

## Reporte de tesis sobre estructuración de un modelo experimental para la caracterización de *lightpipes*

Andrés Julián Flores Ceja<sup>1</sup>, Jorge Flores Garay<sup>1</sup>, Lázaro Rico Pérez<sup>1</sup>,  
Antonio Antolín Fonseca<sup>1</sup>, Natividad Nieto Saldaña<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

### Resumen

En el presente trabajo se estructura un método experimental para caracterizar la distribución de la intensidad en un *lightpipe* de dimensiones preestablecidas. El análisis se realiza utilizando un diseño de experimentos factorial completo con tres factores a tres niveles cada uno como herramienta alternativa al uso de programas computacionales especializados cuyo uso es muy limitado debido a sus elevados costos. Para esto se fabrican manualmente muestras de *lightpipes* y escantillones con los que se conducen pruebas de intensidad para todas las posibles combinaciones de texturas. Con los valores de intensidad obtenidos se calcula el índice de uniformidad óptica para cada tratamiento y se comparan los resultados contra los del *lightpipe* de referencia. Se realizan análisis gráficos y estadísticos para verificar que los efectos de los diferentes tratamientos no son similares; posteriormente se evalúan las interacciones entre los diferentes niveles de textura en las placas de prueba y su impacto en la uniformidad de la intensidad. También se realizan pruebas para validar el análisis y las conclusiones preliminares obtenidas de los experimentos.

**Palabras clave:** *Lightpipe*, uniformidad óptica, intensidad, diseño de experimentos.

### Introducción

Los *lightpipes* son componentes generalmente hechos de plástico transparente (PMMA o PC), que sirven para guiar la luz proveniente de una fuente puntual (e.g. un LED) a través de su cuerpo por medio del fenómeno de reflexión total interna, para después hacer escapar los rayos en un patrón previamente determinado.

La Figura 1 muestra un corte transversal de un *lightpipe* en el que la luz viaja por reflexión en las paredes internas de la pieza; a la izquierda se muestra un LED

como fuente de iluminación. En el diseño de estos componentes se utilizan desde métodos de prueba y error hasta aplicaciones avanzadas de software. El primer método consume mucho tiempo y dinero en prototipos ya que generalmente es un proceso de iteraciones complicado y sin orden; y la desventaja de los paquetes computacionales es que por ser especializados, el costo de su licencia es muy elevado.



Figura 1: Luz viajando a través de un lightpipe por el fenómeno de reflexión total interna

### Definición del Problema

No existe un modelo experimental estructurado que permita caracterizar y diseñar efectivamente un *lightpipe* sin la ayuda de programas especializados.

### Alcance

El presente estudio se enfoca en la creación de una metodología para la caracterización y el desarrollo de un sistema de iluminación.

### Objetivos generales

- Desarrollar un método para la caracterización de sistemas de iluminación.
- Diseñar un *lightpipe* texturizado con mayor uniformidad que uno sin textura.
- Establecer un punto de partida en el diseño de *lightpipes* por medio del cual se reduzca el número de iteraciones en el desarrollo de nuevas geometrías.

### Objetivos específicos

- Crear y documentar un método para desarrollar *lightpipes* por medio del diseño de experimentos y sin la ayuda de paquetes de software especializados.

- Caracterizar la uniformidad óptica de un *lightpipe* texturizado por medio del diseño de experimentos.
- Incrementar la uniformidad óptica de un *lightpipe* en 50% por medio del uso de texturas y el diseño de experimentos.
- Documentar las combinaciones de textura que maximizan la uniformidad óptica en las iteraciones del desarrollo de un *lightpipe*.

### Hipótesis

- Es posible caracterizar la uniformidad óptica de un *lightpipe* texturizado por medio del diseño de experimentos.
- La uniformidad óptica en un *lightpipe* se puede incrementar hasta en un 50% con respecto a un *lightpipe* liso por medio del uso de texturas y el diseño de experimentos como herramienta metodológica.
- Reporte de Tesis sobre Estructuración de un Modelo Experimental para la Caracterización de *Lightpipes*

## Marco Teórico

Las variaciones en la intensidad luminosa, medida sobre la superficie de salida del *lightpipe*, determinan la uniformidad de la iluminación. Lo ideal es tener un patrón de iluminación homogéneo de manera que la intensidad sea la misma en todos los puntos de la superficie de salida del *lightpipe*. La reflexión especular interna dentro de un *lightpipe*, que sucede en la superficie que separa a la pieza del aire, es la que permite transmitir la luz a lo largo del cuerpo del *lightpipe*.

De acuerdo con el manual *Light Guide Techniques Using LED Lamps* (Avago Technologies, 2006), una superficie de salida difusa en un *lightpipe* proporciona ángulos críticos aleatorios para los rayos de luz internos, incrementando la probabilidad de que la luz escape de la pieza. El acabado de las superficies exteriores de un *lightpipe* es muy importante para asegurar un desempeño apropiado, por ejemplo, las paredes paralelas a la dirección en que viaja la luz deben ser lisas, como las de un espejo para maximizar la cantidad de luz transmitida por reflexión total interna.

En los últimos años se han realizado diferentes estudios con el fin de maximizar la uniformidad de la iluminación obtenida con *lightpipes* de diferentes geometrías y tamaños. Como lo mencionan en su estudio *Examination of High Luminance Light Guide Plate by Accumulating Method* (Fujimoto, et al., 2009), una de las ventajas de los *lightpipes* es el uso eficiente de la luz por medio de la conversión de un patrón puntual de emisión a uno planar. Sin

embargo, estos autores mencionan que es difícil conseguir un alto nivel de uniformidad utilizando solamente un *lightpipe* y sin la ayuda de algún difusor extra, por lo que proponen un método de apilamiento de hojas texturizadas delgadas para incrementar la cantidad de indentaciones totales sobre su superficie reflejante y así aumentar la dispersión de los rayos de luz.

Por otro lado, de acuerdo con análisis realizados, se ha determinado que la textura realizada con cortes en V puede proporcionar mayor cantidad de luz direccionada e incrementar el brillo en la dirección del observador (Lee & He, 2011). La razón que estos investigadores presentan para justificar dicha aseveración es que un ángulo grande de incidencia conlleva a la reflexión total interna cuando la luz choca sobre una superficie lisa; sin embargo, la estructura de cortes en V reduce la reflexión interna e incrementa la intensidad de la luz que escapa del *lightpipe*.

Con el fin de evaluar sus resultados, varios grupos de investigadores dividen la superficie iluminada del *lightpipe* en segmentos y miden su *Uniformidad Óptica* la cual calculan como la razón entre la intensidad mínima y la intensidad máxima medidas, ejemplo de ello es el artículo *Dot Pattern Designing on Light Guide Plate of Backlight Module by the Method of Molecular Potential Energy*, (Kang, Guo, Liu, Zhang, & Wang, 2010).

En el estudio titulado *Edge-Lighting Light Guide Plate Based on Micro-Prism for*

*Liquid Crystal Display* (Yan, Wang, Li, & Zhang, 2009), se compara el comportamiento de la luz cuando pasa por *lightpipes* con micro prismas, y cuando pasa por *lightpipes* con indentaciones esféricas.

También se muestran las ventajas que ofrecen los micro prismas al estar en la

parte superior del *lightpipe* (superficie de salida) con respecto a la parte inferior, ya que la primera opción ofrece un mejor control de la dirección de salida de la luz al compensar el ángulo de difracción de ésta por el cambio de medios entre la placa transparente y el aire.

## Metodología

Para evaluar la uniformidad en la intensidad de la placa, es necesario realizar una serie de mediciones en varios puntos para poder identificar un valor mínimo y uno máximo que representen la intensidad más baja y la más alta de la placa respectivamente. Estos valores son utilizados para obtener una proporción dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Uniformidad Óptica} = \left( \frac{\text{Intensidad mínima medida}}{\text{Intensidad máxima medida}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Para el desarrollo del experimento se divide el área de las placas de prueba en 4 zonas. La primera zona, adyacente a la fuente de iluminación, tiene una superficie pulida para que la mayoría de la luz de los LEDs no salga inmediatamente del cuerpo del *lightpipe* y pueda ser transmitida por reflexión total interna a través de todo el cuerpo de la placa. Las otras tres zonas del

*lightpipe* tienen las mismas dimensiones de superficie entre ellas, sin embargo, cuentan con diferentes texturas prismáticas generadas con lijas de diferentes rugosidades para modificar los ángulos de incidencia de los rayos de luz.

La Figura 2 muestra las zonas en que se dividen los *lightpipes* para el experimento de caracterización y la localización de los LEDs con respecto de la placa.

El diseño propuesto para los experimentos a realizar es del tipo Factorial Completo  $3^3$  con tres réplicas. La Tabla 1 muestra los diferentes valores y niveles seleccionados con base en experimentos preliminares realizados así como en la bibliografía consultada.

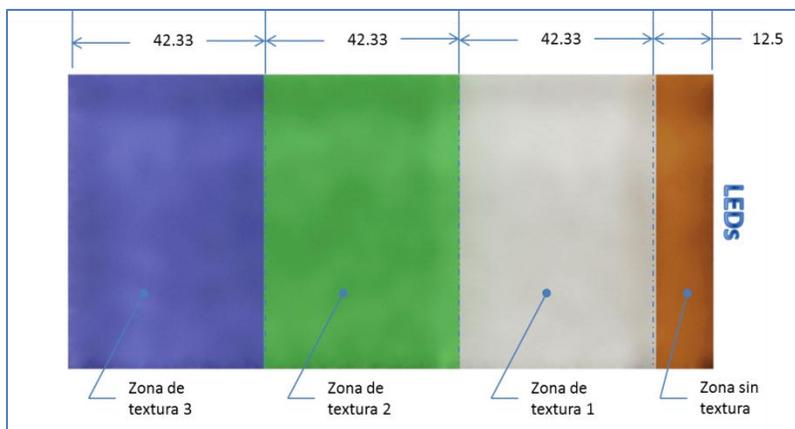


Figura 2: Zonas de texturización para placas de lightpipe

Niveles para cada factor	
Factor	Nivel
Textura en Zona 1	Lija de 220 granos/cm <sup>2</sup>
	Lija de 400 granos/cm <sup>2</sup>
	Lija de 600 granos/cm <sup>2</sup>
Textura en Zona 2	Lija de 220 granos/cm <sup>2</sup>
	Lija de 400 granos/cm <sup>2</sup>
	Lija de 600 granos/cm <sup>2</sup>
Textura en Zona 3	Lija de 220 granos/cm <sup>2</sup>
	Lija de 400 granos/cm <sup>2</sup>
	Lija de 600 granos/cm <sup>2</sup>

Tabla 1: Factores y niveles para el experimento de uniformidad óptica

Los datos obtenidos para el experimento se dividen en tres bloques ya que el *lightpipe* utilizado para realizar las mediciones, consta de 3 LEDs como fuente de luz. Esto ocasiona que existan ciertas zonas que reciben rayos provenientes de los 3 LEDs, mientras otras zonas reciben solamente de dos o incluso solo de uno, como se puede apreciar en la Figura 3.

Lo anterior genera un obstáculo para considerar que todas las observaciones se realizan en condiciones idénticas, por lo que es necesario generar dichos bloques para incrementar la precisión del resultado, ya que con ellos se identifican los cambios en las condiciones en que se realizan las corridas experimentales. El agrupamiento de los puntos de medición por bloques se muestra en la Figura 4.

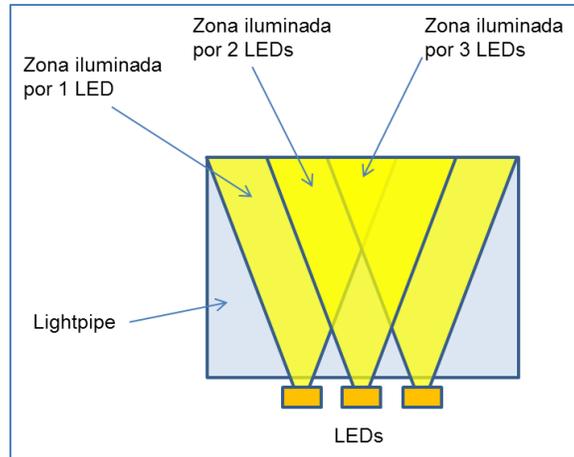


Figura 3: Zonas de iluminación para el lightpipe con 3 LEDs

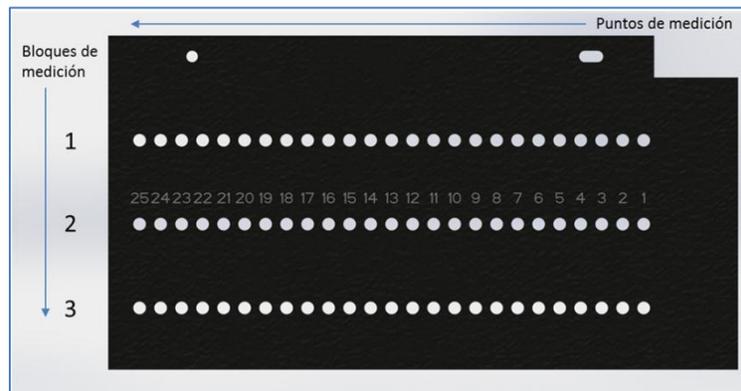


Figura 4: Puntos de medición para cada bloque en la guía de medición del lightpipe

Con base en el experimento diseñado, se obtienen 27 combinaciones diferentes de texturas y posiciones en la placa de medición. Considerando que el número de réplicas del experimento es de 3 se obtienen 81 grupos de medición.

Utilizando un espectrorradiómetro se mide cada posición definida por la guía de

medición del escantillón, generando una hoja de Excel con una tabla y una gráfica para cada placa que describe el cambio de la intensidad a lo largo de los diferentes puntos de prueba.

## Resultados

Con los resultados de las mediciones, se identifican 3 segmentos principales en los gráficos de intensidad obtenidos:

En el primero los puntos de los 3 bloques medidos en cada placa muestran un incremento de intensidad hasta llegar al máximo valor observado en el bloque, como se puede apreciar en la Figura 5a. También se observa que en general, los valores de intensidad para el bloque 2 (la línea intermedia de puntos medidos), son mayores que los de los bloques 1 y 3, y que los valores para los bloques 1 y 3 de este segmento son muy parecidos entre sí, formando una distribución de la intensidad casi simétrica con respecto a la línea de puntos del bloque 2.

En el segundo segmento se aprecia que las intensidades en cada bloque comienzan a disminuir pero también a homogeneizarse

En el último segmento, la intensidad ha llegado a un nivel relativamente estable y homogéneo. La intensidad en esta superficie alcanza niveles en el rango de 1.5 a 3.4 mcd/m<sup>2</sup> para todas las combinaciones de texturas realizadas, mientras que la intensidad que se aprecia en el *lightpipe* sin textura se encuentra en el rango de 0.40 a 0.64 mcd/m<sup>2</sup> aproximadamente.

Se realiza una prueba de hipótesis en la que la hipótesis nula es que las medias de

todos los niveles de la población son iguales entre sí:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k = \mu$$

$H_1$ : Al menos una  $\mu_k$  es diferente a las demás

Los cálculos realizados por el programa Minitab arrojan los resultados mostrados en la Tabla 2.

De acuerdo al análisis realizado, y según el valor seleccionado de  $\alpha = 0.05$ , se puede observar que los 3 efectos principales son significativos así como las diferentes interacciones dobles y la interacción tripe entre los niveles de textura aplicados en las zonas 1, 2 y 3. Lo anterior significa que tanto el orden como los niveles de textura aplicados al *lightpipe* afectan la uniformidad en la intensidad de la placa.

Con base en estos resultados, existe suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula, es decir, la que establece que los promedios de uniformidad óptica son iguales en todos los tratamientos.

De acuerdo a la tabla del análisis de varianza, se puede decir que el modelo generado por el diseño del experimento puede explicar un 95.07% de la variabilidad en la uniformidad óptica, y que además puede predecir resultados con un 92.42% de certeza.

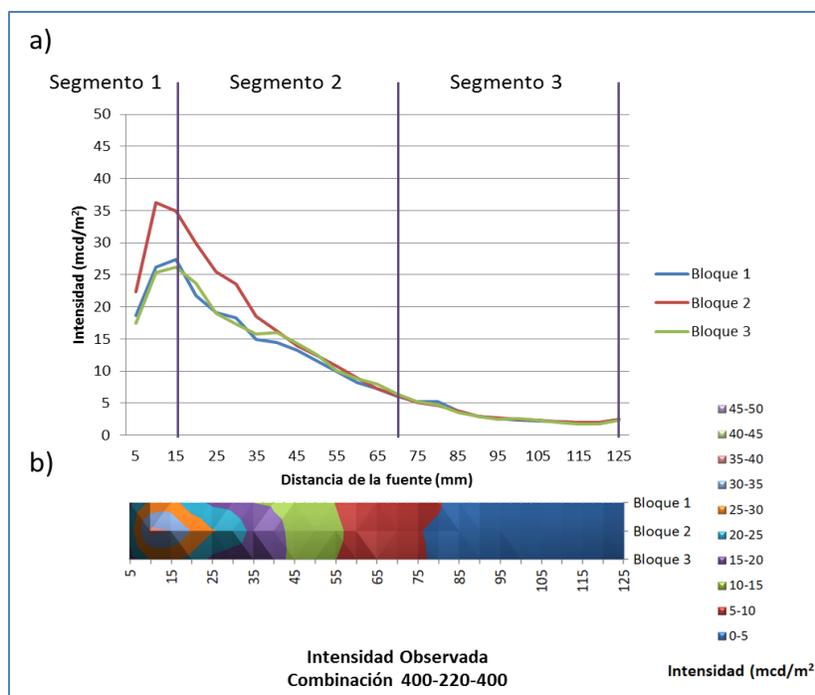


Figura 5: a) Distribución de la intensidad por zonas en un lightpipe. b) Gráfico de superficies de la distribución de intensidad en un lightpipe.

Análisis de Varianza para Uniformidad Óptica, usando SS Ajustada para Pruebas							
Fuente	GDL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	
Blocks	2	95.487	95.487	47.743	58.590	0.000	
Textura en Zona 1	2	356.277	356.277	178.139	218.630	0.000	
Textura en Zona 2	2	44.040	44.040	22.020	27.030	0.000	
Textura en Zona 3	2	161.432	161.432	80.716	99.060	0.000	
Textura en Zona 1*Textura en Zona 2	4	38.811	38.811	9.703	11.910	0.000	
Textura en Zona 1*Textura en Zona 3	4	69.753	69.753	17.438	21.400	0.000	
Textura en Zona 2*Textura en Zona 3	4	8.607	8.607	2.152	2.640	0.000	
Textura en Zona 1*Textura en Zona 2*Textura en Zona 3	8	42.900	42.900	5.362	6.580	0.044	
Error	52	42.370	42.370	0.815			
Total	80	859.677					
S = 0.902666 R-Sq = 95.07% R-Sq(adj) = 92.42%							

Tabla 2: Análisis de varianza para la uniformidad óptica de los lightpipes

En el gráfico de efectos principales de la Figura 6 se puede apreciar que el cambio de texturas en la zona 1 tiene un mayor efecto en la intensidad de la iluminación de la placa, seguido por el cambio de texturas en la zona 3 y finalmente por el cambio de texturas en la zona 2.

En el gráfico de respuestas a las interacciones se puede apreciar que las combinaciones que producen una mayor uniformidad óptica son cuando la textura en la zona 1 es de 600 puntos y la textura en la zona 2 es de 400, así mismo cuando la textura en la zona 1 es de 600 puntos y la de la zona 3 es de 220.

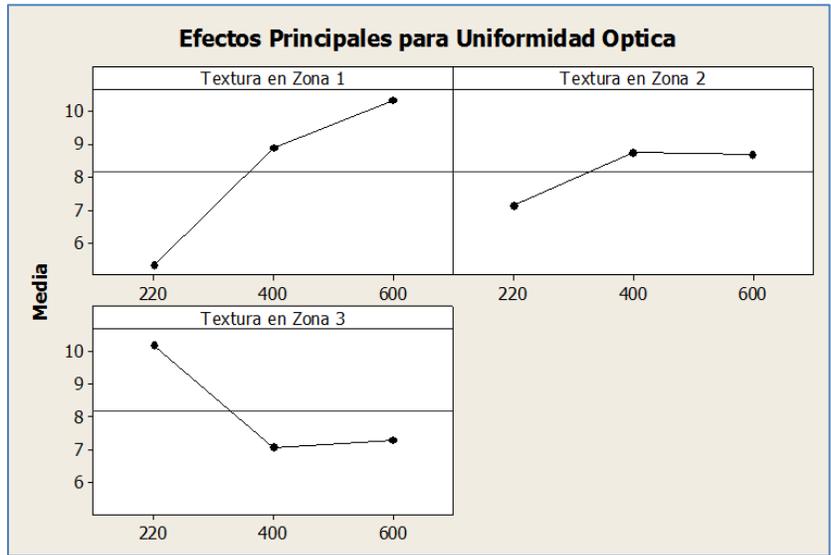


Figura 6: Efectos principales para la uniformidad óptica del lightpipe

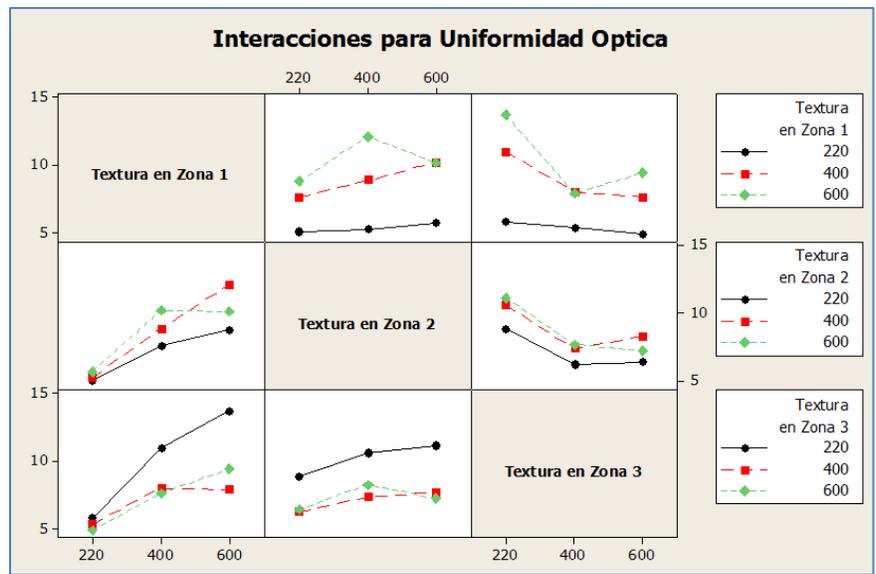


Figura 7: Respuestas a las interacciones para la uniformidad óptica en los lightpipes

Como parte de la validación de la hipótesis del presente trabajo, se mide un *lightpipe* sin textura, es decir, liso en todas sus caras, y en las mismas condiciones que las utilizadas para realizar el experimento de caracterización. Dicha placa es la que

funcionará como punto de referencia para determinar si la uniformidad óptica en un *lightpipe* texturizado se puede incrementar hasta en 50% con respecto a la placa sin textura.

## Conclusiones

Los segmentos 1 y 2 de la Figura 5a representan las áreas de oportunidad en la que se deben reducir los picos de intensidad y homogeneizar los valores de los 3 bloques medidos. De acuerdo al análisis realizado, se puede esperar que al reducir los picos de intensidad en las interfaces del segmento 1 y 2 para los tres bloques, la intensidad emitida por el segmento 3 sufrirá un incremento, ya que una mayor cantidad de rayos de luz se reflejará internamente a través de las paredes del *lightpipe* y tendrá el potencial de ser emitida en la zona más lejana en la placa,

incrementando su intensidad promedio así como el índice de uniformidad óptica de la pieza en general.

Al comparar los promedios de uniformidad óptica de la mejor placa texturizada contra la placa sin textura se puede concluir que la placa con textura 600-400-220 tiene una uniformidad óptica 63.87% mayor que la de la placa sin textura como se muestra en la Tabla 3. Haciendo válida la hipótesis planteada al principio de este trabajo.

Uniformidad Óptica	Placa sin textura	Placa 600-400-220	Incremento
Bloque 1	9.076%	18.396%	102.688%
Bloque 2	7.868%	13.654%	73.538%
Bloque 3	12.590%	16.347%	29.841%
Promedio	9.845%	16.132%	63.869%

Tabla 3: Resumen de resultados para mejor lightpipe con textura Vs. placa sin textura

Para lograr un mayor nivel de uniformidad, se recomienda continuar con experimentos en los que se divida la placa en un mayor número de zonas, así como

utilizar un método experimental similar para determinar el espaciamiento óptimo entre los LEDs.

## Referencias

Avago Technologies. (2006). Light Guide Techniques Using LED Lamps. United States: Avago Technologies.

Kang, M., Guo, K., Liu, Z., Zhang, Z., & Wang, R. (2010). Dot Pattern Designing on Light Guide Plate of Backlight Module by the Method of Molecular Potential Energy. *Journal of Display Technology*, 166-169.

Lee, K., & He, K. (2011). Effect of Micro-Structural Light Guide Plate on Source of Linearly Polarized Light. *Journal of Lightwave Technology*, 3327-3330.

Yan, J., Wang, Q., Li, D., & Zhang, J. (2009). Edge-Lighting Light Guide Plate Based on Micro-Prism for Liquid Crystal Display. *Journal of Display Technology*, 355-357.