material.
- La eficiencia en las láminas de PET es determinante a la hora de mejorar la respuesta obtenida de las muestras con capa difusora inferior basada en TPE.

12 Bibliografía

- I. <http://www.edmundoptics.de/technical-resources-center/optics/diffuser-selection-guide/>
- II. <http://www.infaimon.com/es/>
- III. <http://www.brightviewtechnologies.com/>
- IV. <http://www.kraiburg-tpe.com/>
- V. <http://www.cambridgeincolour.com/tutorials/gamma-correction.htm>