



Gradu Amaierako Lana / Trabajo Fin de Grado  
Ingeniaritza Elektronikoko Gradua / Grado en Ingeniería Electrónica

# Sistemas de Propagación y Distribución de Luz en Productos de Consumo

Egilea/Autor:  
Nicolás Vallis Maestre  
Zuzendaria/Director:  
Iker Caballero Ortiz de Zárate





## Nota Previa

*Todos los diagramas e imágenes presentes en el texto son material original, salvo que se indique lo contrario.*

## Resumen

*La venta de productos tecnológicos de consumo está aumentando vertiginosamente. Este hecho, unido a la constante búsqueda de soluciones de menor consumo y menor coste, hacen de este proyecto un estudio muy actual sobre la problemática existente.*

*Con un estudio de los diferentes sistemas de retroiluminación predominantes en el mercado actual como punto de partida, este texto trata de analizar de forma accesible la tecnología Edge-Lit, presentando una recopilación bibliográfica de aspectos teóricos acompañado por la construcción de varios prototipos funcionales sencillos, que ilustran algunas de las principales aplicaciones de dicha tecnología.*

*Por ello, además de aplicar los conocimientos adquiridos durante el Grado, el texto se enfrentará a problemáticas no teóricas y más relacionadas con el desarrollo de productos de mercado: fabricabilidad, costes, consumo, tamaño, etc. Se trata de un trabajo tanto teórico como práctico.*

1. Introducción	1
1.1 Objetivos y Alcance	1
2. Estado del Arte	3
2.1 Retroiluminación CCFL	4
2.2 Retroiluminación Directa o Full-Array	5
2.3 Retroiluminación desde los Bordos o Edge-Lit	7
2.4 Tecnología OLED	8
2.5 Contraste y Análisis de los Datos Obtenidos	10
2.6 Conclusiones	13
3. Caracterización de la Tecnología Edge-Lit	15
3.1 LGP	16
3.2 Reflectores y Difusores de Luz	17
4. Desarrollo y Pruebas	19
4.1 Distribución de los LED	20
4.2 Distribución de las Irregularidades	24
4.3 Difusor Delantero y Reflector Trasero	29
4.4 Medidas de Luz	32
4.5 Montaje Final	35
5. Otras Aplicaciones	36
5.1 Figuras Luminosas	36
5.2 Otras Formas de Guías de Luz	38
6. Conclusiones	40
6.1 Futuras Líneas de Investigación	41
7. Bibliografía	44

# 1. Introducción

Durante los últimos años la industria tecnológica ha sido testigo de un insólito crecimiento de la demanda de productos de consumo, experimentando un radical cambio de rumbo hacia el público general. En consecuencia, los consumidores se han acostumbrado a una constante pugna entre grandes productores, que cada año renuevan existencias, dejando obsoleto -o al menos anticuado- cualquier dispositivo anterior.

Evidentemente, la pujante sofisticación de los productos tecnológicos de consumo ha sido sustentada por una colosal inversión de capital y personal, que ha solventado un sinfín de problemas de diseño (desde diseño electrónico hasta estética del producto) en tiempo récord.

Uno de estos problemas, y sin duda uno de los más importantes, radica en la incapacidad de las pantallas LCD para producir luz propia<sup>1</sup>, debido al reducido tamaño de los diodos que las componen. Por tanto, estas deben ir acompañadas de un elemento luminoso: luz natural, como en el caso de algunos relojes digitales; o artificial, generalmente luz LED. En el caso de pantallas más sofisticadas -monitores de ordenador, televisiones LCD o dispositivos móviles- la iluminación se realiza desde la parte trasera de la pantalla, técnica conocida como retroiluminación.

Si bien es cierto que el interés del consumidor rara vez recae en la tecnología de retroiluminación, se trata de una de las prestaciones más relevantes de un dispositivos comerciales, debido a que tiene un enorme impacto en aspectos esenciales del diseño electrónico, como el consumo energético, el precio o el espacio requerido [1].

## 1.1 Objetivos y Alcance

Un interesante punto de partida es un estudio de las soluciones actuales en materia de retroiluminación. Por ello, se ha realizado en primer lugar un estado del arte de las técnicas dominantes en el mercado de los últimos años (CCFL, Full-Array, Edge-Lit y OLED), cada una ilustrada con dos ejemplos de productos de consumo. Para ello se aportan diversos datos, diagramas y tablas, que ayuden a ilustrar cada tipo de tecnología,

---

<sup>1</sup> A excepción de las pantallas OLED, cuyo funcionamiento se explicará a lo largo del capítulo 2 (Estado del Arte)

y a realizar una confrontación final de los dichos datos, que permita ver la evolución reciente de la tecnología de pantallas.

Mediante este estado del arte se pretende justificar el aún extendido uso de la retroiluminación de pantallas, además de dar una idea general de cada técnica, sin profundizar en ninguna de ellas.

No obstante, tal y cómo se comprobará más adelante, destaca sobre las demás la tecnología Edge-Lit. Se trata de la única fundamentada en el uso de luz guiada, y además es la más utilizada actualmente. Por todas estas razones -además del amplio marco de aplicación de las guías de luz- el texto se centra en la tecnología Edge-Lit.

Por ello, se ha expuesto el marco teórico de dicha tecnología mediante un análisis cualitativo, para facilitar al lector la comprensión del funcionamiento de este tipo de sistemas. A partir de este marco teórico, se ha desarrollado un prototipo, convenientemente documentado.

La construcción de dicho prototipo se ha documentado mediante numerosos ensayos y pruebas, mediante diagramas, fotografías e incluso medidas cuantitativas de la luminosidad; con el objetivo de arrojar luz acerca de la problemática durante la construcción de estos prototipos y de buscar la mejor solución.

Como ya se ha mencionado, las aplicaciones de la iluminación por luz guiada no se limitan a la tecnología de pantallas. Por ello, se ha creído conveniente explicar otras aplicaciones importantes de la tecnología Edge-Lit, también acompañadas de prototipos sencillos.

En conclusión, el objetivo global del texto es contextualizar los sistemas de retroiluminación actuales, para analizar sus vertientes más sofisticadas y caracterizar su enorme impacto en los dispositivos de consumo.

## 2. Estado del Arte

La tendencia del sector tecnológico por la miniaturización, sumada a unos consumidores que cada vez valoran más la estética en el diseño [2] -entre otros factores- han influido enormemente en el vertiginoso avance y extensión de la electrónica de consumo de uso cotidiano y casi ubicuo.

Este cambio ha afectado de manera radical a numerosas disciplinas relacionadas con la tecnología, desde la economía hasta la ciencia de materiales; y por supuesto, a la electrónica en todas sus vertientes. Es decir, cada etapa de producción de dispositivos de consumo se ha adaptado, en cierta medida, a la era de la información. La retroiluminación de pantallas no es en modo alguno una excepción, ya que su diversidad y complejidad tecnológica han proliferado notablemente los últimos años.

El conjunto de técnicas actuales de retroiluminación merece, por tanto, un análisis detallado. Sin embargo, no existe un consenso para caracterizar la calidad de estos sistemas de forma cuantitativa. Por tanto, se proponen a continuación tres parámetros que permitan describir dichos sistemas con cierto detalle:

1. **Consumo energético** en función del tamaño de pantalla.
2. Factores que influyen en el **diseño** y la experiencia del consumidor (Brillo máximo, uniformidad, tamaño requerido, confort visual, etc.)
3. **Viabilidad económica** (Costes de los materiales, vida útil, etc.)

El objetivo final de este capítulo es contar la historia reciente de la tecnología de retroiluminación, destacando las técnicas que más se adaptan al mercado actual y su impacto en la evolución de los productos tecnológicos de consumo. Para ello se presentarán las cuatro tecnologías de retroiluminación más utilizadas recientemente: CCFL, Full-array, Edge-Lit y OLED; cada una acompañada por dos ejemplos de productos de consumo con dichas tecnologías integradas: un teléfono móvil y un televisor de 65 pulgadas. Presentaremos sus especificaciones, de acuerdo a los tres parámetros antes mencionados:

- **Dimensiones** totales del producto (alto x ancho x grueso) expresadas en centímetros.
- **Precio** en el momento de salida al mercado en Euros.
- **Relación de contraste** real (no teórica), o relación entre el blanco y el negro de la pantalla.
- **Consumo** energético expresado en Vatios. Se ha calculado el consumo de las baterías telefónicas suponiendo un valor estándar de 3,7 V.
- **Relación** porcentual de áreas de la **pantalla** y la superficie frontal total del **dispositivo**.

## 2. 1 Retroiluminación CCFL

La tecnología de retroiluminación CCFL<sup>2</sup> ha sido una de las técnicas más utilizadas a lo largo de las últimas décadas. Sin embargo, el auge de la tecnología LED desplazó el cátodo frío a un segundo plano, hasta apartarlo del mercado. Sin embargo, puede utilizarse como un ejemplo muy ilustrativo, al compararlo con sus sucesores.

Esta tecnología consiste, esencialmente, en introducir luz fluorescente tras los pixels, junto con una serie de difusores que uniformizan su luz. Pese a su simpleza, este sistema presenta sustanciales inconvenientes frente a la tecnología LED.

Las lámparas fluorescentes requieren gran potencia y espacio, por lo que se traduce en un consumo más alto y una carcasa notablemente más gruesa. Pese a su bajo precio, la vida útil de las lámparas fluorescentes es significativamente menor que la de los diodos LED.

Para ilustrar la técnica CCFL hemos escogido dos productos de consumo ya descatalogados, aunque de alta gama en el momento de salida al mercado: la televisión **Samsung LN65B650** (2009) y el teléfono **HTC Magic** (2009).

---

<sup>2</sup> Luz Fluorescente de Cátodo Frío o Cold Cathode Fluorescent Light.



Tabla 1: Dispositivos CCFL

	DIMENSIONES	PRECIO	RELACION DE CONTRASTE	CONSUMO	RELACIÓN PANTALLA/ CUERPO
<b>LN65B650 65" 2009 [3]</b>	155,9 x 94,5 x 10,6 cm	≈ 4900 €	3000:1	350 W (N/D para consumo en standby)	80 %
<b>HTC Magic 3.2" 2009 [4]</b>	11,3 x 5,5 x 1,37 cm	≈ 430 €	1500:1	664 mW	48 %

## 2.2 Retroiluminación Directa o Full-Array

Se trata del sistema de retroiluminación LED más sencillo, y uno de los más utilizados a lo largo de los últimos años: la retroiluminación directa o full-array. Se trata de una distribución ordenada de LEDs luminosos a lo largo de toda la superficie trasera de la pantalla.

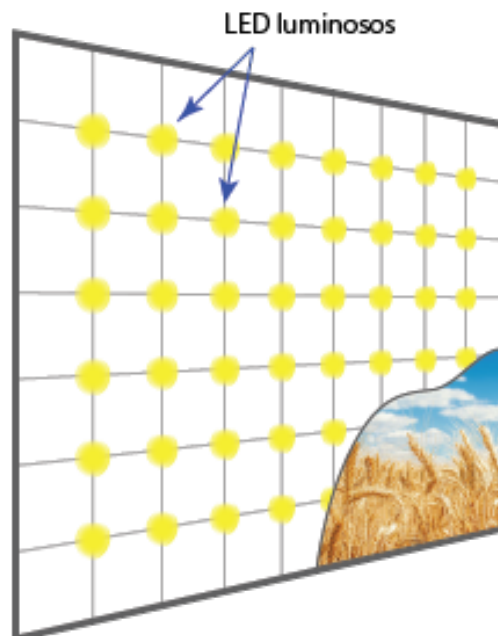


Figura 1: Disposición de LEDs en un sistema Full-Array

Tanto el consumo como el espacio requerido por los LED es significativamente menor, lo cual implica dispositivos más finos y más eficientes. Presenta, también, una luz uniforme, luminosa y agradable a la vista a un precio asequible y sin complicaciones de diseño. Además, la vida útil de los LED es notablemente mayor que la de las lámparas CCFL.

Es evidente que la tecnología LED supuso un gran paso hacia delante en retroiluminación. No obstante, la constante búsqueda de reducción de tamaño y elegancia del diseño por parte de los productores ha provocado que sea cada vez menos utilizada, especialmente en pequeños dispositivos. Sin embargo, cabe destacar que existe una variante más sofisticada: la Retroiluminación Directa de Atenuación Selectiva, o FALD<sup>3</sup>.

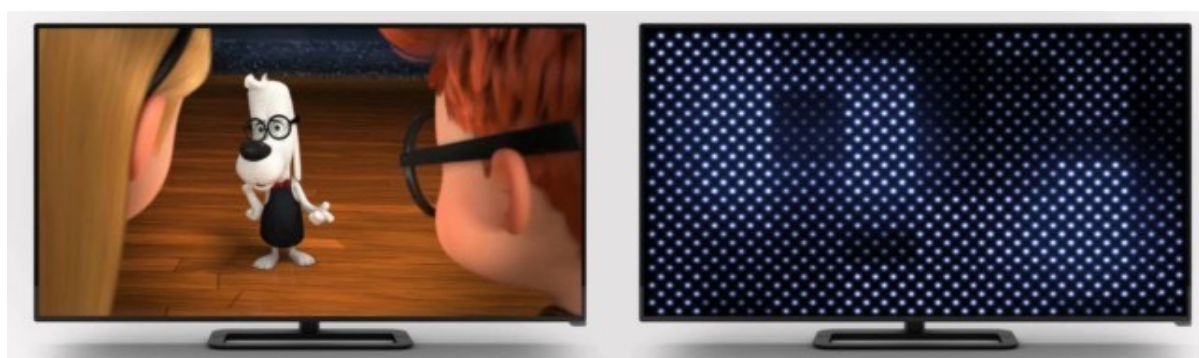


Figura 2: Ejemplo de funcionamiento de un sistema FALD. Fuente: 4K.com

La tecnología FALD se basa en una matriz full-array cuya intensidad varía automáticamente, dependiendo de la información retransmitida en cada sección de la pantalla. Como resultado, se obtiene un sistema de retroiluminación que potencia en gran medida el contraste y el color de la imagen [5], logrando, por tanto, uno de los grandes objetivos de los fabricantes de dispositivos de consumo: la obtención del negro absoluto.

Dos de los dispositivos que utilizan la tecnología full-array son el televisor **Sony Z9D** (2016) y el **iPhone 4 de Apple** (2010), cuyas especificaciones se muestran en la Tabla 2.

---

<sup>3</sup> Del inglés Full Array Local Dimming.

Tabla 2: Dispositivos Full-Array

	DIMENSIONES	PRECIO	RELACION DE CONTRASTE	CONSUMO	RELACIÓN PANTALLA/ CUERPO
<b>Sony Z9D 65" 2016 [6]</b>	146,2 x 84,7 x 7,8 cm	≈ 3500 €	7976:1 (Con tecnología FALD)	322 W (0,5 W en standby)	93 %
<b>iPhone 4 3,5" 2010 [7]</b>	11,52 x 5,86 x 0,93 cm	599 €	2016 :1	584 mW	50 %

Una primera lectura de la tabla, evidencia el impacto de la irrupción de los LED en tecnología de pantallas. Puede observarse una notable mejora de todos los parámetros estudiados con respecto a la tecnología CCFL.

## 2.3 Retroiluminación desde los Bordes o Edge-Lit

En la tecnología Edge-Lit<sup>4</sup> los LED luminosos sólo se encuentran al borde -a veces en la esquina- de la pantalla (Fig. 3), fuera del rango visual del usuario. A través de guías de luz, se consigue una propagación uniforme a lo largo de toda la superficie de la pantalla.

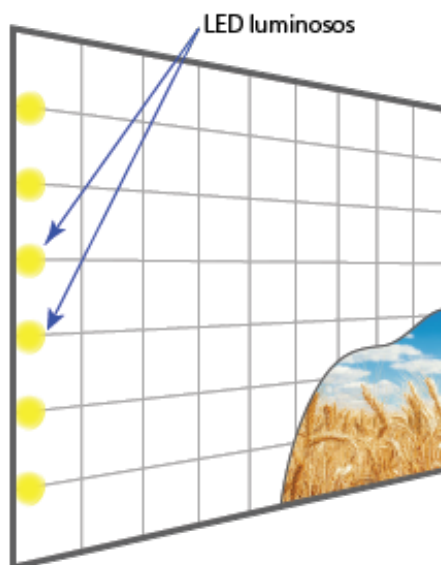


Figura 3: Disposición de LEDs en un sistema Edge-Lit

<sup>4</sup> En inglés, "encendido desde el borde"

Se trata de una tecnología madura y muy extendida en la industria actual, y sin duda, una de las más utilizadas en dispositivos móviles, aunque también presenta un uso muy extendido en televisores de gama media.

No existe un método general de implementación para la tecnología edge-lit. Los materiales, grosor y distribución de LEDs varían en función de las necesidades del producto final. (Nótese que el esquema de la Fig. 2 es un ejemplo ilustrativo que en ningún caso se corresponde con un producto de consumo real). Dos ejemplos representativos de esta tecnología son el televisor **Samsung mu8000** (2017) y el teléfono **Sony Xperia Z** (2013).

**Tabla 3: Dispositivos Edge-Lit**

	<b>DIMENSIONES</b>	<b>PRECIO</b>	<b>RELACION DE CONTRASTE</b>	<b>CONSUMO</b>	<b>RELACIÓN PANTALLA/ CUERPO</b>
<b>Samsung mu8000 65" 2017 [8]</b>	144,51 x 83,43 x 5,47 cm	≈ 2200€	6000:1	220 W (0,5 W en standby)	96 %
<b>Sony Xperia Z 5" 2013 [9]</b>	13,9 x 7,1 x 0,79 cm	≈ 620 €	2462:1	615 mW	70 %

## 2.4 Tecnología OLED

Como se ha mencionado en el apartado introductorio, existen otras tecnologías basadas en la utilización de LEDs con luminancia propia, las cuales no requieren retroiluminación. Este tipo de tecnologías se encuentran mayormente en fase de desarrollo. Un ejemplo de implantación en el mercado actual es la tecnología OLED<sup>5</sup>.

Basada en la utilización de diodos LED orgánicos, la tecnología OLED, está siendo implementada a día de hoy en numerosos productos de consumo. Una tecnología OLED madura permitiría solventar el problema de la retroiluminación, además de mejorar enormemente el rendimiento de las pantallas actuales. Sin embargo, los productos que la

<sup>5</sup> Del inglés *Organic Light Emitter Diode*.

incorporan pueden presentar serios problemas que suponen actualmente un gran coste a los fabricantes [10].

- **Corto tiempo de vida:** Los OLED azules -a diferencia de los rojos y verdes- tienen un tiempo de vida sustancialmente más corto que los LED corrientes (14000 horas frente a 60000 horas respectivamente).

- **Elevado coste de producción:** La escasa madurez de la tecnología implica una gran inversión en desarrollo e investigación, por lo que presentan una gran dificultad de producción a gran escala. En consecuencia, esta tecnología está reservada a productos de gama alta, debido al elevado coste de implantación.

- **Daños en dispositivos:** Existen numerosos defectos inesperados a largo plazo en las pantallas OLED. Uno de ellos es el fenómeno conocido como Burn-in. Se trata de la retención permanente de imágenes no deseadas. Varios fabricantes como Apple [11], han reconocido públicamente que este fenómeno está presente en sus dispositivos OLED.

Pese a estos problemas -y pese al alto precio-, los consumidores se ven enormemente atraídos por su alta resolución, viveza de color y confort visual que brinda la tecnología OLED. Por ello, varios de los dispositivos más destacados del mercado actual cuentan con ella. Dos importantes ejemplos son el **iPhone X de Apple** (2017) y el televisor **LG EF9500 Series** (2017).

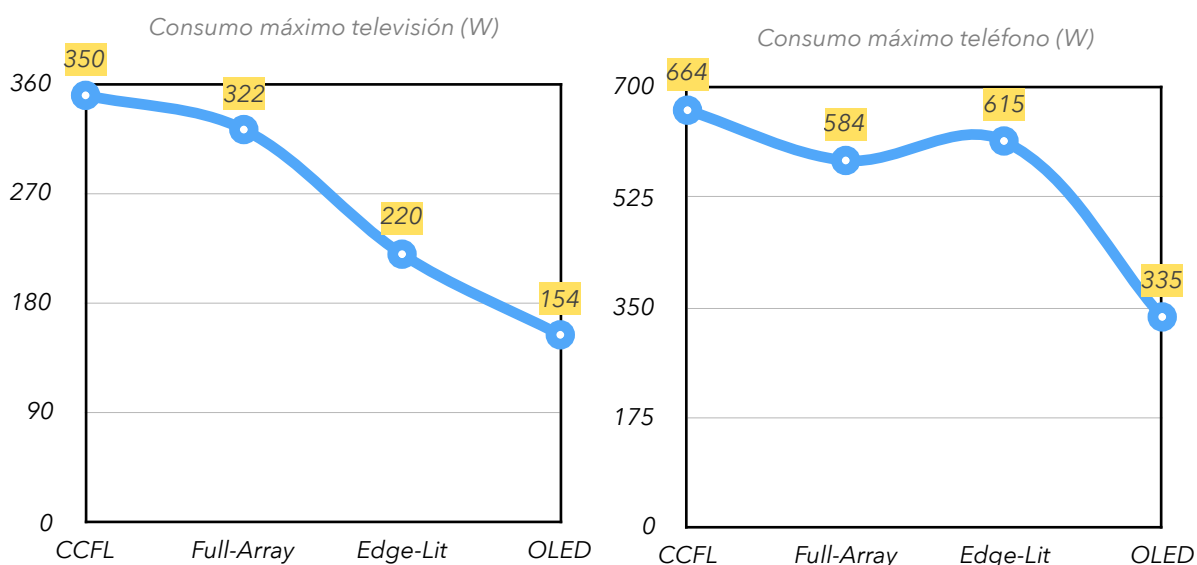
**Tabla 4: Dispositivos OLED**

	<b>DIMENSIONES</b>	<b>PRECIO</b>	<b>RELACION DE CONTRASTE</b>	<b>CONSUMO</b>	<b>RELACIÓN PANTALLA/ CUERPO</b>
<b>LG OLED 65" 2017 [12]</b>	146,1 X 89,2 X 6,8 cm (Grosor de 4,8mm en su punto más fino)	≈ 5700 €	Teóricamente infinito (Sin datos del contraste real)	154W (0,3 W en standby)	99 %
<b>iPhone X 5,8" 2017 [13]</b>	14,36 x 7,09 x 0,77 cm	≈ 1159 €	5013:1	335 mW	83 %

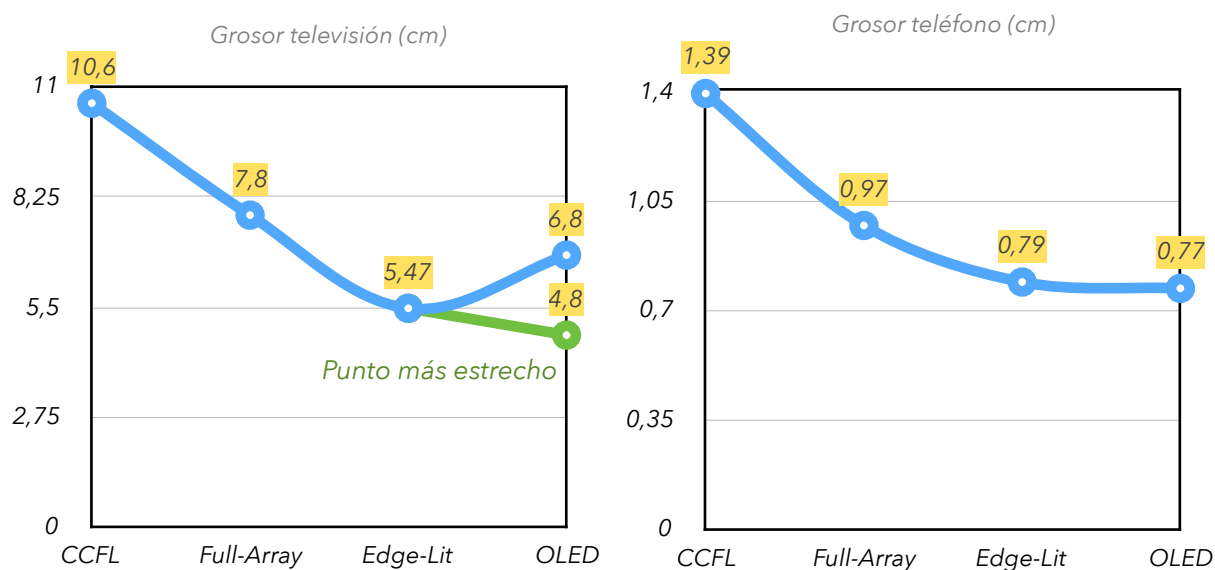
## 2. 5 Contraste y Análisis de los Datos Obtenidos

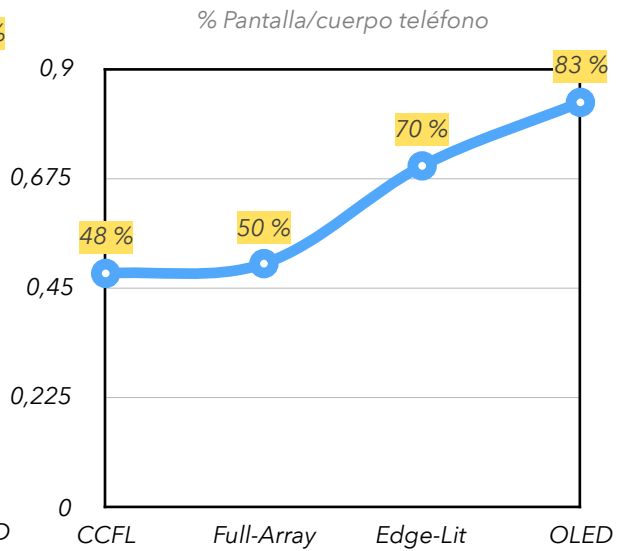
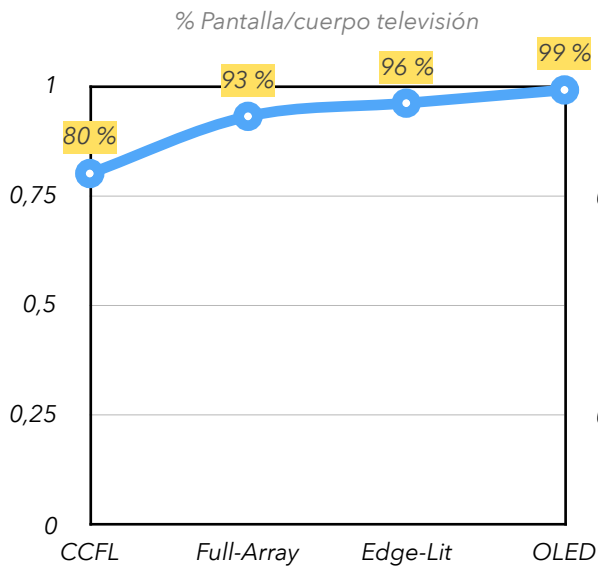
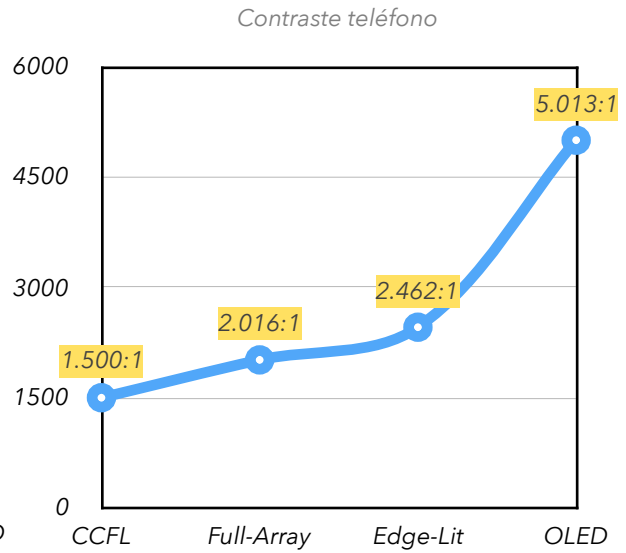
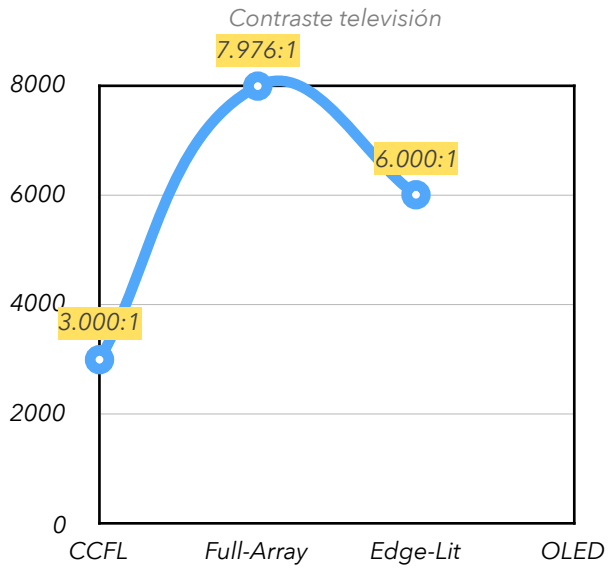
El objetivo de este estado del arte, además de recoger todas las grandes técnicas de iluminación del mercado, es realizar una comparativa precisa y rigurosa entre ellas. Mediante las siguientes gráficas se pretenden evidenciar las ventajas y desventajas de todos los tipos de tecnología estudiados. Para ello, se presentará a continuación la evolución de todos los parámetros estudiados a lo largo del tiempo, divididos en tres grandes grupos (consumo energético, diseño y viabilidad económica).

### 2.5.1 Contraste del Consumo Energético

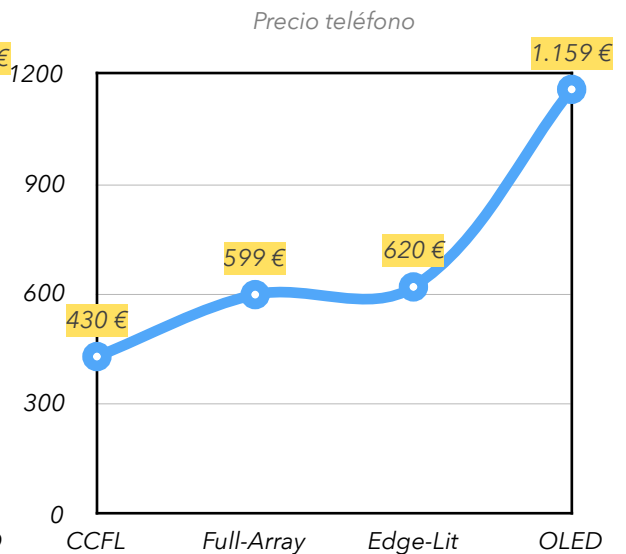
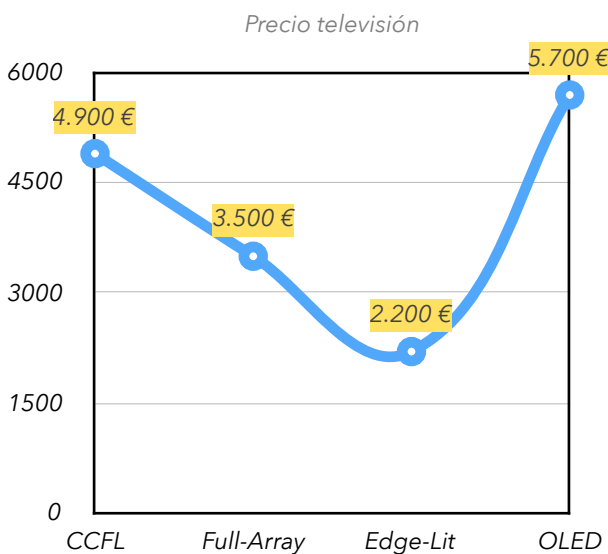


### 2.5.2 Contraste del Diseño: Grosor, Pantalla/Cuerpo y contraste





### 2.5.3 Contraste de la Viabilidad Económica



### 2.5.4 Análisis de los Datos

Tras observar los datos confrontados, es sencillo deducir qué parámetros se ven afectados de manera significativa por el cambio tecnológico, y cuáles no.

- El **grosor** de los dispositivos se ve notablemente reducido en tecnologías más modernas.
- La **relación de contraste** se ve significativamente afectada, siendo cada vez más alta.
- Las diferentes técnicas de retroiluminación son cada vez más complejas, aunque el **precio** de fabricación varía en función del producto. En cuanto a los televisores, el precio cae con el tiempo, debido a que el avance tecnológico ha permitido que un televisor de 65 pulgadas ya no sea un producto de lujo. Sin embargo, en cuanto a los teléfonos móviles, se observa un ligero aumento con el tiempo. En cuanto a la tecnología OLED, irrumpe con un precio muy alto en ambos productos.
- El **consumo energético** se reduce con tecnologías más modernas. Se observa un repunte de consumo en los teléfonos edge-lit, que contradice todo lo que se venía diciendo. Sin embargo, podemos atribuir este pico de consumo a un significativo aumento del tamaño de las pantallas (de 3,5" a 5,0")
- A través del parámetro de relación **pantalla/cuerpo** podemos observar cómo las posibilidades de diseño aumentan con el avance tecnológico.

A pesar de estos resultados, es fundamental tener en cuenta que el impacto tecnológico observado en los anteriores parámetros no es únicamente resultado de el avance de las técnicas de retroiluminación, sino del avance de la producción tecnológica en conjunto.



## 2.6 Conclusiones

Tras analizar toda la información recabada, se ha realizado una tabla comparativa de todas las tecnologías estudiadas. Nótese que se han destacado en verde y rojo a las mejores y peores tecnologías en cada parámetro de estudio. Al final, se incluyen dos columnas con las mayores ventajas y desventajas de cada una.

**Tabla 5: Comparación de las Diferentes Tecnologías**

	CONSUMO	CALIDAD DE IMÁGEN	ESPACIO REQUERIDO	MERCADO	IMPLEMENTACIÓN	MAYOR VENTAJA	MAYOR DESVENTAJA
<b>CCFL</b>	El Más Alto	Bajo Contraste. Negro De Mala Calidad.	El Más Grande	En Desuso	En Desuso	En Desuso	En Desuso
<b>FULL-ARRAY</b>	Alto	Puede Lograr Un Gran Contraste Mediante Tecnología F.A.L.D.	Medio	El Más Asequible	La Más Sencilla	Sencillo diseño e implementación	Gran espacio requerido y alto consumo.
<b>EDGE-LIT</b>	Bajo	Excelente Contraste U Gran Riqueza De Colores	Pequeño	Asequible	Compleja	Poco espacio requerido y grandes posibilidades de diseño a un precio asequible y un bajo consumo.	Complejidad de diseño
<b>OLED</b>	El Más Bajo	Óptima. Miles De Millones De Colores Y Negro Absoluto.	El Más Pequeño	Coste Extremadamente Alto. Graves Dificultades Para Fabricar En Serie. Reservado A Productos De Alta Gama.	La Más Compleja	Mejor calidad de imagen, menor consumo, y más posibilidades de diseño.	Tecnología poco madura y plagada de errores. Grandes dificultades para comercialización. Coste muy alto.

En primer lugar, la obsoleta retroiluminación CCFL ha demostrado ser altamente ineficiente comparada con sus sucesoras, pese a su sencillez y su bajo coste. Obviamente, no es viable en el actual mercado tecnológico.

A continuación, la tecnología Full-Array ha destacado por su fácil implementación. Además, mediante una atenuación selectiva FALD, es posible obtener un excelente contraste. Sin embargo, el espacio ocupado por las matrices de LEDs full array hace imposible satisfacer las necesidades de diseño buscadas por los consumidores, especialmente en telefonía móvil. Por ello, se queda lejos de ser la propuesta ideal.

En cuanto a las pantallas OLED, satisfacen con creces las necesidades de diseño, tamaño y consumo. Sin embargo, se trata de una tecnología sumamente joven y su precio es significativamente mayor que el de dispositivos Edge-Lit de análogas características. Ciertamente, la tecnología OLED tiene grandes posibilidades de convertirse en más utilizada en el mercado de los próximos años. Sin embargo, de momento no es la mejor opción para productos de consumo.

Finalmente, la retroiluminación edge-lit ha demostrado ser sobradamente competente en todos los factores de estudio: Buena relación de contraste, pequeño tamaño que permite innovar en diseño, gran madurez y precio asequible. Además, se trata de una tecnología especialmente conveniente para uso en telefonía móvil y dispositivos portátiles. Estas razones nos llevan a concluir que esta tecnología es la que mejor se ajusta al mercado actual, y por ello será estudiada en más profundidad a lo largo del siguiente capítulo.

### 3. Caracterización de la Tecnología Edge-Lit

Como se ha explicado en el apartado de estado del arte (Pág. 3), la tecnología Edge-Lit tiene como objetivo iluminar una pantalla de forma uniforme, disponiendo de LEDs luminosos únicamente en los bordes.

El fundamento de esta tecnología es cubrir toda la superficie trasera de la pantalla LED con un sistema LGP<sup>6</sup>, o guía de luz plana, y extraer controladamente la luz confinada en esta. No obstante, es frecuente encontrar muchas más capas acompañando a la LGP, aunque sólo dos indispensables para lograr la retroiluminación: los difusores y los reflectores.

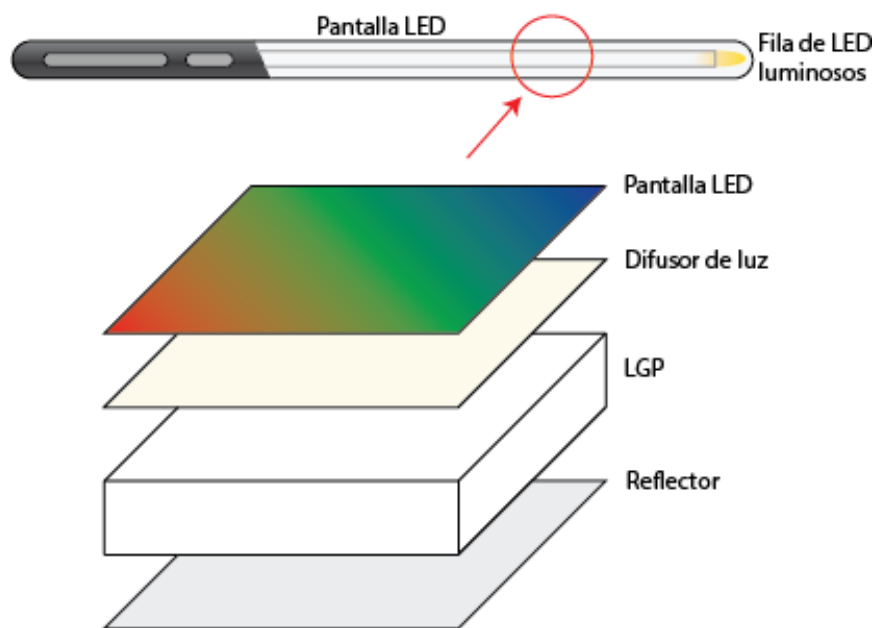


Figura 4: Capas de un sistema Edge-Lit.

Por tanto, una forma eficaz de abordar esta tecnología es el estudio capa a capa, lo cual nos dará una idea general acerca del camino de la luz desde la fuente LED hasta la formación de un plano luminoso.

<sup>6</sup> Del inglés *Light Guide Plate*.

## 3.1 LGP

Podemos definir un LGP como un plano de transmisión guiada de luz que confina los haces luminosos mediante el fenómeno de reflexión total interna -o RTI-. Son numerosos los materiales que pueden utilizarse como LGP. Sin embargo, en tecnología de pantallas el polimetilmetacrilato o PMMA es el más extendido.

Resulta paradójico que un medio de confinación sea útil por “dejar escapar” la luz. Por ello, para ilustrar este contradictorio caso presentamos la siguiente figura, en la que se muestra la incidencia de un haz de luz a la entrada de una LGP. Supondremos un sistema perfectamente adaptado, y reflexiones totales en las paredes de la guía.

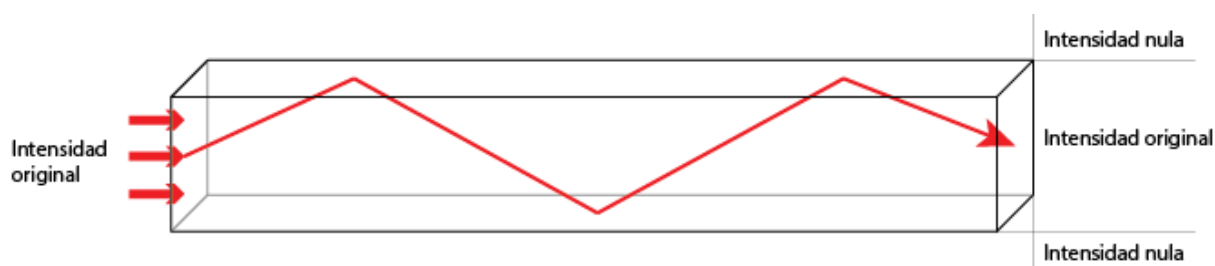


Figura 5: LGP ideal en reflexión total.

Observamos como en un caso ideal, la luminosidad medida fuera de los confines de la LGP es nula, y por lo tanto inútil para nuestro objetivo. Entonces, si no se puede atribuir una luminancia externa a las pérdidas intrínsecas del material, ¿Por qué estos materiales funcionan en la práctica como planos luminosos?

Los fabricantes de productos de consumo, se percataron de que podían controlar la luminosidad de un plano LGP introduciendo irregularidades<sup>7</sup> de forma deliberada, y variando su concentración y forma a lo largo de toda su superficie. Cuando una onda luminosa se encuentra una irregularidad en el interior de la LGP se interrumpe el fenómeno de reflexión total, dando lugar a una extracción de luz al exterior, debido a que dichas paredes cuentan con una gran transparencia [14].

---

<sup>7</sup> Se entiende irregularidad como cualquier variación de la LGP que interrumpa el fenómeno de reflexión total.

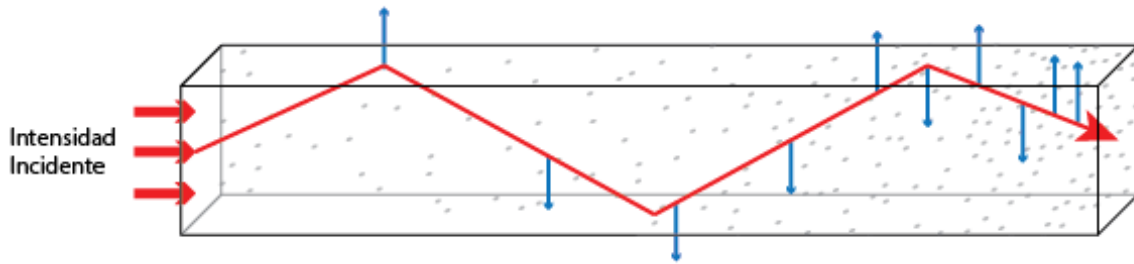


Figura 6: LGP con irregularidades. Interrupción de la reflexión total.

Por el momento, consideraremos estas irregularidades como elementos puntuales e informes. Como es evidente, la densidad de irregularidades es inversamente proporcional a la intensidad de la luz guiada en un punto determinado. Por ello, se ha representado una creciente densidad de puntos en la anterior figura.

## 3.2 Reflectores y Difusores de Luz

Si bien una pantalla LED Edge-Lit cuenta con numerosas capas (polarizadores, filtros de color, etc.), son solamente dos las necesarias para garantizar una retroiluminación uniforme: Una capa reflectora trasera y otra difusora delantera.

En la figura 6 se ha representado la dispersión de luz sólo en una sola dirección - perpendicular a la pantalla- aunque debe tenerse en cuenta que las pérdidas se propagan en todas las direcciones. La colocación de una capa reflectora en la pared inferior de la LGP cumple la simple función de reflejar todos los haces de luz hacia la mirada del usuario<sup>8</sup>.

Mediante la deposición de películas delgadas de plata sobre un material plástico se consigue un índice de reflexión del 96%, aunque en productos de consumo son más comunes los reflectores de capas múltiples. Mediante esta técnica se consiguen índices de refracción de en torno al 98% además de una mejor estabilidad en el color [15].

<sup>8</sup> En productos de consumo actuales se incluyen más capas -por ejemplo, polarizadores- que corrigen aún más la dirección de la luz

No obstante, estas pequeñas irregularidades siguen siendo distinguibles a simple vista. Por ello, es necesario un elemento difusor de luz, que disperse los haces provenientes del LGP, y los convierta en un foco plano y uniforme. En resumen, el camino recorrido por la luz al entrar en un sistema Edge-Lit cuenta con los siguientes pasos:

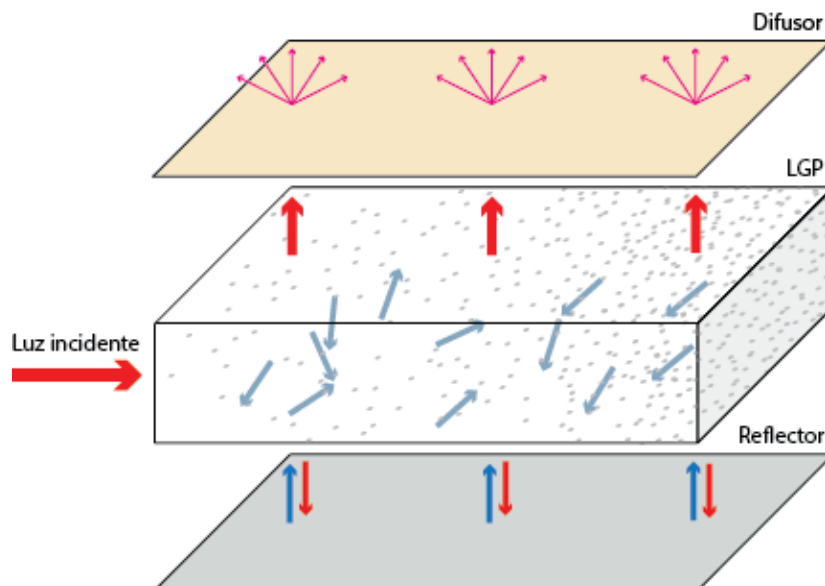


Figura 7: Recorrido de la luz por las capas de la LGP.

1. Un haz de luz incide sobre la LGP, dónde se confina y transporta sin pérdidas de energía hasta encontrar numerosas irregularidades en el camino.
2. Estas irregularidades provocan la dispersión del haz en todas las direcciones.
3. Los haces dispersados en la dirección de la pantalla se irradian al exterior. Aquellos con una dirección inconveniente son reflejados en la capa inferior, y devueltos hacia la pantalla.
4. Los puntos de luz se difuminan en una capa superior creando una luz uniforme.

## 4. Desarrollo y Pruebas

### Nota

Todas las fotografías presentadas a lo largo de este capítulo y en adelante han sido tomadas bajo idénticas condiciones de luz y configuración de cámara (ligera subexposición) salvo que se indique lo contrario.

Tras haber realizado un análisis cualitativo, gracias al cual se han aclarado conceptos básicos acerca del funcionamiento de una LGP, es conveniente profundizar en los fundamentos teóricos de dicha tecnología. No obstante, el conjunto de técnicas que componen la tecnología Edge-Lit es diverso y complejo. Por ello, hemos decidido resumir en 3 partes todo el proceso de diseño y optimización de un sistema de retroiluminación por LGP: Distribución de los LEDs, Distribución de Irregularidades y Difusor Delantero y Reflector Trasero.

Además, para facilitar aún más la comprensión de dicho proceso, se ha construido un prototipo de sistema de retroiluminación, documentado paralelamente. De esta manera, se investigarán las posibles soluciones de diseño, para seleccionar la que mejor se ajuste a nuestro proyecto, sirviendo como demostración práctica de la tecnología actual. Dicho prototipo, imitará la disposición de un dispositivo de retroiluminación fabricado en serie, contando con una versión propia de cada capa:

- **LGP** de metacrilato. Dimensiones 210 x 148 x 4 mm.
- **Fuente de luz LED.**
- Lámina de Aluminio, a modo de **reflector trasero.**
- Lámina translúcida, a modo de **difusor delantero.**

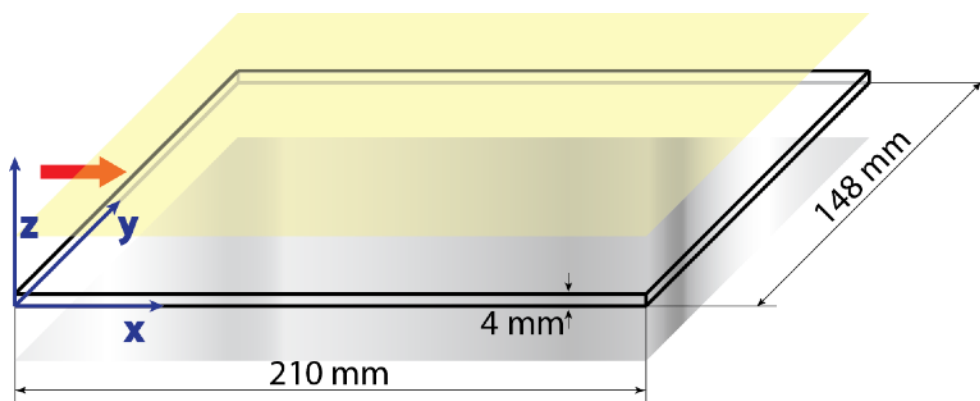


Figura 8: Esquema de diseño del Prototipo

La construcción del prototipo se documentará mediante fotografías tomadas en paralelo al eje z dentro de una cámara oscura, construida a partir de una caja de cartón opaca, cuyas paredes interiores se han pintado de negro mate, que absorba la mayor luminosidad posible e impida rebotes que contaminen las pruebas. Para facilitar la toma de fotografías, se ha realizado un agujero de un tamaño similar al del objetivo de la cámara en la parte superior de la caja. A través de las fotografías, se espera reflejar de forma clara el proceso de diseño y su problemática.

## 4.1 Distribución de los LED

### 4.1.1 Número de LEDs

No existe una fórmula que indique cuántos LED se deben incluir, y menos aún cómo distribuirlos. Sin embargo, es evidente que este parámetro viene muy influido por la eficiencia del diseño. Por ello, es conveniente incorporar el menor número de LEDs posible. Pero, ¿Cuáles son los requerimientos mínimos?

Esta tecnología permite, idealmente, iluminar toda la superficie de una pantalla con una única fuente de luz puntual, por ejemplo, en una esquina. Esto puede funcionar eficazmente en pantallas pequeñas como la de un reloj de pulsera. Sin embargo, no parece la solución idónea para pantallas más grandes como la de un teléfono, y no digamos para la de un televisor.

Cabe destacar que existen actualmente LGPs de alta eficiencia y tamaño medio que funcionan con una única fuente puntual de luz, conocidas como LGP bidireccionales. Es decir, que los patrones de irregularidades se diseñan en 2 dimensiones, para contrarrestar una función de distribución de pérdidas a lo largo del plano XY.

No obstante, la solución más habitual es la colocación de varios LEDs en uno de los bordes de la guía de luz. De esta forma, el diseño de las irregularidades se vuelve mucho más sencillo, ya que se puede considerar una distribución unidireccional. Para ilustrar la confrontación entre ambos modelos, se ha incluido la Fig. 9, incluida en un estudio más extenso [16] acerca de la optimización de LGPs.

Observamos, efectivamente, cómo la distribución de la izquierda decae en 2 direcciones, mientras que la de la derecha sólo lo hace en una. Cabe destacar que en dicho estudio se menciona claramente la mayor complejidad del modelo de un solo LED diagonal.



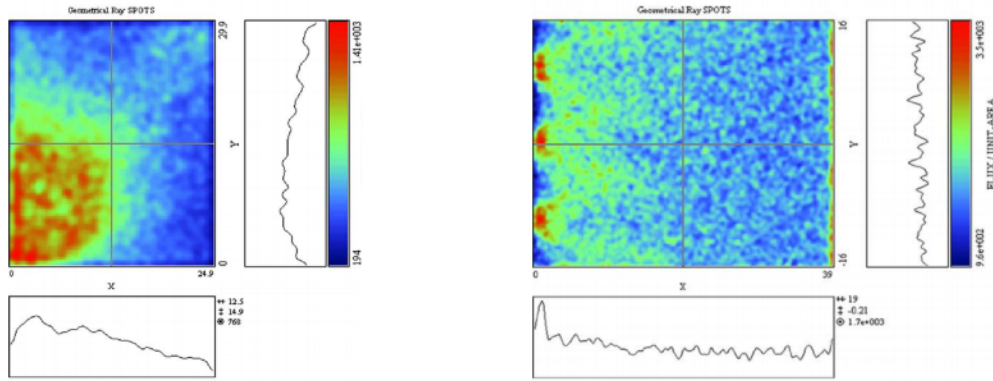


Figura 9: Distribución bidimensional (un solo LED) y unidimensional (LEDs en fila) de luz en LGP.

Fuente: Revista Optical Magazine, vol. 46 no. 4 [16]

#### 4.1.2 Acoplamiento LED-LGP

En general, un acoplamiento deficiente entre guía y fuente de luz es el responsable de la mayor parte de las pérdidas. En muchos casos un acoplamiento directo -sin lentes de por medio- entre los LED y la guía es suficiente. No obstante, Esta conexión se puede optimizar en función de la distancia entre ambos elementos, o más bien, el ángulo de incidencia de los haces en las paredes de la LGP.

A través de leyes elementales de cambio de medio, podemos aproximar un resultado válido para sistemas Edge-Lit sencillos [17]. Suponiendo un haz de luz que propagándose a través de una LGP (plástico) que alcanza la frontera entre esta y el aire, y teniendo en cuenta que los coeficientes de refracción del aire  $n_f=1,00$  y del plástico  $n_i=1,50$ :

Ecuación 1: Ángulo crítico (límite entre reflexión y refracción) a partir de las leyes de Snell.

$$\sin \Phi_c = \frac{n_f}{n_i} = 0,667 \rightarrow \Phi_c \approx 42^\circ$$

Ecuación 2: Pérdidas de Fresnel por reflexión.

$$PF[\%] = 100 \cdot \left( \frac{n_i - n_f}{n_i + n_f} \right)^2 = 4\%$$

Por un lado, el ángulo crítico (Ecuación 1) de incidencia ha de ser mayor que  $42^\circ$  para que se produzca confinamiento de luz. Por otra parte, sabemos que las Pérdidas de Fresnel (Ecuación 2) son de un 4%; es decir, un 4% de la luz se transmitirá, en principio inevitablemente, al exterior. Nótese que las Pérdidas de Fresnel son idénticas en sentido opuesto (Incidencia Aire-Cristal).

Existen numerosas técnicas de guiado de los haces de luz a través de lentes y reflectores auxiliares a un camino óptico, que evitan las Pérdidas de Fresnel y propician la reflexión total de haces, llegando a obtener rendimientos de hasta el 90% [17]. No obstante, para conexiones más sencillas -de calidad suficiente para un gran número de aplicaciones- se recomienda el contacto directo entre fuente de luz y LGP, e incluso la incrustación de los LED. De esta manera, se evitan Pérdidas de Fresnel (no habría cambio de medio a la entrada) y se confinan gran parte de los haces (Véase Fig. 10).

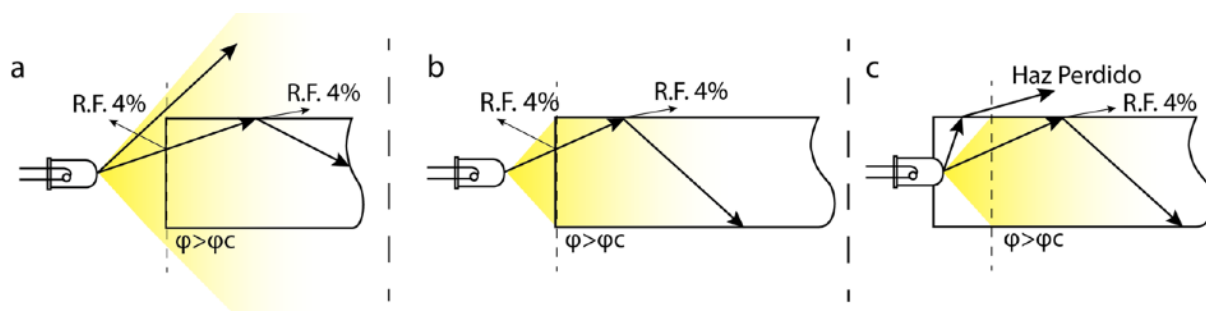


Figura 10: Tres opciones de acoplamiento LED-LGP.

En la Fig. 10 - a se observa un caso realmente ineficiente. En los casos b y c, la eficiencia es óptima. No obstante, en el primero se producirían pequeñas pérdidas de Fresnel mientras que en el segundo se perdería una parte efectiva de la pantalla.

### 4.1.3 Elección para el Prototipo

La mejor opción para nuestro prototipo es la utilización de una **tira de LEDs en contacto directo con el borde de la LGP** de metacrilato, cuyo esquema mostramos en la Fig. 11. El resultado se muestra en la Imagen 1.

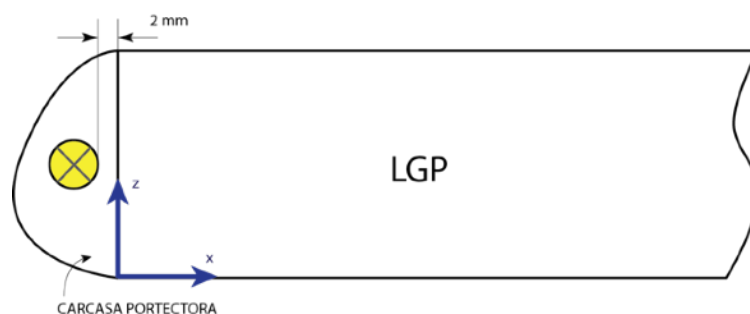


Figura 11: Esquema de acoplamiento LED-LGP en el prototipo.

**Tabla 6: Acoplamiento LED-LGP**

DESVENTAJAS	VENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"><li>• Baja eficiencia, debido al gran número de LEDs -9- para un borde de 5 centímetros.</li><li>• Pérdidas considerables debido a un acoplamiento deficiente</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Alta uniformidad de luz en las proximidades de los LED, debido al gran número de focos.</li><li>• Bajo coste.</li><li>• Implementación sencilla.</li></ul>



*Imagen 1: LGP acoplada a tira de LEDs.*

Es imposible comprobar a simple la calidad del acoplamiento -el cual sabemos que es altamente ineficiente-. No obstante, el prototipo es sobradamente válido debido a la gran luminosidad de los LED. Por otra parte, sí podemos comprobar a simple vista el confinamiento de la luz, ya que toda la superficie de la LGP permanece oscura, a pesar de estar iluminada.

Mediante la observación de este fenómeno comprobamos cómo nuestra placa de metacrilato funciona como guía de luz, ya que la luminosidad procedente de los LED sale al exterior a través de los bordes opuestos.

## 4. 2. Distribución de las Irregularidades

### 4.2.1 Densidad

Por el momento, nos limitaremos a imaginar una distribución informe de irregularidades, pudiendo solamente caracterizarla mediante su densidad. Dicha densidad, debe contrarrestar las pérdidas de luz a lo largo del eje x, ya que consideraremos una distribución unidimensional de acuerdo a lo estudiado en el apartado anterior.

La luz se disipa por causa de numerosos factores (absorción, refracción, dispersión, etc.) que serían complicados de analizar por separado. Por tanto, una forma sencilla y eficaz de calcular las pérdidas de luz es la medida directa, que ha sido objeto de estudio de numerosas investigaciones que concluyen que la luz que se propaga por un medio plástico experimenta una clara atenuación exponencial [18], recogida en la Ecuación 3:

Ecuación 3

$$I = I_0 \cdot e^{-\alpha x}$$

donde  $I_0$  es la intensidad en  $x = 0$  y  $\alpha$  el factor de atenuación. A partir de esta expresión, se propone aumentar de forma inversa la densidad de irregularidades en la LGP, es decir, la función de densidad seguirá una distribución exponencial positiva [18]:

Ecuación 4

$$\rho = K \cdot e^{\beta x}$$

donde  $K$  y  $\beta$  determinan respectivamente la densidad media y el factor de crecimiento de la densidad  $\rho$ .

### 4.2.2 Geometría

Hasta ahora se ha hablado de irregularidades informes, sin embargo, en el diseño de LGPs la geometría de dichas marcas es sumamente importante. Actualmente, prácticamente todos los patrones de irregularidades están formados por puntos de un diámetro micrométrico, distribuidos en los denominados patrones de micropuntos<sup>9</sup>.

---

<sup>9</sup> Del inglés, *micro dot patterns*.

La Ecuación 4 obliga a diseñar una distribución exponencialmente creciente, por lo que se tienen dos opciones: un patrón uniforme de puntos que van aumentando su diámetro a lo largo del eje x (Fig. 12-a) o bien una distribución de puntos de radio fijo que va aumentando su densidad (Fig. 12-b).

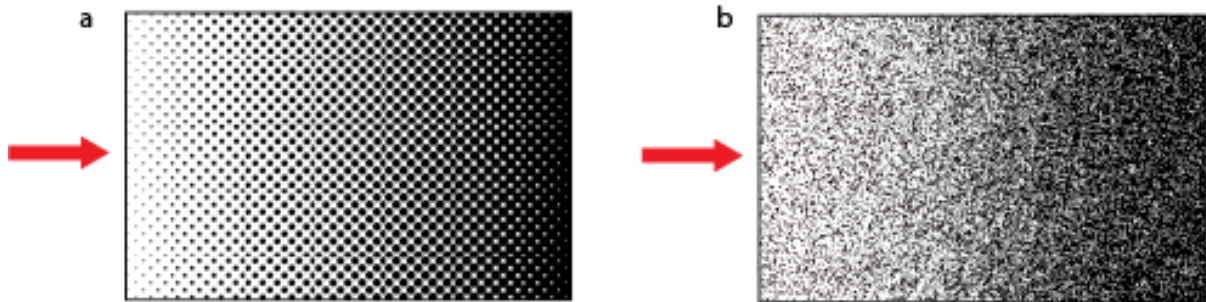


Figura 12: Dos tipos de patrón de micropuntos.

Gracias a la madurez de las diferentes tecnologías de microfabricación, la fijación de los patrones de micropuntos no es una tarea compleja ni costosa. En cualquier caso, presentamos a continuación los más típicos patrones de micropuntos en la industria:

**Tabla 7: Técnicas de Implantación de Patrones**

<p><b>Grabado de muescas en la superficie</b></p>	<p>Micrograbado de muescas en forma de puntos. Realizado mediante técnicas típicas en la fabricación de microchips como el marcado por resina fotosensible.</p>	
<p><b>Impresión de patrones sobre la superficie</b></p>	<p>Similar a la anterior, aunque el patrón se deposita sobre la capa inferior de la LGP.</p>	
<p><b>Patrones uniformes + LGP en rampa</b></p>	<p>Consiste en la fabricación una lámina LGP con su cara inferior inclinada y en dicha cara, estampar un patrón de puntos uniforme. De esta manera, el grosor de la LGP disminuye en puntos más alejados del foco, lo cual aumenta las reflexiones, a priori uniformes. Fabricación más compleja aunque gran rendimiento.</p>	

### 4.2.3 Elección para el prototipo

Debido a la falta de medios para grabar o imprimir un patrón de micropuntos en nuestra LGP, se realizará el grabado manualmente, con ayuda de un punzón muy afilado. Como el grabado de puntos sería un trabajo demasiado costoso, realizaremos una distribución de líneas paralelas al eje  $y$ , de grosor constante y densidad creciente de acuerdo a la Ecuación 4.

Existe una técnica muy extendida en diseño de patrones de irregularidades que consiste en discretizar la distribución de irregularidades en regiones [16]. De esta forma hemos dividido nuestra LGP de 210 mm de largo en secciones de 20 mm (y una de 30 mm) a lo largo del eje  $x$ . Además, hemos ajustado a nuestras posibilidades los parámetros  $K = 1$  y  $\beta = 1/4$  de la Ecuación 4:

Ecuación 5:  $K = 1$  y  $\beta = 1/4$

$$\rho = e^{\frac{x}{4}}$$

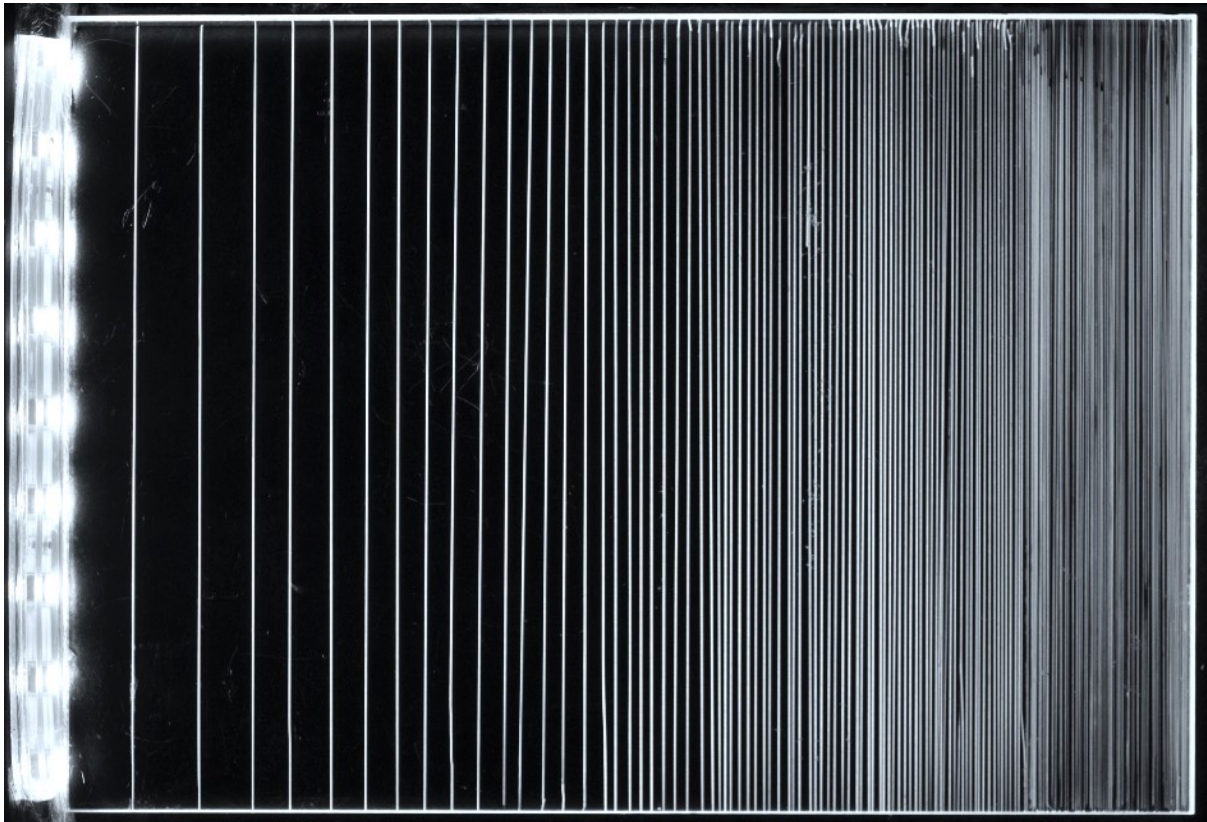
Siguiendo la ecuación 5 y las divisiones preestablecidas, presentamos en la Tabla 8 las densidades de líneas discretizadas para cada región de la LGP. La función de densidad se presentará como número total de líneas en toda la región.

**Tabla 8: Densidad de Irregularidades Discreta**

<b>N° REGIÓN</b>	<b>RANGO (mm)</b>	<b>Densidad (Función 3)</b>	<b>Densidad discretizada</b>
1	0 - 20	1,00	1
1	20 - 40	1,50	2
3	40 - 60	2,23	3
4	60 - 80	3,33	4
5	80 - 100	4,96	5
6	100 - 120	7,39	8
7	120 - 140	11,03	12
8	140 - 160	16,45	17
9	160 - 180	24,54	25
10 (*)	180 - 210	$36,60 \times 1,5 = 54,90$	55

(\*) La última sección se ha considerado de 30 mm, y por tanto los datos de densidad se han multiplicado por 1,5

Finalmente, hemos grabado las líneas en la LGP. Pese a las deficiencias debidas a la inexactitud del proceso manual, queda plasmado de forma evidente el aumento exponencial de la densidad.



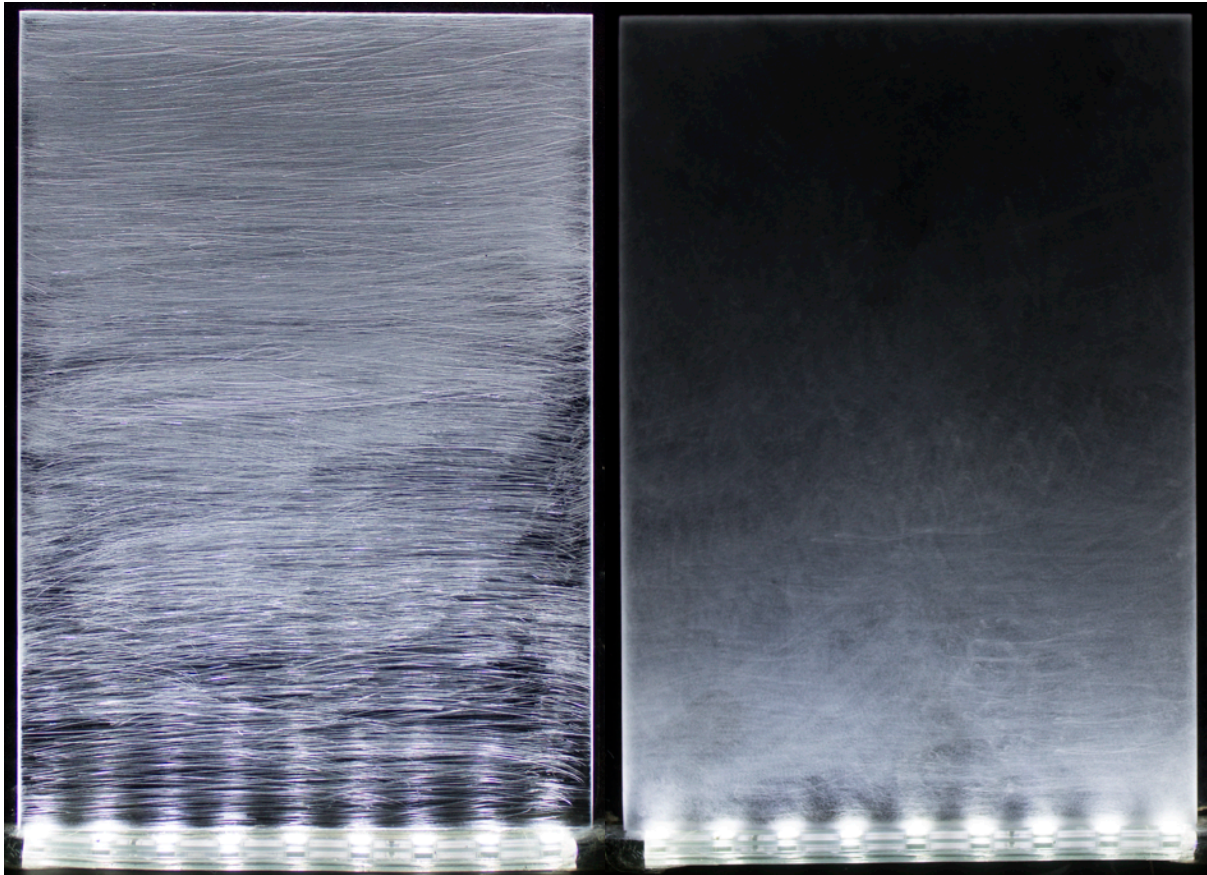
*Imagen 2: LGP con líneas grabadas*

Observamos cómo, efectivamente, la luminosidad va creciendo en puntos alejados de los LED debido a la dispersión de luz. No obstante, la distribución de luz se queda muy lejos de ser uniforme, y parece complicado solucionar este problema con un difusor. Por ello, probaremos otra técnica que nos aporte más uniformidad y luminosidad.

El lijado gradual de la superficie de la LGP parece una solución eficaz en este punto. Lamentablemente, no podemos cuantificar la "cantidad" de lijado. No obstante, podemos realizar una aproximación experimental suficientemente válida. Además, los cálculos de la tabla 8 nos servirán como guía.



Presentamos el resultado en la imagen 3, acompañada de la fotografía (Imagen 4) de otra LGP rayada uniformemente.



*Imagen 3: LGP con rayado progresivo*

*Imagen 4: LGP rayada uniformemente*

Se observa en la Imagen 3 una distribución de luz mucho más potente y difuminada que en la imagen 2. Además, en la Imagen 4 es muy ilustrativa respecto a la atenuación de la luz, y respecto a por qué las irregularidades tienen que aumentar su densidad a medida que se alejan de los LED.

Otra conclusión muy reveladora que se extrae de estas imágenes es la utilidad del lijado como difusor. De hecho, un lijado más fino y controlado nos ahorraría tener que utilizar cualquier tipo de capa difusora.



## 4.3 Difusor Delantero y Reflector Trasero

Si bien es cierto que hasta el momento se han conseguido unos resultados muy positivos, se deben subsanar **dos importantes carencias en el diseño**:

- Se observan muy notoriamente las líneas horizontales y las **marcas del lijado**, dando lugar a graves deficiencias estéticas.
- Las irregularidades introducidas dispersan la luz en todas las direcciones (tal y cómo se ha estudiado en el capítulo tercero: Tecnología Edge-Lit). Es decir, gran parte de la **luz extraída de la LGP está siendo absorbida** por el fondo oscuro.

En definitiva, la adhesión de un difusor delantero y reflector trasero es la solución a estos problemas, tal y cómo se explicará a lo largo de este apartado. Como es evidente, poco hay que añadir acerca de estos dos elementos, ya que su implementación no presenta dificultades técnicas reseñables. No obstante, sí es conveniente comprobar -y documentar- el efecto de ambas capas en nuestro prototipo.

### 4.3.1 Difusor Delantero

Pese al nivel de miniaturización de los patrones de micropuntos presentes en las LGP del mercado actual, muchos prototipos no consiguen proporcionar una luminosidad lo suficientemente homogénea. Al pensar en nuestro prototipo, este problema se magnifica. Aunque únicamente con la LGP se consigue un efecto de uniformidad sobradamente funcional, existen también requerimientos estéticos, que garanticen además el confort visual del usuario.

La solución a este problema es la implementación de una capa difusora frontal, que convierta el patrón de luces en un plano luminoso uniforme y sin imperfecciones. Es importante que dicha capa difusora tenga una gran transmitancia, un grosor muy fino y que mantenga sus propiedades durante largo tiempo (muchos polímeros amarillean). Por ello, los materiales más utilizados para estas capas son polímeros como el poliestireno o el PMMA<sup>10</sup>.

En cualquier caso, situar la lámina en contacto directo con las líneas grabadas no surtiría el efecto deseado, puesto que la densidad de líneas cerca de los LED es sumamente baja y estas seguirían distinguiéndose a simple vista. A priori, el difusor debería guardar cierta distancia con las marcas. Como el grosor es un aspecto importante

---

<sup>10</sup> El PMMA también es el material más utilizado para la fabricación de LGPs

del diseño, situar la lámina en la cara opuesta a las láminas parece la solución más eficaz. Esto, nos da una distancia de 4mm entre el patrón luminoso y el difusor sin tener que aumentar el grosor.

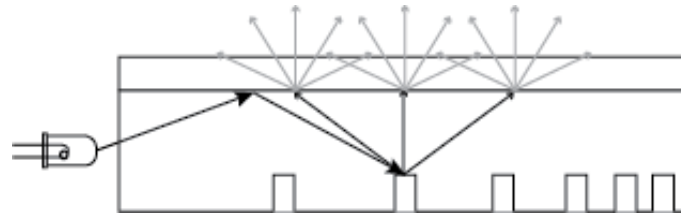


Figura 13: Esquema de acoplamiento LED-LGP en el prototipo.

Nuestro prototipo no requiere materiales duraderos. No obstante, sí es importante encontrar una capa difusora muy translúcida, que no acrecente la alta ineficiencia que el prototipo ya presenta. A nuestro alcance tenemos dos opciones: el **plástico** y el **papel** (3 tipos). Véanse imágenes 5, 6, 7 y 8, comparadas en la tabla 9.

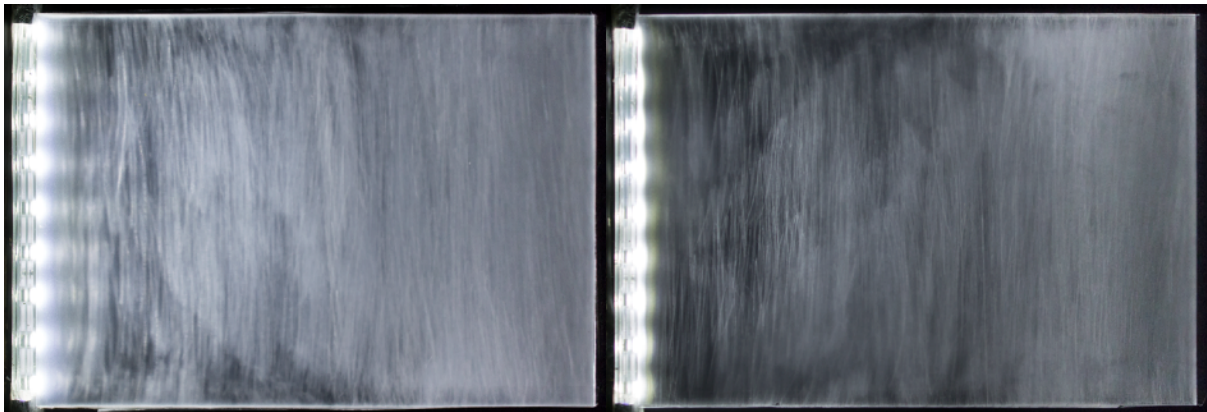


Imagen 5: LGP con difusor de Plástico

Imagen 6: LGP con difusor de Papel Vegetal

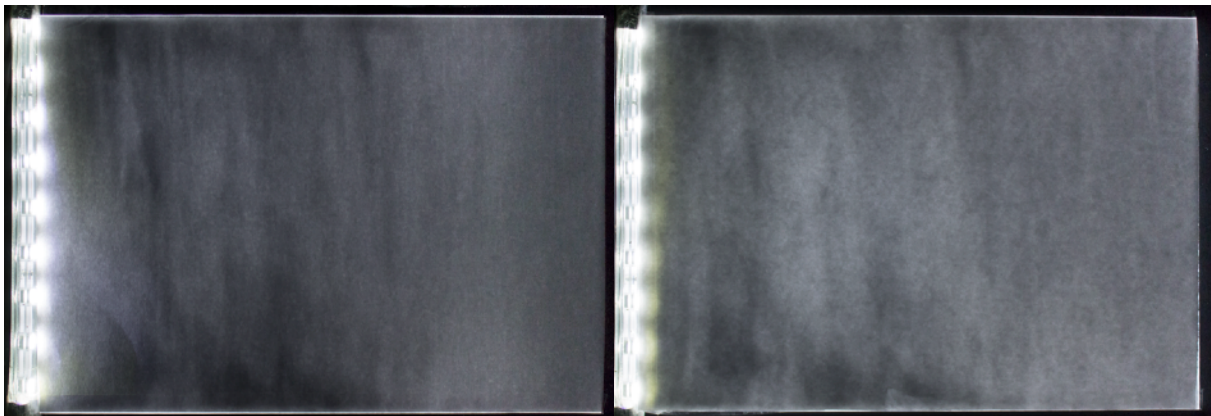


Imagen 7: LGP con difusor de Papel Medio

Imagen 8: LGP con difusor de Papel Fino

**Tabla 9: Comparación de Difusores**

	<b>Transmitancia</b>	<b>Difusión</b>	
<b>Plástico (5)</b>	La más alta	Baja	DESCARTADO
<b>Papel Vegetal (6)</b>	Alta	La más baja	DESCARTADO
<b>Papel Medio (7)</b>	Aceptable	La más alta	
<b>Papel Fino (8)</b>	Aceptable	Alta	

Puede parecer a simple vista que todos los difusores presentan una transmitancia demasiado baja. No obstante, esta sensación de oscuridad se debe a la configuración de la cámara, que debe tomar imágenes intencionadamente oscuras para evitar una sobreexposición de los LED, y visualizar las irregularidades de forma más clara. Por otra parte, al añadir el reflector trasero, la luminosidad aumentará de forma considerable.

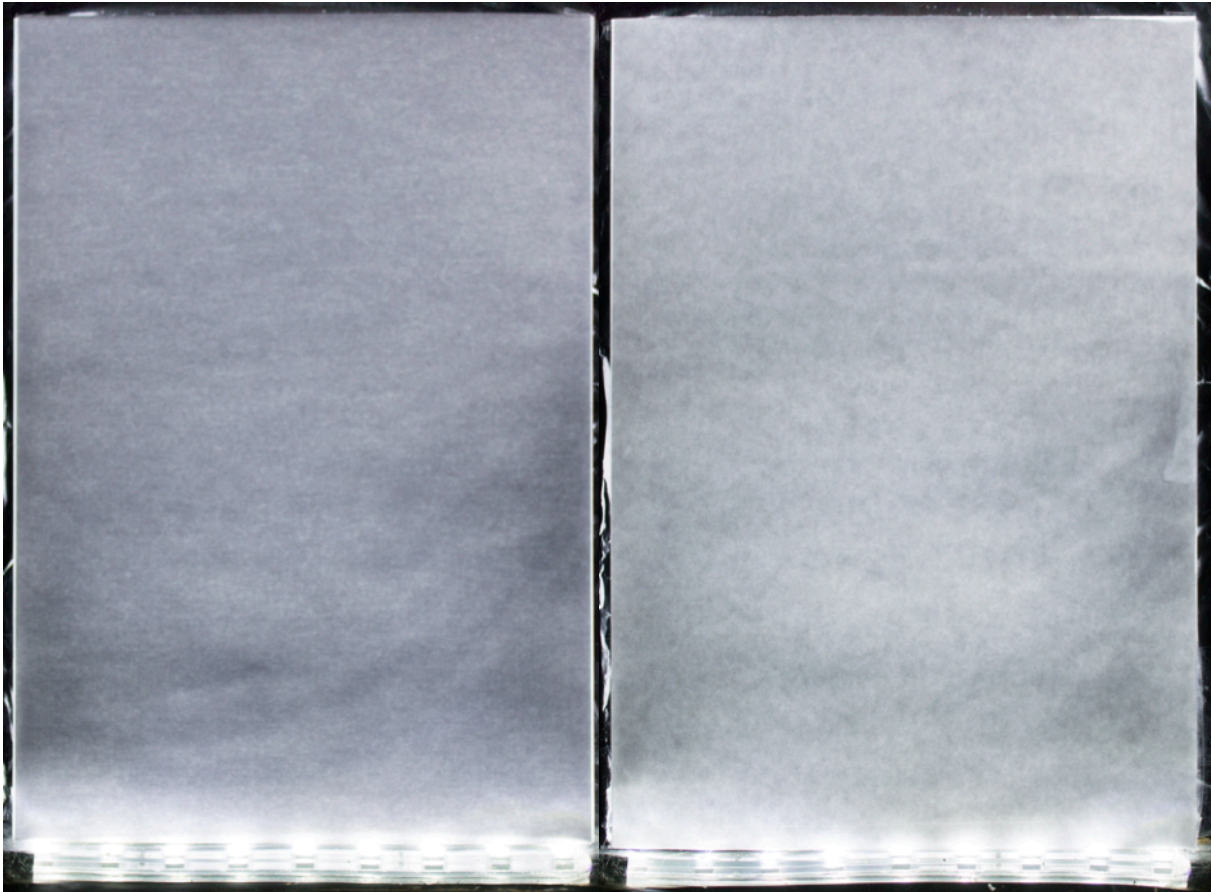
En conclusión, se han descartado los difusores de plástico y papel vegetal por presentar una difusión demasiado baja -Véase en las imágenes 5 y 6 que las líneas se pueden distinguir. Cabe aclarar que las regiones oscuras de las imágenes 7 y 8 no son apreciables a simple vista. Esto puede parecer consecuencia de la baja exposición de la cámara fotográfica. No obstante, cabe preguntarse si el ojo humano puede actuar como difusor.

Efectivamente, numerosos estudios han demostrado que el fondo del ojo humano - es decir, la superficie opuesta a las pupilas, donde se encuentran las células fotosensibles- actúa a menudo como un difusor de alta calidad [19].

#### **4.3.2 Reflector Trasero**

Análogamente con el apartado anterior, podemos considerar un material como buen reflector para una LGP cuando cuenta con una gran reflectancia, un grosor muy fino y propiedades duraderas en el tiempo. En el mercado actual, se suelen implementar capas tanto metálicas (a modo de espejo) o bien plásticas (de color blanco). La reflectividad típica es de entorno al 98% y el grosor de unos 0,2 mm [15]. Actualmente, se aprovecha la funcionalidad de estas capas para otras tareas como mejorar la directividad de la luz de las pantallas, más allá de su función principal.

Afortunadamente, numerosos productos de uso cotidiano cumplen sorprendentemente bien la función de un reflector trasero de un sistema Edge-Lit. A nuestra disposición contamos una capa reflectora metálica (papel de aluminio de uso comercial reflectividad  $\approx 90\%$ , grosor 0,2 mm). Esta ha sido colocada en la capa anterior de la LGP, en contacto directo con las líneas. Véanse imágenes 9 y 10.



*Imagen 9: Papel Medio con Reflector trasero*

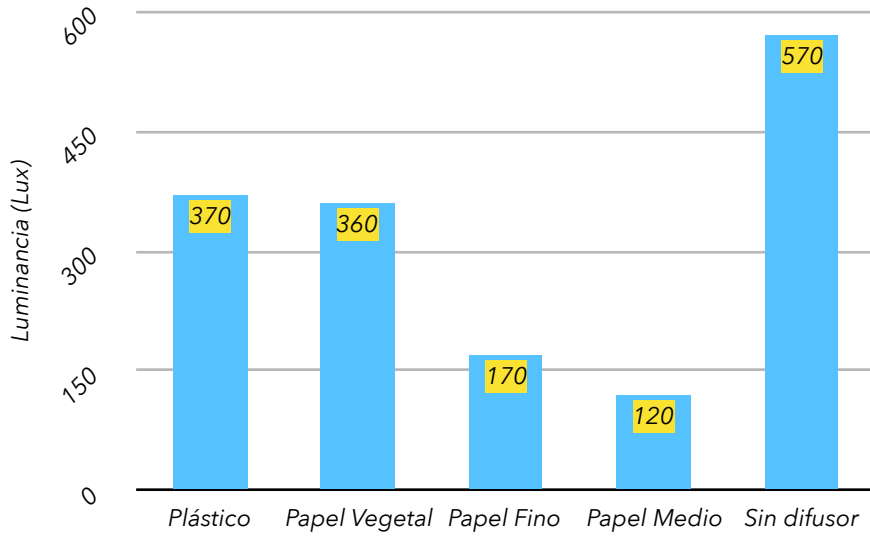
*Imagen 10: Papel Fino con Reflector trasero*

El aumento de luminosidad es evidente. Recordemos que las condiciones de luz y de la cámara han permanecido intactas. Cabe destacar, además, que la luminosidad a simple vista es mucho más intensa. Sin embargo, la luminosidad proporcionada por el difusor de papel fino es notablemente más luminoso. Por ello, es la mejor opción para nuestro prototipo.

## 4.4 Medidas de Luz

Se ha podido escoger la mejor opción a simple vista. No obstante, es conveniente ilustrar con medidas exactas que corroboren nuestra decisión. Una buena solución para estas medidas es la utilización de un luxómetro direccional (sensibilidad de 1 lux).

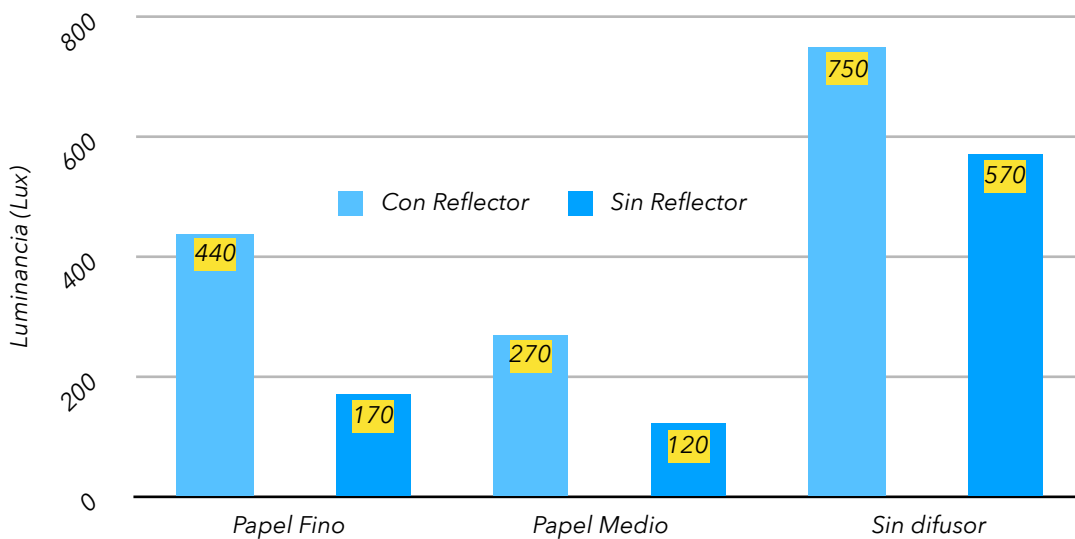
Fig. 14: Comparación difusores



En primer lugar, presentamos una comparación (Fig. 14) de la transmitancia de las diferentes capas difusoras. Para ello, se ha medido la luminancia en varios puntos de la superficie de la LGP, presentando una media redondeada a dos cifras. Efectivamente, los difusores de plástico y papel vegetal brindan una mayor transmitancia.

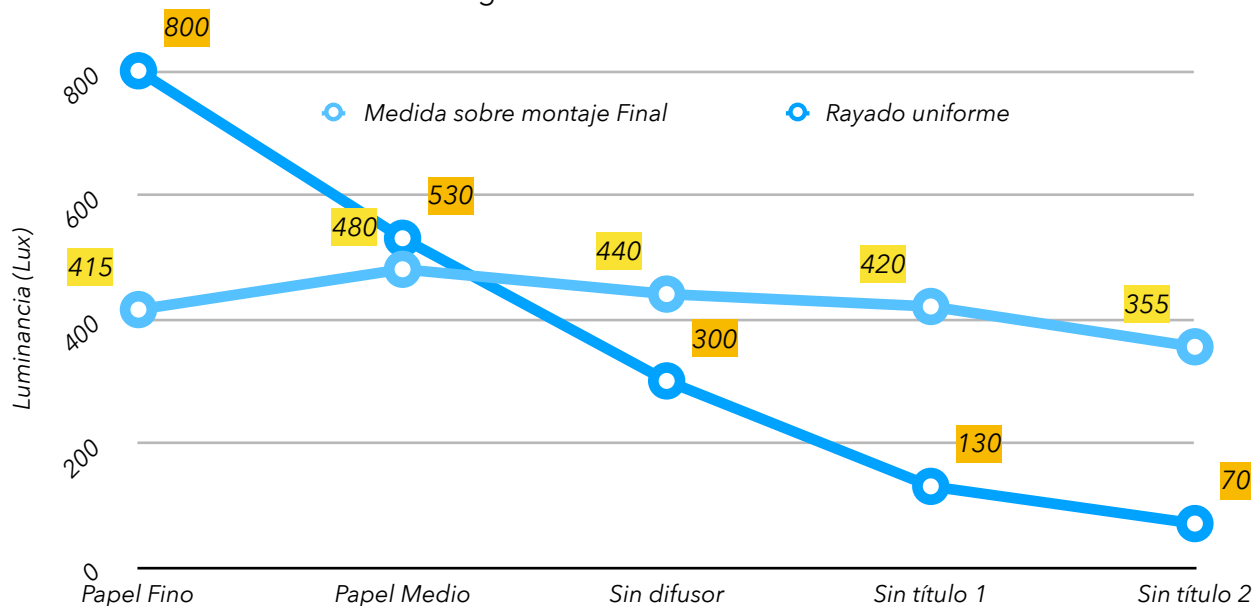
No obstante, todos los reflectores implican una pérdida significativa de luminancia media. Por otra parte, es necesario medir el efecto de la capa reflectora trasera en la luminancia (Fig. 15), que debería contrarrestar esta pérdida.

Fig. 15: Difusores con reflector



Se comprueba un significativo aumento de la luminancia media. En el caso del papel fino, se experimenta una mejora superior al 250% resultando en una mucho mayor eficiencia. Además, el ratio de luminosidades del papel fino con y sin difusor mejora con la implantación de la capa reflectora: mientras que sin reflector se pierde un 70% de luminancia (de 570 a 170 lux) el montaje final presenta un rendimiento del 58% (de 750 a 440 lux).

Figura 16: Uniformidad de la luz



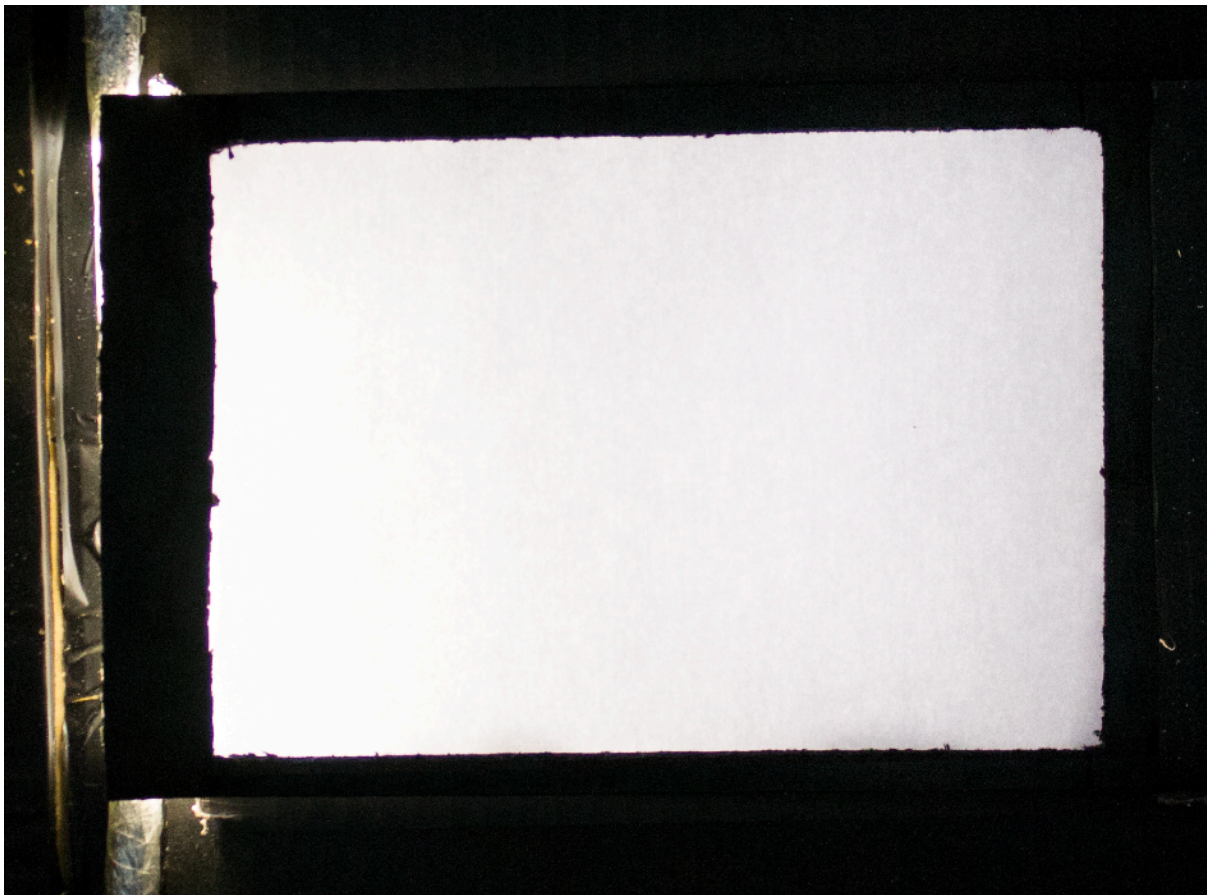
Por último, es necesario comprobar la calidad de otro de los factores más importantes de un sistema Edge-Lit: la uniformidad de la luz. Para ello, se ha realizado una medida comparativa de las LGP de las imágenes 3 y 4; una con lijado gradual y otra con lijado uniforme. A estas se ha añadido además un difusor de papel fino.

Es claramente apreciable cómo la introducción de un rayado gradual aumenta la uniformidad de la luz a lo largo de la LGP. Nótese cómo un lijado de alta densidad en las proximidades de los LED provoca una alta extracción de luz en dicha región y cómo el decaimiento exponencial de la luz se hace evidente. Pese a que la luminosidad del prototipo presenta un ligero decaimiento hacia el final, hemos visto que a simple vista sigue siendo válido.



## 4.5 Montaje Final

Se ha mencionado en varias ocasiones cómo la configuración de la cámara fotográfica ha oscurecido intencionadamente las imágenes. Por ello, creemos conveniente mostrar el resultado tal y cómo se ve a simple vista. Se ha construido en la Imagen un marco opaco imitando la carcasa de un teléfono o un televisor, de manera que los LED quedan cubiertos, y la cámara puede captar la luminosidad *real* sin que los focos inferiores sobreexpongan la fotografía. (Ver Imagen 11)



*Imagen 11: Montaje final del prototipo. Luminosidad "real".*

Pese a que este prototipo se queda lejos de ser el sistema de retroiluminación ideal, es sin duda un modelo muy ilustrativo de la tecnología Edge-Lit, gracias a su simpleza. Pese a las graves deficiencias que presenta, (baja eficiencia, escasa calidad de los materiales, etc.) se puede apreciar una distribución de luz muy luminosa con una excelente uniformidad, a partir de una tira de LEDs. En definitiva, se trata un sistema Edge-Lit que funciona, **quedando demostrada la teoría presentada en el capítulo 3.**

# 5. Otras Aplicaciones

Como hemos visto, los sistemas de retroiluminación son muy diversos, y sobre todo muy complejos. Este nivel de sofisticación es consecuencia de la fuerte inversión de recursos económicos y humanos realizada durante los últimos años en tecnología de pantallas.

No obstante, los principios de las diferentes tecnologías de retroiluminación tienen un ámbito de aplicación mucho más extenso que las pantallas, generalmente con una utilidad estética. Concretamente las técnicas de luz guiada, han permitido ahorrar espacio y energía en un gran número de aplicaciones. De hecho, casi todos los elementos luminosos decorativos presentes en dispositivos de consumo utilizan guías de luz.

Ya se ha mencionado en varias ocasiones la importancia del diseño. Es precisamente este hecho el que ha motivado a la creación de este capítulo, a lo largo del cual se detallarán diversas aplicaciones estéticas de las LGP, algunas de ellas presentes en productos de consumo.

## 5.1 Figuras Luminosas

Se trata de una técnica utilizada tanto en productos de consumo como en otros ámbitos, especialmente el diseño de carteles luminosos. Gracias a las LGP se obtiene un excelente rendimiento, a parte de un diseño sorprendente e innovador.

Consiste en grabar un determinado símbolo o texto en una LGP, de forma que éste es la única parte del plano que se ilumina al acoplar luz LED. Esta técnica permite fabricar carteles luminosos muy eficientes, tanto con utilidades prácticas (e.g. señales de seguridad en un avión, señalización etc.) como estéticas (e.g. iluminación de logotipos de empresas, escaparates, etc.)

En este caso, hemos querido ilustrar esta técnica grabando en una LGP el logotipo de la Universidad del País Vasco. También hemos querido ilustrar las diversas posibilidades de diseño realizando varios prototipos: uno sólo con el trazo exterior, y otro lijado en el interior.



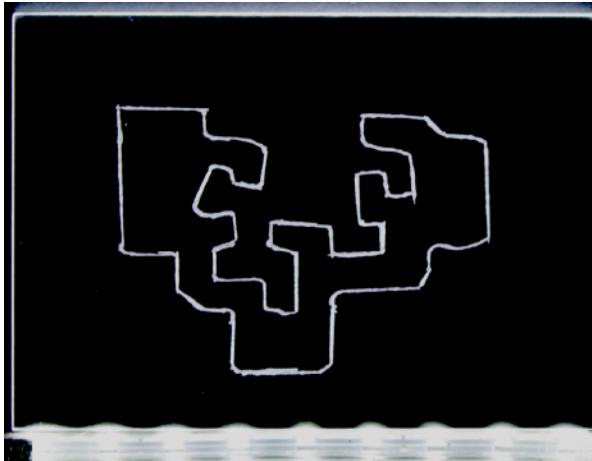


Imagen 12: Contorno del logotipo UPV

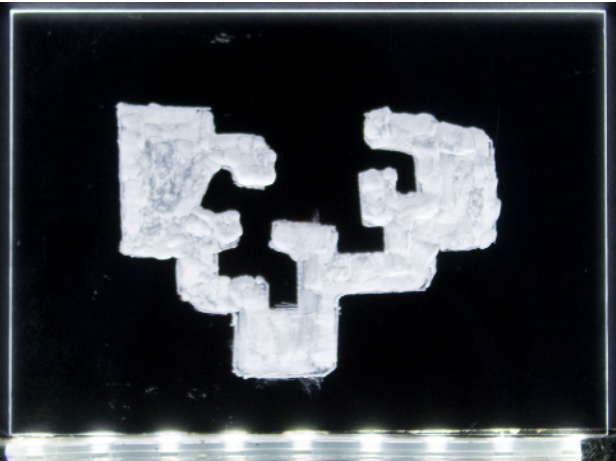


Imagen 13: Relleno del logotipo UPV

Sin embargo, tal y como ya se ha mencionado en este apartado, esta técnica puede tener aplicaciones funcionales. Una de las más utilizadas es la de iluminación de botones de diferentes dispositivos. Presentamos en la imagen 14 los controles de un asiento retroiluminados con el prototipo construido en el capítulo anterior.



Imagen 14: Controles luminosos

Nótese cómo los controles (Reclinar respaldo y reposapiés y llamada al personal de servicio) quedan uniformemente iluminados. Esta técnica puede suponer un significativo ahorro de energía con una adecuada planificación, lo cual es de vital importancia en medios de transporte como aviones o coches.

Nuestro prototipo cuenta con un gran número de LEDs, aunque este pequeño cartel podría ser sobradamente iluminado con uno solo.

Una forma aún más eficiente de realizar esta retroiluminación es el grabado de un patrón luminoso que coincida con el diseño de los controles de la imagen.

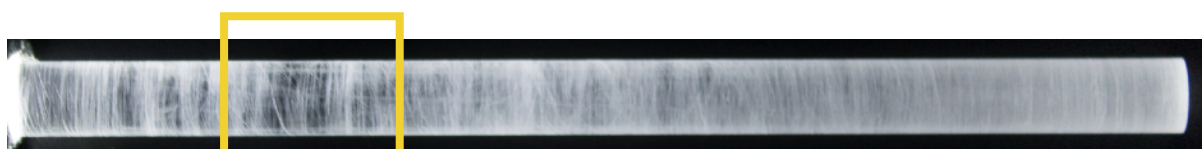
## 5.2 Otras Formas de Guías de Luz

Hasta ahora el texto se ha limitado a estudiar guías de luz planas. No obstante, las guías de luz pueden tener geometrías muy diversas, pudiendo incluso formar ángulos. Hemos creído importante realizar una demostración en este ámbito para ilustrar las vastas posibilidades de diseño en el campo de las LGP.

En este caso, se ha seleccionado una varilla maciza de metacrilato circular de 15 mm de diámetro y 250 mm de largo. La idea es repetir el proceso seguido a lo largo del capítulo 4 para conseguir una distribución cilíndrica de luz uniforme. En resumen, estos son los pasos que hemos seguido:

1. **Lijado gradual de la varilla**, aumentando la densidad de irregularidades en puntos alejados de los LED
2. Colocación de un **difusor opaco** (de papel fino), de transmitancia baja pero aceptable, ya que en este caso el difusor entra en contacto directo con el difusor.
3. Colocación de un **Reflector en uno de los extremos de la varilla**, para evitar que la luz salga al exterior, potenciando además la luz en dicho extremo.
4. **Acoplamiento directo de un solo LED con el otro extremo** de la varilla.

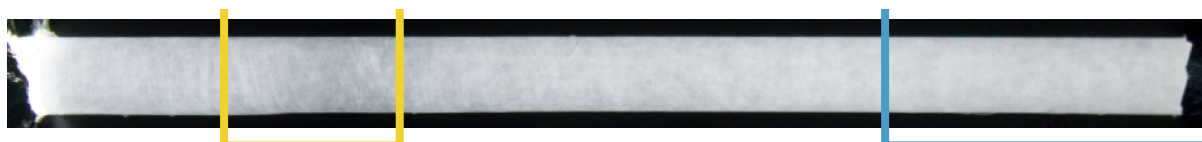
Véanse las imágenes 15 y 16; que documentan el proceso de diseño mostrando el resultado final y la imagen 17 que muestra el resultado final.



*Imagen 15: Varilla lijada progresivamente*



*Imagen 16: Varilla con difusor de papel*



*Imagen 17: Varilla con difusor de papel y reflector en un extremo*

Efectivamente, se ha conseguido una distribución de luminosidad muy uniforme. No obstante, hay un pequeño defecto en el diseño por el cual hay una región más oscura que el resto (Véase recuadro amarillo) debido a un lijado deficiente. Se observa, por otra parte, el notable aumento de luminosidad en el extremo de la varilla cuando con la colocación de un reflector (Recuadro azul).

Por tanto, se ha corregido el lijado deficiente en la región indicada (recuadro amarillo), mostrando el montaje final en la Imagen 18.



*Imagen 18: Montaje final de la varilla*

Finalmente, para comprobar el efecto del difusor en un extremo, que no ha sido estudiado en anteriores capítulos, hemos utilizado el ya mencionado luxómetro para medir la luminosidad en el extremo de la varilla. Las medidas obtenidas sin y con reflector han sido de **55 y 80 lux respectivamente.**

## 6. Conclusiones

Tras un análisis de las diferentes técnicas de retroiluminación, con especial interés en la tecnología Edge-Lit, se han cumplido los objetivos marcados al inicio de este texto. Si bien los medios técnicos a nuestra disposición han sido escasos, la elaboración de este trabajo ha sido realmente provechosa. Por tanto, es conveniente acompañar los datos recabados con algunas conclusiones que no deberían pasarse por alto.

En primer lugar, a lo largo del capítulo 2 -Estado del Arte-, ha quedado patente la superioridad de la tecnología Edge-Lit frente a su predecesora Full-Array no sólo en prestaciones técnicas sino en aplicaciones derivadas y posibilidades de diseño. Por ello, el texto se ha centrado en dicha tecnología en capítulos posteriores.

No obstante, estos sistemas presentan un complejo fundamento teórico y requieren un cuidadoso proceso de diseño y fabricación para cumplir los requerimientos de eficiencia del mercado actual. Para facilitar la comprensión de dicha tecnología se ha construido un prototipo Edge-Lit a lo largo del capítulo 4.

A lo largo de dicho capítulo, se ha visto cómo un lijado progresivo, cuya densidad aumenta a medida que se aleja de los LEDs, consigue interrumpir controladamente la confinación de luz, creando una distribución de luz uniforme. Por otra parte, se comprueba la importancia de la capa difusora, que camufla las marcas del lijado, creando una distribución de luz uniforme pese a introducir considerables pérdidas de luz. No obstante, dichas pérdidas se ven contrarrestadas con un reflector trasero, que evita que la luz sea absorbida por el fondo negro. Los efectos del reflector y del difusor quedan reflejados mediante medidas directas de luz en las figuras 14 y 15 respectivamente (apartado 4.4).

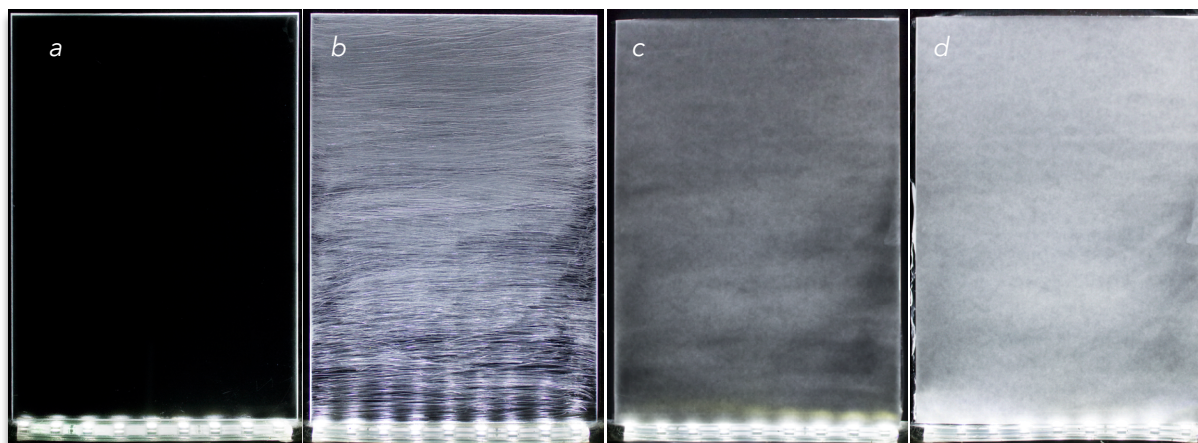


Imagen 19: (a) LGP (b) Rayado - 570 lux (c) Difusor - 170 lux (d) Reflector - 440 lux

Quedan recogidos en la Imagen 19 los principales pasos del proceso de diseño del prototipo. Pese a que el prototipo se queda lejos de ser un sistema comercializable, queda demostrado que los fundamentos de la tecnología Edge-Lit son fácilmente comprensibles y aplicables a un montaje sencillo. No obstante, existen algunos puntos concretos de este proceso que merecen ser comentados.

Por una parte, llama la atención cómo las funciones de las diferentes capas de los sistemas Edge-lit interfieren al aumentar el nivel de miniaturización. En otras palabras, podemos decir que un patrón de micropuntos actúa tanto de fuente de luz cómo de difusor. Extrapolando esta comparación a un diseño industrial de LGPs, unas irregularidades lo suficientemente pequeñas permitirían prescindir -o al menos minimizar el grosor- de la capa difusora maximizando la luminosidad de la pantalla.

Además, queda patente la versatilidad de los sistemas Edge-Lit, debido al amplio marco de aplicaciones derivadas, tanto estéticas como funcionales, recogidas a lo largo del capítulo 5.

## **6.1 Futuras Líneas de Investigación**

Este texto se ha centrado, esencialmente, en caracterizar de forma clara la tecnología Edge-Lit y su proceso de diseño. No obstante, existen otros muchos puntos de enfoque desde los que estudiar en detalle dicha técnica. Por ello, se proponen a continuación varios proyectos, que de emprenderse, complementarían provechosamente este trabajo.

### **6.4.1 Análisis Teórico en Detalle**

A lo largo del capítulo 3 hemos caracterizado de forma más bien cualitativa los sistemas Edge-Lit. Por otra parte, en el capítulo 4 se han explicado con cierto detalle algunos principios teóricos básicos para el diseño del prototipo.

Sin embargo, la extensa bibliografía actual permitiría emprender un estudio que analizara en detalle la propagación de la luz a través de medios de transmisión guiada, así cómo las diferentes técnicas de microfabricación utilizadas para construir modelos Edge-Lit comerciales. Este estudio podría complementarse con medidas de luminosidad más precisas, mediante sensores más sofisticados.

### **6.4.2 Estudio Detallado de Costes y Fabricabilidad**

No se debe obviar la importancia de los estudios de mercado en electrónica de consumo. Si bien en el estado del arte se ha mencionado brevemente la posición de los diferentes sistemas de retroiluminación en el mercado actual, este texto trata principalmente aspectos técnicos.

Por ello, se abre una puerta a realizar un estudio centrado en la comercialización de diferentes dispositivos de consumo, haciendo énfasis en el impacto económico de los sistemas de retroiluminación y en especial de la tecnología Edge-Lit.

### **6.4.3 Ampliación del estudio actual**

En la misma línea de este texto, se propone un estudio más centrado en la tecnología Edge-Lit, que estudie en más profundidad las técnicas de fabricación actuales. De esta manera, se incluirían otras capas obviadas en este texto como los polarizadores y prismas ópticos, que corrigen la dirección de la luz, garantizando un aumento de la eficiencia y del confort del usuario.

Dicho estudio podría completarse con un análisis más detallado de las aplicaciones de la tecnología Edge-Lit en el mercado actual, además de con el diseño de un prototipo más sofisticado.

### **6.4.4 Tecnología OLED**

La tecnología OLED puede desplazar en pocos años a las diferentes técnicas de retroiluminación a un segundo plano. Este hecho da pie a la investigación tanto técnica como económica de la tecnología OLED, así como de la competencia de ambas tecnologías en un futuro próximo.

Este podría formar parte de cualquiera de las propuestas mencionados anteriormente, o constituirse como un sólo texto, que analizara en detalle el incierto futuro de los sistemas de retroiluminación.



# 7. Bibliografía

- [1] P. J. Wild "First-Hand Histories: Liquid Crystal Display Evolution". Engineering and Technology History Wiki, 2017.
- [2] Ali Turkyilmaz, Simge Kantar, M. Enis Bulak, Ozgur Uysal, "User Experience Design: Aesthetics or Functionality?" 2015.
- [3] "Samsung LN65B650 Specs", *CNET*, 2011. [Online]. Available: <https://www.cnet.com/products/samsung-ln65b650/specs/>.
- [4] "HTC Magic - Full phone specifications", *Gsmarena.com*, 2009. [Online]. Available: [https://www.gsmarena.com/htc\\_magic-2714.php](https://www.gsmarena.com/htc_magic-2714.php).
- [5] G. Morrison, "LED local dimming explained", *CNET*, 2017. [Online]. Available: <https://www.cnet.com/news/led-local-dimming-explained/>.
- [6] Sony Corporation, "Sony Z9D 4K HDR with Android TV", *Sony.com*, 2016. [Online]. Available: <https://www.sony.com/electronics/televisions/xbr-z9d-series/specifications>.
- [7] Apple Inc., "iPhone 4 - Especificaciones técnicas", *Support.apple.com*, 2010. [Online]. Available: [https://support.apple.com/kb/sp587?locale=es\\_ES](https://support.apple.com/kb/sp587?locale=es_ES).
- [8] Samsung Electronics, "65mu8000 TV Spec Sheet", 2017.
- [9] "Sony Xperia Z - Full phone specifications", *Gsmarena.com*, 2013. [Online]. Available: [https://www.gsmarena.com/sony\\_xperia\\_z-5204.php](https://www.gsmarena.com/sony_xperia_z-5204.php).
- [10] "OLED", *En.wikipedia.org*. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/OLED>.
- [11] R. Mertens, "Apple admits that burn-in could occur in the iPhone X OLED," OLED Info, 2017.
- [12] LG Group, "EF9500 Series Spec Sheet", 2017.
- [13] Apple Inc., "iPhone X - Especificaciones técnicas", *Apple (España)*, 2017. [Online]. Available: <https://www.apple.com/es/iphone-x/specs/>.



- [14] Y. Huang, "Optics of LCD Backlight", 2012.
- [15] BrightView Technologies, "BrightWhite™ Diffuse Reflector".
- [16] C. Jee-Gong and F. Yu-Bin, "Dot-pattern design of a light guide in an edge-lit backlight using a regional partition approach," *Optical Magazine*, vol. 46 no. 4, 2007.
- [17] Avago Technologies "Light Guide Techniques Using LED Lamps - Application Brief I-003", 2006.
- [18] K. Young Chul, O. Tae-Sik and L. Yong Min, "Optimized pattern design of light-guide plate (LGP)", *Optica Applicata*, 2011.
- [19] F. W. Campbell and R. W. Gubisch, "Optical Quality of the Human Eye". *The journal of Physiology*, 1966.