

UNIVERSIDAD DE GRANADA



Facultad de Ciencias

**Estudio de las propiedades
fotométricas de sistemas de
iluminación de estado sólido en campo
cercano y campo lejano**

José Luis Velázquez Molinero

Granada, Marzo de 2016

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales

Autor: José Luis Velázquez Molinero

ISBN: 978-84-9125-926-8

URI: <http://hdl.handle.net/10481/43894>

UNIVERSIDAD DE GRANADA



**Estudio de las propiedades
fotométricas de sistemas de
iluminación de estado sólido en campo
cercano y campo lejano**

Memoria presentada en la Universidad de Granada por
José Luis Velázquez Molinero para optar al grado de
Doctor
por la Universidad de Granada, dirigida por la Doctora:

Alicia Pons Aglio

Granada, Marzo de 2016

A mi esposa, Elena
a mis padres y suegros, Manuel y Laura, Pepe y Francisca
a mis hermanos y cuñados, Manuel y Maria José, Laura y Juanma, Jonathan y
Miriam, José y Inma, Pablo
y a mis sobrinos, Andrea, Alba, Cristian, Oliver, Samuel y Elena

Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado en el Grupo de Investigación de Medidas de Radiación Óptica (GIMRO) del Instituto de Óptica “Daza Valdés” del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) de Madrid, bajo la dirección de la Dra. Alicia Pons Aglio a quien quiero expresar mi más sincero agradecimiento por sugerirme la realización de este trabajo, por el interés demostrado y por la inapreciable ayuda prestada en el desarrollo del mismo.

También quiero agradecer al Dr. Joaquín Campos Acosta por su capacidad de comunicación durante mi etapa de formación así como sus consejos y orientación en el desarrollo de este trabajo.

Asimismo, quiero agradecer expresamente la inestimable ayuda ofrecida por el Dr. Alejandro Ferrero Turrión por su disponibilidad para discutir los resultados y otros aspectos de la investigación, vitales en mi proceso de formación como investigador.

Al Prof. Manuel Rubiño López por aceptar ser el tutor de este trabajo ante la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad de Granada.

Agradezco a los directores del Instituto de Óptica y de Física Aplicada del CSIC las facilidades que siempre me dieron para poder utilizar las instalaciones y medios de los Institutos en todo lo que fue necesario para el mejor desarrollo de esta tesis doctoral.

Agradezco a todas las personas que han trabajado en el grupo de investigación en estos años el apoyo que me han prestado y su colaboración cuando la he pedido. Además, agradezco a todo el personal del instituto con quienes he interactuado en estos años por su calidad humana de la que he sido objeto.

Y, finalmente, agradezco al CSIC y a la Comunidad de Madrid la concesión de los contratos ofrecidos para la formación de doctores en el CSIC, que ha hecho posible la realización de esta tesis doctoral.

Granada, Marzo de 2016

Índice general

Lista de símbolos	1
Siglas y Acrónimos	5
Resumen	9
Introducción	11
I Base teórica y experimental	15
1. Fundamento teórico de fuentes de estado sólido	17
1.1. Principios de las fuentes de estado sólido (LED)	18
1.1.1. Evolución de los LEDs	19
1.1.2. Fundamento Teórico	20
1.1.3. Tipos y Tecnologías básicas de LED	26
1.1.3.1. LED de alta luminosidad	26
1.1.3.2. LED de alta potencia	27
1.1.4. Mecanismos de generación de luz blanca	30
1.1.4.1. LEDs RGB	31
1.1.4.2. LEDs con fósforo	31
1.1.4.3. LEDs libres de fósforo	33
1.1.4.4. LEDs nanoestructurados	34
1.1.5. Ventajas de la utilización de LEDs	36
1.2. Principios de las fuentes de estado sólido orgánicas (OLED)	36
1.2.1. Avances científicos más relevantes en el desarrollo del OLED	37
1.2.2. Fundamento Teórico	38
1.2.3. Modos de fabricación de OLEDs	39
1.2.3.1. SM-OLED	39

1.2.3.2.	PLED	39
1.2.4.	Clasificación de los tipos de OLEDs	40
1.2.4.1.	TOLED	40
1.2.4.2.	SOLED	41
1.2.4.3.	WOLED	42
1.2.4.4.	FOLED	42
1.2.5.	Configuración de OLEDs en pantallas	43
1.2.5.1.	PMOLED	43
1.2.5.2.	AMOLED	44
1.3.	Ventajas y desventajas de la tecnología OLED	45
1.3.1.	Ventajas de la tecnología OLED	45
1.3.2.	Desventajas de la tecnología OLED	46
2.	Descripción del sistema de medida para fuentes de estado sólido	47
2.1.	Gonioespectrofotómetro	48
2.1.1.	Descripción del instrumento	48
2.1.1.1.	Sistema de detección	49
2.1.1.2.	Sistema de posicionamiento	51
2.1.2.	Procedimiento de medida	54
2.1.2.1.	Alineamiento de la fuente	54
2.1.2.2.	Alineamiento del sistema de detección	56
2.1.2.3.	Medición	58
2.2.	Calibrado de los sistemas de detección	60
2.2.1.	Calibración del fotómetro	60
2.2.1.1.	Linealidad	60
2.2.1.2.	Respuesta angular	61
2.2.1.3.	Responsividad en iluminancia	61
2.2.1.4.	Mismatch factor	62
2.2.2.	Calibrado del espectrorradiómetro	63
3.	Medidas realizadas en el Gonioespectrofotómetro	65
3.1.	Medidas realizadas	65
3.1.1.	Distribución angular de iluminancia	66
3.1.2.	Dependencia de la iluminancia con la distancia	75

II	Fuentes de estado sólido en configuración de campo lejano	83
4.	Teoría de los polinomios de Zernike aplicado a fuentes de iluminación	85
4.1.	Caracterización fotométrica de LEDs a partir de la utilización de los polinomios de Zernike	87
4.1.1.	Descripción de los polinomios de Zernike para determinar las propiedades ópticas de los LEDs	88
4.1.2.	Propiedades más importantes de los polinomios de Zernike	91
4.2.	Determinación de las propiedades ópticas	93
4.2.1.	Ángulo de emisión	94
4.2.2.	Dirección del eje óptico	95
4.2.3.	Inhomogeneidad	96
4.2.4.	Anisotropía	96
4.2.5.	Flujo total	97
4.2.6.	Lambertianidad	97
4.3.	Resultados	99
4.3.1.	Determinación del número de polinomios necesarios	101
4.3.2.	Ángulo de emisión	102
4.3.3.	Dirección del eje óptico	103
4.3.4.	Inhomogeneidad	104
4.3.5.	Anisotropía	105
4.3.6.	Flujo total	106
4.3.7.	Lambertianidad	107
5.	Estimación de las incertidumbres	111
5.1.	Ecuación de medida e incertidumbre	112
5.1.1.	Incertidumbre de la intensidad luminosa	113
5.2.	Incertidumbres ligadas a la medida	114
5.2.1.	Repetitividad	115
5.2.2.	Distancia	115
5.2.3.	Responsividad	115
5.2.4.	Mismatch factor	116
5.2.5.	Amplificador	116
5.2.6.	Linealidad	117
5.2.7.	Direccionalidad del detector	117
5.2.8.	Estabilidad	117

5.2.9. Tamaño de la fuente	118
5.2.10. Lambertianidad	118
5.2.11. Luz parásita	118
5.3. Resumen de las incertidumbres	119
5.4. Estimación de la incertidumbre debida al ajuste	120
5.5. Comparación con el PTB	122

III Fuentes de estado sólido en configuración de campo cercano **127**

6. Caracterización de OLEDs **129**

6.1. Estabilidad	131
6.2. Distribución Espectral	134
6.3. Homogeneidad	134
6.3.1. Dependencia de la homogeneidad con el ángulo azimutal . . .	136
6.3.2. Dependencia de la homogeneidad con la longitud de onda . .	138
6.3.3. Optimización del tamaño de área para considerar al OLED como fuente patrón de radiancia / luminancia	140

7. Determinación de la distribución espacial de luminancia de fuentes extensas **143**

7.1. Metodología	145
7.1.1. Paso 1. Transformación del sistema de referencia cámara al sistema de referencia fuente	145
7.1.2. Paso 2. Interpolación de la ecuación para variaciones angulares	147
7.1.3. Paso 3. Reducción de los coeficientes de la matriz $L_{r,0}$ y g por análisis de componentes principales	148
7.1.3.1. Determinación de los parámetros mediante PCA para el caso de $\mathbf{L}_{r,0}$	149
7.2. Expresión final para determinar la radiancia espectral de una fuente en el espacio	150
7.3. Resultados	152
7.3.1. Paso 1. Cambio del sistema de referencia cámara (CRS) al sistema de referencia fuente (SRS)	154
7.3.2. Paso 2. Cálculo de los coeficientes matriciales $L_{r,0}$ y g	156
7.3.3. Paso 3. Análisis de la fuente mediante PCA	160

7.3.4. Validación del método propuesto	164
Conclusiones	167
Bibliografía	171

Índice de figuras

1.1. Evolución de ventas y de eficiencias para fuentes de estado sólido LED.	18
1.2. Movimiento de los portadores con polarización directa.	20
1.3. Estructura de las bandas de energía de un semiconductor directo en un proceso de recombinación de electrón-hueco.	22
1.4. Diagrama de energía de bandas para varias aleaciones de $GaAs_{1-x}P_x$.	23
1.5. Formación de excitones (par electrón-hueco) por la inclusión de dopantes neutros N en un semiconductor indirecto.	25
1.6. Estructura de un LED de alta luminosidad.	27
1.7. Estructura del LED de alta potencia <i>Philips Luxeon Rebel</i> .	28
1.8. Tira de LEDs SMD 5050.	29
1.9. LED COB.	30
1.10. Espectro de un LED RGB.	31
1.11. Espectros de diferentes tipos de LEDs blancos.	32
1.12. Estructura interna del semiconductor para un LED libre de fósforo.	33
1.13. Espectro de cada uno de los tipos de LEDs libres de fósforo.	34
1.14. Características de un LED nanoestructurado.	35
1.15. Evolución temporal de la eficiencia de las diferentes tecnologías.	37
1.16. Funcionamiento de las distintas regiones que componen un OLED.	38
1.17. Emisión de luz de los distintos TOLEDs.	40
1.18. Esquema de un SOLED.	41
1.19. Esquema de un WOLED.	42
1.20. Fotografía del acabado visual de un FOLED.	43
1.21. Esquema de un PMOLED.	44
1.22. Esquema de un AMOLED.	45
2.1. Fotografía del goniospectrofotómetro.	48
2.2. Sistema de posicionamiento.	53
2.3. Fuentes de irradiación utilizadas.	54

2.4.	Alineamiento del LED respecto del grado de libertad φ	55
2.5.	Alineamiento del LED respecto del grado de libertad θ	56
2.6.	Esquema de alineación para el fotómetro.	57
2.7.	Simulación del valor del flujo en función de la cantidad de medidas realizadas.	58
2.8.	Factor de linealidad del sistema de detección.	60
2.9.	Factor de corrección de la respuesta del detector en diferentes ángulos.	61
2.10.	Comparación de la respuesta relativa del fotómetro con la $V(\lambda)$ a diferentes λ	62
3.1.	Distribución angular de los LEDs <i>Cree XLamp</i>	67
3.2.	Distribución angular de los LEDs <i>Philips Lumileds Luxeon Rebel</i>	68
3.3.	Distribución angular de los LEDs <i>Osram Golden Dragon</i>	69
3.4.	Lámpara 839-4766.	71
3.5.	Lámpara 839-4766.	71
3.6.	Lámpara 820-7975.	72
3.7.	Lámpara 820-7987.	72
3.8.	Lámpara 829-4180.	73
3.9.	Lámpara 829-4247.	73
3.10.	Lámpara 836-2781.	74
3.11.	Lámpara 818-1071.	74
3.12.	Distribución angular a 4 distancias diferentes.	76
3.13.	Variación de la iluminancia del LED blanco <i>Cree</i> , en escala logarítmica.	77
3.14.	Análisis de la diferencia relativa de los datos experimentales con los datos calculados cuando se varía el valor de la posición inicial.	78
3.15.	Diferencias relativas entre los valores de iluminancia medidos y los calculados con ambos procedimientos en función de la distancia y a $\theta = 0^\circ$, para el LED verde de <i>Luxeon</i>	79
3.16.	Diferencias relativas promedio entre las medidas y los datos obtenidos de iluminancia en distintos ángulos polares.	80
3.17.	Diferencias relativas promedio de las medidas para cada uno de los LEDs medidos y para todos los ángulos y distancias medidas.	80
4.1.	Transformación de los polinomios de Zernike.	90
4.2.	Contribución unitaria de algunos de los polinomios de Zernike en la distribución de intensidad luminosa.	91

4.3.	Rotación de los ejes de referencia.	93
4.4.	Distribución angular de intensidad luminosa para los 3 tipos de fuentes de estado sólido medidas en el laboratorio y las diferencias relativas entre las medidas experimentales y los datos ajustados por Zernike. . .	99
4.5.	Distribución angular tipo de intensidad luminosa para cada uno de los diferentes fabricantes estudiados.	100
4.6.	Bondad de ajuste obtenida por la aproximación de Zernike.	101
4.7.	Dirección del eje óptico obtenido para cada uno de los LEDs estudiados.	104
4.8.	Valores de inhomogeneidad obtenidos para cada uno de los LEDs. . .	105
4.9.	Anisotropía $A(\theta)$ promedio en el ángulo azimutal para los 3 tipos de LEDs estudiados.	106
4.10.	Grado de lambertianidad de cada uno de los tipos de LEDs.	108
5.1.	LEDs patrones de alta luminosidad fabricados por la empresa CMS–SCHREDER.	122
5.2.	LED patrón CMS–SCHREDER F107 medido en el IO–CSIC.	123
5.3.	LED patrón CMS–SCHREDER F108 medido en el IO–CSIC.	123
5.4.	LED patrón CMS–SCHREDER F126 medido en el IO–CSIC.	124
5.5.	LED patrón CMS–SCHREDER F132 medido en el IO–CSIC.	124
5.6.	Error relativo en escala logarítmica entre los laboratorios IO-CSIC y PTB.	125
6.1.	Pieza universal diseñada para sujetar los OLEDs.	130
6.2.	Estabilidad de la iluminancia de los OLEDs.	131
6.3.	Fluctuaciones de la estabilidad.	133
6.4.	Espectros medidos para cada uno de los OLEDs estudiados.	134
6.5.	Esquema de la posición de los elementos que componen el gonioespectrofotómetro.	135
6.6.	Homogeneidad de la superficie del OLED <i>Ph</i> en diferentes posiciones del ángulo azimutal.	137
6.7.	Desviación típica de los valores de homogeneidad en diferentes posiciones azimutales para todos los OLEDs.	137
6.8.	Homogeneidad de la superficie del OLED <i>Ph</i> a diferentes longitudes de onda.	138
6.9.	Desviación típica de los valores de homogeneidad en diferentes longitudes de onda para todos los OLEDs.	139

6.10. Determinación del tamaño de área óptimo de los OLEDs para definir una región uniforme.	140
7.1. Vista esquemática del sistema de coordenadas.	146
7.2. Esquema para la determinación de la irradiancia total en un punto del espacio.	151
7.3. Medida obtenida con el sistema de detección cámara CCD + filtro sintonizable, para los OLEDs LG a un ángulo polar $\theta = 0^\circ$ y a una longitud de onda $\lambda = 550$ nm.	152
7.4. Medida obtenida con el sistema de detección cámara CCD + filtro sintonizable, para los OLEDs <i>Philips</i> y <i>Tridonic</i> a un ángulo polar $\theta = 0^\circ$ y a una longitud de onda $\lambda = 550$ nm.	153
7.5. Medida obtenida con el sistema de detección cámara CCD + filtro sintonizable, para los OLEDs <i>Osram</i> a un ángulo polar $\theta = 0^\circ$ y a una longitud de onda $\lambda = 550$ nm.	153
7.6. Transformación del sistema CRS al sistema SRS para el OLED <i>Lg3</i> en $\lambda = 700$ nm.	154
7.7. Transformación del sistema CRS al sistema SRS para el OLED <i>Ph</i> en $\lambda = 700$ nm.	154
7.8. Transformación del sistema CRS al sistema SRS para el OLED <i>Os2</i> en $\lambda = 700$ nm.	155
7.9. Coeficientes de la matriz $L_{r,0}$ obtenidos con el ajuste para el OLED <i>Lg3</i> a distintas λ	157
7.10. Coeficientes de la matriz $L_{r,0}$ obtenidos con el ajuste para el OLED <i>Os2</i> a distintas λ	157
7.11. Coeficientes de la matriz $L_{r,0}$ obtenidos con el ajuste para el OLED <i>Tr1</i> a distintas λ	158
7.12. Coeficientes de la matriz \mathbf{g} obtenidos con el ajuste para el OLED <i>Lg3</i> a distintas λ	158
7.13. Coeficientes de la matriz \mathbf{g} obtenidos con el ajuste para el OLED <i>Os2</i> a distintas λ	159
7.14. Coeficientes de la matriz \mathbf{g} obtenidos con el ajuste para el OLED <i>Tr1</i> a distintas λ	159
7.15. Valores del primer autocoeficiente (A_1) y autovector ($e_{L,1}$) de los coeficientes de la matriz $L_{r,0}$	161

7.16. Valores de los 3 primeros autocorrientes (B_k) y autovectores ($e_{g,k}$) de los coeficientes de la matriz g	162
7.17. Valores de los 3 primeros autocorrientes (B_k) y autovectores ($e_{g,k}$) de los coeficientes de la matriz g	162
7.18. Valores de los 3 primeros autocorrientes (B_k) y autovectores ($e_{g,k}$) de los coeficientes de la matriz g	163
7.19. Distribución espacial de iluminancia para el OLED $Lg1$ en distintas posiciones del espacio.	164
7.20. Distribución espacial de iluminancia para el OLED $Lg3$ en distintas posiciones del espacio.	165
7.21. Distribución espacial de iluminancia para el OLED Ph en distintas posiciones del espacio.	165
7.22. Desviación relativa entre la iluminancia calculada y la experimental para los OLEDs medidos en diferentes distancias. La distancia está normalizada por el tamaño mayor del semilado o radio de la fuente. . .	166

Índice de tablas

1.1. Materiales utilizados en la fabricación de LEDs.	25
1.2. Resumen de los encapsulados SMD.	29
2.1. Especificaciones del fotómetro P11S0T.	50
2.2. Especificaciones del espectrorradiómetro CS-1000 A.	50
2.3. Especificaciones de la cámara VC-Imager compact CCD.	50
2.4. Especificaciones del filtro sintonizable VariSpec VIS.	51
2.5. Motor de rotación por pasos URS150BPP.	52
4.1. Nomenclatura utilizada para cada uno de los polinomios utilizados.	98
4.2. Valores del ángulo de emisión determinados entre la medida directa y el análisis de Zernike.	103
4.3. Comparación del flujo total entre los valores obtenidos experimentales y los valores obtenidos basados en el análisis de Zernike.	106
4.4. Valores de lambertianidad (g) obtenidos a partir de la ley del coseno de Lambert para cada uno de los LEDs estudiados.	107
5.1. Incertidumbre típica relativa y valor del coeficiente de corrección k_{ccf}	116
5.2. Resumen de las incertidumbres típicas asociadas a la medida.	119
5.3. Resumen de las incertidumbres típicas asociadas al ajuste para los ángulos $\theta = 0^\circ$ y $\varphi = 0^\circ$	121
6.1. OLEDs estudiados.	130
6.2. Estabilidad de los OLEDs.	132
6.3. Características eléctricas para cada uno de los OLEDs.	136
7.1. Valores promedio de \mathbf{L}_V , $\mathbf{L}_{r,0}(\lambda)$ y $\mathbf{g}(\lambda)$	156
7.2. Número de PCA para reconstruir el $x\%$ de la varianza observada en el conjunto de matrices $\mathbf{L}_{r,0}$ y \mathbf{g}	161

Lista de símbolos

Símbolo	Magnitud	Unidades
τ_r	Tiempo de recombinación radiativo	s
τ_n	Tiempo de recombinación no radiativo	s
τ	Tiempo de vida promedio de los portadores	s
η_i	Eficiencia cuántica interna	—
λ	Longitud de onda	m
h	Constante de Planck	$eV \cdot s$
c	Velocidad de la luz	$m \cdot s^{-1}$
E_g	Energía de la banda prohibida	eV
k	Momento	$Kg \cdot m \cdot s^{-1}$
I_c	Intensidad de corriente	A
θ_a	Apertura angular	$^\circ$
I_V	Intensidad luminosa	cd
θ	Angulo polar	$^\circ$
φ	Angulo azimutal	$^\circ$
E_V	Iluminancia	lx
d	Distancia	m
δ_l	Factor de linealidad	—
g	Coefficiente de lambertianidad	—
δ_θ	Factor de direccionalidad	—
$V(\lambda)$	Función de sensibilidad fotópica	—
k_{ccf}	Mismatch factor	—
$S(\lambda)$	Distribución espectral del iluminante	$W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$
$s(\lambda)$	Responsividad espectral	$A \cdot lux^{-1} \cdot nm^{-1}$
δ_τ	Desviación de la estabilidad	—

Símbolo	Magnitud	Unidades
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
$\Delta\delta$	Desplazamiento Virtual de la fuente	m
x	Posición de la fuente	m
r	Tamaño de la fuente	m
Z_n^l	Polinomio de Zernike l de orden n	—
ϑ	Coordenada polar en 2-D	m
ρ	Coordenada radial en 2-D	m
F	Distribución angular	cd
$C_{n,m}$	Coficiente de peso de Zernike m de orden n	cd
BA	Ángulo de emisión	$^{\circ}$
θ_0	Dirección polar del eje óptico	$^{\circ}$
φ_0	Dirección azimutal del eje óptico	$^{\circ}$
U	Inhomogeneidad del LED	—
A	Anisotropía del LED	—
Φ_V	Flujo total luminoso	lm
Φ	Flujo total radiante	W
P_i	Polinomio de Zernike i multiplicado por su respectivo coeficiente de peso	cd
θ_{BA}	Semiángulo de emisión	$^{\circ}$
x_c	Centro de masas de la distribución angular de intensidad luminosa en el eje x	—
y_c	Centro de masas de la distribución angular de intensidad luminosa en el eje y	—
Ω	Ángulo sólido	sr
I_{V_0}	Valor de la distribución angular de intensidad luminosa en la dirección $\theta=0$ y $\varphi=0$	cd
A_r	Área de la superficie estudiada	m^2
δ_L	Desviación de la linealidad	—
δ_{Θ}	Desviación del desalineamiento	—
r_s	Radio de la fuente	m
V	Voltaje de lectura	V
δ_t	Corrección de la deriva temporal	—
k_{KTH}	Desviación del amplificador de corriente	—
k_r	Responsividad del fotómetro	A/lx

Símbolo	Magnitud	Unidades
δ_ε	Corrección de luz esparcida	—
d_b	Tamaño de las barras calibradas	m
d_t	Distancia recorrida del tornillo micrométrico	m
θ_d	Semiapertura del ángulo de desplazamiento	sr
τ_{Ev}	Desviación de la iluminancia con respecto al valor medio	—
δ_χ	Desviación de potencia inyectada al LED	—
E_s	Estabilidad	—
H	Homogeneidad	—
L	Radiancia	$Wm^{-2}sr^{-1}$
E	Irradiancia	Wm^{-2}
I	Intensidad Radiante	Wsr^{-1}
ϕ	Ángulo azimutal	$^\circ$
x_i	Posición i de la subfuente en el sistema de referencia cámara para el eje X	m
y_i	Posición i de la subfuente en el sistema de referencia cámara para el eje Y	m
x'_i	Posición i de la subfuente en el sistema de referencia fuente para el eje X'	m
y'_i	Posición i de la subfuente en el sistema de referencia fuente para el eje Y'	m
x'_0	Posición del centroide de la distribución espacial de radiancia de la fuente en el eje X'	m
y'_0	Posición del centroide de la distribución espacial de radiancia de la fuente en el eje Y'	m
K	Número de píxeles de la fuente que están contenidos en la imagen	—
R_i	Respuesta de la cámara CCD en el pixel i	<i>Cuentas</i> s^{-1}
$L_{r,0,i,j}$	Radiancia relativa de la subfuente (x'_i, y'_j) en $\theta = 0^\circ$	$W m^{-2} sr^{-1}$
$g_{i,j}$	Grado de lambertianidad de la subfuente (x'_i, y'_j)	—
A_k	Autocorrelaciones de L del método de las PCA	$Wm^{-2}sr^{-1}$
B_k	Autocorrelaciones de g del método de las PCA	—
$e_{L,k}$	Autovector del método de las PCA	—
$e_{g,k}$	Autovector del método de las PCA	—

Símbolo	Magnitud	Unidades
N_{red}	Número de elementos necesarios para la reconstrucción de la imagen original	—
N_T	Número total de elementos de la imagen original	—
S_F	Matriz de covarianzas del método de las PCA	—
ν_k	Varianza de los autocorrelaciones del método de las PCA	—
C_{cal}	Factor de calibración de la cámara CCD	$s W \text{ Cuentas}^{-1} sr^{-1} m^{-2}$
A_s	Área de la fuente	m^2
A_d	Área de la fuente simulada en el espacio	m^2
I_{pp}	Intensidad luminosa aparente	cd

Siglas y acrónimos

SSL *Solid State Lighting / Iluminación de estado sólido*

LED *Light Emitting Diode / Diodo Emisor de Luz*

OLED *Organic Light Emitting Diode / Diodo Orgánico Emisor de Luz*

TVS *Transient Voltage Suppressor / Supresor de tensión transitoria*

SMD *Surface Mounted Device / Dispositivo Montado en la Superficie*

COB *Chip On Board / Chip en la Placa*

RGB *Red, Green and Blue / Rojo, Verde y Azul*

CRI *Color Rendering Index / Índice de Reproducción de Color*

COF *Chip On Flexible / Chip Flexible*

UV *Ultraviolet / Ultravioleta*

MQW *Multi-Quantum Well / Múltiples Pozos Cuánticos*

QW *Quantum Well / Pozos Cuánticos*

CO₂ *Carbon Dioxide / Dióxido de Carbono*

EIL *Electron Injection Layer / Lámina de Inyección de Electrones*

ETL *Electron Transport Layer / Lámina de Transporte de Electrones*

EML *Emission Layer / Lámina de Emisión*

HIL *Hole Injection Layer / Lámina de Inyección de Huecos*

HTL *Hole Transport Layer / Lámina de Transporte de Huecos*

HOMO *Highest Occupied Molecular Orbital / Orbital Molecular Ocupado más alto*

LUMO *Lowest Unoccupied Molecular Orbital / Orbital Molecular desocupado más bajo*

SM-OLED *Small Molecule Organic Light Emitting Diode / Diodo Orgánico Emisor de Luz basado en pequeñas moléculas*

PLED *Polymer Organic Light Emitting Diode / Diodo Orgánico Emisor de Luz basado en polímeros*

CVP *Chemical Vapour Phase / Fase de Vapor Químico*

TPD *Triarilamina*

IQE *Efficiency Quantum Internal / Eficiencia Cúantica Interna*

EQE *Efficiency Quantum External / Eficiencia Cúantica Externa*

TOLED *Transparent or Top Organic Light Emitting Diode / Diodo Orgánico Emisor de Luz Transparente o Superficial*

SOLED *Stacked Organic Light Emitting Diode / Diodo Orgánico Emisor de Luz agrupado*

WOLED *White Organic Light Emitting Diode / Diodo Orgánico Emisor de Luz Blanca*

FOLED *Flexible Organic Light Emitting Diode / Diodo Orgánico Emisor de Luz flexible*

PMOLED *Passive Matrix Organic Light Emitting Diode / Matriz Pasiva de Diodos Orgánicos Emisores de Luz*

AMOLED *Active Matrix Organic Light Emitting Diode / Matriz Activa de Diodos Orgánicos Emisores de Luz*

LCD *Liquid Crystal Display / Pantalla de cristal líquido*

LMT *Lichtmesstechnik GmbH Berlin*

CIE *Commission Internationale de L'Éclairage / Comisión internacional de iluminación*

CCD *Charge-Coupled Device / Dispositivo de carga acoplada*

FOV *Field of View / Campo de visión*

ST *Manual Linear Stage / Plataforma de desplazamiento lineal*

BIPM *International Bureau of Weights and Measures / Oficina Internacional de Pesas y Medidas*

CIPM *International Committee of Weights and Measures / Comité Internacional de Pesas y Medidas*

FWHM *Full width at half maximum / Anchura a media altura*

SSE *Sum of Squares Error / Suma Cuadrática de errores*

LSF *Least Squares Fitting/ Ajuste por Mínimos Cuadrados*

JCGM *Joint Committee for Guides in Metrology / Conjunto de Comités de Guías en Metrología*

CEM *Spanish Metrology Center / Centro Español de Metrología*

PTB *Physikalisch-Technischen Bundesanstalt*

PCA *Principal Component Analysis / Análisis de componentes principales*

CRS *Camera Reference System / Sistema de Referencia Cámara*

SRS *Source Reference System / Sistema de Referencia Fuente*

Resumen

El trabajo que aquí se expone tiene tres objetivos claramente diferenciados. El primer objetivo que se abordará en esta memoria será el diseño y construcción de un sistema de medida de la distribución de intensidad luminosa para fuentes basadas en tecnologías de estado sólido. El segundo objetivo consiste en desarrollar un procedimiento para interpolar la distribución angular de intensidad luminosa emitida por fuentes de estado sólido inorgánicas (LEDs), así como la determinación de propiedades ópticas asociadas a su emisión. Por último se plantea el problema del análisis de fuentes de estado sólido orgánicas (OLEDs) extensas.

Después de un estudio bibliográfico de las fuentes de estado sólido se decidió construir un gonioespectrofotómetro capaz de medir en configuración de campo cercano y campo lejano. Este gonioespectrofotómetro nos permite obtener toda la información necesaria de la distribución angular de intensidad luminosa para elaborar un procedimiento válido para el estudio de estas fuentes, gracias a sus tres grados de libertad (ángulo polar (θ), ángulo azimutal (φ) y distancia (d)). El método desarrollado para los LEDs está soportado a través de una base bien conocida, como son los polinomios de Zernike. Esta serie de polinomios se presenta como la base más idónea para describir la distribución angular de intensidad luminosa, debido a que estos polinomios forman una base ortogonal y a que están definidos dentro de un círculo de radio unidad. El método consiste en un ajuste por mínimos cuadrados de los valores de intensidad luminosa con la base de los polinomios de Zernike. Como resultado del ajuste por mínimos cuadrados se obtienen unos coeficientes de peso que acompañan a cada uno de estos polinomios, los cuales describen la distribución angular de intensidad luminosa de la fuente. Una vez determinados los valores de cada uno de los coeficientes, éstos se utilizan para determinar propiedades ópticas de fuentes de estado sólido, (ángulo del haz, eje óptico, anisotropía, inhomogeneidad, lambertianidad y flujo total).

El estudio de los OLEDs se hace a través de su distribución espacial de luminancia. Este estudio se hace usando la configuración de campo cercano mediante una cámara CCD con un filtro sintonizable. De este modo, se puede registrar cada una de las regiones de la fuente de estado sólido extensa, denominadas por nosotros “subfuentes”, en cada una de las longitudes de onda. Para su análisis se desarrolló una metodología que permite obtener toda la información espacial y espectral de la fuente mediante un conjunto de valores relativamente pequeño. La metodología desarrollada tiene la ventaja de que además de describir la fuente de estado sólido orgánica a partir de un conjunto de datos simplificados, puede determinar la iluminancia de una fuente sobre cualquier punto del espacio, de una forma mucho más rápida que el método de trazado de rayos utilizado en la actualidad por los programas de *rendering*.

Introducción

En la actualidad hay una necesidad urgente de reducir el consumo energético mundial, como complemento al esfuerzo de producción de energía sostenible. En ese sentido, el objetivo de la Estrategia Europea 2020 es conseguir un ahorro de consumo energético del 20 % para el año 2020 con un aumento progresivo en años posteriores.

La industria de la Iluminación, es una de las áreas donde es posible obtener grandes logros en temas de eficiencia energética. Es también una de las áreas donde se consume una gran cantidad de energía, por lo que las mejoras en la eficiencia tienen un efecto directo y no trivial en el consumo total de energía. El libro verde de la UE *“Lighting the future-Accelerating the deployment of innovative lighting technologies”*, afirma que el 19 % del consumo de electricidad en todo el mundo se usa para la iluminación, por lo que una iluminación más eficiente puede producir un gran ahorro de energía. Esta es una de las razones por las que la UE decidió la eliminación progresiva de las ineficientes lámparas de incandescencia, en el mercado europeo.

En los últimos años, la industria de la Iluminación, ha experimentado una revolución con la llegada de nuevas tecnologías, en particular fuentes basadas en estado sólido, que incluye tanto diodos emisores de luz no orgánicos (LEDs) como orgánicos (OLEDs). La iluminación con fuentes de estado sólido, en especial los LEDs, presenta a priori, indudables ventajas: fiabilidad, mayor eficiencia energética, mayor resistencia a las vibraciones, mejor visión ante diversas circunstancias de iluminación, menor disipación de energía, menor riesgo para el medio ambiente y la posibilidad de regulación de la luz, que permite una gestión total de la instalación de alumbrado.

Validar las ventajas reclamadas así como facilitar el progresivo desarrollo de este tipo de tecnología, necesita de una determinación exacta y sin ambigüedades de sus características, pues la emisión de este tipo de fuentes es diferente de la de los emisores tradicionalmente empleados en iluminación, lo que hace que los métodos estandariza-

dos de caracterización de los emisores tradicionales no sean de aplicación a esta nueva tecnología.

Conscientes de esta importancia, la Comisión Internacional de Iluminación (CIE), estableció en 2007 una primera recomendación para la medida de algunas de las propiedades de emisión de los LEDs, y más recientemente ha promovido la publicación de un estándar internacional para establecer los requisitos de realizar medidas fotométricas y colorimétricas reproducibles de módulos, lámparas y luminarias LEDs; aunque dicho estándar no incluye los OLEDs. En la actualidad varios comités técnicos de la CIE están trabajando en el desarrollo de recomendaciones para las nuevas generaciones de fuentes de estado sólido, pero el trabajo acaba de comenzar.

Asimismo, la importancia de desarrollar una metrología específica para LEDs y OLEDs, se ve avalada por el desarrollo de proyectos a nivel europeo como son el “*Metrology for Solid State Lighting*” (2010-2013), “*Metrology for Efficient and Safe Innovative Lighting*” (2014-2017) y el “*Future Photometry Based on Solid-State Lighting Products*” (2016-2019). Todos ellos financiados por el *European Metrology Research Programme*, con la participación de los laboratorios nacionales europeos, y en los que ha intervenido el grupo de investigación donde se ha desarrollado este trabajo de investigación.

El Laboratorio de Fotometría, Radiometría y Fibras Ópticas del Instituto de Óptica “Daza de Valdés” del CSIC es el Laboratorio de Referencia a nivel regional, nacional e internacional para las magnitudes relacionadas con la medida de la radiación óptica, y Laboratorio Asociado al Centro Español de Metrología (CEM). Es además miembro de pleno derecho del Comité Consultivo para la Fotometría y la Radiometría del Comité Internacional de Pesas y Medidas, CIPM, y firmante del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo de Laboratorios Nacionales, ratificado por los países miembros de la Convención del Metro. En consecuencia, la misión fundamental de este laboratorio es la de desarrollar, mantener y difundir los patrones para la medida de la radiación óptica.

Para evaluar y mejorar de forma fiable el rendimiento de los LEDs, es necesaria una exacta determinación de su eficacia luminosa (lm/W); lo que implica que es necesario medir con la menor incertidumbre posible el flujo luminoso emitido por este tipo de fuentes de radiación.

El flujo luminoso se define como la integral de la Intensidad Luminosa sobre todo el ángulo sólido de emisión de la fuente (4π estereorradianes); o como la integral de la iluminancia de la fuente a lo largo del área de una superficie imaginaria que rodea a la fuente:

$$\Phi = \int I d\Omega \quad \Phi = \int E dA$$

La medida del flujo luminoso se puede realizar por dos métodos: una esfera integradora y un goniofotómetro. En general el método más simple para la medida del flujo luminoso es el uso de una esfera integradora, por comparación directa con una fuente de referencia. Sin embargo este método presenta errores sustanciales, debidos a la no uniformidad espacial de respuesta de la esfera, si la distribución de intensidad luminosa de la fuente a medir no es uniforme y diferente de la distribución espacial de la fuente de referencia (como ocurre con las fuentes de estado sólido). Por ello en este trabajo de investigación nos hemos fijado como objetivo el diseño y construcción de un gonioespectrofotómetro para la medida de la distribución de intensidad luminosa de fuentes basadas en tecnologías de estado sólido, LEDs y OLEDs.

El sistema desarrollado permite la medida de la distribución angular, espectral y espacial de fuentes de estado sólido, con la posibilidad de realizar medidas tanto en campo cercano como en campo lejano.

Finalizado el diseño y construcción, se ha procedido a la caracterización del sistema, con el objetivo de determinar la incertidumbre de medida asociada al mismo.

A partir de las medidas realizadas sobre una serie de LEDs de distintos fabricantes con diferentes distribuciones espectrales y espaciales, hemos propuesto un método basado en los polinomios de Zernike para interpolar la distribución angular de intensidad luminosa de fuentes LEDs; así como la determinación de características de emisión tales como el ángulo de emisión, la dirección del eje óptico, la inhomogeneidad, la anisotropía o el grado de lambertianidad.

Por último, a partir de las medidas experimentales realizadas en OLEDs, se ha desarrollado un método de procesado de datos fotométricos de campo cercano, que se basa en caracterizar la distribución angular de la luminancia para un número grande de pequeños elementos superficiales de la fuente. Este método permite el cálculo de la iluminancia de una fuente sobre cualquier punto del espacio, de una forma mucho más rápida que el método de trazado de rayos utilizado en la actualidad por los programas de *rendering*.

Parte I

Base teórica y experimental

Capítulo 1

Fundamento teórico de fuentes de estado sólido

Contenido

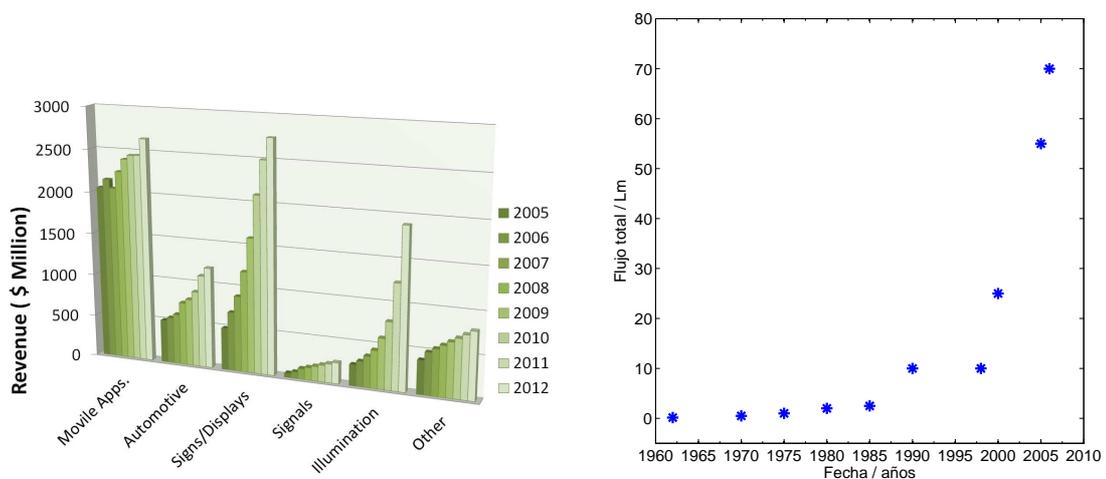
1.1. Principios de las fuentes de estado sólido (LED)	18
1.1.1. Evolución de los LEDs	19
1.1.2. Fundamento Teórico	20
1.1.3. Tipos y Tecnologías básicas de LED	26
1.1.4. Mecanismos de generación de luz blanca	30
1.1.5. Ventajas de la utilización de LEDs	36
1.2. Principios de las fuentes de estado sólido orgánicas (OLED)	36
1.2.1. Avances científicos más relevantes en el desarrollo del OLED	37
1.2.2. Fundamento Teórico	38
1.2.3. Modos de fabricación de OLEDs	39
1.2.4. Clasificación de los tipos de OLEDs	40
1.2.5. Configuración de OLEDs en pantallas	43
1.3. Ventajas y desventajas de la tecnología OLED	45
1.3.1. Ventajas de la tecnología OLED	45
1.3.2. Desventajas de la tecnología OLED	46

1.1. Principios de las fuentes de estado sólido (LED)

La iluminación basada en sistemas de estado sólido (SSL), en particular los LEDs (acrónimo de “*Light Emitting Diode*”), se ha identificado por su eficiencia energética, como una alternativa real a las fuentes de iluminación tradicionales (lámparas de incandescencia y lámparas fluorescentes compactas contaminantes de mercurio). La iluminación con LEDs presenta indudables ventajas: fiabilidad, mayor eficiencia energética, mayor resistencia a las vibraciones, mejor visión ante diversas circunstancias de iluminación, menor disipación de energía, menor riesgo para el medio ambiente, capacidad para operar de forma intermitente de modo continuado y respuesta rápida.

Gracias a estas ventajas los LEDs han ido substituyendo las fuentes tradicionales hasta el punto de que ya las han reemplazado en casi todos los sectores. Como se puede ver en la figura 1.1.a, la tendencia de mercado ha ido creciendo en todos los sectores hasta tener un crecimiento exponencial en los casos de iluminación y de las pantallas (Fig. 1.1.b) [1].

No obstante, el uso de esta nueva tecnología puede verse amenazada si no viene acompañada de una determinación exacta y sin ambigüedades de sus características, pues la emisión de los LEDs es diferente de la de los emisores tradicionalmente empleados en iluminación, lo que hace que los métodos estandarizados de caracterización de los emisores tradicionales no sean de aplicación a esta nueva tecnología.



(a) Progreso de ventas de los LEDs en los últimos años.

(b) Evolución del flujo total emitido por un LED.

Figura 1.1: Evolución de ventas y de eficiencias para fuentes de estado sólido LED.

El reto entonces es desarrollar métodos de medida, nuevos patrones, e instalaciones especializadas para la caracterización de las propiedades de fuentes basadas en tecnologías de estado sólido, en particular LEDs. Asimismo y dado el rápido desarrollo que están experimentando otras tecnologías, como los LEDs orgánicos, y aunque su aplicación en el mercado de la iluminación no se haya extendido todavía, parece conveniente extender estos estudios a la tecnología de los OLEDs.

1.1.1. Evolución de los LEDs

El primer LED comercialmente utilizable fue desarrollado en el año 1962 combinando Galio, Arsénico y Fósforo (*GaAsP*) con lo cual se consiguió un LED rojo (650 nm) con una intensidad relativamente baja [2, 3, 4]. El siguiente desarrollo se basó en el uso del Galio en combinación con el fósforo (*GaP*), con emisión en la banda del orden de los 700 nm. Los siguientes desarrollos, ya en la década de los 70, introdujeron nuevos colores al espectro. Distinta proporción de materiales produjo distintos colores como el verde y rojo utilizando *GaP* y ámbar y rojo utilizando *GaAsP*. También se desarrollaron LEDs infrarrojos, muy usados en controles remotos.

En la década de los 80 un nuevo material entró en escena, el *GaAlAs*. Con la introducción de este material el mercado de los LEDs empezó a despegar ya que proveía un mayor rendimiento. Su brillo era aproximadamente 10 veces superior y además se podía utilizar a elevadas corrientes. Sin embargo, este material se caracteriza por tener varias limitaciones. La primera y más evidente es que sólo se conseguían longitudes de onda de emisión del orden de los 660 nm y además se degradan más rápidamente en el tiempo que los otros materiales, efecto que se hace más notorio ante elevadas temperaturas y humedad.

En los 90 apareció en el mercado tal vez el más exitoso material para producir LEDs, el *AlInGaP*. Las principales virtudes de este compuesto son que se puede conseguir una gama de colores que van desde el rojo al amarillo, cambiando la proporción de los materiales que lo componen, y segundo, su vida útil es sensiblemente mayor.

A final de los 90 se cerró el círculo sobre los colores, cuando gracias a los trabajos de los investigadores Shuji Nakamura, Isamu Akasaki y Hiroshi Amano, se llegó al desarrollo del LED azul. La aparición de este LED permitió la posibilidad de obtener luz blanca, e iniciar la revolución de la utilización del LED como fuente de iluminación. La importancia de este desarrollo se ha visto plasmada en la concesión del Premio Nobel de Física en 2014 a los tres investigadores japoneses.

1.1.2. Fundamento Teórico

Los LEDs son dispositivos electrónicos que sólo permiten el tránsito de electrones en una única dirección. El principal objetivo de un LED es la emisión de luz cuando a través de éste pasa una corriente eléctrica.

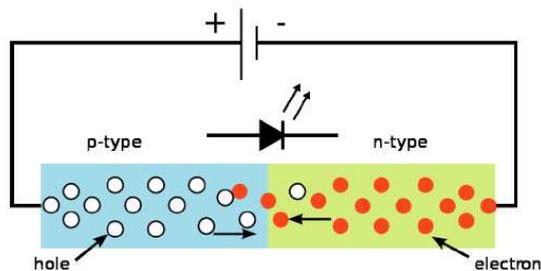


Figura 1.2: Movimiento de los portadores con polarización directa.

Para que estos diodos funcionen correctamente se polariza el semiconductor de forma directa (Fig. 1.2), esto quiere decir, que el gradiente de tensión entre el cátodo y el ánodo es empleado en disminuir la barrera de potencial. Esto provoca un flujo de corriente entre la región tipo P, semiconductor cargado de huecos, y la región tipo N, semiconductor cargado de electrones, es decir, los huecos son inyectados desde la región tipo P hacia la región tipo N y los electrones son inyectados desde la región tipo N hacia la región tipo P [5, 4, 6]. Esto ocasiona una alteración en las condiciones de equilibrio del material. Por este motivo los portadores minoritarios se ven obligados a recombinarse con los portadores mayoritarios hasta alcanzar un equilibrio térmico. De este modo se establece una recombinación de los portadores igual que la inyección de portadores.

Este proceso de recombinación de los portadores minoritarios no es instantáneo, el cual, tiene que encontrar que ambos portadores satisfagan el principio de conservación de la energía y del momento. En cuanto la conservación de energía es fácilmente satisfecha debida a que se puede liberar un fotón del par electrón–hueco, mientras que el principio de conservación de momento es más complicado ya que el fotón no contribuye en este aspecto. Además el proceso de recombinación se da cuando el electrón y el hueco tienen un momento idéntico pero de signo contrario. Por tanto el proceso de recombinación electrón-hueco no es instantáneo por lo que la recombinación entre el electrón y el hueco queda limitada al tiempo de vida media del electrón. Esto quiere decir que el proceso de recombinación entre el electrón y el hueco queda limitado en tiempo hasta que un fotón se combine de nuevo con el electrón. Este tiempo promedio

de recombinación radiativo, τ_r , se puede ver como el tiempo que transcurre desde que el portador minoritario es inyectado hasta que encuentra un portador mayoritario con el momento adecuado para no violar el principio de conservación del momento.

Desafortunadamente este proceso no es tan “sencillo” como acabamos de decir, ya que en el proceso de recombinación el portador minoritario se puede encontrar con defectos cristalinos (tales como impurezas), dislocaciones que pueden retener al portador inyectado. Además el proceso de recombinación no es instantáneo debido a que este portador tiene que desplazarse hasta la zona de recombinación. Este proceso de recombinación no radiativo es caracterizado por un tiempo de vida, τ_n .

Debido a estos problemas, el principal interés a la hora de diseñar LEDs es maximizar la recombinación radiativa frente a la recombinación no radiativa. En otras palabras, es interesante desarrollar condiciones donde el proceso de recombinación radiativa ocurra con bastante rapidez comparado con la recombinación no radiativa. La eficiencia del proceso de generación de luz se puede describir mediante la fracción de tiempo de los portadores minoritarios que se recombinan y los portadores inyectados. La combinación de ambos procesos conduce a un tiempo de vida media τ .

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_n} \quad (1.1)$$

Con esta ecuación se puede expresar la eficiencia cuántica interna como:

$$\eta_i = \frac{\tau_r}{\tau_r + \tau_n} \quad (1.2)$$

A partir de la ecuación anterior se pueden discernir dos casos para obtener una alta eficiencia cuántica. El primer caso es que el material esté libre de imperfecciones (τ_n grande) y el segundo caso es que el proceso de recombinación se dé de manera instantánea (τ_r pequeño). Estas dos condiciones implicarían una eficiencia cuántica próxima al 100 %. En estas condiciones de eficiencia se encuentra en los materiales que pertenecen a las familias III-V, las cuales tienen una eficiencia cuántica interna alta.

Para encontrar materiales adecuados para una alta eficiencia cuántica es necesario entender la estructura de bandas de un semiconductor. La estructura de bandas describe las distribuciones de energía y de momento permitidas para los electrones y para los huecos.

1.1. Principios de las fuentes de estado sólido (LED)

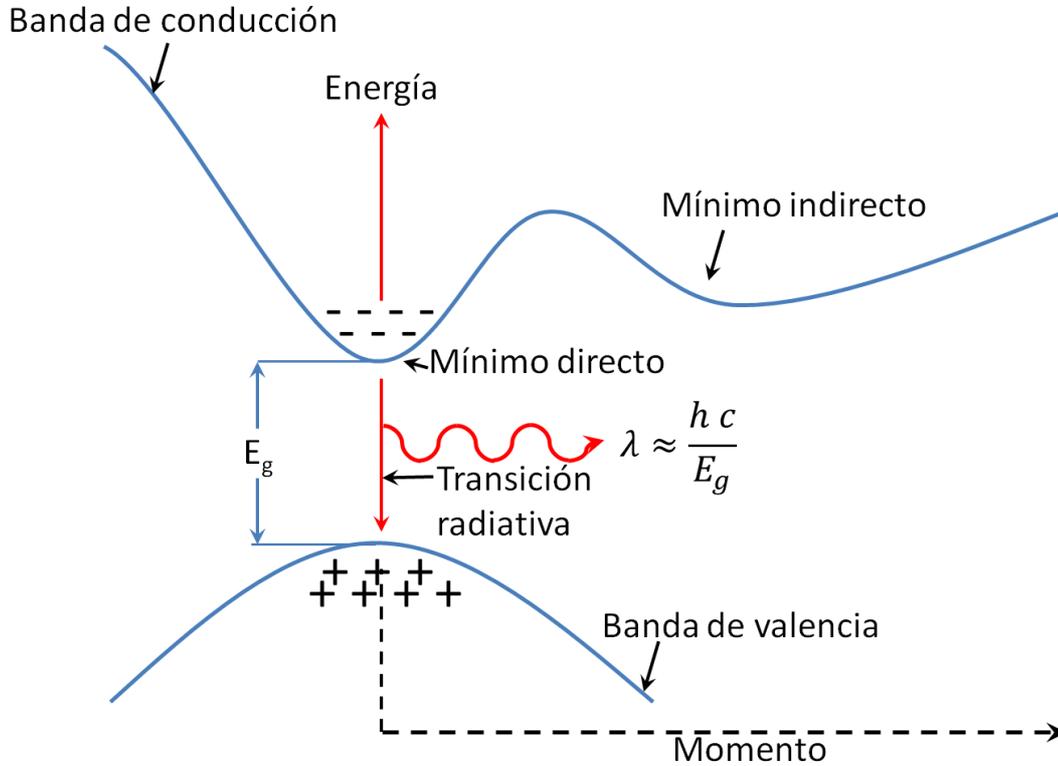


Figura 1.3: Estructura de las bandas de energía de un semiconductor directo en un proceso de recombinación de electrón-hueco.

Como se observa en la figura 1.3 los huecos ocupan la zona más elevada de la banda de valencia, la cual tiene un momento pequeño. En el caso de los electrones estos ocupan la zona más baja de la banda de conducción. Esto lleva a un problema dependiendo del material utilizado a la hora de construir el LED, ya que al tener múltiples valles en la banda de conducción puede ser que los electrones tengan un momento diferente. Dependiendo de esta colocación de los electrones estos materiales se pueden clasificar como directos o indirectos. Si el material es de tipo directo esto implica que el mínimo de la banda de conducción coincide en momento con el máximo de la banda de valencia, lo cual implica que el tiempo de recombinación radiativa, τ_r , es pequeño. Para materiales de tipo indirecto el mínimo de la banda de conducción tiene un momento mayor. Esto implica que el mínimo de la banda de conducción no coincide con el máximo de la banda de valencia, produciéndose una recombinación de los portadores minoritarios no radiativa.

En un semiconductor directo, tal como *GaAs*, el tiempo de vida radiativa τ_r está en el rango de 1 a 100 ns, dependiendo de la temperatura, del dopado y de otros factores. En este material es fácil hacer crecer el cristal con una densidad baja de defectos en

el material teniendo así un valor de τ_n en el mismo rango que τ_r . Para los semiconductores, tales como el germanio o el sílice, el proceso de recombinación radiativa es prácticamente improbable, y τ_r está en torno a los segundos. En este caso $\tau_r \gg \tau_n$ y prácticamente todos los portadores inyectados se recombina no radiativamente.

La longitud de onda de los fotones emitidos en la recombinación radiativa es proporcional a la diferencia de energía entre la recombinación del par electrón–huevo situados en el máximo de la banda de valencia (huecos) y el mínimo de la banda de conducción (electrones).

$$\lambda \approx \frac{hc}{E_g} \quad (1.3)$$

Donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz y E_g es la diferencia entre la banda de conducción y la banda de valencia. Esta ecuación es una aproximación ya que los huecos y los electrones son térmicamente distribuidos en niveles ligeramente por debajo en la banda de valencia y por encima en la banda de conducción. Esto se traduce en que la longitud de onda de los fotones emitidos tienen un cierto ancho, en los límites de longitud de onda emitidos.

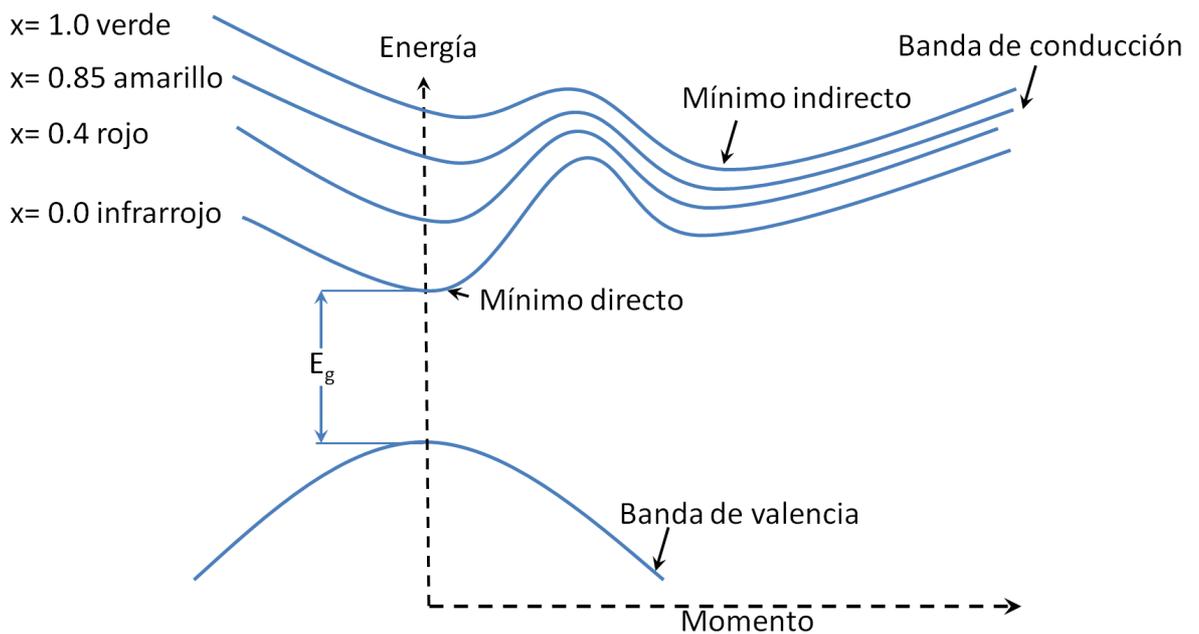


Figura 1.4: Diagrama de energía de bandas para varias aleaciones de $GaAs_{1-x}P_x$.

1.1. Principios de las fuentes de estado sólido (LED)

Con esta observación es fácil pensar que para cambiar la longitud de onda o la energía de la luz emitida sólo hay que modificar la energía de la banda prohibida E_g . Por ejemplo, *GaAs* tiene una $E_g = 1,4 \text{ eV}$, la cual equivale a una emisión de 900 nm. Para lograr una emisión en el visible es necesario elevar la energía de la banda prohibida a $E_g = 1,9 \text{ eV}$. Esto se puede conseguir mediante la mezcla de este material con otros materiales como el *P*. Con esta mezcla, $GaAs_{1-x}P_x$, se consigue una $E_g = 2,3 \text{ eV}$, siendo esta energía variable en función del porcentaje de material añadido.

Como se muestra en la figura 1.4 el mínimo directo se mueve más rápidamente que el mínimo indirecto. Esto sirve para jugar con la longitud de onda con la que salen los fotones del material, es decir, si $x=0.85$ se tiene que la proporción en el material de *As* es del 85 % y la del *P* es del 15 % estando la emisión en la longitud de onda de los amarillos. Pero esta modificación de los niveles de energía no es tan buena como se puede llegar a pensar, ya que la modificación de los niveles de la banda de conducción implica que los electrones pueden repartirse a lo largo de esta banda. Esto ocasiona que la cantidad de electrones con el momento adecuado es menor, ocasionando una caída de la eficiencia cuántica cuando el mínimo indirecto sea menor que el mínimo directo.

Esta discusión indica que los semiconductores indirectos son los menos apropiados para realizar una recombinación de portadores eficiente. Afortunadamente, la inclusión en el material de impurezas neutras electrónicas puede evitar estas limitaciones e introducir nuevos procesos de recombinación radiativos. Para ello sólo basta con substituir un átomo de fósforo *P* por uno de nitrógeno *N*, creando de este modo trampas electrónicas (Fig. 1.5). La cantidad de electrones del átomo de nitrógeno, con 5 electrones en su capa más externa, hace que se compense con el átomo de fósforo, dando como resultado una trampa electrónicamente nula. Sin embargo, la fuerte electronegatividad del nitrógeno puede capturar un electrón de la banda de conducción. Sin embargo la fuerte unión del electrón con esta banda hace que la función de onda en el espacio de momentos se expanda y tenga una magnitud razonable de $k=0$ en este espacio. Los defectos de carga negativa pueden atraer un hueco libre de la banda de valencia formando así un par electrón-hueco o "exciton". Este exciton tiene una alta probabilidad de recombinarse radiativamente, siendo su energía menor que E_g . Además como resultado de esta unión se tiene que el tiempo de vida medio para este tipo de recombinación oscila entre los 100 ns y los 1000 ns.

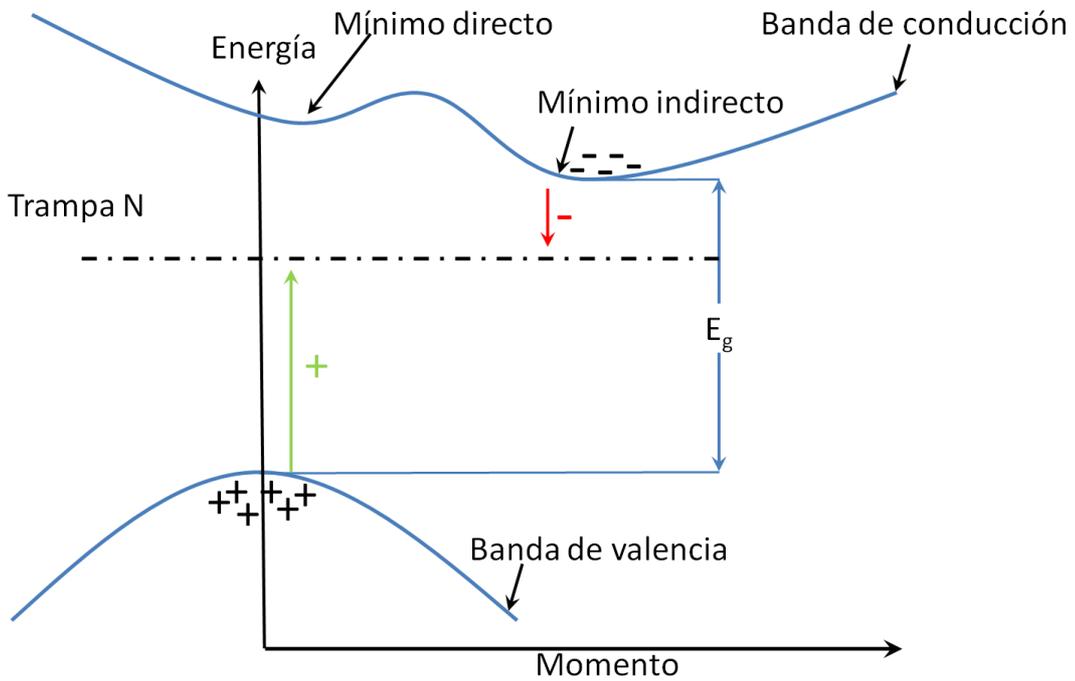


Figura 1.5: Formación de excitones (par electrón-hueco) por la inclusión de dopantes neutros N en un semiconductor indirecto.

Dependiendo de los materiales utilizados (Tab. 1.1) los LEDs pueden emitir en distintas zonas del espectro electromagnético.

Tabla 1.1: Materiales utilizados en la fabricación de LEDs.

Composición	Formulación Química	Color	λ / nm
Arseniuro de Galio	<i>GaAs</i>	Infrarrojo	940
Arseniuro de Galio y Aluminio	<i>AlGaAs</i>	Infrarrojo	890
Arseniuro fosfuro de Galio	<i>GaAsP</i>	Rojo	630
Fosfuro de Galio	<i>GaP</i>	Verde	555
Nitruro de Galio	<i>GaN</i>	Verde	525
Seleniuro de Zinc	<i>ZnSe</i>	Azul	—
Carburo de Silicio	<i>SiC</i>	Azul	480
Nitruro de Galio e Indio	<i>InGaN</i>	Azul	450
Diamante	<i>C</i>	ultravioleta	—

1.1.3. Tipos y Tecnologías básicas de LED

En la actualidad hay una gran diversidad de modelos disponibles en el mercado, aunque el funcionamiento básico de cada uno de ellos es el mismo. Fijándose en la cantidad de potencia consumida, estos LEDs se pueden separar en 2 grupos diferentes: alta luminosidad y alta potencia.

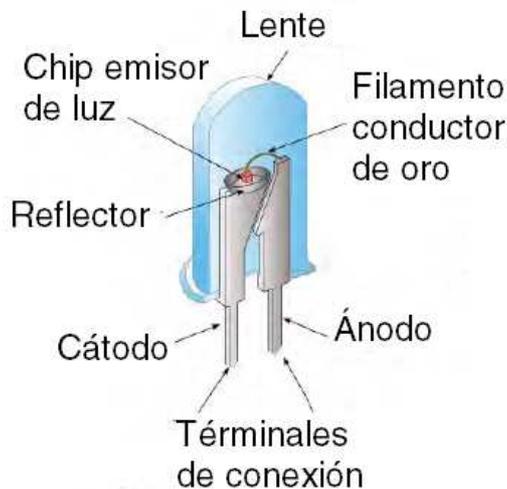
1.1.3.1. LED de alta luminosidad

El límite de potencia para ser clasificados en un grupo o en otro, se establece en los 20 mA aproximadamente. Este tipo de LEDs (Fig. 1.6.b) son considerados de alta luminosidad ($I_c \leq 20 \text{ mA}$) porque tienen un gran rendimiento óptico, además de un ángulo sólido de emisión reducido. Este tipo de dispositivos suelen tener aperturas angulares de emisión iguales o inferiores a $\theta_a \leq 90^\circ$.

Debido a la baja intensidad en la emisión de luz de estos LEDs son denominados, en algunos casos, como LEDs indicadores. Estos LEDs reciben este nombre, porque suelen usarse como indicadores en los dispositivos electrónicos para mostrar el estado del equipo. La utilización de estos dispositivos es muy habitual para esta finalidad debido al bajo coste y a su fácil incorporación en los diferentes paneles.

Los LEDs de alta luminosidad son comúnmente conocidos por la forma de carcasa exterior que tienen (ver Figura 1.6.b). Este tipo de encapsulado está designado por los fabricantes de luminarias de incandescencia como $T - 1$ y $T - 1\frac{3}{4}$ [7]. Esta nomenclatura hace referencia al diámetro del encapsulado en octavos de pulgada, es decir, la equivalencia a un diámetro de 5 mm aproximadamente.

Este tipo de LEDs, como se puede ver en la Figura 1.6.a, está diseñado de una forma muy eficiente, en cuanto a elementos utilizados en la construcción para aprovechar al máximo la emisión del chip. En la Figura 1.6.a se muestra que el LED está compuesto por un cátodo, el cuál va unido en su parte superior a un reflector parabólico que contiene el chip emisor. Esta distribución permite utilizar el reflector parabólico con dos finalidades. La primera, el reflector redirige todos los rayos emitidos por el chip en una misma dirección. La segunda y más importante, es que a su vez el reflector es usado para disipar el calor generado por el semiconductor cuando emite luz. Esta solución permite alargar la vida media de este tipo de fuentes. Para cerrar el circuito se conecta el semiconductor al ánodo mediante un filamento conductor de oro que permite el tránsito de corriente entre el ánodo y el cátodo. Para finalizar la construcción se recubre la fuente con un tipo de resina que permita la dilatación de los metales del interior y que a su vez funciona como lente para direccionar la luz.



(a) Elementos que componen un LED de alta luminosidad.

(b) Aspecto comercial de un LED de alta luminosidad.

Figura 1.6: Estructura de un LED de alta luminosidad.

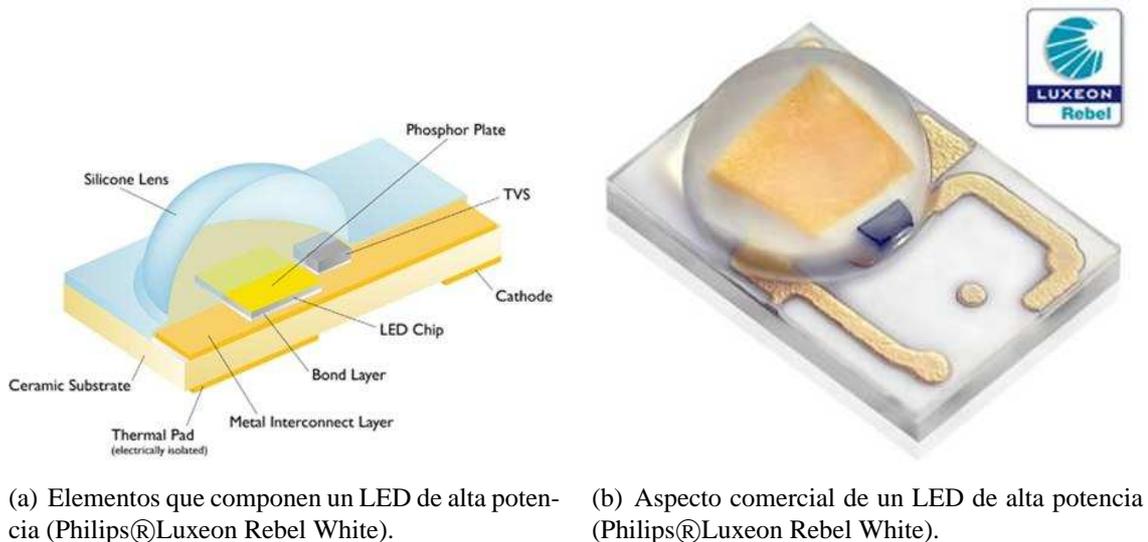
1.1.3.2. LED de alta potencia

Los avances tecnológicos han revolucionado el concepto de fuente de estado sólido hasta el punto de pasar de ser simples indicadores a fuentes de iluminación. A diferencia de los LEDs de alta luminosidad, los LEDs de alta potencia son utilizados en lámparas por su elevada intensidad luminosa y por su mayor apertura angular ($\theta_a \approx 110^\circ$). Este tipo de LEDs (Fig. 1.7.b) son considerados de alta potencia porque funcionan con una intensidad de corriente eléctrica igual o superior a 350 mA [8, 9, 10]. Este incremento de potencia, se debe principalmente, al aumento de la zona de disipación de calor, ya que este diseño permite un chip emisor de mayor tamaño, aumentando así el calor generado por éste.

En la figura 1.7.a se puede observar un corte transversal donde se muestran los elementos que forman un LED de alta potencia. Para este caso se expondrá un esquema de uno de los LEDs que serán estudiados en capítulos siguientes, *Philips® Luxeon Rebel White*. Se observa que este tipo de LEDs tienen la conexión de la corriente en la parte inferior del LED. Esto permite un aislamiento eléctrico, gracias al sustrato de cerámica que hay, entre la lámina metálica que conecta el cátodo del soporte con la lámina de unión del chip del LED. El chip del LED es el responsable de que se produzca la electroluminiscencia explicada en la subsección 1.1.2. Este tipo de LEDs tienen además un protector contra la tensión *Transient Voltage Suppressor* (TVS). Una

1.1. Principios de las fuentes de estado sólido (LED)

vez construido el LED se le añade una lente de silicona, que será principalmente la responsable de la emisión de luz del LED.



(a) Elementos que componen un LED de alta potencia (Philips®Luxeon Rebel White).

(b) Aspecto comercial de un LED de alta potencia (Philips®Luxeon Rebel White).

Figura 1.7: Estructura del LED de alta potencia *Philips Luxeon Rebel*.

Incluso con los LEDs de alta potencia, la cantidad de luz que se obtiene a la salida, obliga en determinadas aplicaciones al uso de un número elevado de ellos para obtener la cantidad de luz deseada. En un esfuerzo de aumentar esa cantidad de luz, se ha trabajado en el desarrollo de diferentes tipos de encapsulado (lo que ha permitido asimismo aumentar su vida útil), que permiten solventar las dificultades anteriores [11].

En la actualidad los tipos de encapsulado más habituales son el SMD (*Surface Mounted Device*) y el COB (*Chip On Board*) [12, 13, 14, 15, 16, 17, 18].

LED SMD: Se trata de un LED encapsulado en una resina semirrígida y que se ensambla de manera superficial. Esto le ofrece ciertas características muy interesantes para todo el mundo de la iluminación:

- Su encapsulado permite una gran superficie semiconductor, lo que proporciona una gran cantidad de luz mejorando la calidad del LED.
- Una forma de instalación es colocarlos en serie sobre algún circuito impreso (montaje superficial o SMD) para crear una bombilla. Aunque se dañe alguno de estos LEDs, cuentan con un dispositivo que los suplen para que los demás sigan funcionando a pleno rendimiento.

- Permiten una amplia variedad de colores, según el material semiconductor que se utilice en su fabricación. En su modelo RGB (Red, Green y Blue), utiliza tres LEDs con los colores primarios, con lo que puede desarrollar hasta 16 millones de colores mediante la mezcla aditiva. El usuario puede seleccionar el color deseado mediante un mando a distancia o controlador, subir o bajar la intensidad de la luz y hacer increíbles efectos luminosos.
- El índice de reproducción de color (CRI) es alto, de hasta el 80 %. Esto quiere decir que reproduce los colores fielmente.
- Al no tener filamento, son resistentes a los golpes y es realmente complicado que se averíen. El tiempo estimado de vida útil de un LED SMD ronda las 50.000 horas, o lo que es lo mismo, casi 6 años funcionando las 24 horas del día.
- El nombre del LED SMD suele ir acompañado de las medidas del encapsulado. De esta manera, los que más se han estandarizado (hablamos siempre para iluminación) son el SMD 3528 y el SMD 5050.



Figura 1.8: Tira de LEDs SMD 5050.

Tabla 1.2: Resumen de los encapsulados SMD.

	Led/metro	W/metro	lm/metro	Tamaño / mm
SMD3528	60	4.8	330-360	3.5x2.8
SMD3014	120	9.6	660-720	3.5x2.8
SMD5050	60	14.4	990-1080	5.0x5.0
SMD2835	60	12	1300	2.8x3.5
SMD2835	120	24	2600	2.8x3.5
SMD5630	60	14.4	2700	5.6x3.0
SMD5730	60	14.4	2900	5.7x3.0

LED COB: Este acrónimo corresponde a las siglas “*Chip on board*” (“chip en la placa”), en el cual se han insertado multitud de LEDs en un mismo encapsulado.

Este tipo de encapsulado se está imponiendo poco a poco en el mercado por encima del SMD. El motivo principal es que nos proporciona más rendimiento lumínico: esto

1.1. Principios de las fuentes de estado sólido (LED)

quiere decir que con la misma potencia y tamaño, un LED COB aporta más luz que el SMD.

Esto dota al LED COB de ciertas ventajas:

- Al proporcionarnos más luz, no necesitamos concentrar tanto el haz de luz para conseguir suficiente intensidad lumínica. De esta manera, hay muchos productos con este tipo de LEDs que emiten con un ángulo de apertura de hasta 160°.
- El LED COB tiene un mayor CRI que el SMD, por lo que conseguimos una luz de mayor calidad. En la mayoría de los casos, el CRI es mayor de 90.
- Emiten una luz multidireccional y no causan deslumbramiento.

Otros beneficios incluyen compatibilidad con una variedad de controladores estándar (incrementos de 350 mA) y componentes ópticos, que ofrece mayor flexibilidad de diseño y más opciones, contribuyendo a acortar los ciclos de desarrollo del producto y reducir los costes.



Figura 1.9: LED COB.

En la actualidad todavía se sigue trabajando en la mejora del rendimiento de estas fuentes como son los LEDs COF “*Chip on flexible*” y los LEDs “*flip-chip*”[19, 20].

1.1.4. Mecanismos de generación de luz blanca

La obtención de “luz blanca”, es posible principalmente mediante uno de los siguientes métodos indirectos:

- Utilización de LEDs RGB.
- Utilización de LEDs de emisión azul (o UV) + encapsulado con recubrimiento fosfórico.

1.1.4.1. LEDs RGB

EL primer proceso de fabricación de LEDs blancos es mediante la unión de tres tipos de LEDs de alta potencia diferentes. Los LEDs RGB están basados en la utilización de tres LEDs que cubran todo el rango electromagnético visible (Red,Green,Blue=RGB) bajo un mismo encapsulado. De este modo, la emisión producida por los 3 LEDs conjuntamente proporciona al observador una sensación de luz blanca. Si observamos la Fig. 1.10 se ve como el espectro de esta fuente está claramente diferenciado por tres picos de emisión correspondientes a cada uno de los LEDs de alta potencia.

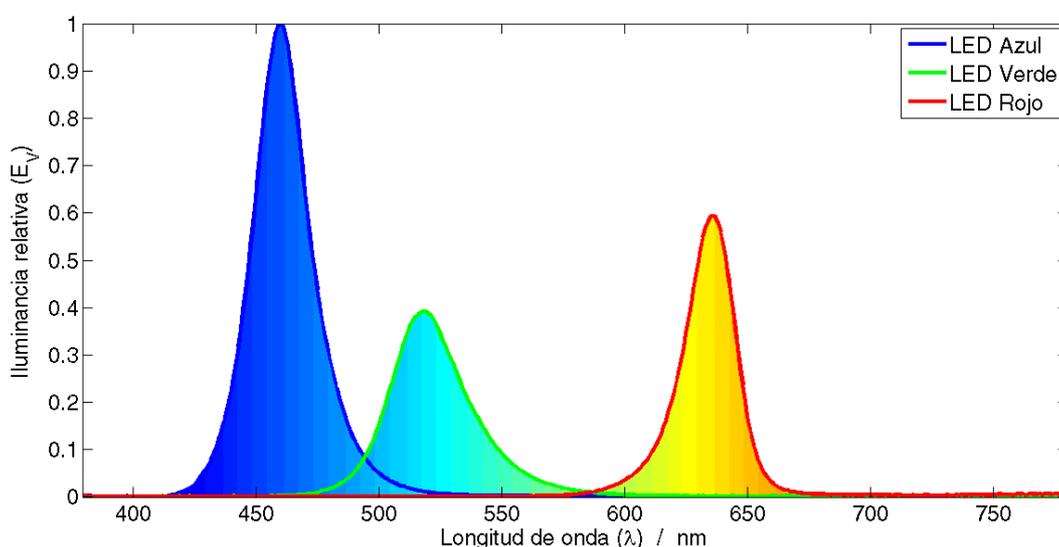


Figura 1.10: Espectro de un LED RGB.

Presentan la ventaja de una alta eficiencia y la posibilidad de un cambio dinámico del color. Sin embargo su estabilidad no es muy alta debido a un envejecimiento desigual de los distintos LEDs.

1.1.4.2. LEDs con fósforo

El segundo proceso, y el más extendido hasta ahora, es la fabricación de LEDs blancos a partir de un LED azul. El proceso consiste en la utilización de un LED azul con un recubrimiento de fósforo encima del chip emisor. Con el segundo procedimiento se obtienen LEDs blancos debido a que la emisión del azul es reabsorbida por el fósforo que hay encima del chip. Esta emisión es de nuevo emitida en diferentes longitudes de onda por el recubrimiento de fósforo (Figs. 1.11.a, 1.11.b, 1.11.c y 1.11.d). De este modo proporciona una sensación de luz blanca al observador como en el caso anterior.

1.1. Principios de las fuentes de estado sólido (LED)

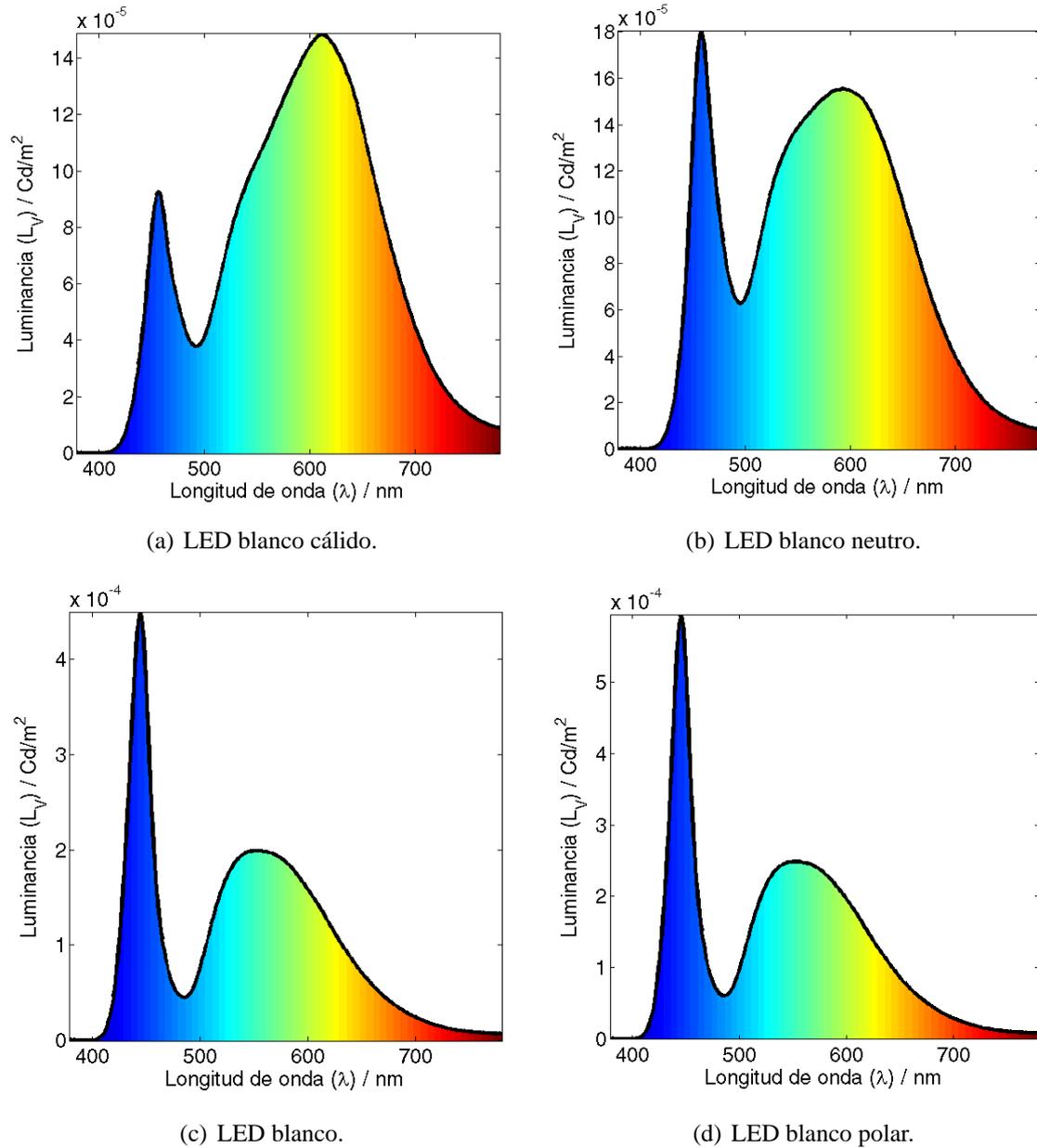


Figura 1.11: Espectros de diferentes tipos de LEDs blancos.

Este método tiene la ventaja de poder crear distintos tipos de blancos. El tipo de blanco resultante vendrá determinado por el espesor de la capa de fósforo. En función del espesor de esta capa se obtienen LEDs con distintos tipos de blancos. Estos van desde el blanco polar para aquellos que tienen un espesor de fósforo pequeño hasta el blanco cálido para aquellos con mayor espesor de fósforo.

1.1.4.3. LEDs libres de fósforo

Los LEDs libres de fósforo tienen como finalidad emitir luz blanca sin necesidad de utilizar fósforo como paso intermedio [21]. Este planteamiento surge como consecuencia de una mejora de las propiedades eléctricas de los LEDs basados en fósforo. Este tipo de LEDs tiene una desventaja con respecto a los LEDs libres de fósforo, y es que necesita el fósforo como elemento, para transformar la luz azul emitida en luz blanca. Esto proporciona un problema para la reproducción cromática de LEDs del mismo tipo, ya que depende del espesor de este recubrimiento. Otro problema añadido es que debido al recubrimiento, éste tipo de LEDs tienen una eficiencia energética menor, ya que hay parte de la radiación que es absorbida por el fósforo. Por último, el recubrimiento implica que el semiconductor esté sometido a temperaturas más altas. De este modo impide que los tiempos de vida medios sean superiores.

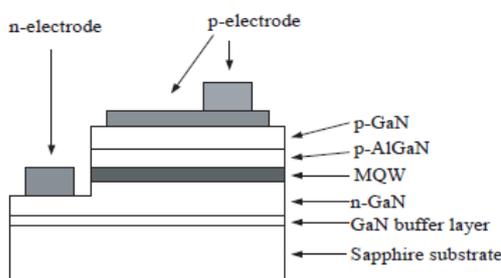
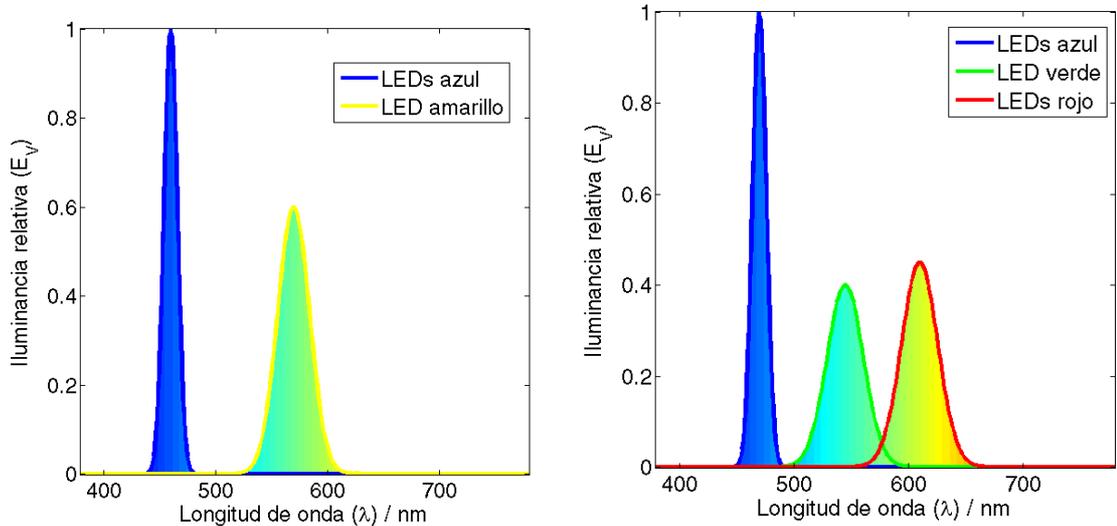


Figura 1.12: Estructura interna del semiconductor para un LED libre de fósforo.

Para solventar todos estos inconvenientes, han surgido los LEDs libres de fósforo. A diferencia de los LEDs anteriores, éstos LEDs tienen un esquema de semiconductor diferente (Fig. 1.12). La diferencia con respecto a otros tipos de semiconductores radica en la región activa. Esta lámina es capaz de emitir en diferentes longitudes de onda, mediante múltiples pozos cuánticos (*multi-quantum well=MQW*). Debido a este diseño de semiconductor, se pueden fabricar dos tipos de regiones MQW diferentes para la emisión de luz blanca. El primer tipo consiste en colocar 3 pozos cuánticos (QW) capaces de emitir en longitudes de onda de 460 nm (azul) y 1 QW capaz de emitir en la longitud de onda de 570 nm (amarillo) como muestra la Figura 1.13.a. El segundo tipo de LEDs se basa en la utilización de 2 QWs capaces de emitir en longitudes de onda de 610 nm (rojo), 1 QW en la longitud de onda de 545 nm (verde) y 2 QWs en longitudes de onda 470 nm (azul) como muestra el espectro de la Figura 1.13.b).

1.1. Principios de las fuentes de estado sólido (LED)



(a) Espectro de un LED libre de fósforo de tipo 1 ($\lambda_{\text{azul}} = 460$ nm y $\lambda_{\text{amarillo}} = 570$ nm).

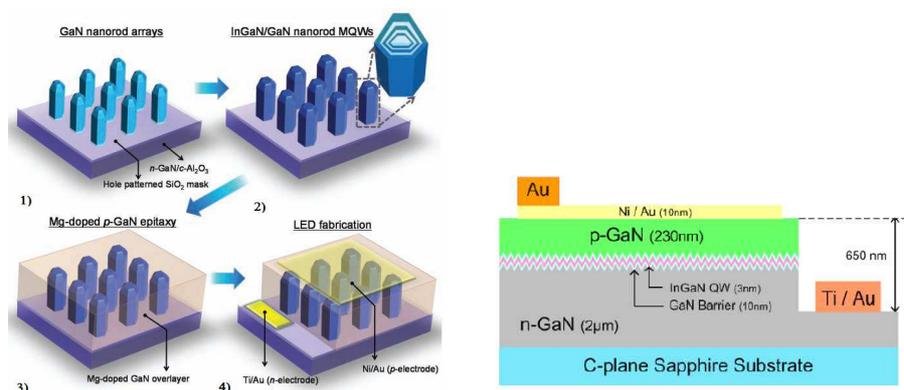
(b) Espectro de un LED libre de fósforo de tipo 2 ($\lambda_{\text{azul}} = 470$ nm, $\lambda_{\text{verde}} = 545$ nm y $\lambda_{\text{rojo}} = 610$ nm).

Figura 1.13: Espectro de cada uno de los tipos de LEDs libres de fósforo.

1.1.4.4. LEDs nanoestructurados

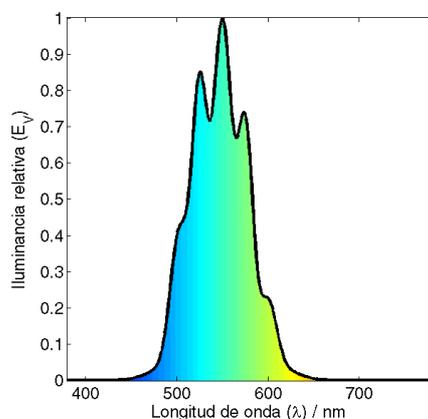
Los LEDs nanoestructurados [22, 23] al igual que los LEDs libres de fósforo son otro proceso de fabricación de LEDs blancos. La importancia de este método de fabricación consiste en una mejora de la eficiencia luminosa del chip emisor mediante nanoestructuras creadas en el semiconductor (Fig. 1.14.a). La técnica de construcción se basa en la deposición de materiales semiconductores, como en el caso anterior, sobre una lámina de zafiro. A diferencia de los LEDs libres de fósforo, el proceso de fabricación se interrumpe en la región n-GaN (Fig. 1.14.b). En este punto se deposita en la superficie de este material una sustancia corrosiva que elimina parte del material de la capa. Este proceso se realiza en una atmosfera con un alto contenido en amonio y en silano. Con estas sustancias disueltas en el ambiente se consigue generar en la superficie del material nanoestructuras piramidales (Fig. 1.14.a1). Estas estructuras son la base para la deposición de diferentes regiones con múltiples pozos cuánticos. El crecimiento de estas estructuras se puede ver mediante el corte realizado en la superficie de una de las estructuras (Fig. 1.14.a2). Los pozos cuánticos generados en estas estructuras se diferencian de la estructura de los LEDs libres de fósforo, porque contiene 4 longitudes de onda diferentes distribuidas a lo largo del espectro visible. Estos pozos son capaces de emitir en longitudes de onda pertenecientes al azul, verde, amarillo y rojo (Fig. 1.14.c). Una vez realizadas las nanoestructuras se reanuda el proceso de

fabricación depositando la región p-GaN y los contactos metálicos (Fig. 1.14.b). Este proceso permite mejorar las características electrónicas de los LEDs libres de fósforo. Las mejoras se basan principalmente en que hay un número menor de reflexiones internas de electrones debido al cambio del índice de refracción. Otra de las ventajas que proporciona este tipo de LEDs es que, el campo eléctrico interno generado por las cargas de polarización es menor. Esto permite que no haya una caída en la densidad de corriente de un sustrato a otro, proporcionando una mejor eficiencia eléctrica.



(a) Estructura interna de un LED nanoestructurado.

(b) Diseño del semiconductor de un LED nanoestructurado.



(c) Simulación de un espectro de un LED nanoestructurado.

Figura 1.14: Características de un LED nanoestructurado.

1.2. Principios de las fuentes de estado sólido orgánicas (OLED)

1.1.5. Ventajas de la utilización de LEDs

- Estas fuentes luminosas son menos contaminantes para el medio ambiente debido a que no contienen mercurio ni tungsteno. Además este tipo de fuentes reduce hasta en un 80 % las emisiones de CO_2 .
- Tiene un gran número de ciclos de encendido sin afectar a su vida útil.
- El tiempo de vida útil es muy superior al tiempo de vida útil de las fuentes luminosas que se han venido usando hasta el momento.
 - Lámpara incandescente: 1000 h.
 - Lámpara incandescente halógena de tungsteno: 2000 h - 5000 h.
 - Lámpara de sodio de Baja Presión: 14000 h.
 - Lámpara de sodio de Alta Presión: 16000 h.
 - Lámpara de mercurio de Baja Presión: 10000 h.
 - Lámpara de mercurio de Alta Presión: 16000 h.
 - Lámpara de Halogenuros Metálicos: 9000 h.
 - LED: 50000 h.
- Resiste mayores niveles de humedad y es más resistente a vibraciones que otras fuentes.
- Tiene un gran ahorro energético debido a que no genera calor, a diferencia de las fuentes tradicionales que el 80 % de la energía la transforma en calor.
- El encendido es inmediato.
- Se puede reproducir cualquier color del espectro visible con una combinación de LEDs RGB. Además este tipo de fuentes cubre rangos electromagnéticos de emisión por encima y por debajo del rango visible:

1.2. Principios de las fuentes de estado sólido orgánicas (OLED)

El nombre del dispositivo optoelectrónico OLED (*Organic Light Emitting Diodes*) viene dado por los materiales utilizados en este tipo de fuentes. El OLED consiste en

un diodo que contiene una capa electroluminiscente basada en compuestos orgánicos que reaccionan a una determinada estimulación eléctrica capaz de emitir por sí misma.

1.2.1. Avances científicos más relevantes en el desarrollo del OLED

El suceso más importante que ha llevado a desarrollar esta tecnología se establece a principios de los años 50 cuando Bernanose et al. de la Universidad de Nancy (Francia) descubrieron una pequeña conductividad eléctrica en el compuesto Naranja de Acrilina [24, 25]. Este hito afirmó las bases iniciales para el posterior desarrollo de estos dispositivos. En los años 60 Martin Pope junto con sus colaboradores de la Universidad de Nueva York, Helfrich y Schneider en el *National Research Council* publicó varios artículos sobre el control de la electroluminiscencia mediante una corriente eléctrica en monocristales de antraceno. A pesar de estos descubrimientos esta tecnología parecía poco realista debido a que eran necesarios aplicar voltajes del orden de 100 V. Esta perspectiva cambió en 1977 con el trabajo de Chiang et al. ya que descubrieron un aumento de 11 órdenes de magnitud en la conductividad eléctrica de un polímero al introducir un halógeno en poliacetileno. Otro suceso importante se establece en los años 80 donde Partridge et al. (1983) publicaron un trabajo sobre la electroluminiscencia en polímeros, el cual fue clave para que en 1987 Tang y VanSlyke crearan en los laboratorios de Kodak el primer diodo orgánico basado en películas moleculares depositadas por vapor. Por último se puede destacar el trabajo de J. H. Burroughes et al. en 1990 sobre la electroluminiscencia en polímeros conjugados el cual impulsó a la industria en invertir en el desarrollo de la electroluminiscencia orgánica. En la figura 1.15 se muestra como los OLEDs han ido evolucionando con respecto a los LEDs.

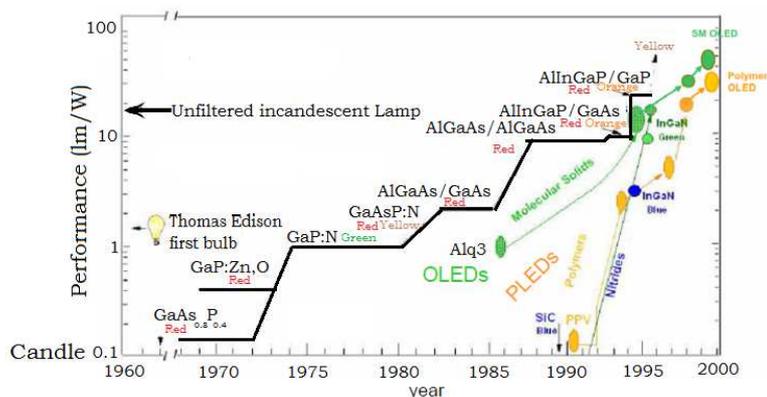


Figura 1.15: Evolución temporal de la eficiencia de las diferentes tecnologías.

1.2. Principios de las fuentes de estado sólido orgánicas (OLED)

1.2.2. Fundamento Teórico

El fundamento teórico de un OLED no se diferencia en gran medida de la teoría que ya se explicó en la sección 1.1.2 para un LED, ya que ambos dispositivos funcionan de forma muy similar [26]. Para explicar el funcionamiento de este tipo de dispositivos se utilizará el esquema de la figura 1.16.a.

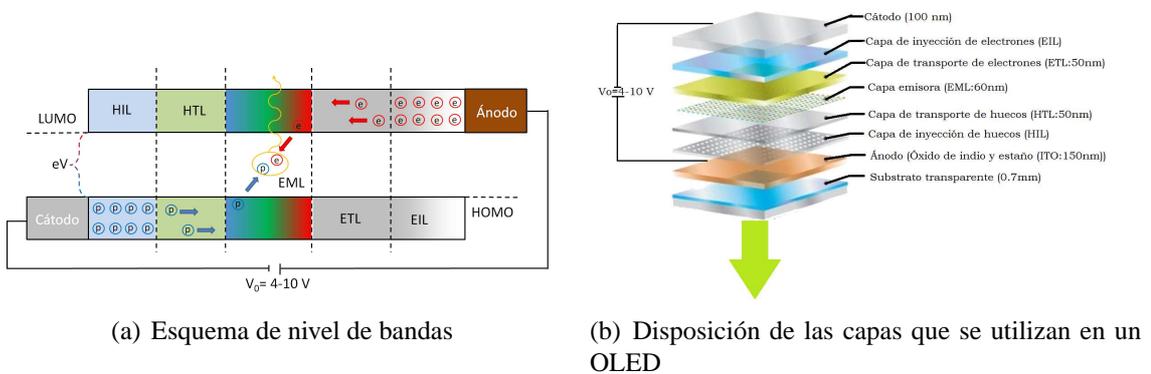


Figura 1.16: Funcionamiento de las distintas regiones que componen un OLED.

Para lograr un funcionamiento óptimo del dispositivo las regiones se distribuyen mediante la deposición de un conjunto de láminas que están superpuestas unas con otras (Fig. 1.16.b). La diferencia de potencial (4V-10V) generada entre el ánodo y el cátodo favorece dos movimientos. El primer movimiento comienza en la zona EIL (*Electron Injection Layer*) donde empiezan a generarse electrones libres que son recogidos por la lámina ETL (*Electron Transport Layer*). En esta región los electrones se ven forzados a desplazarse a través del material, debido al campo eléctrico que hay en el interior hasta llegar a la región EML (*Emission Layer*). Del mismo modo se produce una inyección de huecos debida a la capa HIL (*Hole Injection Layer*) que son desplazados hacia la región HTL (*Hole Transport Layer*), donde son transportados por el mismo campo eléctrico hasta la zona EML. En este sustrato los huecos ocupan el nivel de energía orbital molecular más alto ocupado HOMO (*Highest Occupied Molecular Orbital*), mientras que los electrones se colocan en el nivel de energía orbital molecular más bajo desocupado LUMO (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*). Esto provoca que entre los dos niveles de energía se produzca una recombinación de los electrones con los huecos, generando de este modo un flujo de fotones para los estados que decaen en el estado singlete.

1.2.3. Modos de fabricación de OLEDs

La fabricación de esta tecnología se basa principalmente en la utilización de dos tipos de substratos orgánicos SM-OLED (*Small Molecule Organic Light Emitting Diode*) y PLED (*Polymer Light Emitting Diode*) [25, 3]. Estos dos tipos de OLEDs principalmente se diferencian en el técnica de preparación del substrato electroluminiscente. Los SM-OLED se basan en construir la lámina mediante una deposición química de la evaporización del material *Chemical Vapour Phase*, (CVP), en el vacío. A diferencia de los SM-OLEDs los PLEDs se fabrican con películas de polímeros que se preparan mediante un método conocido como *spin-coating*, desde una solución en una atmósfera inerte. Además existen otro tipo de OLEDs que están menos extendidos porque son más complejos de construir. Este tipo de OLEDs están basados en dendrímeros, esto quiere decir que el substrato tiene una geometría fractal y que tiene un tamaño intermedio entre las moléculas y los polímeros.

1.2.3.1. SM-OLED

Los SM-OLED fueron los primeros OLEDs en aparecer cuando se desarrollaron en 1987 por los científicos de los laboratorios de Kodak. Estos están constituidos por una bicapa N,N-Bis(3-metilfenil)-N,N-bis(fenil)bencidina (una triarilamina conocida por las siglas TPD, transportador de huecos) y Alq₃ (Aluminio-tris(8-hidroxi-quilonilato)) siendo esta capa la responsable de transportar los huecos y de la emisión electroluminiscente en una longitud de onda en la región visible del verde.

Un estudio de estos dispositivos muestra que la eficiencia cuántica interna (EQI) es tan solo del 25 % debido a que está limitada por la estadística de espín. Sin embargo la eficiencia cuántica externa (EQE) en los OLEDs tienen todavía una probabilidad mucho menor que la EQI, ya que ésta eficiencia está aproximadamente sobre el 5 %.

1.2.3.2. PLED

El descubrimiento de este tipo de dispositivos fueron elaborados varias décadas más tarde que los SM-OLED. Los primeros PLEDs que se desarrollaron fueron en 1990 por J. H. Burroughes en los laboratorios de Cavendish en Cambridge donde se observó una alta eficiencia en un polímero π -conjugado en la franja verde del espectro visible. Este tipo de dispositivos presentan varias ventajas con respecto a los SM-OLEDs ya que debido a su estructura molecular muestra una gran flexibilidad a la hora de construir este tipo de OLEDs. Otra de las ventajas que proporciona este tipo

1.2. Principios de las fuentes de estado sólido orgánicas (OLED)

de OLEDs es que al tratarse de una disolución de polímeros en ciertas sustancias, hace que el método de fabricación sea más económico que los SM-OLEDs. Además, este método permite poder construir estos dispositivos más extensos. Por el contrario, en este tipo de método es más difícil conseguir que en el proceso de fabricación de los SM-OLEDs, ya que el número de impurezas introducidas en la película tiene que ser bajo.

1.2.4. Clasificación de los tipos de OLEDs

1.2.4.1. TOLED

Se definen como TOLEDs a dos tipos diferentes de OLEDs. El primero de ellos es el *Transparent Organic Light Emitting Diode* que como su propio nombre indica son OLEDs transparentes ya que introducen un cátodo transparente. Esto permite al diodo que la emisión producida en la capa electroluminiscente se propague en ambos sentidos, obteniéndose un OLED casi transparente. El hecho es que cuando estos dispositivos están apagados tienen una transparencia entre el 70 % y el 85 %. La ventaja que tienen estos dispositivos es que favorece la visualización de éstos con la luz directa del sol ya que mejoran el contraste con el medio.

El segundo OLEDs que utiliza este mismo acrónimo es el *Top emitting Organic Light Emitting Diodes*. Este tipo de OLEDs funciona del mismo modo que los OLEDs transparentes pero con la diferencia, que estos dispositivos agregan una lámina de un material reflectante a continuación del cátodo. Este material reflectante se coloca para potenciar la cantidad de luminosidad que emite el TOLED. En la figura 1.17.a se muestra un esquema de cómo es la emisión de la luz debida a un OLED transparente mientras que en la 1.17.b muestra como emite la luz un OLED con emisión superficial.

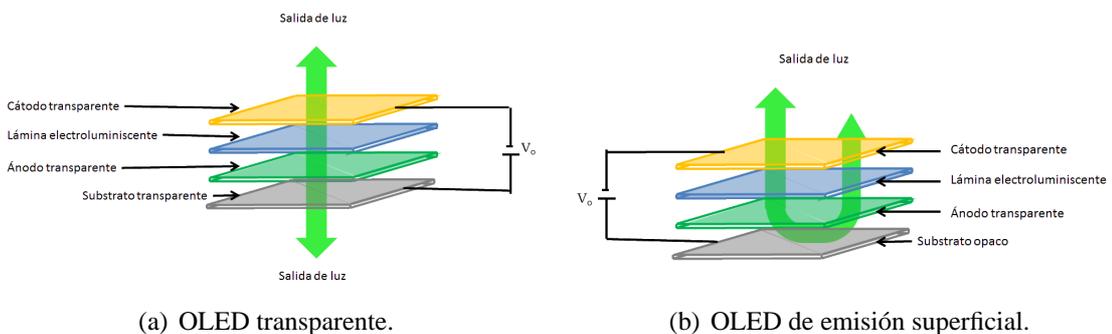


Figura 1.17: Emisión de luz de los distintos TOLEDs.

1.2.4.2. SOLED

La idea que subyace en los SOLED (*Stacked Organic Light Emitting Diode*) es la construcción de un OLED blanco mediante substratos con emisión en las bandas del visible rojo, verde y azul. Esta tecnología fue desarrollada en la Universidad de Princeton a mediados de los años 90 mediante la colocación de substratos con distinto gap en una misma columna (Fig. 1.18), capaces de emitir en las diferentes regiones del espectro (rojo, verde y azul).

Esta tecnología ofrece tres beneficios fundamentalmente. El 1° de los beneficios es que triplica la resolución de la pantalla y resalta las diferencias de color debido a que se pueden modular independientemente el color, la escala de grises y la intensidad. El 2° consiste en que aumenta la emisión total y la eficiencia de la potencia neta. Por último aumenta la vida media de los dispositivos ya que se reduce la intensidad que circula a través de cada uno de los substratos.

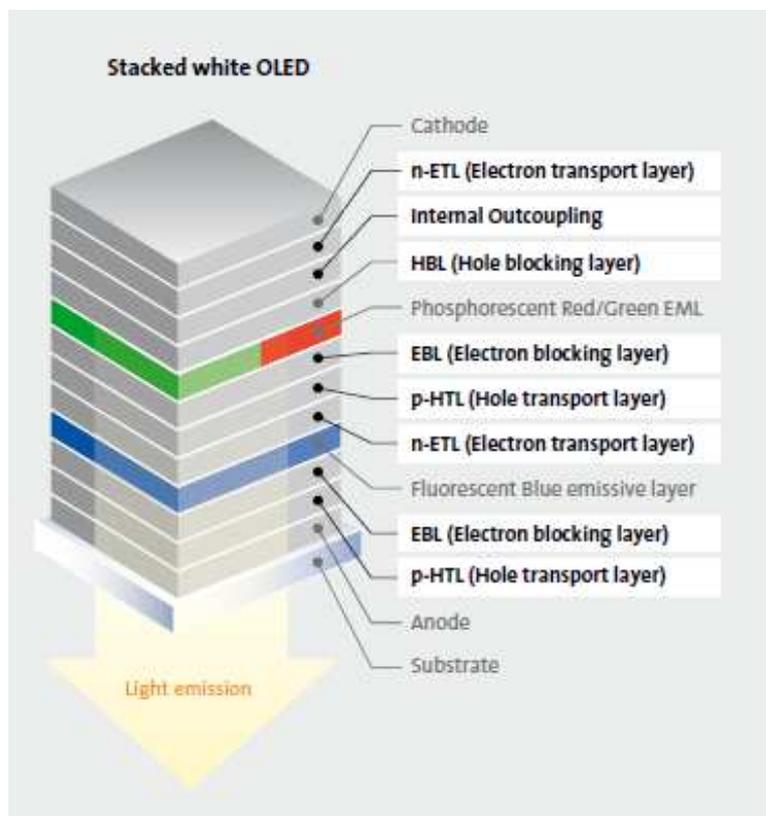


Figura 1.18: Esquema de un SOLED.

1.2. Principios de las fuentes de estado sólido orgánicas (OLED)

1.2.4.3. WOLED

El término WOLED (*White Organic Light Emitting Diode*) se reserva para los OLEDs, que tienen una apariencia de la luz emitida blanca. A diferencia de los SOLEDs estos tipos de OLEDs distribuyen sus capas de forma, que cada una de las tres láminas RGB se colocan contiguamente (Fig. 1.19) en vez de apilados. Este modo de construir este tipo de OLEDs consigue obtener una luz más homogénea ya que a todos les llega la misma intensidad de corriente. Otra ventaja que ofrece este tipo de tecnología es reducir el espesor del OLED. Esto se traduce en una reducción del peso debido a que no son necesarias tantas láminas en deposición como un SOLED.

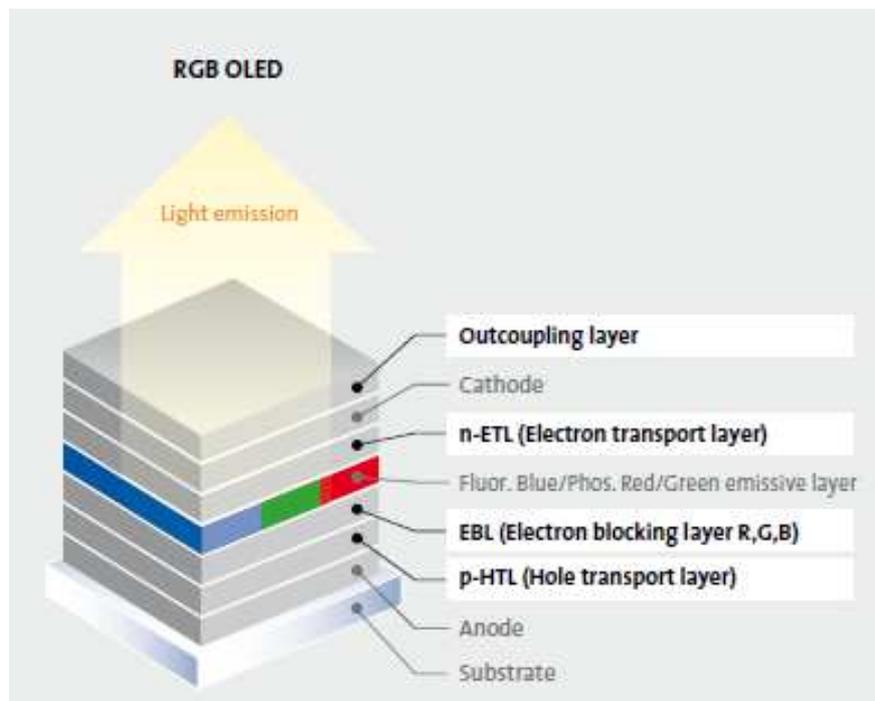


Figura 1.19: Esquema de un WOLED.

1.2.4.4. FOLED

Por último se encuentra los FOLED (*Flexible Organic Light Emitting Diode*). Este tipo de OLEDs tiene múltiples ventajas con respecto a los ya citados anteriormente, ya que estos diodos a diferencia de los anteriores se construyen en un sustrato flexible como puede ser plástico o metal (Fig. 1.20). Estos materiales aportan una gran flexibilidad además de una reducción del peso total del dispositivo. La reducción del peso se debe a que los OLEDs utilizan como sustrato de deposición un vidrio. Otra de las ventajas de dichos dispositivos se encuentra en la resistencia del material frente

a golpes indeseados. Este material flexible resulta más complicado romperlos que los vidrios. Además la utilización de estos substratos contribuyen a obtener una mayor luminosidad del OLED, debido a que no es necesario un espesor muy elevado de esta lámina. Esto unido a que la absorción del plástico es menor que la del vidrio convierte a estos tipos de materiales idóneos para su construcción.

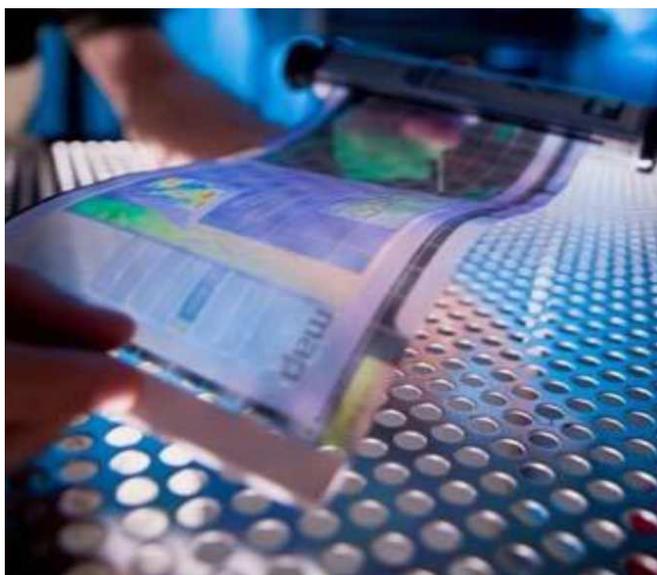


Figura 1.20: Fotografía del acabado visual de un FOLED.

1.2.5. Configuración de OLEDs en pantallas

Debido a la gran versatilidad que tienen estos dispositivos para ser incorporados en los displays de última generación, se han desarrollado dos configuraciones para su implementación, totalmente diferentes PMOLED y AMOLED [27].

1.2.5.1. PMOLED

La ordenación PMOLED (*Passive Matrix Organic Light Emitting Diode*) se basa en una utilización pasiva de los OLEDs. Este tipo de configuración permite controlar la pantalla mediante el acceso por filas y columnas (Fig. 1.21). Un ejemplo práctico es imaginar que se dispone de una matriz con n filas y m columnas ordenadas. Cuando se aplica una diferencia de potencial en la fila n y en la columna m , sólo se puede encender el OLED que se encuentra en esa posición. Esto dificulta la creación de imágenes dentro de una pantalla, ya que es necesario crear una secuencia rápida que permita encender y apagar cada OLED o pixel para poder generar una imagen. Este tipo de

1.2. Principios de las fuentes de estado sólido orgánicas (OLED)

alineamiento permite desarrollar pantallas de forma fácil y barata aunque con el inconveniente de una programación compleja para generar la secuencia de movimiento en la pantalla.

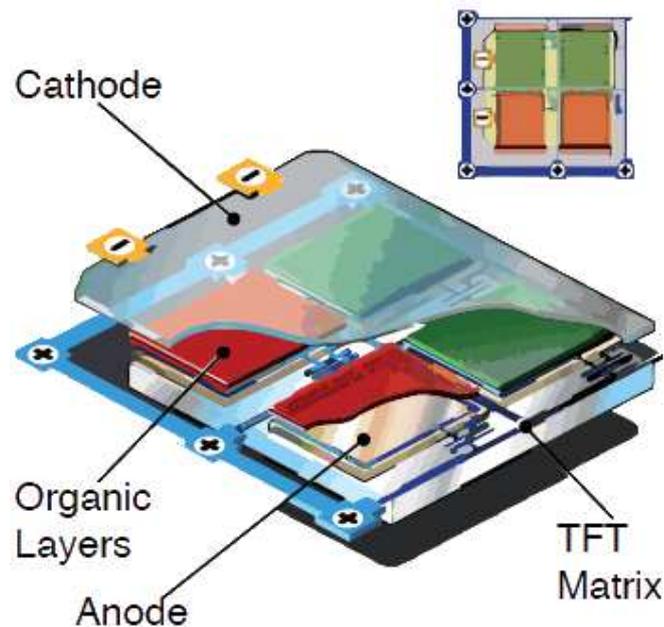


Figura 1.21: Esquema de un PMOLED.

1.2.5.2. AMOLED

La configuración AMOLED (*Active Matrix Organic Light Emitting Diode*) se basa, como su propio nombre indica, en la utilización de OLEDs funcionando activamente mediante una distribución espacial en forma de matriz. Esto quiere decir que cada uno de los píxeles de una pantalla se controla de forma independiente. Como se puede apreciar en el esquema de la figura 1.22 los OLEDs se disponen todos en la misma orientación pudiendo encenderlos selectivamente aplicando una diferencia de potencial en una fila (ánodo) y en una columna (cátodo) determinada. Por el contrario, la implementación de esta configuración en una pantalla es mucho más costosa que la disposición PMOLED, con la ventaja de que con esta alineación se puede seleccionar varias o todas las posiciones de una fila y columna. Esto permite construir pantallas más grandes.

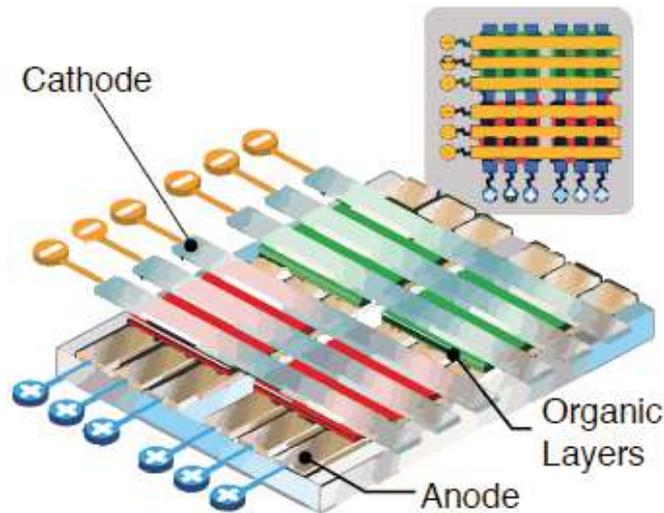


Figura 1.22: Esquema de un AMOLED.

1.3. Ventajas y desventajas de la tecnología OLED

1.3.1. Ventajas de la tecnología OLED

- Los OLEDs se pueden fabricar con un sustrato de plástico en vez de cristal. Esto implica, que este tipo de iluminación puede ser más ligera, más delgada y más flexible que un LED o un LCD (*Liquid Crystal Display*).
- Los OLEDs son más brillantes que los LEDs debido a que las capas orgánicas de un OLED son mucho más delgadas que las capas de cristal inorgánico. Por otra parte el vidrio tiene una pequeña absorción de luz que hace disminuir el brillo del LED.
- No es necesaria la utilización de vidrio.
- Los OLEDs no requieren retroiluminación como el LCD porque los OLEDs producen su propia luz. Esto implica un menor consumo de energía que un LCD. Esto se debe a que la mayor parte de la energía de un LCD se consume en la iluminación de fondo.
- Son fáciles de construir a la par de que se pueden construir en grandes tamaños.
- Los OLEDs tienen un gran campo de visión, entorno a los 170° a diferencia de los LCD que tienen 30° .

1.3. Ventajas y desventajas de la tecnología OLED

1.3.2. Desventajas de la tecnología OLED

- El tiempo de vida de los OLEDs rojos y verdes son de 46000 h a 230000 h mientras que los OLEDs azules son de 14000 h.
- El proceso de fabricación en la actualidad es muy caro.
- El agua puede dañarlos fácilmente.

Capítulo 2

Descripción del sistema de medida para fuentes de estado sólido

Contenido

2.1. Gonioespectrofotómetro	48
2.1.1. Descripción del instrumento	48
2.1.2. Procedimiento de medida	54
2.2. Calibrado de los sistemas de detección	60
2.2.1. Calibración del fotómetro	60
2.2.2. Calibrado del espectrorradiómetro	63

En este capítulo se presenta la descripción y caracterización del gonioespectrofotómetro [28, 29] que hemos desarrollado para realizar medidas de la distribución de intensidad luminosa de fuentes de estado sólido [30, 31, 32]; detallando asimismo el procedimiento físico de medida. El sistema desarrollado permite la medida de la distribución angular, espectral y espacial de fuentes de estado sólido y tiene la posibilidad de realizar medidas tanto en campo lejano como en campo cercano.

2.1. Goniotespectrofotómetro

2.1.1. Descripción del instrumento

El instrumento desarrollado (Fig. 2.1) consta de dos sistemas: posicionamiento y detección. De acuerdo con la clasificación de tipos de goniotespectrofotómetros [29, 28] se puede clasificar como tipo 1: la fuente de radiación gira alrededor de dos ejes (vertical y horizontal); permaneciendo el detector en una posición fija a una distancia suficientemente grande para considerar que se cumplen las condiciones de campo lejano. La magnitud medida en este caso es por tanto la iluminancia en incidencia normal.

El instrumento incluye también un sistema de alineamiento, basado en una cámara, que permite asimismo realizar las medidas en campo cercano.

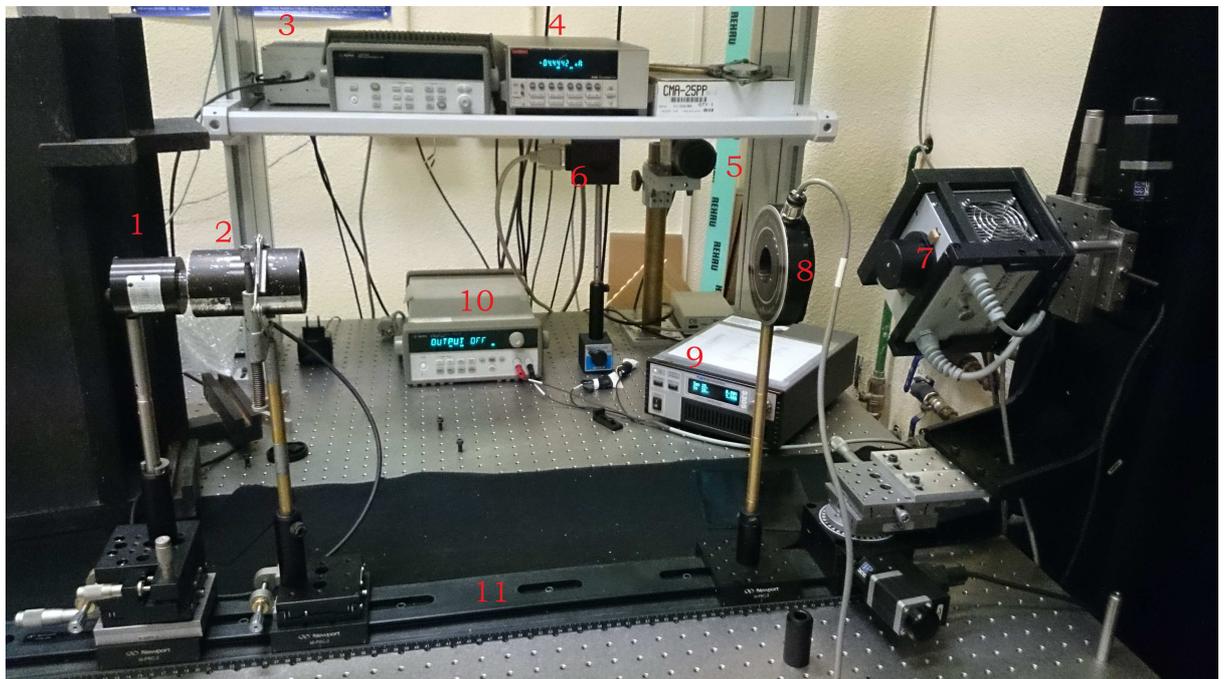


Figura 2.1: Fotografía del goniotespectrofotómetro desarrollado para la medida de fuentes de estado sólido. 1) fotómetro, 2) Baffle, 3) Estabilizador de temperatura del fotómetro, 4) Picoamperímetro Keithley, 5) Cámara CCD Davis, 6) Filtro sintonizable, 7) Sistema de iluminación, 8) Shutter, 9) Control de estabilización de temperatura para la fuente de iluminación, 10) Fuente de alimentación Agilent 34970A y 11) Banco óptico.

2.1.1.1. Sistema de detección

En la configuración de campo lejano, el sistema de detección está constituido por un fotómetro comercial P11SOT (LMT Lichtmesstechnik GmbH), estabilizado en temperatura. Siguiendo las recomendaciones de la CIE (Comisión Internacional de Iluminación) [33] para la medida de la intensidad luminosa de fuentes de estado sólido, tiene una apertura de entrada circular de 100 mm² de área y está provisto de un difusor plano para mejorar su respuesta angular. Estas y otras características importantes se muestran en la tabla 2.1.

El fotómetro está montado sobre una serie de plataformas con cinco grados de libertad que permiten el posicionamiento exacto del mismo respecto al eje óptico, definido mediante un haz láser. El conjunto de plataformas se desliza a lo largo de un raíl para fijar la distancia de medida. Delante del fotómetro se coloca un baffle para minimizar la luz esparcida.

El sistema de detección se completa con un espectrorradiómetro CS-1000 A (Konica Minolta). Este sistema nos permite determinar la distribución espectral de radiación de la fuente en el intervalo espectral comprendido entre 380 nm y 780 nm [34], con una resolución de 1 nm y un campo de visión (FOV) de 1°. La lista completa de especificaciones se puede ver en la tabla 2.2.

En la configuración de campo cercano, el sistema de detección está formado por una cámara VC Imager compact CCD de la empresa DAVIS LaVisión con un tiempo de exposición variable entre 10 μ s y 10 s; un rango espectral entre 290 nm y 900 nm y una resolución de imagen de 640 x 480 pixels (Tab. 2.3). Delante de la cámara se ha instalado asimismo un filtro sintonizable de cristal líquido (VariSpec) para dotar a la cámara de resolución espectral (Tab. 2.4).

2.1. Goniospectrofotómetro

Tabla 2.1: Especificaciones del fotómetro P11S0T.

Propiedades	Valor
Diámetro de la superficie sensible a la luz	11,3 mm
Error f_1 acc. DIN EN 130332-1	< 1 %
Adaptador coseno	No
Estabilización termoestática	Si
Dimensiones	R=25 mm x l=50 mm

Tabla 2.2: Especificaciones del espectrorradiómetro CS-1000 A.

Propiedades	Valor
Campo de Visión	1°
Rango de Visión	380 nm-780 nm
Resolución	0,9 nm/pixel
Mínima distancia de medida	200 mm
Área mínima medida	1,15 mm
Rango de Luminancia	0,01 cd/m^2 a 80000 cd/m^2
Repetibilidad	0,1 %
Precisión espectral	0,3 nm
Mínimo tiempo de integración	0,004 s
Tiempo de medida	1 s a 243 s
Temperatura de operación	5 °C a 35 °C
Tamaño (ancho, alto y largo)	146 mm 148 mm 256 mm
Peso	4,7 kg

Tabla 2.3: Especificaciones de la cámara VC-Imager compact CCD.

Propiedades	Valor
Resolución de la imagen	640 x 480 Pixel
Formato del chip	6,3 x 4,8 mm^2
Velocidad de salida	12 bit
Velocidad de lectura	16 MHz
Frecuencia de imágenes	40 <i>frames/s</i>
Rango espectral	290 nm a 900 nm
Shutter electrónico mínimo	10 μs
Tamaño (ancho, alto y largo)	59 mm 50 mm 85 mm

Tabla 2.4: Especificaciones del filtro sintonizable VariSpec VIS.

Propiedades	Valor
Rango espectral	400 nm a 720 nm
Ancho de banda	7 nm, 10 nm o 20 nm
Apertura	20 mm a 35 mm
Ángulo de iluminación permitido	7,5°
Tiempo de respuesta	50 ms
Precisión en la longitud de onda	Ancho de banda/8 cm 0,5 nm
Saturación del filtro	500 mW/cm ²
Temperatura de operación	10°C a 40°C

2.1.1.2. Sistema de posicionamiento

En el sistema de posicionamiento se pueden discernir dos partes fundamentales, por un lado se encuentra el sistema de posicionamiento del sistema de detección y por otro lado está la posición que ocupa la fuente de radiación.

El sistema de detección está montado sobre un conjunto de plataformas que son muy útiles para posicionar el sistema de detección a una distancia determinada y perpendicular a la superficie de la fuente de radiación. El conjunto de plataformas está compuesto por una plataforma de tilteo, la cual permite corregir la inclinación del sistema de detección. Además, con esta plataforma también se puede corregir la orientación de la superficie de detección para que ésta sea paralela a la superficie de la fuente de radiación. Otra plataforma de este conjunto es la plataforma de desplazamiento lineal. Esta plataforma se encuentra colocada encima de la plataforma de tilteo. De este modo permite realizar un movimiento perpendicular al banco óptico que sirve para posicionar el centro del área de detección en el eje mecánico de la fuente de radiación. Por último para obtener la distancia de una forma más exacta, se utiliza una plataforma de desplazamiento lineal con un tornillo micrométrico fijado a esta plataforma. Este soporte se encuentra conectado a una plataforma que sirve a su vez como nexo de unión entre estas plataformas y el banco óptico. Ésta será la responsable de fijar la distancia exacta entre la fuente de radiación y el sistema de detección.

Con el sistema de detección fijado, en la posición exacta, se coloca otro conjunto de plataformas iguales al conjunto del sistema de detección, las cuales servirán para colocar un baffle pegado a la superficie del área de detección. Este baffle evita que las posibles reflexiones que se producen en el medio entren en el sistema de detección.

2.1. Goniómetro

Fijada la dirección y la orientación del detector se coloca en el otro extremo del banco óptico los elementos necesarios para soportar y mover la fuente de radiación a estudiar. El primer elemento que se utiliza es una plataforma de fijación al banco óptico, previamente modificada con 4 orificios roscados en los extremos de la pieza. Esta modificación es necesaria para poder acoplar un motor de rotación por pasos URS150BPP, fabricado por la empresa NEWPORT. Teniendo en cuenta el peso que tiene que soportar este motor se escogió uno con las especificaciones dadas en la tabla 2.5.

Tabla 2.5: Motor de rotación por pasos URS150BPP.

Propiedades	Valor
Capacidad de carga centrada en la normal	300 <i>N</i>
Torque normal	2 <i>N m</i>
Amplitud de movimiento	360°
Resolución	0.0002°
Incremento mínimo de movimiento	0.0002°
Repetitividad	0.01°
Histéresis	0.01°
Exactitud absoluta	0.03°
Velocidad máxima	40°
Balanceo	50 <i>rad</i>
Excentricidad	3 <i>m</i>

Este elemento es una de las piezas claves a la hora de constituir el goniómetro, debido a que este motor dota al sistema de un grado de libertad, ángulo polar en coordenadas esféricas, (θ). A continuación se acoplan dos plataformas de desplazamiento lineal (ST1 y ST2) de forma que estas queden perpendiculares entre sí y con tornillos micrométrico fijados a éstas. Las dos plataformas permiten corregir el centro de rotación del sistema. Las 2 plataformas dejan el eje de giro centrado en el banco óptico mediante la plataforma que se encuentra perpendicular al banco óptico, ST1. Por lo tanto el movimiento de la plataforma ST2 queda restringido en la dirección del banco óptico para posicionar la superficie de la fuente de radiación en el eje de giro.

Para medir la superficie de la fuente de radiación es necesario unir una escuadra metálica con un ángulo de 90° sobre las plataformas ST1 y ST2. Con este elemento

se consigue colocar el eje mecánico de la lente de la fuente de radiación, paralelo al banco óptico. Esta escuadra será acoplada a la base de otro motor de rotación por pasos, igual que el motor anterior, para darle al sistema otro grado de libertad, el ángulo azimutal en coordenadas esféricas (φ). Para finalizar el sistema de posicionamiento se ensamblan otras dos plataformas de desplazamiento lineal (ST3 y ST4) que están unidas perpendicularmente entre sí al motor de giro. De este modo se corrigen los posibles desplazamientos que se producen entre el centro de la fuente y el centro de giro del segundo motor, proceso que será explicado en la sección de alineamiento del sistema. El resultado del diseño del sistema de posicionamiento de la fuente así como las diferentes fuentes utilizadas se muestran en las figuras 2.2 y 2.3.

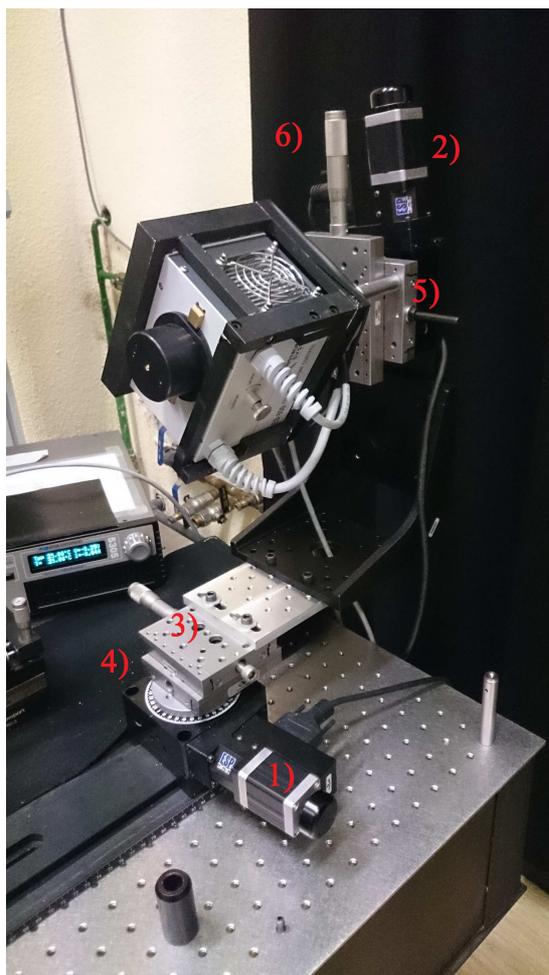


Figura 2.2: Sistema de posicionamiento. 1) y 2) Motor de pasos, 3) Plataforma de desplazamiento lineal ST1, 4) Plataforma de desplazamiento lineal ST2, 5) y 6) Plataforma de desplazamiento lineal ST3 y ST4.

2.1. Goniómetro



Figura 2.3: Fuentes de irradiación utilizadas.

2.1.2. Procedimiento de medida

Una vez descrito el goniómetro, hay que desarrollar un procedimiento de medida. Este procedimiento consta de tres fases. La primera es la más importante porque definirá el origen de coordenadas (0,0,0) en un sistema de referencia esférico. Esta fase consiste en el alineamiento de la fuente de radiación. La segunda consiste en el alineamiento del sistema de detección, y la tercera es el procedimiento que se lleva a cabo para la medida propiamente dicha.

2.1.2.1. Alineamiento de la fuente

La alineación de la fuente de radiación en este sistema experimental es primordial cuando se realiza la medida. Un mal alineamiento de la fuente proporciona un desplazamiento del origen de coordenadas, ocasionando una localización incorrecta del sistema de referencia. Esto implica que cuando se realizan las diferentes rotaciones en el sistema de medida, la localización del punto observado de la fuente de radiación sea incorrecta. De este modo se producirían errores de tipo sistemático en la medida. Por este motivo se ha desarrollado un procedimiento de alineación mediante la utilización de la misma cámara CCD del goniómetro.

El procedimiento de alineación del sistema comienza enfocando la cámara CCD en la posición donde se encuentra la fuente. Una vez enfocada la fuente se hace una rotación del ángulo polar de 90° para situar el tip (extremo de la lente del LED) de la fuente en frente de la cámara CCD. Posicionada ésta se enciende y se reajusta el

tiempo de exposición de la cámara así como el tamaño del diafragma y el enfoque del objetivo, para ver la imagen claramente.

Una vez que están todos los elementos preparados, se realiza rotaciones reiteradas en el ángulo azimutal desde $\varphi = -180^\circ$ hasta $\varphi = 180^\circ$. Este proceso nos muestra la circunferencia imaginaria que describe el centro de la fuente de irradiación (circunferencia roja de la figura 2.4.a). Vista la circunferencia descrita por el movimiento, se puede ir corrigiendo su posicionamiento colocando el centro de la fuente en la mitad del radio de dicha circunferencia imaginaria, mediante los tornillos micrométricos ST3 y ST4. Este paso se repite sistemáticamente hasta que no haya ningún desplazamiento en dichas rotaciones, como en la figura 2.4.b). De este modo queda determinada la altura de la fuente a medir con respecto al banco óptico.

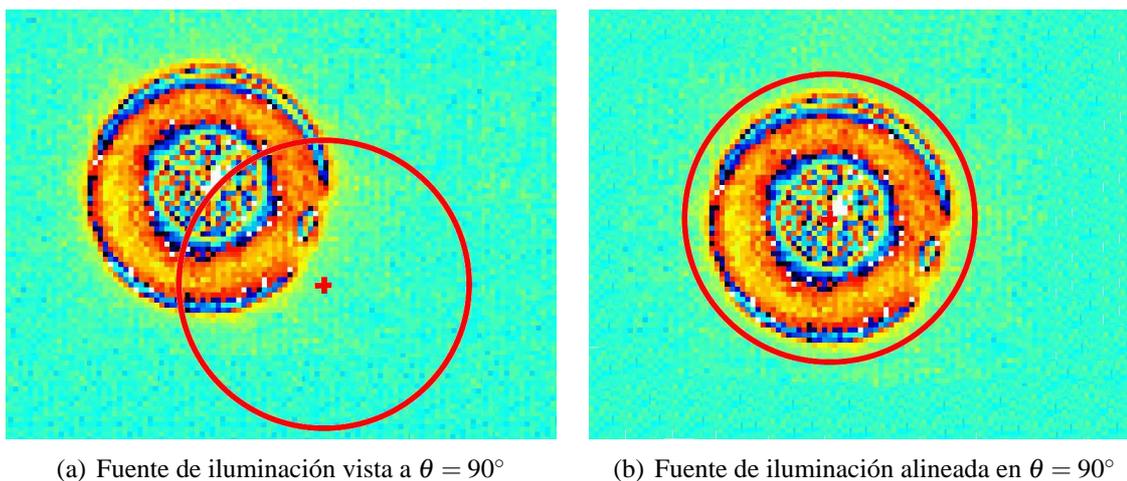


Figura 2.4: Alineamiento del LED respecto del grado de libertad φ .

Fijada la posición con respecto al ángulo azimutal se procede a alinear el sistema con respecto al ángulo polar. Este procedimiento de alineación se realiza de forma similar al anterior. Para hacer este alineamiento se realizan rotaciones del ángulo polar desde $\theta = 0^\circ$ hasta $\theta = 90^\circ$. Una vez comenzado el alineamiento se parte de una posición como en la figura 2.5.a) y 2.5.d). Se rota el sistema hasta $\theta = 90^\circ$ donde se coloca el cursor del ratón en el centro de radiancia de la fuente, en las imágenes se mostrará como una línea negra para verlo más claro. Este centro de radiancia ha sido determinado previamente por el alineamiento del ángulo azimutal.

Sin mover la línea negra se rota el ángulo polar hasta $\theta = 0^\circ$ donde se desplaza el tornillo micrométrico ST2 hasta posicionar el tip de la fuente a una distancia media entre la posición actual del tip, línea roja, y la posición de la línea negra (ver figura

2.1. Goniospectrofotómetro

2.5.e). En este punto se vuelve a redefinir el eje de rotación colocando la línea negra en el tip de la fuente. De nuevo se vuelve a rotar el sistema de medida hasta $\theta = 90^\circ$ sin mover la línea negra y se vuelve a colocar el centro de radiancia a una distancia intermedia entre la posición actual y la línea negra mediante un desplazamiento de la plataforma ST1 (ver figura 2.5.b). Una vez finalizado el desplazamiento de ST1 se vuelven a repetir todos los pasos anteriores hasta conseguir que no haya ningún desplazamiento en el tip de la fuente (Fig. 2.5.c) y 2.5.f)).

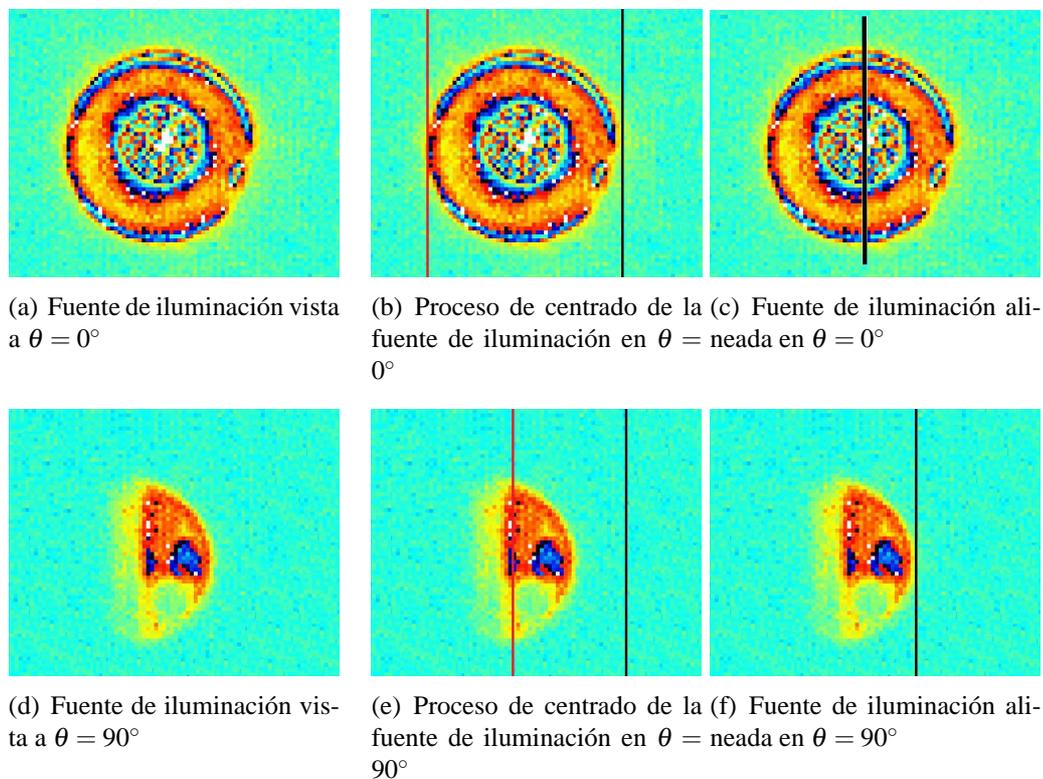


Figura 2.5: Alineamiento del LED respecto del grado de libertad θ .

De este modo ya se encuentra posicionado el tip de la fuente a medir en el origen de coordenadas (0,0,0), que será utilizado como punto de referencia para alinear el sistema de detección con ayuda de un láser de alineamiento de doble haz.

2.1.2.2. Alineamiento del sistema de detección

Definido el origen del sistema de referencia (0,0,0) es el momento de alinear el fotómetro. Para ello se coloca la fuente a medir en un ángulo polar $\theta = 0^\circ$, ya que ésta determina la altura a la que deben de ir todos los elementos colocados en el banco

óptico. Con la altura fijada se colocan dos vástagos alineados con el banco óptico y con sus orificios a la misma altura del centro de la fuente a medir (Fig. 2.6).

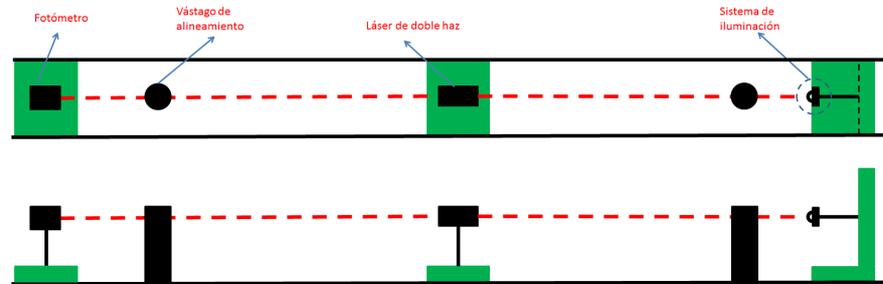


Figura 2.6: Esquema de alineación para el fotómetro.

El siguiente paso es colocar un láser de doble haz en el centro del banco. Este láser se tomará como referencia una vez que esté correctamente alineado con el banco óptico y con la fuente de iluminación. Para un correcto alineamiento se le acopla a la base del láser dos plataformas. Una para corregir el desplazamiento transversal al banco y otra para corregir las inclinaciones tanto verticales como horizontales. Colocado el láser en su posición, se aproximan ambos vástagos hasta el láser. Esto permite fijar la altura y el centrado del haz mediante su plataforma de desplazamiento transversal al banco. Acto seguido se desplazan los vástagos sobre el banco, permitiendo ir corrigiendo la desviación del haz, tanto vertical como horizontal, mediante la plataforma de tilteo hasta llegar a los extremos del banco. En esta posición se repite todo el procedimiento anterior hasta que no haya que rectificar ninguna de las plataformas del láser. A continuación se retiran los vástagos, porque el láser ya está perfectamente alineado, y se desplaza transversalmente con respecto al banco hasta hacer coincidir el haz láser con el tipo de la fuente a medir. Este paso es necesario debido a que entre la plataforma de fijación al banco y el motor de giro polar hay un pequeño desplazamiento con respecto al centro del banco óptico. Por último y con el eje ya definido por el láser se coloca el fotómetro en el extremo opuesto a la fuente con los mismos grados de libertad que dispone el láser. El siguiente paso es colocar el fotómetro a la distancia que se quiere medir mediante unas barras calibradas en longitud. Fijado el fotómetro en esta posición del banco óptico, se moverá la plataforma de desplazamiento transversal al banco, hasta colocar el centro del área de detección en el spot del láser. En éste paso se utilizará la plataforma de tilteo del fotómetro para hacer que coincida el reflejo del spot del láser con el orificio de salida del láser. En este punto ya se puede retirar el láser porque se encuentran tanto el fotómetro como la fuente perfectamente alineados y listos para realizar la medida.

2.1. Gonioprotómetro

2.1.2.3. Medición

En principio la determinación del flujo luminoso mediante la medida de la distribución de intensidad luminosa en un gonioprotómetro es más exacta que la realizada mediante una esfera integradora; evitando así errores espectrales y espaciales asociados a la pintura de la esfera. Sin embargo es fundamental en este caso determinar de forma adecuada el número de puntos que se van a medir. Un número excesivo de puntos podría dar lugar a un solapamiento de valores y un tiempo de medida excesivamente largo.

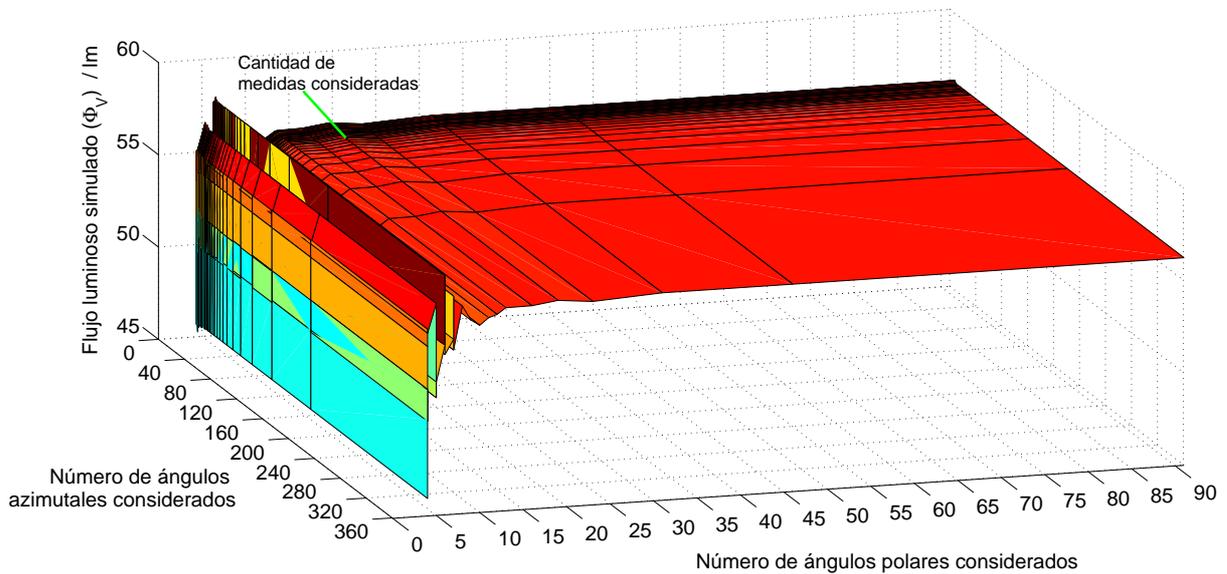


Figura 2.7: Simulación del valor del flujo en función de la cantidad de medidas realizadas.

Por otra parte hay que asegurar que el espaciado elegido, permita determinar de forma adecuada las posibles no uniformidades de la distribución de intensidad de la fuente a medir. Con este razonamiento se ha realizado una simulación para determinar cómo influye la cantidad de puntos medidos con la variación del flujo total obtenido. Esta simulación se ha realizado para fuentes cuya divergencia de ángulo es superior a 90° . La figura 2.7 muestra el valor del flujo total obtenido de una fuente en función de la cantidad de ángulos azimutales (φ) y de ángulos polares (θ) medidos. Los valores de flujo en cada posición fueron calculados mediante una interpolación lineal de la distribución angular de una medida, conociendo así el valor en todos los puntos. Determinada la distribución angular, se procedió a calcular el flujo total correspondiente a cada uno de los casos. Para cada caso se eliminaron puntos, de la distribución angular, de forma simétrica para ambos grados de libertad hasta llegar a un conjunto de

ángulos (θ, φ) mínimo para determinar el flujo total. Como muestra el gráfico se puede obtener un valor del flujo bastante aproximado en una amplia región de conjuntos de ángulos. En nuestro caso hemos elegido un número de puntos tal que obtengamos una desviación del valor del flujo total $\Delta\Phi_V = 0,4\%$. Hay que tener en cuenta que esta cantidad de puntos, así como la distribución de medida se verá modificada para fuentes de estado sólido con divergencias de ángulo pequeñas.

Una vez hemos determinado el número mínimo de puntos necesarios para obtener el flujo total, que el sistema de medida está alineado y que se ha desarrollado el programa de ordenador para controlar dicho sistema, se pueden tomar las medidas. En el inicio de la ejecución del programa solicita las condiciones ambientales así como las condiciones iniciales que se establecen para la fuente a medir: intensidad de corriente aplicada, voltaje aplicado, temperatura del chip y el tipo de LED. Para comodidad del usuario el programa tiene definidas las configuraciones geométricas que se van a analizar.

Introducidos todos los parámetros iniciales el programa inicia una medida del picoamperímetro en todas las escalas para escoger la escala más adecuada a la posición en donde se encuentra el fotómetro. De este modo se evita el problema de que la iluminancia que llega al detector sature el picoamperímetro, proporcionando así errores en la lectura. Realizada la elección de la escala por el picoamperímetro se estabiliza la fuente de iluminación a la temperatura establecida en los parámetros iniciales.

Por último y con los valores iniciales fijados, el goniespetrofotómetro se sitúa en la posición inicial $(\theta = 0^\circ, \varphi = -180^\circ)$ donde el programa que se ha diseñado hace una medida tanto de la iluminancia que llega al fotómetro como de los valores de la intensidad de corriente aplicada, voltaje aplicado, resistencia de la fuente, temperatura del chip de la fuente y finalmente de la posición geométrica en la que está colocada la fuente de radiación. Tomadas todas estas medidas se incrementa el ángulo azimutal en 12° para volver a tomar los mismos valores comentados anteriormente. Este proceso se repite hasta que el ángulo azimutal haya hecho una rotación completa, es decir, hasta la posición $(\theta = 0^\circ, \varphi = 180^\circ)$. Terminada esta serie de datos se modifica el ángulo polar en $\Delta\theta = 5^\circ$ y se vuelve a realizar el mismo procedimiento descrito anteriormente pero ahora con el sentido de rotación al contrario, de $\varphi = 180^\circ$ a $\varphi = -180^\circ$, para reducir el tiempo de medida. Este procedimiento se repite hasta finalizar la serie de medidas en un ángulo polar $\theta = 90^\circ$. Concluida la medida el propio programa finaliza la medida reordenando todos los datos de $\varphi = -180^\circ$ a $\varphi = 180^\circ$ para cada ángulo polar y mostrando en la pantalla el resultado de esta medida.

2.2. Calibrado de los sistemas de detección

2.2.1. Calibración del fotómetro

El calibrado del fotómetro [35] ha consistido en los siguientes puntos:

2.2.1.1. Linealidad

Uno de los procedimientos para determinar la linealidad del fotómetro es a partir de la ley de la inversa de la distancia al cuadrado. Esta ley nos permite modificar la cantidad de iluminancia recibida en el detector mediante un desplazamiento en distancia del fotómetro. La ecuación 2.1 muestra como es la dependencia de la iluminancia en el fotómetro a partir de un valor de referencia cuando se modifica la distancia.

$$E_{d_1} = E_{d_2} \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad (2.1)$$

siendo E_{d_2} el valor de iluminancia en la distancia d_2 .

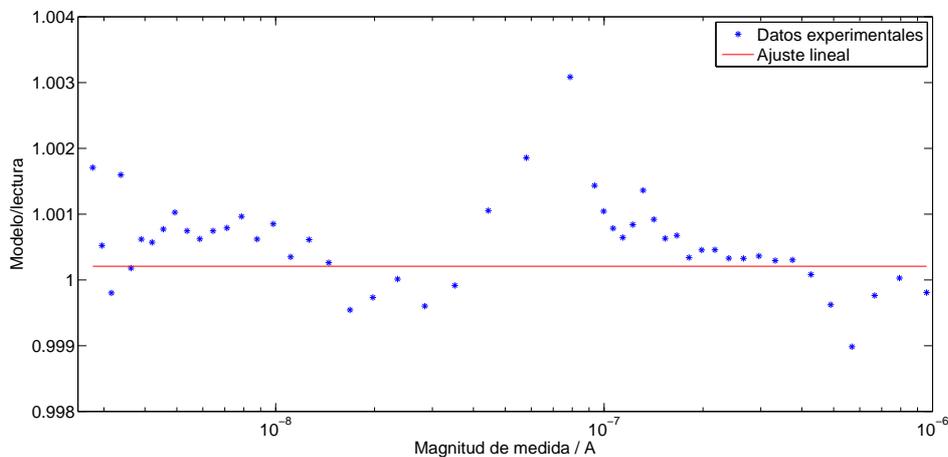


Figura 2.8: Factor de linealidad del sistema de detección.

Para estimar la linealidad del detector (Fig. 2.8) se tomó como referencia una lámpara patrón de incandescencia con halógeno de 1000 W y se fue modificando la distancia en intervalos de 25 cm desde una distancia de 150 cm hasta 800 cm. Para cubrir un mayor rango, se añadieron varios filtros neutros y se volvió a repetir el procedimiento anterior. Con este procedimiento, se determinó el factor de linealidad del conjunto fotómetro más amplificador para los órdenes de magnitud definidos entre 10^{-9} A y 10^{-7} A (rango de señales obtenidas en nuestro sistema en la medida de las fuentes de

estado sólido). La figura 2.8 muestra una clara correspondencia lineal entre los valores medidos y los valores obtenidos por el modelo entre los rangos que hemos definido, siendo su factor de linealidad $\delta_l = 1,0002$.

2.2.1.2. Respuesta angular

Para determinar cómo es la respuesta del detector en función del ángulo polar de incidencia se utilizó un procedimiento parecido al procedimiento para determinar la linealidad. El procedimiento consistió en comparar los datos del modelo de una fuente lambertiana ($E_V = E_{V_0} \cos^2 \theta$) con los datos experimentales. Para ello se colocó el detector en el sistema de posicionamiento y se hizo girar en intervalos de $\Delta\theta = 1^\circ$ desde un ángulo polar de $\theta = -80^\circ$ hasta $\theta = 80^\circ$. La comparación entre los datos medidos y los datos del modelo dio los resultados mostrados en la figura 2.9. En este gráfico se puede ver la respuesta del detector a distintos ángulos de incidencia. Examinando el gráfico en más detalle se tiene que el factor de corrección debido al ángulo es $\delta_\Theta = 1,0014$ para el ángulos de incidencia con el que hemos trabajado.

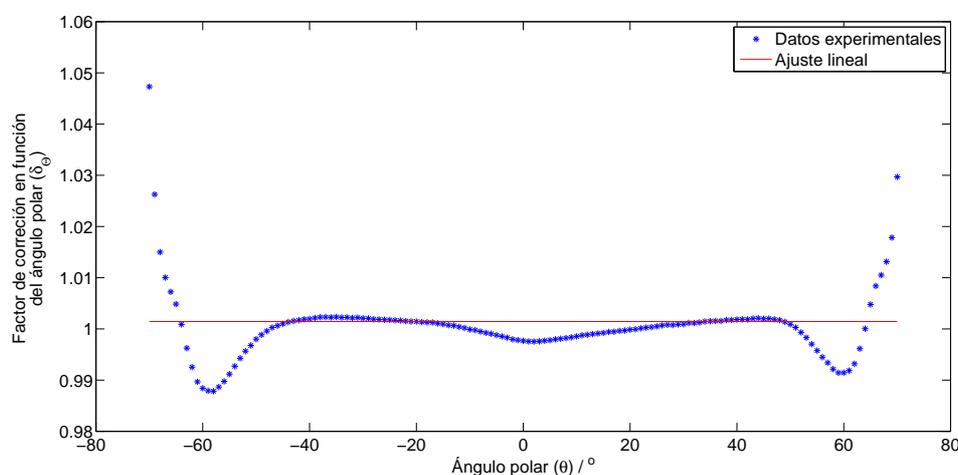


Figura 2.9: Factor de corrección de la respuesta del detector en diferentes ángulos.

2.2.1.3. Responsividad en iluminancia

Calibrar la responsividad en iluminancia de un detector significa conocer su respuesta a la iluminancia producida por una fuente de radiación sobre la superficie sensible del detector, a una distancia especificada. En nuestro caso se ha determinado la responsividad del fotómetro descrito por comparación directa con un detector de referencia trazable directamente al radiómetro criogénico, patrón primario del laboratorio.

2.2. Calibrado de los sistemas de detección

Como se recomienda, como fuente de radiación se ha usado una lámpara de incandescencia con temperatura de color de 2856 K (Iluminante A de la CIE). El valor de responsividad obtenida es de 4.87 nA/lx.

2.2.1.4. Mismatch factor

Cuando un fotómetro se usa para medir la iluminancia de fuentes cuya distribución espectral es diferente de la del iluminante A, como es el caso de las fuentes de estado sólido, ocurre un error debido a que la responsividad espectral relativa de los fotómetros no es idéntica a la curva $V(\lambda)$ definida por la CIE. Este error se puede corregir determinando el factor de desajuste, k_{ccf} (conocido por mismatch factor) [36], que se define como:

$$k_{ccf} = \frac{\int_{\lambda} S_A(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} S_A(\lambda) s_r(\lambda) d\lambda} \frac{\int_{\lambda} S_{LED}(\lambda) s_r(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda} S_{LED}(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (2.2)$$

Donde $S_A(\lambda)$ es la distribución espectral relativa del iluminante A (iluminante para el que se ha calibrado previamente el fotómetro), $s_r(\lambda)$ es la responsividad espectral relativa del fotómetro, $V(\lambda)$ es la eficiencia espectral luminosa definida por la CIE y $S_{LED}(\lambda)$ es la distribución espectral relativa de la fuente a medir.

Para determinar este factor, la responsividad espectral relativa del fotómetro se ha medido en el sistema comparador de detectores del laboratorio. En la figura 2.10 se puede ver el resultado obtenido junto con la función $V(\lambda)$ de la CIE.

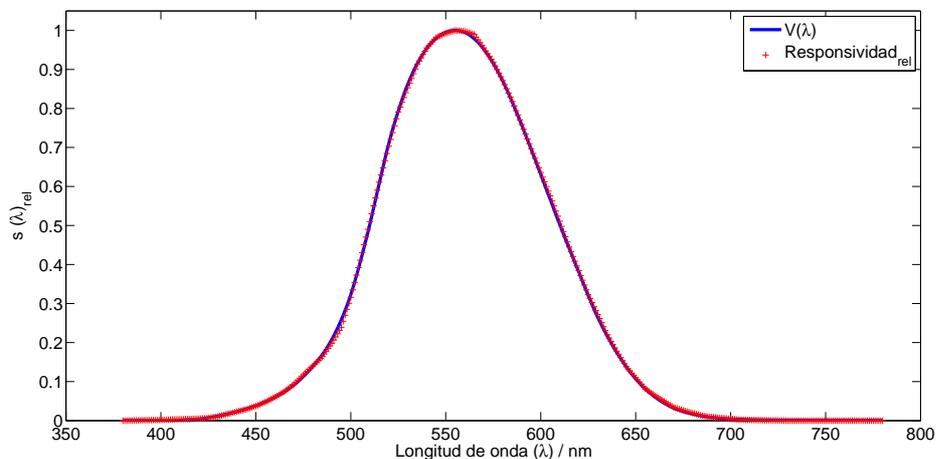


Figura 2.10: Comparación de la respuesta relativa del fotómetro con la $V(\lambda)$ a diferentes λ .

2.2.2. Calibrado del espectrorradiómetro

El calibrado del espectrorradiómetro ha consistido en el calibrado de la escala de longitudes de onda y el calibrado de la escala de irradiancia.

El calibrado en longitud de onda consiste en comparar las longitudes de onda correspondientes a las líneas de emisión de lámparas espectrales, con las longitudes de onda en que se detecten máximos de señal. Para cubrir el intervalo espectral completo en que el espectrorradiómetro es sensible (380 nm a 780 nm) se han usado las líneas de emisión de lámparas de Hg y Ne.

Asimismo el calibrado en irradiancia consiste en la comparación espectral, bajo condiciones de medida bien conocidas, entre la irradiancia medida por el espectrorradiómetro y la irradiancia conocida de una fuente patrón. En este caso se han utilizado como fuente patrón la lámpara BN9101-209, calibrada respecto a la escala de irradiancia espectral del laboratorio, trazable internacionalmente mediante la intercomparación BIPM CCPR-K1.a (2006).

2.2. Calibrado de los sistemas de detección

Capítulo 3

Medidas realizadas en el Gonioespectrofotómetro

Contenido

3.1. Medidas realizadas	65
3.1.1. Distribución angular de iluminancia	66
3.1.2. Dependencia de la iluminancia con la distancia	75

3.1. Medidas realizadas

Una vez explicados todos los elementos que componen el goniofotómetro es hora de medir las fuentes de estado sólido. Para ello, en este capítulo se indicará el número de LEDs, los modelos y los fabricantes que se han utilizado para hacer la medida. Para estos LEDs se mostrará su distribución angular de intensidad luminosa mediante un gráfico en 3D. Esta representación ayuda a entender de una forma más simple las simetrías e imperfecciones que tienen las distribuciones angulares de las fuentes. Por último se hará un análisis de la ley de la inversa del cuadrado de la distancia y como unas ligeras modificaciones en esta ley afectan a la precisión del modelo para estas fuentes.

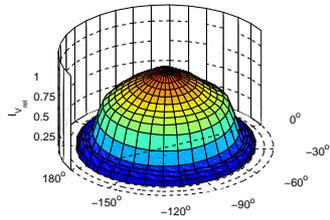
3.1.1. Distribución angular de iluminancia

La distribución angular de intensidad luminosa de todos los LEDs fue medida a una distancia de 190 cm, mediante el goniómetro explicado en el capítulo 2. Como se comentó en el capítulo anterior estas medidas no se realizaron de forma continua sino que se escogieron un conjunto de puntos discretos definidos por una simulación.

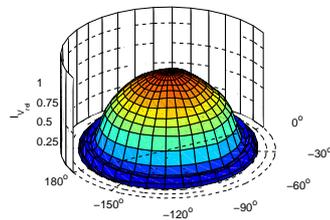
Las medidas angulares se realizaron de forma que todos los puntos de medida quedasen distribuidos uniformemente sobre una semiesfera. En base a este criterio las medidas fueron tomadas con una diferencia de ángulo polar de $\Delta\theta = 5^\circ$ cubriendo el intervalo angular desde $\theta = 0^\circ$ hasta $\theta = 90^\circ$. En esta selección de ángulos la normal del LED se encuentra situada en el ángulo polar $\theta = 0^\circ$. Respecto al ángulo azimutal, las medidas se realizaron en intervalos $\Delta\varphi = 12^\circ$, desde $\varphi = -180^\circ$ hasta $\varphi = 180^\circ$.

Esta selección de puntos nos permitió medir en un total de 589 configuraciones geométricas. De este modo la distribución angular de intensidad luminosa queda únicamente determinada en todas las direcciones del espacio como se podrá ver en las figuras de más adelante. Antes de iniciar una medida las fuentes LEDs son colocadas en el centro del sistema de referencia con ayuda de la cámara CCD que tiene nuestro goniómetro. Este centrado y alineado de las fuentes se realizó mediante el procedimiento explicado en la subsección 2.1.2.1. En todos los casos se realizaron las medidas después de que los LEDs estuviesen estabilizados por debajo de un umbral definido por nuestro laboratorio ($\delta_\tau \leq 0,2\%$). Durante el proceso de medida los LEDs fueron controlados tanto en temperatura como en corriente eléctrica. Estos parámetros se mantuvieron constantes con una temperatura del chip emisor de $T = 25^\circ\text{C}$ y una intensidad de corriente de $I = 350\text{ mA}$ durante toda la medida.

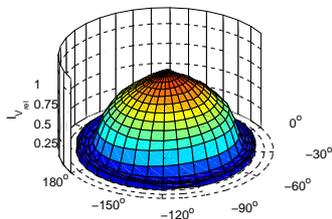
Con el fin de obtener una gran variedad de distribuciones angulares se seleccionaron 18 LEDs con diferentes flujos y distintos ángulos de divergencia. Entre esta selección se encuentran LEDs fabricados por diferentes empresas como *Osram*, *Philips* y *Cree*. Entre estos fabricantes se eligieron 5 LEDs del modelo *Golden Dragon* del fabricante *Osram*, 7 LEDs del modelo *XLamp* del fabricante *Cree* y 6 LEDs del modelo *Lumileds Luxeon Rebel* del fabricante *Philips*. Para cada conjunto de LEDs se seleccionaron fuentes con una emisión espectral diferente entre sí. Estos LEDs emiten en diferentes regiones del espectro: azul, rojo, verde. Además se escogieron los distintos tipos de blancos disponibles en cada fabricante: polar, cálido y neutro. A continuación se muestra la distribución angular obtenida de intensidad luminosa para cada uno de los modelos seleccionados.



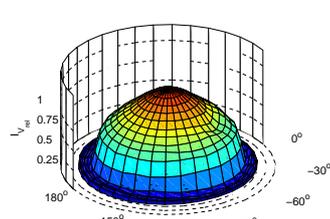
(a) Blanco.



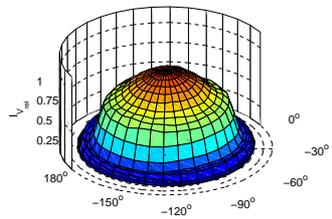
(b) Blanco cálido.



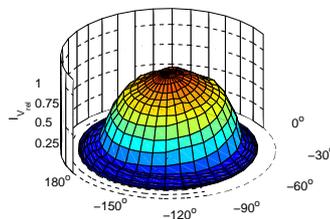
(c) Blanco neutro.



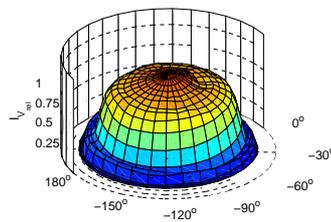
(d) Blanco polar.



(e) Azul.



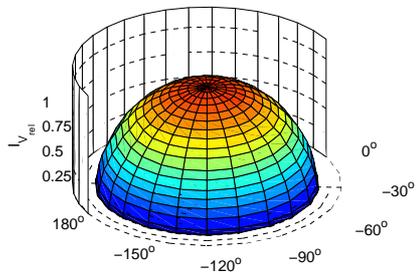
(f) Rojo.



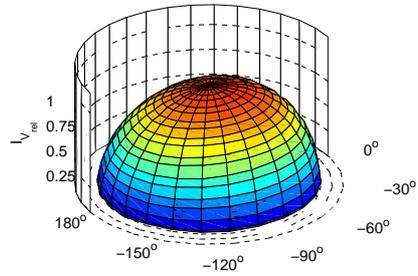
(g) Verde.

Figura 3.1: Distribución angular de los LEDs *Cree XLamp*.

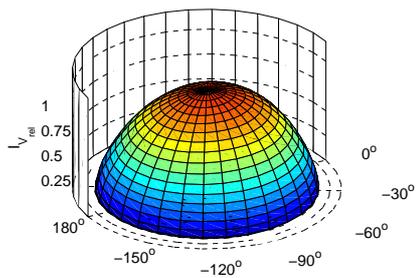
3.1. Medidas realizadas



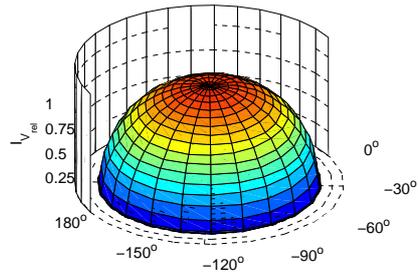
(a) Blanco.



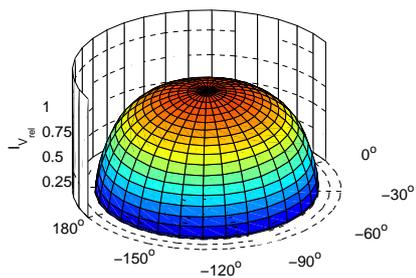
(b) Blanco cálido.



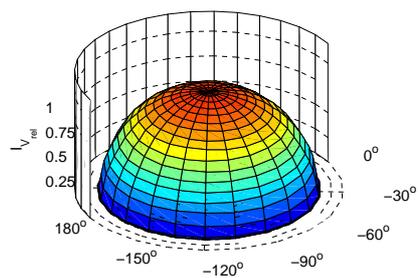
(c) Blanco polar.



(d) Azul.

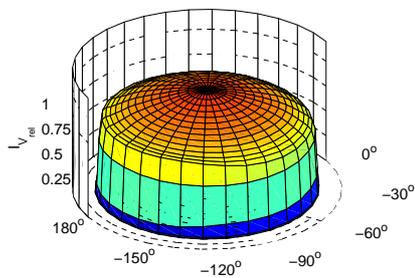


(e) Rojo.

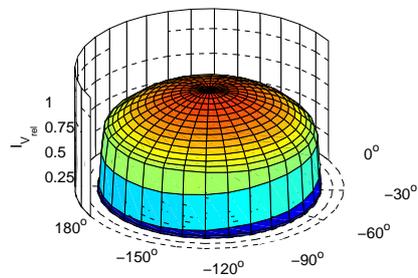


(f) Verde.

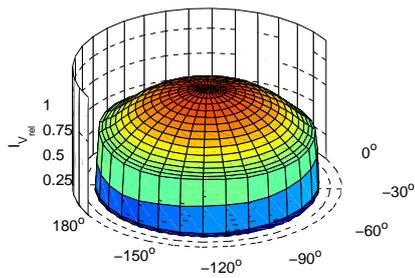
Figura 3.2: Distribución angular de los LEDs *Philips Lumileds Luxeon Rebel*.



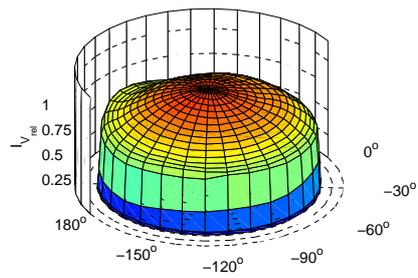
(a) Blanco.



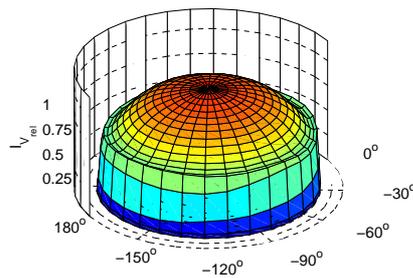
(b) Blanco cálido.



(c) Azul.



(d) Rojo.



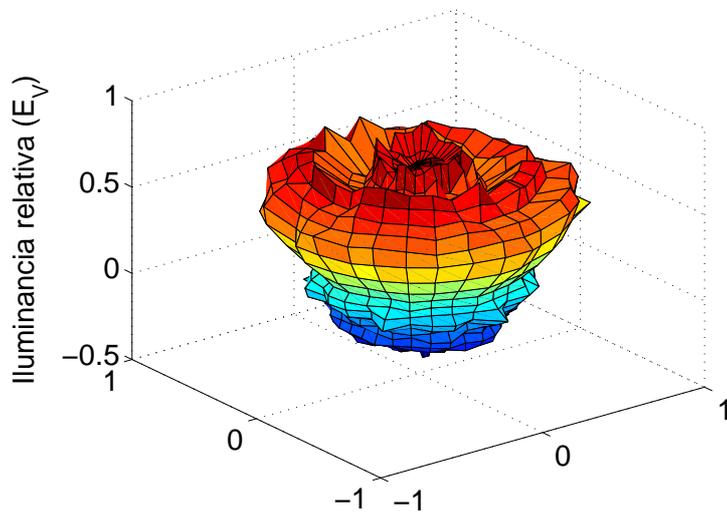
(e) Verde.

Figura 3.3: Distribución angular de los LEDs *Osram Golden Dragon*.

Como comprobación de la versatilidad del goniofotómetro desarrollado, además de los LEDs de alta potencia mencionados anteriormente también se midieron las distribuciones angulares para 8 lámparas LEDs de bulbo claro de diferentes modelos y

3.1. Medidas realizadas

fabricantes, que se han introducido recientemente en el mercado como substitutas de lámparas de incandescencia. Estas lámparas fueron medidas a diferencia de los LEDs de alta potencia entre el ángulo polar $\theta = 0^\circ$ hasta $\theta = 180^\circ$ con un intervalo de $\Delta\theta = 5^\circ$, debido a su emisión en ángulos polares elevados. El resto de grados de libertad se mantuvieron igual que en el caso de los LEDs de alta potencia. Con estos incrementos angulares, se midieron en total 1147 configuraciones geométricas para estas luminarias. Las lámparas así como las distribuciones angulares asociadas a estos tipos de luminarias son mostradas en las figuras 3.4.a, 3.4.b, 3.5.a, 3.5.b, 3.6.a, 3.6.b,s 3.7.a, 3.7.b, 3.8.a, 3.8.b, 3.9.a, 3.9.b, 3.10.a, 3.10.b, 3.11.a, 3.11.b.

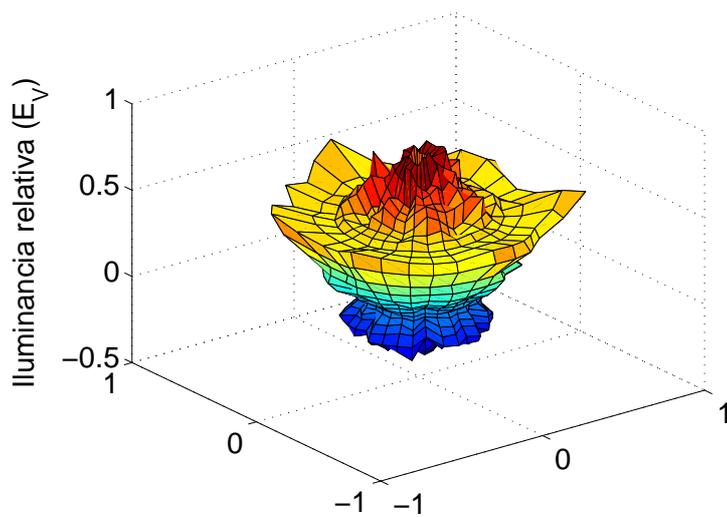


(a) Distribución angular.



(b) Aspecto comercial.

Figura 3.4: Lámpara 839-4766.



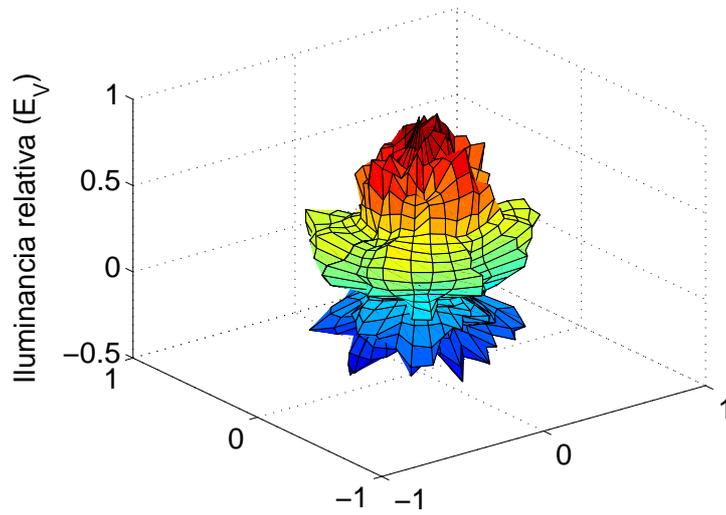
(a) Distribución angular.



(b) Aspecto comercial.

Figura 3.5: Lámpara 839-4766.

3.1. Medidas realizadas

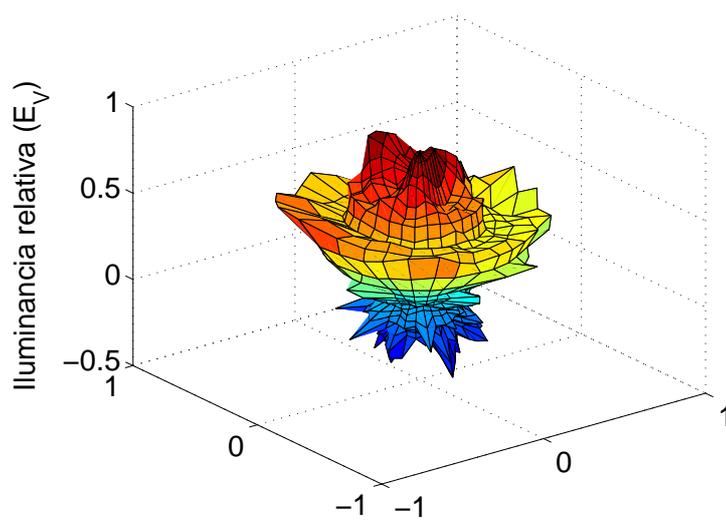


(a) Distribución angular.



(b) Aspecto comercial.

Figura 3.6: Lámpara 820-7975.

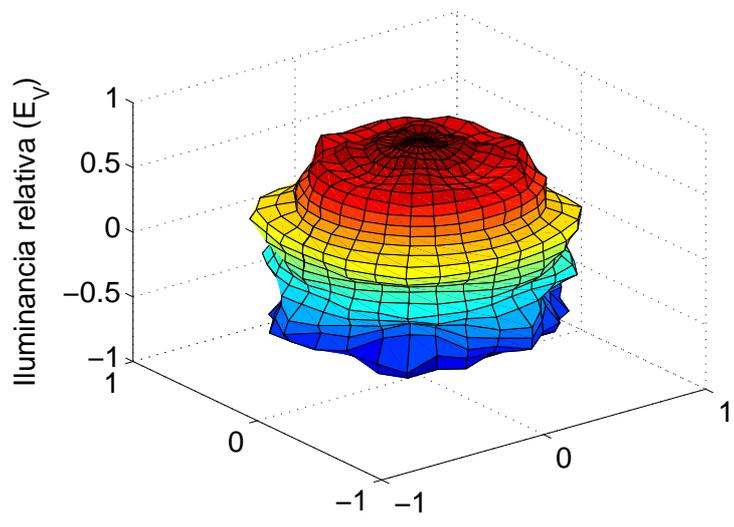


(a) Distribución angular.



(b) Aspecto comercial.

Figura 3.7: Lámpara 820-7987.

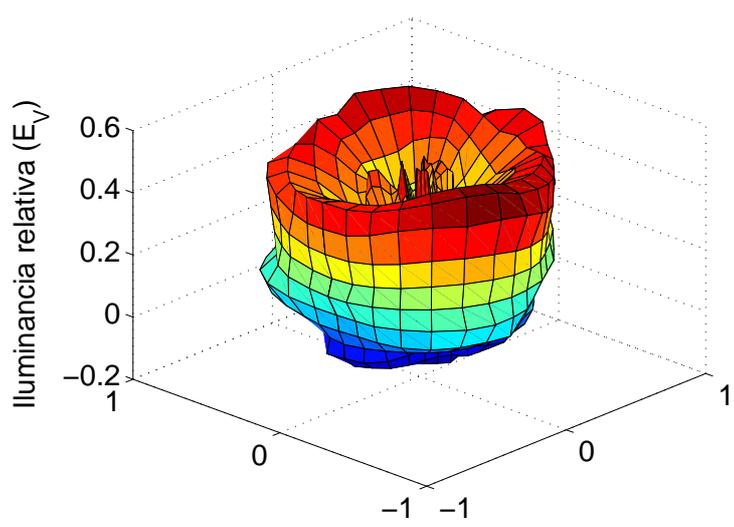


(a) Distribución angular.



(b) Aspecto comercial.

Figura 3.8: Lámpara 829-4180.



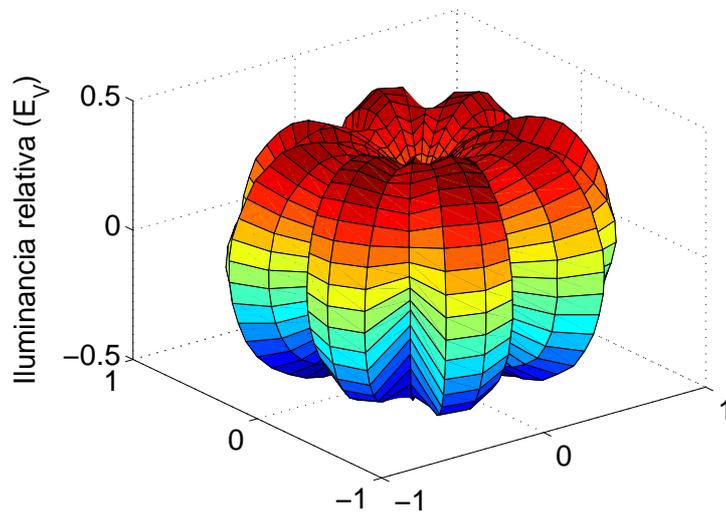
(a) Distribución angular.



(b) Aspecto comercial.

Figura 3.9: Lámpara 829-4247.

3.1. Medidas realizadas

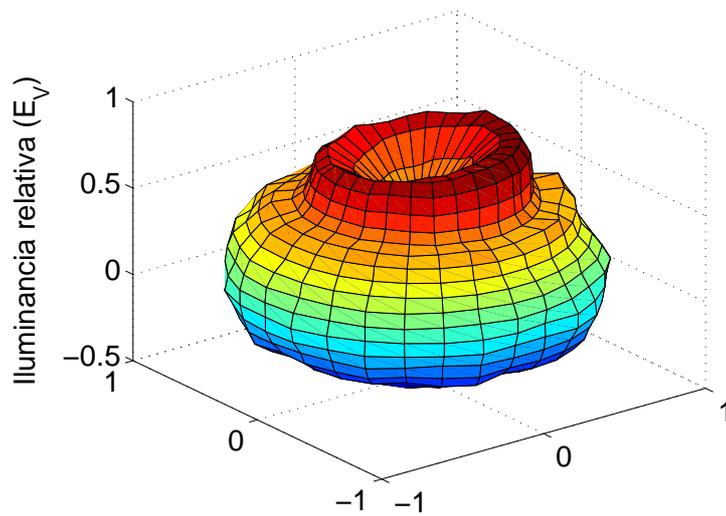


(a) Distribución angular.



(b) Aspecto comercial.

Figura 3.10: Lámpara 836-2781.



(a) Distribución angular.



(b) Aspecto comercial.

Figura 3.11: Lámpara 818-1071.

Debido a la complejidad que atañe y a la importancia de cómo es la emisión de las fuentes de estado sólido en este trabajo, este tema será ampliado en el capítulo siguiente para los LEDs de alta potencia. El hecho de realizarlo para los LEDs de alta potencia y no para las lámparas LED es porque de este modo se tiene un método más genérico ya que dependiendo de la óptica asociada a la lámpara, la distribución angular del LED cambia de forma drástica.

3.1.2. Dependencia de la iluminancia con la distancia

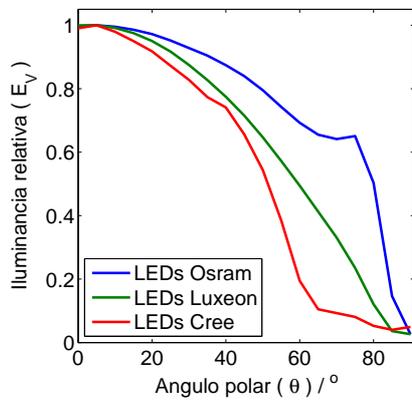
Para desarrollar completamente el potencial del sistema de medida construido, se realizaron medidas utilizando el tercer grado de libertad, la distancia. El objetivo de estas medidas era analizar la dependencia de la iluminancia en función de la distancia, así como el comportamiento de la iluminancia en otros ángulos polares. Para comprobar esta dependencia se utilizaron los LEDs de alta potencia mencionados en la sección anterior.

El estudio de la dependencia de la iluminancia con la distancia se realizó a lo largo de un banco óptico de 2 m. Estas medidas fueron realizadas en 19 posiciones diferentes distribuidas uniformemente en intervalos de 10 cm desde la posición inicial de 10 cm hasta los 190 cm. Estas medidas fueron realizadas tomando el tip como origen de coordenadas. El eje mecánico de la lente viene definido por un láser, el cual se utiliza como referencia para colocar la apertura del fotómetro centrada y perpendicular al fotómetro.

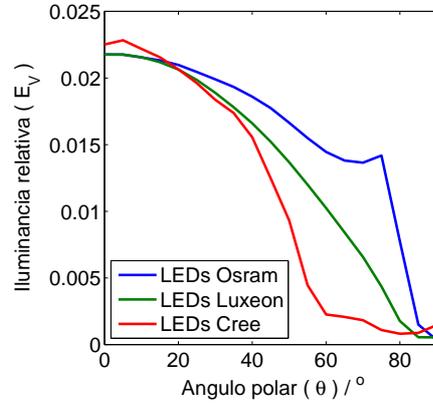
La distribución angular de los LEDs se ha medido a diferentes distancias mediante el goniofotómetro. Las medidas se realizaron desde el ángulo polar $\theta = 0^\circ$ hasta $\theta = 90^\circ$ con un intervalo de $\Delta\theta = 5^\circ$, donde la normal del LED se encuentra situada en el ángulo polar $\theta = 0^\circ$. Como se comentó en el capítulo anterior, el posicionamiento de los LEDs se realizó con ayuda de la cámara CCD. Además, los LEDs se midieron después de un periodo de estabilización controlados a una temperatura constante de $T = 25^\circ\text{C}$ y con una intensidad de corriente constante de $I=350\text{ mA}$.

Como resultado de estas medidas se obtuvieron las siguientes figuras que se muestran a continuación. Estas figuras representan la distribución angular en 4 distancias diferentes para cada uno de los tipos de LEDs utilizados.

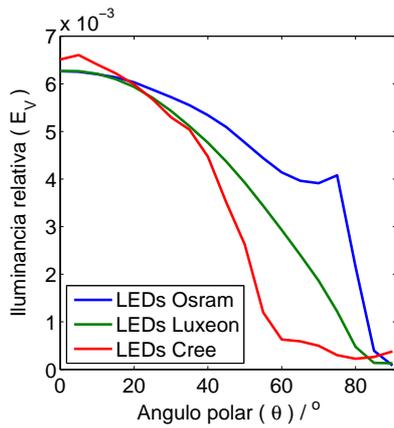
3.1. Medidas realizadas



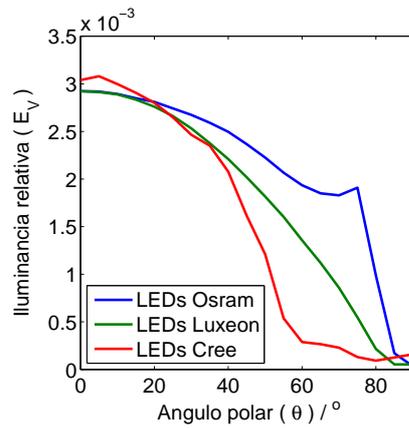
(a) Distribución angular en 10 cm.



(b) Distribución angular en 70 cm.



(c) Distribución angular en 130 cm.



(d) Distribución angular en 190 cm.

Figura 3.12: Distribución angular a 4 distancias diferentes. Los datos corresponden a un LED *Osram* verde, a un LED *Luxeon* blanco polar y a un LED *Cree* rojo.

En la figura 3.12 se observa que la distribución angular de la fuente se sigue conservando independientemente de la distancia donde se realice la medida. Esto nos indica que el modelo de propagación de la radiación es independiente del ángulo polar con el que es observada la fuente. Por otra parte, la figura 3.13 muestra la dependencia de la iluminancia con la distancia a diferentes ángulos polares. Como se puede ver la dependencia es similar para todos los ángulos. En esta figura hemos representado los resultados obtenidos para el LED blanco de *Cree*, pero se obtienen resultados similares para todos los LEDs estudiados.

El objetivo de estas medidas era encontrar un modelo que nos permita predecir la iluminancia a cualquier distancia y dirección, para ello se ajustaron los datos experimentales obtenidos mediante dos modelos diferentes.

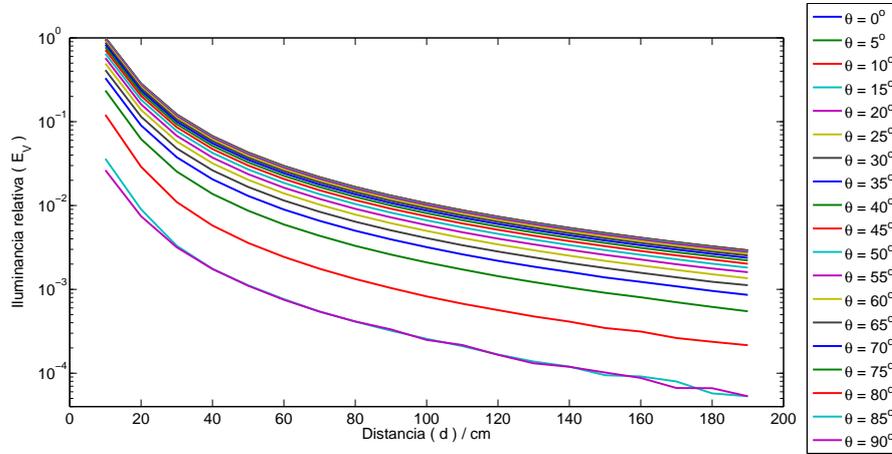


Figura 3.13: Variación de la iluminancia del LED blanco *Cree*, en escala logarítmica, en función de la distancia para diferentes ángulos polares.

El primer modelo (Ec. 3.1) consiste en la ley de la inversa del cuadrado de la distancia modificada con un desplazamiento virtual de la fuente, así como una relación de los tamaños de los componentes. El segundo modelo utilizado (Ec. 3.2) fue la ley de la inversa del cuadrado de la distancia modificada solamente con el desplazamiento virtual de la fuente [37, 38, 39].

$$E_V = \frac{I_V}{(x - \Delta\delta)^2 + r^2} \quad (3.1)$$

$$E_V = \frac{I_V}{(x - \Delta\delta)^2} \quad (3.2)$$

Para estas ecuaciones se ha empleado los símbolos estandarizados E_V e I_V para definir la iluminancia medida y la intensidad luminosa, $\Delta\delta$ se ha empleado para definir el desplazamiento virtual de la fuente desde el tip del LED hasta el punto de emisión, x es la distancia entre la apertura del fotómetro y el plano de referencia definido por el tip del LED y r define el tamaño de la combinación entre la apertura del detector y el radio efectivo de la fuente emisora.

Los valores de los parámetros (I_V , $\Delta\delta$ y r) de los diferentes modelos propuestos se obtuvieron siguiendo dos procedimientos diferentes. La finalidad de seguir dos procedimientos diferentes radica en obtener el valor de estos parámetros de la forma más sencilla posible y con una precisión asequible para la determinación de la iluminancia. En el primer procedimiento se obtuvo el valor de estos parámetros mediante un ajuste por mínimos cuadrados de los valores de iluminancia obtenidos en función de la dis-

3.1. Medidas realizadas

tancia. Este ajuste se realizó para los dos modelos propuestos anteriormente (Ecs. 3.1 y 3.2).

El segundo procedimiento consistió en calcular de forma analítica la solución de cada uno de los parámetros. Una vez obtenidas las expresiones de los parámetros I_V , δ y r , se utilizaron los valores de iluminancia y de distancia en el punto más alejado donde se realizaron las medidas. Este punto fue escogido porque es un valor representativo para determinar el valor de la intensidad luminosa, ya que esta aproximación equivale al valor de I_V en el infinito. Para el siguiente punto se comprobaron todas las distancias (Fig. 3.14), teniendo los valores más precisos para las distancias más cortas. Estos puntos se pueden ver que guardarían una relación con el desplazamiento virtual de la fuente, porque es donde las expresiones tienen más importancia. En este caso se puede ver, como una aproximación de las ecuaciones al límite de campo cercano. En base a este razonamiento se tomó el valor de la iluminancia medido en la posición inicial (10 cm) ya que esta posición representa la condición B recomendada por la CIE. Por último es necesario considerar otro punto de referencia para poder despejar todas las variables de la expresión 3.1. Para este punto, se tomó el valor de iluminancia medido en una posición intermedia. La comprobación de los procedimientos utilizados así como de los modelos empleados en este análisis son mostrados en la figura 3.15 para el LED *Luxeon* verde en incidencia normal $\theta = 0^\circ$.

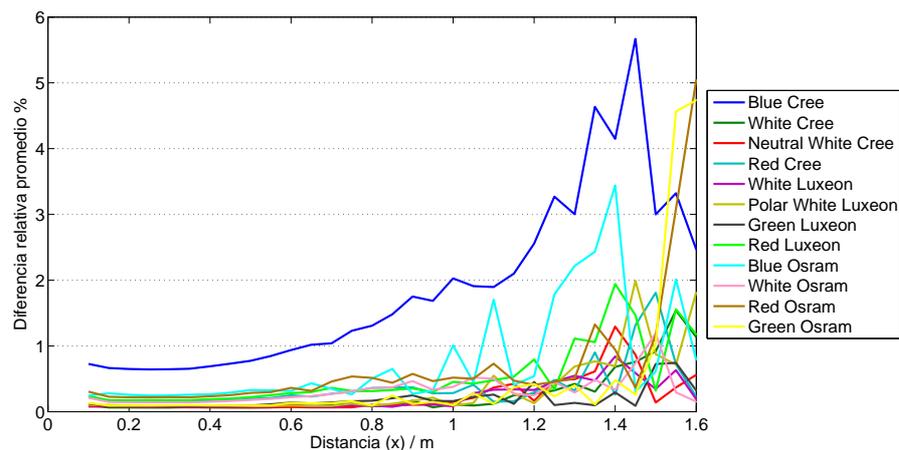


Figura 3.14: Análisis de la diferencia relativa de los datos experimentales con los datos calculados cuando se varía el valor de la posición inicial.

El gráfico 3.15 muestra un ejemplo genérico de como es el comportamiento de los LEDs con la distancia. La figura muestra las desviaciones obtenidas entre los datos

experimentales y los dos modelos considerados en ambos procedimientos. A la vista de estos resultados se pueden establecer las siguientes consideraciones:

- Para todos los LEDs estudiados, el modelo simplificado (Ec. 3.2) es el que da los mejores resultados. El uso de un modelo más complicado no aporta mejoras apreciables.
- Respecto al método de determinación de los parámetros, el mejor resultado se obtiene siempre con el ajuste por mínimos cuadrados.
- Es posible predecir la iluminancia a cualquier distancia con un error inferior al 1 %, haciendo medidas a sólo dos distancias. Una de ellas puede ser la correspondiente a la condición B de la CIE y la otra, una distancia la suficientemente grande para considerar que estemos en condiciones de campo lejano.

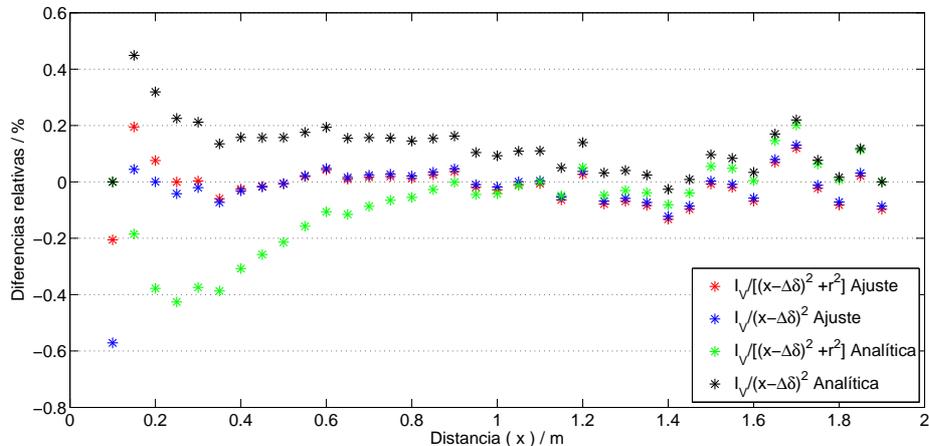


Figura 3.15: Diferencias relativas entre los valores de iluminancia medidos y los calculados con ambos procedimientos en función de la distancia y a $\theta = 0^\circ$, para el LED verde de *Luxeon*.

Para analizar la dependencia con el ángulo polar se utiliza el gráfico 3.16. En esta figura se muestra las diferencias relativas promedio para cada uno de los ángulos polares hasta un ángulo $\theta = 50^\circ$. Esta figura muestra que los valores de las diferencias van aumentando gradualmente a medida que modificamos la dirección de emisión. Calculando el valor promedio de estas diferencias, se observa que éstas se mantienen para ángulos polares $\leq 40^\circ$ incrementándose el valor de la desviación en ángulos polares mayores.

3.1. Medidas realizadas

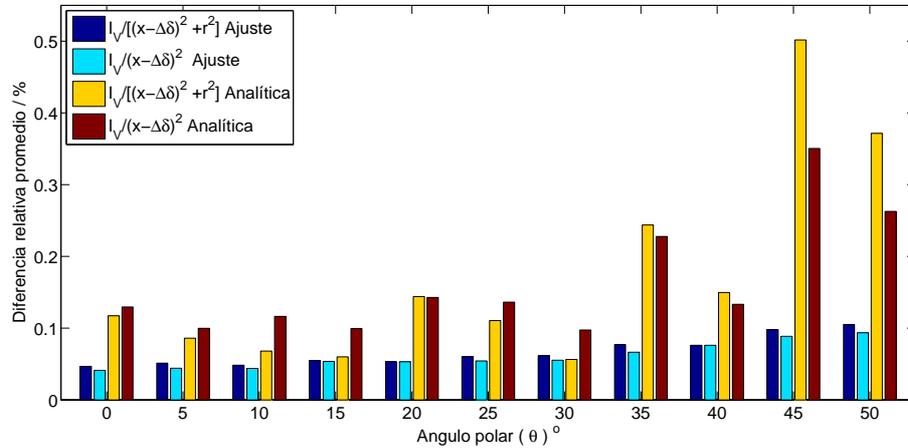


Figura 3.16: Diferencias relativas promedio entre las medidas y los datos obtenidos de iluminancia en distintos ángulos polares.

Por último, se muestra una figura resumen (Fig. 3.17) del resultado obtenido para cada uno de los modelos estudiados. Este gráfico representa el valor de la desviación promedio genérica para cada uno de los LEDs, es decir, en esta figura se analiza el valor promedio obtenido en todas las distancias y en todos los ángulos. Como se muestra en dicha figura el comportamiento de los 2 modelos con los valores ajustados son muy parecidos. A pesar de la proximidad entre los modelos se observa que el modelo de la ecuación 3.2 tiene un comportamiento levemente mejor en algunos de los casos. Esto sugiere que este modelo es el más adecuado para definir la variación de la iluminancia en función de la distancia para los LEDs.

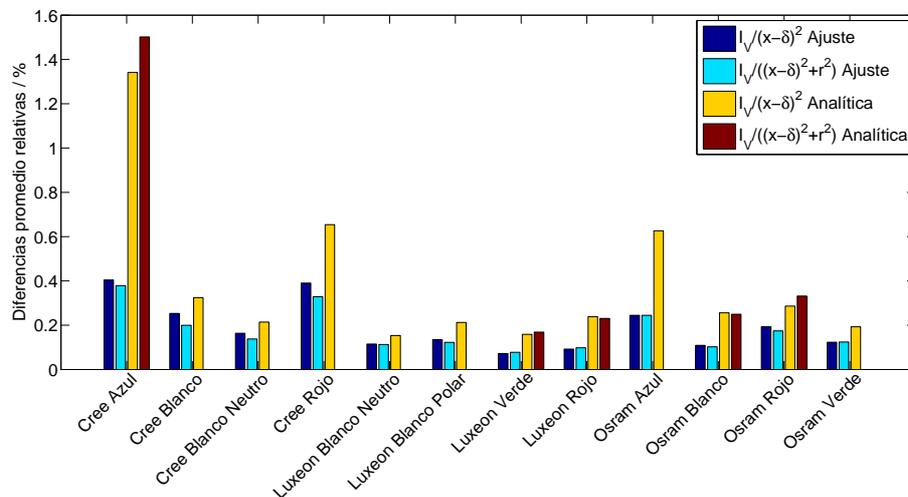


Figura 3.17: Diferencias relativas promedio de las medidas para cada uno de los LEDs medidos y para todos los ángulos y distancias medidas.

3.1. Medidas realizadas

Parte II

Fuentes de estado sólido en configuración de campo lejano

Capítulo 4

Teoría de los polinomios de Zernike aplicado a fuentes de iluminación

Contenido

4.1. Caracterización fotométrica de LEDs a partir de la utilización de los polinomios de Zernike	87
4.1.1. Descripción de los polinomios de Zernike para determinar las propiedades ópticas de los LEDs	88
4.1.2. Propiedades más importantes de los polinomios de Zernike	91
4.2. Determinación de las propiedades ópticas	93
4.2.1. Ángulo de emisión	94
4.2.2. Dirección del eje óptico	95
4.2.3. Inhomogeneidad	96
4.2.4. Anisotropía	96
4.2.5. Flujo total	97
4.2.6. Lambertianidad	97
4.3. Resultados	99
4.3.1. Determinación del número de polinomios necesarios	101
4.3.2. Ángulo de emisión	102
4.3.3. Dirección del eje óptico	103
4.3.4. Inhomogeneidad	104
4.3.5. Anisotropía	105

4. Teoría de los polinomios de Zernike aplicado a fuentes de iluminación

4.3.6. Flujo total	106
4.3.7. Lambertianidad	107

La distribución de la intensidad luminosa (o distribución de luminancia en caso de fuentes extensas) es la magnitud clave para caracterizar una fuente para su uso en aplicaciones de iluminación [40, 37, 41, 42, 43]. Esta distribución se da normalmente en coordenadas esféricas debido a las recomendaciones dadas por la CIE [33, 44] para los programas de cálculo destinados a aplicaciones de iluminación. Sin embargo, las coordenadas polares dan una información más útil a la hora de mostrar las características de emisión de los LEDs, tales como el ángulo de emisión, la dirección del eje óptico, la inhomogeneidad, la anisotropía o incluso el grado de lambertianidad.

En este capítulo se propone realizar una transformación para convertir la distribución angular de intensidad luminosa expresada en la base de coordenadas esféricas a la base de coordenadas polares. Gracias a esta transformación las desviaciones producidas en las magnitudes citadas anteriormente se pueden intuir de forma más sencilla.

Una vez realizada esta transformación, es necesario buscar una base que sea capaz de poder reproducir estas distribuciones angulares. Para solventar este problema se han utilizado los polinomios de Zernike [45], ya que son una secuencia de polinomios ortogonales que están definidos dentro de un disco de radio unidad. Estos polinomios son muy utilizados en el estudio y especificaciones de las aberraciones. Este motivo fue una de las razones que nos planteó utilizar estos polinomios como una base para describir la distribución angular de intensidad luminosa de una fuente. La otra razón es porque con esta base se obtiene una expresión compacta de la distribución angular, mientras que en otras bases como por ejemplo, la base de Bessel, Legendre, Laguerre, Chevyshev, etc.[46], podría ser más complicada. Esto plantearía un trabajo más arduo para definir las expresiones de las características fotométricas en función de como están definidas estas bases.

Los polinomios de Zernike fueron desarrollados por el físico alemán Frits Zernike [47] en 1934. Estos se obtuvieron como un resultado de las eigenfunciones de una ecuación diferencial de segundo orden en su artículo de contraste de fase. La importancia de este trabajo radica en que los polinomios de Zernike forman un conjunto completo de polinomios ortogonales sobre el interior de un círculo unitario [48]. Ade-

más los polinomios de Zernike cumplen ciertas propiedades simples de invariancia que son adecuadas a la hora de describir algunas magnitudes físicas [49]. Aparte del uso que se le dará en este capítulo a los polinomios de Zernike; estos polinomios son habitualmente usados en otras disciplinas como: la caracterización de turbulencias [50] o de las aberraciones ópticas [51, 52]. La base de los polinomios de Zernike es interesante utilizarla en este problema, por sus propiedades analíticas derivadas de la simplicidad de las funciones radiales y de la factorización radial de las funciones azimutales. De este modo esta base permite expresar las características de los LEDs con un número pequeño de polinomios [53].

En las siguientes subsecciones se propone un método basado en los polinomios de Zernike para interpolar la distribución angular de intensidad luminosa de fuentes LEDs. Esta interpolación será a partir de las medidas goniométricas realizadas en diferentes direcciones del espacio ($C - \gamma$ valores fotométricos), permitiendo así poder expresar la distribución angular dentro de un círculo de radio unidad. Esto implica que los polinomios de Zernike se pueden usar para describir la distribución angular de un LED. A partir de la aproximación de los datos experimentales de I_V se derivan otras características y cantidades fotométricas asociadas a este tipo de fuentes. Estas magnitudes se han definido como la divergencia del haz, la dirección del eje óptico, la inhomogeneidad, la anisotropía, el grado de lambertianidad y el flujo total de la fuente.

4.1. Caracterización fotométrica de LEDs a partir de la utilización de los polinomios de Zernike

Para caracterizar la emisión de una fuente de estado sólido es necesario conocer como es su emisión en las diferentes direcciones del espacio [54]. Este conocimiento se puede obtener a través de la medida de la distribución angular de iluminancia. Para ello es necesaria la utilización de sistemas de medida direccionales. En nuestro caso se diseñó y construyó el goniómetro explicado en el capítulo 2. El problema de este tipo de sistemas es que la medida realizada nos permite conocer como es la distribución de intensidad luminosa I_V en posiciones discretas del espacio. Esto implica que es necesario elaborar un procedimiento que permita obtener el valor de I_V en todas las posiciones del espacio para así tener la fuente de estado sólido totalmente caracterizada.

4.1. Caracterización fotométrica de LEDs a partir de la utilización de los polinomios de Zernike

El método que se plantea en éste trabajo se basa en una interpolación de la distribución angular mediante los polinomios de Zernike.

4.1.1. Descripción de los polinomios de Zernike para determinar las propiedades ópticas de los LEDs

Una vez realizada la medida de la distribución angular es necesario desarrollar una técnica que permita obtener estos valores de una forma sencilla. Para ello, un buen punto de partida son las figuras que se obtuvieron en la subsección 3.1. Como se pueden ver en estas figuras, la distribución angular de intensidad luminosa es representada en un sistema de coordenadas esférico. Esta representación ayuda a tener una idea previa de los parámetros ópticos de la fuente estudiada.

Con esta idea previa de la fuente de estado sólido ya se pueden tratar estos datos. Para ello, es necesario expresar los datos de partida de la base esférica en otra equivalente. Este cambio de base se consigue mediante una proyección de los datos de la distribución angular de intensidad luminosa sobre un plano. Por tanto con la transformación empleada se pasa de un sistema en coordenadas esféricas ($3 - D$) a un sistema de coordenadas polares ($2 - D$), donde todos los datos están contenidos dentro de un círculo de radio unidad. Entre los datos de la base $3 - D$ y la base $2 - D$ se mantiene una relación biyectiva, es decir, las dos bases están unívocamente identificadas.

Con este fundamento, resulta natural pensar, que un método eficaz para abordar la descripción de la distribución angular de intensidad luminosa, sea la base de los polinomios de Zernike. De este modo tomando un área circular de radio unidad, área donde está definida la distribución angular, se pueden definir los polinomios de Zernike mediante un conjunto de funciones separables de la forma:

$$Z_n^l(\rho, \vartheta) = R_n^l(\rho) \exp^{il\vartheta} \quad (4.1)$$

siendo ρ la coordenada radial, ϑ la coordenada angular, n es un entero positivo y l puede ser tanto, un número entero positivo como negativo, siempre que cumpla que la

condición de que $n - |l|$ sea par. Además la función $R_n^l(\rho)$ de la expresión 4.1 se puede definir con $m = |l|$ de este modo:

$$R_n^{\pm m}(\rho) = \sum_{k=0}^{\frac{n-m}{2}} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k! (\frac{n+m}{2} - k)! (\frac{n-m}{2} - k)!} \rho^{n-2k} \quad (4.2)$$

Como se verá en la sección 4.1.2 los polinomios de Zernike cumplen ciertas propiedades que son útiles a la hora de expresar la distribución angular de intensidad luminosa. De estas propiedades, se puede destacar el hecho de que estos polinomios nos permiten describir valores reales del campo $F(\rho, \vartheta)$, siempre y cuando, estos valores tengan unas oscilaciones suaves dentro del área definida ($\rho \leq 1$). Por tanto, la distribución angular es expresada mediante un conjunto de coeficientes $C_{n,m}$.

$$F(\rho, \vartheta) = \sum_{n,m} C_{n,m} Z_n^m(\rho, \vartheta) \quad (4.3)$$

Por otro lado, la medida de la distribución angular $I_V(\theta, \varphi)$ es obtenida mediante el goniofotómetro en la base de coordenadas esféricas (ángulo polar θ , ángulo azimutal φ). Esto proporciona un problema para trabajar con la base de polinomios de Zernike. Sin embargo, para este caso, los valores obtenidos en el goniofotómetro tienen un único valor para cada dirección. Esto implica que los valores de $I_V(\theta, \varphi)$ se pueden expresar en una base de coordenadas polares:

$$I_V(\theta, \varphi) = I_V(\rho, \vartheta) \quad (4.4)$$

donde este cambio de base se puede realizar a partir de la transformación:

$$\rho = \sin \theta \quad (4.5)$$

$$\vartheta = \varphi \quad (4.6)$$

4.1. Caracterización fotométrica de LEDs a partir de la utilización de los polinomios de Zernike

Aplicando esta transformación a la ecuación 4.3, se consigue describir los valores medidos dentro de un círculo unitario (Fig.4.1), mediante la expresión:

$$I_V(\rho, \vartheta) = I_V(\sin \theta, \varphi) = \sum_{n,m} C_{n,m} Z_n^m(\sin \theta, \varphi) \quad (4.7)$$

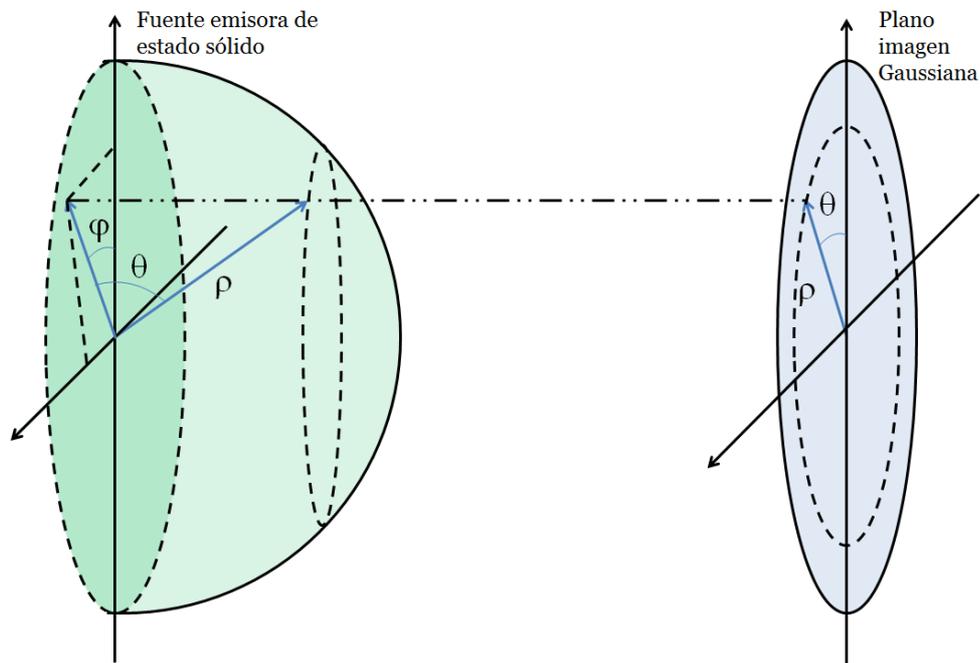


Figura 4.1: Transformación de los polinomios de Zernike.

Con la expresión 4.7 se tiene la ventaja de que la distribución angular de intensidad luminosa de cualquier LED, siempre que este oscile de forma suave, puede describirse de forma sencilla mediante un conjunto de escalares. Estos escalares se han definido como los coeficientes de Zernike, $C_{n,m}$, que acompañan a cada uno de sus correspondientes polinomios (Z_n^m) [55]. A partir de esta expresión la información se puede desglosar en contribuciones parciales, para así ver que coeficientes tienen más relevancia en el frente de onda como se puede ver en la figura 4.2.

Como se ha comentado anteriormente, la ventaja de este método radica en que se puede describir la distribución angular de $I_V(\theta, \varphi)$ con un conjunto pequeño de coeficientes (ver sección 4.3). Pero no sólo tiene esta ventaja, ya que otra de las ventajas de aplicar este procedimiento, es que se pueden obtener todas las características fotométricas que definen a una fuente de estado sólido a partir de la definición de 9 coeficientes de Zernike. Sin embargo, esto no quiere decir que sean necesarios esta

cantidad de coeficientes para definir la distribución angular, aunque si es cierto que la exactitud de la distribución dependerá del número de coeficientes escogidos.

Por otro lado se quiere hacer resaltar que las propiedades de los polinomios de Zernike siguen cumpliéndose, como se demuestra a continuación para algunas de las propiedades. Esto es debido a que la transformación lleva, una base definida en 3-D a una base definida 2-D de forma biyectiva, es decir, cada punto de la base tridimensional esta unívocamente identificado con cada punto de la base bidimensional.

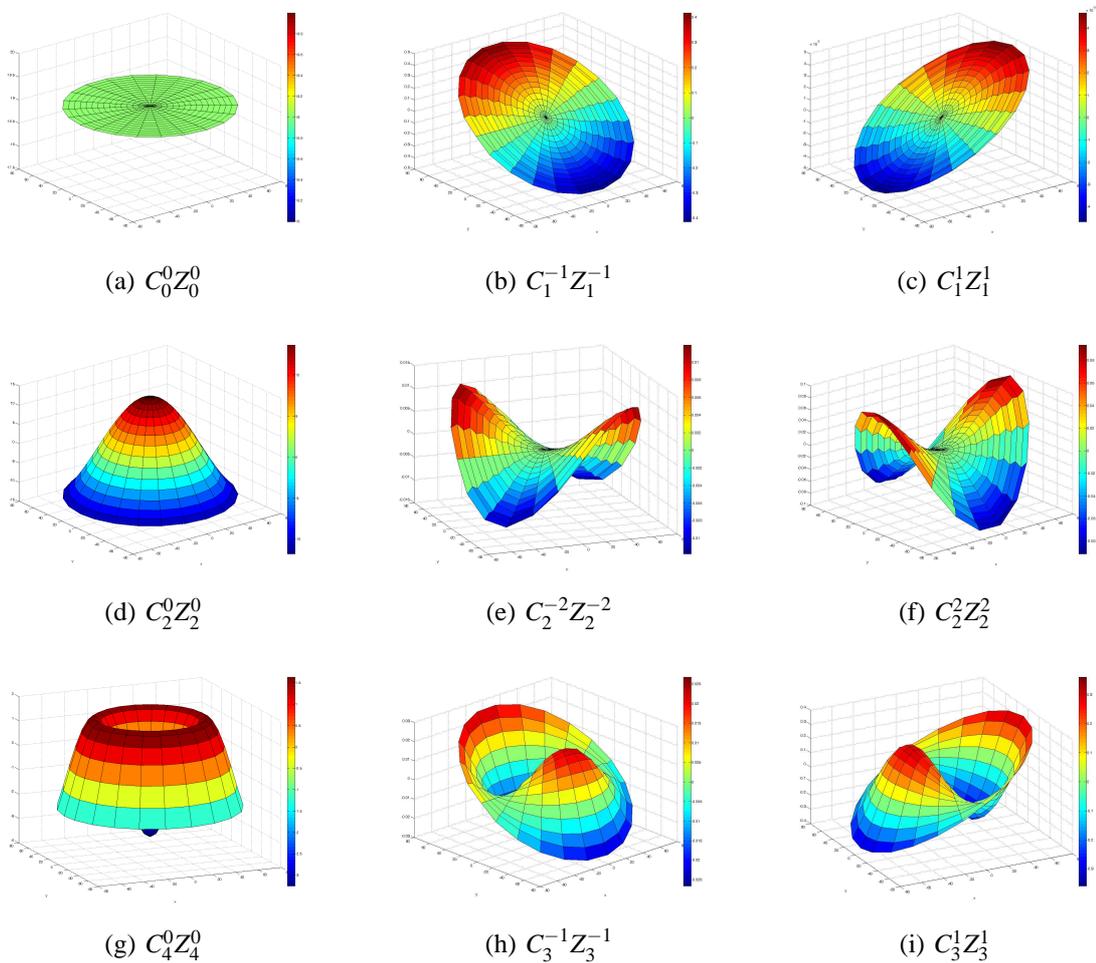


Figura 4.2: Contribución unitaria de algunos de los polinomios de Zernike en la distribución de intensidad luminosa.

4.1.2. Propiedades más importantes de los polinomios de Zernike

A causa de la transformación realizada (Ec. 4.5) es necesario probar que algunas de las propiedades más relevantes en este trabajo siguen cumpliéndose. Esto es debido

4.1. Caracterización fotométrica de LEDs a partir de la utilización de los polinomios de Zernike

a que la descripción de la distribución angular, así como algunas de las magnitudes fotométricas necesitan que se cumplan estas propiedades.

- La primera propiedad de los polinomios de Zernike es la ortogonalidad dentro del círculo de radio unidad.

$$\int_0^1 \left(\int_0^{2\pi} Z_n^{*m}(\rho, \theta) * Z_n^m(\rho, \theta) d\rho \right) d\theta = (4.8)$$

$$\int_0^1 \left(\int_0^{2\pi} a_{mn} * a_{m'n'} * \rho^{n+n'} * \cos(m\theta) * \cos(m'\theta) * \rho d\rho \right) d\theta =$$

$$\int_0^1 \left(\int_0^{2\pi} a_{mn} * a_{m'n'} * \rho^{n+n'+1} * \frac{\cos[(m+m')\theta] + \cos[(m-m')\theta]}{2} d\rho \right) d\theta =$$

$$\frac{a_{mn} * a_{m'n'}}{2} * \left(\frac{\rho^{n+n'+2}}{n+n'+2} \right)_0^1 * \left(\frac{-\sin[(m+m')\theta]}{(m+m')} * \frac{-\sin[(m-m')\theta]}{(m-m')} \right)_0^{2\pi} = 0$$

Con $l'=1$ se observa que el resultado es diferente de 0.

$$\int_0^1 \left(\int_0^{2\pi} Z_n^{*m}(\rho, \theta) * Z_n^m(\rho, \theta) d\rho \right) d\theta = (4.9)$$

$$\int_0^1 \left(\int_0^{2\pi} a_{mn} * a_{mn'} * \rho^{n+n'} * \cos(m\theta) * \cos(m\theta) * \rho d\rho \right) d\theta =$$

$$\int_0^1 \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} a_{mn} * a_{mn'} * \rho^{n+n'+1} * \frac{1 + \cos(2m\theta)}{2} d\rho \right) d\theta =$$

$$\frac{a_{mn} * a_{mn'}}{2} * \left(\frac{\rho^{n+n'+2}}{n+n'+2} \right)_0^1 * \left(\theta - \frac{\sin(2m\theta)}{2m} \right)_0^{\frac{\pi}{2}} = a_{mn} * a_{mn'} \frac{\pi}{n+n'+2}$$

- La segunda propiedad de los polinomios de Zernike es la invariancia rotacional. Esta propiedad indica que cualquier rotación de los ejes en el ángulo ϕ no afecta a la función. Por tanto si se rota los ejes x' e y' un ángulo γ (Fig. 4.3) se obtendría una relación entre las funciones como se muestra en la expresión 4.10.

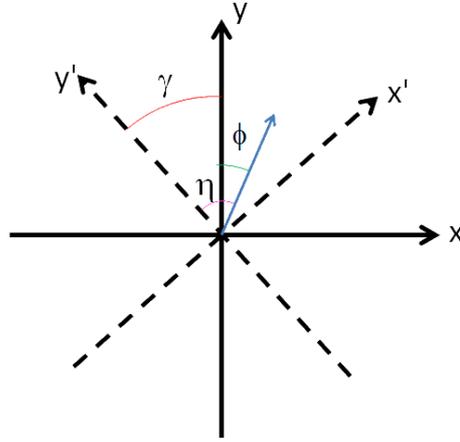


Figura 4.3: Rotación de los ejes de referencia.

$$V(x', y') = H(\gamma) * V(x, y) \quad (4.10)$$

Donde $H(\gamma)$ es una función con un periodo de rotación de 2π . Siendo las funciones $V_n^m(x, y)$ y $V_n^m(x', y')$ funciones de la forma:

$$V_n^m(x, y) = R_n^m(\sin \theta) \exp^{im\phi} \quad (4.11)$$

$$V_n^m(x', y') = R_n^m(\sin \theta) \exp^{im\eta} \quad (4.12)$$

Desarrollando la ecuación 4.12 se obtiene:

$$\begin{aligned} V_n^m(x', y') &= R_n^m(\sin \theta) \exp^{im\eta} = R_n^m(\sin \theta) \exp^{im(\gamma+\phi)} = \\ &R_n^m(\sin \theta) \exp^{im\gamma} \exp^{im\phi} = V_n^m(x, y) \exp^{im\gamma} = V_n^m(x, y)H(\gamma) \end{aligned} \quad (4.13)$$

- La tercera propiedad indica que el grado de la función radial es del orden igual o menor que n . Esta propiedad se puede ver en la ecuación 4.2 donde el grado del polinomio mayor es ρ^{n-2k} y el de menor grado es m .

4.2. Determinación de las propiedades ópticas

Las propiedades fotométricas son derivadas a partir de la función de intensidad luminosa ($I_V(\theta, \phi)$), en el caso de fuentes puntuales. Estas magnitudes se pueden definir

4.2. Determinación de las propiedades ópticas

a partir de los coeficientes que acompañan a los polinomios de Zernike que acabamos de ver en las secciones previas. Para definir una fuente de estado sólido es necesario especificar los descriptores fotométricos que determinan una fuente. En este caso se han definido las siguientes magnitudes: (1) El ángulo de emisión (BA), (2) La dirección del eje óptico (θ_0, φ_0) , (3) La inhomogeneidad (U), (4) La anisotropía (A), (5) El flujo total (Φ_V) y (6) El grado de lambertianidad (g).

4.2.1. Ángulo de emisión

El ángulo de emisión (BA) se define para las fuentes de estado sólido, como la anchura angular que hay entre dos valores contiguos cuyo valor de intensidad luminosa toma el valor medio del máximo de la distribución [44]. Esta magnitud es normalmente conocida con el nombre de anchura a mitad de altura (FWHM). Por tanto para calcular esta propiedad se tiene en cuenta los polinomios P_0 , P_4 y P_8 que se definen en la tabla 4.1. La elección de estos polinomios se debe a que estas fuentes tienen una simetría rotacional y que además la divergencia sólo depende del ángulo polar.

$$P_0 + P_4(\sin \theta_{BA}) + P_8(\sin \theta_{BA}) = \frac{\max[I_V(\theta, \varphi)]}{2} \quad (4.14)$$

si se resuelve de forma analítica esta ecuación para el ángulo polar θ_{BA} se obtiene la siguiente expresión:

$$\theta_{BA} = \arcsin \sqrt{\varepsilon \left(1 \pm \operatorname{sgn}(\varepsilon) \sqrt{1 + \frac{\gamma}{\varepsilon^2}} \right)} \quad (4.15)$$

donde las variables ε y γ son definidas en términos de los coeficientes de Zernike como:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} - \frac{1}{2\sqrt{15}} \frac{C_{2,0}}{C_{4,0}} \quad (4.16)$$

$$\gamma = \frac{-2C_{0,0} + \sqrt{12}C_{2,0} - \sqrt{20}C_{4,0} + \max[I_V(\theta, \varphi)]}{12\sqrt{5}C_{4,0}} \quad (4.17)$$

Como la expresión 4.15 contiene la mitad de información de la distribución angular, se puede definir el ángulo de emisión como en la ecuación 4.18. Para ello, se debe tener en cuenta que la distribución angular de intensidad luminosa tiene que ser simétrica con respecto al eje óptico.

$$BA = \theta_{BA+} - \theta_{BA-} \quad (4.18)$$

4.2.2. Dirección del eje óptico

Otra de las características importantes que se definen en una fuente de estado sólido es el eje óptico. Esta magnitud se indica para mostrar la trayectoria principal de emisión de la fuente luminosa. Esta dirección no siempre coincide con el eje mecánico de la carcasa de la fuente, por lo que es necesario definirlo. Por tanto, estas fuentes de estado sólido tienen un sentido real de definir la dirección de la emisión siempre que la distribución angular del LED tenga un único lóbulo. Para este tipo de distribuciones angulares se define el eje óptico, como la dirección correspondiente al centro de masas definido por las siguientes ecuaciones:

$$x_c = \frac{\int x I_V(x, y) dA}{\int I_V(x, y) dA} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^1 \rho \cos \vartheta I_V(\rho, \vartheta) \rho d\rho d\vartheta}{\int_0^{2\pi} \int_0^1 I_V(\rho, \vartheta) \rho d\rho d\vartheta} = \frac{C_{1,1}}{2C_{0,0}} \quad (4.19)$$

$$y_c = \frac{\int y I_V(x, y) dA}{\int I_V(x, y) dA} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^1 \rho \sin \vartheta I_V(\rho, \vartheta) \rho d\rho d\vartheta}{\int_0^{2\pi} \int_0^1 I_V(\rho, \vartheta) \rho d\rho d\vartheta} = \frac{C_{1,-1}}{2C_{0,0}} \quad (4.20)$$

Una vez obtenidas las coordenadas del centroide de la distribución angular de intensidad luminosa ya se puede relacionar estas variables con la dirección del eje óptico mediante las ecuaciones siguientes:

$$\theta_0 = \arcsin \left(\sqrt{x_c^2 + y_c^2} \right) = \arcsin \left(\frac{\sqrt{(C_{1,1}^2 + C_{1,-1}^2)}}{2C_{0,0}} \right) \quad (4.21)$$

y

$$\varphi_0 = \arctan \left(\frac{y_c}{x_c} \right) = \arctan \left(\frac{C_{1,-1}}{C_{1,1}} \right) \quad (4.22)$$

Para determinar la dirección correcta del eje óptico se considera el signo de x_c e y_c para asignar el valor del ángulo azimutal ($0 \leq \varphi_0 \leq 2\pi$). Como se muestra en las expresiones 4.21 y 4.22 el eje óptico puede ser fácilmente determinado sabiendo el valor de 3 coeficientes de Zernike, $C_{0,0}$, $C_{1,-1}$ y $C_{1,1}$.

4.2.3. Inhomogeneidad

El concepto de inhomogeneidad puede ser interesante en algunas aplicaciones, ya que ésta característica da una idea de cómo se asemeja una fuente LED a una fuente puntual ideal, cuya intensidad luminosa es constante en cualquier dirección. Por este motivo se ha definido la inhomogeneidad U como la raíz cuadrada de la sumatoria de todos los coeficientes de Zernike, excepto para el término $C_{0,0}$, cuyo valor representa el valor medio.

$$U = \sqrt{\sum_{i=1}^8 \frac{\int_0^1 \int_0^{2\pi} P_i^2(\rho, \vartheta) \rho d\rho d\vartheta}{\int_0^1 \int_0^{2\pi} P_0^2(\rho, \vartheta) \rho d\rho d\vartheta}} \quad (4.23)$$

utilizando la propiedad de ortogonalidad comentada en la subsección 4.1.2, se puede simplificar la expresión anterior quedando del siguiente modo:

$$U = \sqrt{\sum_{n \neq 0} \sum_m \hat{C}_{n,m}^2} \quad (4.24)$$

donde $\hat{C}_{n,m} = \frac{C_{n,m}}{C_{0,0}}$. Esta definición conduce a un valor de $U \approx 0$ cuando la emisión del frente de onda llega a ser esférico.

4.2.4. Anisotropía

La siguiente propiedad fotométrica es la anisotropía (A). Esta magnitud es importante para definir una fuente de estado sólido porque indica el grado de simetría rotacional sobre el eje mecánico. El coeficiente de anisotropía viene definido como la variación de la intensidad luminosa con respecto al ángulo azimutal (φ). De este modo, se obtiene un valor de anisotropía diferente para cada ángulo polar θ evaluado. El cálculo de este coeficiente se realiza a partir de la contribución de aquellos polinomios que son independientes del ángulo azimutal, los cuales, son todos menos P_0 , P_2 y P_4 .

$$A(\rho) = \sqrt{\frac{\sum_{i \neq 0,4,8} \int_0^{2\pi} P_i^2(\rho, \vartheta) \rho d\vartheta}{\int_0^{2\pi} [P_0^2(\rho) + P_4^2(\rho) + P_8^2(\rho)] \rho d\vartheta}} = \quad (4.25)$$

$$= \sqrt{\frac{2\pi\rho^3(8\rho_0^2 + \alpha_c \hat{C}_c^2 + \alpha_a \hat{C}_a^2)}{1 + \alpha_d \hat{C}_{2,0}^2 + \alpha_s \hat{C}_{4,0}^2}}$$

donde los coeficientes α_i y C_i viene definidos del siguiente modo:

$$\begin{aligned}
\rho_0 &= \sin \theta_0 \\
\hat{C}_c^2 &= \hat{C}_{3,-1}^2 + \hat{C}_{3,1}^2 \\
\hat{C}_a^2 &= \hat{C}_{2,-2}^2 + \hat{C}_{2,2}^2 \\
\alpha_c &= 4(2 - 3\rho^2)^2 \\
\alpha_a &= 3\rho^2 \\
\alpha_d &= 3(-1 + 2\rho^2)^2 \\
\alpha_s &= 5(1 - 6\rho^2 + 6\rho^4)^2
\end{aligned}$$

4.2.5. Flujo total

El flujo luminoso total Φ_V del LED es la magnitud responsable que determina la cantidad de energía que es capaz de emitir dicha fuente en todas las direcciones del espacio. Este parámetro se calcula mediante una integración de la ecuación 4.7 con respecto al ángulo sólido proyectado $d\Omega = \sin \theta d\theta d\varphi = \rho d\rho d\vartheta$. Esta integración se simplifica en gran medida, ya que la contribución de los polinomios de Zernike dependientes del ángulo azimutal se cancelan. Por tanto la expresión resultante después de la integración queda del siguiente modo:

$$\Phi_V = \int_0^{2\pi} d\vartheta \int_0^1 I_V(\rho, \vartheta) \rho d\rho = 2\pi \left(C_{0,0} + \frac{1}{\sqrt{3}} C_{2,0} + \frac{1}{\sqrt{5}} C_{4,0} \right) \quad (4.26)$$

4.2.6. Lambertianidad

Para finalizar el estudio de los LEDs se tiene en cuenta el parámetro de lambertianidad. La magnitud de lambertianidad nos indica como es la emisión de la intensidad luminosa comparada con la de un emisor ideal. Esto es debido a que el emisor ideal cumple la ley del coseno de Lambert, donde se postula que la emisión de este tipo de fuentes decae proporcionalmente con el coseno del ángulo polar (θ) [56]. Para determinar el grado de lambertianidad de una fuente se calcula el valor de g en la ecuación:

$$I_V(\theta) = I_{V_0} \cos^g \theta \quad (4.27)$$

4.2. Determinación de las propiedades ópticas

La lambertianidad de la fuente se obtiene a partir de la resolución analítica de esta ecuación para el parámetro g . Para ello se evalúa la expresión 4.27 en el valor medio del máximo de intensidad luminosa, donde $I_V(\theta) = \frac{I_{V_0}}{2}$. Por tanto, el valor del ángulo polar (θ) se puede expresar como una función del ángulo de emisión (Ec. 4.18). De este modo la ecuación 4.27 queda expresada en función de los coeficientes de Zernike.

$$\frac{I_{V_0}}{2} = I_{V_0} \cos^g \left(\frac{BA}{2} \right) \quad (4.28)$$

$$g = \frac{-\ln 2}{\ln \left(\cos \frac{BA}{2} \right)} \quad (4.29)$$

A lo largo de todas las subsecciones, se han definido una serie de magnitudes fotométricas que definen todas las propiedades ópticas de una fuente estado sólido. En base a estas características fotométricas, el conjunto de polinomios de Zernike se puede resumir al grupo reducido de 9 polinomios dados en la siguiente tabla:

Tabla 4.1: Nomenclatura utilizada para cada uno de los polinomios utilizados.

Término de Zernike	Contribución a la distribución
$Z_0^0=1$	$P_0 = C_{0,0}Z_0^0$
$Z_1^{-1}(\sin \theta, \varphi)=2 \sin \theta \sin \varphi$	$P_1(\rho, \vartheta) = P_1(\sin \theta, \varphi) = C_{1,-1}Z_1^{-1}(\sin \theta, \varphi)$
$Z_1^1(\sin \theta, \varphi)=2 \sin \theta \cos \varphi$	$P_2(\rho, \vartheta) = P_2(\sin \theta, \varphi) = C_{1,1}Z_1^1(\sin \theta, \varphi)$
$Z_2^{-2}(\sin \theta, \varphi)=\sqrt{6} \sin^2 \theta \sin 2\varphi$	$P_3(\rho, \vartheta) = P_3(\sin \theta, \varphi) = C_{2,-2}Z_2^{-2}(\sin \theta, \varphi)$
$Z_2^0(\sin \theta)=\sqrt{3}(2 \sin^2 \theta - 1)$	$P_4(\rho) = P_4(\sin \theta) = C_{2,0}Z_2^0(\sin \theta)$
$Z_2^2(\sin \theta, \varphi)=\sqrt{6} \sin^2 \theta \cos 2\varphi$	$P_5(\rho, \vartheta) = P_5(\sin \theta, \varphi) = C_{2,2}Z_2^2(\sin \theta, \varphi)$
$Z_3^{-1}(\sin \theta, \varphi)=\sqrt{8}(3 \sin^3 \theta - 2 \sin \theta) \sin \varphi$	$P_6(\rho, \vartheta) = P_6(\sin \theta, \varphi) = C_{3,-1}Z_3^{-1}(\sin \theta, \varphi)$
$Z_3^1(\sin \theta, \varphi)=\sqrt{8}(3 \sin^3 \theta - 2 \sin \theta) \cos \varphi$	$P_7(\rho, \vartheta) = P_7(\sin \theta, \varphi) = C_{3,1}Z_3^1(\sin \theta, \varphi)$
$Z_4^0(\sin \theta)=\sqrt{5}(6 \sin^4 \theta - 6 \sin^2 \theta + 1)$	$P_8(\rho) = P_8(\sin \theta) = C_{4,0}Z_4^0(\sin \theta)$

4.3. Resultados

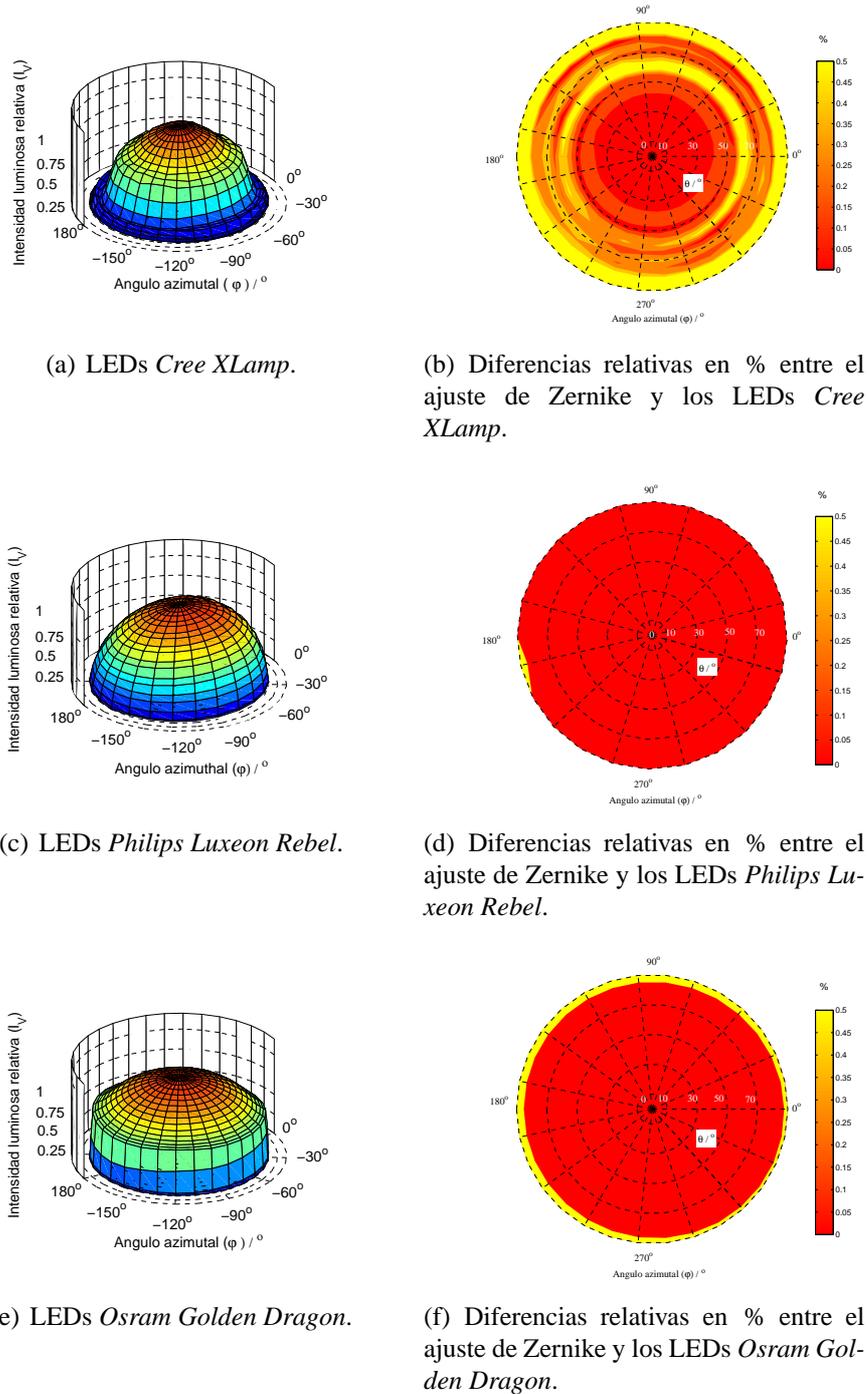


Figura 4.4: Distribución angular de intensidad luminosa para los 3 tipos de fuentes de estado sólido medidas en el laboratorio y las diferencias relativas entre las medidas experimentales y los datos ajustados por Zernike.

4.3. Resultados

Visto el procedimiento que se va a emplear para analizar los datos sólo queda aplicárselo a las diferentes distribuciones angulares que se midieron en la subsección 3.1.1. Como se mencionó en esta subsección, sólo se va a emplear el procedimiento descrito, a las fuentes de estado sólido que no están implementadas ya como una lámpara, debido a la multitud de casuística que se encuentra en el mercado.

En las figuras 4.4 a), 4.4 c) y 4.4 e) se muestra las distribuciones angulares de intensidad luminosa (valores fotométricos $C\text{-}\gamma$) que se van a estudiar en este apartado, donde la posición radial (ρ) de la representación viene dada por el $\text{sen}\theta$.

Para poder describir estas distribuciones angulares de intensidad luminosa se ha realizado la transformación que se definió en las ecuaciones 4.5 y 4.6, cuyos valores han sido ajustados con los polinomios de Zernike. Estos ajustes son comparados con los datos experimentales mediante un gráfico en 2 dimensiones en las figuras 4.4 b), 4.4 d) y 4.4 f) para ver las diferencias relativas existentes entre los dos. Como se puede ver en estas figuras el ajuste es muy bueno para los LEDs *Philips Luxeon Rebel*, cuyos valores de la distribución angular varían suavemente. Otra de las distribuciones que se ajustan muy bien son para los LEDs *Osram Golden Dragon*, donde se tiene unas diferencias relativas pequeñas hasta el ángulo polar de 80° . Esto se debe a que en este punto la distribución tiene una caída fuerte hasta hacerse nula en 90° . Para el caso de los LEDs *Cree* se tiene un ajuste un poco peor que en los casos anteriores debido a que este tipo de distribuciones tiene oscilaciones abruptas en ciertos puntos de θ .

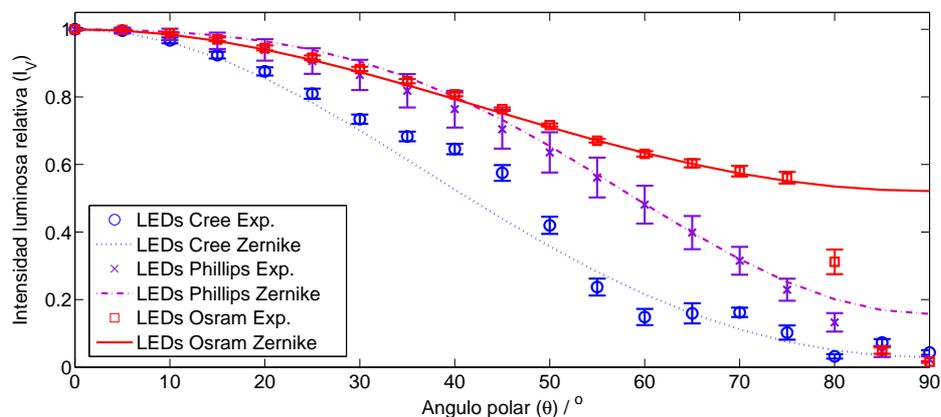


Figura 4.5: Distribución angular tipo de intensidad luminosa para cada uno de los diferentes fabricantes estudiados.

En la figura 4.5 se muestra un corte de la distribución angular para dar una idea más clara de las diferencias obtenidas entre los datos experimentales y los datos ajustados.

Estas barras de error representan la desviación típica de los valores de la distribución para cada ángulo azimutal. En esta figura se puede ver en más detalle la caída abrupta que tiene la distribución angular de intensidad luminosa de los LEDs *Osram Golden Dragon* cuando estos sobrepasan un ángulo polar de 75° .

4.3.1. Determinación del número de polinomios necesarios

Para determinar la cantidad de polinomios de Zernike necesarios a la hora de representar la distribución angular de intensidad luminosa, se ha realizado un análisis de la suma cuadrática del error. En la figura 4.6 se muestra la bondad del ajuste obtenida por los diferentes términos que participan en el ajuste de los polinomios de Zernike. En esta figura se representa los valores relativos de la suma cuadrática de los errores (SSE) obtenidos en escala semi-logarítmica para los 18 LEDs de alta potencia que se han estudiado. Este valor de SSE es representado en función de la cantidad de coeficientes que se han empleado a la hora de describir $I_V(\theta, \varphi)$. El valor de SSE con un único término corresponde a la función $I_V(\theta, \varphi)$ definida sólo por el coeficiente constante ($C_{0,0}$); con 2 términos se le añade el coeficiente $C_{2,0}$ con su polinomio, así hasta coger todos los polinomios de Zernike con sus correspondientes coeficientes de peso. La elección de estos polinomios viene determinada en el eje secundario de abscisas que hay encima del gráfico. Esta elección de los coeficientes se ha realizado en función del mayor valor promedio correspondiente a los 18 LEDs estudiados.

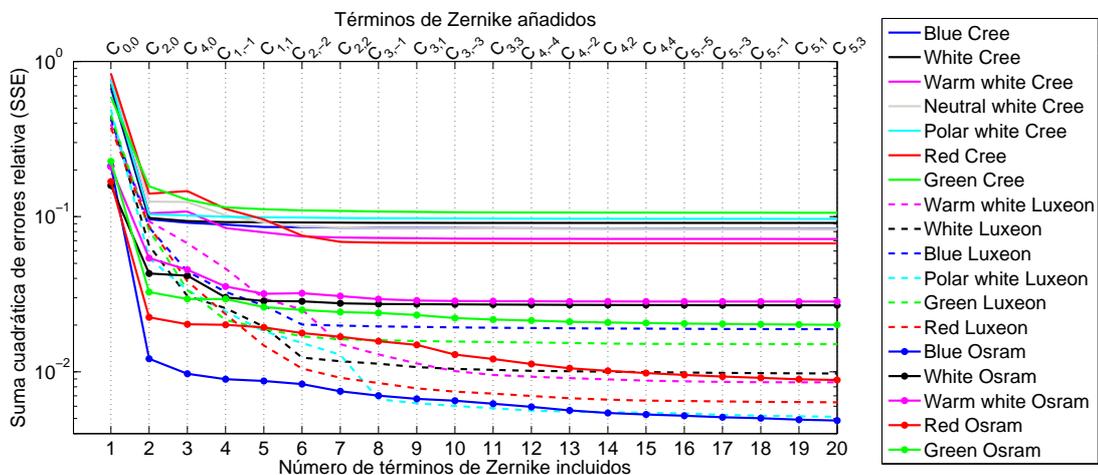


Figura 4.6: Bondad de ajuste obtenida por la aproximación de Zernike. Valor relativo de la suma cuadrática del error en escala semi-logarítmica para los 18 LEDs estudiados en función del número de coeficientes empleados en el ajuste.

4.3. Resultados

En la figura 4.6 se hace evidente que hay 2 ($C_{0,0}$ y $C_{2,0}$) polinomios que resaltan sobre los demás, ya que el valor de la SSE disminuye drásticamente para todos los casos estudiados. Para el caso de los LEDs *Osram Golden Dragon* se observa que la adición del número de polinomios a la función de intensidad luminosa no produce ninguna mejora significativa. Además para los LEDs *Osram Golden Dragon* y para los LEDs *Philips Luxeon Rebel* se tiene que el valor de la SSE tiende al 4% cuando se utilizan los 5 polinomios de Zernike que hemos designado. Para la mayoría de estos LEDs, excepto para el LED blanco cálido de *Philips*, se pueden emplear 2 polinomios de Zernike ($C_{2,0}$ y $C_{4,0}$) para ajustar la distribución angular de la intensidad luminosa, manteniendo una SSE relativa inferior al 5%. Sin embargo, para los LEDs *Cree Xlamp* el resultado es muy diferente. Para la mayoría de estos LEDs se tiene que la SSE relativa no mejora significativamente con la adición de polinomios, manteniéndose estas diferencias en torno al 7%. Por lo tanto, para dar una expresión definitiva y que sea útil para determinar las propiedades ópticas, se ha decidido utilizar los 9 polinomios dados en la tabla 4.1 para expresar la función de intensidad luminosa.

Como se ha comprobado en la subsección anterior los polinomios de Zernike describen la distribución angular de intensidad luminosa con un conjunto pequeño de escalares. El siguiente paso es analizar una por una las diferentes propiedades fotométricas que se comentaron en la sección 4.2.

4.3.2. Ángulo de emisión

Mediante la ecuación 4.15 que se derivó de la distribución angular de intensidad luminosa, se han determinado los valores del ángulo de emisión para cada uno de los 18 LEDs de alta potencia estudiados. Los resultados de la tabla 4.2 muestran los resultados obtenidos mediante dos procedimientos diferentes. El primer procedimiento consiste en determinar el valor del ángulo polar (θ) cuando la distribución angular medida alcanza el valor medio del máximo de I_V . En el segundo procedimiento se determina el valor del ángulo de emisión mediante el análisis de Zernike que se comentó anteriormente.

Como se puede ver en la tabla 4.2 los valores del ángulo de emisión se encuentran en un rango entre los 70° y los 150° . Estos resultados se pueden comprobar en la figura 4.5, donde se muestra la distribución angular de intensidad luminosa para un ángulo azimutal (φ) de 0° .

Tabla 4.2: Valores del ángulo de emisión determinados entre la medida directa y el análisis de Zernike.

		Ángulo de haz / °		
		Medida directa	Zernike	Desviación absoluta
<i>Cree Xlamp</i>	Polar White	93.9	80.4	-13.5
	White	92.3	81.8	-10.5
	Warm White	89.6	76.8	-12.8
	Neutral White	85.2	75.6	-9.6
	Blue	93.5	83.0	-10.5
	Red	75.9	73.4	-2.5
	Green	96.1	92.4	-3.7
<i>Philips Luxeon Rebel</i>	Polar White	101.3	105.7	4.4
	Warm White	114.0	118.1	4.1
	Neutral White	106.6	111.8	5.2
	Blue	112.3	116.5	4.2
	Red	118.4	121.3	2.9
	Green	110.6	113.5	2.9
<i>Osram Golden Dragon</i>	White	150.7	–	–
	Warm White	145.5	157.3	11.8
	Blue	152.2	–	–
	Red	151.8	–	–
	Green	147.0	–	–

En este gráfico se observa que los LEDs *Philips* son los que tienen una mejor aproximación con el ajuste de Zernike, siendo su error promedio de 4°. Estos resultados son consistentes, ya que la resolución con la que se han realizado las medidas es superior (5°). Por el contrario, para la mayoría de los LEDs *Osram* no se han obtenido valores del ángulo de emisión. Esto es porque la expresión 4.15 está indeterminada a causa de que los valores de la distribución angular de intensidad luminosa quedan por encima del valor medio del máximo. Para los LEDs *Cree* se obtiene un error promedio de -9°, con unas desviaciones entre los -2.5° y los -13°.

4.3.3. Dirección del eje óptico

Mediante las expresiones 4.21 y 4.22 se puede hacer un estudio de cómo es la variación entre el eje óptico y el eje mecánico. Representando estos valores sobre el diagrama polar de la figura 4.7 se observa que los valores obtenidos están aleatoria-

4.3. Resultados

mente distribuidos alrededor del eje mecánico (origen de coordenadas). Además se observa que la mayor desviación angular de los valores es de 2.5° estando comprendidas la mayoría de las desviaciones entre 0° y 1° . También es notorio que los LEDs *Osram*, cuya divergencia es mayor, tenga un valor del eje óptico por debajo del resto de fabricantes ($\leq 0.5^\circ$).

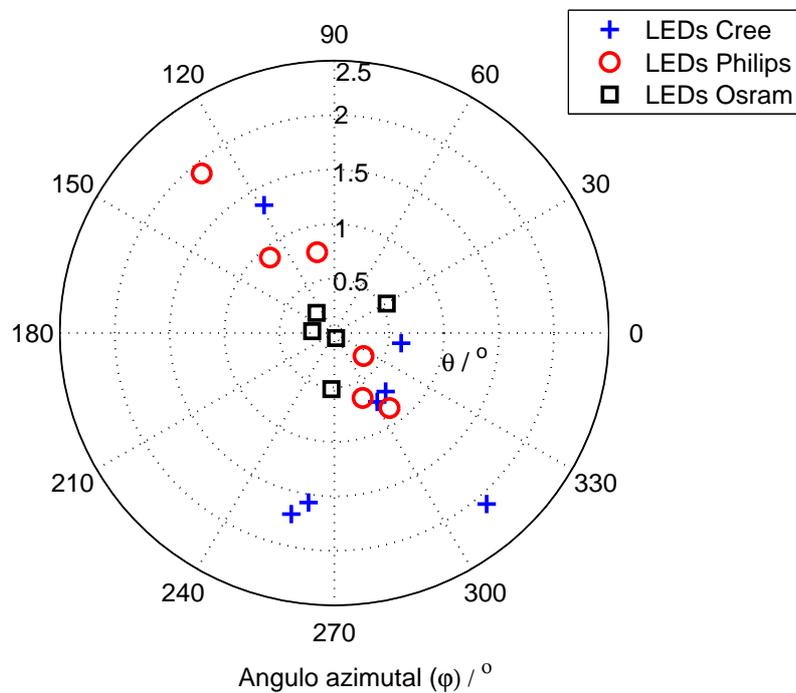


Figura 4.7: Dirección del eje óptico obtenido para cada uno de los LEDs estudiados.

4.3.4. Inhomogeneidad

Otra de las características mencionadas para las fuentes de estado sólido es la inhomogeneidad. En la figura 4.8 se muestra el cociente entre los datos obtenidos por la expresión 4.24 (U_{Zer}) y la desviación estándar relativa de las medidas de intensidad luminosa (U_{std}) para ver la correlación existente entre ellas.

Como se muestra en este gráfico, entre los valores U_{Zer} y U_{std} existe un factor de proporcionalidad que relacionan ambas variables. Esto puede ser parcialmente explicado por la distribución de las direcciones tomadas al realizar la medida sobre las cuales se ha determinado U_{std} .

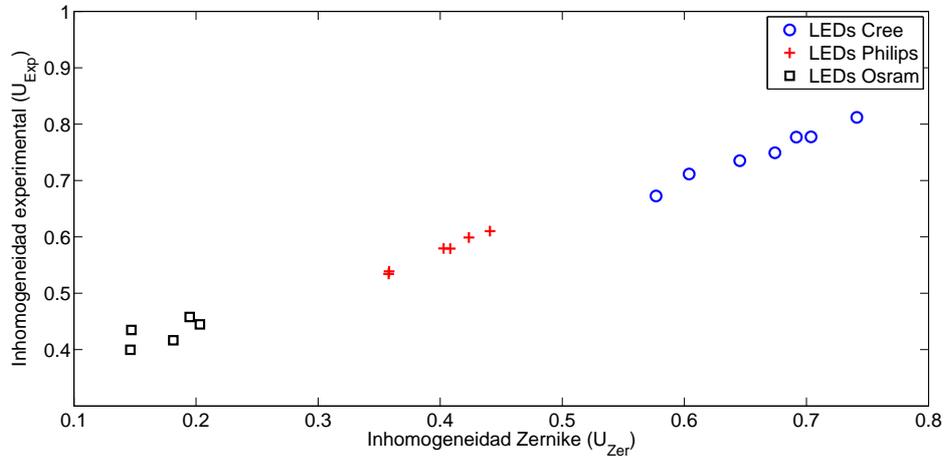


Figura 4.8: Valores de inhomogeneidad obtenidos para cada uno de los LEDs.

Para aclarar este concepto, hay que tener en mente que las medidas fueron realizadas uniformemente distribuidas en el espacio de coordenadas esféricas, lo cual implica que para ángulos polares pequeños la densidad de puntos sea mayor. Además en esta figura se puede observar que aquellos LEDs que tienen un ángulo de emisión mayor tienen un valor de inhomogeneidad menor.

4.3.5. Anisotropía

En la siguiente figura se muestran los valores obtenidos de anisotropía obtenida por diferentes métodos. El primer procedimiento determina el valor de la anisotropía (A_{std}) para cada ángulo polar (θ) mediante la desviación típica de los valores obtenidos en cada ángulo azimutal (φ). El segundo modo de determinar la anisotropía (A_{Zer}) es mediante la ecuación 4.25 que se obtuvo anteriormente. En la figura 4.9 se muestra los resultados obtenidos mediante los diferentes métodos para cada uno de los tipos de LEDs estudiados.

Como se muestra en esta figura, los LEDs presentan una anisotropía alrededor del 2% para ángulos polares menores a 50° , incrementándose esta rápidamente para valores del ángulo polar altos. También se puede ver en esta figura que los valores de anisotropía basados en el ajuste de Zernike son muy próximos a los valores A_{std} para ángulos menores de 75° aproximadamente. Estos resultados son consistentes con las desviaciones obtenidas en las figuras 4.4.b), 4.4.d) y 4.4.e), que muestran una desviación mayor en valores altos de θ .

4.3. Resultados

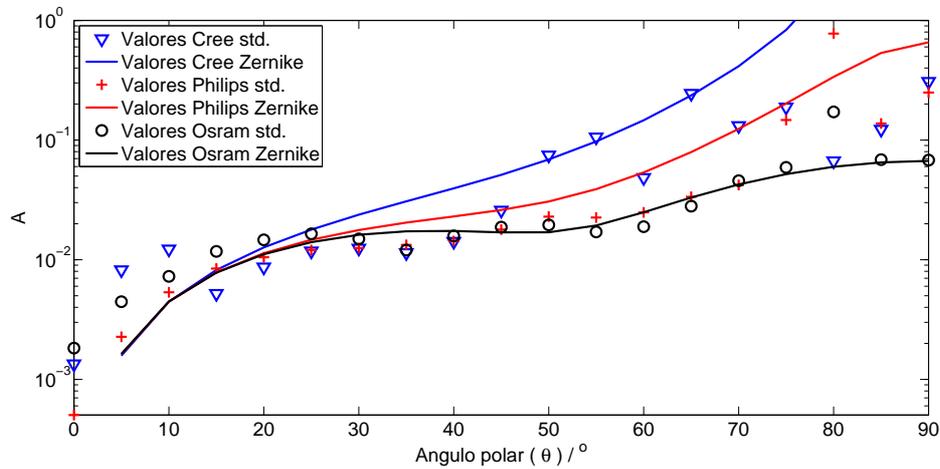


Figura 4.9: Anisotropía $A(\theta)$ promedio en el ángulo azimutal para los 3 tipos de LEDs estudiados.

4.3.6. Flujo total

Tabla 4.3: Comparación del flujo total entre los valores obtenidos experimentales y los valores obtenidos basados en el análisis de Zernike.

		Flujo total / lum		Desviación / %
		Exp.	Zer.	
<i>Cree Xlamp</i>	Polar White	90.2	84.6	-6.2
	White	76.4	72.5	-5.2
	Warm White	45.9	41.6	-9.3
	Neutral White	56.2	54.3	-3.4
	Blue	20.7	20.1	-2.5
	Red	41.1	38.1	-7.3
	Green	68.0	64.1	-5.8
<i>Philips Luxeon Rebel</i>	Polar White	73.5	75.8	3.0
	Warm White	43.8	45.5	4.0
	Neutral White	46.7	48.4	3.5
	Blue	29.1	30.0	3.1
	Red	55.1	57.4	4.1
	Green	84.0	86.0	2.4
<i>Osram Golden Dragon</i>	White	97.4	113.5	16.6
	Warm White	78.1	88.9	13.8
	Blue	18.3	20.8	13.9
	Red	44.1	50.8	15.1
	Green	64.7	74.1	14.6

Para determinar los valores del flujo total que es emitido por una fuente sólo hay que sumar discretamente cada uno de los valores obtenidos de la distribución angular de intensidad luminosa. Estos valores son comparados en la tabla 4.3 con los valores calculados por la integración directa de la función de intensidad luminosa (Ec. 4.26). La tabla muestra que los coeficientes de Zernike permiten determinar el valor del flujo total de una fuente de estado sólido con un error estimado menor al 4 % para los LEDs *Philips*. Para los LEDs *Cree* se obtienen unas diferencias más elevadas, y con signo contrario debido a las pequeñas oscilaciones que tienen estos. Por último para los LEDs *Osram*, se tiene un error promedio del 14% a causa de que la distribución angular de intensidad luminosa cae fuertemente en ángulos polares elevados, y como se ha visto anteriormente, este procedimiento no es capaz de reproducir la distribución angular con el número de polinomios seleccionados.

4.3.7. Lambertianidad

Tabla 4.4: Valores de lambertianidad (g) obtenidos a partir de la ley del coseno de Lambert para cada uno de los LEDs estudiados.

		$g_{LSF} \pm U(k=2)$	g_{Zer}	Desviación absoluta
<i>Cree Xlamp</i>	Polar White	2.22 ± 0.30	2.6	0.38
	White	2.14 ± 0.29	2.47	0.33
	Warm White	2.40 ± 0.24	2.85	0.45
	Neutral White	2.49 ± 0.32	2.94	0.45
	Blue	2.03 ± 0.29	2.40	0.37
	Red	2.63 ± 0.35	3.13	0.50
	Green	1.67 ± 0.29	1.88	0.21
<i>Philips Luxeon Rebel</i>	Polar White	1.40 ± 0.03	1.38	-0.02
	Warm White	1.08 ± 0.03	1.04	-0.04
	Neutral White	1.25 ± 0.04	1.20	-0.05
	Blue	1.20 ± 0.09	1.08	-0.12
	Red	1.04 ± 0.07	0.97	-0.07
	Green	1.28 ± 0.09	1.15	-0.13
<i>Osram Golden Dragon</i>	White	0.60 ± 0.19	–	–
	Warm White	0.70 ± 0.17	0.93	0.23
	Blue	0.63 ± 0.12	–	–
	Red	0.56 ± 0.12	–	–
	Green	0.70 ± 0.13	–	–

4.3. Resultados

El parámetro de lambertianidad (g) ha sido obtenido mediante un ajuste por mínimos cuadrados (g_{LSF}) y mediante la ecuación obtenida en la subsección 4.2.6 (Ec. 4.29). Los valores obtenidos mediante ambos procedimientos son mostrados en la tabla 4.4.

Como se muestra en esta tabla se tienen unas diferencias entre los valores calculados por el ajuste (g_{LSF}) y los valores obtenidos por Zernike (g_{Zer}) menores que la incertidumbre de ajuste, por tanto estos valores se pueden considerar que son equivalentes para el caso de los LEDs *Philips*. Para los LEDs *Cree*, cuyos valores son mayores que 1, se tiene que las diferencias entre ambos valores de g son mayores que el valor de la incertidumbre del ajuste para los casos en que el valor de g es mayor que 2. Para el caso de los LEDs *Osram* no se pudo obtener el valor de (g_{Zer}) para la mayoría de los casos debido a que no se pudo calcular el valor del ángulo de emisión.

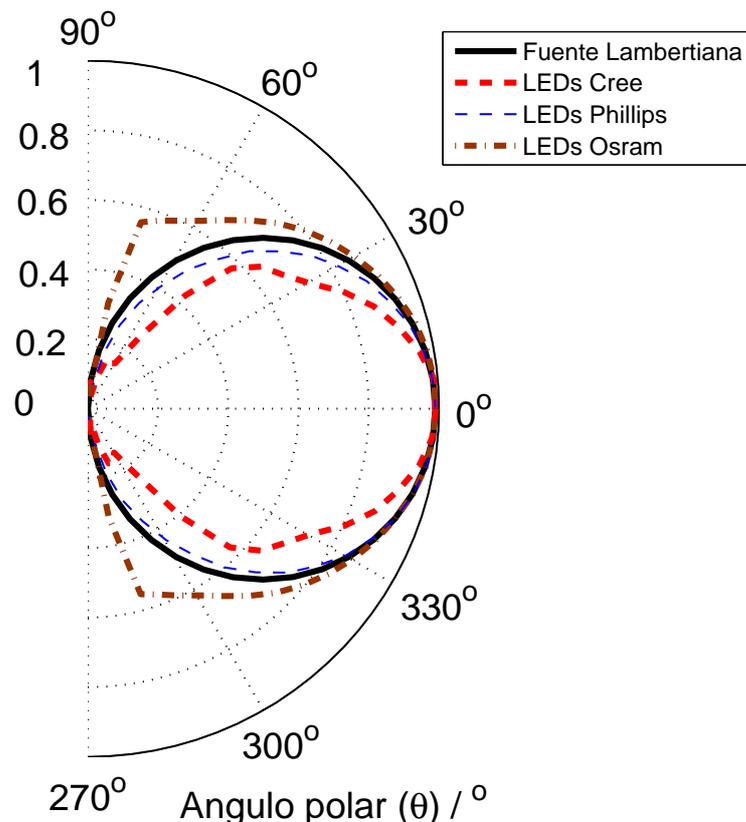


Figura 4.10: Grado de lambertianidad de cada uno de los tipos de LEDs.

En la figura 4.10 se muestra la lambertianidad que presentan los 3 tipos de LEDs estudiados. En esta figura aparecen los LEDs *Philips* muy próximos a la emisión de una fuente Lambertiana debido a que el valor de $g \approx 1$. Por otro lado se tienen los LEDs

Cree que tienen un valor de $g > 1$, lo cual indica cómo se puede ver en el gráfico, que la emisión de este tipo de fuentes es más direccional, al igual que en el caso de los LEDs *Osram* con un valor de $g < 1$.

4.3. Resultados

Capítulo 5

Estimación de las incertidumbres

Contenido

5.1. Ecuación de medida e incertidumbre	112
5.1.1. Incertidumbre de la intensidad luminosa	113
5.2. Incertidumbres ligadas a la medida	114
5.2.1. Repetitividad	115
5.2.2. Distancia	115
5.2.3. Responsividad	115
5.2.4. Mismatch factor	116
5.2.5. Amplificador	116
5.2.6. Linealidad	117
5.2.7. Direccionalidad del detector	117
5.2.8. Estabilidad	117
5.2.9. Tamaño de la fuente	118
5.2.10. Lambertianidad	118
5.2.11. Luz parásita	118
5.3. Resumen de las incertidumbres	119
5.4. Estimación de la incertidumbre debida al ajuste	120
5.5. Comparación con el PTB	122

El diseño y construcción del sistema de medida que hemos realizado lleva asociado un conjunto de incertidumbres que deben ser cuidadosamente analizadas y estudiadas

5.1. Ecuación de medida e incertidumbre

para determinar la calidad del resultado obtenido. De este modo se puede evaluar la idoneidad del resultado viendo el intervalo de aproximación en el que está contenida la medida. Estas incertidumbres son evaluadas en base al conjunto de reglas definidas por la norma JCGM 100:2008 y suplementos [57, 58, 59, 60, 61, 62].

5.1. Ecuación de medida e incertidumbre

La intensidad luminosa, I_V , es una función que está definida como la relación entre flujo emitido por una fuente infinitesimal y el ángulo sólido infinitesimal definido por el área sensible del fotómetro:

$$\partial I_V = \frac{\partial \Phi}{\partial \Omega} \quad (5.1)$$

Como se especificó en la descripción del instrumento, la magnitud de medida en nuestro caso, ha sido la iluminancia, E_V . Estas dos magnitudes se encuentran estrechamente relacionadas a través de la aproximación del ángulo sólido (Ec. 5.2) con la cual se obtiene la expresión 5.3.

$$\partial \Omega \approx \frac{\partial A}{d^2} \quad (5.2)$$

$$\partial E_V = \frac{\partial \Phi}{\partial A} \approx \frac{\partial I_V}{d^2} \quad (5.3)$$

A la vista de la expresión 5.3 es posible medir la intensidad luminosa (I_V) mediante la medida de iluminancia (E_V) en el detector. Para ello se considera elementos finitos tanto de superficie como de ángulo sólido al realizar la medida. De este modo se llega a una relación bastante simple entre I_V y E_V . Como se muestra en la siguiente expresión estas dos magnitudes son proporcionales al valor de la distancia afectada por los factores de corrección.

$$I_{V_1} = \frac{E_V d^2}{\left[1 - \frac{g+3}{4} \left(\frac{r_s}{d}\right)^2\right] \Omega_0} \delta_L \delta_\Theta \delta_\tau \quad (5.4)$$

donde δ_L es el valor de corrección debida a la linealidad del sistema de detección, δ_Θ es el valor de corrección debido a un desalineamiento angular entre el detector y la fuente luminosa, δ_τ es un factor de corrección a causa de la estabilidad de la fuente en el tiempo, d es el valor de la distancia donde se encuentra el fotómetro con respecto a la fuente luminosa, r_s es el tamaño del radio de la fuente, g es un valor referido

a la lambertianidad de la fuente, explicada en la subsección 4.2.6 y Ω_0 es el ángulo sólido con un valor de 1 sr según [44]. El análisis de la incertidumbre de esta expresión comienza por la descomposición de cómo se ha determinado el valor de iluminancia:

$$E_V = \frac{V k_{KTH}}{(k_r + \delta_r) k_{ccf}} \quad (5.5)$$

siendo V el valor de la lectura obtenido en el picoamperímetro, k_r el valor de la responsividad del fotómetro, k_{ccf} el valor de corrección debido a la diferencia de su responsividad relativa con respecto a la función $V(\lambda)$, δ_r es el valor de corrección de la deriva temporal del detector y k_{KTH} es la constante de calibrado del amplificador utilizado (Keithley 6485).

Determinada la I_{V_1} en posiciones discretas del espacio, se puede expresar éste parámetro, a través de un ajuste de la distribución angular de la intensidad luminosa, mediante el método de mínimos cuadrados como se mostró en la ecuación 4.7.

$$I_{V_2}(\theta, \varphi) = I_{V_2}(\sin \theta, \varphi) = \sum_{n,m} C_{n,m} Z_n^m(\sin \theta, \varphi) \quad (5.6)$$

donde los $Z_n^m(\sin \theta, \varphi)$ son los polinomios de Zernike mostrados en la tabla 4.1 y los $C_{n,m}$ son los coeficientes de peso de la distribución angular con su correspondiente incertidumbre.

5.1.1. Incertidumbre de la intensidad luminosa

Aplicando la ley de propagación de incertidumbres y considerando que todas las magnitudes de entrada son independientes, se obtiene que la incertidumbre típica asociada a la iluminancia E_V y a la intensidad luminosa I_{V_1} será:

$$u^2(E_V) = \left(\frac{\partial E_V}{\partial V}\right)^2 u^2(V) + \left(\frac{\partial E_V}{\partial k_{KTH}}\right)^2 u^2(k_{KTH}) + \left(\frac{\partial E_V}{\partial k_r}\right)^2 u^2(k_r) + \left(\frac{\partial E_V}{\partial \delta_r}\right)^2 u^2(\delta_r) + \left(\frac{\partial E_V}{\partial k_{ccf}}\right)^2 u^2(k_{ccf}) \quad (5.7)$$

5.2. Incertidumbres ligadas a la medida

$$\begin{aligned} u^2(I_{V_1}) = & \left(\frac{\partial I_{V_1}}{\partial E_V}\right)^2 u^2(E_V) + \left(\frac{\partial I_{V_1}}{\partial d}\right)^2 u^2(d) \\ & + \left(\frac{\partial I_{V_1}}{\partial g}\right)^2 u^2(g) + \left(\frac{\partial I_{V_1}}{\partial r_s}\right)^2 u^2(r_s) + \left(\frac{\partial I_{V_1}}{\partial \delta_L}\right)^2 u^2(\delta_L) \\ & + \left(\frac{\partial I_{V_1}}{\partial \delta_\Theta}\right)^2 u^2(\delta_\Theta) + \left(\frac{\partial I_{V_1}}{\partial \delta_\tau}\right)^2 u^2(\delta_\tau) \end{aligned} \quad (5.8)$$

5.2. Incertidumbres ligadas a la medida

Los datos que se derivan de la medida de la intensidad luminosa I_{V_1} están afectados por una serie de incertidumbres típicas relacionadas con:

- La repetitividad $\rightarrow u(V)$
- La distancia en la que se sitúa la fuente $\rightarrow u(d)$
- La responsividad del fotómetro $\rightarrow u(k_f)$
- La deriva temporal de la responsividad del fotómetro $\rightarrow u(\delta_f)$
- El amplificador $\rightarrow u(k_{KHT})$
- La linealidad del sistema de detección $\rightarrow u(\delta_L)$
- El desalineamiento del sistema de detección $\rightarrow u(\delta_\Theta)$
- La responsividad espectral (mismatch factor) $\rightarrow u(k_{ccf})$
- La lambertianidad de la fuente $\rightarrow u(g)$
- El tamaño de la fuente $\rightarrow u(r_s)$
- La estabilidad de la lámpara $\rightarrow u(\delta_\tau)$
- La luz esparcida del medio en el que se realiza la medida $\rightarrow u(\delta_\epsilon)$

5.2.1. Repetitividad

La incertidumbre debida a la repetitividad de los datos se evalúa a partir de la desviación típica de los valores obtenidos en el sistema de detección, cuando éstas condiciones, tanto eléctricas, ambientales y geométricas son las mismas para cada medida. Para la determinación de la repetitividad se han realizado 3 medidas de la iluminancia de la fuente, siendo su incertidumbre típica relativa $u(V) < 0,01\%$. Se puede obtener un valor de incertidumbre menor, haciendo el cálculo sobre un conjunto mayor de medidas.

5.2.2. Distancia

La incertidumbre típica debida a la distancia es una función de las incertidumbres debidas a cada uno de los instrumentos utilizados. En nuestro caso la incertidumbre tiene en cuenta tanto la incertidumbre de las barras calibradas, $u(d_b)$ (valor certificado), como la incertidumbre del tornillo micrométrico, $u(d_t)$, utilizado para refinar la posición del detector.

$$u^2(d) = u^2(d_b) + u^2(d_t) \quad (5.9)$$

Por tanto el valor relativo de la incertidumbre típica debida a la distancia es $u(d) < 0,01\%$.

5.2.3. Responsividad

La incertidumbre en el valor de responsividad del fotómetro se determinó en el calibrado del mismo, descrito en la subsección 2.2.1. El valor de incertidumbre típica obtenido ha sido de $u(k_r) = 0,41\%$.

Para tener en cuenta que la respuesta del fotómetro puede variar a lo largo del tiempo (deriva), se introduce un factor de corrección que tenga en cuenta esta variación. La incertidumbre debida a esta deriva será la estimada por un histórico de calibraciones. Si esto no es posible es habitual considerar que contribuye con una incertidumbre de $\pm 0,1$ veces la incertidumbre del patrón. Es una contribución tipo B, con distribución de probabilidad rectangular. La incertidumbre se calculará como:

$$u(\delta_r) = \frac{0,1 u(k_r)}{\sqrt{3}} \quad (5.10)$$

Resultando una incertidumbre típica relativa de $u(\delta_r) = 0,023\%$.

5.2. Incertidumbres ligadas a la medida

5.2.4. Mismatch factor

La incertidumbre de este factor se ha obtenido aplicando la ley de propagación de incertidumbres a la expresión 2.2. Tanto el valor de este factor como su incertidumbre dependen de la fuente de radiación que estemos midiendo. En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos para cada uno de los LEDs medidos.

Tabla 5.1: Incertidumbre típica relativa y valor del coeficiente de corrección k_{ccf} .

Fabricante	Modelo	k_{ccf}	$u(k_{ccf})$ %
<i>Cree Xlamp</i>	Polar White	0,997	0,012
	White	0,997	0,012
	Warm White	0,999	0,0036
	Neutral White	0,998	0,0058
	Blue	0,996	0,073
	Red	1,010	0,081
	Green	0,993	0,052
<i>Philips Luxeon Rebel</i>	Polar White	0,997	0,012
	Warm White	1,000	0,0035
	Neutral White	0,998	0,0054
	Blue	0,998	0,078
	Red	1,011	0,082
	Green	0,993	0,055
<i>Osram Golden Dragon</i>	White	0,997	0,013
	Warm White	0,998	0,0060
	Blue	0,996	0,076
	Red	1,011	0,082
	Green	0,990	0,063

5.2.5. Amplificador

El valor del factor de calibración y su incertidumbre serán las especificadas en su certificado de calibración y dependen de la escala de medida. Este equipo ha sido calibrado en el Centro Español de Metrología (CEM). De acuerdo con los datos de su certificado, la incertidumbre típica es $u(k_{KHT}) < 0,01$ %.

5.2.6. Linealidad

La linealidad de las medidas se puede corregir mediante el procedimiento descrito en la sección 2.2.1. Considerando una distribución rectangular, se obtiene un valor de incertidumbre típica de $u(\delta_L) = 0,01\%$.

5.2.7. Direccionalidad del detector

La direccionalidad angular entre el fotómetro y la fuente está presente a la hora de alinear ambos sistemas. En la subsección 2.2.1 se explicó el procedimiento de como estimar el valor de la direccionalidad del detector. Por tanto, sólo queda determinar el valor de la incertidumbre típica de este parámetro. Para esta incertidumbre hemos supuesto que tiene una distribución coseno. En los casos en que la magnitud de entrada es una función coseno, es habitual considerar que la corrección tiene valor nulo y expresar la incertidumbre como:

$$u(\delta_\Theta) = \frac{\theta_d^2}{\sqrt{20}} \quad (5.11)$$

donde θ_d viene definido como la semiamplitud del ángulo de desplazamiento definido en radianes. Evaluando la incertidumbre típica de este modo, se obtiene un valor de $u(\delta_\Theta) = 0,01\%$.

5.2.8. Estabilidad

Para obtener el valor de la incertidumbre típica de la estabilidad se ha realizado el siguiente procedimiento.

En todos los casos se midió el valor de iluminancia durante un periodo de 3 horas. De este modo se puede analizar cómo es la variación de las oscilaciones de iluminancia a medida que va transcurriendo el tiempo. Para determinar el tiempo de estabilización de la fuente se calcula la diferencia máxima entre el valor del pico máximo y el valor del pico mínimo con respecto al valor medio de iluminancia. De este modo se puede establecer un valor del tiempo donde se considera que la fuente es estable.

Por otro lado también se tiene en cuenta que la emisión del LED es debida a la fuente de alimentación que le suministra la energía. La fuente de alimentación también tiene oscilaciones en la intensidad de corriente de salida y por tanto es otra fuente de incertidumbre a tener en cuenta. La incertidumbre debida a la estabilidad eléctrica, $u(\delta_\chi)$, depende de cómo de constante sea capaz de mantener la potencia de salida la

5.2. Incertidumbres ligadas a la medida

fuente de alimentación. Para ello se midió el valor de la intensidad y de voltaje que se aplicaron a los LEDs durante el periodo de medida. Una vez obtenido el valor de potencia se estimó que esta incertidumbre seguía una distribución rectangular. Teniendo en cuenta que la estabilidad está influenciada por dos términos de incertidumbre se puede estimar el valor de la incertidumbre de la estabilidad mediante la siguiente ecuación.

$$u^2(\delta_\tau) = u^2(\tau_{E_V}) + u^2(\delta_\chi) \quad (5.12)$$

siendo $u(\tau_{E_V})$ el valor de la desviación de la iluminancia con respecto al valor medio y $u(\delta_\chi)$ el valor de la desviación de potencia inyectada al LED. Con estas dos incertidumbres típicas se obtiene una incertidumbre típica relativa del $u(\delta_\tau) \approx 0,027\%$. Por otro lado el periodo de estabilización de los LEDs varía de forma considerable desde 1 minuto para el LED verde *Cree Xlamp* hasta los 160 minutos para el blanco cálido *Cree Xlamp*.

5.2.9. Tamaño de la fuente

Como no se puede acceder al tamaño del chip de LED, se consideró como tamaño de la fuente el dado por las hojas de especificaciones de cada fuente, así como su incertidumbre típica asociada $u(r_s) = 2,3\%$.

5.2.10. Lambertianidad

En sección 4.3.7 ya se comentó el valor tanto de la lambertianidad de las medidas como el valor de su incertidumbre expandida para comparar los resultados obtenidos en ambos procedimientos. Por tanto el valor relativo de la incertidumbre típica asociado a este valor oscila $5\% \leq u(g) \leq 16\%$.

5.2.11. Luz parásita

La luz esparcida en el medio es debida a las múltiples reflexiones en los objetos que forman el goniospectrofotómetro. A pesar de todo el apantallamiento que se ha colocado para disminuir las reflexiones, siempre queda una iluminación residual. Teniendo esto en cuenta se midió el valor de la luz difusa del medio. Esta evaluación se hizo colocando una pantalla del tamaño de la fuente delante del detector y a una distancia suficiente como para que la sombra de esta pantalla tapase el detector. En

estas condiciones se midió la iluminancia para los diferentes ángulos polares. Para estimar la luz esparcida se tomó el valor máximo de iluminancia registrada por el detector. De este modo se obtuvo un valor relativo de incertidumbre típica aproximada al $u(\delta_\varepsilon) = 0,01\%$.

5.3. Resumen de las incertidumbres

La tabla 5.2 muestra el resumen de los resultados obtenidos al analizar las incertidumbres típicas consideradas en este experimento. Para dicha tabla se quiere hacer hincapié que los resultados en % mostrados en esta tabla están multiplicados por su correspondiente coeficiente de sensibilidad. Por tanto la tabla muestra la contribución de cada una de las magnitudes consideradas relativas a la incertidumbre final.

Tabla 5.2: Resumen de las incertidumbres típicas asociadas a la medida.

Magnitud de entrada	Tipo A %	Tipo B %
Repetitividad	0,00078	
Distancia		0,00077
Responsividad	0,41	
Deriva temporal del detector		0,023
Mismatch factor		0,041
Lambertianidad	< 0,0001	
Tamaño de la fuente		< 0,0001
Picoamperímetro		< 0,0001
Linealidad	0,0071	
Direccionalidad		0,0068
Estabilidad de la fuente		0,029
Luz parásita		< 0,0001
Incertidumbre estándar total	uI_{V_1}	0.41
Incertidumbre expandida total (k=2)	UI_{V_1}	0.82

5.4. Estimación de la incertidumbre debida al ajuste

Como se muestra en la tabla, hay magnitudes como la luz parásita, el picoamperímetro, la estabilidad de la fuente, etc... que se pueden considerar despreciables con respecto a otras, debido a su contribución a la incertidumbre total. En esta tabla se muestra que nuestro factor más limitante a la hora de disminuir la incertidumbre de la medida es la responsividad del detector, ya que esta magnitud contribuye a la incertidumbre total relativa casi con el 0,4%. Teniendo todo esto en cuenta se puede asumir que el valor relativo de la incertidumbre expandida para la intensidad luminosa I_{V_1} en la dirección normal, es decir $\theta = 0^\circ$ (ángulo polar) y $\varphi = 0^\circ$ (ángulo azimutal) es del $u(I_{V_1}) \approx 0,82\%$.

5.4. Estimación de la incertidumbre debida al ajuste

Determinada la $u(I_{V_1})$ sólo falta obtener la $u(I_{V_2})$ para determinar la incertidumbre de la intensidad luminosa debida al ajuste. La estimación de la incertidumbre de este valor al igual que en el caso anterior se obtiene mediante la propagación de errores definida en la literatura mencionada. Aplicando la propagación de errores en la ecuación 5.6 y teniendo en cuenta los coeficientes de sensibilidad, se llega a la expresión de la incertidumbre para la distribución angular de intensidad luminosa:

$$u^2(I_{V_2}) = \left(\frac{\partial I_{V_2}}{\partial \theta}\right)^2 u^2(\theta) + \left(\frac{\partial I_{V_2}}{\partial \varphi}\right)^2 u^2(\varphi) + \sum_i \left(\frac{\partial I_{V_2}}{\partial C_i}\right)^2 u^2(C_i) \quad (5.13)$$

Utilizando la expresión 5.13 se obtiene el valor de la incertidumbre típica asociada a cada coeficiente (Tab. 5.3). En dicha tabla se muestra el valor de la incertidumbre típica relativa de cada uno de los coeficientes determinados en el ajuste con Zernike, excepto para aquellos que tienen una contribución nula a la incertidumbre. Para simplificar la tabla se ha mostrado los valores de incertidumbre correspondientes al LED con mayor incertidumbre. Al igual que en la tabla anterior (Tab. 5.2), en esta tabla se muestra la contribución de la incertidumbre típica relativa a la incertidumbre total para cada coeficiente. Estos valores de incertidumbre típica relativa son dados para la dirección coincidente con el eje mecánico ($\theta = 0^\circ$, $\varphi = 0^\circ$).

Tabla 5.3: Resumen de las incertidumbres típicas asociadas al ajuste para los ángulos $\theta = 0^\circ$ y $\varphi = 0^\circ$.

Magnitud de entrada	Tipo A %	Tipo B %
Ángulo polar		0,18
$C_{0,0}$	0,00017	
$C_{2,0}$	0,00025	
$C_{4,0}$	0,00028	
Incertidumbre estándar total	uI_{V_2}	0,18
Incertidumbre expandida total ($k=2$)	UI_{V_2}	0.36

La incertidumbre de la intensidad luminosa vendrá determinada por la incertidumbre de las medidas, así como por la incertidumbre del ajuste.

$$u^2(I_V) = u^2(I_{V_1}) + u^2(I_{V_2}) \quad (5.14)$$

A la vista de los resultados obtenidos en las tablas 5.2 y 5.3 se obtiene un valor de incertidumbre expandida relativa inferior al $u(I_V) \leq 1\%$.

5.5. Comparación con el PTB



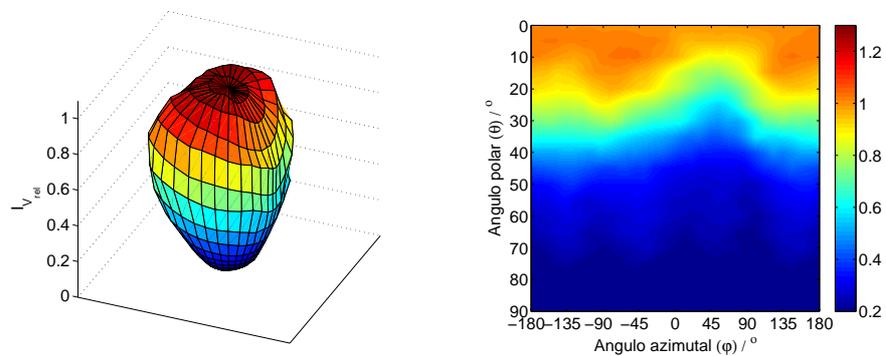
Figura 5.1: LEDs patrones de alta luminosidad fabricados por la empresa CMS–SCHREDER.

El mejor método para controlar posibles errores sistemáticos, asociados al método de medida elegido, y en consecuencia verificar la incertidumbre asignada a una determinada medida, es comparar los resultados obtenidos con los de otro laboratorio, en condiciones similares. En este caso hemos comparado nuestras medidas con las realizadas por el Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) con un goniómetro similar.

La comparación ha consistido en la medida de la distribución de intensidad luminosa de 4 LEDs patrones de alta luminosidad con diferentes distribuciones espectrales. Los LEDs que se emplearon fueron el F132, F126, F108 y F107 de la empresa CMS–SCHREDER (Fig. 5.1). Estas fuentes fueron medidas en ambos laboratorios con los parámetros de entrada muy bien controlados. Para hacer las medidas se estableció una intensidad de corriente de $I = 20,00 \pm 0,02$ mA, un voltaje $V = 3,0 \pm 0,1$ V y una temperatura de estabilización de $T = 32,0 \pm 0,1$ °C.

En nuestro laboratorio los LEDs se midieron en el sistema de medida, desde un ángulo polar de $\theta = 0^\circ$ hasta $\theta = 90^\circ$ con un intervalo entre las medidas de $\Delta\theta = 5^\circ$. Respecto al ángulo azimutal se midió desde $\varphi = -180^\circ$ hasta $\varphi = 180^\circ$ con un intervalo equiespaciado de $\Delta\varphi = 11^\circ$. Estas medidas se representaron en un sistema de coordenadas esféricas para ver mejor la distribución angular de la fuente, dando como resultado las figuras 5.2.a, 5.3.a, 5.4.a y 5.5.a. Las medidas en ambos laboratorios

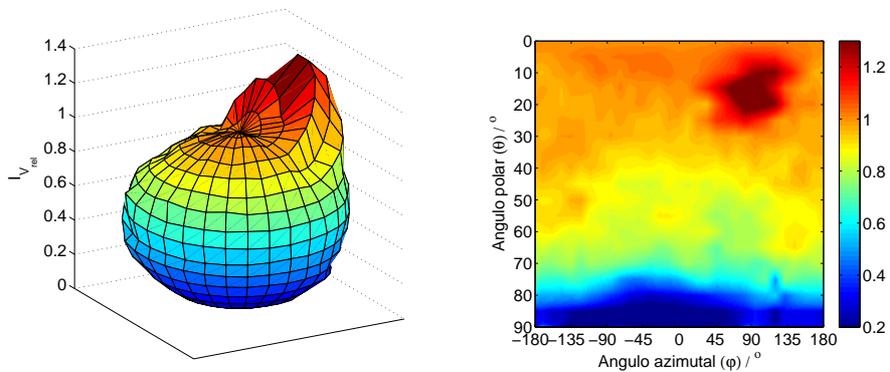
se hicieron a diferentes $\Delta\theta$ y $\Delta\phi$. Con el objetivo de comparar ambas medidas, se realizó una interpolación lineal de los datos obtenidos en cada laboratorio. Para esta interpolación se tomó un paso angular $\Delta\theta = 0,5^\circ$ y un paso angular $\Delta\phi = 0,5^\circ$ (Figs. 5.2.b, 5.3.b, 5.4.b y 5.5.b).



(a) Distribución angular en en coordenadas esféricas.

(b) Distribución angular detallado para cada ángulo.

Figura 5.2: LED patrón CMS–SCHREDER F107 medido en el IO–CSIC.

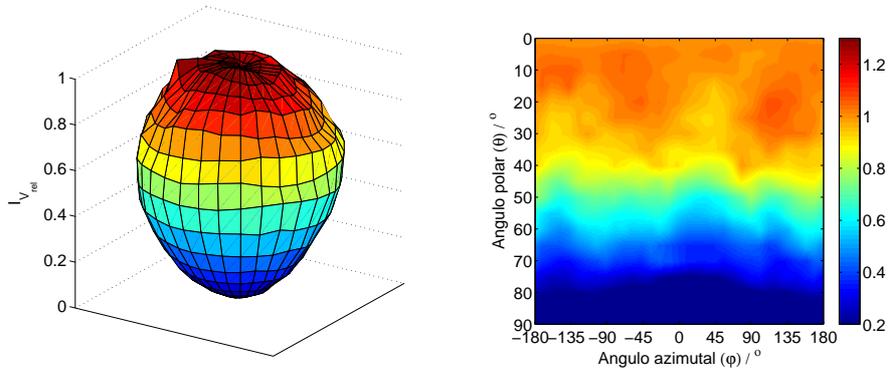


(a) Distribución angular en en coordenadas esféricas.

(b) Distribución angular detallado para cada ángulo.

Figura 5.3: LED patrón CMS–SCHREDER F108 medido en el IO–CSIC.

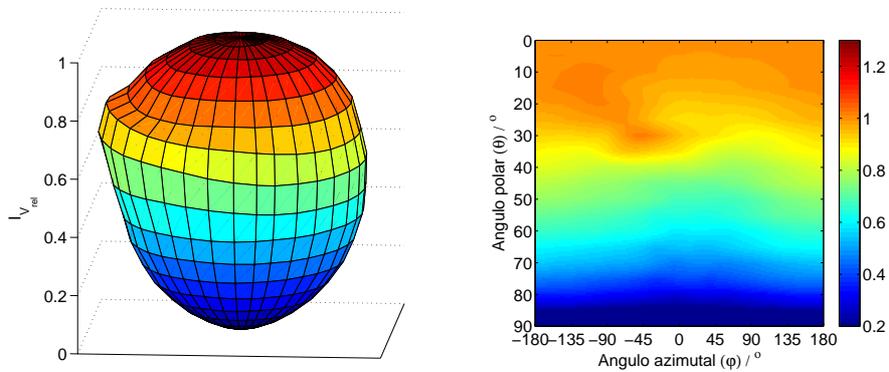
5.5. Comparación con el PTB



(a) Distribución angular en en coordenadas esféricas.

(b) Distribución angular detallado para cada ángulo.

Figura 5.4: LED patrón CMS–SCHREDER F126 medido en el IO–CSIC.



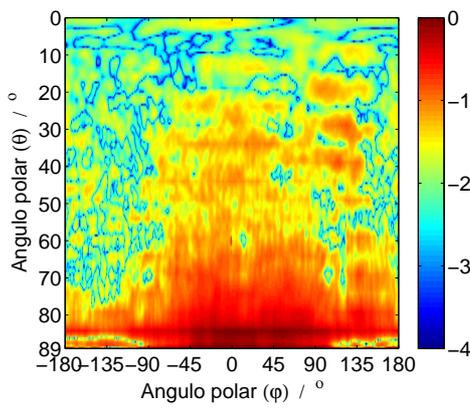
(a) Distribución angular en en coordenadas esféricas.

(b) Distribución angular detallado para cada ángulo.

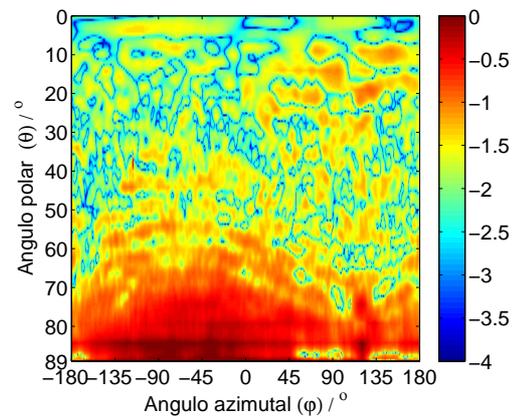
Figura 5.5: LED patrón CMS–SCHREDER F132 medido en el IO–CSIC.

En la figura 5.6 hemos representado las diferencias relativas, en escala logarítmica, obtenidas entre los dos laboratorios. La diferencia relativa es aproximadamente del 1,5% para todos los LEDs, para ángulos polares menores que 50° . Para ángulos mayores se observa sin embargo un aumento de las diferencias relativas, que se podrían explicar por las singularidades observadas en las distribuciones de los LEDs y en el hecho del diferente intervalo de medidas usado en cada laboratorio. También las medidas nos permitieron poder realizar una intercomparación del flujo total obtenido entre am-

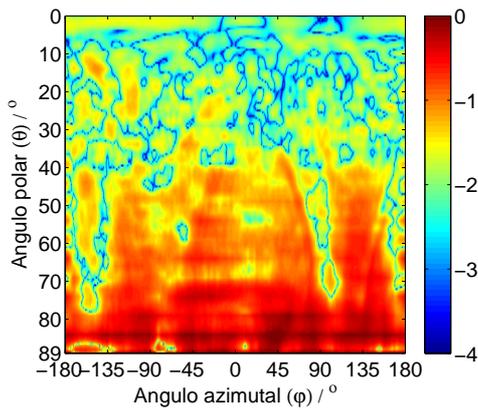
bos equipos, teniendo una desviación promedio del valor de flujo del 3 % con respecto al PTB, lo cual, teniendo en cuenta las singularidades de las distribuciones angulares medidas, nos valida la cantidad de puntos que se eligieron en la subsección 2.1.2.3.



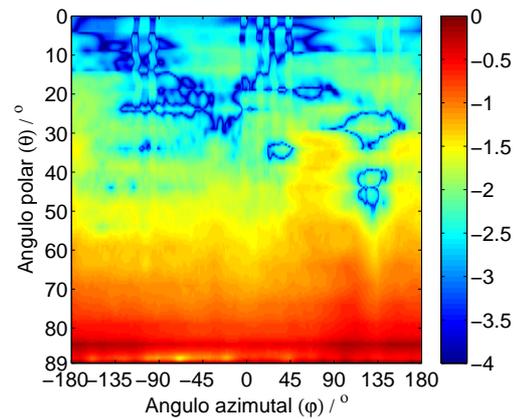
(a) LED CMS-Schreder F107



(b) LED CMS-Schreder F108



(c) LED CMS-Schreder F126



(d) LED CMS-Schreder F132

Figura 5.6: Error relativo en escala logarítmica entre los laboratorios IO-CSIC y PTB.

5.5. Comparación con el PTB

Parte III

Fuentes de estado sólido en configuración de campo cercano

Capítulo 6

Caracterización de OLEDs

Contenido

6.1. Estabilidad	131
6.2. Distribución Espectral	134
6.3. Homogeneidad	134
6.3.1. Dependencia de la homogeneidad con el ángulo azimutal	136
6.3.2. Dependencia de la homogeneidad con la longitud de onda	138
6.3.3. Optimización del tamaño de área para considerar al OLED como fuente patrón de radiancia / luminancia	140

La aparición de los LEDs orgánicos (OLEDs), que gradualmente se están convirtiendo en una nueva alternativa en el campo de la iluminación general, supone un nuevo reto para los laboratorios dedicados a desarrollar métodos de medida de fuentes de radiación. Por una parte, al ser fuentes de estado sólido presentan las ventajas ya mencionadas de mayor eficiencia energética que las fuentes tradicionales, respeto al medio ambiente, resistencia a mayores niveles de humedad, etc. . . Además, el hecho de poder fabricarlos en grandes tamaños, plantea la posibilidad de que puedan ser utilizados como patrones de luminancia.

Por otra parte, las propiedades ópticas de los OLEDs difieren de las de los LED en muchos aspectos tales como su distribución espectral, espacial y angular y, al menos aparentemente, la distribución espectral de radiancia de los OLEDs presenta una dependencia con la posición de operación. Todos estos hechos justifican la necesidad de estudiar sus características de forma independiente a lo realizado con los LEDs.

En el presente capítulo se presenta la caracterización de estas fuentes en relación a su distribución espectral, estabilidad y homogeneidad.

6. Caracterización de OLEDs

Para este estudio se han elegido 10 OLEDs de diferentes fabricantes, forma, tamaño y tipo de superficie con que son construidos (Tab. 6.1)

Tabla 6.1: OLEDs estudiados.

Fabricante	Código	Modelo	Tamaño / mm	Forma	Superficie
<i>LG</i>	<i>Lg1</i>	N6BB30F	110 × 320	Rectangular	Espejada
	<i>Lg2</i>	N6SB40F	55 × 53	Cuadrada	Difusa
	<i>Lg3</i>	N6OA40F	∅ = 110	Circular	Difusa
	<i>Lg4</i>	N6OA30F	∅ = 110	Circular	Espejada
<i>Philips</i>	<i>Ph</i>	Lumiblade	110 × 112	Cuadrada	Difusa
<i>Tridonic</i>	<i>Tr1</i>	Lureon Eval 2	99 × 99	Cuadrada	Difusa
	<i>Tr2</i>	Lureon Eval 20w5	200 × 50	Rectangular	Difusa
<i>Osram</i>	<i>Os1</i>	Orbeos CDW 030	∅ = 90	Circular	Espejada
	<i>Os2</i>	Orbeos RDW 046	125 × 47	Rectangular	Espejada
	<i>Os3</i>	Orbeos SDW 058	118 × 113	Cuadrada	Espejada

Como se puede ver en la tabla 6.1, los OLEDs estudiados varían bastante en tamaño (desde 47 mm hasta 320 mm) y en forma geométrica (rectangulares, circulares y cuadrados). Esto nos ha obligado a diseñar y fabricar, como paso previo, una pieza universal para la sujeción adecuada de todos ellos en el goniofotómetro (Fig. 6.1).

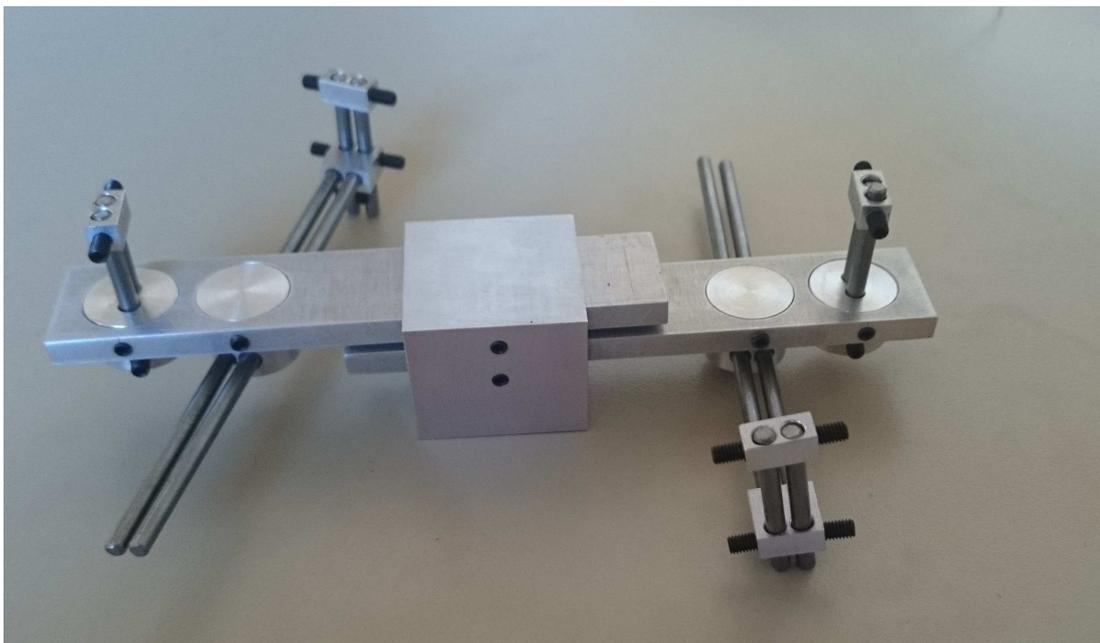


Figura 6.1: Pieza universal diseñada para sujetar los OLEDs.

6.1. Estabilidad

Una de las condiciones más elementales que debe tener una fuente de radiación que potencialmente pueda ser utilizada como patrón, es la estabilidad [63]. En nuestro caso la estabilidad de los OLEDs estudiados se ha determinado mediante la siguiente expresión (Ec. 6.1):

$$E_s = \frac{E_{V_{\max}} - E_{V_{\min}}}{\langle E_V \rangle} \quad (6.1)$$

donde $E_{V_{\max}}$ y $E_{V_{\min}}$ representa el valor del pico máximo y mínimo de la iluminancia medida por el fotómetro cuando ha transcurrido un cierto tiempo después del encendido de la misma. Por último se define el valor $\langle E_V \rangle$ como el valor medio de iluminancia obtenido en éste intervalo de tiempo.

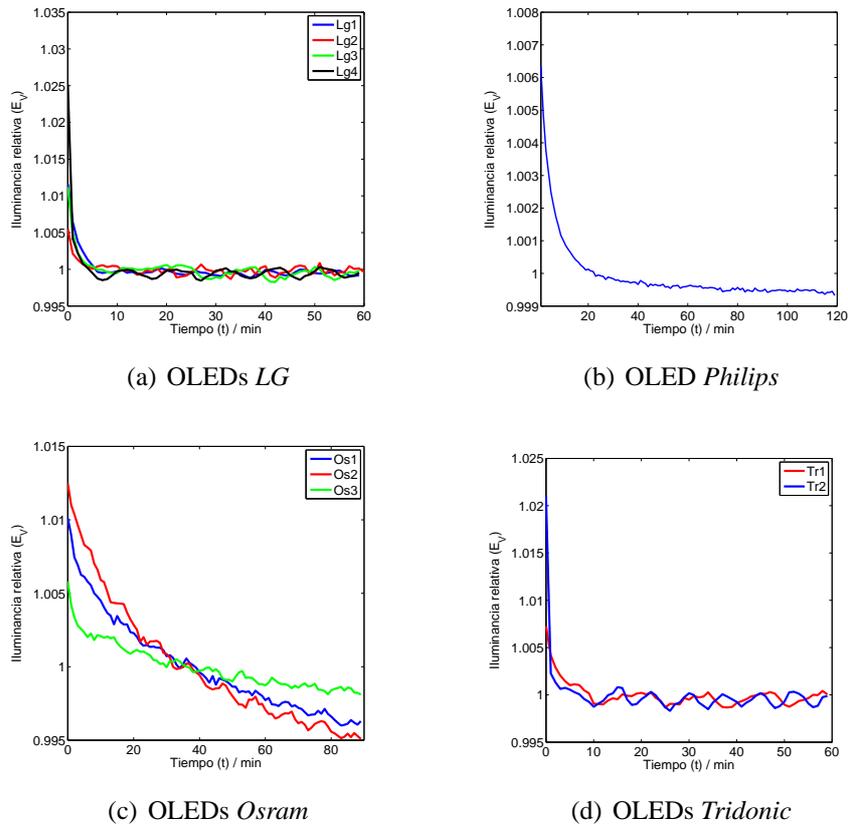


Figura 6.2: Estabilidad de la iluminancia de los OLEDs.

En las figuras 6.2.a, 6.2.b, 6.2.c y 6.2.d se muestra, como es la tendencia de la curva para la iluminancia relativa medida por el fotómetro, a medida que transcurre

6.1. Estabilidad

el tiempo. Las figuras muestran, que para 3 de los 4 fabricantes el comportamiento es similar entre ellos, debido a que estos presentan un fuerte pico de emisión cuando se encienden. Una vez encendidos estas fuentes decaen rápidamente hasta alcanzar una cierta estabilidad en la iluminancia medida. La variación de los valores obtenidos se puede considerar como aceptables siempre y cuando estas variaciones estén por debajo de un 0,3% de estabilidad. Para el caso de los OLEDs *Osram* (Fig. 6.2.c) se observa que la tendencia de la curva es diferente al resto de los fabricantes. En esta figura se comprueba que estos 3 OLEDs tienen un decrecimiento monótono a lo largo de todo el tiempo transcurrido, no siendo posible estabilizarlos completamente por debajo del 0,3%.

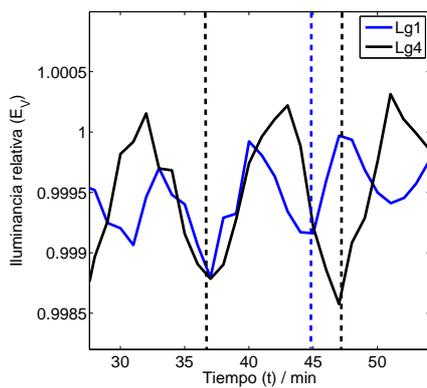
La tabla 6.2 muestra que todas las fuentes estudiadas, excepto las fabricadas por *Osram*, están dentro de los límites establecidos que hemos definido anteriormente. Los OLEDs muestran una estabilidad ($E_s \approx 1,5\%$) cuando se considera todo el tiempo de encendido. Si se considera un tiempo de estabilización como el de las lámparas de incandescencia ($t \approx 15 \text{ min}$) se obtiene unos valores de estabilidad dentro de los límites establecidos en la mayoría de los casos. Para el caso de los OLEDs *Osram* se observa en la tabla 6.2 que no es posible obtener una estabilidad inferior al 0,3% debido a que la tendencia de la iluminancia medida de las 3 fuentes siempre es decreciente.

Tabla 6.2: Estabilidad de los OLEDs.

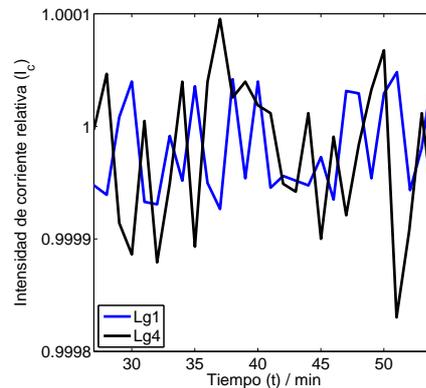
	Código	Estabilidad (%)	
		tiempo > 0 min	tiempo > 15 min
<i>LG</i>	<i>Lg1</i>	1.27	0.13
	<i>Lg2</i>	0.68	0.23
	<i>Lg3</i>	1.29	0.23
	<i>Lg4</i>	2.67	0.18
<i>Philips</i>	<i>Ph</i>	0.91	0.11
<i>Tridonic</i>	<i>Tr1</i>	0.86	0.18
	<i>Tr2</i>	2.26	0.25
<i>Osram</i>	<i>Os1</i>	1.41	0.75
	<i>Os2</i>	1.74	0.93
	<i>Os3</i>	0.77	0.39

Para el resto de OLEDs tampoco se puede obtener un resultado mejor para la estabilización de la fuente. En las figuras 6.3.a y 6.3.c se representa la ampliación de las figuras 6.2.a y 6.2.d para un intervalo de tiempo dado. En ellas aparecen los resultados de las oscilaciones de la iluminancia obtenida para algunos de los OLEDs medidos.

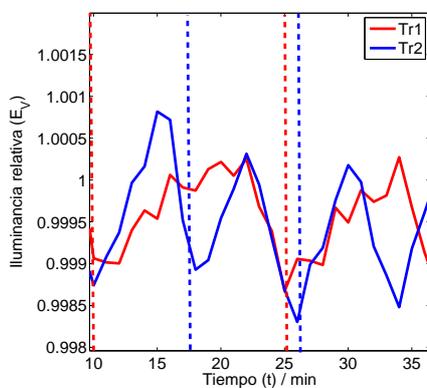
Aquí se observa que no es posible obtener una estabilización mejor de la fuente debido a que el valor de la iluminancia va oscilando periódicamente. Como se indica en estas figuras, los OLEDs tienen un ciclo de repetición variable en función de la fuente examinada ($Lg1 \approx 10$ min, $Lg4 \approx 8$ min, $Tr1 \approx 14$ min y $Tr2 \approx 8$ min). Las oscilaciones producidas en la iluminancia se comprueba que no son sólo debidas a fluctuaciones de la corriente eléctrica suministrada al OLED, como se puede apreciar en las figuras 6.3.b y 6.3.d. Esto implica que debe de haber otro fenómeno como por ejemplo la variación de la temperatura ambiente que hace que la emisión del OLED fluctúe.



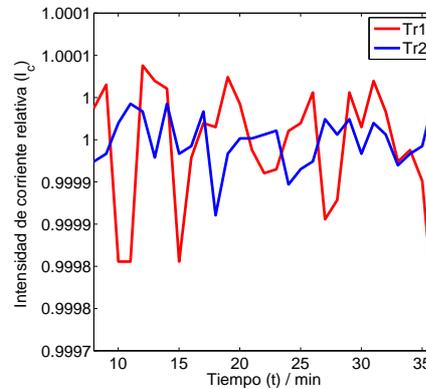
(a) Estabilidad de la iluminancia de los OLEDs *LG*



(b) Estabilidad de la corriente eléctrica de los OLEDs *LG*



(c) Estabilidad de la iluminancia de los OLEDs *Tri-donic*



(d) Estabilidad de la corriente eléctrica de los OLEDs *Tri-donic*

Figura 6.3: Fluctuaciones de la estabilidad.

6.2. Distribución Espectral

La distribución espectral de cada uno de los OLEDs se ha medido con el espectrorradiómetro MINOLTA CS-1000A.

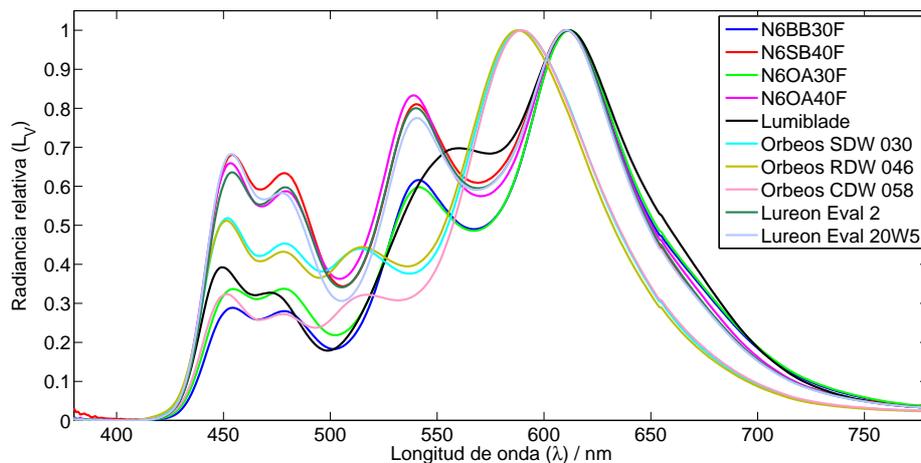


Figura 6.4: Espectros medidos para cada uno de los OLEDs estudiados.

En la figura 6.4 se observa claramente la estructura comentada en la sección 1.2.4. Todas las fuentes OLEDs presentan un espectro con varios picos claramente diferenciados en la zona del azul, verde y rojo. Esto se debe a la estructura interna que se explicó en el apartado 1.2.4. Para los OLEDs de *LG* y de *Tridonic* presentan un espectro muy parecido en cuanto a la altura y posiciones de los picos mientras que los OLEDs fabricados por *Osram* tienen un desplazamiento de los picos más significativo hacia longitudes de onda más cercanas al verde. Esta distribución espectral otorga a este tipo de fuentes un aspecto visual menos cálido que el resto. Por último se tiene que el OLED *Philips* tiene una distribución diferente a los otros dos, *LG* y *Tridonic*, debido a que el pico central lo tiene desplazado hacia longitudes de onda más altas.

6.3. Homogeneidad

El siguiente paso ha sido hacer un estudio de la distribución espacial de homogeneidad de la fuente [64], para determinar como de constante es la emisión del flujo en cada uno de los puntos de la superficie. El valor de la homogeneidad (H) para cada uno de los OLEDs estudiados, se puede determinar mediante la expresión:

$$H = \frac{std(L)}{\langle L \rangle} \quad (6.2)$$

siendo $std(L)$ la desviación típica de los valores de la matriz que contiene toda la información de la distribución espacial de radiancia y $\langle L \rangle$ es el valor medio de la distribución espacial de radiancia en la misma superficie.

La determinación de la homogeneidad se ha realizado utilizando la misma configuración del goniospectrofotómetro que se comentó en el capítulo 2 (Fig. 6.5). En este tipo de medidas se utiliza la cámara CCD en combinación con el filtro sintonizable como sistema de detección. Este sistema de detección se empleó del mismo modo que en el capítulo 2 para alinear la fuente. Además de esta utilidad, el sistema de detección se utilizó para obtener la distribución espacial de radiancia y poder así, discernir las diferentes regiones de homogeneidad de la superficie.

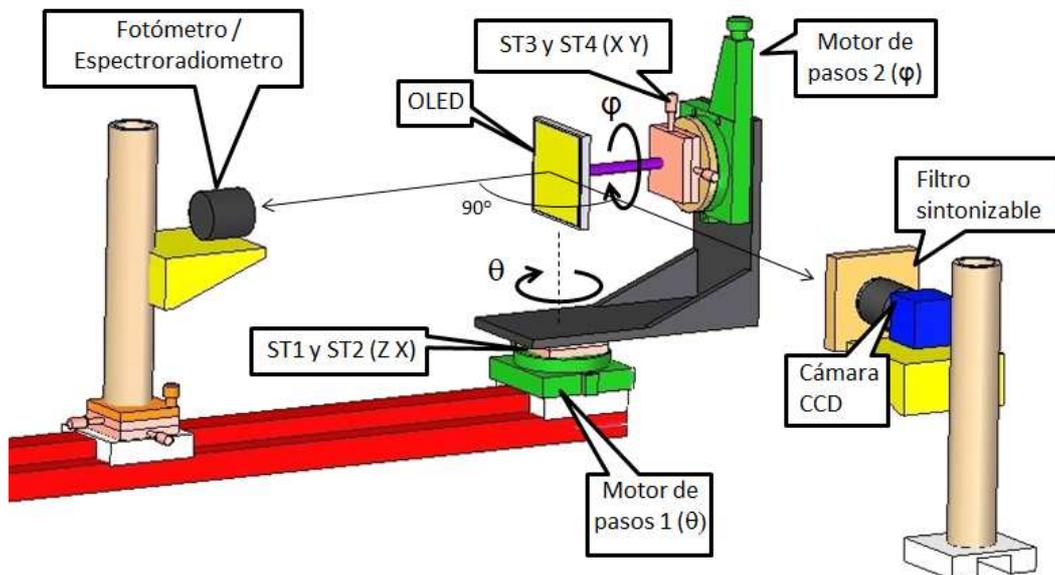


Figura 6.5: Esquema de la posición de los elementos que componen el goniospectrofotómetro.

La medida se realizó para los 10 OLEDs comentados en la tabla 6.1. El procedimiento consiste en tomar una plantilla de referencia para fijar el centro del OLED en el origen de coordenadas mediante el procedimiento explicado en la subsección 2.1.2.1. Una vez centrada la fuente extensa sobre el origen de coordenadas de la esfera imaginaria, y dado que como hemos comentado algunos autores han apuntado una dependencia de la distribución espacial de luminancia con la posición de operación[65],

6.3. Homogeneidad

hemos realizado medidas en diferentes ángulos azimutales y en distintas longitudes de onda.

En cuanto al ángulo azimutal las medidas se hicieron desde $\phi = -180^\circ$ hasta $\phi = 180^\circ$ con un incremento equiespaciado de $\Delta\phi = 45^\circ$. También se midió la distribución espacial en las diferentes longitudes de onda. Para ello se utilizó el filtro sintonizable con una longitud de onda de partida de $\lambda = 400$ nm hasta una longitud de onda final de $\lambda = 700$ nm, distribuidas uniformemente en intervalos de $\Delta\lambda = 10$ nm. Para obtener unos valores más fiables de la homogeneidad, estas medidas se hicieron manteniendo la intensidad de corriente estable al valor fijado por el fabricante (Tab. 6.3), y después del periodo de estabilización determinado por el método anterior.

Tabla 6.3: Características eléctricas para cada uno de los OLEDs.

Código	Intensidad corriente (mA)	Voltaje (V)	Densidad de corriente (mA/cm^2)	Temperatura de uso ($^\circ C$)
<i>Lg1</i>	500	8.4	1.85	25
<i>Lg2</i>	62	6.0	2.93	25
<i>Lg3</i>	230	6.1	3.08	25
<i>Lg4</i>	150	8.5	2.00	25
<i>Ph</i>	500	24	4.13	25
<i>Os1</i>	115	6.0	2.48	25
<i>Os2</i>	103	6.0	2.62	25
<i>Os3</i>	285	6.0	2.58	25
<i>Tr1</i>	230	6.1	2.90	40
<i>Tr2</i>	230	5.8	3.03	40

6.3.1. Dependencia de la homogeneidad con el ángulo azimutal

La figura 6.6 muestra los resultados obtenidos para el OLED *Ph* en las diferentes configuraciones azimutales, ϕ , para una longitud de onda de $\lambda = 400$ nm.

En esta figura se aíslan aquellas zonas que tienen el mismo valor de radiancia mediante unas líneas de contorno. En esta figura se representa como se va transformando cada zona de homogeneidad a medida que la superficie va rotando en el ángulo azimutal. Como se ve, sí se observa una cierta dependencia con la posición de operación.

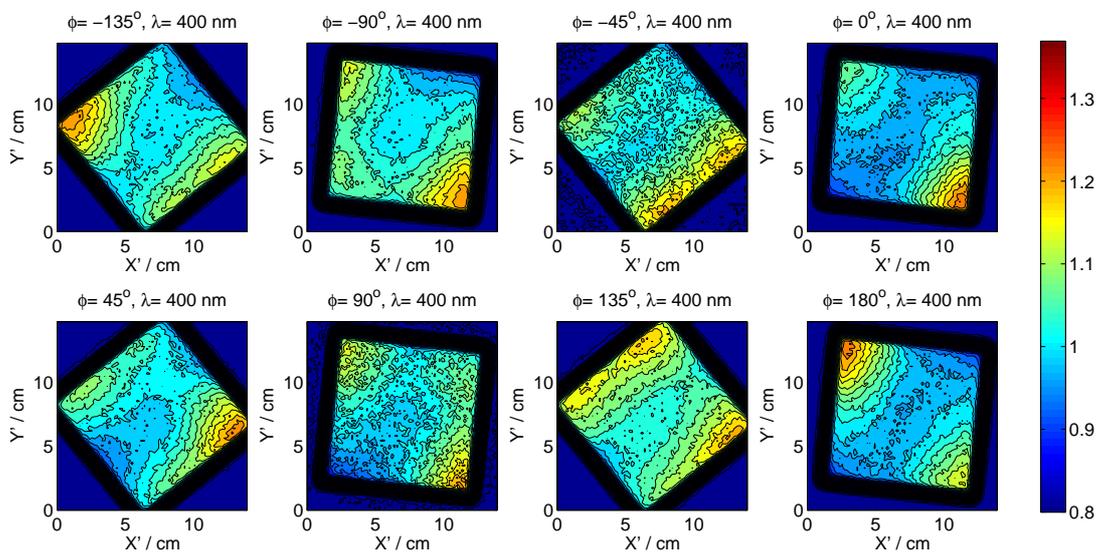


Figura 6.6: Homogeneidad de la superficie del OLED *Ph* en diferentes posiciones del ángulo azimutal.

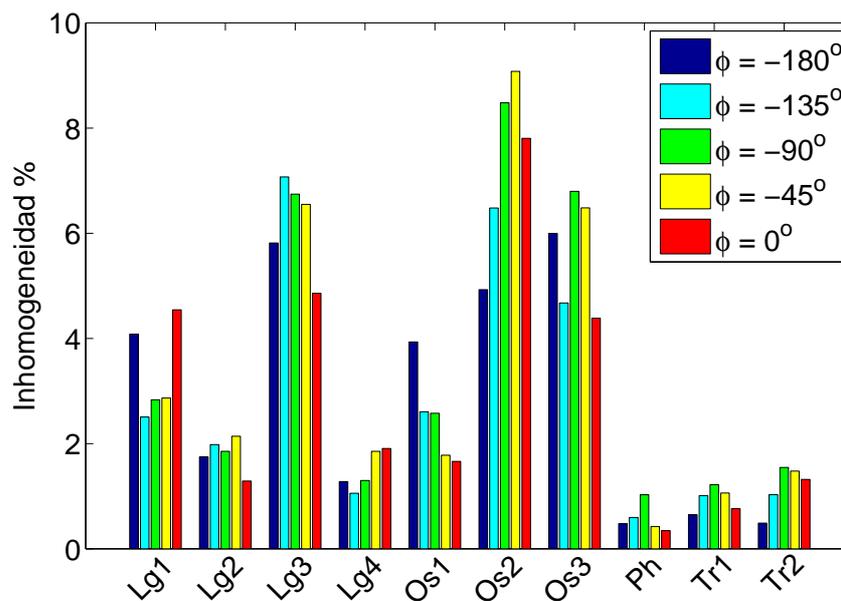


Figura 6.7: Desviación típica de los valores de homogeneidad en diferentes posiciones azimutales para todos los OLEDs.

6.3. Homogeneidad

La figura 6.7 muestra un resumen de los resultados obtenidos para todos los OLEDs. Se puede apreciar que el mejor comportamiento, respecto a la homogeneidad, se da en los OLEDs *Ph* y *Tr*. Para dichas fuentes se obtienen unos valores de homogeneidad próximos al 99%, en las diferentes configuraciones geométricas. En el extremo contrario nos encontramos con el OLED *Os2*, donde las diferencias de homogeneidad para las distintas configuraciones están entre el 5% y el 9%, cuando se analiza todo el área de la fuente.

6.3.2. Dependencia de la homogeneidad con la longitud de onda

El siguiente procedimiento es determinar cómo influye la distribución espectral en la homogeneidad. Este parámetro sería un indicativo de la capacidad de reproducción de color en las diferentes zonas de la superficie. Para ello se ha seguido el mismo procedimiento empleado en el apartado anterior.

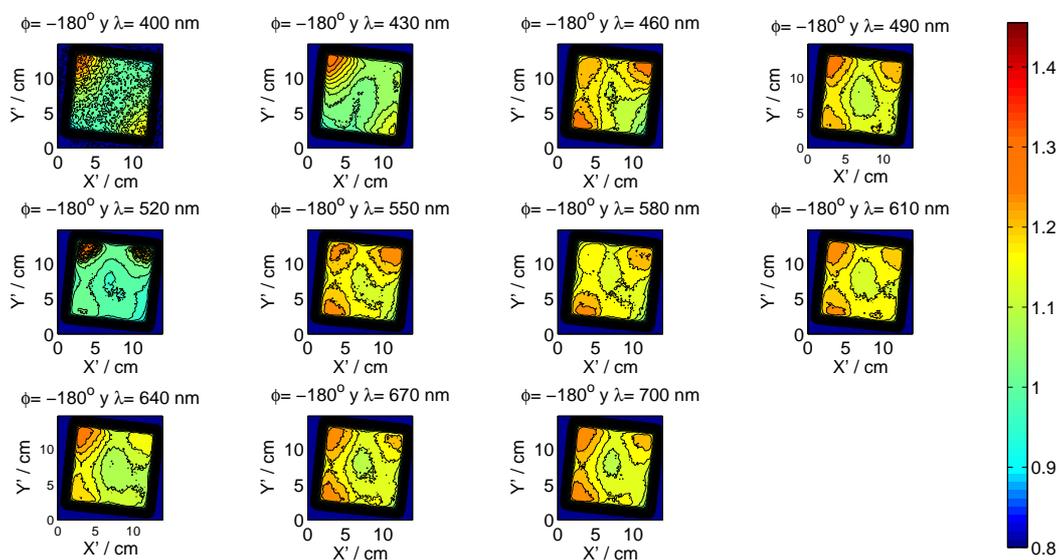


Figura 6.8: Homogeneidad de la superficie del OLED Ph a diferentes longitudes de onda.

La figura 6.8 muestra cómo se modifican cada una de las zonas de homogeneidad en la superficie de la fuente, manteniendo el ángulo azimutal constante, $\phi = -180^\circ$. En esta figura se observa que las zonas de homogeneidad van variando a medida que cambia la longitud de onda (λ) observada. En las figuras se aprecia que la zona central mantiene prácticamente la misma región de homogeneidad, siendo esta radiancia constante e independiente de la longitud de onda a la que es observada. También se

puede observar que la radiancia es mayor para las longitudes de onda superiores a los 550 nm, lo cual le confiere al OLED una tonalidad de blanco cálido.

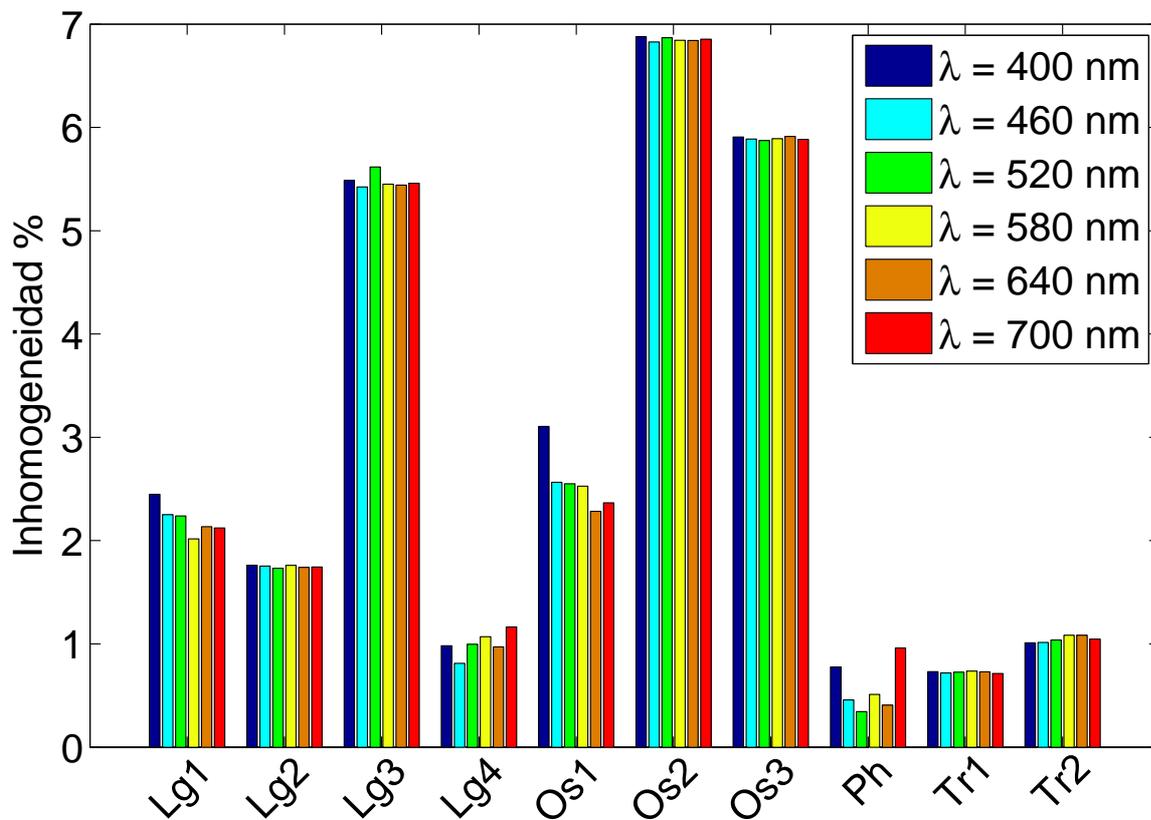


Figura 6.9: Desviación típica de los valores de homogeneidad en diferentes longitudes de onda para todos los OLEDs.

Para el resto de los OLEDs se obtiene un comportamiento semejante en cuanto a la variación de las regiones de homogeneidad. El estudio de esta magnitud, al igual que en el apartado anterior se ha realizado tomando en consideración todo el área de emisión. La figura 6.9 demuestra como la homogeneidad de los OLEDs *Ph* y *Tr1* siguen siendo las mejores en cuanto a valor se refiere, siendo esta homogeneidad superior al 99% para todas las longitudes de onda de observación. Además se observa que la variación de la homogeneidad se puede considerar despreciable para las diferentes longitudes de

6.3. Homogeneidad

onda observadas, ya que esta variación es, en el peor de los casos, inferior al 0,6% para el OLED *Ph*. La diferencia del 0,6% en la homogeneidad observada hace que no existan diferencias de tonalidades de blanco en las diferentes regiones de la superficie.

6.3.3. Optimización del tamaño de área para considerar al OLED como fuente patrón de radiancia / luminancia

Vistos los análisis realizados de la dependencia de la homogeneidad, tanto en ángulo azimutal como en distribución espectral sólo falta determinar el tamaño de área más óptimo. Para ello se consideran las fuentes OLEDs dentro de unas condiciones de contorno para asemejar todas las fuentes entre sí. Para ello se hace un análisis de como varía el promedio de la radiancia cuando se modifica el área de observación de la superficie.

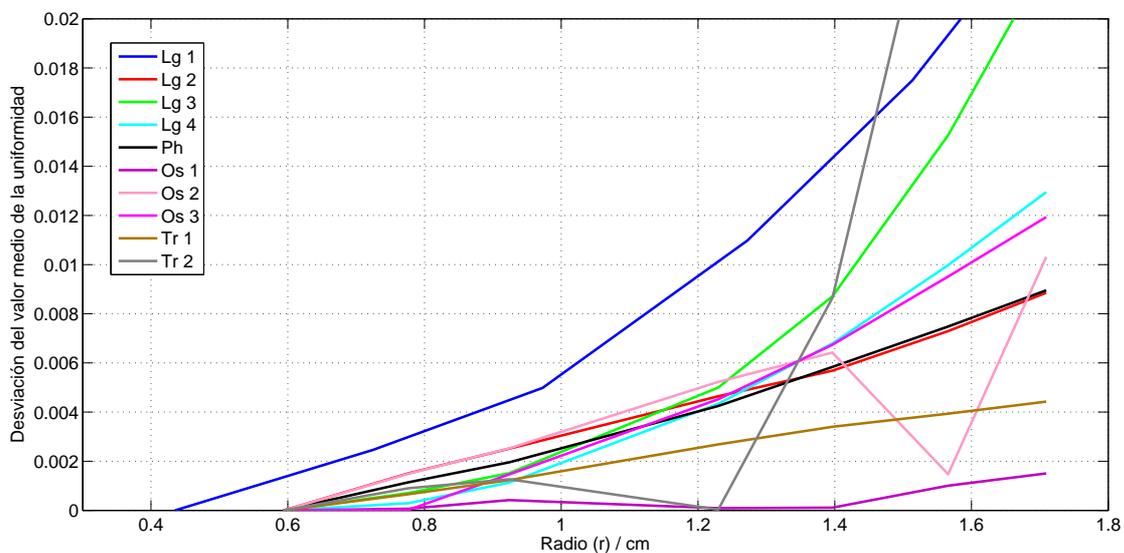


Figura 6.10: Determinación del tamaño de área óptimo de los OLEDs para definir una región uniforme.

La figura 6.10 muestra la desviación del promedio de la radiancia de la fuente para cada uno de los OLEDs estudiados. El cambio en el promedio de la radiancia da una idea de la variación de la homogeneidad dentro de la zona estudiada. Esto permite analizar la homogeneidad del OLED a partir del valor medio de radiancia, siendo este valor diferente a medida que se van tomando áreas cada vez más grandes. Para este análisis y debido a la ambigüedad de las posiciones dentro del área, se toma como punto de referencia el centro físico de la fuente.

El gráfico revela la verdadera importancia de cómo obtener una fuente patrón de radiancia, debido a que la desviación es independiente de la zona de la fuente. Entiéndase como independiente, cualquier región que esté contenida dentro del área definida.

El gráfico (Fig. 6.10) muestra que gran parte de las fuentes estudiadas mantienen una desviación del promedio de la radiancia por debajo del 0,2%. Este valor es obtenido considerando un área circular $A_r = 3,1 \text{ cm}^2$ dentro de la superficie de la fuente. Para el caso del OLED *Os1* se tiene un resultado curioso. Éste OLED presenta un buen resultado respecto al promedio de la homogeneidad a pesar del mal comportamiento que se obtuvo en las figuras 6.6 y 6.9. Esto es a causa de la falta de homogeneidad en la superficie del OLED, ya que esta homogeneidad está simétricamente repartida respecto al centro considerado. Lo que se quiere decir con este resultado es que, la disminución del promedio de homogeneidad en un lado de la superficie se ve compensado con el aumento del promedio de homogeneidad obtenido en el otro lado, dando un valor medio parecido en cada una de las áreas consideradas.

Por tanto a la vista de todos los resultados obtenidos en las tres figuras 6.6, 6.9, y 6.10 se pueden considerar que las fuentes de estado sólido más idóneas para ser consideradas como patrones son los OLEDs *Ph* y *Tr1*. Estos OLEDs tienen una inestabilidad eléctrica $\approx 0,1\%$ y las regiones de homogeneidad tienen unos valores muy parecidos siendo prácticamente independientes tanto del ángulo de observación ($\approx 1\%$) como de la longitud de onda observada $< 1\%$. Esto implica que dentro del área seleccionada en la figura 6.10 se obtiene un valor de radiancia constante pudiéndose estimar ésta con una desviación menor al 0,2% para un área de radio $r < 0,9 \text{ cm}$.

6.3. Homogeneidad

Capítulo 7

Determinación de la distribución espacial de luminancia de fuentes extensas

Contenido

7.1. Metodología	145
7.1.1. Paso 1. Transformación del sistema de referencia cámara al sistema de referencia fuente	145
7.1.2. Paso 2. Interpolación de la ecuación para variaciones angulares	147
7.1.3. Paso 3. Reducción de los coeficientes de la matriz $L_{r,0}$ y g por análisis de componentes principales	148
7.2. Expresión final para determinar la radiancia espectral de una fuente en el espacio	150
7.3. Resultados	152
7.3.1. Paso 1. Cambio del sistema de referencia cámara (CRS) al sistema de referencia fuente (SRS)	154
7.3.2. Paso 2. Cálculo de los coeficientes matriciales $L_{r,0}$ y g	156
7.3.3. Paso 3. Análisis de la fuente mediante PCA	160
7.3.4. Validación del método propuesto	164

Una vez estudiado el espectro, estabilidad y homogeneidad de los OLEDs, el siguiente paso para completar la caracterización fotométrica, es la medida de su distribu-

7. Determinación de la distribución espacial de luminancia de fuentes extensas

ción angular de intensidad luminosa. Recordemos que esta se define como el cociente del flujo luminoso que sale de la fuente, y se propaga en un ángulo sólido elemental que contiene la dirección considerada, por dicho ángulo. Por lo tanto se debe medir en condiciones en las que el flujo se propaga en direcciones muy bien definidas, o en ángulos sólidos muy pequeños; lo que implica realizar la medida a distancias grandes en relación al tamaño de la fuente (entre 5 y 15 veces el tamaño de la fuente [29, 66, 67], dependiendo de la distribución angular del flujo emitido). Para fuentes extensas, como son los OLEDs, esta condición es muy difícil de cumplir; en cuyo caso lo que se obtiene es una intensidad luminosa aparente I_{pp} [29, 68]; con la consecuencia añadida de que la ley de la inversa del cuadrado de la distancia no puede aplicarse.

Ese error sistemático se puede evitar si las medidas se realizan en condiciones de campo cercano. Esto significa que la fuente se analiza en detalle, como una fuente extensa y no como una fuente puntual como ocurre en condiciones de campo lejano. La condición de campo cercano se puede realizar si se usa una cámara en lugar de un fotómetro convencional [69, 70]. La cámara permite resolver detalles espaciales de la fuente porque está compuesta de muchos detectores o píxeles, con un campo de visión muy pequeño. Esto significa, que en la práctica, la fuente se puede subdividir en muchas “subfuentes” [71] para las cuales si se cumple la condición de campo lejano.

Como se mencionó en el capítulo 2, nuestro goniofotómetro (Ver figura 6.5) incorpora una cámara que tiene una doble función: permitir el alineamiento preciso de las fuentes a estudiar y dotar al equipo de la configuración en campo cercano. Esta ha sido la configuración elegida para la medida de la distribución angular de intensidad luminosa de nuestros OLEDs. Ahora bien, el uso de cámaras en las medidas fotométricas, introduce nuevas dificultades. La primera de ellas es la luz esparcida, que puede suponer del orden de un 2 % de incertidumbre. El siguiente problema es la gran cantidad de datos que se obtienen a partir de las imágenes adquiridas. Para esto, la solución más común es usar el método conocido como trazado de rayos [72], método poco eficiente debido al elevado tiempo de procesado de los datos [73].

En este capítulo se presenta el procedimiento completo que hemos seguido para la determinación de la distribución angular (y espectral) de fuentes extensas, incluyendo un procedimiento para reducir el tratamiento de los datos que se obtienen en la configuración de campo cercano.

En este estudio se han definido pequeñas áreas, llamadas subfuentes, que vienen definidas por el pequeño campo de visión que sustenta cada pixel de la cámara con el área de la luminaria colocada frontalmente. Esto permite obtener una imagen de la distribución angular de luminancia de la fuente espaciada en tantos puntos como pixeles tenga la cámara. A partir del conjunto de medidas realizadas de la distribución espacial, en diferentes ángulos y en distintas longitudes de onda, se puede caracterizar completamente la fuente.

El primer propósito de este procedimiento, consiste en reducir la información de la distribución angular de luminancia obtenida de la cámara, a un conjunto menor de valores mediante un ajuste por mínimos cuadrados. La información contenida en este subconjunto de valores es todavía demasiado elevada como para ser tratada fácilmente, por ello, se realiza además otro método. El siguiente procedimiento consiste en reducir la información espectral a una serie de datos, minimizada por el cálculo de sus componentes principales, PCA. De este modo la fuente completa queda caracterizada fotométricamente. Después de determinar la fuente ya se puede calcular cada una de sus magnitudes fotométricas a partir de una integración de todas las subfuentes. Este método permite obtener estas magnitudes en un periodo de tiempo reducido comparado con el método de trazado de rayos.

7.1. Metodología

El resultado de una medida con nuestro gonio en configuración de campo cercano, es decir con la cámara y el filtro sintonizable, es un conjunto de imágenes $N \times M$, que se corresponden con M imágenes para cada ángulo polar (θ) y N longitudes de onda (λ). Obtenidas estas imágenes, se necesitan varios procesos para reducir la información.

7.1.1. Paso 1. Transformación del sistema de referencia cámara al sistema de referencia fuente

La transformación del sistema de referencia cámara (*CRS*) al sistema de referencia fuente (*SRS*) permite relacionar cada uno de los pixeles de la cámara CCD (x_i, y_i) con cada una de las posiciones de las subfuentes (x'_i, y'_i) (Fig. 7.1). Este sistema de referencia, *SRS*, está definido en un sistema de coordenadas cartesianas, X' e Y' , dentro de un plano bidimensional que contiene la superficie de la fuente.

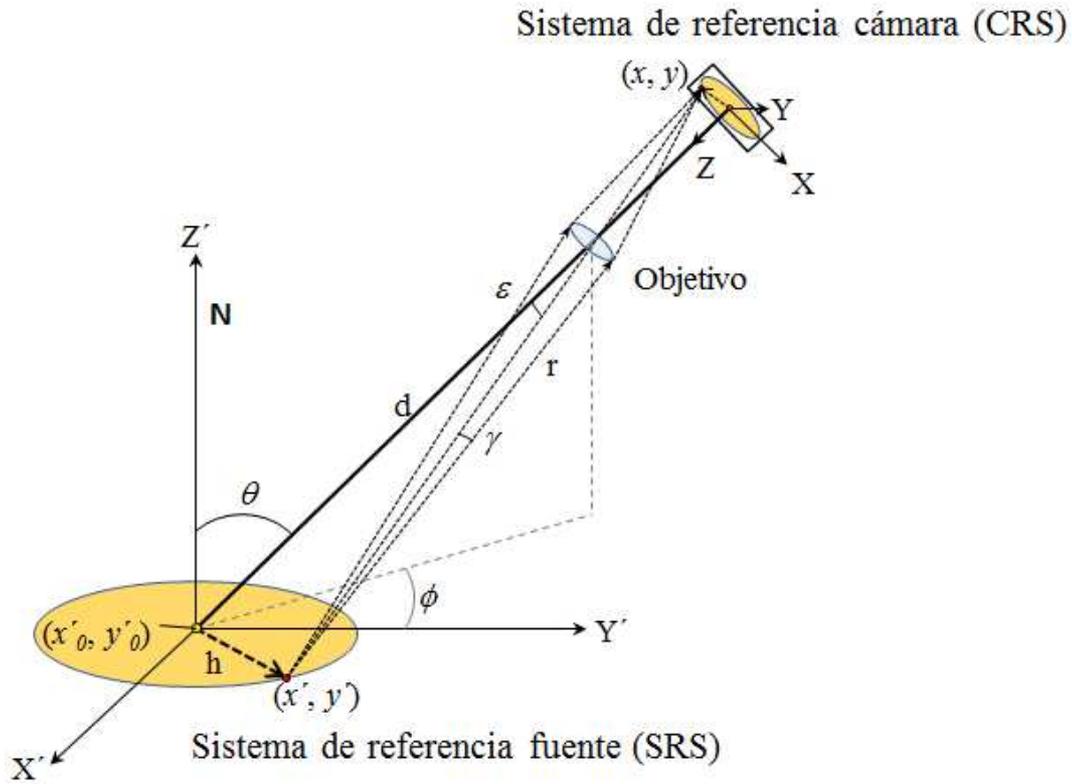


Figura 7.1: Vista esquemática del sistema de coordenadas.

Dado el plano de referencia en el sistema *SRS*, se define el origen de coordenadas (x'_0, y'_0) en función del centroide de la distribución espacial de radiancia de la fuente (Ecs. 7.1 y 7.2). Se toma este origen de coordenadas porque independientemente de la dirección en la que esté colocada la fuente, tiene una reproducibilidad bastante buena con el centroide de la distribución de radiancia en el sistema *CRS*, (x_0, y_0) .

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^K x_i R_i}{\sum_{i=1}^K R_i} \quad (7.1)$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^K y_i R_i}{\sum_{i=1}^K R_i} \quad (7.2)$$

siendo K el número de píxeles de la fuente que están contenidos en la imagen y R_i la respuesta de la cámara en el píxel i . Una vez que el origen de coordenadas (x_0, y_0) está bien definido para cada imagen, se realiza una transformación de los datos a un sistema de referencia intermedio (*dCRS*) mediante una desproyección de estos $(x_{i,d}, y_{i,d})$. Por tanto esta transformación modifica aquellas imágenes que tienen un $\theta \neq 0^\circ$, siendo calculadas de la siguiente forma:

$$x_{i,d} = x_i - x_0 \quad (7.3)$$

$$y_{i,d} = \frac{y_i - y_0}{\cos \theta} \quad (7.4)$$

donde el eje X del sistema *CRS* está orientado perpendicularmente al plano de traslación de la cámara. De este modo, las imágenes de la fuente que ocupaban menos columnas, debido a una proyección de la fuente, pasa a tener el mismo número de columnas que la imagen en $\theta = 0^\circ$. Esto provoca que la distribución de radiancia desproyectada tenga columnas que carezcan de valores. Para solventar este inconveniente se ha rellenado las columnas vacías con el valor promedio de las columnas adyacentes que tienen información de la fuente.

Realizada la transformación se obtiene que el sistema de referencia desproyectado (*dCRS*) sólo coincide con el sistema de referencia fuente (*SRS*) cuando el ángulo azimutal es $\phi = 0^\circ$. Por este motivo, mediante las ecuaciones 7.5 y 7.6 se compensa la rotación de la imagen.

$$x'_i = x_{i,d} \cos \phi + y_{i,d} \sin \phi \quad (7.5)$$

$$y'_i = x_{i,d} \sin \phi - y_{i,d} \cos \phi \quad (7.6)$$

Gracias a esta transformación la imagen pasa del sistema de referencia desproyectado *dCRS* al sistema de referencia fuente, donde el valor de cada posición del pixel está relacionado con el valor de radiancia de cada posición de las subfuentes. Además, la variación del valor de la radiancia en cada pixel para las distintas configuraciones espectrales y angulares se mantiene como una variación de radiancia en cada una de las subfuentes en el sistema *SRS*.

7.1.2. Paso 2. Interpolación de la ecuación para variaciones angulares

Los datos de la distribución de radiancia que se han obtenido en el sistema *SRS*, para las diferentes configuraciones angulares, se pueden reducir a una única expresión mediante una ecuación de interpolación [74]. Esta variación angular de radiancia de las distintas subfuentes de la imagen se puede reducir mediante la expresión:

$$L_{r,i,j}(\lambda, \theta) = L_{r,0,i,j}(\lambda) \cos^{g_{i,j}(\lambda)} \theta \quad (7.7)$$

7.1. Metodología

donde $L_{r,i,j}$ es la radiancia relativa de la subfuente en (x'_i, y'_j) , $g_{i,j}$ es el grado de lambertianidad y $L_{r,0,i,j}$ es la radiancia relativa en $\theta = 0^\circ$. La ventaja de realizar este ajuste, es que los coeficientes que acabamos de definir sólo quedan en función de la longitud de onda (λ). De este modo la dependencia angular queda interpolada por la expresión anterior, ya sea para fuentes lambertianas ($g_{i,j}(\lambda) = 0$) o para fuentes muy direccionales ($g_{i,j}(\lambda) \neq 0$). Por el contrario, esta aproximación no incluye las rotaciones de la fuente en el ángulo azimutal (ϕ). Para el caso en que se quiera considerar este grado de libertad, se deben aproximar los valores de $L_{r,0,i,j}(\lambda)$ y $g_{i,j}(\lambda)$ mediante una función periódica en el ángulo azimutal (ϕ). Como el conjunto de valores de los parámetros $L_{r,0,i,j}(\lambda)$ y $g_{i,j}(\lambda)$ se pueden organizar como matrices que representan la distribución espacial en el *SRS*, los llamaremos en adelante coeficientes de la matriz $L_{r,0}$ y g .

7.1.3. Paso 3. Reducción de los coeficientes de la matriz $L_{r,0}$ y g por análisis de componentes principales

A partir de la ecuación 7.7 se obtienen 2 matrices correspondientes a los coeficientes ($L_{r,0}$ y g), para cada una de las longitudes de onda medidas. Esto implica que el total de valores que se están utilizando hasta el momento es del orden de $2 \times N$ matrices, que todavía es un número muy elevado de datos. El siguiente paso es reducir esta cantidad de datos mediante un análisis de componentes principales (PCA) [75]. Con este método de análisis, se transforma la expresión 7.7 en un sistema lineal de matrices, con un número menor de valores. Donde las matrices resultantes tienen contenida toda la información, tanto angular como espectral, de la distribución espacial de radiancia. Del proceso debido al análisis de componentes principales se obtiene la siguiente expresión:

$$\mathbf{L}_{r,0}(\lambda) = \langle \mathbf{L}_{r,0}(\lambda) \rangle + \sum_{k=1}^{N_{\text{red}}} e_{L,k}(\lambda) \mathbf{A}_k \quad (7.8)$$

$$\mathbf{g}(\lambda) = \langle \mathbf{g}(\lambda) \rangle + \sum_{k=1}^{N_{\text{red}}} e_{g,k}(\lambda) \mathbf{B}_k \quad (7.9)$$

siendo \mathbf{A}_k y \mathbf{B}_k matrices con las mismas dimensiones que las matrices $\mathbf{L}_{r,0}$ y \mathbf{g} . Por otro lado, las matrices $e_{L,k}(\lambda)$ y $e_{g,k}(\lambda)$ contienen los coeficientes de peso que restauran la imagen inicial a partir de una combinación lineal. Debido a que este método parte con las matrices de media 0 es necesario volver a sumar este valor para recuperar la matriz inicial. Por este motivo se define $\langle \mathbf{X} \rangle$ como el valor promedio de los elemen-

tos de la matriz \mathbf{X} . Por último, N_{red} es el valor del número de elementos necesarios en la sumatoria para hacer una reconstrucción precisa de los resultados, siendo N_{red} un valor mucho menor que N_{T} , número total de elementos, en la mayoría de los casos. Otra de las ventajas que aporta este procedimiento es, que no sólo reduce de forma considerable el número de elementos sino que también permite tener una comprensión más clara sobre la dependencia angular y espectral.

Debido a la complejidad que entraña el cálculo de las matrices se explica a continuación en más detalle cómo se obtienen para el caso de $\mathbf{L}_{r,0}$.

7.1.3.1. Determinación de los parámetros mediante PCA para el caso de $\mathbf{L}_{r,0}$

Como resultado de la expresión 7.7 se obtiene una gran cantidad de elementos que deben ser analizados. Por este motivo, se llevó a cabo el estudio de estos elementos mediante un análisis de componentes principales. Este método, como ya se ha comentado anteriormente, permite obtener información más detallada de las incógnitas que están involucradas en el problema, así como de una reducción del número de variables a tratar. Esto hace que este procedimiento sea una herramienta muy potente para los intereses que se presentan en este capítulo. En base a esto, es importante entender el procedimiento para calcular estas matrices.

Como punto de partida se tiene, que el valor de cada pixel en los coeficientes $\mathbf{L}_{r,0}$ es una variable N -dimensional aleatoria, donde N es el número de longitudes de onda que se han medido. La dimensionalidad de las medidas condiciona la dimensión de estos coeficientes matriciales de covarianza, siendo esta matriz de dimensión $N \times N$. La matriz de covarianza (S_{F}) obtenida normalmente no es diagonal, mostrando de este modo las correlaciones internas entre las imágenes. La diagonalización del método de las PCA proporciona 3 tipos de elementos a partir de la matriz de covarianza. Estos elementos son: N autovalores \mathbf{v}_k , N autovectores $\mathbf{e}_{L,k}(\lambda)$ y N matrices \mathbf{A}_k que serán definidas como “autocoficientes”.

A partir de los datos resultantes se obtiene, que la matriz de autovalores viene definida en orden decreciente. El orden viene definido de acuerdo con la contribución de los autocoficientes asociados a la varianza total de los valores. Por tanto, \mathbf{v}_k representa la varianza de los autocoficientes \mathbf{A}_k . De este resultado se obtiene que el autovector $\mathbf{e}_{L,k}$ viene definido por N elementos correspondientes a cada una de las longitudes de onda analizadas. Esto implica que cada autovector $\mathbf{e}_{L,k}$ puede verse como unas coordenadas que transforman un espacio, donde las variables están correlacionadas, a otro

7.2. Expresión final para determinar la radiancia espectral de una fuente en el espacio

espacio, donde estas variables están descorrelacionadas. La ecuación que define la expresión de los autocorrelaciones viene dada del siguiente modo:

$$\mathbf{A}_k = \sum_{j=1}^N e_{L,k}(\lambda_j) \bar{\mathbf{L}}_{r,0}(\lambda_j) \quad (7.10)$$

donde \bar{X} , se obtiene de la matriz original X , a partir de restarle el valor medio de la matriz ($\bar{X} = X - \langle X \rangle$). Una vez obtenidos los autocorrelaciones A_k , se puede volver a obtener la matriz de partida mediante la transformación inversa de la expresión 7.10, como se muestra a continuación.

$$\bar{\mathbf{L}}_{r,0}(\lambda) = \sum_{k=1}^N e_{L,k}(\lambda) \mathbf{A}_k \quad (7.11)$$

Esta ecuación coincide con la expresión lineal de la ecuación 7.8, con la diferencia de que esta última expresión es una versión más filtrada y con un número menor de componentes (N_{red}). De este modo, se puede seleccionar el número de componentes correspondiente a los autovalores, para que la matriz final tenga la cantidad de información elegida en función de la varianza seleccionada con respecto a la varianza total.

7.2. Expresión final para determinar la radiancia espectral de una fuente en el espacio

Para determinar la radiancia espectral de una fuente sólo es necesario reagrupar todos los pasos que se han dado a través de las subsecciones anteriores. En consecuencia la radiancia espectral de la subfuente (i,j) queda completamente caracterizada mediante la siguiente ecuación:

$$L_{i,j}(\lambda, \theta) = C_{\text{cal}}(\lambda) \left[\langle \bar{\mathbf{L}}_{r,0}(\lambda) \rangle + \sum_{k=1}^{N_{\text{red}}} e_{L,k}(\lambda) A_{k,i,j} \right] \times \left(\cos \theta \right)^{\langle \mathbf{g}(\lambda) \rangle + \sum_{k=1}^{N_{\text{red}}} e_{g,k}(\lambda) B_{k,i,j}} \quad (7.12)$$

Donde $C_{\text{cal}}(\lambda)$ es el factor de calibración relacionado con la responsividad espectral del sistema cámara + filtro sintonizable. Al ser este factor independiente del ángulo polar (θ) y de la distancia (d), se puede calcular mediante una comparación directa con una medida realizada con el espectrorradiómetro MINOLTA CS1000 calibrado. Esta expresión resume todas las configuraciones que se han examinado mediante su dependencia angular en función de θ y su dependencia espectral con el parámetro λ .

Por otro lado se puede tener un conocimiento completo del valor de las magnitudes radiométricas (I , E y L) en cualquier punto del espacio r mediante la medida de la cámara CCD. Esto es posible porque el valor de la radiancia L viene definido por el flujo radiante ($d\Phi$) que emite cada subfuente dentro de un ángulo sólido $d\Omega_d$ y con un diferencial de área dA_s , sobre un diferencial de superficie del espacio dA_d . Este valor puede ser calculado mediante la expresión:

$$d\Phi = L dA_s \cos \theta d\Omega_d = L dA_s \cos^2 \theta \frac{dA_d}{r^2} \quad (7.13)$$

A partir de las expresiones anteriores (Ecs. 7.12 y 7.13) se puede calcular el valor del flujo radiante (Φ) para una fuente con área A_s en un área A_d del espacio mediante la sumatoria de todas las subfuentes pertenecientes a la fuente (i,j) en la región definida por el área A_d (m,n).

$$\Phi(\lambda) = \sum_m \sum_n \sum_i \sum_j L_{i,j}(\lambda, \theta_{i,j,m,n}) \Delta A_s \cos^2 \theta_{i,j,m,n} \frac{\Delta A_d}{r_{i,j,m,n}^2} \quad (7.14)$$

donde $\theta_{i,j,m,n}$ es el ángulo de emisión entre la subfuente (i,j), con área ΔA_s , y la superficie elemental (m,n), con superficie ΔA_d . El parámetro $r_{i,j,m,n}$ hace referencia a la distancia entre el elemento diferencial (i,j) y el elemento diferencial (m,n) (Fig. 7.2). Para obtener el flujo total de la fuente, los subíndices j e i toman diferentes valores hasta completar el área de la fuente, mientras que los subíndices m y n toman los valores necesarios hasta cubrir toda la región irradiada. Una vez obtenido el flujo $\Phi(\lambda)$ se puede obtener la irradiancia E dividiendo éste por el área A_d y la iluminancia multiplicando E por la función de peso $V(\lambda)$.

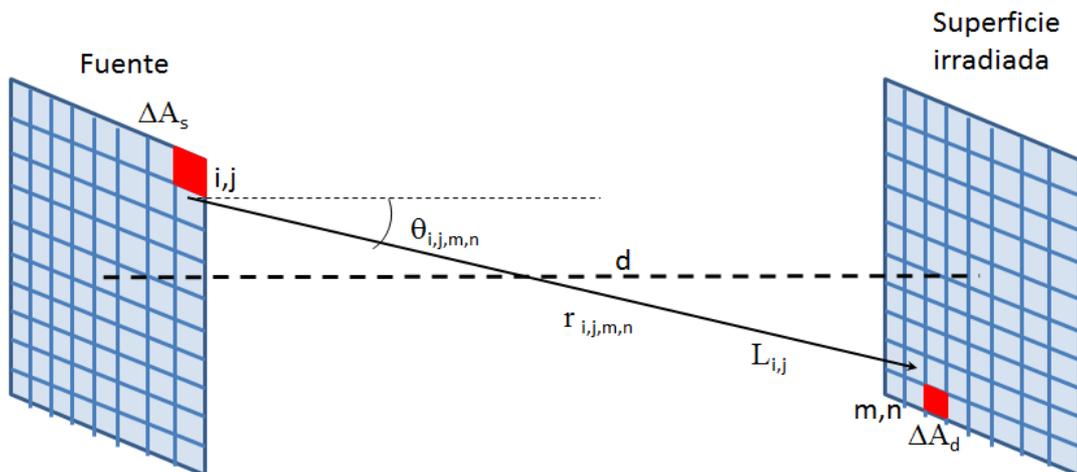


Figura 7.2: Esquema para la determinación de la irradiancia total en un punto del espacio.

7.3. Resultados

El procedimiento descrito para reducir el tratamiento de los datos, se ha aplicado a la medida de la distribución angular de radiancia de los 10 OLEDs descritos en el capítulo anterior. El primer paso ha sido fijar una posición central de referencia por medio de una plantilla superpuesta al OLED. Este punto se utilizó como referencia para centrar el OLED en el sistema de rotación con la cámara CCD. Una vez centrado se procedió a obtener medidas de la superficie de la fuente en distintas posiciones angulares (θ) y en distintas longitudes de onda (λ). Las medidas angulares se realizaron entre el ángulo polar $\theta = 0^\circ$ y $\theta = 80^\circ$, distribuidas uniformemente en intervalos de $\Delta\theta = 10^\circ$. Para el caso de las longitudes de onda el intervalo medido ha sido desde $\lambda = 400$ nm hasta $\lambda = 700$ nm (límites establecidos por el filtro sintonizable) con $\Delta\lambda = 10$ nm; lo que se traduce en un total de 31 longitudes de onda. Todas las medidas se realizaron después de un tiempo de estabilización de 15 minutos y con una intensidad de corriente estabilizada a la referencia del fabricante (Tab. 6.3).

Las siguientes figuras muestran como ejemplo, las medidas realizadas para $\theta = 0^\circ$ y $\lambda = 550$ nm para cada uno de los OLEDs medidos.

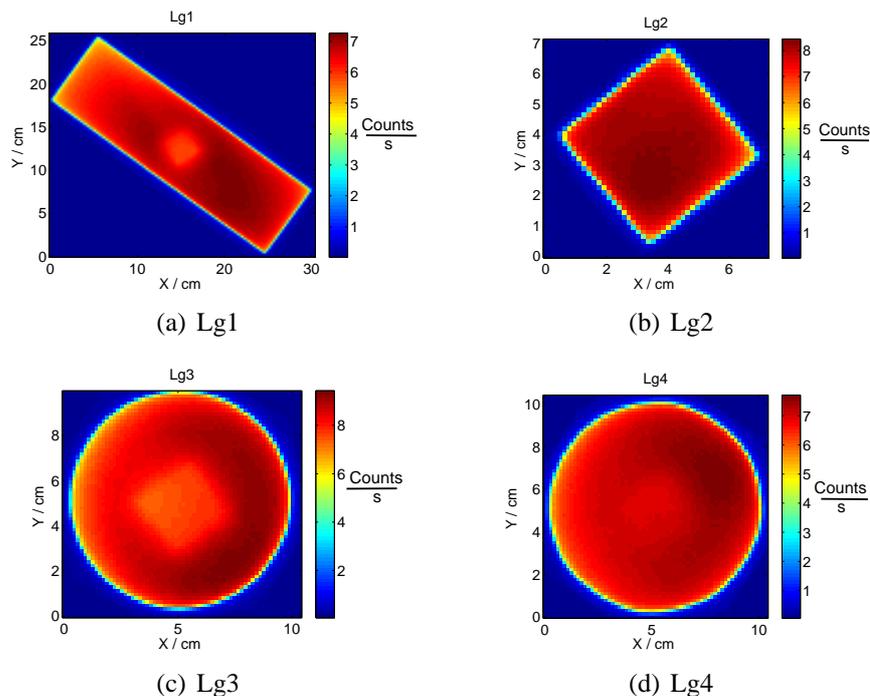
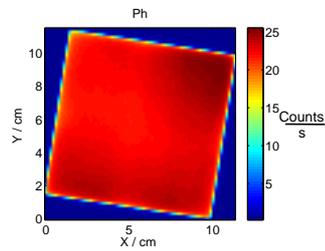
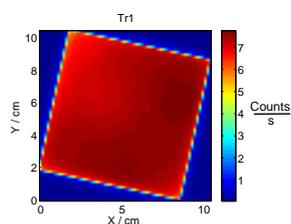


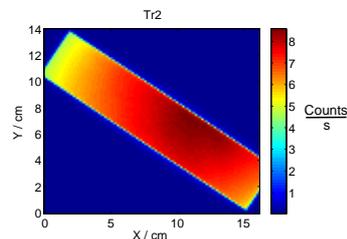
Figura 7.3: Medida obtenida con el sistema de detección cámara CCD + filtro sintonizable, para los OLEDs LG a un ángulo polar $\theta = 0^\circ$ y a una longitud de onda $\lambda = 550$ nm.



(a) Ph

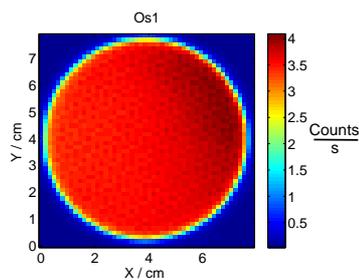


(b) Tr1

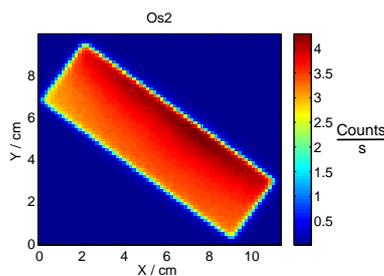


(c) Tr2

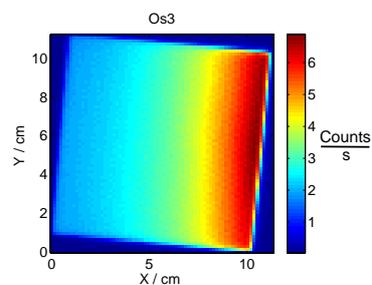
Figura 7.4: Medida obtenida con el sistema de detección cámara CCD + filtro sintonizable, para los OLEDs *Philips* y *Tridonic* a un ángulo polar $\theta = 0^\circ$ y a una longitud de onda $\lambda = 550$ nm.



(a) Os1



(b) Os2



(c) Os3

Figura 7.5: Medida obtenida con el sistema de detección cámara CCD + filtro sintonizable, para los OLEDs *Osram* a un ángulo polar $\theta = 0^\circ$ y a una longitud de onda $\lambda = 550$ nm.

7.3. Resultados

Veamos ahora como aplicar el procedimiento explicado anteriormente:

7.3.1. Paso 1. Cambio del sistema de referencia cámara (CRS) al sistema de referencia fuente (SRS)

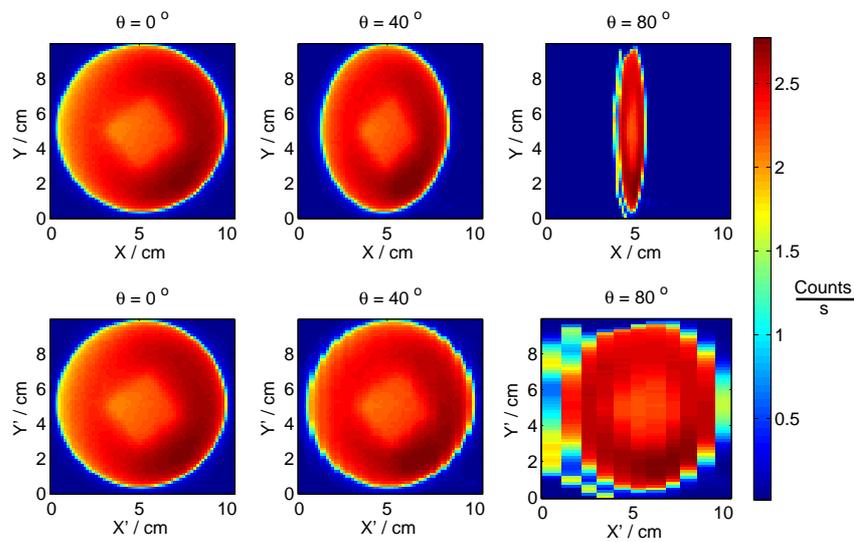


Figura 7.6: Transformación del sistema CRS al sistema SRS para el OLED *Lg3* en $\lambda = 700$ nm.

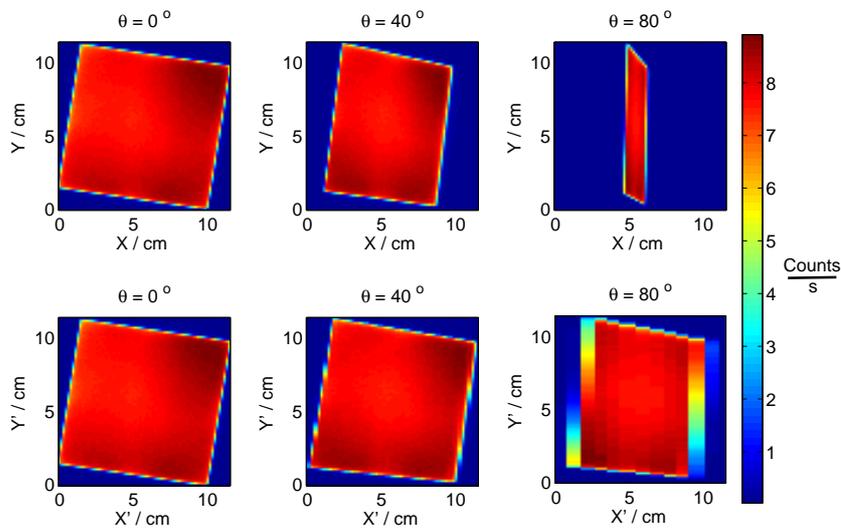


Figura 7.7: Transformación del sistema CRS al sistema SRS para el OLED *Ph* en $\lambda = 700$ nm.

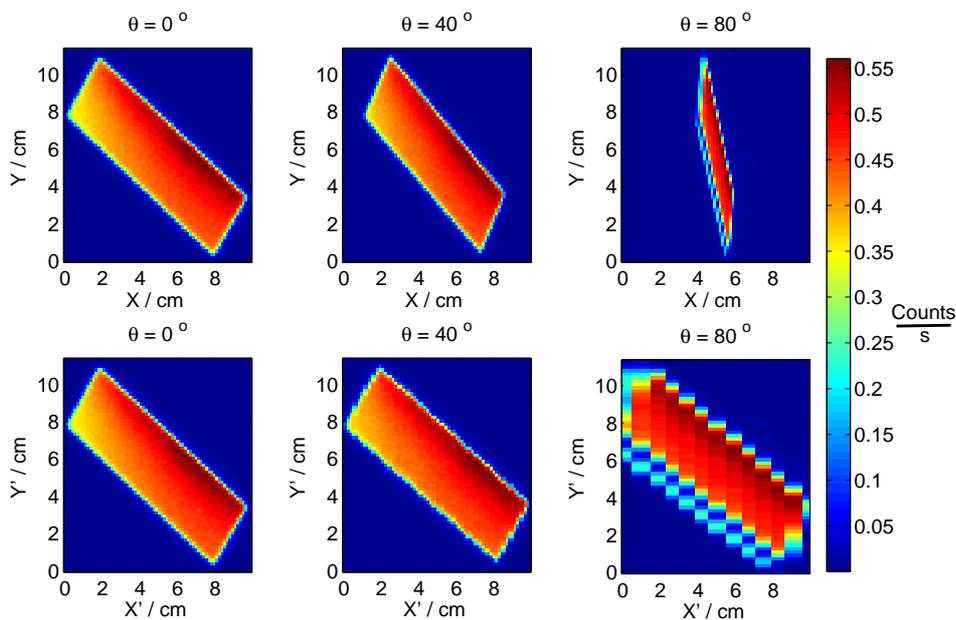


Figura 7.8: Transformación del sistema CRS al sistema SRS para el OLED *Os2* en $\lambda = 700$ nm.

El cambio del sistema de referencia cámara (CRS) al sistema de referencia fuente (SRS) se puede ver mediante las figuras 7.6, 7.7 y 7.8. Estas figuras han sido seleccionadas para ver cómo afecta la transformación del sistema CRS al sistema SRS. En estas figuras se representan los 3 tipos de geometrías que se han estudiado a una longitud de onda $\lambda = 700$ nm.

En la fila superior de cada una de las figuras se muestra como la fuente va modificando su aspecto geométrico en el sistema CRS a medida que el ángulo polar (θ) va cambiando. Por el contrario en la fila inferior se muestra como es el resultado en el sistema SRS, cuando se aplica el procedimiento que se explicó en la subsección 7.1.1. Para cada figura se han seleccionado 3 ángulos polares de rotación ($\theta = 0^\circ$, $\theta = 40^\circ$ y $\theta = 80^\circ$) que muestran claramente cómo afecta esta transformación al sistema de referencia CRS, siendo la transformación nula en el caso de $\theta = 0^\circ$. Para ángulos polares elevados se observa que la transformación necesita hacer una interpolación importante de los datos, debido a que cada pixel en el sistema de referencia CRS equivale a $1/\cos 80^\circ \approx 6$ pixeles en el sistema de referencia SRS. Como se comentó en el apartado 7.1.1, la interpolación de los valores se hace con el valor promedio de los pixeles subyacentes que tienen un valor no nulo. Por último se observa que la columna del medio ($\theta = 40^\circ$) no es afectada mucho por la transformación siendo ambas imágenes muy parecidas en los diferentes sistemas de referencia.

7.3.2. Paso 2. Cálculo de los coeficientes matriciales $L_{r,0}$ y \mathbf{g}

A partir de los datos obtenidos en el sistema SRS ya es posible obtener la función de ajuste descrita por la expresión 7.7. Determinando de este modo los coeficientes matriciales correspondientes a $L_{r,0}$ y \mathbf{g} para cada OLED y para cada longitud de onda medida.

En la tabla 7.1 se muestran los coeficientes matriciales obtenidos del ajuste para cada uno de los OLEDs estudiados. El símbolo $\langle \langle \rangle_{\lambda} \rangle$ representa el promedio espectral de la magnitud mientras que el símbolo $\langle \langle \rangle$ representa el promedio espacial. Además en esta tabla se denota $s(\langle \langle \rangle_{\lambda} \rangle)$ como el valor de la desviación típica de los valores promediados espectralmente. En dicha tabla también se muestra el valor promedio de luminancia obtenido.

Tabla 7.1: Valores promedio de \mathbf{L}_V , $\mathbf{L}_{r,0}(\lambda)$ y $\mathbf{g}(\lambda)$.

Code	$\langle \mathbf{L}_V \rangle \pm s(\mathbf{L}_V)$ $\times 10^3 \frac{cd}{m^2}$	$\langle \langle \mathbf{L}_{r,0} \rangle_{\lambda} \rangle \pm s(\langle \langle \mathbf{L}_{r,0} \rangle_{\lambda} \rangle)$ $\frac{Cuentas}{ms}$	$\langle \langle \mathbf{g} \rangle_{\lambda} \rangle \pm s(\langle \langle \mathbf{g} \rangle_{\lambda} \rangle)$
Lg1	2.5 ± 0.2	5.4 ± 0.4	-0.02 ± 0.04
Lg2	2.9 ± 0.2	5.6 ± 0.5	0.05 ± 0.05
Lg3	2.9 ± 0.3	5.7 ± 0.5	0.11 ± 0.04
Lg4	2.9 ± 0.2	6.2 ± 0.4	0.05 ± 0.07
Ph	8.7 ± 0.7	18.0 ± 1.5	0.05 ± 0.05
Os1	1.9 ± 0.2	3.4 ± 0.2	0.37 ± 0.16
Os2	1.8 ± 0.7	3.2 ± 0.3	0.43 ± 0.06
Os3	1.9 ± 0.6	3.5 ± 1.4	0.50 ± 0.07
Tr1	2.6 ± 0.1	5.1 ± 0.3	0.05 ± 0.06
Tr2	2.7 ± 0.3	5.2 ± 0.6	0.15 ± 0.04

Los valores de la matriz $L_{r,0}$ son mostrados en las figuras 7.9, 7.10 y 7.11 para cada una de las geometrías en las diferentes longitudes de onda, mientras que en las figuras 7.12, 7.13 y 7.14 se muestran respectivamente el valor de los coeficientes de la matriz \mathbf{g} .

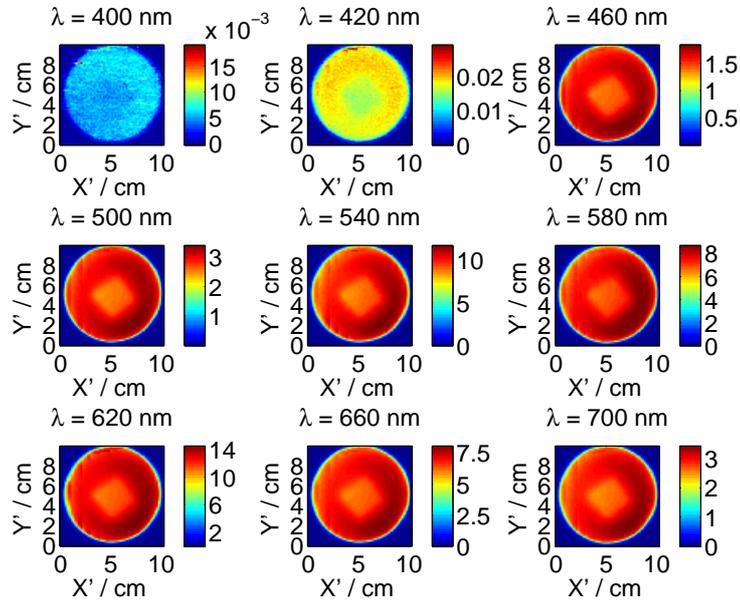


Figura 7.9: Coeficientes de la matriz $L_{r,0}$ obtenidos con el ajuste para el OLED $Lg3$ a distintas λ .

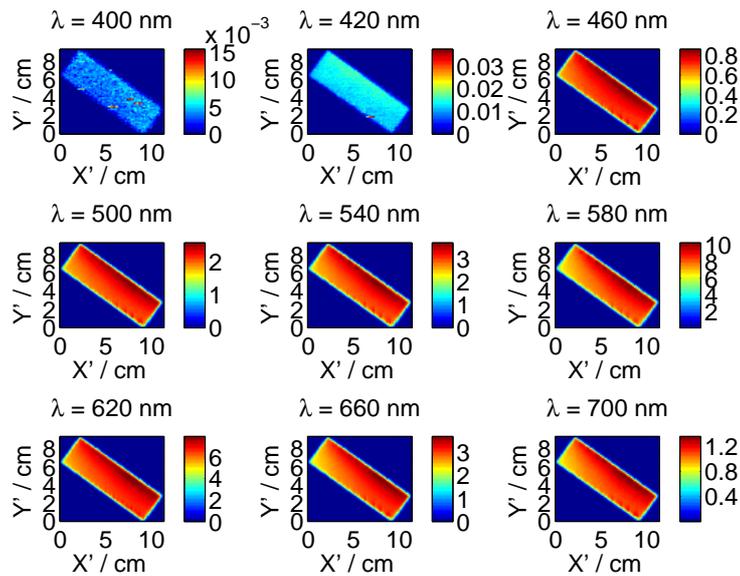


Figura 7.10: Coeficientes de la matriz $L_{r,0}$ obtenidos con el ajuste para el OLED $Os2$ a distintas λ .

7.3. Resultados

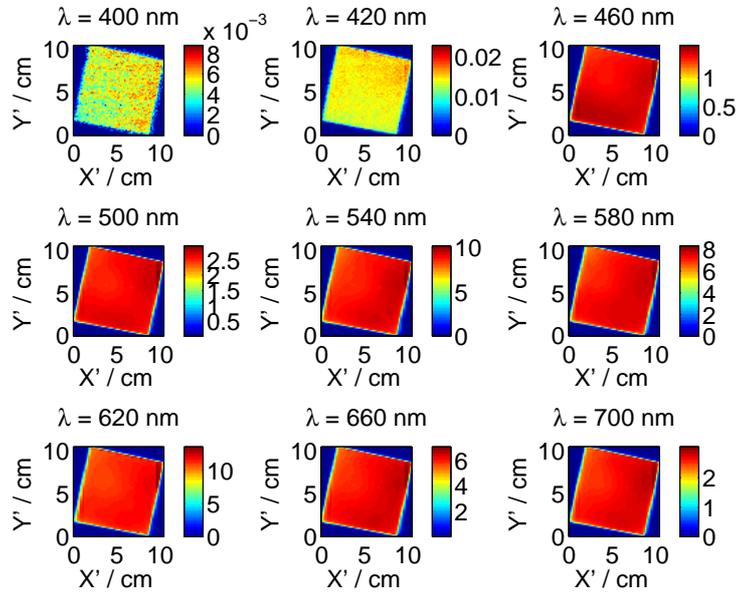


Figura 7.11: Coeficientes de la matriz $L_{r,0}$ obtenidos con el ajuste para el OLED *Tr1* a distintas λ .

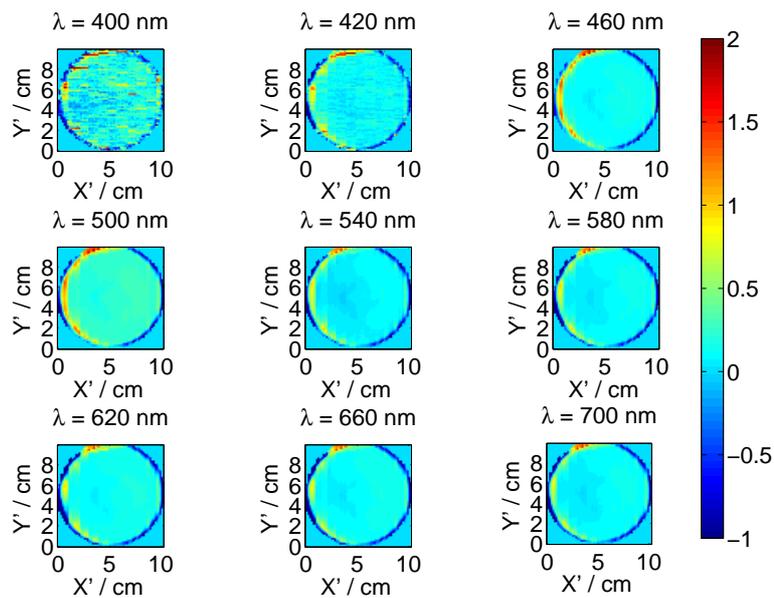


Figura 7.12: Coeficientes de la matriz g obtenidos con el ajuste para el OLED *Lg3* a distintas λ .

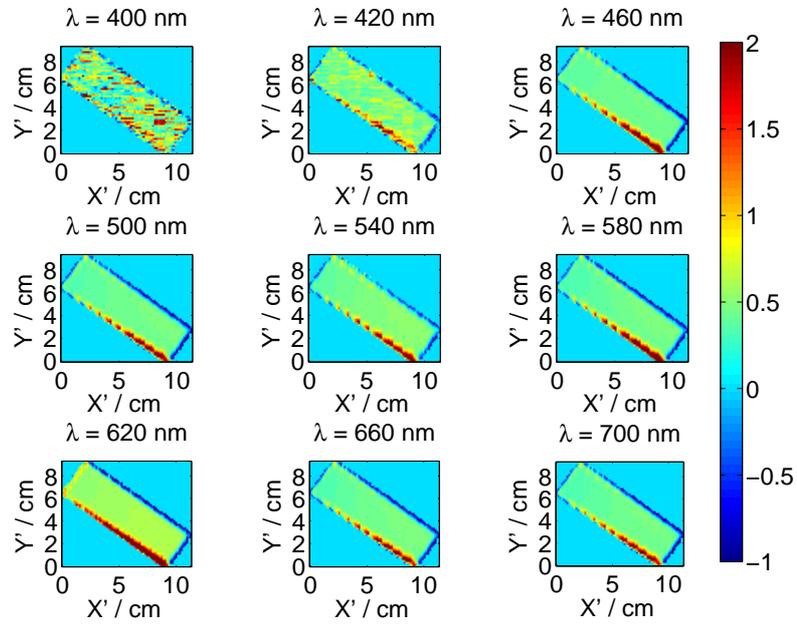


Figura 7.13: Coeficientes de la matriz \mathbf{g} obtenidos con el ajuste para el OLED *Os2* a distintas λ .

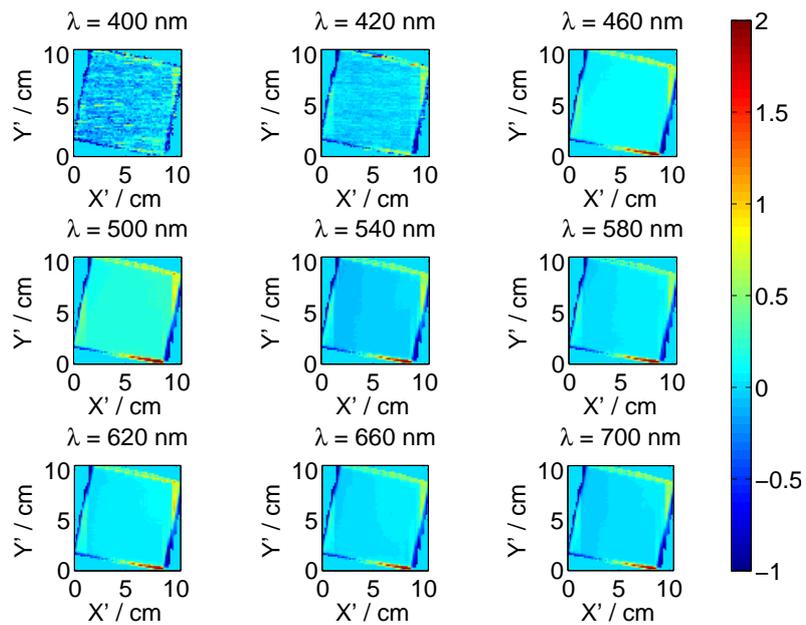


Figura 7.14: Coeficientes de la matriz \mathbf{g} obtenidos con el ajuste para el OLED *Tr1* a distintas λ .

7.3. Resultados

Debido a la emisión, prácticamente nula, de este tipo de fuentes en longitudes de onda $\lambda = 400$ nm (Fig. 6.4) el sistema de detección (cámara CCD y filtro sintonizable) no es capaz de recoger una información fiable de la fuente. Por tanto la medida en estas longitudes de onda se basa esencialmente en la medida del ruido del sistema de detección, como se puede ver en las figuras anteriores para $\lambda = 400$ nm y $\lambda = 420$ nm. Estas figuras también revelan que la aproximación realizada por el ajuste 7.7 es correcta. Estos resultados respaldan la distribución espectral obtenida con el espectrorradiómetro Minolta CS-1000A (Sec. 6.2), ya que los picos que presenta la distribución se corresponden con el mayor número de *Cuentas/s* obtenido en el ajuste.

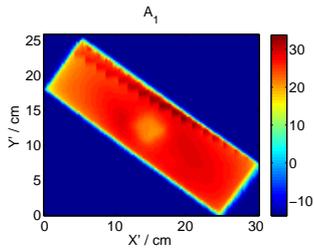
7.3.3. Paso 3. Análisis de la fuente mediante PCA

Con el fin de reducir más la información de estas matrices de coeficientes, se realiza el procedimiento explicado en la subsección 7.1.3. En este análisis se persigue la principal motivación de reducir el número de componentes de las matrices de coeficientes. Estas componentes se utilizan en este procedimiento para analizar la fuente en sus diferentes longitudes de onda (Figs. 7.16, 7.17 y 7.18). Una vez aplicado el análisis de componentes principales se obtiene la tabla 7.2. Esta tabla muestra el número de componentes principales que se requieren para reconstruir el $x\%$ (cabecera de la tabla $N_{x\%}$) de la varianza observada en las matrices de coeficientes $\mathbf{L}_{r,0}$ y \mathbf{g} , mostradas en el apartado anterior. En ella se observa que a medida que la variación de la distribución espacial de radiancia sea más compleja con la longitud de onda, el número de autovectores para reconstruir el $x\%$ de la información también aumenta.

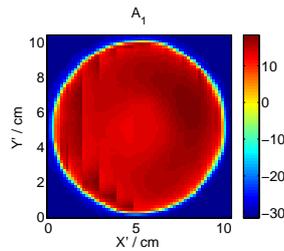
Se observa que para todos los OLEDs estudiados, sólo se necesita 1 autocoficiente, así como su autovector correspondiente, para reconstruir el 99% de la varianza completa de los coeficientes de la matriz $\mathbf{L}_{r,0}$. Esto se traduce en que la distribución espacial de radiancia es independiente de la longitud de onda. Por otro lado se encuentra, que para reconstruir la varianza completa de los coeficientes de la matriz \mathbf{g} es necesario la utilización de varios de los autocoficientes y autovectores, lo cual implica, que la direccionalidad de la fuente depende de la longitud de onda. La justificación de esta afirmación viene dada porque para algunos OLEDs es necesario utilizar varios autocoficientes para reconstruir la fuente. Otros de los autocoficientes utilizados son encargados de reproducir el ruido observado a longitudes de onda pequeñas (Figs. 7.16, 7.17 y 7.18).

Tabla 7.2: Número de PCA para reconstruir el $x\%$ de la varianza observada en el conjunto de matrices $\mathbf{L}_{r,0}$ y \mathbf{g} .

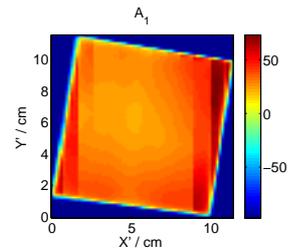
Code	$\mathbf{L}_{r,0}$	\mathbf{g}		
	N_{99}	N_{95}	N_{98}	N_{99}
Lg1	1	2	5	6
Lg2	1	2	3	4
Lg3	1	4	4	5
Lg4	1	4	6	7
Ph	1	1	2	4
Os1	1	3	4	5
Os2	1	3	5	6
Os3	1	4	5	6
Tr1	1	3	4	5
Tr2	1	2	5	6



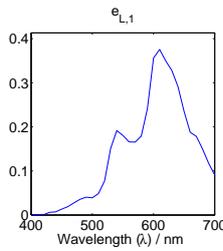
(a) Autocoefficientes A_1 del OLED Lg1.



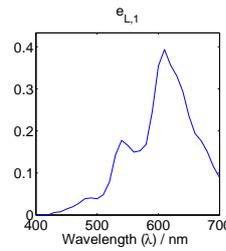
(b) Autocoefficiente A_1 del OLED Lg4.



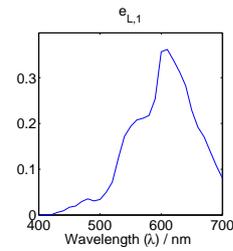
(c) Autocoefficiente A_1 del OLED Ph.



(d) Autovector $e_{L,1}$ del OLED Lg1.



(e) Autovector $e_{L,1}$ del OLED Lg4.



(f) Autovector $e_{L,1}$ del OLED Ph.

Figura 7.15: Valores del primer autocoefficiente (A_1) y autovector ($e_{L,1}$) de los coeficientes de la matriz $L_{r,0}$.

7.3. Resultados

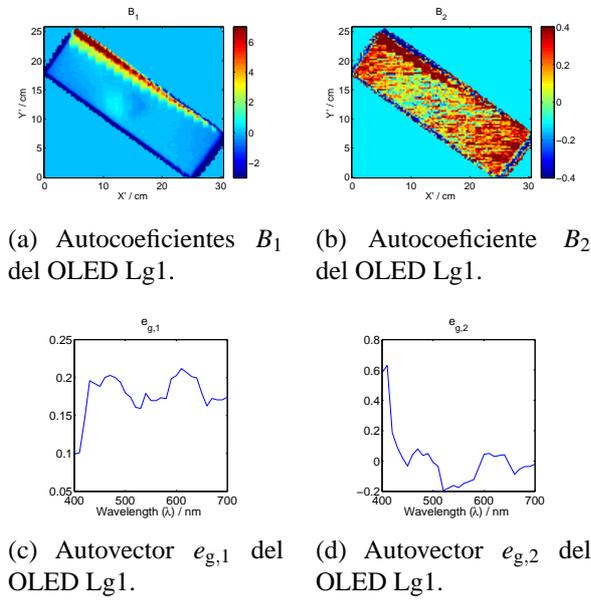


Figura 7.16: Valores de los 3 primeros autocoefficientes (B_k) y autovectores ($e_{g,k}$) de los coeficientes de la matriz g .

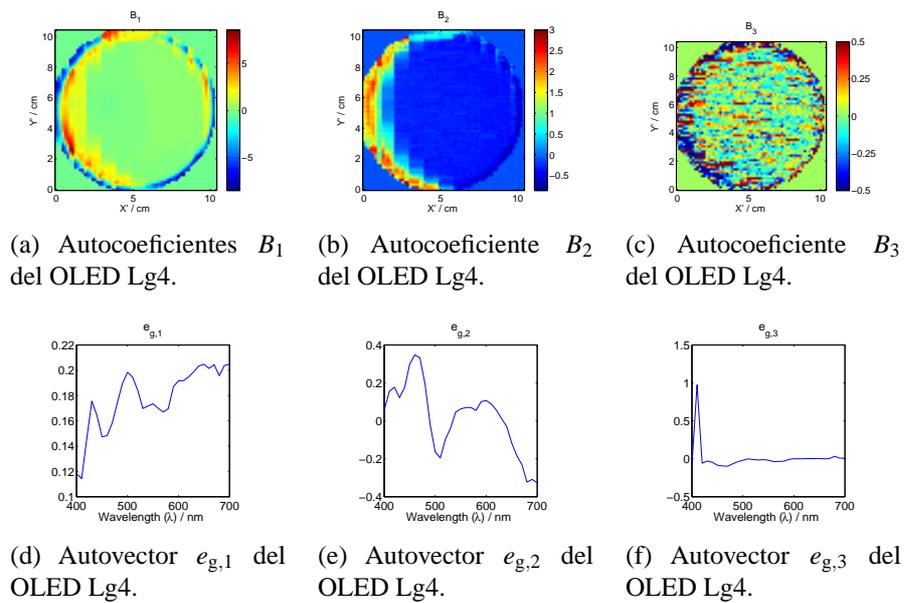
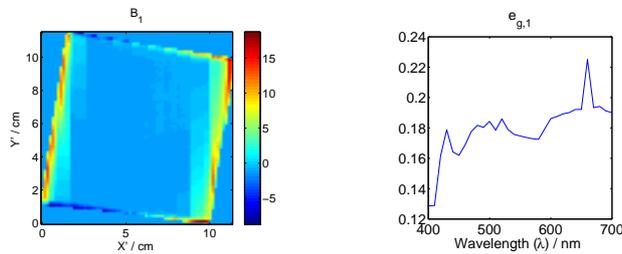


Figura 7.17: Valores de los 3 primeros autocoefficientes (B_k) y autovectores ($e_{g,k}$) de los coeficientes de la matriz g .



(a) Autocoefficientes B_1 del OLED Ph. (b) Autovector $e_{g,1}$ del OLED Ph.

Figura 7.18: Valores de los 3 primeros autocoefficientes (B_k) y autovectores ($e_{g,k}$) de los coeficientes de la matriz g .

Las figuras 7.15, 7.16, 7.17 y 7.18 representan el valor de los autovectores ($e_{L,k}$ y $e_{g,k}$) y autocoefficientes (A_k , B_k) de los OLEDs Lg1, Lg4 y Ph necesarios para reconstruir el 95 % de la información de la distribución espacial de radiancia. Como se puede ver en las figuras 7.15.a), 7.15.b) y 7.15.c) todas las fuentes describen muy bien su forma así como las diferentes regiones de radiancia con un autocoefficiente. El primer autovector, $e_{L,1}$, de cada una de las fuentes nos da una aproximación de la distribución espectral de cada una de las fuentes (Figs. 7.15.d), 7.15.e) y 7.15.f)). Para el caso de los coeficientes de la matriz g , el análisis es un poco más complejo, debido a que necesita más de un autocoefficiente para llegar a reproducir el 95 % de la información. Para los casos 7.16.a), 7.17.a) y 7.18.a) se cumple que el primer autocoefficiente delimita el área de emisión para cada uno de los OLEDs. Mientras, el resto actúa de diferentes formas en función de como haya sido la varianza de la distribución espacial. En el ejemplo 7.16.b) se ve que la segunda componente del autocoefficiente, B_2 , nos da la información del ruido medido en la imagen, mientras que el autovector (Fig. 7.16.d), $e_{g,2}$ nos define que este ruido se debe principalmente a la longitud de onda de $\lambda = 410$ nm. Para la figura 7.17.b) se tiene un comportamiento muy diferente respecto del anterior, debido a que el segundo autocoefficiente es el responsable de rectificar los bordes que delimitan la fuente. Esto implica un aumento de la direccionalidad para longitudes de onda cortas y una disminución de ésta para longitudes de onda larga (Fig. 7.17.d). Al igual que en el caso anterior el autocoefficiente de la figura 7.17.c) proporciona información del ruido medido en la longitud de onda $\lambda = 420$ nm (Fig. 7.17.f).

7.3.4. Validación del método propuesto

Como hemos visto en la subsección 7.2 es posible determinar el valor de la iluminancia en cualquier punto del espacio mediante la expresión 7.14 a partir de las medidas obtenidas. Estos resultados se demuestran mediante las figuras 7.19, 7.20 y 7.21 donde figuran los valores de las distribuciones de iluminancia calculados para los OLEDs Lg1, Lg3 y Ph a diferentes distancias (0.5 cm, 5 cm, 10 cm y 70 cm) para un ángulo polar $\theta = 0^\circ$. En estas figuras se pueden apreciar como los valores de la distribución de iluminancia se van haciendo cada vez más homogéneos a medida que nos alejamos de la fuente. Se tiene que a distancias muy próximas, la distribución de iluminancia tiene la misma forma que la fuente de emisión de partida (Figs. 7.19.a), 7.20.a) y 7.21.a)) mientras que a distancias lejanas la distribución toma una forma circular con valores muy parecidos entre sí, aproximándose de este modo a las condiciones de campo lejano (Figs. 7.19.d), 7.20.d) y 7.21.d)).

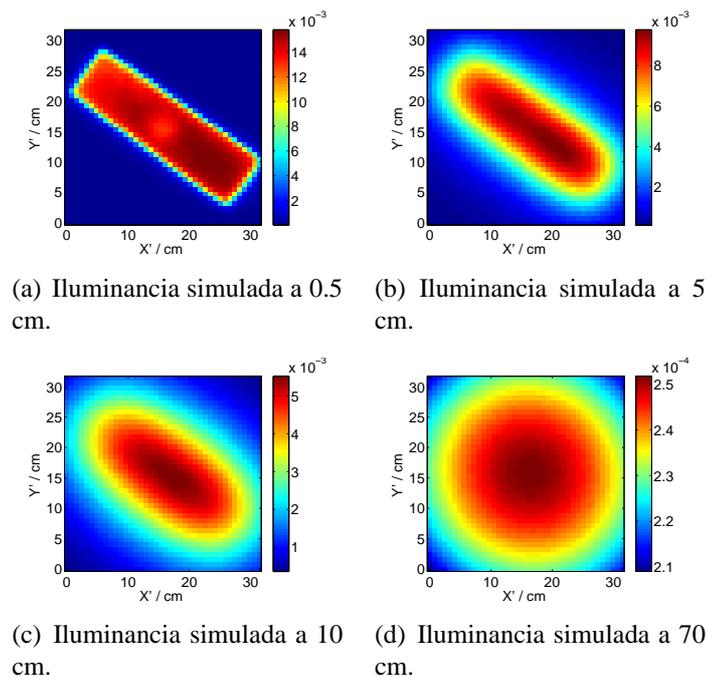


Figura 7.19: Distribución espacial de iluminancia para el OLED Lg1 en distintas posiciones del espacio.

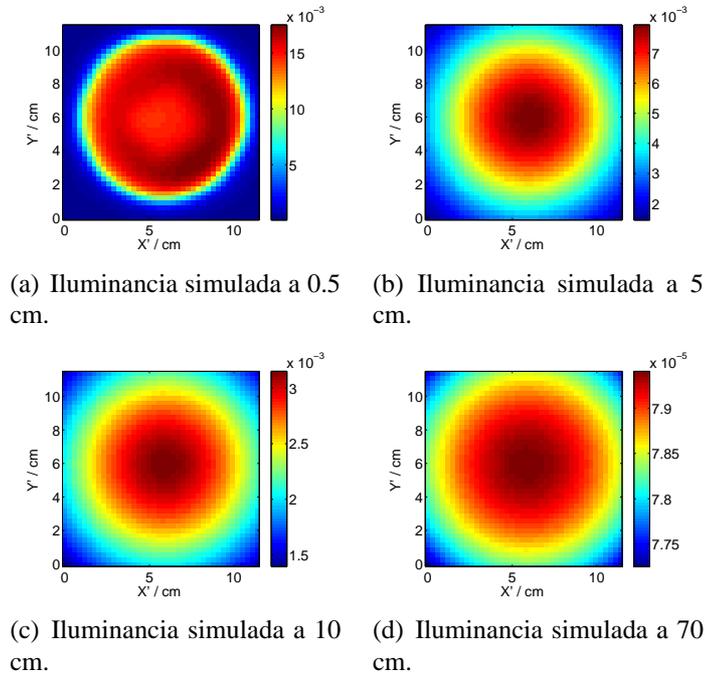


Figura 7.20: Distribución espacial de iluminancia para el OLED *Lg3* en distintas posiciones del espacio.

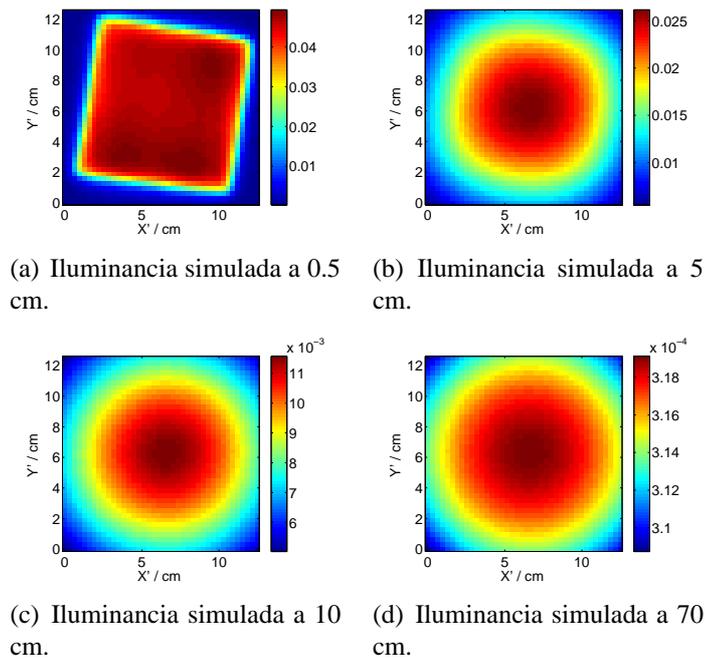


Figura 7.21: Distribución espacial de iluminancia para el OLED *Ph* en distintas posiciones del espacio.

7.3. Resultados

La validación de este procedimiento viene dada por la comparación entre los valores simulados de iluminancia a distintas distancias y el valor obtenido en el fotómetro localizado en las mismas posiciones que las fuentes simuladas. Se utilizó un área de 1 cm^2 , al igual que el área del fotómetro, para obtener los valores de iluminancia en las diferentes posiciones y así estimar las desviaciones producidas en cada punto. Estas desviaciones se pueden ver en el gráfico 7.22, donde se ha representado en el eje de ordenadas la desviación de las medidas simuladas con respecto a las medidas del fotómetro y en el eje de abscisas la relación entre la distancia en la que se hizo la medida y el tamaño mayor del semilado del OLED o radio.

En este gráfico se puede ver cómo, en la mayoría de los casos estudiados, el valor relativo de las desviaciones están por debajo de la desviación sistemática esperada, si se compara con la desviación relativa de la ley de la inversa de la distancia al cuadrado. A pesar de todas las aproximaciones realizadas a lo largo de este método se observa que la mayoría de las desviaciones con respecto a los datos originales están por debajo del 2%, validando de este modo el procedimiento desarrollado para estas fuentes.

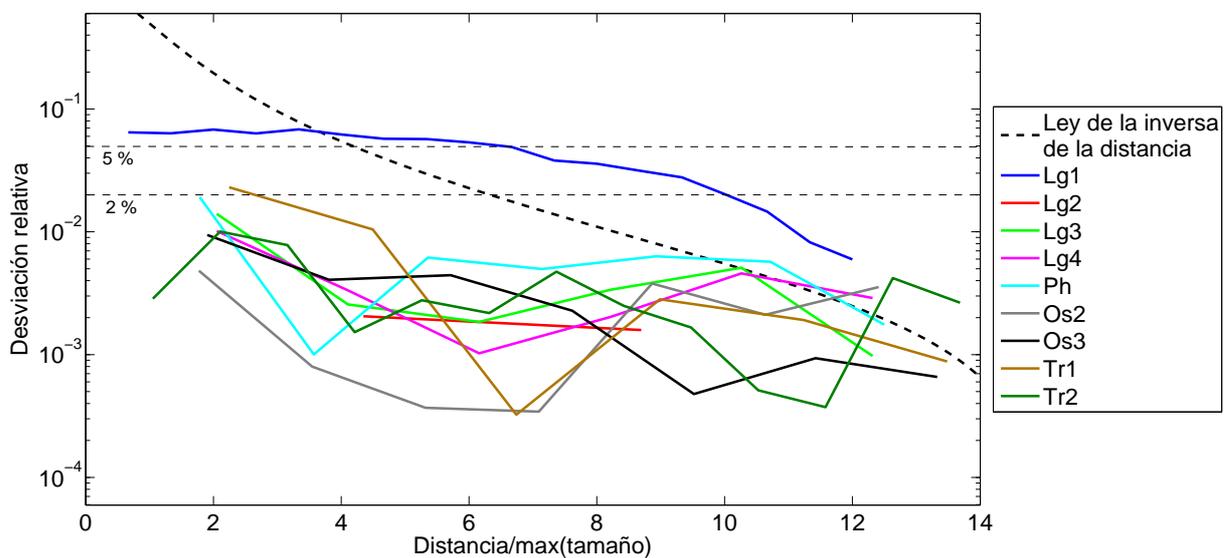


Figura 7.22: Desviación relativa entre la iluminancia calculada y la experimental para los OLEDs medidos en diferentes distancias. La distancia está normalizada por el tamaño mayor del semilado o radio de la fuente.

Conclusiones

1. Se ha realizado un estudio sobre la importancia que tienen las fuentes de estado sólido en nuestros días. Además se ha realizado un análisis de los diferentes tipos de fuentes de estado sólido destinados a la iluminación que se encuentran en el mercado actualmente y en un futuro cercano, así como el funcionamiento de cada uno de los diferentes tipos de fuentes orgánicas e inorgánicas.
2. Se ha diseñado, construido y automatizado un goniotespectrofotómetro para la medida de fuentes de estado sólido. Este diseño es muy flexible, ya que permite medir la distribución angular, espectral y espacial de iluminancia en condiciones de campo cercano o en condiciones de campo lejano con independencia del tamaño de la fuente, y según sean las necesidades del estudio que se quiera realizar. Además la disposición de los elementos del goniotespectrofotómetro permite realizar el intercambio de los dispositivos de detección (fotómetro, espectrorradiómetro y cámara CCD) para medir diferentes aspectos de la fuente de iluminación.
3. La puesta en marcha del goniotespectrofotómetro condujo a realizar una calibración de los diferentes elementos que forman el sistema, tanto de posicionamiento como de detección. Por tanto, debido a esta calibración se han obtenido los factores necesarios que corrigen cada uno de los parámetros que están involucrados en la ecuación de medida, así como las incertidumbres correspondientes de cada uno de los factores. Debido al método utilizado se estima que podemos obtener la intensidad luminosa con una incertidumbre expandida menor que el 1% y un flujo total, con una incertidumbre del 3% mediante una intercomparación realizada con el PTB.
4. El tercer grado de libertad (d) del goniofotómetro que hemos diseñado, nos permitió hacer un estudio de la propagación de la luz de un LED. Los resultados

obtenidos permiten afirmar la posibilidad de usar un modelo basado en una modificación de la ley del inverso del cuadrado de la distancia; en el que se incluye la posición virtual de la fuente del LED con respecto al extremo físico del mismo; y que es posible predecir la iluminancia a cualquier distancia, con un error inferior al 1 %, midiendo sólo a dos distancias; siendo una de ellas la correspondiente a la condición B de la CIE (10 cm).

5. Se ha comprobado que la base de los polinomios de Zernike es una de las bases de polinomios ortogonales más recomendable entre todas las bases de polinomios citadas, tanto por la definición de los polinomios como por las propiedades que cumplen. Esta base se ha utilizado para hacer el estudio de 18 LEDs de diferentes fabricantes dando un buen resultado a la hora de definir cada distribución angular de intensidad luminosa. Además se comprueba en este trabajo que dichas distribuciones angulares de intensidad luminosa pueden ser descritas por un conjunto de 9 polinomios de Zernike, reduciéndose a 2 polinomios si el nivel de incertidumbre requerido no es muy elevado.
6. Se demuestra que el ajuste basado en los polinomios de Zernike permite caracterizar diferentes propiedades fotométricas de una fuente de estado sólido, además de describir la distribución angular de intensidad luminosa. Entre estas propiedades fotométricas de un LED se encuentra el flujo total de la fuente (Φ_V), el ángulo de emisión (BA), la dirección del eje óptico (θ_0, φ_0), la anisotropía (A), la inhomogeneidad (U) y por último el grado de lambertianidad (g).
7. Realizado el estudio en configuración de campo lejano para los LEDs, se procedió a realizar un estudio en configuración de campo cercano sobre la homogeneidad de 10 OLEDs. Para estas fuentes extensas se ha comprobado que la homogeneidad es prácticamente independiente tanto del ángulo de rotación como de la longitud de onda de observación. Esto se traduce en que el color observado en las fuentes extensas es independiente del ángulo de rotación girado.
8. En base a este criterio de homogeneidad se pueden considerar algunos OLEDs como patrones de homogeneidad siempre y cuando el área seleccionada sea menor que $3,1 \text{ cm}^2$, ya que la desviación de los valores de radiancia contenidos en esta área son inferiores al 0,2 %.
9. Se ha desarrollado un procedimiento que permite reducir los datos obtenidos en la medida de la distribución espacial de radiancia, sin perder información.

Este procedimiento permite, además de disminuir la cantidad de datos, poder interpretarlos de forma relativamente sencilla, gracias al método conocido como PCA.

10. El procedimiento desarrollado ha sido aplicado a la medida de 10 OLEDs para estimar las magnitudes fotométricas (E_V , I_V y L_V). Este método nos permite obtener estas magnitudes fotométricas en un corto periodo de tiempo comparado con el método de trazado de rayos. Esta reducción en el tiempo de cálculo se debe a que este método realiza una integración de las “subfuentes” que componen la fuente.
11. Se ha comprobado que con el método de análisis de OLEDs, se puede estimar la iluminancia en cualquier punto con un valor de incertidumbre típica inferior al 2%, independientemente del tamaño, forma y superficie de la fuente.

Bibliografía

- [1] Strategies Unlimited. “The worldwide market for LEDs market review and forecast 2012”. *Strategies Unlimited, California*, (2012).
- [2] Osram [Internet]. “The history of the LED”, Actualizada: 7 Noviembre 2015. [Fecha de consulta: 7 Noviembre 2015] disponible en: http://www.osram.com/osram_com/news-and-knowledge/led-home/professional-knowledge/led-basics/led-history/index.jsp.
- [3] V. K. Khanna. “*Fundamentals of Solid-state Lighting: LEDs, OLEDs, and Their Applications in Illumination and Displays*”. CRC Press, (2014).
- [4] P. Mottier. “*LED for lighting applications*”, volume 134. John Wiley & Sons, (2010).
- [5] R. H. Haitz, M. G. Craford, and R. H. Weissman. “Light Emitting Diodes”. *Handbook of optics*, 2:121–129, (1995).
- [6] E. F. Schubert, T. Gessmann, and J. K. Kim. “*Light Emitting Diodes*”. Wiley Online Library, (2005).
- [7] France Saint Germain. “IALA Guideline No. 1048”. (2005).
- [8] T. Dunn, and A. Stich. [Internet]. “Driving the Golden Dragon LED”, Actualizada: 1 Septiembre 2015. [Fecha de consulta: 5 enero 2016] disponible en: http://www.osram-os.com/osram_os/en/products/product-catalog/led-light-emitting-diodes/golden-dragon/index.jsp.
- [9] R. Karlicek. “The Evolution of LED Packaging”. *Rensselaer Polytechnic Institute*, (2012).

BIBLIOGRAFÍA

- [10] Philips [Internet]. “LUXEON Rebel Platform Assembly and handling information”, Actualizada: 1 abril 2015. [Fecha de consulta: 15 diciembre 2015] disponible en: <http://www.lumileds.com/products/color-leds/luxeon-rebel-color>.
- [11] Jae-Kwan Sim, K. Ashok, Yong-Ho Ra, Hong-Chul Im, Byung-Joon Baek, and Cheul-Ro Lee. “Characteristic enhancement of white LED lamp using low temperature co-fired ceramic-chip on board package”. *Current Applied Physics*, 12(2):494–498, (2012).
- [12] R. Weber. “COB LEDs simplify SSL manufacturing, drive broader deployment”. *LEDs Magazine*, (2013).
- [13] Ming-Te Lin, Shang-Ping Ying, Ming-Yao Lin, Kuang-Yu Tai, and Jyh-Chen Chen. “High power LED package with vertical structure”. *Microelectronics Reliability*, 52(5):878–883, (2012).
- [14] S. Keeping. “El auge de los Módulos LED COB”. *Electronic Products*, (2014).
- [15] The LEDs store [Internet]. “Diferencias entre LEDs SMD y LEDs COB”, Actualizada: 10 febrero 2016. [Fecha de consulta: 10 febrero 2016] disponible en: http://www.theledstore.es/diferencias-entre-leds-smd-y-leds-cob_ca7694.
- [16] Nergueiza [Internet]. “Tipos de LEDs en bombillas: SMD, COB, 5050, 5630.”, Actualizada: 15 enero 2016. [Fecha de consulta: 16 enero 2016] disponible en: <http://nergiza.com/tipos-de-leds-en-bombillas-smd-cob-5050-5630/>.
- [17] Alromar energías de futuro [Internet]. “Comparativa de los LEDs SMD, LED COB y LED Alta Potencia”, Actualizada: 13 septiembre 2013. [Fecha de consulta: 16 enero 2016] disponible en: <http://www.alromar-energia.es/blog/comparativa-de-los-leds-smd-led-cob-y-led-alta-potencia/>.
- [18] LedBox [Internet]. “Comparativa entre los chips SMD 5730 y SMD 5630”, Actualizada: 15 enero 2016. [Fecha de consulta: 16 enero 2016] disponible en: <http://blog.ledbox.es/informacion-led/comparativa-entre-los-chips-smd5730-y-smd5630>.
- [19] Y. Liu, J. Zhao, C. Chang-Ann Yuan, G. Q Zhang and F. Sun. “Chip-on-flexible packaging for high-power flip-chip light-emitting diode by AuSn and SAC soldering”. *Components, Packaging and Manufacturing Technology, IEEE Transactions on*, 4(11):1754–1759, (2014).

-
- [20] Young-Woo Kim, Sung-Mo Park, Min-Sung Kim, Jae-Pil Kim, Jae-Bum Kim, Sang-Bin. “Optimization of flexible substrate for COF (chip on flexible) LED packaging”. In *Electronic Components and Technology Conference, 2009. ECTC 2009. 59th*, pages 1953–1960. IEEE, (2009).
- [21] M. Yamada, Y. Narukawa, and T. Mukai. “Phosphor free high-luminous-efficiency white light-emitting diodes composed of InGaN multi-quantum well”. *Japanese Journal of Applied Physics*, 41(3A):L246, (2002).
- [22] T. Jung. “*Nano-structured InGaN Light-Emitting Diodes for Solid-State Lighting*”. PhD thesis, The University of Michigan, (2009).
- [23] B. Garrido. “Electroluminiscencia y amplificación óptica en nanoestructuras de silicio: hacia la integración de la electrónica y la fotónica”. *Phys. Lett*, 77:3143–3145, (2000).
- [24] Wikipedia [Internet]. “OLED”, Actualizada: 10 enero 2016. [Fecha de consulta: 10 enero 2016] disponible en: <http://en.wikipedia.org/wiki/OLED>.
- [25] P. Chamorro Posada, J. Martín Gil, P. Martín Ramos, and L. M. Navas García. “Fundamentos de la tecnología OLED”. (2008).
- [26] J. Kalinowski. “*Organic Light-Emitting Diodes: Principles, Characteristics & Processes*”. CRC press, (2004).
- [27] R. González, and C. M. Aguilar. “Tecnología OLED y MOLED”. *Visión electrónica*, 1(2):34–48, (2010).
- [28] P. Marx. “New goniophotometers for lighting-engineering laboratories”. *Publication N° 133 CIE-Session Warsaw Proc.*, 1:189–92, (1999).
- [29] CIE 126:1996. “The Photometry and Goniophotometry of Luminaires”. Technical report, Commission Internationale de l’Eclairage, (1996).
- [30] CIE 070:1987. “The Measurement of Absolute Luminous Intensity Distributions”. Technical report, Commission Internationale de l’Eclairage, (1987).
- [31] P. Raynham. “DIN EN 13032-1 2012: Light and lighting-Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires-Part 1: Measurement and file format”. (2012).

BIBLIOGRAFÍA

- [32] CIE 084:1989. “Mesurtement of luminous flux”. Technical report, Commision Internationale de l’Eclairaige, (1989).
- [33] CIE 127:2007. “Measurement of LEDs”. Technical report, Commision Internationale de l’Eclairaige, (2007).
- [34] H. Baumgartner, A. Vaskuri, T. Poikonen, T. D’ onsberg, T. Pulli, J. Oksanen, P. Kärhä, and E. Ikonen. “Measurement of relative spectra of LEDs”. *Proceeding of the 12th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry (NEWRAD)*, 1:142–143, (2014).
- [35] Y. Ohno. “NIST Special Publication 250-37”. *Photometric Calibrations*, (1997).
- [36] CIE 053:1982. “Methods of characterizing the performance of radiometers and photometers”. Technical report, Commision Internationale de l’Eclairaige, (1982).
- [37] P. Manninen, J. Hovila, P. Kärhä, and E. Ikonen. “Method for analysing luminous intensity of light-emitting diodes”. *Measurement Science and Technology*, 18(1):223, (2007).
- [38] P. Manninen, J. Hovila, P. Kärhä, and E. Ikonen. “Determination of distance offsets of diffusers for accurate radiometric measurements”. *Metrología*, 43(2):S120, (2006).
- [39] A. Pons, J. Campos, A. Ferrero, J. L. Velázquez , M. L. Hernanz, and A. Rabal. “Metrología de LEDs”. In *Proc. 5º Congreso Español de Metrología*, pages 6–14. CEM, junio (2013).
- [40] D.R. Agaphonov, V. S. Ivanov, V.I. Sapritsky, and R. I. Stolyarevskaya. “Light measurements of high-luminance LEDs ”. *Metrología*, 37(5):587, (2000).
- [41] Y. Ohno. “Optical metrology for LEDs and solid state lighting”. *Proceedings SPIE*, 6046:604625–604625–8, (2006).
- [42] K. Godo, T. Saito, H. Shitomi, T. Zama, and I. Saito. “Development of a total luminous flux measurement facility for LEDs at the National Metrology Institute of Japan”. *Proceedings of the 12th International Conference on New Developments and Applications in Optical Radiometry (NEWRAD)*, 1:95, (2014).
- [43] M. Bürmen, F. Pernuš, and B. Likar. “Automated optical quality inspection of light emitting diodes”. *Measurement Science and Technology*, 17(6):1372, (2006).

-
- [44] CIE S 025/E:2015. “Test Method for LED Lamps, LED Luminaires and LED Modules”. Technical report, Commission Internationale de l’Eclairage, (2015).
- [45] V. Lakshminarayanan, and A. Fleck. “Zernike polynomials: a guide”. *Journal of Modern Optics*, 58(7):545–561, (2011).
- [46] M. R. Spiegel, and J. Liu, and R. L. Abellanas. “*Formulas y tablas de matematica aplicada*”. McGraw-Hill Inc., (2003).
- [47] K. Van Berkel, A. Van Helden, and L. C. Palm. “A History of Science in The Netherlands Survey, Themes and References”. JSTOR, pp. 609-611 (1999).
- [48] V. N. Mahajan. and Guang-ming Dai. “Orthonormal polynomials in wavefront analysis: analytical solution”. *J. Opt. Soc. Am. A*, 24(9):2994–3016, Sep (2007).
- [49] M. Born, and E. Wolf. “*Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light*”. CUP Archive, (1999).
- [50] R. J. Noll. “Zernike polynomials and atmospheric turbulence”. *J. Opt. Soc. Am.*, 66(3):207–211, Mar (1976).
- [51] V. N. Mahajan. “Zernike annular polynomials for imaging systems with annular pupils”. *J. Opt. Soc. Am.*, 71(1):75–85, Jan (1981).
- [52] R. Navarro, J. L. López, J. A. Díaz, and E. Pérez. “Generalization of Zernike polynomials for regular portions of circles and ellipses”. *Optics Express*, 22(18):21263–21279, (2014).
- [53] J. L. Velázquez, A. Ferrero, A. Pons, J. Campos, and M. L. Hernanz. “Zernike polynomials for photometric characterization of LEDs”. *Journal of Optics*, 18(2):025605, (2016).
- [54] J. L. Velázquez, A. Ferrero, M. López, A. Pons, and A. Villamarín. “Angular distribution of the averaged luminous intensity of low power LEDs transfer standards”. *Proc. SPIE 8785, 8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications*, 8785:87858W, Noviembre (2013).
- [55] C-J Kim and R. R. Shannon. “Catalog of Zernike polynomials”. *Applied Optics and Optical Engineering*, X:193–221, (1987).

BIBLIOGRAFÍA

- [56] J. M. Palmer, and B. G. Grant. “*The Art of Radiometry*”. SPIE Press Bellingham, (2010).
- [57] GUM. “Evaluation of measurement data. Guide to the expression of uncertainty in measurement: JCGM 100: 2008 (E)”. (2008).
- [58] ISO GUM. “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, (1995), with Supplement 1, Evaluation of measurement data, JCGM 101: 2008. *Organization for Standardization, Geneva, Switzerland*, (2008).
- [59] IEC BIPM, ILAC IFCC, IUPAP IUPAC, and OIML ISO. “Evaluation of measurement data-guide for the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100: 2008”. *Joint Committee for Guides in Metrology (JGCM)*, (2008).
- [60] EA-4/02. “Expression of the uncertainty of measurement in calibration”. *European co-operation for accreditation*, (2013).
- [61] IEC BIPM, ISO IFCC, IUPAP, IUPAC, and OIML ISO. Evaluation of measurement data Supplement 2 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement”–Extension to any number of output quantities JCGM 102: 2011. *Joint Committee for Guides in Metrology (JGCM)*, 3(4):6, (2011).
- [62] CIE 198-SP1.X:2011. “Determination of measurement uncertainties in photometry”. Technical report, Commission Internationale de l’Eclairage, (2011).
- [63] T. Gerloff, M. Meyer, M. Taddeo, and A. Sperling. “Measurements on OLEDs: Optical Properties, Reference Standards, Stability”. *Light and Engineering*, 20(2):12, (2012).
- [64] H. W. Bae, Y. H. Son, B. Y. Kang, J. M. Lee, H. Nam, and J. H. Kwon. “Luminance uniformity study of OLED lighting panels depending on OLED device structures”. *Optics express*, 23(24):30701–30708, (2015).
- [65] T. Kawabata and Y. Ohno. “Optical measurements of OLED panels for lighting applications”. *Journal of Modern Optics*, 60(14):1176–1186, (2013).
- [66] S. Stannard, and J. Brass. “Application distance photometry”. *Journal of the Illuminating Engineering Society*, 19(1):39–46, (1990).
- [67] V. A. Jacobs, S. Forment, and P. Rombauts. “Near-field and far-field goniophotometry of narrow-beam LED arrays”. *Lighting Research and Technology*, page 1477153514530139, (2014).

-
- [68] J. J. B. Moerman, and J. G. Holmes. “The choice of test distance to control errors in the photometry of round projectors focused at a long distance”. *Lighting Research and Technology*, 13(2):87–95, (1981).
- [69] J. Audenaert, B. Van Giel, V. A. Jacobs, S. Forment, and P. Hanselaer. “The use of near field goniophotometers for LED lighting applications”. *Technologiecluster ESAT Electrotechnische Engineering*, (2012).
- [70] I. Ashdown, and M. Salsbury. “A near-field goniospectroradiometer for LED measurements”. In *Contract Proceedings*, pages 634215–634215. International Society for Optics and Photonics, (2007).
- [71] M. López, K. Bredemeier, N. Rohrbeck, C. Véron, F. Schmidt, and A. Sperling. “LED near-field goniophotometer at PTB”. *Metrología*, 49(2):S141, (2012).
- [72] J. Rowbury. “Tracing the Rays”. *Electro Optics*, pages 18–19, April (2014).
- [73] V. A. Jacobs, R. Van Gaeve, B. Ribbens, W. R. Ryckaert, M. Diltoer, and P. Rombouts, and P. Hanselaer. “Quality Assessment of Virtual Prototypes of Surgical Luminaires using Near-field Ray-data”. *Leukos*, 9(3):189–200, (2013).
- [74] C. Sánchez del Río. “*Análisis de Errores*”. Universidad Complutense, (1989).
- [75] A. Ferrero, J. Alda, J. Campos, J. M. López-Alonso, and A. Pons. “Principal Components Analysis of the photoresponse nonuniformity of a matrix detector.”. *Applied optics*, 46(1):9–17, (2007).

BIBLIOGRAFÍA

