

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
UPC-BARCELONATECH

DEPARTAMENTO DE ÓPTICA Y OPTOMETRÍA
FACULTAD DE ÓPTICA Y OPTOMETRÍA DE TERRASSA



TESIS DOCTORAL

QUALITY CHECK OF OPTICAL ELEMENTS
MANUFACTURED WITH IN-MOULD HYBRID
INTEGRATION TECHNIQUE

MEMORIA PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR
EN INGENIERÍA ÓPTICA

Presentada por:

PAU CASTILLA GONZÁLEZ

Director:

DR. JOSÉ ARASA MARTÍ

Universitat Politècnica de Catalunya

Terrassa, 2019



Acta de qualificació de tesi doctoral

Curs acadèmic:

Nom i cognoms

Programa de doctorat

Unitat estructural responsable del programa

Resolució del Tribunal

Reunit el Tribunal designat a l'efecte, el doctorand / la doctoranda exposa el tema de la seva tesi doctoral titulada

_____.

Acabada la lectura i després de donar resposta a les qüestions formulades pels membres titulars del tribunal, aquest atorga la qualificació:

NO APTE

APROVAT

NOTABLE

EXCEL·LENT

(Nom, cognoms i signatura)		(Nom, cognoms i signatura)	
President/a		Secretari/ària	
(Nom, cognoms i signatura)	(Nom, cognoms i signatura)	(Nom, cognoms i signatura)	
Vocal	Vocal	Vocal	

_____, _____ d'/de _____ de _____

El resultat de l'escrutini dels vots emesos pels membres titulars del tribunal, efectuat per la Comissió Permanent de l'Escola de Doctorat, atorga la MENCIÓ CUM LAUDE:

SÍ

NO

(Nom, cognoms i signatura)		(Nom, cognoms i signatura)	
President/a de la Comissió Permanent de l'Escola de Doctorat		Secretari/ària de la Comissió Permanent de l'Escola de Doctorat	

Barcelona, _____ d'/de _____ de _____

A mi madre, mi constante.
A Irene, a su sonrisa y a los ciervos.

Agradecimientos

Como dice el grupo *Village People* en su canción *YMCA*: “No man, does it all by himself” y de ésto van estas líneas.

Primeramente, agradezco a Josep, mi director, por la oportunidad que me ha brindado, por todo el tiempo que me ha dedicado, por la gran cantidad de paciencia que ha tenido conmigo y por nuestras conversaciones de *filosofía*.

A SnellOptics, por ofrecerme un entorno en el que he podido crecer tanto a nivel personal como a nivel profesional. A Carles, por su paciencia, sus dosis de realidad en los momentos oportunos y por compartir su genio. A los antiguos miembros, Cristina y Manel, por proporcionarme nuevos puntos de vista, cada uno en su ámbito. A los presentes miembros, Dani, Gámez y Marc por ser un grupo bravo. A Patri, por revisar todo el código y querer entenderlo. Mención especial a Noemí, que ha estado presente durante todo el proceso.

A mis compañeros de máster, David y Raúl, que me ayudaron a superar un año muy exigente, con los que aun puedo compartir risas.

A Andrés por darme mi primera oportunidad laboral cuando aún estaba cursando la carrera. Si mi experiencia no hubiese sido tan positiva probablemente no habría seguido mi camino en el ámbito de la óptica.

A mis compañeros de universidad, Adrià, Àlvar, Arnau, Bernat, David y Emili, porque mi experiencia universitaria hubiese dejado mucho que desear sin ellos, por el grupo de amigos que conseguimos formar y que aún mantenemos, pese a los diferentes caminos que cada uno está tomando.

A mi premoh, por ser la nota de libertad en mi vida. Por el bagaje común y las chapas incansables que compartimos. A Oriol, por estar casi siempre. Por todas las horas que hablábamos sin vernos, por todas las bromas internas que se nos han ocurrido. A Top, ser inesperado, por ser esa voz crítica, que todos necesitamos, que cuestiona cualquier opinión que se da generalmente como aceptada.

A Irene, por completarme y hacerme mejor persona, por aguantarme en todos los momentos en que ha tenido que poner de más, por escuchar mis divagaciones, por su pronto, por su bondad.

A mi madre, por la educación y los valores que me ha dado. Por instarme siempre a dar un poco más, por ser un ejemplo de esfuerzo y superación, por no rendirse nunca.

Índice

Índice	III
1. Introducción	1
1.1. Contexto	1
1.2. Objetivos de la presente tesis doctoral.....	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Estructura de la memoria	4
2. Estado del conocimiento	7
2.1. Estado del arte	7
2.2. Estudio de Mercado	12
3. Estrategia de medida	17
3.1. Introducción.....	17
3.2. Descripción test óptico en línea	18
3.2.1. Descripción de la geometría del test óptico en línea.....	19
3.2.2. Descripción del proceso de validación funcional	20
3.2.2.1. Descripción del componente fotónico teórico tipo	20
3.2.2.2. Relaciones radiométricas en las condiciones de medida del test óptico en línea	21
3.2.2.3. Implementación del test óptico en línea.....	26
3.3. Descripción del control óptico de calidad	34
3.3.1. Descripción del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)	35
3.3.1.1. Descripción de la geometría del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$).....	35
3.3.1.2. Implementación del control óptico de calidad	37
3.3.2. Descripción del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)	54
3.3.2.1. Descripción de la geometría del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$).....	54
3.3.2.2. Implementación del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)	58
4. Equipo de medida	77

4.1.	Descripción del equipo del test óptico en línea	77
4.2.	Descripción del equipo del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)	82
4.3.	Descripción del equipo del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)	84
4.4.	Calibración del equipo de medida.....	86
4.4.1.	Calibración geométrica	86
4.4.2.	Calibración energética	87
4.5.	Repetitividad del equipo de medida.....	96
4.5.1.	Pruebas de repetitividad del test óptico en línea.....	97
4.5.2.	Pruebas de repetitividad del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$).....	98
4.5.3.	Pruebas de repetitividad del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$).....	100
4.6.	Descripción del entorno de simulación.....	104
5.	Componentes medidos	109
5.1.	Componente FOT.....	109
5.2.	Componente LED Lambertiano.....	113
5.3.	Componente LED Lambertiano con lente secundaria.....	115
6.	Medidas experimentales.....	119
6.1.	Componente FOT.....	119
6.1.1.	Medidas empleando la configuración del test óptico en línea	120
6.1.2.	Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) 123	
6.1.3.	Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) 127	
6.2.	Componente LED Lambertiano.....	133
6.2.1.	Medidas empleando la configuración del test óptico en línea	134
6.2.1.1.	Registros empleados para verificar la invariancia del test bajo desplazamiento del componente (< 1 mm).....	134
6.2.1.2.	Registros empleados para verificar la repetitividad del test óptico en línea	136
6.2.2.	Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) 138	
6.2.2.1.	Registros empleados para verificar el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) 138	

6.2.2.2.	Registros empleados para verificar la repetitividad del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$).....	142
6.2.3.	Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)	144
6.2.3.1.	Registros empleados para verificar el control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)	144
6.2.3.2.	Registros empleados para verificar la repetitividad del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$).....	150
6.3.	Componente LED Lambertiano con lente secundaria.....	151
6.3.1.	Medidas empleando la configuración del test óptico en línea	152
6.3.2.	Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)	156
6.3.3.	Implementación del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)	161
7.	Simulaciones	167
7.1.	Componente LED Lambertiano.....	167
7.1.1.	Implementación del test óptico en línea	168
7.1.2.	Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)	169
7.1.3.	Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)	172
7.2.	Componente FOT.....	177
7.2.1.	Implementación del test óptico en línea	178
7.2.2.	Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)	180
7.2.3.	Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)	185
7.3.	Componente LED Lambertiano con lente secundaria.....	187
7.3.1.	Implementación del test óptico en línea	188
7.3.2.	Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)	189
7.3.3.	Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)	193
8.	Interpretación de los resultados	199

8.1. Componente LED Lambertiano.....	199
8.2. Componente FOT.....	202
8.3. Componente LED Lambertiano con lente secundaria.....	205
9. Conclusiones.....	209
Apéndice A.....	213
Apéndice B.....	217
Bibliografía.....	221

1. Introducción

1.1. Contexto

Cuando tenía alrededor de 6 años recuerdo que le dije a mi madre que de mayor quería ser inventor. Mi madre me respondió, entre risas, que me quitase eso de la cabeza, que a los inventores los quemaban (probablemente tenía en mente a Galileo, aunque no lo acabaron quemando). Siempre he sido una persona con interés en la ciencia en general, pero lo que me acabó llevando a estudiar física fue la lectura recomendada por mi profesor de biología, cuando tenía 17 años, de *La historia más bella del mundo* (1998). Este libro presenta tres orígenes: el origen del universo, el origen de la vida y el origen del ser humano. No hace falta decir qué origen me cautivó.

En el penúltimo año en la universidad, creció mi interés por las interacciones luz-materia, sobre todo a raíz de cursar la asignatura de óptica cuántica. Como consecuencia, me interesé en realizar prácticas en empresas del sector de la óptica, aunque sus aplicaciones perteneciesen al entorno clásico. De este modo, llevé a cabo las prácticas en una empresa enfocada al diseño e ingeniería óptica, donde profundicé en mis conocimientos de óptica geométrica y óptica difractiva y a su vez pude experimentar por primera vez un entorno laboral en el ámbito de la ciencia. Al finalizar las practicas tenía decidido que quería seguir formándome en el campo de la ingeniería óptica mediante la realización de un máster en fotónica.

En una de las asignaturas donde se abordaba la ingeniería óptica conocí a Josep, y con el objetivo de seguir profundizando en dicha materia, llevé a cabo el trabajo de final de máster bajo su supervisión, en el que usamos el cómputo de la MTF para validar la calidad óptica de una cámara. Pocos meses después de la defensa del trabajo, se me brindó la oportunidad de formar parte de la empresa de ingeniería óptica SnellOptics™, empresa spin-off del CD6, de la cual Josep es uno de los fundadores.

En el momento en que me incorporé a la empresa, SnellOptics™ y la UPC en consorcio con QPO™ se encontraban desarrollando un nuevo método de fabricación de componentes fotónicos basados en tecnología LED.

En la actualidad el uso de diodos emisores de luz (LED, en sus siglas en inglés) está ampliamente extendido en sectores tan distintos como el de la iluminación, tanto de interior como de exterior; el de la automoción; el de la señalización viaria; el de la publicidad; así como el de los dispositivos móviles [1-6].

La colonización por parte de la tecnología LED de tan diversos sectores es consecuencia de varios motivos, tales como su alta eficiencia energética, gran tiempo de vida y bajo coste

de mantenimiento [7-10]. Como consecuencia de esta colonización, la industria de la tecnología LED presenta grandes crecimientos interanuales desde el inicio del presente siglo [11-13].

En la mayoría de las aplicaciones en las que se emplean LEDs, estos vienen acompañados de lo que se conoce como empaquetado (*package*). El *package* puede estar compuesto por diferentes materiales dependiendo del tipo, pero todos cumplen con las siguientes funciones [14-18]:

- Proteger el conexionado del componente LED del entorno.
- Disipar el calor que genera el componente LED.

Adicionalmente, hay procesos de *packaging* que incluyen la encapsulación de la zona emisora de luz del LED, el chip del LED. La encapsulación suele consistir simplemente en la adición de una resina transparente con forma de cúpula esférica. Sin embargo, los fabricantes de resinas para el encapsulado LED se centran más en aspectos como la disipación del calor y la protección en entornos hostiles que en la funcionalidad óptica que dota al componente [19-20]. Los LED con encapsulado de resina actuales tienen la ventaja para el fabricante de que son muy tolerantes desde el punto de vista de su funcionalidad óptica debido a su simplicidad. Por lo tanto, aunque la zona en la que se coloca la encapsulación varíe, la funcionalidad óptica de los componentes no se ve apreciablemente afectada. Como consecuencia, actualmente no se encuentran en el mercado una gran variedad de sistemas de validación de la funcionalidad óptica en el proceso de fabricación en línea porque no hay una necesidad, el proceso de fabricación actual no lo requiere. Sin embargo, desde el punto de vista de las aplicaciones en ingeniería óptica, los sistemas LED actuales con y sin encapsulado presentan un escollo.

Dado que la óptica que representa la encapsulación de la resina (en caso de tenerla) es sencilla, es necesario añadir sistemas ópticos adicionales a los componentes para que en las aplicaciones en ingeniería óptica obtengamos la funcionalidad óptica deseada. Este hecho es evidente en sistemas de iluminación (luminarias, faros de automoción) o que contengan sensores ópticos (encoders), en que se añaden ópticas secundarias complejas a los componentes LED con el fin de lograr la funcionalidad óptica deseada. Como consecuencia, al ser el sistema fotónico y la óptica secundaria elementos independientes, estos no se validan conjuntamente hasta el ensamblaje de ambos. Este hecho puede conllevar que la funcionalidad final no sea la adecuada debido a que haya errores de posicionado entre ellos.

El nuevo método de fabricación desarrollado por SnellOptics™ y la UPC, a través de varios proyectos tanto nacionales como internacionales, ENCAP y FLOIM [21-22], solventa este problema y además permite la disminución de costes, así como de tamaño de los componentes. Esto es consecuencia de que en el nuevo proceso de fabricación de los componentes fotónicos la óptica que se añade no es una simple cúpula esférica de resina, sino que se inyecta la óptica adecuada para la función óptica específica para la que se va a aplicar el componente fotónico y además la óptica actúa como *package*, protegiendo el componente. Es decir, los componentes fabricados ya tienen la funcionalidad requerida sin

que sea necesario añadir a posteriori una voluminosa óptica secundaria, con los problemas asociados que ya hemos presentado.

De este modo, los componentes fabricados mediante este nuevo método constan de un alto valor añadido debido a que contienen elementos ópticos complejos. Por este motivo, es necesario que se implemente un test en la misma línea de producción de los componentes fotónicos que permita, en tiempo real, validar la funcionalidad óptica de cada uno de los componentes fabricados. Este hecho permite controlar durante el funcionamiento de la línea de producción, y no al final del proceso de fabricación de la totalidad del lote, la validez de los componentes fotónicos fabricados. Adicionalmente, es necesario aplicar un control óptico de calidad en el entorno de laboratorio que de un modo sencillo sea capaz de detectar los defectos presentes en los componentes descartados al implementar el test en línea.

1.2. Objetivos de la presente tesis doctoral

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general de esta tesis es el desarrollo e implementación de una estrategia de medida que permita la validación de la funcionalidad óptica de componentes fotónicos en la misma línea de fabricación y el control óptico de calidad complementario en el entorno de laboratorio. De este modo la estrategia de medida debe llevarse a cabo mediante un sistema experimental modular. Es decir, el sistema debe permitir la validación de la funcionalidad óptica de los componentes fotónicos en la línea de producción y, además, añadiendo pequeñas variaciones, debe permitir la implementación de un control óptico de calidad en el entorno de laboratorio para dar una primera respuesta a los motivos por los que ciertos componentes han sido descartados por el test óptico en línea.

La estrategia de medida, además, debe presentar una importante característica: que ésta sea simulable. Esto es, que las simulaciones reproduzcan el comportamiento que se da en el entorno experimental. El hecho de poder implementar la estrategia de medida en un entorno simulado permite obtener resultados con validez experimental antes de implementar el test en la línea de producción y el control óptico de calidad en el entorno de laboratorio. Este hecho nos permite definir a priori los criterios de aceptación y las funciones de mérito implementadas en la estrategia de medida para los diferentes componentes fotónicos.

1.2.2. Objetivos específicos

Para lograr la consecución del objetivo general de la presente tesis doctoral, deben llevarse a cabo una serie de objetivos específicos.

1. Obtener una base empírica formal para la estrategia de medición

La base empírica formal desarrollada en el presente doctorado se basa en estrategias de medición radiométricas combinadas con el análisis de trazado de rayos. En muchos casos

la obtención de los datos se llevará a cabo mediante solucionadores de sistemas de ecuaciones sobredeterminados.

2. Construir un dispositivo capaz de analizar los componentes fotónicos en un entorno de producción en línea y en un entorno de laboratorio

Una vez determinada qué información queremos que constituya nuestros registros experimentales, para cada uno de los dos entornos, debemos diseñar y construir un dispositivo experimental que nos permita obtenerlos.

3. Realizar un algoritmo capaz de extraer información relevante sobre la funcionalidad de los componentes fotónicos en un entorno de producción en línea y en el entorno de laboratorio

Partiendo de la información obtenida mediante el dispositivo experimental para cada uno de los entornos, debemos desarrollar un algoritmo que nos permita caracterizar la funcionalidad óptica del componente fotónico. Tal algoritmo, al aplicarse en un entorno de producción en línea debe determinar si el componente es válido o no. Y, del mismo modo, al aplicarlo en el entorno de laboratorio, debe darnos una primera información acerca del defecto que ha provocado que el componente no haya superado el test óptico en línea.

4. Implementación conjunta del algoritmo y del dispositivo

El prototipo y el algoritmo deben implementarse conjuntamente tanto en el entorno experimental como en el entorno simulado. Por ello se ha complementado la implementación experimental con la implementación en un entorno de simulación.

5. Calibración del dispositivo experimental

La etapa de calibración del dispositivo se lleva a cabo con el objetivo de obtener valores numéricamente consistentes. Este objetivo específico se lleva a cabo en adición a la prueba de repetitividad de la implementación de la estrategia de medida.

1.3. Estructura de la memoria

La presente tesis doctoral está organizada en 9 capítulos, incluyendo éste, de la siguiente manera:

El capítulo 2 muestra el contexto en el que se enmarca la presente tesis doctoral. Dado que es una tesis doctoral llevada a cabo en un entorno industrial, dicho contexto muestra una dualidad: estado del arte y estado del mercado. El estado del arte está dividido en dos partes. En primer lugar, mostramos el presente estado del arte en lo relativo a técnicas relacionadas radiométricas y fotométricas implementadas mediante sistemas goniométricos. En segundo lugar, mostramos las técnicas implementadas mediante sistemas formadores de imagen. Tal y como se explica en el capítulo, ambas tienen sus ventajas y sus inconvenientes. El estudio de mercado viene determinado por los dos ámbitos de aplicación de la presente tesis: el entorno de laboratorio y el entorno en línea. De modo análogo,

mostramos sistemas radiométricos aptos para su implementación en el entorno de producción en línea y a en el entorno del laboratorio.

El capítulo 3 presenta la estrategia de medida que se ha desarrollado e implementado en la presente tesis para realizar la validación de la funcionalidad óptica de los componentes fotónicos. Como ya se ha mencionado, la estrategia tiene dos ámbitos bien diferenciados: el test óptico en línea implementado en el entorno de producción en línea y el control óptico de calidad implementado en el entorno del laboratorio. Primeramente, presentaremos la base física y matemática de las estrategias de medida. En segundo lugar, mostraremos la estrategia de medida adaptada al entorno en línea. En tercer lugar, presentaremos la estrategia de medida en el entorno de laboratorio. Ésta última se presenta dividida en dos partes. Primeramente, analizamos la funcionalidad óptica para los ángulos de emisión cercanos al eje óptico y posteriormente analizamos la funcionalidad para ángulos grandes.

El capítulo 4 está dividido en tres partes. En primer lugar, mostramos la descripción del equipo experimental utilizado para implementar el test óptico en línea y posteriormente presentamos el utilizado para implementar el control óptico de calidad. En segundo lugar, presentamos la calibración geométrica y energética del dispositivo experimental. En tercer lugar, presentamos el estudio de repetitividad de la implementación de la estrategia de medida. Por último, presentamos como se ha reproducido el dispositivo experimental en el entorno de simulación.

El capítulo 5 presenta y describe los componentes fotónicos a los que se les ha implementado la estrategia de medida.

El capítulo 6 presenta los registros y medidas experimentales obtenidas al aplicar la estrategia de medida a los distintos componentes fotónicos. Mostramos la implementación del test óptico en línea, así como la implementación del control óptico de calidad tanto para ángulos pequeños de emisión como para ángulos grandes.

El capítulo 7 presenta los registros simulados obtenidos en el entorno de simulación en el que se reproducen las condiciones de las medidas experimentales. Además, analizamos ciertos casos a los que no tenemos acceso experimentalmente. Para todos los casos, presentamos los datos obtenidos al aplicar la estrategia de medida en los registros simulados.

El capítulo 8 presenta la interpretación de los resultados a partir de la comparación entre los casos simulados y los casos experimentales, tanto para los casos de estudiados mediante el test óptico en línea como mediante el control óptico de calidad.

El Capítulo 9 presenta las conclusiones extraídas de la elaboración de la tesis doctoral, así como las posibles vías de futuro trabajo.

1. INTRODUCCIÓN

2. Estado del conocimiento

Tal y como se ha presentado en la introducción, la presente tesis se enfoca al desarrollo de un dispositivo y una estrategia de medida que permiten validar la funcionalidad óptica de componentes fotónicos basados en tecnología LED. El dispositivo y la estrategia de medida desarrollados presentan una estructura modular con el objetivo de adaptar su implementación tanto a las condiciones de la línea de fabricación de componentes como al entorno de laboratorio.

El presente capítulo tiene el objetivo de presentar el contexto científico-técnico en el que se enmarca la presente tesis doctoral industrial. En primer lugar presentamos el estado del arte en el campo la validación y la caracterización de la funcionalidad óptica de componentes fotónicos emisores de luz y en segundo lugar, dado que la presente tesis se lleva a cabo en un entorno industrial, presentamos el estudio de mercado donde mostramos diferentes patentes y dispositivos vinculados a la validación y caracterización óptica de componentes fotónicos emisores de luz, tanto en el entorno de fabricación en línea como en el entorno del laboratorio.

En el Apéndice A definimos los diferentes conceptos empleados en las medidas radiometría (y sus correspondientes fotométricos) por lo que, en la presente sección no definimos las distintas magnitudes radiométricas que nombramos.

2.1. Estado del arte

El presente estado del arte está dividido en tres partes. En primer lugar, presentamos dispositivos de caracterización radiométrica basados en sistemas goniométricos. En segundo lugar, presentamos dispositivos de caracterización radiométrica basados en sistemas de adquisición de imagen. Y en tercer lugar, mostramos ejemplos de sectores industriales en los que se han implementado estos dos tipos de dispositivos para la caracterización y validación óptica de componentes.

Como ya hemos mencionado, el uso de componentes fotónicos está muy extendido en diferentes industrias debido a su alta eficiencia, alta vida útil y bajo mantenimiento [23-26]. Por este motivo, estos componentes se utilizan en entornos muy diferentes, como iluminación, telecomunicaciones y mecatrónica, entre otros [27-30]. El uso de componentes fotónicos en distintas aplicaciones necesitan que éstos presenten distribuciones de intensidad radiante de luz muy específicas. Como consecuencia es necesario el desarrollo de estrategias para caracterizar su funcionalidad óptica.

A continuación, presentamos los dos tipos de sistemas que se utilizan más comúnmente en la caracterización y validación de componentes fotónicos: los sistemas goniométricos y los sistemas formadores de imagen.

Sistemas goniométricos

Los procesos de medida típicos en el campo de la radiometría y la fotometría son bien conocidos y extensamente aplicados, tal como atestigua la literatura [31-33]. Uno de los tipos de sistema más populares para la caracterización de componentes fotónicos son los sistemas goniométricos. Los sistemas goniométricos están constituidos típicamente por un montaje que permite rotación ortogonal mediante dos ángulos y un sensor. Si el sensor es un radiómetro, un fotómetro o un espectrofotómetro, el sistema se conoce como goniometriómetro, goniometrómetro o goniometrospectrofotómetro respectivamente. El uso de sistemas goniométricos en cualquier industria relacionada con la radiometría es extendido y consolidado debido a la precisión de sus medidas [34-40].

La Comisión Internacional de la Iluminación (CIE, por sus siglas en francés) estableció en su publicación no. 70 de 1987 [41] tres tipos de sistemas goniométricos de dos ejes según el plano de medida: A, B o C [42]. La Figura 2.1 (a) muestra el sistema goniométrico para el plano de medida A. En este sistema el eje horizontal es fijo y el eje móvil es perpendicular a este eje. Las mediciones se realizan girando la fuente de luz alrededor el eje horizontal, mientras que el otro eje se mantiene en una posición fija. La Figura 2.1 (b) muestra el sistema goniométrico para el plano de medida B. En este sistema el eje vertical es fijo y el eje horizontal es móvil. Las mediciones se realizan girando la fuente de luz sobre el eje vertical, mientras que el otro eje se mantiene en una posición fija. La Figura 2.1 (c) muestra el sistema goniométrico para el plano de medida C. En este sistema el eje vertical es fijo y el eje horizontal es el eje móvil. En el caso de este último tipo de sistema goniométrico de dos ejes suele añadirse un espejo (Figura 2.2 (a)).

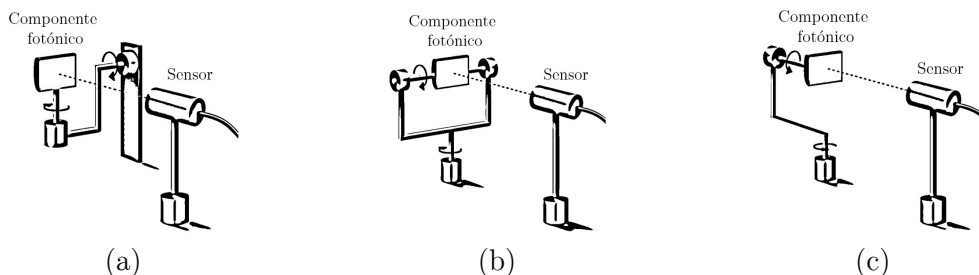


Figura 2.1 (a) Sistema goniométrico para el plano de medida A. El eje horizontal es fijo y el eje móvil es perpendicular a este eje. (b) Sistema goniométrico para el plano de medida B. El eje vertical es fijo y el eje horizontal es móvil. (c) Sistema goniométrico para el plano de medida C. El eje vertical es fijo y el eje horizontal es el eje móvil.

Dos años después, la CIE en la publicación no. 84 de 1989 estableció un nuevo tipo de sistema goniométrico como el recomendado [43]: el sistema goniométrico de 3 ejes (Figura 2.2 (b)). En este tipo de sistema goniométrico el componente fotónico a caracterizar no se desplaza ni rota sobre sí mismo, mientras que usualmente el sensor se desplaza horizontalmente. En la actualidad convive el uso tanto de sistemas goniométricos de dos como de tres ejes. Este hecho es principalmente debido a que los sistemas de dos ejes son más baratos y sencillos de fabricar.

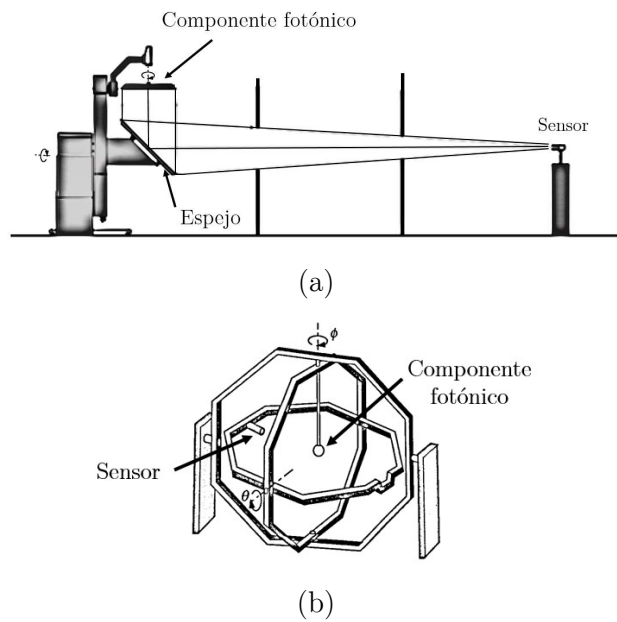


Figura 2.2 (a) Sistema goniométrico de tipo C de dos ejes que incluye un espejo. (b) Sistema goniométrico de 3 ejes. En este tipo de sistema goniométrico el componente fotónico a caracterizar no se desplaza ni rota sobre sí mismo, mientras que usualmente el sensor se desplaza horizontalmente. En la actualidad convive el uso tanto de sistemas goniométricos de dos como de tres ejes.

Pese al extendido uso de los sistemas goniométricos, todos comparten la característica de que el proceso de medida es lento. Debido a este hecho, recientemente, coincidiendo con los avances tecnológicos en los sensores de imagen (CCD y CMOS) se han propuesto nuevos sistemas para la caracterización y validación de sistemas fotónicos. El principal objetivo de estos sistemas es la implementación en contextos en que la rapidez de la validación tiene más relevancia que la precisión de la medida.

Sistemas formadores de imagen

Los sistemas formadores de imagen se basan en el discretizado en píxeles de los sensores para realizar la caracterización o validación de la funcionalidad óptica de los componentes fotónicos. La estructura general de este tipo de sistemas comprende un conjunto de

elementos ópticos, como difusores o lentes, que conducen el flujo emitido por el componente fotónico hacia los píxeles del sensor de imagen [44-58]. La Figura 2.3 muestra la estructura descrita.

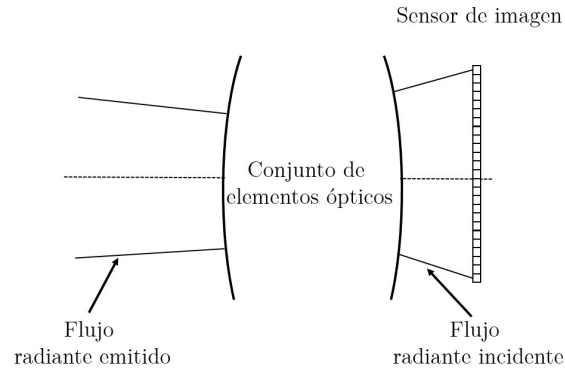


Figura 2.3 Estructura de los sistemas aplicados a la radiometría y a la fotómetría basados en formación de imagen. Estos sistemas se basan en el discretizado en píxeles de los sensores para realizar la caracterización o validación de la funcionalidad óptica de los componentes fotónicos. La estructura general de este tipo de sistemas comprende un conjunto de elementos ópticos, como difusores o lentes, que conducen el flujo emitido por el componente fotónico hacia los píxeles del sensor de imagen

A continuación, presentamos dos ejemplos concretos de este tipo de sistemas.

En [45] usan el objetivo de la cámara enfocado a infinito de tal modo que las posiciones de los píxeles correspondían a diferentes direcciones de propagación de la luz emitida por el componente fotónico, Figura 2.4 (a). Tal y como se destaca en la publicación, este sistema presentaba de forma inherente por su geometría un compromiso entre el rango dinámico de direcciones de propagación y la precisión de éstas.

En [58] utilizan una superficie difusora curvada de 2.5 m de diámetro colocada a 2 m del componente fotónico. De este modo, con el objetivo de la cámara enfocado en la superficie difusora, realizan una imagen de la distribución de irradiancia correspondiente al componente fotónico, Figura 2.4 (b). En la publicación destacan que son capaces de registrar la distribución de irradiancia del componente fotónico en tiempos del orden del segundo. Sin embargo, este sistema presenta un gran tamaño en lo que respecta a los conjuntos ópticos usados, en este caso la superficie difusora.

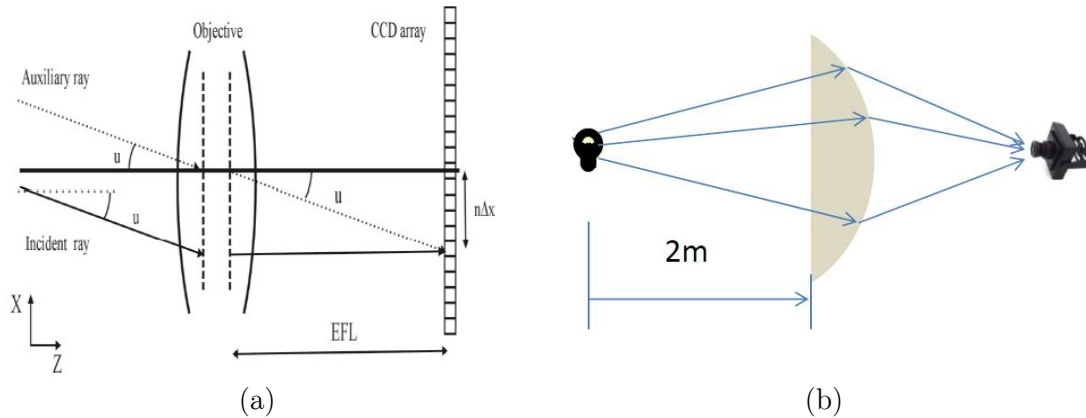


Figura 2.4 (a) Estructura del sistema radiométrico basado en formación de imagen utilizado en [45]. El objetivo de la cámara está enfocado a infinito de tal modo que las posiciones de los píxeles correspondían a diferentes direcciones de propagación de la luz emitida por el componente fotónico (b) Estructura del sistema radiométrico basado en formación de imagen utilizado en [58]. Se sitúa una superficie difusora curvada de 2.5 m de diámetro colocada a 2 m del componente fotónico. De este modo, con el objetivo de la cámara enfocado a la superficie difusora, realizan una imagen de la distribución de irradiancia sobre ésta correspondiente al componente fotónico

Finalmente, presentamos las condiciones de implementación de estos sistemas en la caracterización y validación de componentes fotónicos.

Caracterización de componentes

En general, en radiometría hay dos condiciones en las que se puede caracterizar o validar un componente fotónico: campo cercano y campo lejano. La frontera entre ambas condiciones no está estrictamente definida, pero se asume que si se realizan las medidas a una distancia 10 veces mayor que la dimensión mayor del componente se considera campo lejano. En las condiciones de campo lejano se asume que tanto el sensor como el componente son puntuales, lo que facilita el proceso de medida y el procesamiento de las medidas. En cambio, en campo cercano, esa asunción no puede aplicarse y tanto las dimensiones del sensor como las del componente deben considerarse.

La caracterización apropiada del campo cercano se realiza en dos ámbitos bien diferenciados. El primer ámbito es el del diseño de superficies ópticas. Si se consigue caracterizar correctamente el comportamiento de un componente en el régimen de campo cercano es posible reproducirlo correctamente en un entorno de simulación. En los entornos de simulación cuando se diseñan ópticas o reflectores, las superficies diseñadas se hallan en la zona que corresponde a campo cercano del componente [59-61]. Como consecuencia, contar con una buena reproducción de la fuente facilita el proceso de diseño. El segundo ámbito es el de la metrología. En muchas aplicaciones, las condiciones de la aplicación final de los componentes son de campo lejano. Sin embargo, el desarrollo de equipos de caracterización compactos y de bajo coste imponen que las dimensiones de estos establezcan el proceso de caracterización en el régimen de campo cercano. Para hacer compatibles

ambas realidades, se han hecho estudios que presentan en qué condiciones se pueden extraer las condiciones de campo lejano a partir de la caracterización en campo cercano [62-65].

Una de las aplicaciones que mejor ejemplifica el uso del campo cercano tanto en el ámbito del diseño [66-69] como en el ámbito de la metrología es la caracterización de faros en el sector automovilístico. La actual normativa europea de validación de faros [70] establece que las medidas de intensidad radiante deben llevarse a cabo montando el faro sobre un goniómetro de precisión a una distancia de 25 metros del sensor radiométrico. Como consecuencia, la validación solo puede llevarse a cabo en instalaciones muy específicas. Adicionalmente, si el faro no cumple la normativa debe modificarse para posteriormente repetir el proceso de validación. Con el objetivo de implementar una primera validación antes de realizar la validación normativa, se han desarrollado diferentes estrategias basadas en medir la distribución de intensidad radiante del faro en régimen de campo cercano [71-76].

Una vez presentado brevemente cual es el estado del arte de los sistemas de caracterización y validación de componentes fotónicos, presentaremos el estudio de mercado.

2.2. Estudio de Mercado

El estudio del mercado es una parte fundamental del estado del conocimiento de cualquier tesis doctoral industrial ya que esta tiene como objetivo realizar una aportación que tenga aplicación e impacto en la industria.

La presente sección está dividida en dos partes. En primer lugar, presentamos los sistemas comerciales relativos a validación y caracterización en línea de producción de componentes fotónicos. En segundo lugar, presentamos sistemas comerciales relativos a la validación y caracterización en el entorno del laboratorio. Para cada entorno, presentamos una breve compilación de patentes.

Sistemas de validación en línea

En el entorno de fabricación de componentes fotónicos los tiempos de producción son de pocos segundos por pieza [77]. En estas condiciones, debido a la pequeña ventana temporal de acción, los sistemas comerciales que existen son, principalmente, sistemas de validación que realizan la comparación directa de valores respecto a un elemento de referencia que se considera válido, y muy pocos son sistemas de caracterización, en los que se analiza la bondad del elemento a partir de los valores medidos, sin mediar el elemento de referencia.

Existen diversas empresas en el sector de sistemas de test en el entorno en línea, como Avera Technologies [78], Pruftechnik [79], Maxim Integrated [80], A.T.E Solutions [81] y Chroma ATE [82]. Estas empresas, adicionalmente a la venta de sus productos, ofrecen soluciones de test en línea personalizadas sobretudo en el ámbito de la mecánica, la

electrónica y software. Sin embargo, únicamente las dos últimas, A.T.E Solutions y Chroma ATE han desarrollado sistemas de validación en línea de componentes fotónicos.

ATE Solutions es una empresa especializada en diseñar y fabricar dispositivos automatizados de test, principalmente para la industria electrónica. En 2016 a petición de ASD Lighting PLC desarrolló un sistema para analizar el encendido y la temperatura de color correlacionada (CCT, por sus siglas en inglés) de LEDs montados en farolas, *Fully automated in-line test system for testing LED light engines* [83], Figura 2.5 (a). Este sistema consiste en una línea de automatizada que desplaza los componentes y un sistema de visión artificial. La cámara del sistema toma una imagen y el software es capaz de reconocer la posición de los componentes fotónicos individuales, detectando la ausencia de componente fotónico o que éste no emite suficiente flujo radiante, Figura 2.5 (b).



Figura 2.5 (a) *Fully automated in-line test system for testing LED light engines* desarrollado por ATE Solutions. Este sistema de validación in-línea de componentes fotónicos evalúa la ausencia o si el componente fotónico no emite suficiente flujo luminoso. (b) Aspecto del registro que evaluar el sistema de ATE Solutions, donde se indica mediante un círculo rojo que el componente fotónico no emite suficiente flujo luminoso.

Chroma A.T.E. es una empresa proveedora de dispositivos de medida y sistemas de test automático. Sus productos se aplican a diferentes sectores, aunque desarrollan productos principalmente para el sector electrónico, así como al de la iluminación. Actualmente tienen un test en línea de componentes fotónicos destinados a iluminación, modelo 58158-SC [84]. El modelo 58158-SC, Figura 2.6 (a) y (b), ofrece una medida del flujo luminoso total emitido, y parámetros prioritarios en los componentes aplicados a la iluminación como la temperatura de color correlacionada y el índice de reproducción cromática (CRI, por sus siglas en inglés).



Figura 2.6 (a) Vista del test en línea de componentes fotónicos destinados a iluminación, modelo 58158-SC desarrollado por Chroma A.T.E. Este modelo ofrece medidas del flujo luminoso total emitido, y parámetros prioritarios en los componentes aplicados a la iluminación como la temperatura de color correlacionada y el índice de reproducción cromática. (b) Ilustración donde se indica el modelo 58158-SC operando línea.

En concordancia al número de dispositivos que encontramos en el mercado, la cantidad de patentes en este ámbito es también reducida. En el estado de la técnica se encuentra, por ejemplo, invenciones que validan la calidad del patrón de irradiancia de un punto obtenido por la reflexión en una superficie de un haz de flujo radiante [85], en que se miden diferentes características del punto luminoso reflejado a grandes distancias.

Sistemas de validación y caracterización en el entorno de laboratorio

Hay un gran número de empresas que ofrecen productos radiométricos y fotométricos de uso en el entorno del laboratorio, como por ejemplo Labsphere, Inc. [86], TechnoTeam Holding GmbH [87], Everfine Corporation [88], Instruments Systems [89], International Light Technologies [90], Westboro Photonics [91].

De modo análogo respecto al estado del arte, los dispositivos que se usan en el entorno del laboratorio se pueden dividir en sistemas goniométricos y sistemas con sensor de imagen. En esta sección presentamos una breve selección.

Sistemas goniométricos

En el estado del arte hemos presentado que el hecho más destacable de los sistemas goniométricos es la exhaustividad de las medidas que presentan, a coste de un proceso de medida lento. Como ya hemos mostrado, los sistemas goniométricos de dos ejes comerciales están divididos en los diferentes planos de medida: A, B y C. La Figura 2.7 (a) presenta el modelo de goniofotómetro RiGO801 – 600 [92] fabricado por TechnoTeam Holding GmbH perteneciente a la familia RiGO801. Este modelo de goniofotómetro es de tipo C y tiene las siguientes dimensiones: $L \times W \times H = 2000 \times 1600 \times 2200 \text{ mm}^3$, una distancia de medida de 370 mm y una precisión angular menor a 0.05° para los dos ángulos de análisis. La Figura 2.7 (b) presenta el modelo de goniofotómetro: Type C Moving Mirror

Goniophotometer [93] de Labsphere. Este goniofotómetro es igualmente de tipo C pero incluye un espejo, a diferencia del modelo de TechnoTeam Holding GmbH. Este goniofotómetro tiene las dimensiones: $L \times W \times H = 4.3 \times 4.3 \times 2.5 \text{ m}^3$. Presenta una distancia al sensor de entre 7.6 m a 12.2 m debido a la presencia del espejo y una precisión angular de 0.01° .

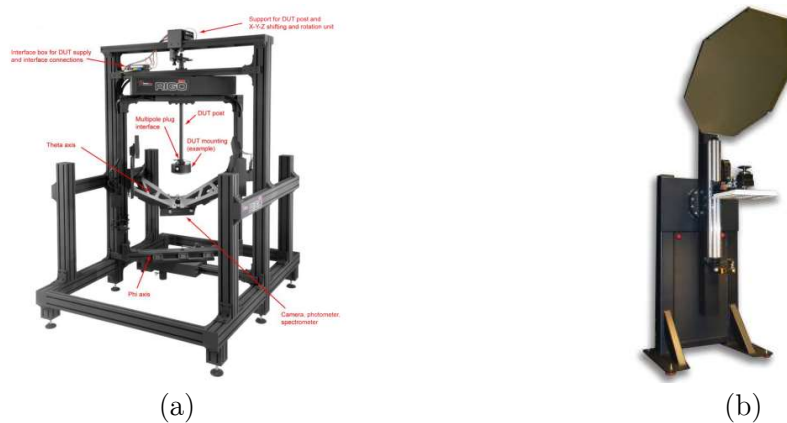


Figura 2.7 (a) Modelo de goniofotómetro RiGO801 – 600 fabricado por TechnoTeam Holding GmbH perteneciente a la familia RiGO801. Este modelo es de tipo C y sus dimensiones son: $L \times W \times H = 2000 \times 1600 \times 2200 \text{ mm}^3$, tiene una distancia de medida de 370 mm y una precisión angular menor a 0.05° para los dos ángulos de análisis. (b) Goniofotómetro modelo Type C Moving Mirror Goniophotometer de Labsphere. Este goniofotómetro incluye un espejo y sus dimensiones son $L \times W \times H = 4.3 \times 4.3 \times 2.5 \text{ m}^3$. Presenta una distancia al sensor de entre 7.6 m a 12.2 m debido a la presencia del espejo y una precisión angular de 0.01° .

Sistemas con sensor de imagen

Tal y como hemos mencionado en el estado del arte, los sistemas con sensor de imagen permiten realizar un gran número de medidas en una sola imagen. Para que esto sea posible todos ellos vienen acompañados de un software de procesamiento de imagen. La Figura 2.8 (a) presenta el modelo LumiCam 2400 Advanced [94] fabricado por Instruments Systems. Este modelo pertenece a la familia de fotómetros de sensor de imagen LumiCam. Esta familia de fotómetros, como cualquier sistema fotográfico, permiten adecuar el ángulo de visión, entre 5° y 15° utilizando objetivos de 28 mm, 50 mm y 100 mm de focal respectivamente. La aplicación específica para la que han sido desarrollados es la caracterización de la iluminancia de pantallas LCD.

La Figura 2.8 (b) presenta el modelo Conometer® 80 [95] fabricado por Westboro Photonics. Westboro Photonics cuenta con dos familias de fotómetros: Smart Series USB3 CMOS y P6E Series, que presentan prestaciones similares a la familia LumiCam de Instruments Systems. Sin embargo, el modelo Conometer® 80 es un fotómetro que presenta un ángulo de visión de 80° gracias a un sistema de lentes conoscópico con una resolución angular de 0.22° .



Figura 2.8 (a) Modelo de fotómetro LumiCam 2400 Advanced fabricado por Instruments Systems, permite adecuar el ángulo de visión, entre 5° y 15° , la aplicación específica para la que han sido desarrollados es la caracterización de la iluminancia de pantallas LCD. (b) Fotómetro modelo Conometer® 80 fabricado por Westboro Photonics, presenta un ángulo de visión de 80° gracias a un sistema de lentes conoscópico con una resolución angular de 0.22° .

Cabe destacar que en el campo de los sistemas radiométricos y fotométricos de uso en el laboratorio hay una gran variedad de patentes que protegen los diferentes productos presentados [96-100] a diferencia de lo que ocurre cuando se emplean en la línea de producción de componentes fotónicos.

Del estado del arte y del estudio de mercado realizado se pueden extraer dos grandes conclusiones. En primer lugar, observamos que no hay gran cantidad de sistemas que validen la funcionalidad óptica de componentes fotónicos para cualquier aplicación. Los sistemas que ofrecen ATE Solutions y Chroma ATE están claramente enfocados únicamente a sistemas de iluminación. En segundo lugar, observamos que, pese a que los sistemas goniométricos tienen gran precisión en la medida y están ampliamente consolidados en el entorno del laboratorio son los sistemas radiométricos de formación de imagen los que al final se eligen, en muchas ocasiones, por su reducido tamaño y la sencillez y rapidez del proceso de medida.

3. Estrategia de medida

3.1. Introducción

En el Capítulo 2 se han presentado diferentes estrategias de medida y dispositivos cuyo fin es validar la funcionalidad óptica de componentes fotónicos, tanto en el entorno de producción en línea como en el entorno del laboratorio. Nuestra estrategia de medida consta asimismo de dos partes claramente diferenciadas: el test óptico de validación llevado a cabo en el entorno en línea y el control óptico de calidad llevado a cabo en el entorno de laboratorio. Del mismo modo, cada parte tiene un objetivo claro y diferenciado. El test óptico de validación en línea tiene el objetivo de homologar la totalidad de los componentes en la misma línea de producción e identificarlos como válidos o como no válidos. El control óptico de calidad, implantado en el entorno del laboratorio, tiene el objetivo de determinar las distintas causas que originan el rechazo del componente fotónico por parte del test óptico de validación. Los componentes evaluados son conocidos nominalmente, tanto en su descripción geométrica, como en los materiales que los constituyen y en su funcionalidad óptica. Siempre se tiene por referencia la funcionalidad óptica nominal de los componentes analizados.

La estrategia de medida que mostramos en la presente tesis doctoral se ha diseñado para la validación de la funcionalidad óptica de un componente FOT (Fiber Optic Transceiver) fabricado mediante el nuevo método de fabricación desarrollado por SnellOptics™ y la UPC en consorcio con QPO™. Sin embargo, con el objetivo de mostrar la versatilidad de la estrategia de medida, ésta se ha implementado a componentes fotónicos con funcionalidades ópticas distintas.

El test óptico de validación en línea debe adaptarse al entorno en el que se fabrica el componente FOT, así su análisis y la determinación de si éste es válido o no debe llevarse dentro de una ventana de tiempo inferior a la del ciclo de fabricación del componente FOT y en consecuencia la geometría del dispositivo, los registros que se obtienen y las funciones de mérito del test óptico de validación en línea están condicionadas al entorno de producción.

El control óptico de calidad no está sujeto a las limitaciones de tiempo del test óptico de validación y determina los errores de fabricación que han provocado que el componente fotónico haya sido descartado al implementarse el test óptico de validación. El objetivo del control óptico de calidad es dar una respuesta más elaborada que la del test óptico de validación, como consecuencia, las funciones implementadas necesitan un tiempo de ejecución más elevado. Sin embargo, ni la geometría del dispositivo ni los registros que se obtienen varían drásticamente respecto al test óptico de validación. De hecho, la ventaja

de nuestra estrategia de medida reside en la simplicidad de implementación y en la similitud entre el test óptico de validación y el control óptico de calidad. La simplicidad de la estrategia permite que esta pueda adaptarse para ser implementada en componentes fotónico, más allá del componente FOT, que presenten funcionalidades ópticas diversas. Además, la similitud entre el dispositivo experimental del test óptico de validación y el del control óptico de calidad permiten comprobar la coherencia entre los resultados de ambas pruebas.

Como ya se ha mencionado, la estrategia de medida se ha implementado en diversos componentes, que serán presentados en el Capítulo 5, pero con el fin ejemplificar la descripción tanto del test óptico de validación como del control óptico de calidad se ha usado un componente fotónico teórico nominal sencillo y realista. Sencillo, para que pueda desarrollarse una descripción analítica de la implementación de la estrategia de medida. Realista, para que los resultados obtenidos muestren la capacidad de la estrategia de medida. Además, ejemplificar la implementación de la estrategia de medida nos permite presentar valores numéricos mientras se ilustran las diferentes implementaciones ésta.

El presente capítulo está estructurado en dos partes. En primer lugar, presentamos el test óptico de validación en línea, en él mostramos la geometría del test, las magnitudes radiométricas usadas en las condiciones de medida y ejemplificamos su implementación mediante el uso de un componente fotónico teórico nominal. En segundo lugar, presentamos el control óptico de calidad, argumentamos las modificaciones realizadas en el dispositivo respecto al test óptico de validación en línea y ejemplificamos su implementación usando el mismo componente fotónico teórico nominal.

3.2. Descripción test óptico en línea

Como ya se ha mencionado en la introducción de este capítulo, el test óptico en línea es una parte fundamental de la presente tesis, pues tiene por objeto garantizar la validez de todos los componentes fabricados en la misma línea de producción. El contexto en el que se lleva a cabo el test claramente marca la implementación de éste: debe ejecutarse dentro de una breve ventana de tiempo (del orden del segundo) y determinar, basándose en un único registro, si la funcionalidad del componente fotónico es válida o no.

En el presente apartado describimos la geometría implementada y el proceso de validación; funciones de mérito y criterios escogidos. Con el fin de ilustrar su aplicación, como ya hemos mencionado, aplicamos el test óptico a un componente fotónico teórico tipo y de radiancia conocida, al que se le han introducido las modificaciones oportunas para visualizar la implementación de las funciones de mérito.

3.2.1. Descripción de la geometría del test óptico en línea

Existen dos factores que condicionan las dimensiones del test óptico en línea: el entorno en el que se implementa y el dispositivo que quiere validarse. El primer factor es fácil entender ya que el entorno en línea impone ciertas limitaciones sobre la disposición y dimensiones de los elementos que forman el test. Respecto al segundo factor, debe considerarse que las propias dimensiones y condiciones de radiancia del componente también fijan límites. Como consecuencia, el test óptico en línea quedará definido cuando se compatibilicen ambos condicionantes.

La disposición de los elementos en el test óptico en línea que se muestran en la Figura 3.1 tiene por objeto recoger los patrones de irradiancia, sobre una superficie difusora, del elemento que se valida. Para ello a 89.5 mm de la base de sujeción del elemento fotónico a validar y paralela a la misma se ha colocado una superficie difusora circular de 125 mm de diámetro donde se recoge la distribución de irradiancia creada por el componente, permitiendo recoger el flujo radiante emitido en un semi-ángulo de alrededor de 35° .

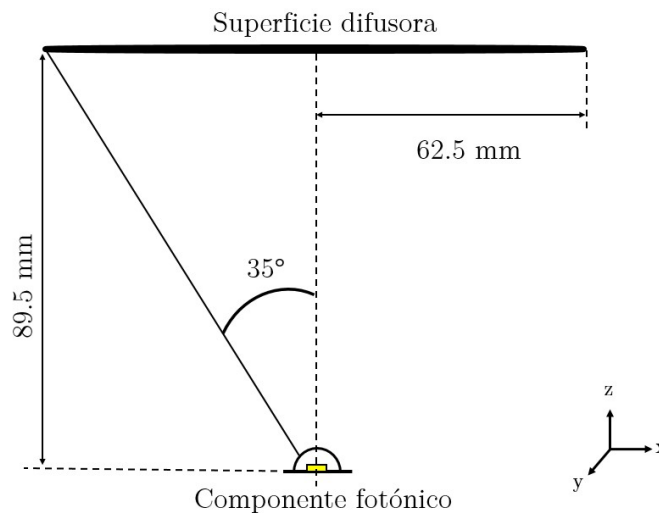


Figura 3.1 Geometría del test óptico de validación de la funcionalidad en línea. La superficie difusora donde se registra la irradiancia está situada a 89.5 mm de la base de sujeción de éste, paralela a la misma y tiene un radio de 62.5 mm. Esta disposición nos permite analizar un semi-ángulo de 35° de la emisión del componente fotónico aproximadamente.

En el montaje del test óptico en línea, la emitancia radiante de la superficie difusora se registra mediante una cámara monocroma que permite discriminar un total de 970×1294 píxeles. Si tomamos el valor mínimo (970 píxeles) para cubrir 175 mm (125 mm de diámetro de la superficie y 25 mm extras en cada sentido para asegurar el montaje mecánico) obtenemos una resolución espacial de 182 micras sobre la superficie difusora, que equivale a 0.12° de resolución angular desde la posición del componente fotónico.

3.2.2. Descripción del proceso de validación funcional

La presente subsección está dividida en tres partes. En primer lugar, presentaremos el componente fotónico teórico tipo que hemos elegido para ilustrar la aplicación del proceso de validación funcional en línea. En segundo lugar, resolveremos las relaciones radiométricas que sustentan la base radiométrica en que se basa nuestro test. Y, en tercer lugar, presentamos las funciones de mérito y los criterios de escogidos para el proceso de validación funcional en línea de la presente tesis doctoral.

3.2.2.1. Descripción del componente fotónico teórico tipo

La elección del componente fotónico teórico tipo se ha hecho en base a dos criterios con el fin de facilitar las comparaciones con los registros experimentales del capítulo 6: que éste posea una descripción matemática simple y que su dimensión y estructura sea cercana a un componente real.

El componente teórico tipo está constituido por una superficie cuadrada de emisión Lambertiana de $1 \times 1 \text{ mm}^2$ de área, encapsulada por una semiesfera de radio 1.275 mm e índice de refracción 1.5 . La Figura 3.2 muestra esquemáticamente la geometría del componente fotónico teórico tipo.

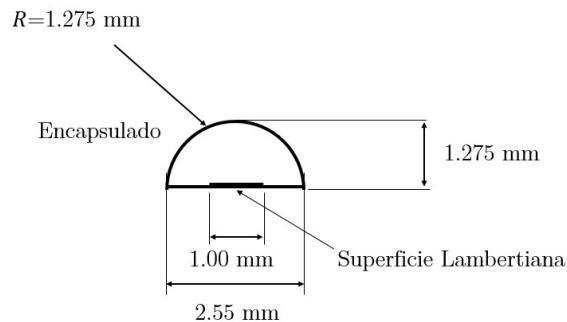


Figura 3.2 Descripción esquemática del componente fotónico teórico tipo usado para presentar las diversas funciones de mérito y criterios del test óptico de validación en línea. Éste está formado por una superficie cuadrada de emisión Lambertiana de $1 \times 1 \text{ mm}^2$ de área y encapsulado por una semiesfera de radio 1.275 mm e índice de refracción $n=1.5$.

A continuación, presentamos la solución de diferentes relaciones radiométricas de interés usando las propiedades de nuestro componente fotónico teórico tipo y la geometría de nuestro test óptico de validación en línea.

3.2.2.2. Relaciones radiométricas en las condiciones de medida del test óptico en línea

Tal y como presentamos en el Apéndice A, la transferencia de radiación en el vacío entre una superficie emisora y una superficie receptora puede describirse mediante la forma integral de la ecuación fundamental de transferencia de radiación:

$$\phi = \int_{s_0} \int_{a_0} L \frac{ds_0 \cos\theta da_0 \cos\psi}{R^2}, \quad (3.1)$$

donde θ es el ángulo que existe entre la dirección del flujo emergente de la superficie emisora con respecto a la normal de dicha superficie en un punto P , ds_0 es el elemento infinitesimal de área alrededor del punto P , da_0 es el elemento infinitesimal de área para un punto Q de la superficie receptora, ψ es el ángulo que existe entre la dirección del flujo incidente en la superficie receptora con respecto a la normal de dicha superficie en el punto Q , R es la distancia entre P y Q , L es la radiancia de la superficie emisora y ϕ es el flujo radiante recibido por la superficie receptora de área a_0 desde la superficie emisora de área s_0 . La Figura 3.3 muestra esquemáticamente los elementos presentados en la ecuación (3.1) dentro la geometría de nuestro test óptico de validación en línea.

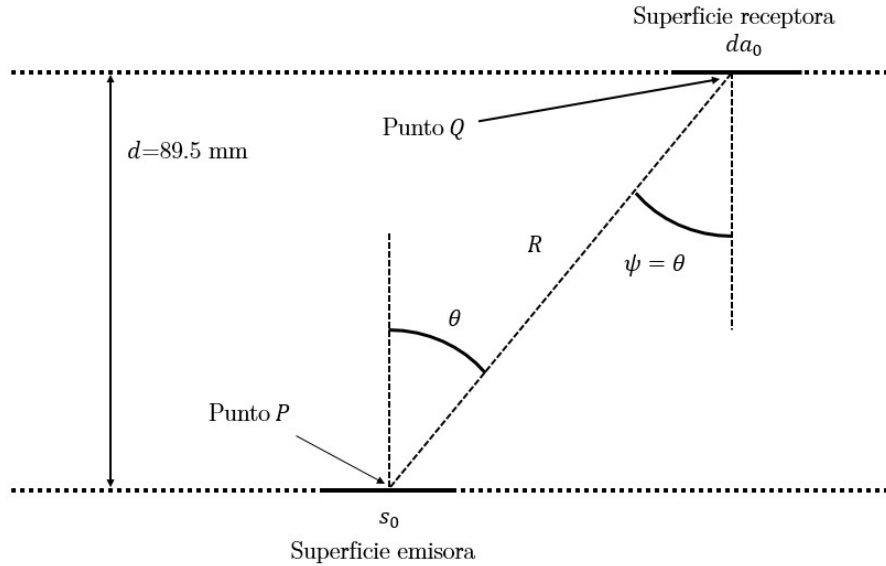


Figura 3.3 Configuración geométrica en que se muestran la superficie emisora, s_0 , y un píxel de la superficie receptora, da_0 , en el contexto de nuestro test óptico de validación en línea.

Como puede observarse en la Figura 3.3, en la disposición del test propuesta los ángulos ψ y θ coinciden ya que la superficie emisora es paralela a la superficie receptora.

Nuestro interés es hallar el valor de la irradiancia, E , en cada elemento infinitesimal de área, da_0 , (píxel) en la que se ha dividido la superficie difusora. Como hemos considerado

que la radiancia de la superficie, L , es constante (superficie con emisión Lambertiana) ésta puede salir de la integral en la ecuación (3.1). Si, además, elegimos resolver la ecuación para la irradiancia en vez de para el flujo radiante, la ecuación (3.1) adquiere la siguiente forma:

$$E = \frac{d\phi}{da_0} = L \int_{s_0} \frac{ds_0 \cos^2 \theta}{R^2}, \quad (3.2)$$

donde E es la irradiancia en cada uno de los elementos infinitesimales, da_0 , en los que se ha dividido la superficie difusora, esto es, los píxeles.

Analicemos ahora el peso de la superficie emisora en nuestro razonamiento. Si consideramos que la dimensión mayor de nuestra superficie, $\sqrt{s_0}$, es del orden de 1 mm, mientras que la distancia, R , es del orden de $d = 89.5$ mm (distancia axial entre el componente fotónico y la superficie difusora) podemos asumir que los términos R^2 y $\cos\theta$ no varían apreciablemente a lo largo del rango de integración (área de la superficie emisora) y en consecuencia los consideramos constantes. La Figura 3.4 muestra esquemáticamente la situación. La justificación de esta asunción la realizamos a continuación.

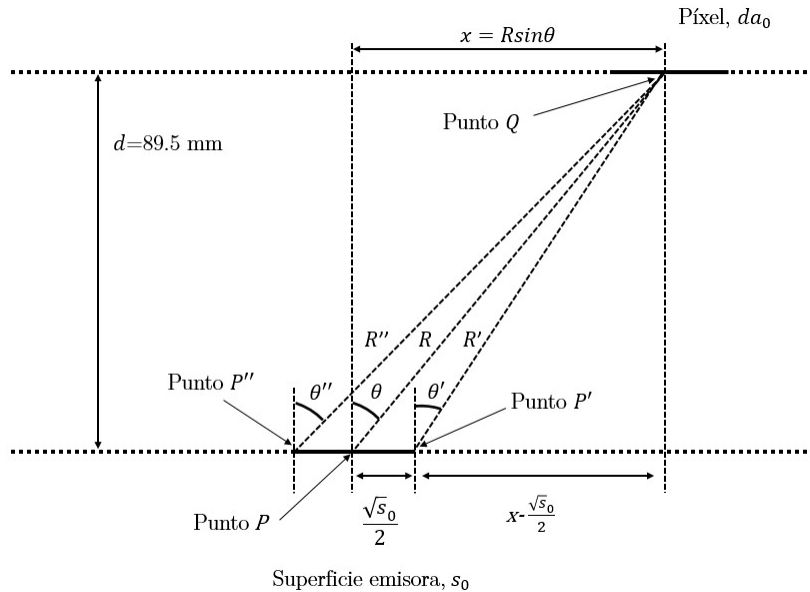


Figura 3.4 Relaciones geométricas existentes entre R y θ correspondientes al punto central de la superficie emisora s_0 , P ; R' y θ' correspondientes al punto extremo P' y R'' y θ'' correspondientes al punto extremo P'' .

De la Figura 3.4 se obtienen las relaciones:

$$\left(R\sin\theta - \frac{\sqrt{S_0}}{2}\right)^2 + d^2 = R'^2, \quad (3.3)$$

$$\left(R\sin\theta + \frac{\sqrt{S_0}}{2}\right)^2 + d^2 = R''^2, \quad (3.4)$$

$$d = R\cos\theta = R'\cos\theta' = R''\cos\theta''. \quad (3.5)$$

Donde R , θ son los parámetros ya mencionados mientras que R' es la distancia entre un extremo de la superficie emisora, P' , y el punto Q , centro del elemento infinitesimal de área, da_0 y θ' es el ángulo que existe entre la dirección del flujo emergente de la superficie emisora con respecto a la normal de dicha superficie en el punto P' . Del mismo modo, R'' es la distancia entre el otro extremo de la superficie emisora, P'' , y el punto Q , y θ'' es el ángulo que existe entre la dirección del flujo emergente de la superficie emisora con respecto a la normal de dicha superficie en el punto P'' .

Con el fin de evaluar el impacto de considerar puntual la superficie emisora en la ecuación (3.2), esto es: considerar constantes R^2 y $\cos\theta$, veamos cual sería la variación del término $\frac{\cos\theta^2}{R^2}$ de la ecuación (3.2) si empleamos los valores extremos (θ', R') y (θ'', R'') en lugar de los valores definidos por el punto central (θ, R) . Para ello emplearemos los términos $\Delta' = \frac{\cos^2\theta R'^2}{R^2\cos^2\theta'}$ y $\Delta'' = \frac{\cos^2\theta R''^2}{R^2\cos^2\theta''}$ para los casos: $\theta = 0^\circ$ y $\theta = 35^\circ$, que son los ángulos mínimos y máximos que analiza nuestro test óptico, ver Tabla 3.1.

	Caso 1 ($\theta = 0^\circ$)	Caso 2 ($\theta = 35^\circ$)
$\cos\theta$	1.00000	0.86602
$\cos\theta'$	0.99998	0.82140
$\cos\theta''$	0.99998	0.81690
R (mm)	85.500	104.376
R' (mm)	85.501	104.090
R'' (mm)	85.501	104.664
$\Delta' = \frac{\cos^2\theta R'^2}{R^2\cos^2\theta'}$	1.00005	0.99180
$\Delta'' = \frac{\cos^2\theta R''^2}{R^2\cos^2\theta''}$	1.00005	1.00829

Tabla 3.1 Valores de las magnitudes $(\cos\theta, \cos\theta', \cos\theta'')$, (R^2, R'^2, R''^2) y (Δ', Δ'') en función de θ .

En la Tabla 3.1 se han empleado las cantidades Δ' y Δ'' , como la variación del término $\frac{\cos\theta^2}{R^2}$ para los puntos P' y P'' respecto al punto P . En el caso, ideal, en que los términos fuesen constantes, se obtendría $\Delta' = \Delta'' = 1$. En el primer caso, ($\theta = 0^\circ$), obtenemos un

3. ESTRATEGIA DE MEDIDA

valor de las variaciones, $\Delta' = \Delta'' = 1.00005$, lo que supone una desviación del 0.05% respecto al caso ideal. En el segundo caso, ($\theta = 35^\circ$), obtenemos los siguientes valores para la variaciones, $\Delta' = 0.99180$ y $\Delta'' = 1.00829$, lo que supone una desviación del 0.82% y 0.83% respectivamente respecto al caso ideal. Como consecuencia, podemos afirmar que el error asociado a considerar constante el término $\frac{\cos\theta}{R^2}$ en el peor de los casos, ($\theta = 35^\circ$), es menor al 1%, disminuyendo hasta el 0.05% para el caso más favorable ($\theta = 0^\circ$). Usando este razonamiento, simplificamos la ecuación (3.2):

$$E \approx \frac{Ls_0 \cos^2 \theta}{R^2}. \quad (3.6)$$

Adicionalmente, si, como se presenta la Figura 3.5, $R = \frac{d}{\cos\theta}$, obtenemos:

$$E \approx \frac{Ls_0 \cos^4 \theta}{d^2}. \quad (3.7)$$

La ecuación (3.7) ya podría usarse como expresión para encontrar la irradiancia, E , en cada uno de los píxeles en los que se ha dividido nuestra superficie difusora. Sin embargo, cuando se especifica la funcionalidad de una fuente de luz en el entorno industrial usualmente se emplea el flujo radiante total, ϕ , en función de la corriente eléctrica. Por este motivo, expresaremos la irradiancia en función del flujo radiante en vez de respecto a su radiancia. Para ello, usamos la expresión de la radiancia de una fuente (Apéndice A):

$$L = \frac{d^2\phi}{d\omega ds} = \frac{d^2\phi}{d\omega ds_0 \cos\theta}, \quad (3.8)$$

donde $ds = ds_0 \cos\theta$ es el área infinitesimal alrededor del punto de estudio, ds_0 , proyectada en la dirección de propagación de la radiación en un plano normal a ésta, $d\omega$ es el elemento infinitesimal de ángulo sólido en la dirección de propagación dada y θ es el ángulo que forman la dirección de propagación y la normal de la superficie en el punto de estudio (ver Figura 3.5).

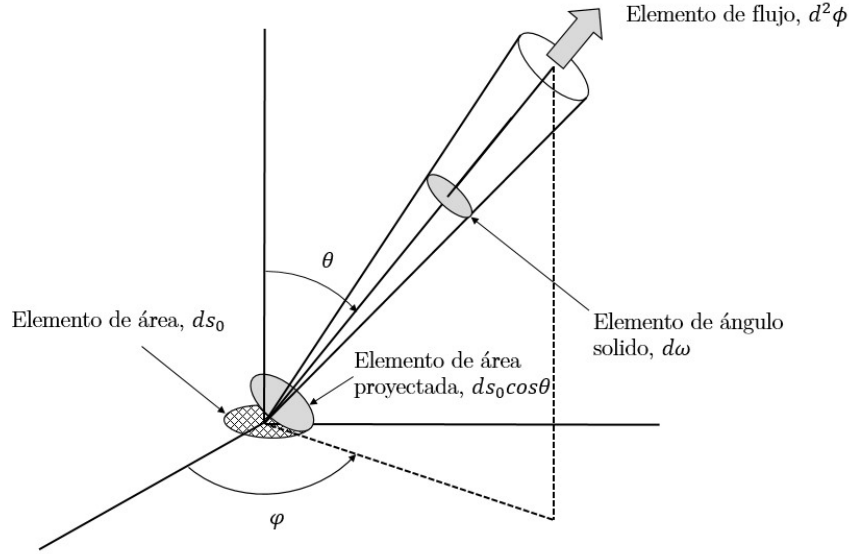


Figura 3.5 Geometría, expresada en coordenadas esféricas, empleada para definir la radiancia, en función del elemento de flujo emitido en una dirección dada.

Integrando la ecuación (3.8) y aislando ϕ , obtenemos:

$$\phi = \int_{s_0} \int_{\Omega} L \cos\theta d\omega ds_0. \quad (3.9)$$

Donde Ω es el ángulo solido dentro del cual la fuente emite radiación. Dado que nuestra fuente es Lambertiana, L es una constante y puede salir del proceso de integración. En estas condiciones si expresamos el diferencial de ángulo sólido en coordenadas esféricas, $d\omega = \sin\theta d\theta d\phi$, tenemos:

$$\int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta \sin\theta d\theta = \pi. \quad (3.10)$$

El ángulo θ se integra hasta $\frac{\pi}{2}$ ya que consideramos que nuestra fuente emite el flujo radiante dentro de un hemisferio. La integral relativa al área de la fuente tiene la siguiente solución trivial:

$$\int_{s_0} ds_0 = s_0. \quad (3.11)$$

De este modo $\phi = Ls_0\pi$. Sustituyendo esta expresión en la ecuación (3.7), encontramos, finalmente:

$$E \approx \frac{\phi \cos^4 \theta}{\pi d^2}. \quad (3.12)$$

En nuestro caso $\phi = 1 \text{ W}$.

3.2.2.3. Implementación del test óptico en línea

En la presente subsección mostramos como, a partir de los registros de irradiancia sobre la superficie difusora, generamos las funciones de mérito y los criterios de aceptación para llevar a cabo la validación funcional. A lo largo de la exposición emplearemos el componente fotónico teórico tipo como ejemplo. La validación está constituida por dos grupos de funciones de mérito y sus respectivos criterios; un criterio energético, en nuestro ejemplo en base al flujo radiante total en el plano del difusor y un criterio de forma, en nuestro caso, a partir de la posición del máximo de la distribución y la simetría de ésta.

Ya que la validación funcionalidad está vinculada a cada componente fotónico concreto, en el Capítulo 6 presentamos las funciones de mérito y criterios de aceptación aplicados para cada caso, siempre tomando el registro nominal como referencia.

A continuación, presentamos el registro nominal de nuestro componente fotónico nominal teórico tipo, hallado mediante simulación numérica para la que hemos empleado el programa de diseño óptico ZemaxTM. La Figura 3.6 (a) muestra un esquema del test óptico de validación en línea, la Figura 3.6 (b) muestra su distribución de irradiancia sobre la superficie del difusor en escala de grises, y la Figura 3.6 (c) presenta el corte horizontal que contiene el máximo de la distribución de irradiancia ajustado a la función $f(\theta) = A \cdot \cos^4 \theta$. A pesar de que nuestro componente fotónico teórico tipo está formado por una superficie de emisión Lambertiana embebida en una cúpula de índice de refracción 1.5, su distribución de irradiancia es la de forma $f(\theta) = A \cdot \cos^4 \theta$ y como consecuencia puede considerarse aproximadamente Lambertiana, ecuación (3.12).

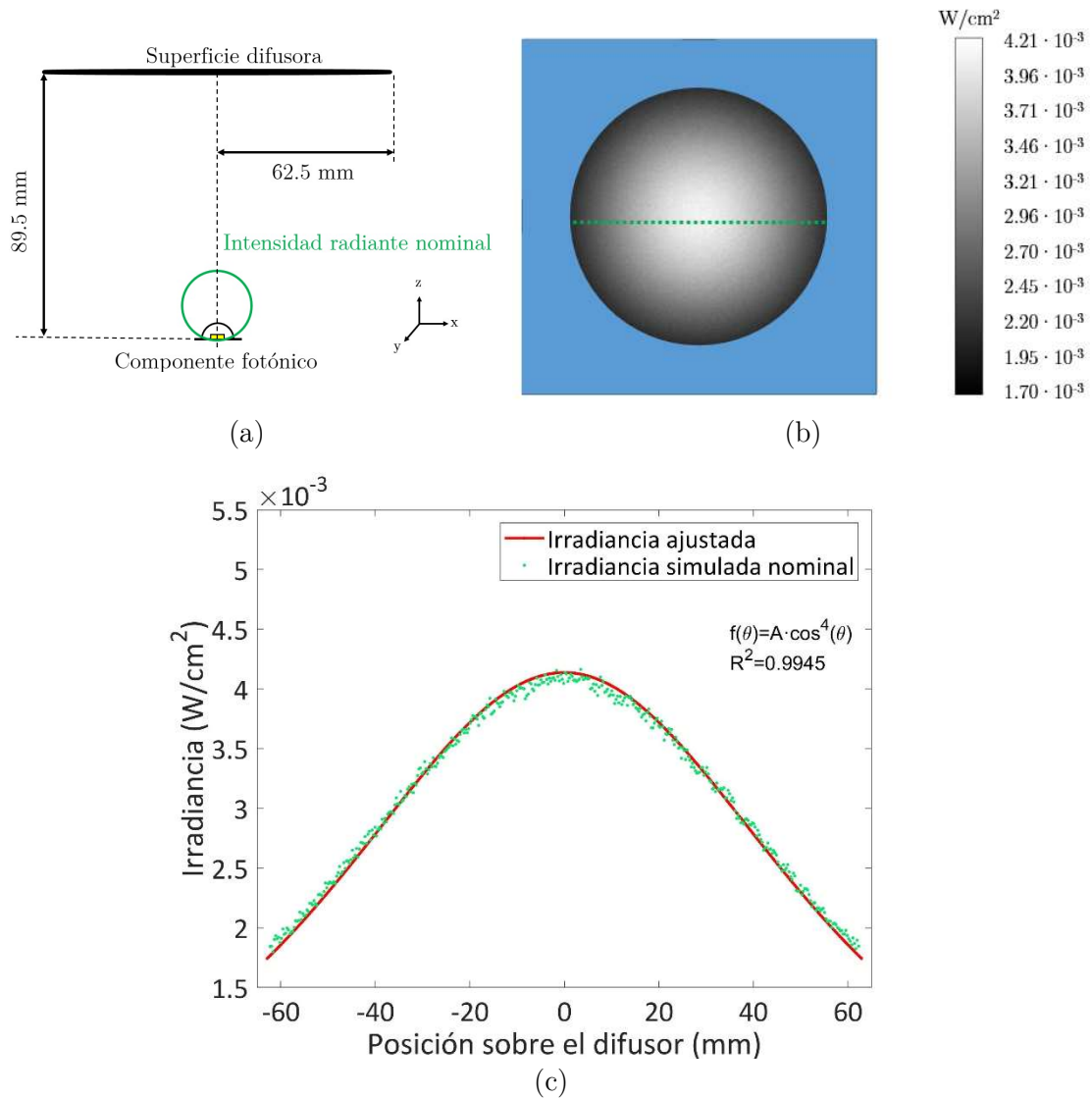


Figura 3.6 (a) Representación esquemática de la geometría del test óptico de validación en línea. (b) Registro nominal simulado del componente fotónico teórico tipo que usamos para ejemplificar la aplicación del test óptico de validación en línea, dimensión del marco $150 \times 150 \text{ mm}^2$. (c) Ajuste del corte horizontal de irradiancia (línea roja) que presenta el registro nominal simulado (puntos verdes).

Una vez hemos presentado la distribución de irradiancia nominal del componente fotónico teórico tipo estamos en condiciones de presentar las funciones de mérito y sus criterios de aceptación asociados.

I. 1ª Función de mérito y criterio de aceptación asociado: flujo radiante total en el plano del difusor

El objetivo que tiene la primera función de mérito es descartar los componentes que, por diversos motivos, emiten un flujo radiante excesivo o insuficiente dentro de la ventana angular de 35° que fija nuestro sistema de validación en línea.

La función de mérito asociada a este primer criterio se puede expresar como la diferencia, en valor absoluto, entre el flujo radiante nominal y el flujo radiante en la superficie difusora. El criterio de aceptación para considerar válido el componente fotónico se ha fijado para una variación de la función de mérito menor del 15% respecto al valor del flujo radiante nominal. La expresión matemática del criterio es la siguiente:

$$abs\left(\sum_{i=1}^N REp_i - \sum_{i=1}^N RNp_i\right) < 0.15\left(\sum_{i=1}^N RNp_i\right) \Rightarrow \text{Válido}, \quad (3.13)$$

donde *abs* es el operador valor absoluto, *i* es el índice del sumatorio, que se extiende desde el primer hasta el último píxel del registro, *N*, sobre la superficie difusora; *REp* es el valor del flujo en los diferentes píxeles del registro a evaluar y *RNp* es el valor del flujo en los diferentes píxeles del registro nominal.

Para la ejemplificación de este criterio hemos usando nuestro componente fotónico teórico tipo modificando el radio de la encapsulación epoxy de su valor nominal, $r = 1.275$ mm, a un nuevo valor de radio de la encapsulación, $r = 2$ mm. La Figura 3.7 (a) muestra el esquema del test óptico de validación en línea y las distribuciones de intensidad radiante del componente nominal y del componente a evaluar. La Figura 3.7 (b) muestra los cortes horizontales centrales de los registros de las distribuciones de irradiancia sobre la superficie difusora para el componente nominal y el componente a evaluar. La Figura 3.7 (c) muestra la distribución de irradiancia sobre la superficie difusora del componente nominal y la Figura 3.7 (d) muestra la distribución de irradiancia sobre la superficie difusora del componente a evaluar.

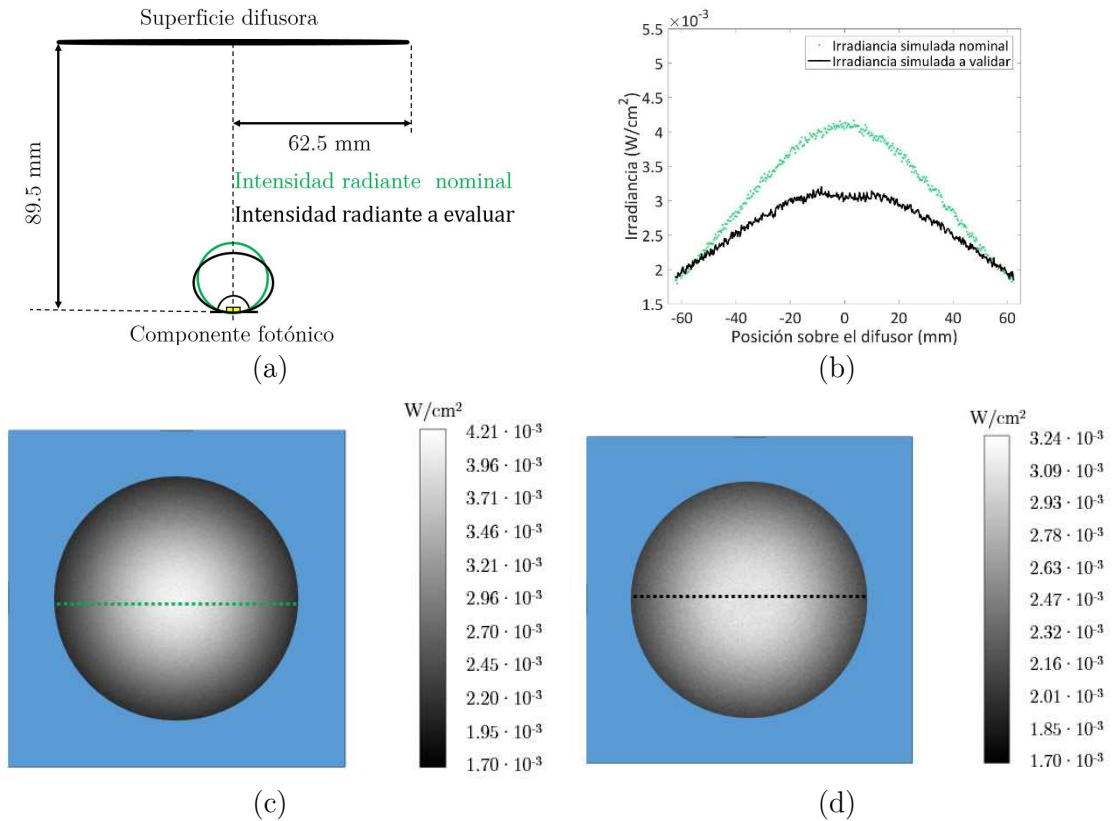


Figura 3.7 (a) Representación esquemática de la geometría del test óptico de validación en línea, así como la de intensidad radiante nominal y la intensidad radiante a validar. (b) Cortes horizontales de los registros nominales y a validar. (c) Registro nominal simulado de la distribución de irradiancia del componente fotónico teórico tipo nominal, dimensión del marco $150 \times 150 \text{ mm}^2$. (d) Registro simulado de la distribución de irradiancia asociada al componente fotónico teórico tipo a evaluar, dimensión del marco $150 \times 150 \text{ mm}^2$.

Para el caso con el que hemos decidido ejemplificar la primera función de mérito y su correspondiente criterio, el valor de flujo recibido en la superficie difusora del test óptico en línea es de $3.35 \cdot 10^{-1} \text{ W}$ para el registro nominal y de $3.00 \cdot 10^{-1} \text{ W}$ para el registro a validar. Dado que, según el criterio, la desviación del registro a evaluar debe ser menor al 15% del flujo total en el registro nominal, $0.50 \cdot 10^{-1} \text{ W}$, obtenemos que el componente fotónico a evaluar es considerado apto.

II. 2ª Función de mérito y criterio de aceptación asociado: Forma de la distribución de irradiancia

El objetivo que tiene la segunda función de mérito es descartar los componentes cuya distribución de irradiancia presente variaciones en la forma respecto a la distribución de irradiancia del componente teórico tipo nominal.

Esta segunda función de mérito está asociada intrínsecamente a la detección simultánea de la posición del máximo de irradiancia en el plano del difusor y de la falta de simetría de rotación de la distribución de irradiancia. No podemos emplear una función de mérito que únicamente emplee la posición del máximo de irradiancia ya que un desplazamiento puro del componente fotónico implicaría un desplazamiento de la posición del máximo y el componente seguiría siendo válido. Al vincular la posición del máximo con la excentricidad presente en la distribución de irradiancia, la función de mérito distingue entre un desplazamiento puro y un cambio en la dirección de emisión del componente.

La función de mérito propuesta es la siguiente. En primer lugar, determinamos el máximo del registro de la distribución de irradiancia sobre el plano de la superficie difusora. En segundo lugar, tomando como referencia el valor del máximo, seleccionamos aquellos píxeles que tengan valores que permitan formar una región anular alrededor del máximo y, en tercer y último lugar, calcularemos la excentricidad de la elipse de mejor ajuste al conjunto de píxeles que forman la región anular empleando el método de mínimos cuadrados [101]. El método de los mínimos cuadrados es muy usado en sistemas sobredeterminados. Es decir, en casos en que tenemos un gran número de variables, en este caso las coordenadas de los píxeles, y queremos determinar un pequeño número de parámetros, en este caso los semidiámetros de la elipse.

Junto a esta función de mérito emplearemos dos criterios para validar el componente: el primero para seleccionar el área de píxeles que formarán la región anular y el segundo para considerar válido no válido el componente en función del valor de la excentricidad de la elipse ajustada.

El criterio elegido para determinar la región anular ha sido seleccionar aquellos píxeles que presenten niveles de flujo radiante entre el 67.5% y el 72.5 % del valor del máximo y descartar el resto. En formato de ecuación:

$$\begin{aligned} 0.675 \cdot p_{max} < p_i < 0.725 \cdot p_{max} &\Rightarrow p_i = p_i, \\ 0.675 \cdot p_{max} > p_i \vee p_i > 0.725 \cdot p_{max} &\Rightarrow p_i = 0, \end{aligned} \quad (3.14)$$

donde p_{max} es el valor del máximo del flujo radiante en los píxeles y p_i es el valor del flujo radiante en el píxel i . Tal y como se observa en la ecuación (3.14) el criterio de selección establece que el valor del píxel debe estar entre el 67.5% y el 72.5 % del valor del máximo. Una vez seleccionados los píxeles de la zona anular podemos realizar la tercera operación de la función de mérito, el ajuste de los valores de los parámetros de la ecuación de la elipse mediante el método de los mínimos cuadrados. La expresión de la elipse utilizada es la de la ecuación (3.15):

$$\frac{(x_i - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y_i - y_0)^2}{b^2} = 1, \quad (3.15)$$

donde, x_i , e y_i , y son las coordenadas del píxel i de la región anular seleccionada, x_0 , e y_0 son las coordenadas del píxel que presenta el máximo flujo radiante y, por último, a y b son los semiejes de la elipse. En el proceso de ajuste estamos interesados en encontrar a , y b .

El método de los mínimos cuadrados encuentra la solución que presenta un mínimo residuo cuadrático. En notación matricial, el sistema de ecuaciones lineales que queremos resolver se puede expresar de la siguiente forma:

$$\hat{A}\vec{x} = \vec{b} + \vec{\epsilon}, \quad (3.16)$$

dónde \hat{A} es una matriz $m \times n$ con $m \gg n$, siendo m del orden varias centenas y $n = 2$, \vec{x} es el vector que contiene los parámetros que queremos determinar, \vec{b} es un vector de dimensiones $m \times 1$ y $\vec{\epsilon}$, el vector residuo, es consecuencia de que los píxeles no definen una elipse perfecta. La solución al problema es la que minimiza la norma al cuadrado del vector residuo, $\vec{\epsilon}$, esto es, el residuo al cuadrado:

$$\|\vec{\epsilon}\|^2 = \|\hat{A}\vec{x} - \vec{b}\|^2. \quad (3.17)$$

La ecuación (3.15) se puede reescribir en forma matricial como sigue

$$\begin{pmatrix} (x_i - x_0)^2 & (y_i - y_0)^2 \\ \vdots & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{a^2} \\ 1 \\ \frac{1}{b^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \end{pmatrix}, \quad (3.18)$$

con las siguientes equivalencias:

$$\begin{cases} \hat{A} = \begin{pmatrix} (x_i - x_0)^2 & (y_i - y_0)^2 \\ \vdots & \vdots \end{pmatrix}, \\ \vec{x} = \begin{pmatrix} \frac{1}{a^2} \\ 1 \\ \frac{1}{b^2} \end{pmatrix}, \\ \vec{b} = \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \end{pmatrix}. \end{cases} \quad (3.19)$$

Finalmente, puede demostrarse [102] que el vector \vec{x} que minimiza $\|\vec{\epsilon}\|^2$ viene dado por la expresión:

$$\vec{x} = (\hat{A}^T \hat{A})^{-1} \hat{A}^T \vec{b}. \quad (3.20)$$

Una vez encontrados a y b , en el caso en que $b < a$ calculamos el valor de la excentricidad, ϵ , mediante la ecuación (3.21):

$$\epsilon = \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (3.21)$$

Finalmente, presentamos el criterio sobre la excentricidad. En nuestro ejemplo hemos considerado válidos los componentes cuya excentricidad, no supere 2 veces el valor de excentricidad para el componente fotónico nominal tipo, ecuación (3.22):

$$\epsilon_e < 2 \epsilon_n \Rightarrow \text{Válido}, \quad (3.22)$$

donde ϵ_n es la excentricidad en el registro nominal y ϵ_e es la excentricidad en el registro a evaluar.

Cabe destacar que para distintos componentes fotónicos dichos criterios podrán tener valores distintos e, incluso, dependiendo de las especificaciones demandadas deberán construirse funciones de mérito y criterios concretos para dichos componentes.

Para ilustrar la implementación de la función de mérito asociada a la forma de la distribución de irradiancia hemos introducido una desviación angular en la dirección de emisión de flujo radiante de nuestro componente fotónico tipo. Dicha desviación es consecuencia de un desplazamiento de 0.3 mm de la superficie del encapsulado respecto a la posición nominal. La Figura 3.8 (a) muestra el esquema del test óptico de validación en línea y las distribuciones de intensidad radiante del componente nominal y del componente a evaluar. La Figura 3.8 (b) muestra la distribución de irradiancia sobre la superficie difusora del componente nominal, donde se han indicado los cortes que pasan por el máximo de la distribución. La Figura 3.8 (c) muestra la distribución de irradiancia sobre la superficie difusora del componente a evaluar, indicando también los cortes que pasan por el máximo de la distribución. La Figura 3.8 (d) muestra los cortes horizontales que pasan por el máximo de los registros a evaluar y nominal. En esta última, se observa claramente como el máximo del registro a evaluar presenta un desplazamiento respecto al nominal. Finalmente, la Figura 3.8 (e) muestra los cortes verticales que pasan por el máximo de los registros a evaluar y nominal.

Con el objetivo de una mejor visualización de cómo se implementa la función de mérito descrita y su criterio, presentamos adicionalmente la Figura 3.9. Ésta muestra, para cada registro, los píxeles que forman la zona anular después de aplicar la primera operación de la función de mérito y el criterio seleccionado, ecuación (3.14), para el registro nominal, Figura 3.9 (a), y para el registro a validar, Figura 3.9 (b).

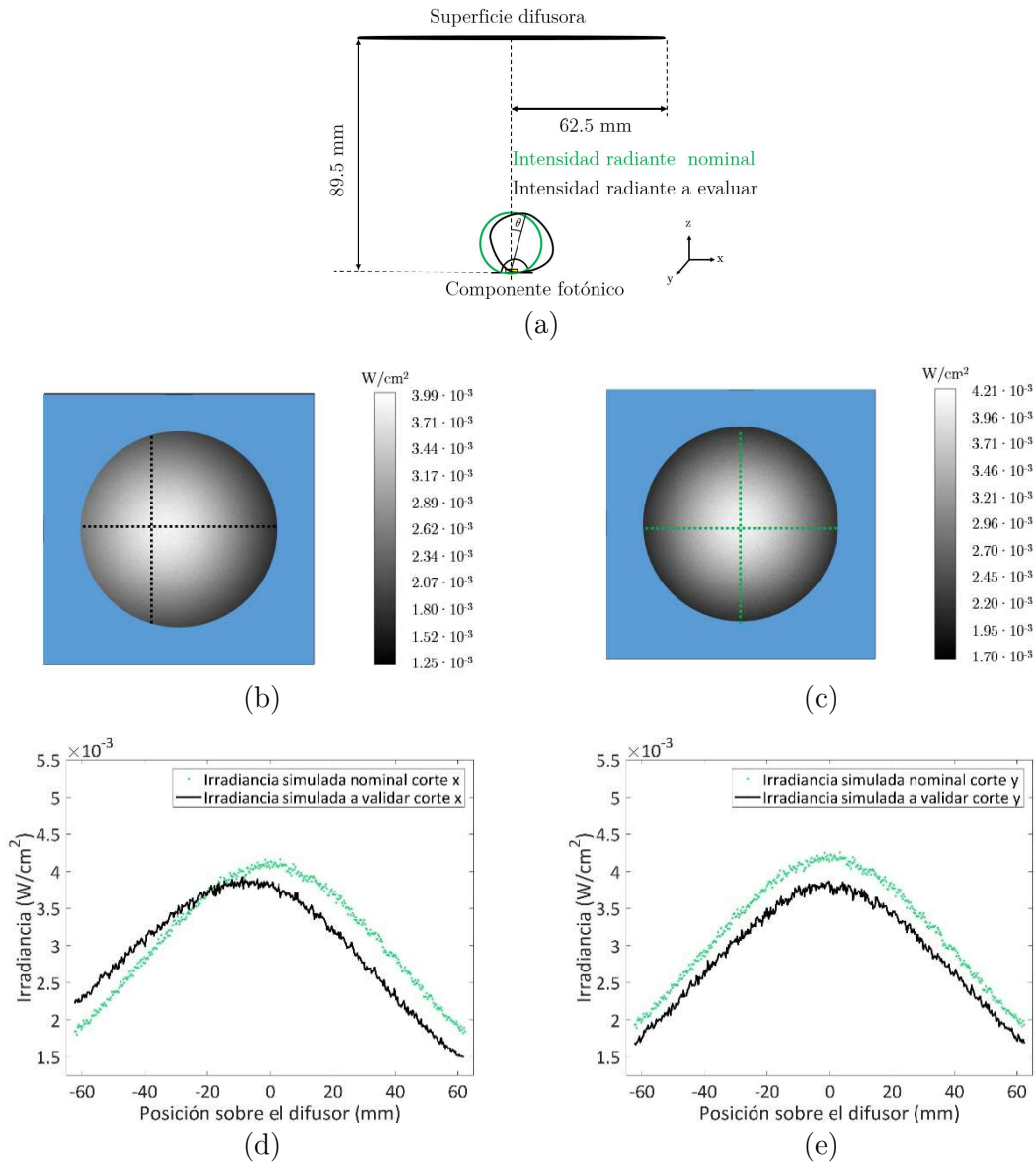


Figura 3.8 (a) Representación esquemática de la geometría del test óptico de validación en línea, así como la de intensidad radiante nominal y la intensidad radiante a validar. (b) Registro nominal simulado de la distribución de irradiancia del componente tipo nominal, dimensión del marco 150x150 mm². (c) Registro simulado de la distribución de irradiancia asociada al componente fotónico tipo a evaluar, dimensión del marco 150x150 mm². (d) Cortes horizontales de los registros nominales y a validar (e) Cortes verticales de los registros nominales y a validar.

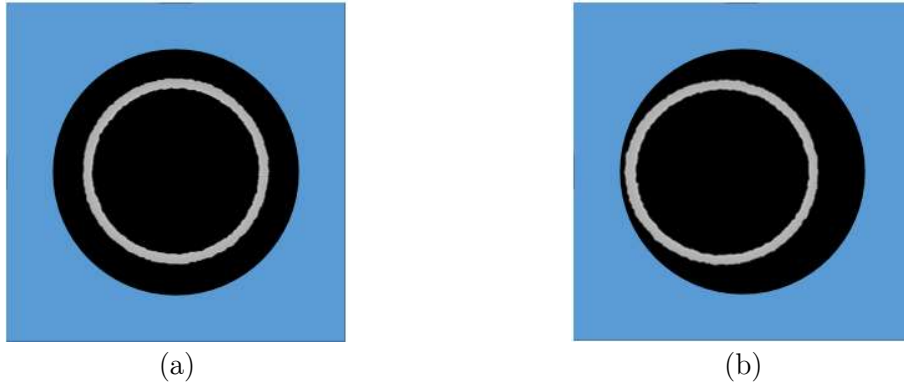


Figura 3.9 Zonas anulares seleccionadas mediante la ecuación (3.13). (a) Registro nominal. (b) Registro a validar.

Así pues, en nuestro ejemplo, al realizar el ajuste de la mejor elipse a las coordenadas de los píxeles de la zona anular, encontramos los valores de a y b , para el registro nominal y el registro a validar. Para el registro nominal obtenemos $(a_n, b_n) = (131.39, 130.39)$ píxeles, mientras que para el registro a evaluar obtenemos $(a_e, b_e) = (136.82, 130.74)$ píxeles. Usando la ecuación (3.21) obtenemos el valor de las excentricidades $\epsilon_n=0.12$ y $\epsilon_e=0.29$. Finalmente estamos en condiciones de aplicar el criterio de validez, en nuestro ejemplo el proporcionado por la ecuación (3.22), $\epsilon_e < 2\epsilon_n$, que para nuestro ejemplo nos determinar que el componente fotónico es válido si su excentricidad es inferior a 0.24, ya que el componente tipo a validar usado para ilustrar presenta un valor de excentricidad de $\epsilon_v=0.29$ consideraremos el componente no válido.

La aplicación de las funciones de mérito y los criterios relacionados mencionados aseguran la validez del componente fotónico, ya que las funciones están construidas a partir de la funcionalidad óptica del componente fotónico nominal. Sin embargo, ni la configuración del test ni los criterios descritos ofrecen ningún tipo de información acerca de los errores que han provocado el descarte de los componentes no válidos. Por este motivo, con el fin de completar el proceso de validación es necesario implementar un control óptico de calidad que dé una primera respuesta acerca del origen de los defectos en la distribución de irradiancia registrada durante el proceso en línea.

La estrategia que proponemos como control óptico de calidad en el entorno de laboratorio tiene el valor de, siendo cercana al test óptico de validación en línea ofrecer un primer paquete de información capaz de proporcionar conocimiento acerca de los orígenes de los defectos que han provocado el rechazo del componente.

3.3. Descripción del control óptico de calidad

El control óptico de calidad se implementa en el entorno de laboratorio. Como ya se ha mencionado, éste tiene como objetivo proporcionar información sobre las posibles causas que han provocado que los componentes fotónicos no hayan sido calificados como válidos en el test óptico en línea. El control óptico de calidad requiere tiempos de implementación

superiores a un ciclo de producción, por lo que, tal como se ha mencionado, su implementación está pensada para que sea llevada a cabo por un operario cualificado.

La implementación del control óptico de calidad se ha diseñado de forma que pueda medir componentes con patrones de distribuciones de intensidad radiante muy diversos y para ello se ha optado por realizarlo con dos configuraciones distintas. La primera configuración analiza el flujo radiante emitido en la misma ventana angular que el test óptico en línea, esto es, un semiángulo menor de 35° , ($\theta < 35^\circ$) y está pensado para aquellos componentes fotónicos que emitiendo dentro de esta ventana angular no hayan sido considerados válidos por el test óptico en línea. La segunda configuración analiza el flujo radiante emitido por el componente fotónico en un semiángulo entre 35° y 76° ($\theta > 35^\circ$) y está concebido para el análisis de dos circunstancias de interés: Cuando el componente no emite suficiente flujo radiante dentro de la ventana $\theta < 35^\circ$ o cuando se quiere complementar la información obtenida analizando los ángulos grandes de emisión.

Así pues, hemos dividido este apartado en dos partes bien diferenciadas. En primer lugar, presentamos la geometría y las funciones de mérito del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) y, en segundo lugar, procedemos de forma análoga con el control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$).

3.3.1. Descripción del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)

En primer lugar, presentamos la geometría del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) y posteriormente presentamos su implementación. Asimismo, tal y como ya hicimos en la descripción del test óptico en línea para ejemplificar la implementación, usaremos el componente fotónico teórico.

3.3.1.1. Descripción de la geometría del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)

En la introducción de esta tesis ya mencionamos que uno de las restricciones que impondríamos a los sistemas de control óptico de calidad es que fuesen lo más similares posibles a los controles de verificación en línea con el fin de que se pudiesen establecer relaciones simples entre ellos. De este modo la geometría del test óptico en línea y la del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) difieren únicamente en la adición de un elemento para éste último: una malla de patrón rectangular de agujeros circulares. En el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) la malla de patrón rectangular de agujeros circulares se introduce entre el componente fotónico que está siendo analizado y la superficie difusora. Las dimensiones externas de la malla y su distancia a la superficie difusora son tales que ambos elementos subtienden la misma ventana angular desde la posición del componente fotónico. La Figura 3.10 presenta la geometría del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$). Como puede observarse, entre la superficie difusora y el componente fotónico, y a 40 mm de ésta, se coloca la malla de 35.0 mm de diámetro.

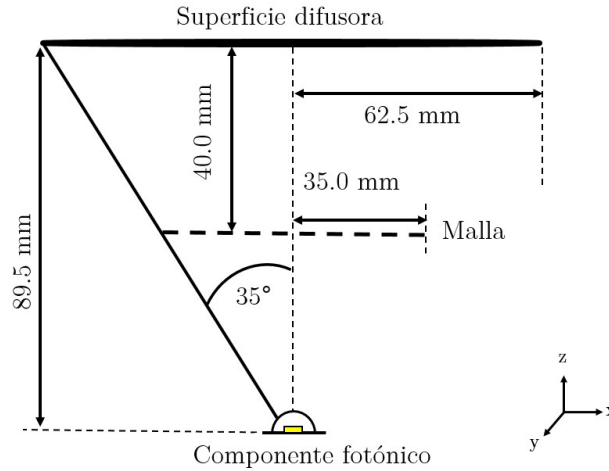


Figura 3.10 Geometría del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$). La superficie difusora donde se registra la irradiancia está situada a 89.5 mm de la base de sujeción de éste, paralela a la misma y tiene un radio de 62.5 mm. A 40 mm de la superficie difusora, entre ésta y el componente fotónico, se coloca la malla con un patrón rectangular de agujeros circulares, y un radio total de 35.0 mm. Igual que el test óptico en línea, esta disposición nos permite analizar un semi-ángulo de 35° de la emisión del componente fotónico.

La presencia de la malla permite asignar direcciones concretas a diferentes zonas de la distribución de irradiancia sobre la superficie difusora. Esto es consecuencia de que, gracias a la presencia de la malla, la irradiancia presente en el plano de la superficie difusora se presenta agrupada por una serie de spots. Cada spot corresponde a la radiación que ha atravesado un agujero en particular, de este modo podemos crear una relación biyectiva entre los spots y los agujeros de la malla. La geometría de la malla está fundamentada en dos premisas. La primera es que los agujeros sean lo suficientemente pequeños como para que se les pueda asociar una sola dirección y la segunda premisa es que el número de agujeros sea suficiente como para crear un muestreo adecuado de direcciones.

En la malla que usamos, los agujeros tienen un diámetro de 0.5 mm con una separación entre ellos de 3 mm. En las condiciones en las que se encuentra situada la malla, un diámetro de agujero de 0.5 mm supone que el ángulo sólido asociado a un agujero desde la posición del componente fotónico va desde los $9.50 \cdot 10^{-5}$ sr, con un ángulo plano de 51 arcmin, para un agujero situado en el centro de la malla ($\theta = 0^\circ$), hasta los $7.77 \cdot 10^{-5}$ sr, con un ángulo plano de 37 arcmin, si el agujero está en el extremo de la malla ($\theta = 35^\circ$). En consecuencia, estamos en condiciones de poder considerar que la dirección asociada a cada agujero es única. Por lo que respecta a la densidad de muestreo, al ser la distancia entre agujeros de 3 mm tenemos aproximadamente $(35^2\pi)/3^2 \sim 400$ direcciones dentro de la ventana de 35° de semi-ángulo. La Figura 3.11 muestra el aspecto de la malla utilizada para el control óptico de calidad.

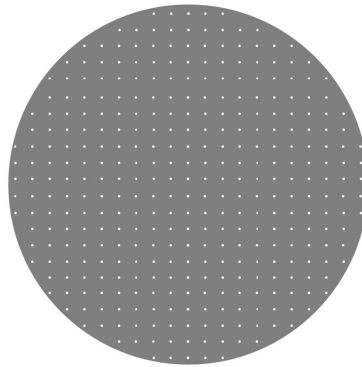


Figura 3.11 Vista frontal de la malla de agujeros utilizada en el control óptico de calidad. Diámetro externo de la malla, 70 mm (35 mm de radio), diámetro de los agujeros 0.5 mm y separación entre agujeros de 3 mm tanto verticalmente como horizontalmente

Si bien el periodo de la malla que usamos para obtener los registros experimentales (Capítulo 6) y los registros simulados (Capítulo 7) es de 3 mm, en el presente capítulo, para que el análisis de la información visual sea más sencillo, usamos un periodo de 9 mm.

3.3.1.2. Implementación del control óptico de calidad

La implementación del control óptico de calidad se fundamenta en el análisis de la distribución de irradiancia y en un proceso de trazado inverso de rayos utilizando la información direccional que nos aporta la presencia de la malla de agujeros. Las dos magnitudes que utilizamos durante la implementación del control óptico de calidad son la posición de los spots y su irradiancia.

I. Análisis de la posición de los spots

La principal información que nos aporta la posición de los spots, junto con el conocimiento de su agujero asociado, es la dirección en la que se propaga la luz desde el componente fotónico hasta la superficie difusora. El análisis de la dirección de propagación de la luz es de capital importancia, pues cualquier defecto que varíe la funcionalidad del componente fotónico también hará variar la dirección con la que la luz atraviesa ciertos agujeros de la malla. De este modo, variaciones en la radio de la curvatura de la óptica o la presencia de desalineado entre la óptica y el chip del LED tendrán como consecuencia que los spots varíen sus posiciones debido a un cambio en la dirección de propagación de la luz que los atraviesa. Tal y como se ha mencionado anteriormente, la geometría del control óptico de calidad y las dimensiones de los agujeros de la malla nos permiten asignar para cada spot una dirección de propagación única.

La presente sección y las siguientes están divididas en tres partes. Primeramente, presentamos la determinación de la posición de los spots. Después presentamos las dos funciones de mérito que utilizaremos para extraer información de los registros y, finalmente, ejemplificamos el proceso aplicándolo a dos registros concretos.

1. Posición de los spots

La determinación de la posición de los spots es el primer paso en todos los análisis que realizaremos en el control óptico de calidad. La llevamos a cabo mediante el siguiente procedimiento. En primer lugar, usando la simetría del montaje, asignamos por construcción una región, R_0 , alrededor de donde el eje óptico (que pasa el agujero central de la malla) interseca el plano del difusor, Figura 3.12. Gracias a la geometría del montaje y a la estructura periódica de la malla podemos afirmar que el spot que se encuentre dentro de la región R_0 es el que corresponde al agujero central de la malla. Para mostrar este hecho, observemos la situación presentada en la Figura 3.13 (a). En el caso en que un spot que no corresponda al agujero central se halle dentro de la región R_0 es necesario que, como mínimo, el componente fotónico se encuentre desplazado respecto a la posición nominal una distancia P_2 , cuyo valor viene dado por la siguiente expresión:

$$P_2 = \frac{L}{Z_1} P_1 = \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) P_1. \quad (3.23)$$

Donde $L = 89.5$ mm es la distancia entre el plano donde se encuentra el componente fotónico y el plano del difusor, $Z_1 = 49.5$ mm es la distancia entre el plano donde se encuentra el difusor y el plano de la malla, $Z_2 = 40$ mm es la distancia entre el plano de la malla y el plano del difusor, y $P_1 = 3$ mm es el periodo de separación de los agujeros de la malla. En nuestro caso el valor del desplazamiento, P_2 , es de 5.42 mm. De este modo, dado que tanto en el entorno de simulación como en el entorno experimental tenemos precisión inferior al mm, podemos afirmar que el spot que se encuentre dentro de la región R_0 corresponde al spot central.

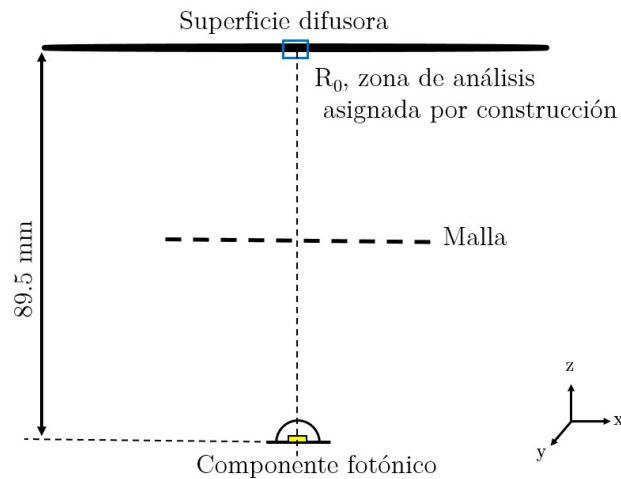


Figura 3.12 Localización por construcción de la región, R_0 , alrededor de donde el eje óptico del control óptico de calidad interseca con la superficie difusora.

Análogamente, la separación que debe haber entre las regiones, R , correspondientes a cada uno de los spots, viene también viene dado por P_2 , Figura 3.13 (b). Al distribuir las diferentes regiones en el plano de la superficie difusora obtenemos una relación biyectiva entre los spots y los agujeros de la malla.

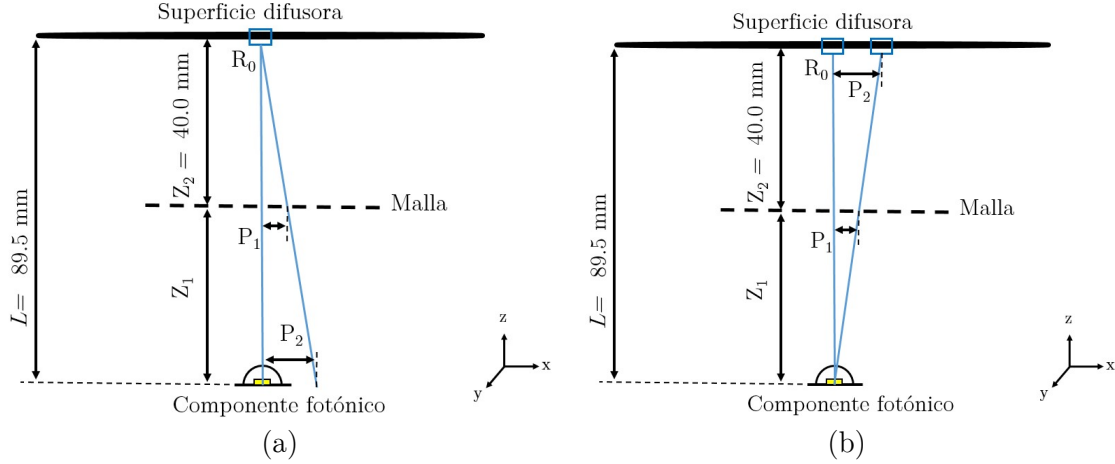


Figura 3.13 (a) Desplazamiento en el componente fotónico, P_2 , necesario para que en la región R_0 se halle un spot que no corresponda al agujero central. (b) Por simetría respecto a la situación presentada en (a), dada la posición del componente fotónico, la separación entre los spots viene dada por P_2 .

Una vez hemos definimos las distintas regiones cuadradas, R , alrededor de cada uno de los spots, pasamos a calcular el centroide éstos. La Figura 3.14 (a) muestra unos pocos spots con sus correspondientes áreas de análisis, R . Seguidamente, para cada una de las regiones, Figura 3.14. (b), calculamos el centroide mediante el método del centro de gravedad [103]:

$$(x_c y_c)_{ij} = \frac{\sum_{kl}^M X_{kl} R_{kl}}{\sum_{kl}^M R_{kl}}, \quad (3.24)$$

donde i y j son respectivamente el índice fila y el índice columna que definen la posición de la región R respecto a las demás regiones, (x_c, y_c) son las coordenadas locales del centroide del spot en el plano del difusor, k y l son respectivamente el índice fila y el índice columna de matriz de píxeles que constituye la región R , R_{kl} son cada uno de los píxeles de la región R y X_{kl} es la matriz de coordenadas que define la posición del píxel R_{kl} .

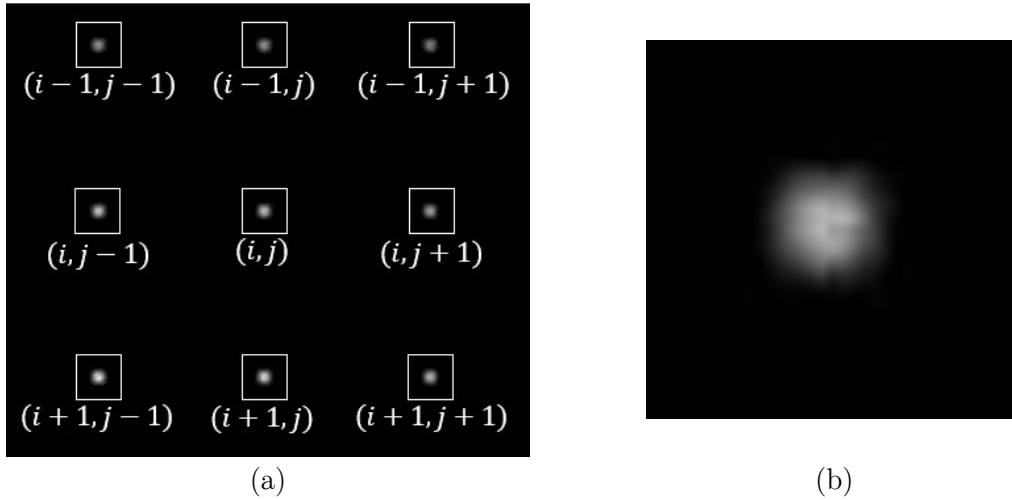


Figura 3.14 (a) Distribución de spots de irradiancia en el plano del difusor. Para cada spot se ha definido una región que lo incluye a partir de la información del propio montaje experimental. (b) Vista en detalle de una de las regiones utilizadas para calcular el centroide de un spot dado.

Una vez determinadas las coordenadas de los centroides su asignación al agujero de la malla correspondiente es inmediato ya que hemos establecido esta relación a priori con los spots. En consecuencia, podemos hallar todas y cada una de las direcciones que determinan los centroides de los spots y la posición del centro de los agujeros de la malla con el fin de realizar el trazado inverso de los rayos.

Ahora estamos en condiciones de abordar la primera función de mérito que nos servirá para obtener información cuantitativa de la zona en la que convergen los rayos.

2. Funciones de mérito

Gracias a la asociación centroide-agujero podemos asignar una sola dirección a cada par agujero-spot. Este hecho nos permite definir un rayo a partir de la coordenada del centroide del spot y de la coordenada del centro del agujero asociado:

$$\frac{x - x_{0i}}{u_i} = \frac{y - y_{0i}}{v_i} = \frac{z - z_{0i}}{w_i} = \lambda_i, \quad (3.25)$$

donde el subíndice i corresponde a cada par agujero-spot, (x, y, z) son las coordenadas espaciales del rayo, (x_0, y_0, z_0) son las coordenadas del centro del agujero y (u, v, w) son los cosenos directores correspondientes a las tres direcciones espaciales que definen el vector del rayo.

En general, si analizamos el conjunto de los rayos obtenidos para un caso cualquiera, ya sea medido o simulado, encontramos que los rayos construidos no se cortan en un único punto, sino que definen un volumen parecido a un reloj de arena: confluyen en una región y posteriormente divergen. La Figura 3.15 presenta esquemáticamente ésta situación. Esta

zona puede interpretarse como un volumen dentro del cual se halla la imagen del chip del LED a través de la óptica del componente fotónico.

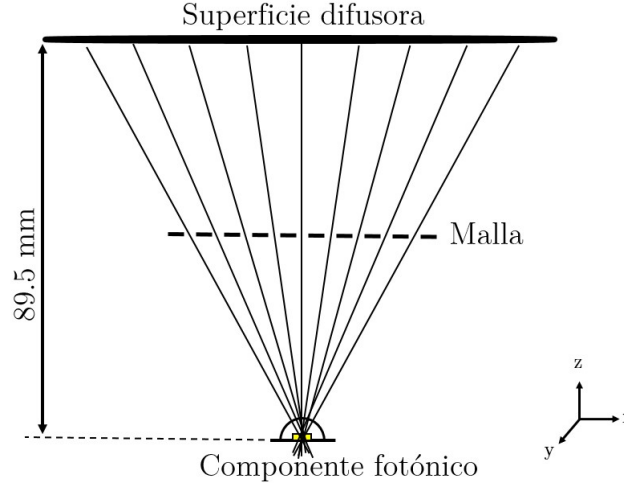


Figura 3.15 Vista esquemática del trazado inverso de rayos. Los rayos obtenidos a partir de las coordenadas de los centroides y el correspondiente centro de los agujeros de la malla convergen en un volumen para posteriormente divergir.

Para determinar el centro del volumen de convergencia de los rayos, el tipo de problema que se nos presenta es el de un sistema de ecuaciones lineales sobredeterminado, pues disponemos del orden de 400 rayos que no presentan una única intersección entre ellos y deseamos encontrar el punto central de la región de confluencia. Como ya hemos mencionado, este tipo de problemas se pueden resolver con el método de los mínimos cuadrados. Recuperando la expresión matricial presentada anteriormente:

$$\hat{A}\vec{x} = \vec{b} + \vec{\epsilon}, \quad (3.26)(3.16)$$

donde \hat{A} es una matriz $m \times n$ con $m \gg n$, siendo m del orden de 400 y $n = 3$, \vec{x} es el vector posición del centro del volumen de convergencia que queremos determinar, \vec{b} es un vector de dimensiones $m \times 1$ y $\vec{\epsilon}$, el vector residuo, es consecuencia de que las rectas no se cruzan en un único punto. Como ya hemos presentado, la solución al problema es la que minimiza la norma al cuadrado del vector residuo, $\vec{\epsilon}$, esto es, el residuo al cuadrado:

$$\|\vec{\epsilon}\|^2 = \|\hat{A}\vec{x} - \vec{b}\|^2. \quad (3.27)(3.17)$$

Para expresar nuestro sistema de ecuaciones en forma matricial para aplicar el método de los mínimos cuadrados, partimos de la ecuación (3.25):

$$\begin{aligned}
\frac{x - x_{0i}}{u_i} &= \frac{y - y_{0i}}{v_i} = \frac{z - z_{0i}}{w_i} = \lambda_i \Rightarrow \\
\frac{x - x_{0i}}{u_i} + \frac{y - y_{0i}}{v_i} + \frac{z - z_{0i}}{w_i} &= 3\lambda_i \Rightarrow \\
\frac{x - x_{0i}}{u_i} + \frac{y - y_{0i}}{v_i} - 2\frac{z - z_{0i}}{w_i} &= 0.
\end{aligned} \tag{3.28}$$

De este modo, podemos usar la última expresión de la ecuación (3.28) para escribir el conjunto de las ecuaciones de los rayos en forma matricial:

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{u_1} & \frac{1}{v_1} & \frac{-2}{w_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{x_{01}}{u_1} + \frac{y_{01}}{v_1} - \frac{2z_{01}}{w_1} \\ \vdots \end{pmatrix}. \tag{3.29}$$

La ecuación (3.29) tiene el mismo aspecto que (3.26), con las siguientes equivalencias:

$$\begin{cases} \hat{A} = \begin{pmatrix} \frac{1}{u_1} & \frac{1}{v_1} & \frac{-2}{w_1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{pmatrix}, \\ \vec{x} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \\ \vec{b} = \begin{pmatrix} \frac{x_{01}}{u_1} + \frac{y_{01}}{v_1} - \frac{2z_{01}}{w_1} \\ \vdots \end{pmatrix}. \end{cases} \tag{3.30}$$

Como hemos mostrado anteriormente, el vector \vec{x} que minimiza $\|\vec{\epsilon}\|^2$ viene dado por la expresión:

$$\vec{x} = (\hat{A}^T \hat{A})^{-1} \hat{A}^T \vec{b}, \tag{3.31}(3.20)$$

Este centro, como ya hemos mencionado, puede interpretarse como el centro de la imagen del chip del LED a través de la óptica. La Figura 3.16 presenta esquemáticamente la posición de las coordenadas que definen el vector \vec{x} dentro del volumen de convergencia de los rayos.

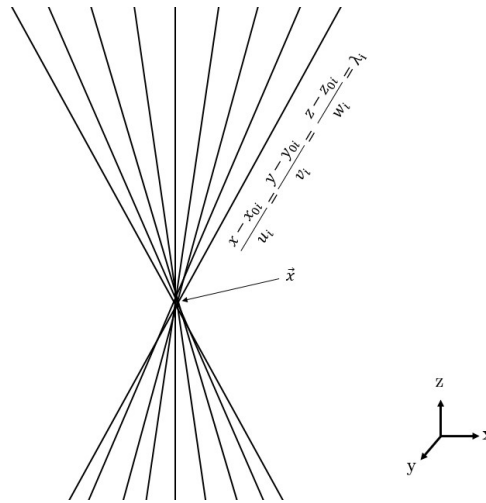


Figura 3.16 Representación esquemática del centro del volumen de convergencia de los rayos, \vec{x} , determinado mediante la implementación del método de los mínimos cuadrados a las ecuaciones de los rayos.

El objetivo de la primera función de mérito es cuantificar el desplazamiento del centro del volumen de convergencia de los rayos. De este modo, la función de mérito cuantifica lo que cualitativamente nos muestran los trazados inversos de rayos. La expresión de la función de mérito la obtenemos a partir del módulo del vector diferencia, entre el vector posición calculado para el registro nominal, \vec{x}_n , y el vector posición calculado para el del registro a evaluar, \vec{x}_e . Expresado matemáticamente:

$$\|\vec{x}_n - \vec{x}_e\|, \quad (3.32)$$

Si esta diferencia fuese cero indicaría que el dispositivo fotónico está centrado con el sistema de medida, en el ejemplo seleccionado se visualizará este efecto.

Una vez presentada la primera función de mérito presentaremos la segunda función de mérito que tiene como objetivo determinar si el chip del LED se encuentra desalineado respecto a la óptica del componente fotónico. Tal y como veremos en los ejemplos, son necesarias las dos funciones para poder discernir entre un desplazamiento global del dispositivo fotónico o el desplazamiento de la fuente respecto a la óptica.

Como ya hemos mencionado, la implementación de la primera función de mérito nos da información cuantitativa de la zona en la que convergen los rayos, pero no acerca de la dirección con la que convergen. Con el objetivo de complementar la información obtenida de la implementación de la primera función de mérito analizamos las dos primeras componentes, u y v , del vector director unitario de cada uno los rayos, $n_i = (u_i, v_i, w_i)$. Al estudiar las componentes u y v , ya extraemos toda la información del vector n , ya que al ser éste unitario tenemos $w^2 = 1 - u^2 - v^2$. Con el objetivo de extraer un único valor de las distribuciones de valores u_i y v_i analizamos los valores del tercer momento estándar, también conocido como asimetría [104]:

$$\begin{aligned}\tilde{\mu}_{3u} &= \frac{\mu_{3u}}{\sigma_u^3} = \frac{E[(u_i - \mu_u)^3]}{E[(u_i - \mu_u)^2]^{3/2}}, \\ \tilde{\mu}_{3v} &= \frac{\mu_{3v}}{\sigma_v^3} = \frac{E[(v_i - \mu_v)^3]}{E[(v_i - \mu_v)^2]^{3/2}},\end{aligned}\tag{3.33}$$

donde μ es la media de la distribución, E es el operador esperanza matemática, μ_3 es el tercer momento, σ es la desviación estándar, $\tilde{\mu}_3$ es el tercer momento estándar o asimetría, y, finalmente los subíndices u y v hacen referencia a las componentes del vector dirección. Al comparar los valores obtenidos de la asimetría para ambas direcciones de propagación, $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, podemos extraer si la propagación que presentan los rayos en la dirección x es cercana a la que presentan en la dirección y . De este modo, la modificación en la forma global o pérdida de simetría de la cáustica que cualitativamente nos muestra el trazado inverso de rayos, Figura 3.17, se expresa cuantitativamente mediante el valor de las asimetrías.

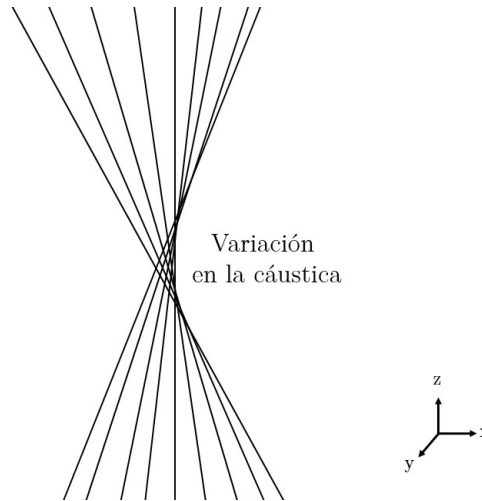


Figura 3.17 Representación esquemática de la cáustica formada por rayos que presentan una variación entre las distribuciones de los valores de u y v .

De este modo nuestra segunda función de mérito se basa en comparar los valores de la asimetría que presentan u_i y v_i para determinar si en la dirección de propagación de los rayos existe un predominio en la dirección x o y . Para cuantificar este predominio, la función de mérito propuesta es el valor absoluto de la relación entre los cocientes de la asimetría presente en u_i y de la asimetría presente en v_i para el caso nominal y para el caso a evaluar:

$$\text{abs}\left(\frac{\tilde{\mu}_{3ue}}{\tilde{\mu}_{3ve}} / \frac{\tilde{\mu}_{3u}}{\tilde{\mu}_{3vn}}\right) = \text{abs}\left(\frac{\tilde{\mu}_{3ue} \cdot \tilde{\mu}_{3v}}{\tilde{\mu}_{3ve} \cdot \tilde{\mu}_{3uv}}\right), \quad (3.34)$$

donde los subíndices n y e hacen referencia al registro nominal y al registro a evaluar, respectivamente.

Recordemos que el objetivo de este primer análisis es poder determinar la presencia de variaciones globales en el radio de curvatura nominal y la presencia de desalineado entre el chip del LED y la óptica del componente fotónico. Con este objetivo, para apoyar la información gráfica que nos aporta el trazado inverso de rayos hemos construimos las dos funciones de mérito presentadas.

Una vez presentadas ambas funciones de mérito, presentamos su implementación mediante un ejemplo.

3. Ejemplificación

Para ilustrar la implementación de las funciones de mérito asociadas al análisis de la posición de los spots hemos usado el mismo ejemplo que utilizamos para ilustrar la 2ª función de mérito y su correspondiente criterio del test óptico en línea (3.2.2.3. II): un componente fotónico tipo que presenta un desalineado de 0.3 mm en la dirección x entre la superficie óptica y el chip del LED. Recordemos que dicho componente fotónico tipo fue considerado no válido por el test óptico en línea.

La Figura 3.18 (a) muestra el esquema del control óptico de calidad y de las distribuciones de intensidad radiante del componente nominal y del componente a validar. La Figura 3.18 (b) presenta la distribución de irradiancia del componente tipo nominal sobre la superficie difusora a través de la malla de agujeros. La 3.18 (c) presenta el registro de la distribución de irradiancia sobre la superficie difusora del componente tipo a evaluar a través de la malla de agujeros. La Figura 3.18 (d) muestra la posición de los centroides de los spots del registro nominal. La Figura 3.18 (e) muestra la posición de los centroides de los spots del registro a evaluar.

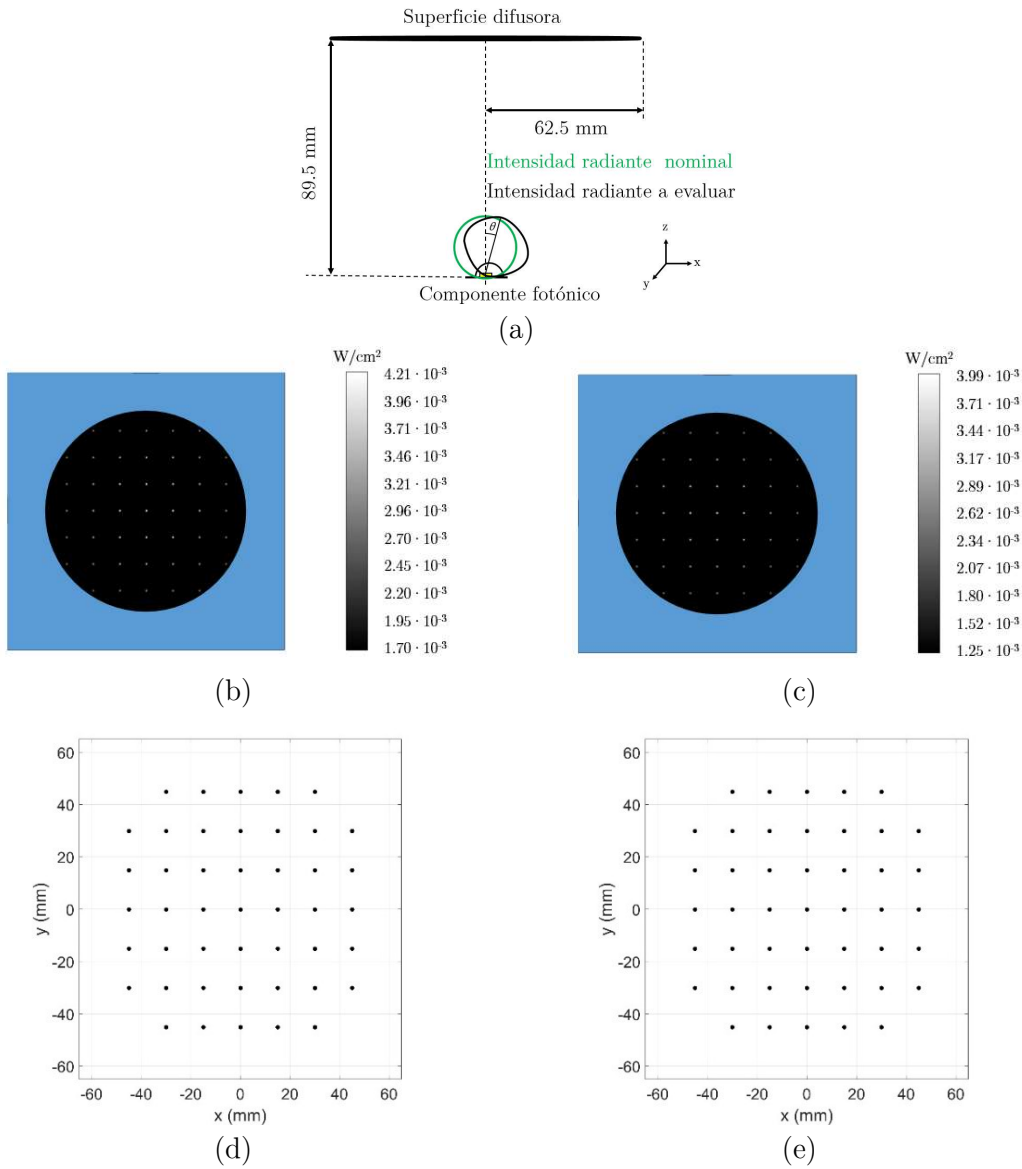


Figura 3.18 (a) Representación esquemática de la geometría del control óptico de calidad, así como la de intensidad radiante nominal y la intensidad radiante a validar. (b) Registro nominal simulado de la distribución de irradiancia del componente tipo nominal. (c) Registro simulado de la distribución de irradiancia asociada al componente fotónico tipo a evaluar. (d) Posición de los centroides de los spots de la distribución de irradiancia nominal. (e) Posición de los centroides de los spots de la distribución de irradiancia nominal.

Como puede observarse, a simple vista no se observan diferencias entre las posiciones de los centroides mostrados en la Figura 3.18 (d) ni en la Figura 3.18 (e). Este hecho es principalmente debido a que en la escala de la superficie difusora las desviaciones en la posición de los centroides no son apreciables. La misma situación sucede en las representaciones de las distribuciones de los valores (u, v) para el registro a evaluar y el registro nominal, Figura 19 (c) y (d) respectivamente. Sin embargo, estas pequeñas desviaciones están presentes y este hecho se manifiesta al realizar el trazado inverso de

rayos. La Figura 3.19 (a) y la Figura 3.19 (b) muestran respectivamente el trazado inverso de rayos cerca de la zona de convergencia para el registro nominal y para el registro a evaluar. En aras de la claridad y la simplicidad se muestra la vista xz del trazado inverso de rayos ya que el desalineado se ha implementado en la dirección x .

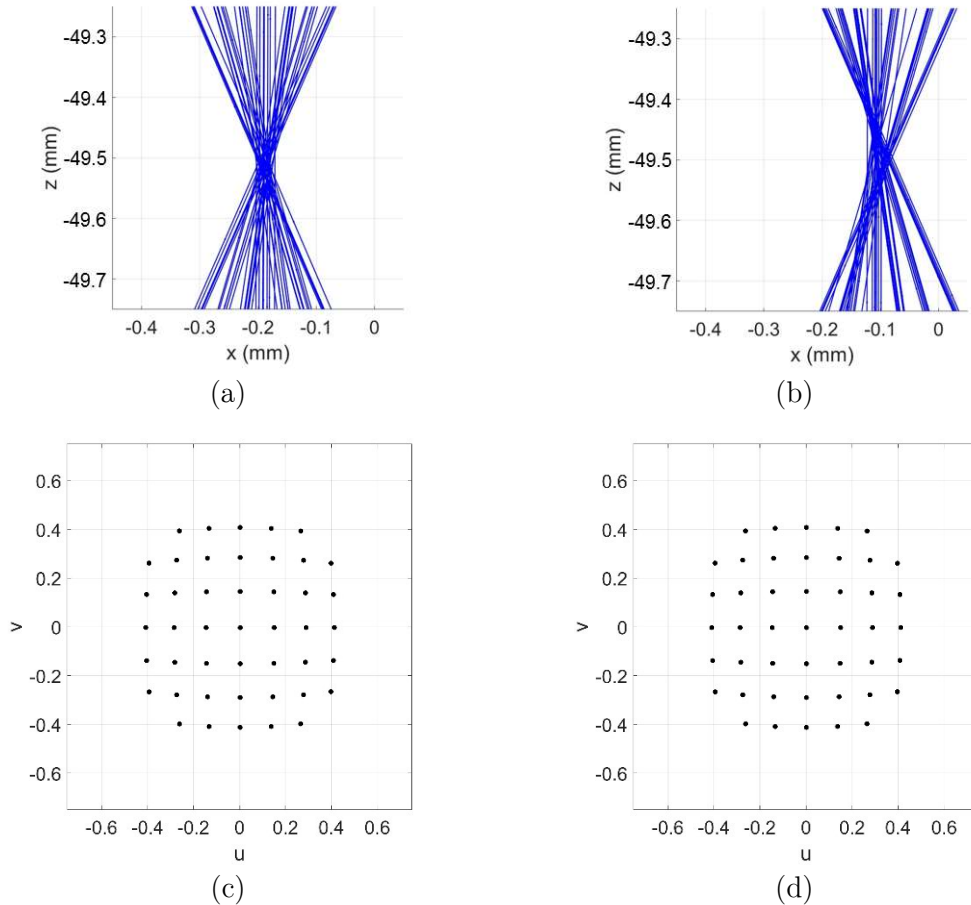


Figura 3.19 Zona en la que convergen los rayos cuando se implementa el trazado de rayos inverso para (a) el registro nominal (b) registro a evaluar. Obsérvese que un desplazamiento en la dirección x de la posición del volumen donde convergen los rayos. Además, en el trazado de rayos del registro a evaluar se aprecia una pérdida de asimetría en la forma de la cáustica respecto al trazado de rayos del registro nominal. Sin embargo, en la distribución de las componentes (u, v) para (c) el registro nominal y (d) el registro a evaluar no se observan grandes diferencias debido a la escala de valores que toman.

En el trazado inverso de rayos apreciamos diferencias cualitativas entre el caso nominal y el caso a evaluar. Primeramente observamos que el volumen en el que convergen los rayos ha sufrido un desplazamiento en la dirección x entre el registro nominal y el registro a evaluar. Además, apreciamos que existe una pérdida de simetría, una modificación en la forma de la cáustica, debido a la variación en las direcciones que presentan los rayos cuando se acercan a la zona de convergencia. Por consiguiente, la visualización del trazado inverso de rayos ya nos está indicando cual es la causa de que el componente fotónico haya sido

considerado no válido. La variación en la posición del volumen en el que convergen los rayos no se ha presentado únicamente en \mathbf{z} , lo que sería coherente con un cambio global en el radio, sino también en \mathbf{x} . Si además consideramos la pérdida de simetría en la forma de la cáustica podemos confirmar la presencia de desalineado.

Si ahora aplicamos la primera función de mérito, ecuación (3.32), la diferencia en la posición del centro del volumen de convergencia de los rayos, obtenemos un valor de 0.14 mm. Resultado obtenido al sustraer la posición del centro del volumen de convergencia de los rayos del registro nominal $\mathbf{x}_n = (-0.19, 0.19, -60.10)$ mm, a la posición del registro a evaluar $\mathbf{x}_e = (-0.10, 0.19, -60.00)$ mm. Es decir, el centro del volumen de convergencia ha sufrido un desplazamiento de 0.14 mm en el registro a evaluar, respecto al registro nominal.

Si ahora aplicamos la segunda función de mérito (3.34), la relación entre los ratios de la asimetría de \mathbf{u}_i y \mathbf{v}_i para el registro nominal y el registro a evaluar, obtenemos un valor de $abs(13.63/-3.56)=3.82$. Este valor se ha obtenido a partir de, en primer lugar, calcular el tercer momento estándar de la distribución de los valores que presentan la primera y la segunda componente de los vectores directores de los rayos en el registro nominal, ecuación (3.34), $\tilde{\mu}_{3u} = -2.23 \cdot 10^{-4}$ y $\tilde{\mu}_{3v} = 6.27 \cdot 10^{-5}$. En segundo lugar, se ha implementado la misma operación en el registro a evaluar: $\tilde{\mu}_{3ue} = 1.10 \cdot 10^{-3}$ y $\tilde{\mu}_{3ve} = 7.93 \cdot 10^{-5}$. Finalmente, hemos hallado el valor del ratio de las asimetrías que presenta el componente nominal, $\frac{\tilde{\mu}_{3un}}{\tilde{\mu}_{3vn}} = -3.56$ y el componente a evaluar $\frac{\tilde{\mu}_{3ue}}{\tilde{\mu}_{3ve}} = 13.63$.

El valor de esta segunda función de mérito nos corrobora la presencia de asimetría en la cáustica que observamos en el trazado de rayos inverso en el registro a evaluar. En caso de que no hubiese asimetría en la forma de la cáustica la función de mérito debe darnos un valor próximo a la unidad.

El ejemplo utilizado para presentar el análisis de la posición de los spots nos indica que la presencia de desalineado entre el chip del LED y la óptica tiene tanto un efecto en la zona en la que se forma la imagen del chip del LED como en la dirección en la que los rayos emergen del componente fotónico. Por lo general, tal y como presentaremos cuando implementemos el control óptico de calidad en los siguientes capítulos, las modificaciones en el radio de curvatura de la lente afectan sobre todo a la componente \mathbf{z} del vector $\vec{\mathbf{x}}$, mientras que las componentes \mathbf{x} e \mathbf{y} del vector $\vec{\mathbf{x}}$ y la relación entre $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$ son más susceptibles a la presencia de desalineado en el componente fotónico.

II. Análisis del valor de irradiancia de los spots

El análisis de la posición de los spots identifica defectos globales que causan la variación de la posición de la imagen del chip del LED o la presencia de asimetría en la dirección de la luz emitida. Como ya hemos mencionado, tales modificaciones respecto al comportamiento nominal son en gran medida consecuencia de una variación en el radio de la óptica o la presencia de desalineado entre la óptica y el chip del LED.

El presente análisis tiene el objetivo de identificar defectos de carácter local, concretamente, en las variaciones locales de la energía emitida para cada una de las direcciones en que hemos dividido la intensidad radiante. El nivel de irradiancia que presenta cada spot individualmente nos da información de la energía radiante que emite el componente fotónico en la dirección correspondiente a la del spot. Variaciones en el valor de irradiancia de un cierto spot respecto al valor nominal es indicativo, generalmente, de un cambio significativo en la superficie óptica del componente fotónico. Dado que conocemos la dirección de propagación vinculada a cada spot, podemos efectuar de nuevo el proceso de trazado inverso de rayos y buscar la intersección de los rayos cuyo spot presente una disminución anómala del nivel de irradiancia con la superficie nominal de la lente. Alrededor de la región en la que estos rayos intersecan con la superficie nominal de la óptica debe considerarse la presencia de un defecto, por ejemplo; una burbuja, una inclusión o una cavidad.

La presente sección únicamente contiene dos apartados, en el primero presentamos la función de mérito propuesta para identificar los spots que presentan un nivel de irradiancia fuera de los márgenes y el criterio que nos permite considerar si deben, o no, analizarse. En el segundo apartado presentamos dos ejemplos de su aplicación. Antes de presentar la función de mérito queremos destacar que en esta sección y en las siguientes no presentamos la identificación de los centroides de los spots, aunque se usen, ya que el proceso es análogo al de la sección anterior.

1. Función de mérito y criterio

El objetivo de la función de mérito y de su correspondiente criterio es determinar si en el registro a evaluar hay spots que presentan sustancialmente un inferior o superior nivel de irradiancia que el spot correspondiente en el registro nominal. Para cada uno de los spots, se computa el valor absoluto de la diferencia entre la irradiancia del spot en el registro nominal y la irradiancia del mismo spot en el registro a evaluar:

$$\Delta_{ij} = \text{abs}(I_{ijn} - I_{ije}), \quad (3.35)$$

donde i y j son respectivamente el índice fila y el índice columna que define la posición del spot respecto a los demás spots, I_{ijn} es la irradiancia del spot ij en el registro nominal y I_{ije} es la irradiancia del spot ij en el registro a evaluar. La expresión de la función de mérito y su criterio es la siguiente:

$$\Delta_{ij} > 0.5\bar{\Delta} \Rightarrow \text{spot } ij \text{ es anómalo}, \quad (3.36)$$

donde $\bar{\Delta}$ es el promedio de los valores Δ_{ij} . El término $0.5\bar{\Delta}$ es el criterio de discriminación seleccionado.

Finalmente, una vez identificado los spots anómalos, se realiza el ya explicado trazado de rayos inverso únicamente para los spots anómalos. De la intersección de los rayos con la superficie nominal de la óptica del componente fotónico podemos determinar dónde está el defecto que provoca la discrepancia en la energía radiante emitida en estas direcciones.

2. Ejemplificación

Para ilustrar la implementación de las funciones de mérito asociada al análisis del nivel de irradiancia de los spots hemos usado nuestro componente fotónico tipo en el que se ha provocado un defecto local mediante la extracción de material con forma de cavidad esférica de radio, $r=0.5$ mm, en la superficie de la óptica, tal y como muestra la Figura 3.20.

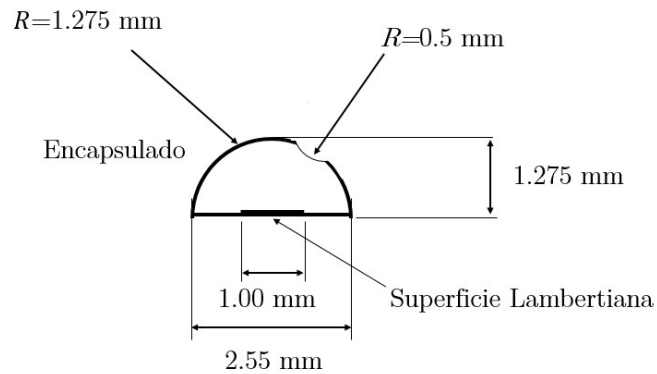


Figura 3.20 Descripción esquemática del componente fotónico teórico que presenta una cavidad de 0.5 mm de radio.

En la Figura 3.21 (a) se muestra el esquema del control óptico de calidad y de las distribuciones de intensidad radiante del componente nominal y del componente a validar y en la Figura 3.21 (b) y 3.21 (c) se presentan las distribuciones de irradiancia sobre la superficie difusora de los componentes tipo nominal y a evaluar.

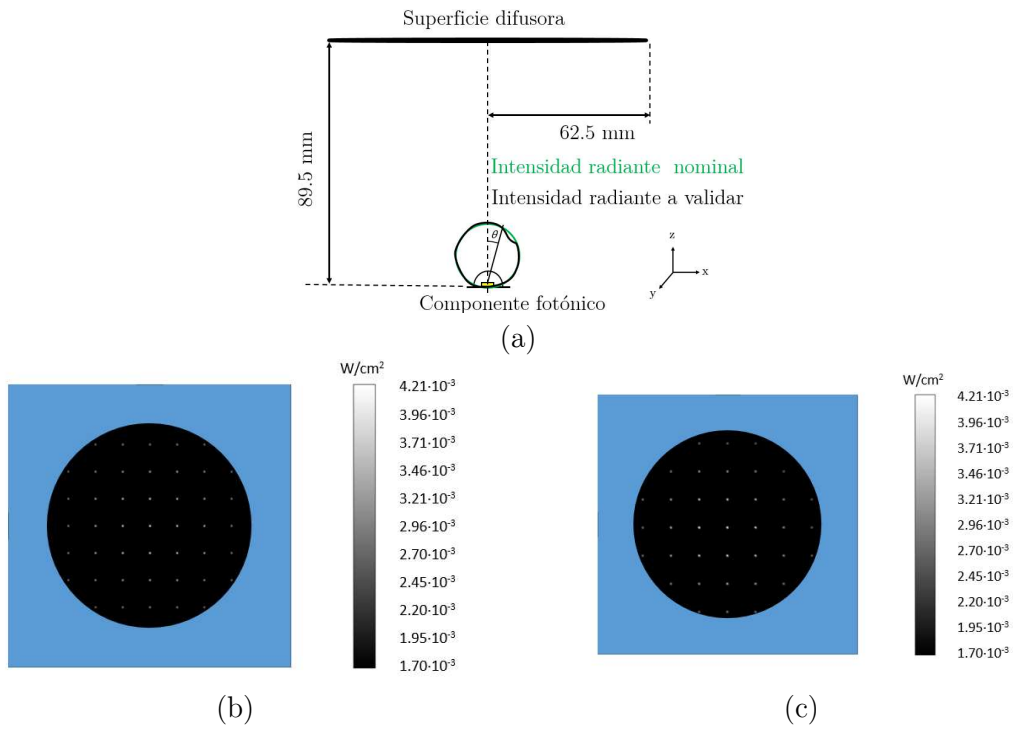


Figura 3.21 (a) Representación esquemática de la geometría del control óptico de calidad, así como la de intensidad radiante nominal y la intensidad radiante a validar. (b) Registro nominal simulado de la distribución de irradiancia del componente tipo nominal. (c) Registro simulado de la distribución de irradiancia asociada al componente fotónico tipo a evaluar.

Finalmente, la Figura 3.22 (a) presenta esquemáticamente el trazado inverso de los rayos asociados a los spots defectuosos. La Figura 3.22 (b) presenta esquemáticamente la intersección de los rayos con la zona de la superficie óptica que presenta la cavidad. La Figura 3.22 (b) muestra el registro a evaluar en el que se han rodeado con un círculo rojo los spots que son considerados anómalos según la expresión (3.36). La Figura 3.22 (d) y la 3.22 (e) muestran los puntos de intersección de todos los rayos creados mediante el trazado inverso con la superficie óptica del componente fotónico tipo en el plano xy y en el plano xz respectivamente, en rojo se han destacado los puntos de intersección de los rayos correspondientes a los spots anómalos.

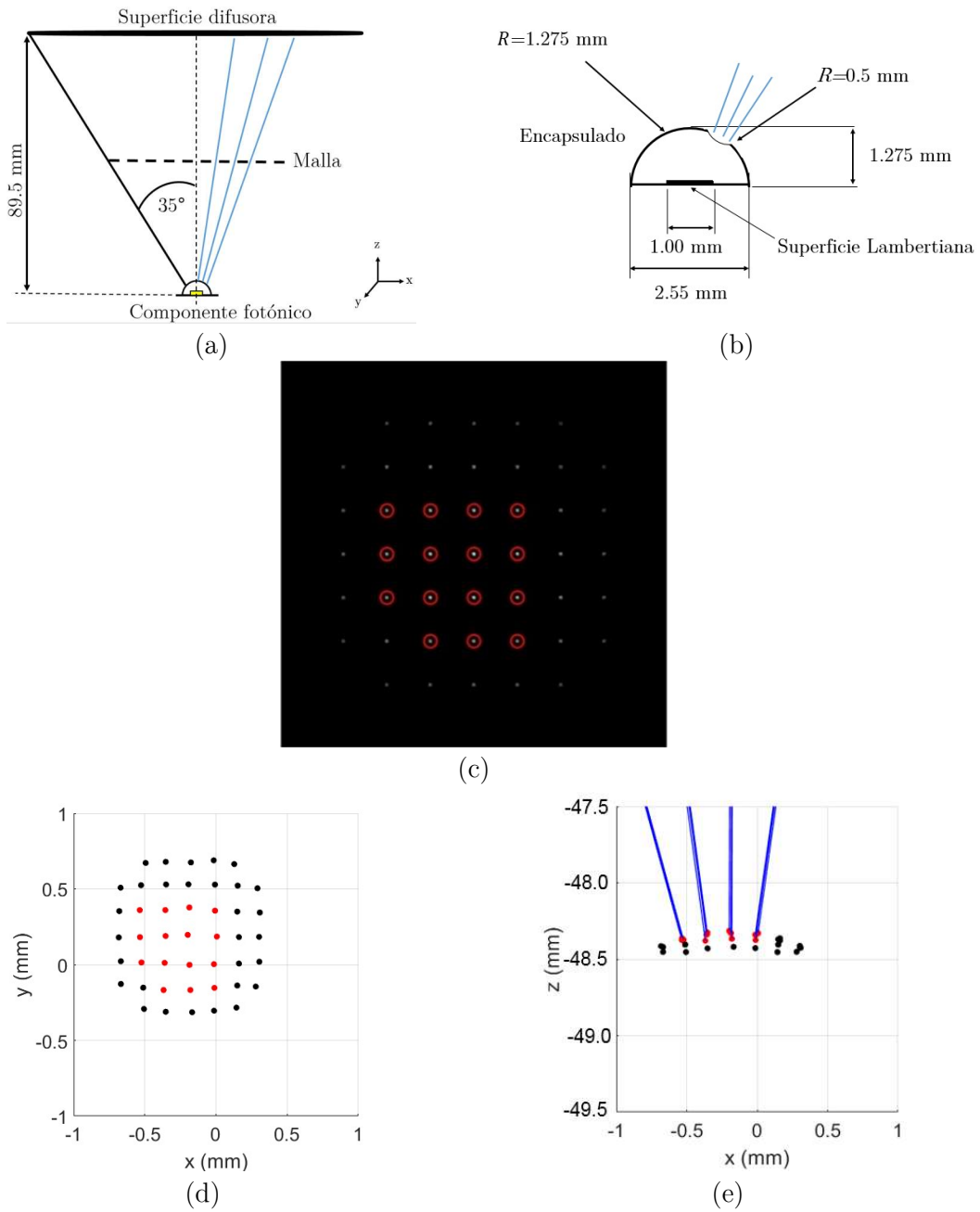


Figura 3.22 (a) Esquema del trazado inverso de los rayos asociados a los spots defectuosos. (b) Vista esquemática de la intersección de los rayos producidos mediante trazado inverso con la cavidad que presenta del componente fotónico tipo. (c) Registro a evaluar en el que se han rodeado con un círculo rojo los spots que son considerados anómalos según la expresión (3.36). (d) Intersección de todos los rayos creados mediante el trazado inverso con la superficie óptica del componente fotónico tipo en el plano xy . Rojo: intersección con la superficie óptica del componente fónico tipo de los rayos asociados a los spots anómalos. Negro: intersección con la superficie óptica del componente fónico tipo de los rayos asociados al resto de spots. (e) Vista en el plano xz de (d) en la que se ha añadido el trazado inverso de los rayos anómalos.

Tal y como hemos presentado, el análisis del valor de irradiancia de los spots nos permite detectar la presencia de defectos de carácter local, tales como burbujas, inclusiones o cavidades en la óptica del componente fotónico.

Adicionalmente a la detección, el análisis nos indica la zona de la superficie óptica que se ve afectada por la presencia de dicho defecto. Ya que la expresión que determina los puntos de intersección de una línea con una superficie óptica cualquiera depende de la función con la que se elija describir la superficie óptica, en general será necesario el uso de herramientas de simulación óptica para determinar los puntos de intersección. Sin embargo, en el caso de nuestro componente fotónico tipo, al ser su óptica un simple casquete esférico, podemos expresar analíticamente los puntos de intersección entre la superficie óptica y los rayos y complementar la información de la Figura 3.22 con la ubicación del defecto sobre la superficie del componente fotónico.

Así pues, en nuestro ejemplo partiremos de la expresión de un rayo, \vec{r} , definido en el espacio tridimensional por la siguiente ecuación:

$$\vec{r} = (x_o, y_o, z_o) + d\vec{n}, \quad (3.37)$$

donde $\vec{o} = (x_o, y_o, z_o)$ es el punto de origen del rayo, d es la distancia de propagación del rayo y \vec{n} es el vector director unitario que define la dirección de propagación del rayo. Y la esfera que describe la superficie de nuestro componente vendrá definida por la ecuación:

$$(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2 = R^2, \quad (3.38)$$

donde $\vec{c} = (x_c, y_c, z_c)$ es el centro de la esfera y R es el radio de ésta. Puede demostrarse que los puntos de intersección vienen dados por:

$$\vec{x} = \vec{o} + d_{int}\vec{n}, \quad (3.39)$$

con

$$d_{int} = -(\vec{n} \cdot (\vec{o} - \vec{c})) \pm \left((\vec{n} \cdot (\vec{o} - \vec{c}))^2 - \|\vec{o} - \vec{c}\|^2 + R^2 \right)^{1/2}. \quad (3.40)$$

La Tabla 3.2 presenta las coordenadas de los puntos de intersección de los spots anómalos sobre la superficie del nuestro componente fotónico tipo.

Spot	Coordenada (mm)		
	x	y	z
1	-0.532	0.367	-48.372
2	-0.367	0.364	-48.344
3	-0.192	0.387	-48.331
4	0.011	0.361	-48.346
5	-0.538	0.184	-48.363
6	-0.352	0.194	-48.330
7	-0.204	0.200	-48.312
8	0.010	0.187	-48.332
9	-0.522	0.014	-48.378
10	-0.367	0.011	-48.349
11	-0.193	0.020	-48.335
12	0.0144	0.013	-48.349
13	-0.378	-0.176	-48.387
14	-0.184	-0.172	-48.371
15	-0.011	-0.153	-48.374

Tabla 3.2 Valores de las coordenadas de los puntos de intersección sobre la superficie del componente fotónico tipo de los spots identificados como anómalos.

En esta sección hemos presentado los distintos aspectos del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$). Hemos presentado la geometría del control óptico y hemos descrito los análisis que se llevan a cabo. En la siguiente sección procederemos de forma análoga con el control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$).

3.3.2. Descripción del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)

La presente sección tiene una estructura análoga a la sección anterior. Presentamos la geometría del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) y su implementación para después ejemplificarlo por medio de su implementación en el componente fotónico teórico tipo.

3.3.2.1. Descripción de la geometría del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)

La geometría del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) sigue la misma pauta que la del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$). Es decir, queremos que el control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) tenga una geometría lo más similar posible al test óptico en línea con el objetivo de mantener invariables la distancia relativa de la muestra al equipo y la dimensión del equipo a lo largo de las diversas estrategias de medida. En consecuencia, hemos construido

el control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) empleando la misma malla de agujeros del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$). Sin embargo, dado que el objetivo es abarcar las direcciones que el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) no contempla, cuenta con un elemento adicional: una superficie reflectora parabólica. Al colocar el componente fotónico cerca de la zona donde está localizado el foco de la superficie reflectora parabólica se consigue que la luz emitida por el componente fotónico en ángulos mayores de 35° , después de sufrir una reflexión sobre el reflector parabólico, se dirija hacia la superficie difusora. El ángulo máximo que se consigue recoger con esta disposición es de 76° , ángulo que viene fijado por el tamaño de la abertura inferior que debe realizarse en la superficie reflectora parabólica con el fin de que pueda colocarse el componente fotónico en la posición correcta de medida. La Figura 3.23 (a) muestra esquemáticamente la disposición geométrica de los distintos elementos que conforman el control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$). La Figura 3.23 (b) presenta el comportamiento de los rayos que inciden sobre la superficie reflectora.

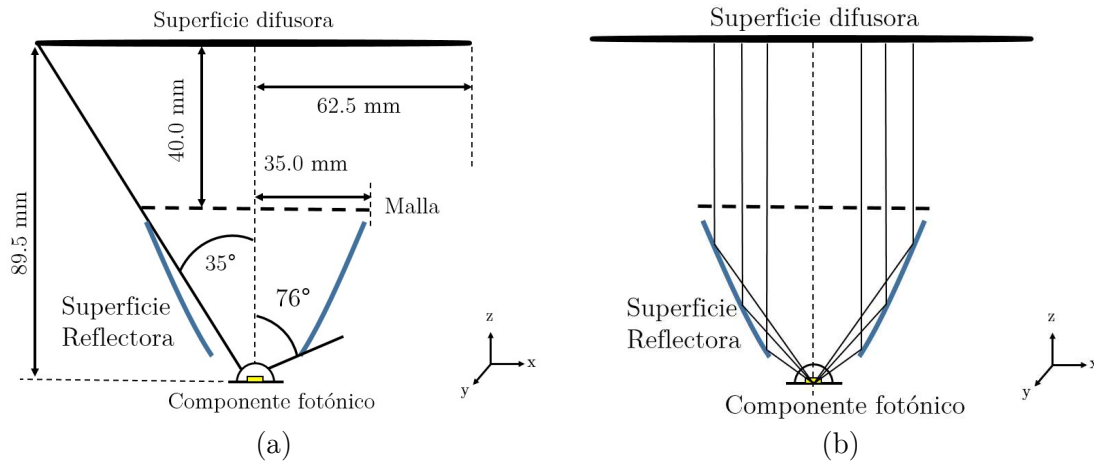


Figura 3.23 (a) Geometría del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$). La superficie difusora donde se registra la irradiancia está situada a 89.5 mm de la base de sujeción de éste, paralela a la misma y tiene un radio de 62.5 mm. A 40 mm de la superficie difusora, entre ésta y el componente fotónico, se coloca la malla con un patrón rectangular de agujeros circulares, y un radio total de 35.0 mm. Por último, se coloca una superficie reflectora parabólica, que subtende un ángulo máximo de 76° respecto a la posición del componente, de tal forma la posición del componente fotónico coincide con la del foco ésta. (b) Comportamiento de los rayos de luz emitidos por el componente fotónico que inciden en la superficie reflectora parabólica.

La presencia de la superficie reflectora conlleva una distribución de spots distinta a la que se observa en el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$). Tal y como se observa en la Figura 3.23 (b), los spots vinculados a ángulos de emisión mayores se encuentran más cerca del eje óptico que los spots vinculados a ángulos de emisión menores y su posición no es una proyección directa de la fuente de luz a través de la malla de agujeros.

Las dimensiones de la superficie reflectora deben adaptarse a la disposición geométrica del resto de los elementos del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$). De este modo y con el fin

de que la luz que incide sobre la superficie reflectora sea reflejada hacia la superficie difusora, el semidiámetro de su abertura debe ser ligeramente inferior a los 35 mm de semidiámetro que presenta la malla. Del mismo modo, la distancia entre la posición del foco de la superficie reflectora y el final de ésta debe ser ligeramente inferior a la distancia entre el plano del componente fotónico y el plano de la malla (49.5 mm). La Figura 3.24 muestra las dimensiones más relevantes de la superficie reflectora elegida.

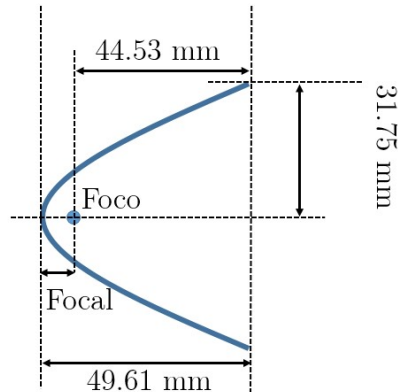


Figura 3.24 Dimensiones de la superficie reflectora parabólica utilizada en el control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$). El semidiámetro de la abertura es de 31.75 mm, la distancia del foco a la posición de la abertura es de 44.53 mm y la focal de la superficie parabólica es de 5.08 mm

Adicionalmente, dado que geometría condiciona las dimensiones de la superficie parabólica, también condiciona el parámetro óptico de ésta, su focal. La focal de la superficie parabólica descrita y mostrada en la Figura 3.24 es de 5.08 mm. El valor de la focal no es crítico, en tanto que nuestro objetivo es colocar el componente fotónico en la posición de foco, lo que sí es crítico es que la posición del componente fotónico alrededor del foco de la parábola condicione la vinculación de los spots con la posición de los agujeros de la malla. Como ya hemos mencionado, se espera que los spots vinculados a ángulos de emisión mayores se encuentren más cerca del eje óptico mientras que los vinculados a ángulos de emisión menores se encuentren más alejados del eje óptico. Para que esto sea cierto, los rayos que inciden sobre la superficie parabólica deben emerger del reflector aproximadamente paralelos al eje óptico. Si esto no sucede, puede haber cruces entre la posición de los spots y la de su agujero correspondiente, incumpliendo la posición esperada de los spots, la como se muestra en la Figura 3.25, lo que implicaría una incorrecta identificación del spot con su correspondiente agujero de la malla que lo ha originado.

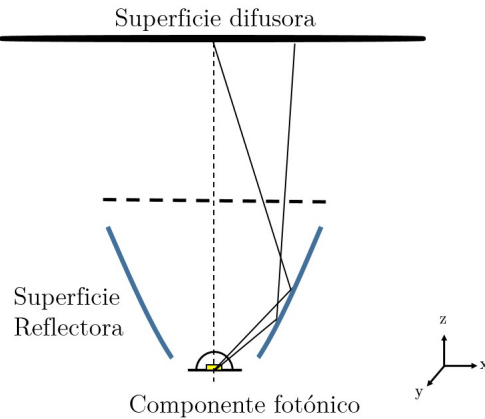


Figura 3.25 Representación esquemática de la presencia de cruces entre el spot y su agujero asociado ya que el componente fotónico no se encuentra en foco debido a un desplazamiento en el eje z del reflector.

Para mostrar que contamos con la suficiente robustez en el posicionado del componente fotónico sobre el eje óptico, dirección z , hemos realizado dos registros simulados del componente fotónico tipo nominal en un rango de ± 0.5 mm respecto a la posición nominal. El rango de ± 0.5 mm es mucho mayor que el error de posicionado del componente fotónico, que es de pocas décimas de mm. Por lo que si para estos valores extremos que no hay presencia de cruces en la posición de los spots podemos asegurar que el dispositivo es robusto respecto al posicionado del componente en z . La Figura 3.26 (a) presenta el registro 0.5 mm por encima de la posición de foco y la Figura 3.26 (b) presenta el registro 0.5 mm por debajo de la posición de foco. Puede apreciarse como no hay un cambio en la disposición relativa que presentan los spots, lo que nos permite afirmar que dentro de este rango los spots se encuentran ordenados sin la presencia de cruces entre ellos.



Figura 3.26 (a) Registro en que el componente fotónico tipo se encuentra 0.5 mm por encima de la posición de foco, más cerca de la malla. (b) Registro en que el componente fotónico tipo se encuentra 0.5 mm por debajo de la posición de foco, más alejado de la malla. Se observa claramente como los spots mantienen la misma estructura en ambos registros de modo que podemos descartar la presencia de cruces entre ellos.

Adicionalmente, puede observarse como, a diferencia del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$), los spots tienen diferentes formas según la posición en el plano del difusor. Esto es inherente a la presencia del reflector y además está fuertemente relacionado a la pendiente del reflector en el punto en que los rayos incidieron en este. Sin embargo, como mostraremos a lo largo del presente capítulo, cuando implementamos el trazado inverso de rayos obtenemos resultados coherentes.

3.3.2.2. Implementación del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)

La implementación del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) es análoga a la del control óptico de calidad presentado anteriormente. Se fundamenta, en primer lugar, en el análisis de la distribución de irradiancia de los rayos de luz que se han reflejado en la superficie parabólica y, en segundo lugar, en un proceso de trazado inverso de rayos utilizando la información direccional que nos aporta la presencia de la malla de agujeros. Para realizar el trazado inverso, debido a la presencia del reflector, haremos uso de la ley de Snell en su forma vectorial, demostrada en el Apéndice B.

De igual modo que en el control óptico de calidad anterior, las dos magnitudes que utilizamos durante la implementación del control óptico de calidad son la posición de los spots y su irradiancia.

I. Análisis de la posición de los spots

De modo análogo al control óptico de calidad para ($\theta < 35^\circ$) también queremos asociar los spots de los rayos que inciden sobre el reflector con su correspondiente agujero de la malla. De este modo lo que obtenemos es la dirección a la que se han reflejado los rayos después de incidir sobre la superficie parabólica. De nuevo, cualquier modificación global en el radio de curvatura de la óptica o la presencia de desalineado entre la óptica del componente fotónico y el chip del LED afectan a la dirección de los rayos antes y después de incidir en la superficie reflectora. Como ya hemos indicado, nuestro objetivo es asociar a cada par agujero-spot una dirección única. A continuación, presentamos la estrategia implementada.

La presente sección y las siguientes están divididas en tres partes. Primeramente, presentamos la determinación de la posición de los spots. Después presentamos las dos funciones de mérito que utilizaremos para extraer información de los registros y, finalmente, ejemplificamos el proceso aplicándolo a dos registros concretos. En todos los casos señalamos las diferencias en el análisis de la posición de los spots que surgen debido a la presencia de la superficie parabólica reflectora.

1. Posición de los spots

En primer lugar, y antes de entrar en el análisis de la posición de los spots hemos de recordar que estamos interesados sólo en los spots que corresponden a ángulos de emisión ($\theta > 35^\circ$), y que en el momento de obtener el registro de los spots, obtenemos, inevitablemente, los spots para todos los ángulos. Así pues, es necesario sustraer los spots correspondientes a ángulos ($\theta < 35^\circ$) del registro original. El proceso es trivial ya que el valor de los spots para ($\theta < 35^\circ$) está previamente identificado y simplemente hay que realizar su sustracción (Figura (3.27)). A lo largo del presente apartado únicamente presentamos los registros con la información de ($\theta < 35^\circ$) ya sustraída.

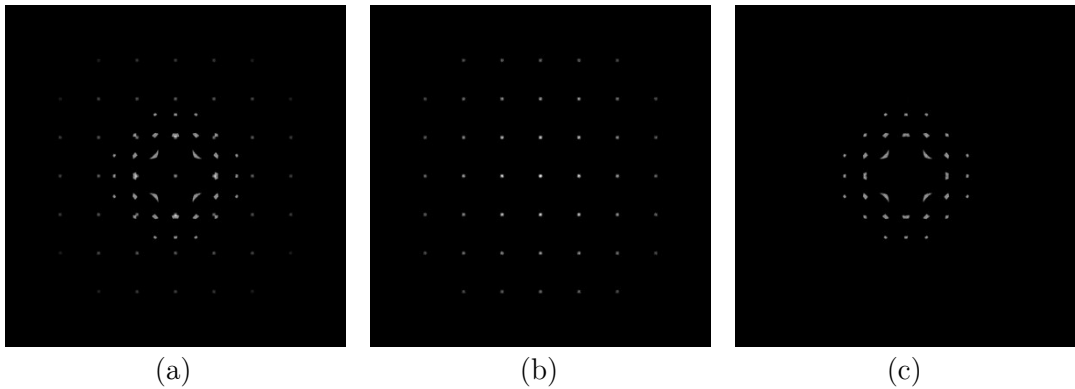


Figura 3.27 (a) Registro completo. (b) Registro solo con los spots correspondientes a ($\theta < 35^\circ$). (c) Registro solo con los spots correspondientes a ($\theta > 35^\circ$).

Al centrarnos en los spots producidos por los rayos que inciden sobre la superficie reflectora no contamos con la presencia del spot central que nos sirvió como referencia en el caso anterior, no obstante, se puede emplear cualquier otro spot para establecer la relación ya que la localización de los spots se basa en los mismos supuestos que en el caso ($\theta < 35^\circ$). En primer lugar, hay que emplear un spot de referencia cuya asignación al agujero correspondiente sea inequívoca y en segundo lugar, debe existir un período espacial de separación conocido entre las regiones R donde están localizados los spots. Los supuestos son los mismos, la presencia de la superficie reflectora simplemente cambia el mecanismo de aplicación.

En primer lugar, abordamos la asignación del spot de referencia. Dado que ya no tenemos la opción trivial de elegir el spot central, tapamos todos los agujeros de la malla menos uno y obtenemos un registro con un solo spot, s_{ij} , Figura 3.28 (a). De este modo, dado que no hay ningún otro agujero en la malla, necesariamente, sabemos qué agujero ha generado el spot. Obviamente, cuando repetimos el registro con la malla sin que haya ningún agujero tapado, el spot s_{ij} no habrá cambiado su posición, Figura 3.28 (b), así las posiciones de los demás spots se vinculan al spot de referencia s_{ij} .

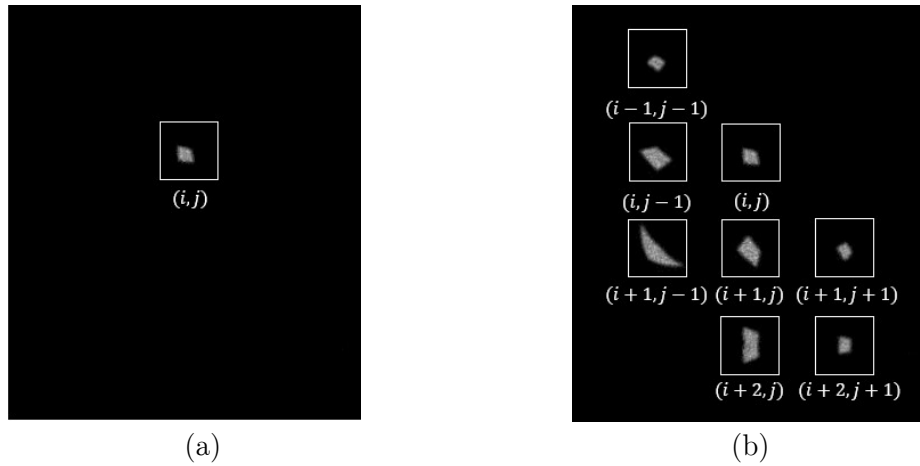


Figura 3.28 (a) Spot s_{ij} usado como referencia obtenido al tapar todos los agujeros de la malla excepto uno. (b) Cuando destapamos el resto de los agujeros el spot de referencia s_{ij} mantiene su posición. Las posiciones de los demás spots se vinculan al spot de referencia s_{ij} .

En segundo lugar, una vez determinado el agujero correspondiente al spot de referencia, abordamos el segundo supuesto: la distribución periódica de los spots. Este supuesto se basa en que nuestra precisión en colocar el componente fotónico en el foco de la superficie parabólica es suficiente, no solo para garantizar que no haya cruces entre spot y agujero, sino para afirmar que los rayos que atraviesan los agujeros lo hacen aproximadamente paralelos al eje óptico. Esta afirmación implica que el período que presentan los agujeros en la malla, P_1 , es el mismo que debemos implementar al separar las distintas regiones, R_{ij} , en el plano del difusor, P_2 . La Figura 3.28 presenta esquemáticamente la situación descrita.

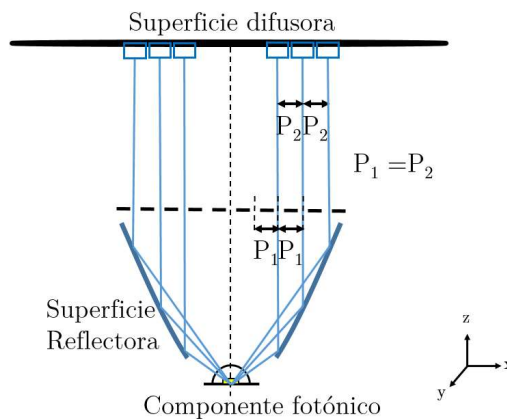


Figura 3.28 Representación esquemática del comportamiento de los rayos cuando el componente fotónico está cerca del foco de la superficie parabólica. Dado que los rayos son reflejados aproximadamente paralelos al eje óptico, el periodo de los spots puede considerarse igual al periodo de los agujeros en la malla.

Finalmente, calculamos el centroide de los spots que se hallan en las diferentes regiones por el método del centro de gravedad mediante la expresión anteriormente presentada, ecuación (3.24). De este modo, conseguimos, de nuevo, asociar una única dirección de propagación a cada spot construyendo un rayo usando el centroide de este y el centro de su agujero correspondiente. Es decir, nos encontramos en las mismas condiciones para tratar la información que en el caso de ($\theta < 35^\circ$).

2. Funciones de mérito

Como ya hemos explicado, gracias a la asociación centroide-agujero de la malla podemos construir la ecuación de un rayo para cada spot, recordemos la ecuación (3.25):

$$\frac{x_1 - x_{0i1}}{u_{i1}} = \frac{y_1 - y_{0i1}}{v_{i1}} = \frac{z_1 - z_{0i1}}{w_{i1}} = \lambda_{i1}, \quad (3.41)$$

donde el subíndice 1, señala que son las ecuaciones de los rayos después de reflejarse sobre la parabólica. Por lo demás, todos los elementos son equivalentes a los de la ecuación (3.25). Recordemos que, aunque físicamente la luz sale del componente fotónico, como nuestro proceso es un trazado de rayos *inverso* empezamos con las ecuaciones de los rayos ya reflejados.

Las ecuaciones de los rayos presentadas en la expresión (3.41) pueden analizarse como si no hubiese reflector. Igual que en la sección anterior, podemos realizar un trazado inverso y calcular el centro del volumen donde convergen mediante el método de los mínimos cuadrados. De este modo, encontramos la posición de la imagen del chip del LED del componente fotónico a través de la óptica de éste y de la superficie parabólica. Adicionalmente, queremos encontrar la imagen del chip del LED del componente fotónico únicamente a través de la óptica de éste. Con este fin hacemos uso la ley de Snell vectorial. Es decir, propagamos los rayos descritos en la expresión (3.41), calculamos su punto de intersección con la superficie parabólica y finalmente computamos la ley de Snell para cada punto y rayo. En primer lugar, presentamos el cálculo de los puntos de intersección.

Sea una superficie parabólica descrita por la función:

$$f(x, y, z) = (x - \tilde{x}_0)^2 + (y - \tilde{y}_0)^2 - 4F(z - \tilde{z}_0) = 0, \quad (3.42)$$

donde x e y son las coordenadas de los planos perpendiculares al eje óptico, z es la coordenada en la dirección del eje óptico, F es la focal de la parábola y $(\tilde{x}_0, \tilde{y}_0, \tilde{z}_0)$ son las coordenadas del vértice de ésta. Puede determinarse, que los puntos de intersección entre la parábola descrita mediante la ecuación (3.42) y los rayos descritos por la expresión (3.41) vienen dados por:

$$\begin{aligned}
x_i &= \lambda_{i1} u_{i1} + x_{0i1}, \\
y_i &= \lambda_{i1} v_{i1} + y_{0i1}, \\
z_i &= \lambda_{i1} w_{i1} + z_{0i1}.
\end{aligned} \tag{3.43}$$

Con

$$\lambda_{i1} = \frac{1}{(u_{i1} + v_{i1})^2} \left(\frac{1}{2} ((-4Fw_{i1} + 2u_{i1}x_{0i1} - 2u_{i1}\tilde{x}_0 + 2v_{i1}y - 2v_{i1}\tilde{y}_0)^2 + \right. \\
\left. -4(u_{i1}^2 + v_{i1}^2)(-4Fz + 4F\tilde{z}_0 + (x_{0i1} - \tilde{x}_0)^2 + (y_{0i1} - \tilde{y}_0)^2))^{1/2} + \right. \\
\left. +2Fw - u_{i1}x + u_{i1}\tilde{x}_0 - v_{i1}y + v_{i1}\tilde{y}_0 \right). \tag{3.44}$$

Una vez obtenido el punto de intersección de cada rayo con la parábola queremos obtener la dirección del ángulo reflejado mediante la implementación de la ley de Snell vectorial. Con este fin, primeramente, calculamos el gradiente de la expresión (3.42) con el objetivo de conocer la expresión del vector normal en cualquier punto de la parábola:

$$\begin{aligned}
\vec{N} = \nabla f &= (df_x, df_y, df_z) \\
&= (2(x - \tilde{x}_0), 2(y - \tilde{y}_0), -4F),
\end{aligned} \tag{3.45}$$

donde, \vec{N} es el vector normal de la superficie parabólica en un punto cualquiera, que apunta en el sentido negativo de z , ∇f es el vector gradiente de la función f que define la superficie parabólica y (df_x, df_y, df_z) son las derivadas parciales de la función f en las direcciones x , y y z , respectivamente.

Finalmente, aplicando la ley de Snell vectorial, encontramos el vector unitario definido por los cosenos directores de los rayos reflejados, $\hat{n}_{i2} = (u_{i2}, v_{i2}, w_{i2})$:

$$\hat{n}_{i2} = \left(1 - \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 (\hat{N}_i \times \hat{n}_{i1})(\hat{N}_i \times \hat{n}_{i1}) \right)^{\frac{1}{2}} \hat{N}_i + \frac{n_1}{n_2} ((\hat{N}_i \times \hat{n}_{i1}) \times \hat{N}_i), \tag{3.46}$$

donde \hat{N}_i es el vector unitario de \vec{N} en el punto (x_i, y_i, z_i) en la superficie parabólica, n_1 es el índice de refracción del medio 1, $n_1 = 1$ al ser éste aire, n_2 es el índice de refracción del medio 2, $n_2 = -1$ al ser la superficie parabólica reflejante y \hat{n}_{i1} es el vector director unitario de los rayos incidentes sobre la superficie parabólica.

En consecuencia, la expresión que define los rayos reflejados en la superficie parabólica es:

$$\frac{x_2 - x_i}{u_{i2}} = \frac{y_2 - y_i}{v_{i2}} = \frac{z_2 - z_i}{w_{i2}} = \lambda_{i2}. \tag{3.47}$$

En este punto podemos aplicar el método de los mínimos cuadrados para, igual que en el control óptico de calidad anterior, encontrar el centro del volumen de convergencia del conjunto 1 de rayos, los rayos trazados hasta el reflector, y del conjunto 2, después de la reflexión. Adaptando la notación de la ecuación (3.31), obtenemos:

$$\begin{aligned}\vec{x}_1 &= (\hat{A}_1^T \hat{A}_1)^{-1} \hat{A}_1^T \vec{b}_1, \\ \vec{x}_2 &= (\hat{A}_2^T \hat{A}_2)^{-1} \hat{A}_2^T \vec{b}_2,\end{aligned}\tag{3.48}$$

donde el sufijo 1 y 2 hacen referencia al conjunto 1, y al conjunto 2, respectivamente. La Figura 3.29 muestra esquemáticamente los rayos de ambos conjuntos, así como la posición de las coordenadas que definen el vector \vec{x}_2 dentro del volumen de convergencia del segundo conjunto de los rayos. Dado que los rayos del conjunto 1 presentan direcciones de propagación muy cerca de ser paralelas al eje óptico, la posición definida por el vector \vec{x}_1 se halla lejos del plano de la malla, del orden de miles de mm.

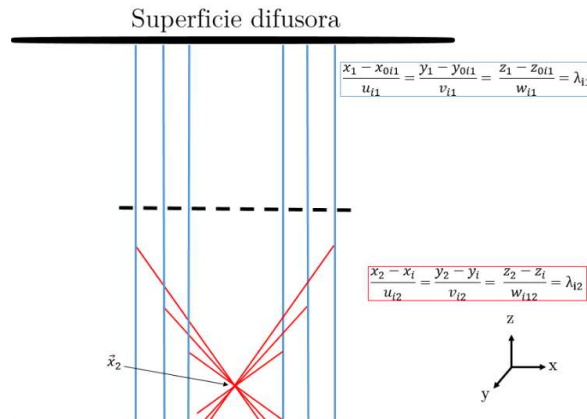


Figura 3.29 Presentación esquemática de los dos conjuntos de rayos que analizamos. En azul presentamos el conjunto de rayos 1, correspondiente a los rayos que se propagan desde la superficie parabólica a la superficie difusora. En rojo presentamos el segundo conjunto de rayos. Éstos se propagan desde el lugar de incidencia de la superficie parabólica del primer conjunto de rayos. Adicionalmente se indican las ecuaciones que rigen ambos conjuntos de rayos, así como el centro del volumen de convergencia del segundo conjunto de rayos, \vec{x}_2 .

Una vez obtenidos los conjuntos de rayos ya estamos en condiciones de presentar la primera de las funciones de mérito que tiene por objeto, al igual que para el caso de ($\theta < 35^\circ$), determinar si el componente fotónico se encuentra desalineado respecto al eje del sistema de medida o si existe un cambio global en el radio de la óptica. Esta función de mérito puede aplicarse tanto para los rayos trazados hasta el reflector, conjunto 1, como para los rayos que han sufrido la reflexión, conjunto 2. De nuevo, la función de mérito consiste en calcular la distancia entre el vector posición calculado para el registro nominal, \vec{x}_n , y el vector posición calculado para el del registro a evaluar, \vec{x}_e . En el presente caso, tenemos dos conjuntos de rayos a los que aplicar la función:

$$\|\vec{x}_{nk} - \vec{x}_{ek}\|, \quad (3.49) \quad (3.32)$$

donde el subíndice k toma los valores 1 o 2 dependiendo del conjunto de rayos al que estamos aplicando la función de mérito.

La segunda de las funciones de mérito, al igual que para el caso de ($\theta < 35^\circ$) tiene por objeto confirmar si la superficie emisora del componente fotónico está desalineada respecto a su propia óptica. Analizamos las dos primeras componentes, u y v , del vector director unitario de cada uno los rayos, $\hat{n}_{ik} = (u_{ik}, v_{ik}, w_{ik})$ para ambos conjuntos de rayos. Del mismo modo que antes, extraemos un único valor de las distribuciones de valores u_{ik} y v_{ik} computando los valores del tercer momento estándar, también conocido como asimetría:

$$\begin{aligned} \tilde{\mu}_{3uk} &= \frac{\mu_{3uk}}{\sigma_{uk}^3} = \frac{E[(u_{ik} - \mu_{uk})^3]}{E[(u_{ik} - \mu_{uk})^2]^{3/2}}, \\ \tilde{\mu}_{3vk} &= \frac{\mu_{3vk}}{\sigma_{vk}^3} = \frac{E[(v_{ik} - \mu_{vk})^3]}{E[(v_{ik} - \mu_{vk})^2]^{3/2}}. \end{aligned} \quad (3.50) \quad (3.33)$$

Con el objetivo de cuantificar la predominancia de una de las componentes sobre la otra, la función de mérito propuesta es el valor absoluto de la relación entre los cocientes de la asimetría presente en u y de la asimetría presente en v para el caso nominal y para el caso a evaluar:

$$abs\left(\frac{\tilde{\mu}_{3uke}}{\tilde{\mu}_{3vke}} / \frac{\tilde{\mu}_{3ukn}}{\tilde{\mu}_{3vkn}}\right) = abs\left(\frac{\tilde{\mu}_{3uk} \cdot \tilde{\mu}_{3vkn}}{\tilde{\mu}_{3vke} \cdot \tilde{\mu}_{3ukn}}\right), \quad (3.51) \quad (3.34)$$

De este modo, de nuevo aplicaremos dos veces esta segunda función de mérito: al primer conjunto de rayos y al segundo conjunto de rayos.

En resumen, al implementar el análisis de la posición de los spots en del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) contamos con la información cualitativa de dos conjuntos de rayos trazados inversamente y las distribuciones de las componentes u y v . La información cuantitativa la aporta la aplicación de dos funciones de mérito a ambos conjuntos de rayos.

3. Ejemplificación

Con el objetivo de que la presente sección sea clara la hemos dotado de la siguiente estructura. Primero realizamos el análisis para el primer conjunto de rayos (antes de

reflejarse), después realizamos el análisis para el segundo conjunto de rayos (después de reflejarse) y por último comparamos la información extraída para cada conjunto.

Para ejemplificar la implementación del análisis de la posición de los spots usamos el mismo ejemplo que para el control óptico de calidad óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$): un componente fotónico tipo que presenta un desalineado de 0.3 mm en la dirección x entre la superficie óptica y el chip del LED.

La Figura 3.30 (a) muestra el esquema del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) y las distribuciones de intensidad radiante del componente nominal y del componente a validar, la Figura 3.30 (b) presenta la distribución de irradiancia simulada de los rayos que se han reflejado sobre la superficie parabólica del componente tipo nominal sobre la superficie difusora a través de la malla de agujeros, la Figura 3.30 (c) presenta el registro de la distribución de irradiancia simulada de los rayos que se han reflejado sobre la superficie parabólica sobre la superficie difusora del componente tipo a evaluar a través de la malla de agujeros, y la Figura 3.30 (d) y (e) muestran, respectivamente, la posición de los centroides de los spots del registro nominal y del registro a evaluar.

Pueden observarse diferencias en la forma de los spots entre la Figura 3.30 (b) y (c), concretamente se aprecia como en el registro a evaluar los spots interiores de la zona izquierda han aumentado su tamaño, mientras que los de la parte derecha han disminuido. Este hecho se traduce en la posición de los centroides que muestran la Figura 3.30 (d) y (c). Aunque la diferencia es sutil, tiene un efecto en el aspecto del trazado inverso de los rayos, así como en las componentes (u, v) .

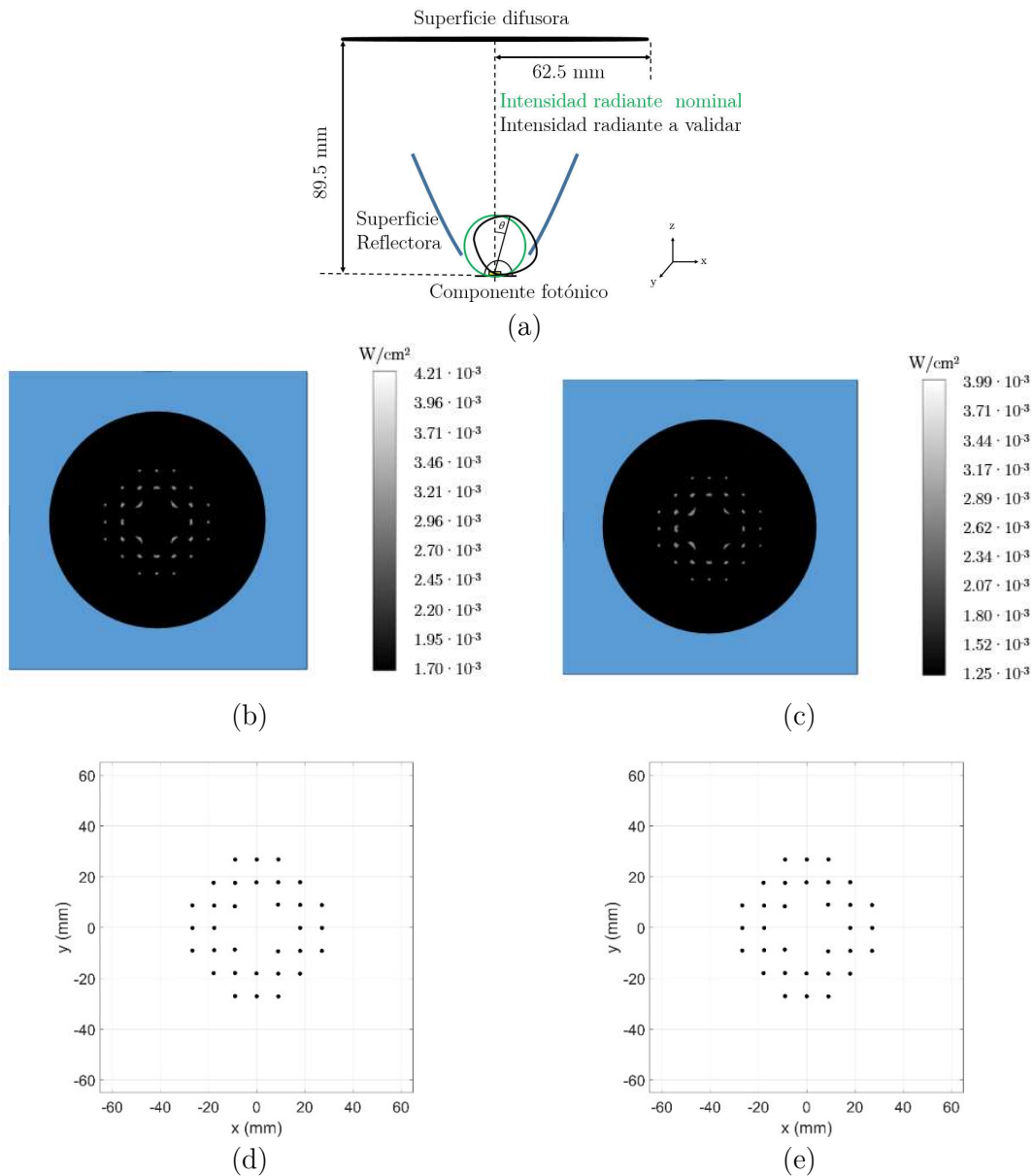


Figura 3.30 (a) Representación esquemática de la geometría del control óptico de calidad, así como la de intensidad radiante nominal y la intensidad radiante a evaluar. (b) Registro nominal simulado de la distribución de irradiancia del componente tipo nominal. (c) Registro simulado de la distribución de irradiancia asociada al componente fotónico tipo a evaluar. (d) Posición de los centroides de los spots de la distribución de irradiancia nominal. (e) Posición de los centroides de los spots de la distribución de irradiancia a evaluar.

Implementación del análisis en el primer conjunto de rayos (antes de reflejarse)

La Figura 3.31 (a) y (b) muestran, respectivamente, el trazado inverso de rayos a lo largo de 10000 mm (10 m) en la dirección de propagación z con el objetivo de visualizar diferencias entre el trazado del registro nominal y el del registro a evaluar. Como ya mencionamos, dado que el componente fotónico tipo está situado en el foco de la superficie

parabólica, los rayos asociados tienen componentes (u, v) con valores pequeños, Figura 3.31 (c) y (d)) y en consecuencia es necesario propagarlos a grandes distancias para poder hallar el centro del volumen de convergencia. Del mismo modo, dentro del orden de magnitud que presentan las componentes (u, v) podemos apreciar claras diferencias entre el registro nominal y el registro a evaluar. Incluso podemos inferir, sin el uso de la función de mérito, el desalineado en la dirección x en el registro a evaluar debido a la distribución asimétrica de los valores de u .

Si aplicamos la primera función de mérito, ecuación (3.49), la diferencia entre la posición del centro del volumen de convergencia de los rayos entre el registro nominal y el registro a evaluar es de 4850.68 mm. No debe sorprendernos el valor, ya que estamos trabajando con imágenes que se encuentran cerca del infinito óptico, ya que el componente fotónico está situado cerca el punto focal de la superficie reflectora parabólica. El resultado ha sido obtenido al sustraer la posición del centro del volumen de convergencia de los rayos del registro nominal $x_n = (26.01, 25.05, 7541.48)$ mm, a la posición del registro a evaluar $x_e = (9.09, -26.60, 2670.83)$ mm. Cabe destacar que el hecho que el método de los mínimos cuadrados encuentre el centro de convergencia más allá del plano de la malla en el espacio positivo de la dirección z no afecta a la aplicación de la función de mérito, sin embargo, al encontrarnos tan alejados en la dirección z , no podemos extraer conclusiones sólidas acerca de la posición en el plano xy .

Si ahora aplicamos la segunda función de mérito (3.51), es decir la relación entre los ratios de la asimetría de u_{i1} y v_{i1} para el registro nominal y el registro a evaluar, obtenemos un valor de $abs(21.60/-0.78)=27.76$. Este valor se ha obtenido a partir del valor del ratio de las asimetrías que presenta el componente nominal, $\frac{\tilde{\mu}_{3un1}}{\tilde{\mu}_{3vn1}} = -0.78$ y el componente a evaluar $\frac{\tilde{\mu}_{3ue1}}{\tilde{\mu}_{3ve1}} = 21.60$. Que a su vez se han obtenido a partir del tercer momento estándar de la distribución de los valores que presentan la primera y la segunda componente de los vectores directores de los rayos en el registro nominal, ecuación (3.50), $\tilde{\mu}_{3un1} = 6.77 \cdot 10^{-3}$ y $\tilde{\mu}_{3vn1} = -8.71 \cdot 10^{-3}$ y sus análogos en el registro a evaluar: $\tilde{\mu}_{3ue1} = 0.18$ y $\tilde{\mu}_{3ve1} = 8.51 \cdot 10^{-3}$.

En este caso y por el motivo, ya mencionado, de que el componente fotónico se encuentra cerca del foco de la superficie reflectora parabólica, la segunda función de mérito nos aporta más información que la primera, nótese que 21.60 es un valor considerablemente mayor a la unidad. De este modo, la segunda función de mérito sumada a las distintas representaciones de la Figura 3.31 nos indican que en el componente fotónico tipo hay presencia de desalineado entre el chip del LED y la óptica en la dirección x .

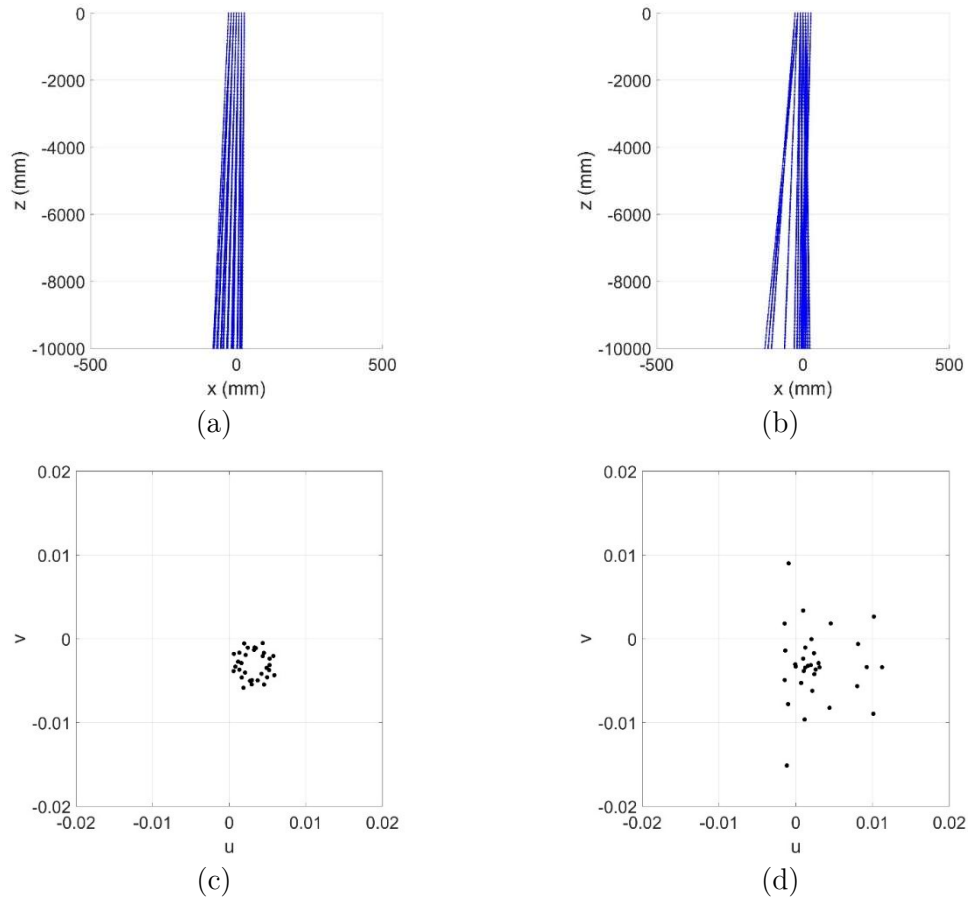


Figura 3.31 (a) Propagación del primer conjunto de rayos para (a) el registro nominal y (b) el registro a evaluar. Como observamos, debido a que los rayos son cuasi paralelos al eje óptico hay que trazarlos una gran distancia para observar diferencias entre los registros. Distribución de las componentes (u, v) para (c) el registro nominal y (d) el registro a evaluar. Puede observarse como en el registro a evaluar hay una clara asimetría en la distribución de valores de la componente u .

Implementación del análisis en el segundo conjunto de rayos (después de reflejarse).

Este análisis lo hemos realizado con el segundo conjunto de rayos, los que hemos obtenido al aplicar la ley de Snell vectorial al primer conjunto.

La Figura 3.32 (a) y (b) muestran respectivamente el trazado inverso de rayos en la zona donde se halla la superficie reflectora para el registro nominal y para el registro a evaluar. En azul se indican los rayos del conjunto 1, para que las figuras sean más fáciles de interpretar, y en rojo se muestran los rayos pertenecientes al segundo conjunto, trazados desde el punto en que los rayos del primer conjunto intersecan con la superficie parabólica. La Figura 3.32 (c) y (d) muestran el trazado de rayos del conjunto 2 cerca de la zona de convergencia.

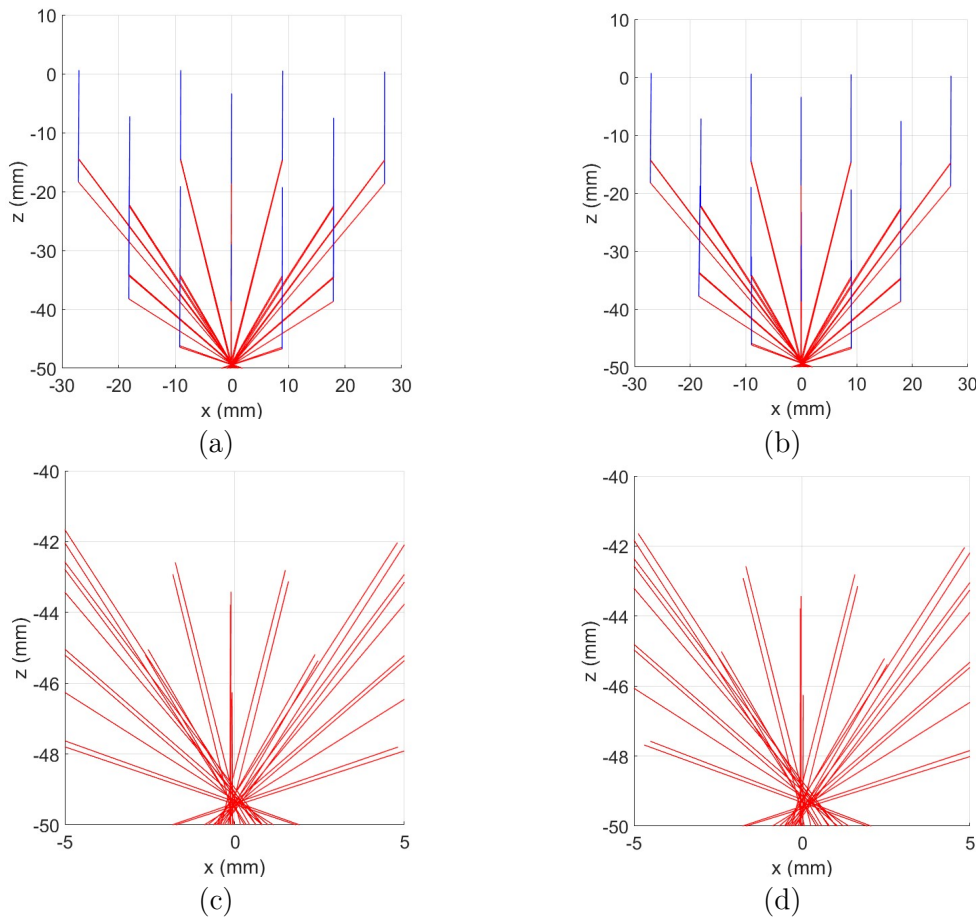


Figura 3.32 Propagación del segundo conjunto de rayos (rojo) a partir de la intersección del primer conjunto de rayos (azul) con la superficie parabólica, para (a) el registro nominal y (b) el registro a evaluar. Vista en detalle de la zona de convergencia del segundo conjunto de rayos trazados para (c) el registro nominal y (d) el registro a evaluar. Pueden observarse que los desplazamientos en el volumen de convergencia, debido a las dimensiones de la representación sólo se aprecian sutilmente.

A diferencia de lo que ocurría cerca de la zona de convergencia de los rayos para el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$), en el presente caso no se aprecian claramente diferencias entre el trazado inverso de rayos del registro nominal y del registro a evaluar. Este hecho es principalmente debido a que, al trazar ángulos con grandes pendientes, los pequeños desplazamientos no se aprecian con facilidad. Sin embargo, al aplicar la primera función de mérito el desplazamiento se pondrá de manifiesto claramente.

En lo que respecta a la distribución de los valores de las componentes (u, v) que muestran Figura 3.33 (a) y (b) destacamos el hecho de que las diferencias entre el registro nominal y el registro a evaluar no son visualmente claras debido a la escala en la que se distribuyen los valores al contrario de lo que ocurría con el conjunto 1 de rayos, Figura 3.31 (c) y (d).

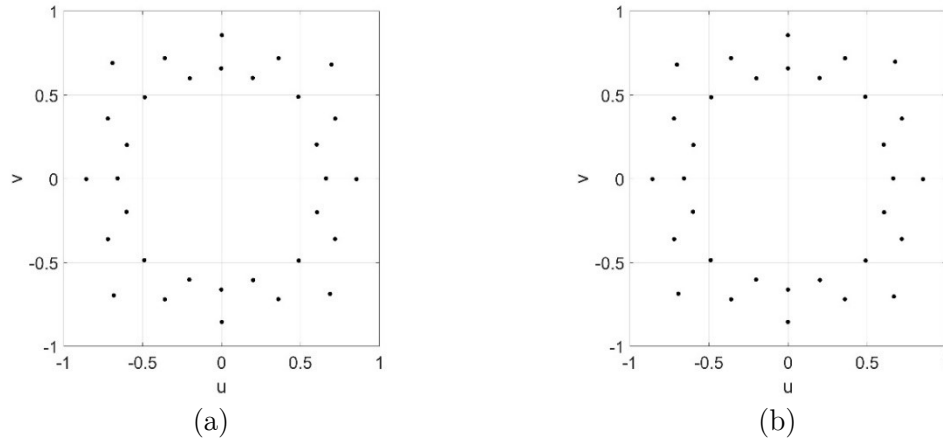


Figura 3.33 Distribución de las componentes (u, v) para (a) el registro nominal y (b) el registro a evaluar. Dado que la distribución de valores es alta, de 0 a 1, en comparación con la distribución del primer conjunto de rayos, las variaciones locales de los valores entre el registro nominal y el registro a evaluar no se aprecian claramente.

Si a ahora aplicamos la primera función de mérito (3.49) al segundo conjunto de rayos obtenemos un valor de 0.69 mm. Como antes, el resultado se ha obtenido al sustraer la posición del centro del volumen de convergencia de los rayos del segundo conjunto del registro nominal $\mathbf{x}_n = (-0.10, 0.10, -44.73)$ mm, a la posición del registro a evaluar $\mathbf{x}_e = (0.01, 0.10, -45.42)$ mm y a diferencia de lo ocurrido cuando analizamos el primer conjunto de rayos podemos extraer más información de los vectores posición. En los valores de \mathbf{x}_n y \mathbf{x}_e observamos como no hay cambio de la posición en la dirección y , tal y como cabía esperar de un desalineado en la dirección x , sino que éste ha ocurrido únicamente en las direcciones x y z .

Tal y como hemos comentado anteriormente, si nos encontrásemos ante un cambio global en el radio de curvatura, únicamente la componente z se vería afectada. Para acabar de confirmar la presencia de desalineado, implementamos la segunda función de mérito.

La segunda función de mérito, (3.51), es la relación entre los ratios de la asimetría de u_i y v_i para el registro nominal y el registro a evaluar. Para el segundo conjunto de rayos, obtenemos un valor de $abs(21.60/0.78)=2.33$. Y al igual que en todos los casos anteriores se ha obtenido a partir del ratio de las asimetrías que presenta el componente nominal, $\frac{\tilde{\mu}_{3un2}}{\tilde{\mu}_{3vn2}} = -0.99$ y el componente a evaluar $\frac{\tilde{\mu}_{3ue2}}{\tilde{\mu}_{3ve2}} = 2.31$, que a su vez se ha obtenido a partir de calcular el tercer momento estándar de la distribución de los valores que presentan la primera y la segunda componente de los vectores directores de los rayos en el registro nominal, ecuación (3.51), $\tilde{\mu}_{3un2} = 3.63 \cdot 10^{-4}$ y $\tilde{\mu}_{3vn2} = -3.67 \cdot 10^{-4}$ y del registro a evaluar $\tilde{\mu}_{3ue2} = -8.53 \cdot 10^{-4}$ y $\tilde{\mu}_{3ve2} = -3.68 \cdot 10^{-3}$.

Observamos que, claramente, la segunda función de mérito tiene un mayor valor para el primer conjunto de rayos que para el segundo. Indicándonos que el primer conjunto de rayos presenta más claramente los cambios en la dirección de propagación.

Comparación de la información extraída antes (conjunto 1) y después (conjunto 2) de reflejarse en la superficie parabólica.

Para finalizar la ejemplificación de la implementación del análisis de la posición de los spots queremos destacar que éste se basa tanto en información cualitativa proporcionada por las representaciones gráficas como por los valores obtenidos mediante la implementación de las funciones de mérito. El conjunto 1 de rayos, por lo general, permite una interpretación gráfica de la información más clara que el conjunto 2, en el trazado inverso de los rayos y, en especial, en la distribución de los valores (\mathbf{u}, \mathbf{v}) . Al implementar las funciones de mérito al primer conjunto de rayos, extraemos más información de la segunda función de mérito, la que compara los valores de las componentes (\mathbf{u}, \mathbf{v}) , que de la primera, la que busca el centro de convergencia de los rayos. La situación se invierte cuando aplicamos las funciones de mérito al conjunto 2 de rayos, es decir, del primer conjunto de rayos es más fácil extraer información relativa a las direcciones de propagación mientras que del segundo conjunto de rayos es más fácil extraer información acerca de las posiciones de convergencia de los rayos.

II. Análisis del valor de irradiancia de los spots

El presente análisis tiene por objetivo encontrar, en el registro a evaluar, los spots que presentan variaciones sustancialmente en el nivel de irradiancia respecto al registro nominal.

1. Función de mérito y criterio

Con este fin aplicamos la misma función de mérito y de su correspondiente criterio que ya construimos en el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$):

$$\Delta_{ij} = \text{abs}(I_{ijn} - I_{ije}), \quad (3.51) \quad (3.35)$$

donde i y j son respectivamente el índice fila y el índice columna que define la posición de la spot respecto a los demás spots, I_{ijn} es la irradiancia del spot ij en el registro nominal y I_{ije} es la irradiancia del spot ij en el registro a evaluar. La expresión de la función de mérito y su criterio es la siguiente:

$$\Delta_{ij} > 0.5\bar{\Delta} \Rightarrow \text{spot } ij \text{ es anómalo}, \quad (3.52) \quad (3.36)$$

donde recordemos que $\bar{\Delta}$ es el promedio de los valores Δ_{ij} .

Del mismo modo que en el control óptico de calidad anterior, una vez identificado los spots anómalos, se realiza el trazado de rayos inverso teniendo en cuenta la reflexión en la

superficie parabólica únicamente para los spots anómalos, y de igual modo que antes, de la intersección de los rayos con la superficie nominal de la óptica del componente fotónico podemos determinar dónde está el defecto que provoca la discrepancia en la energía radiante emitida en estas direcciones.

2. Ejemplificación

Para ilustrar la implementación de las funciones de mérito asociada al análisis del nivel de irradiancia de los spots hemos usado nuestro componente fotónico tipo en el que se ha provocado un defecto local mediante la extracción de material con forma de cavidad esférica de radio, $r=0.5$ mm, en la superficie de la óptica, esta vez en una zona que afecta a los rayos que inciden sobre la superficie reflectora, tal y como muestra la Figura 3.34

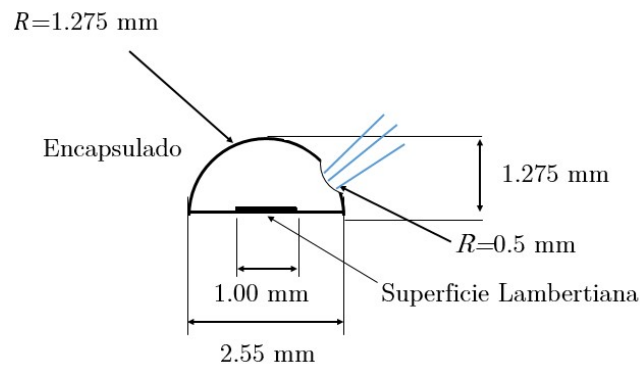


Figura 3.34 Descripción esquemática del componente fotónico teórico que presenta una cavidad de 0.5 mm de radio en una región que afecta a los rayos que inciden sobre la superficie reflectora.

La Figura 3.35 (a) muestra el esquema del control óptico de calidad y de las distribuciones de intensidad radiante del componente nominal y del componente a validar y la Figura 3.35 (b) y (c) presentan las distribuciones de irradiancia sobre la superficie difusora de los componentes tipo nominal y a evaluar.

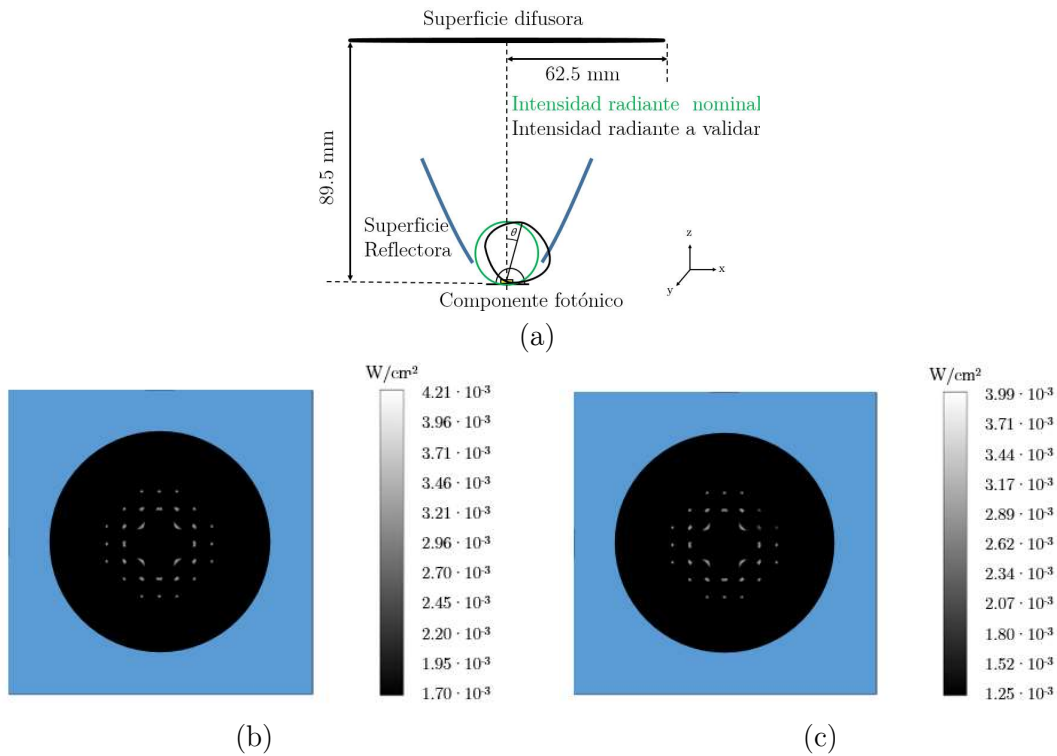


Figura 3.35 (a) Representación esquemática de la geometría del control óptico de calidad, así como la de intensidad radiante nominal y la intensidad radiante a validar. (b) Registro nominal simulado de la distribución de irradiancia del componente tipo nominal. (c) Registro simulado de la distribución de irradiancia asociada al componente fotónico tipo a evaluar.

Finalmente, la Figura 3.36 (a) presenta esquemáticamente el trazado inverso de los rayos asociados a los spots defectuosos. La Figura 3.36 (b) presenta esquemáticamente la intersección de los rayos con la zona de la superficie óptica que presenta la cavidad. La Figura 3.36 (c) muestra el registro a evaluar en el que se han rodeado con un círculo rojo los spots que son considerados anómalos según la expresión (3.52). La Figura 3.36 (d) y (e) muestran los puntos de intersección de todos los rayos creados mediante el trazado inverso con la superficie óptica del componente fotónico tipo en el plano xy y en el plano xz respectivamente, en rojo se han destacado los puntos de intersección de los rayos correspondientes a los spots anómalos.

El análisis del valor de irradiancia de los spots nos permite detectar la presencia de defectos de carácter local, tales como burbujas, inclusiones o cavidades en la óptica del componente fotónico y además nos indica la zona de la superficie óptica que se ve afectada por la presencia de dicho defecto. La Figura 3.36 (d) muestra claramente como los rayos que se reflejan en la superficie parabólica pertenecen a una zona anular alrededor del ápex de la óptica del componente fotónico tipo.

3. ESTRATEGIA DE MEDIDA

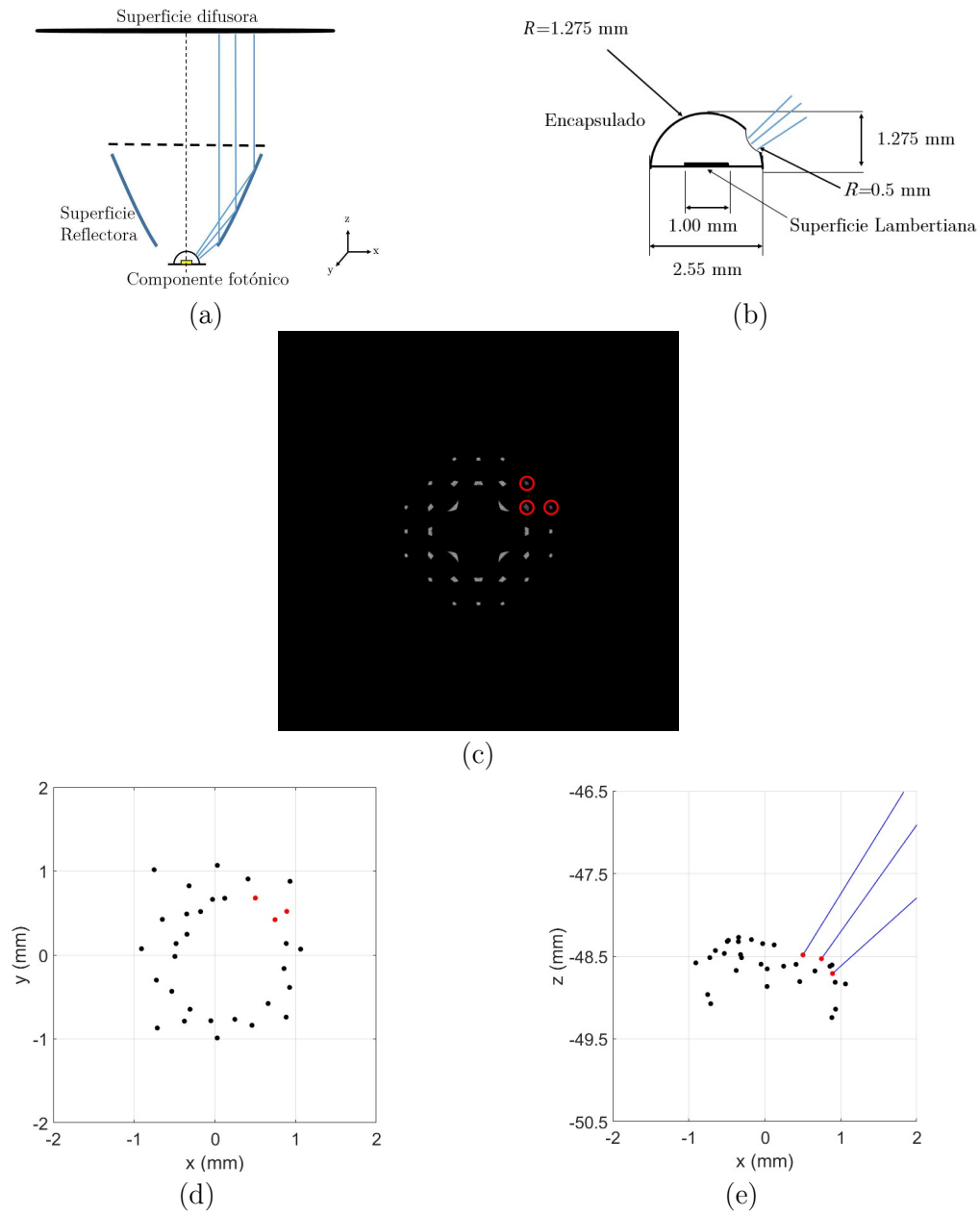


Figura 3.36 (a) Esquema del trazado inverso de los rayos asociados a los spots defectuosos. (b) Vista esquemática de la intersección de los rayos producidos mediante trazado inverso con la cavidad que presenta del componente fotónico tipo. (c) Registro a evaluar en el que se han rodeado con un círculo rojo los spots que son considerados anómalos según la expresión (3.52). (d) Intersección de todos los rayos creados mediante el trazado inverso con la superficie óptica del componente fotónico tipo en el plano xy . Rojo: intersección con la superficie óptica del componente fónico tipo de los rayos asociados a los spots anómalos. Negro: intersección con la superficie óptica del componente fónico tipo de los rayos asociados al resto de spots. (e) Vista en el plano xz de (d) en la que se ha añadido el trazado inverso de los rayos anómalos.

Completando la información de la Figura 3.36, la Tabla 3.3 presenta las coordenadas de los puntos de intersección de los rayos asociados a los spots anómalos sobre la superficie

3. ESTRATEGIA DE MEDIDA

del nuestro componente fotónico tipo. Estos puntos se han obtenido analíticamente de forma análoga a la sección anterior.

Spot	Coordenada (mm)		
	x	y	z
1	0.50	0.68	-48.49
2	0.75	0.42	-48.53
3	0.89	0.52	-48.71

Tabla 3.3 Valores de las coordenadas de los puntos de intersección sobre la superficie del componente fotónico tipo de los spots identificados como anómalos.

3. ESTRATEGIA DE MEDIDA

4. Equipo de medida

El presente capítulo presenta el entorno de medida experimental, su montaje experimental, así como la calibración geométrica y radiométrica realizada. Además, también presentamos el entorno de simulación, su motivación y como se ha reproducido el entorno de medida y los elementos utilizados.

Tal y como hemos presentado en el Capítulo 3, la estrategia de medida y el montaje experimental se basan en una estructura aditiva de elementos y estrategias, en consecuencia, seguiremos el mismo procedimiento para describir el equipo de medida que el empleado en la presentación de la estrategia de medida. En primer lugar presentaremos el equipo de medida del test óptico de validación y posteriormente describiremos los elementos que añadimos para llevar a cabo los dos controles ópticos de calidad ($\theta < 35^\circ$) y ($\theta > 35^\circ$).

4.1. Descripción del equipo del test óptico en línea

El equipo utilizado para llevar a cabo el test óptico en línea puede dividirse en tres bloques. En el primer bloque lo forma la unidad de medida propiamente dicha, compuesta por todos los elementos optomecánicos que permiten la colocación de los componentes fotónicos que se quiere evaluar, la superficie en la que se recoge la distribución de irradiancia producida por el componente fotónico y la cámara que recoge el registro. El segundo bloque consta únicamente, en nuestro caso, de la fuente de corriente que permite el encendido de los componentes fotónicos. Si el componente requiriera controles y protocolos específicos para su encendido también formarían parte de este bloque. El tercer y último bloque consta del ordenador con el que se almacenan los registros, se procesan y se implementan los algoritmos y funciones de mérito asociados a la estrategia de medida. La Figura 4.1 presenta el conjunto del equipo.

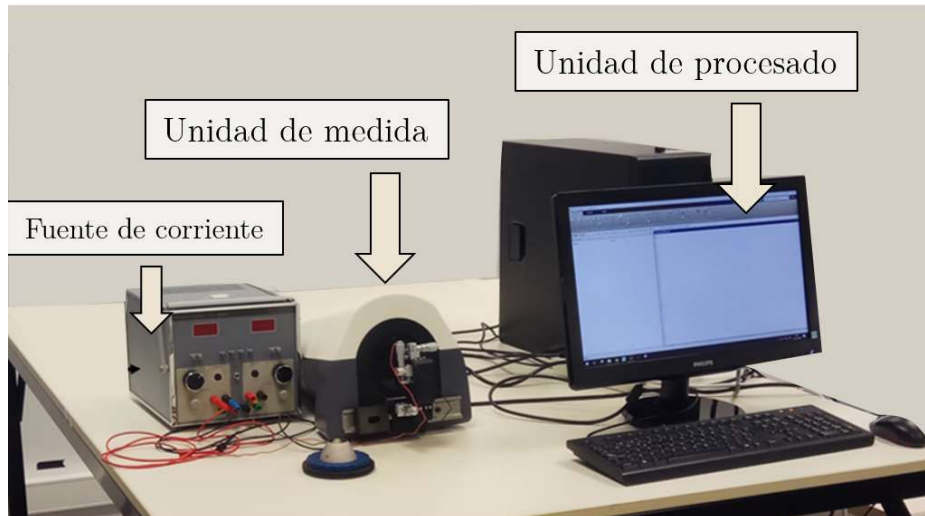


Figura 4.1 Fotografía en que se muestran los tres bloques de los que consta el equipo de medida. En la izquierda presentamos la fuente de alimentación utilizada para el encendido de los componentes fotónicos. En el centro está situada la unidad de medida propiamente dicha, que incluye el montaje optomecánico y es uno de los constituyentes principales de la presente tesis. En la derecha se sitúa el ordenador utilizado para almacenar los registros, procesarlos y aplicar las funciones de mérito y algoritmos elaborados.

En la presente sección únicamente nos centramos en describir el montaje optomecánico, la descripción y uso de fuente de alimentación no requiere ninguna explicación adicional y los algoritmos y funciones de mérito han sido presentados a lo largo del Capítulo 3.

La Figura 4.2 (a), (b), (c) y (d) muestran diferentes vistas del montaje optomecánico del test óptico en línea. En cada una de ellas se destaca los elementos que forman parte del test: los 3 microposicionadores para cada eje destinados a ubicar correctamente el componente a evaluar, la ventana de borosilicato sobre la que se adhiere el vinilo difusor y la cámara enfocada, mediante un objetivo, al plano del vinilo difusor. Adicionalmente se ha añadido una sección de un modelo 3D del montaje optomecánico, Figura 4.2 (e), para mostrar más claramente la disposición de los elementos.

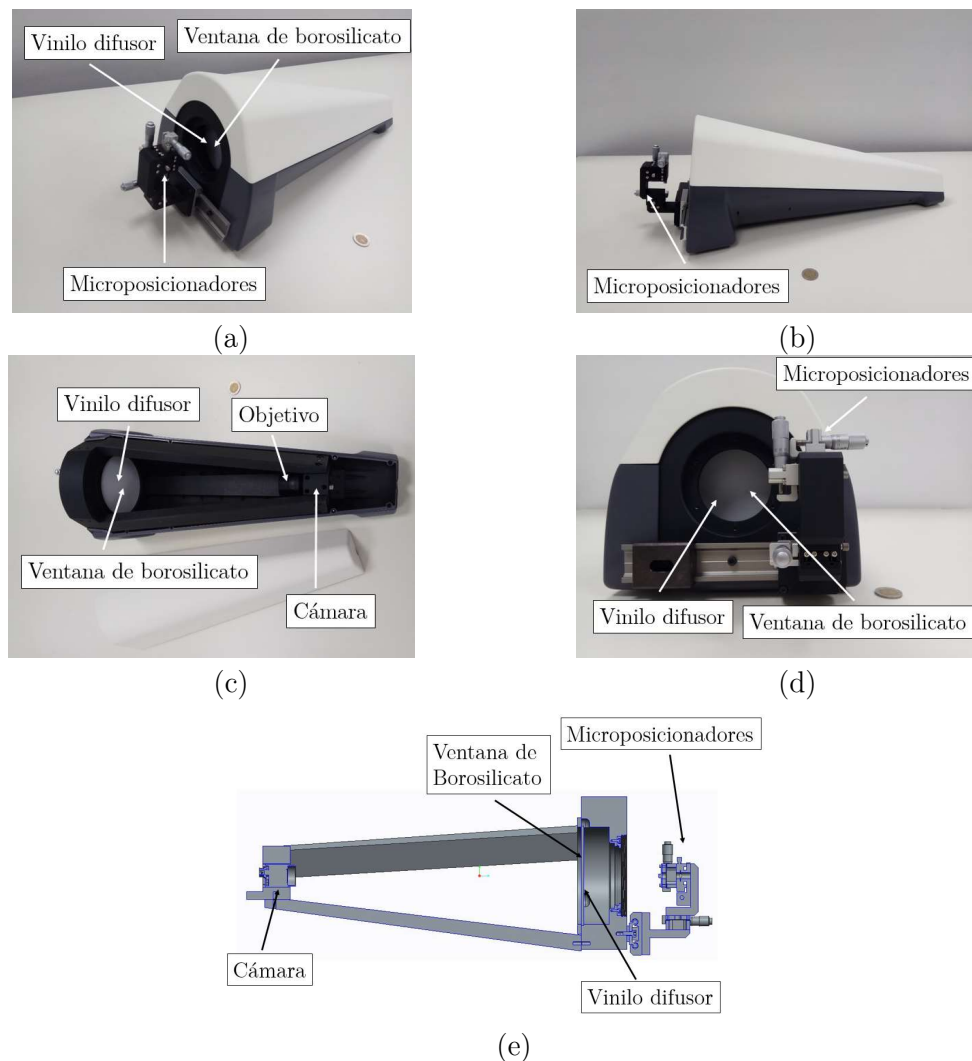


Figura 4.2 Vista de la unidad de medida (a) perspectiva, (b) lateral, (c) superior y (d) frontal del montaje optomecánico del test óptico en línea, donde se indican los diferentes elementos que lo forman: 3 microposicionadores, la ventana de borosilicato en la que se adhiere el vinilo difusor y la cámara enfocada sobre la superficie del vinilo mediante el objetivo. (e) Sección lateral del modelo 3D donde se indica los diferentes elementos que lo forman.

A continuación, presentamos información detallada de cada uno de los elementos del montaje optomecánico del test óptico en línea.

Cámara y objetivo

La cámara y el objetivo, Figura 4.3 (a), son los elementos que definen el campo de observación del que constarán nuestros registros y la precisión espacial de estos. El modelo de la cámara que usamos en nuestro montaje es Guppy PRO F-503B de Allied Vision Technologies™ [105]. Esta cámara una resolución máxima de 2588×1940 píxeles². Nosotros hemos usado una resolución de 1294×970 píxeles² con un tamaño de píxel de $4.4 \mu\text{m} \times 4.4 \mu\text{m}$. Dada la distancia focal de nuestro objetivo, $F = 8 \text{ mm}$, y la distancia de

éste al plano del difusor, 330 mm, obtenemos que nuestros registros cubren un campo de $240 \times 175 \text{ mm}^2$ con una relación $\text{píxel/mm} = 5.5$. De este modo, la cámara y el objetivo nos limitan el tamaño de nuestra superficie difusora, cuyo diámetro debe ser menor a 175 mm.

Otro aspecto del montaje optomecánico que determina la cámara es la ventana espectral que evaluamos. La cámara es el elemento que dicta a que rango del espectro electromagnético tenemos acceso en el proceso de evaluación de los componentes optoelectrónicos. Como consecuencia, debe elegirse una cámara cuyo rango espectral sea compatible con el espectro de emisión de los componentes fotónicos. En nuestro caso las longitudes de onda en las que emiten los componentes fotónicos definen un rango de entre 400 nm y 750 nm, correspondientes al rango del visible. De este modo, nuestra cámara debe tener una eficiencia cuántica (QE, por sus siglas en inglés) para este rango de longitudes de onda diferente de cero. La Figura 4.3 (b) muestra en gris la eficiencia cuántica del modo en que utilizamos la cámara (modo monocromo).

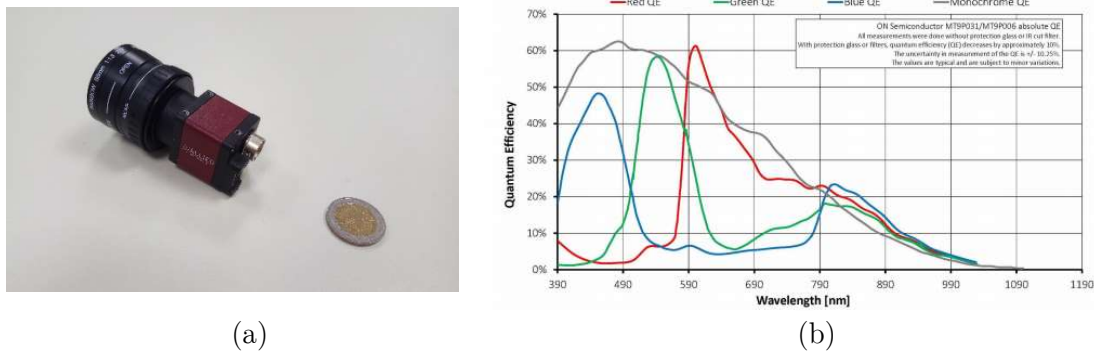


Figura 4.3 (a) Fotografía en que se presenta la cámara usada, modelo Guppy PRO F-503B, junto con el correspondiente objetivo de focal, $F=8$ mm. (b) Eficiencias cuánticas de la cámara para RGB (rojo, verde azul) y modo monocromo (gris).

Observamos como la eficiencia cuántica para el rango del visible varía entre el 45% y el 30%, de modo que la cámara es adecuada para la caracterización de los componentes fotónicos.

Ventana de borosilicato y vinilo difusor.

En lo que respecta a las propiedades de la ventana y del difusor, desde el punto de vista optomecánico, estamos interesados en la dimensión de la ventana y en la transmisión que presentan ambos elementos conjuntamente. Dado que en el test óptico en línea tenemos como objetivo evaluar una ventana angular de aproximadamente 35° , el diámetro de la ventana determina la distancia axial hasta el plano en el que se encuentra el componente fotónico. Adicionalmente, el diámetro de la ventana impuesto por el campo que ofrece la cámara debe ser menor a 180 mm. La venta óptica usada es el modelo #33-005 de Edmund OpticsTM [106], que presenta un grosor de 3.3 mm y un diámetro de 125 mm.

4. EQUIPO DE MEDIDA

La Figura 4.4 (a) muestra una fotografía de la ventana con el difusor adherido. Teniendo en cuenta el diámetro de la ventana de borosilicato y la ventana angular se obtiene la distancia a la que deben colocarse los componentes fotónicos. Esta distancia ya se ha presentado en el Capítulo 3 y es de 89.5 mm. Gracias a la presencia de los microposicionadores, el plano del componente fotónico puede desplazarse para adaptarse a las diferentes dimensiones de los componentes evaluados.

En lo que respecta el espectro de transmisión, para el difusor usado, modelo 3635-70 de 3M™, el fabricante detalla que éste tiene una transmitancia nominal del 65% [107]. Por otro lado, la curva de transmisión de la ventana [108], Figura 4.4 (b) varía entre el 95% y el 90% en nuestro intervalo de longitudes de onda de interés.

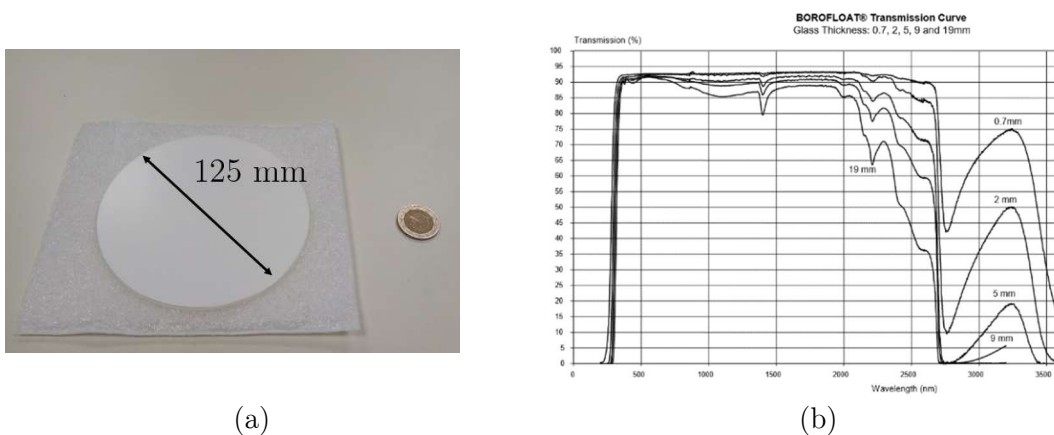


Figura 4.4 Fotografía de la ventana de borosilicato utilizada, #33-005 (Edmund Optics™), a la que se ha adherido un vinilo difusor, 3635-70 (3M™). (b) Curva de transmitancia de la ventana de borosilicato subministrada por Edmund Optics™, para grosores de 0.7, 2, 5 y 9 mm. Nuestra ventana presenta un grosor de 3.3mm. Observamos como la transmitancia en nuestro rango de longitudes de onda oscila entre el 95% y el 90%.

Tanto el efecto de la variación de la QE de la cámara como de la variación de transmitancia del difusor en función y de la ventana de borosilicato en función de la longitud de onda, así como otros efectos tanto de aspecto energético como geométrico se corrigen conjuntamente en el proceso de calibración que presentamos en secciones posteriores del presente capítulo.

Microposicionadores

El modelo de microposicionador utilizado en la presente tesis es el #66-401 de Edmund Optics™ [109]. El montaje optomecánico consta de tres microposicionadores, para cada uno de los tres ejes, con un desplazamiento total de 13 mm y una precisión de 0.01 mm. La Figura 4.5 muestra la fotografía de uno de los modelos de microposicionador usado.



Figura 4.5 Fotografía del modelo de microposicionador utilizado, #66-401 (Edmund Optics™). Este modelo de microposicionador presenta un recorrido total de 13 mm con una precisión de 0.01 mm.

A continuación presentamos el montaje empleado para el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) así como los elementos que se añaden respecto al test óptico en línea.

4.2. Descripción del equipo del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)

Tal y como se presenta en el Capítulo 3, sección 3.3.1.1, para convertir el test óptico en línea en el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) es necesario añadir únicamente una malla de agujeros. Con el fin de dotar a la malla del menor grosor posible, ésta la hemos construido mediante la técnica de impresión en fotolito. Tal y como se ha presentado en la misma sección, los agujeros, es decir las zonas sin impresión de la malla, presentan un diámetro de 0.5 mm y una separación entre ellos de 3 mm, siguiendo una distribución rectangular. La malla de agujeros debe reposar sobre una ventana para evitar dobleces de la misma. La Figura 4.6 (a) y (b), presentan respectivamente una vista en perspectiva y frontal del equipo del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) en las que se observan los nuevos elementos añadidos al test óptico en línea, la Figura 4.6 (c) presenta una sección del modelo 3D en la que también se han añadido los nuevos elementos.

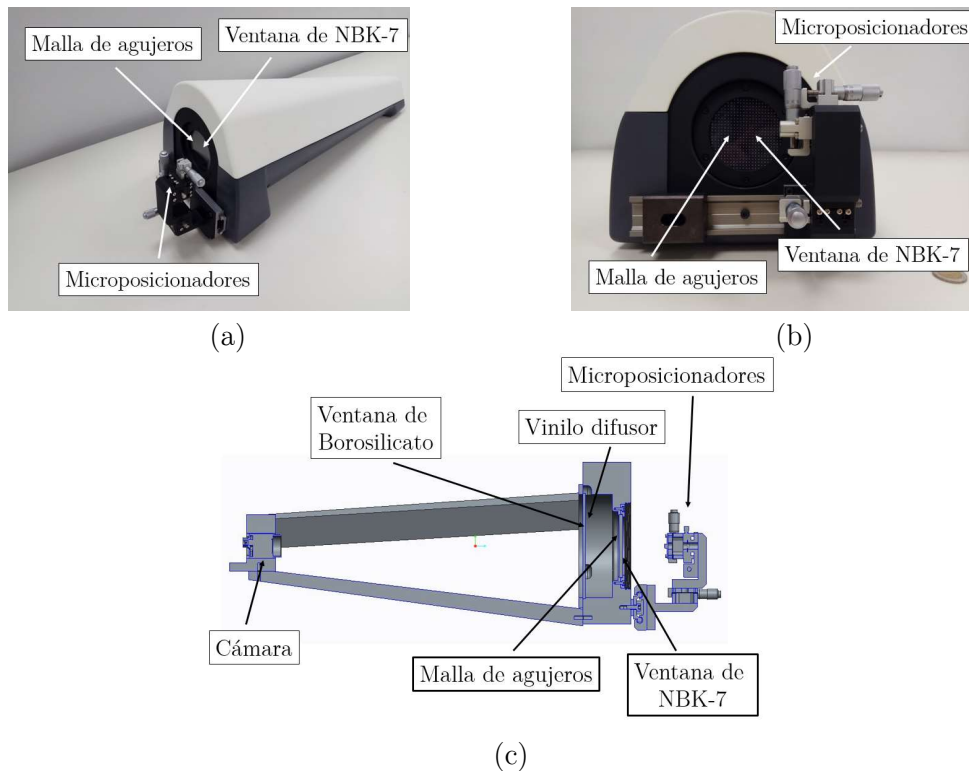


Figura 4.6 Vista en perspectiva (a) y frontal (b) del montaje optomecánico del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$), donde se indican los diferentes elementos añadidos al montaje del test óptico en línea, la malla de agujeros impresa en fotolito soportada por la ventana de NBK-7. (c) Sección lateral del modelo 3D del montaje optomecánico del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)

Malla y ventana de NBK-7

Sobre el diámetro de la malla y de la ventana angular hay ciertas restricciones heredadas del test óptico de calidad que tienen que cumplir. Dado que el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) tiene la misma ventana angular que el test óptico, el diafragma que sujeta la malla no debe limitar dicha ventana angular. Por diseño del montaje experimental, se ha fijado que la distancia entre la malla de agujeros y la superficie difusora sea de 40 mm. De este modo dado que la distancia entre el componente fotónico y la superficie difusora es de 89.5 mm, el diafragma de sujeción de la malla debe tener un diámetro mayor de 69.14 mm. La ventana de NBK-7 utilizada en el montaje experimental es el modelo #84-359 de Edmund OpticsTM [110], que presenta un diámetro de 75 mm y 4mm de grosor, cuya sujeción presenta un diámetro de 70 mm, de modo que no nos limita la ventana angular.

La Figura 4.7 (a) y (b) presentan respectivamente la ventana de sujeción de la malla y la malla de agujeros impresa en fotolito. La Figura 4.7 (c) presenta la reflectancia de ventana de NBK-7 para las longitudes de onda del visible y el infrarrojo cercano.

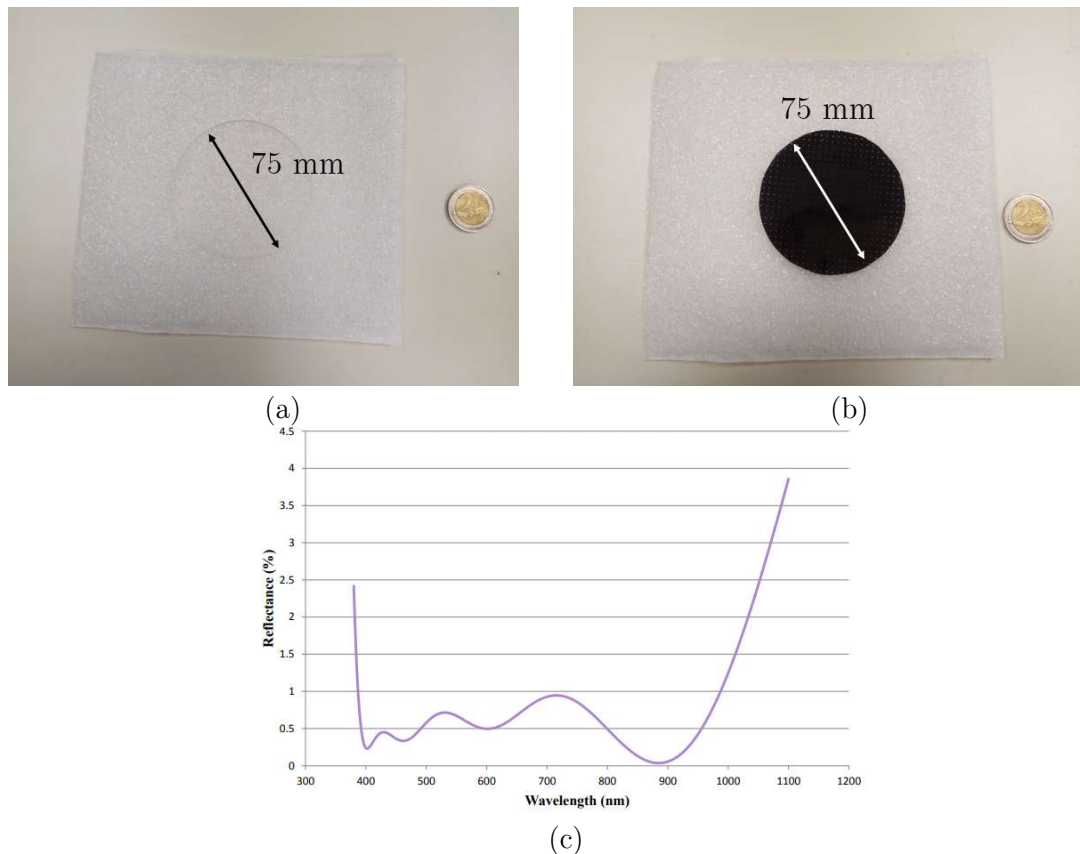


Figura 4.7 Fotografía de la ventana de NBK-7 utilizada, #84-359 (Edmund Optics™) de 75 mm de diámetro y 4 mm de grosor, que sirve como sujeción de la malla de agujeros. (b) Malla de agujeros de 75 mm de diámetro utilizada en el entorno experimental. Ésta consiste en un fotolito impreso. Las zonas no impresas que constituyen los agujeros tienen un diámetro de 0.5 mm y una separación entre ellas de 3 mm, siguiendo un patrón de distribución rectangular. (c) Curva de reflectancia de la ventana de borosilicato suministrada por Edmund Optics™.

4.3. Descripción del equipo del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)

El único elemento que se añade en el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) para convertirlo en el control óptico de calidad de ($\theta > 35^\circ$) es un reflector parabólico. Tal y como se ha explicado en el Capítulo 3 sección 3.3.2.1 el reflector parabólico recoge la luz emitida en ángulos mayores a 35° . La Figura 4.8 (a) y (b) muestran respectivamente una vista en perspectiva, y frontal del equipo del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$). De nuevo se muestran las vistas donde se aprecia la presencia del nuevo elemento. La Figura 4.8 (c) presenta una sección del modelo 3D donde también se observa la presencia del nuevo elemento.

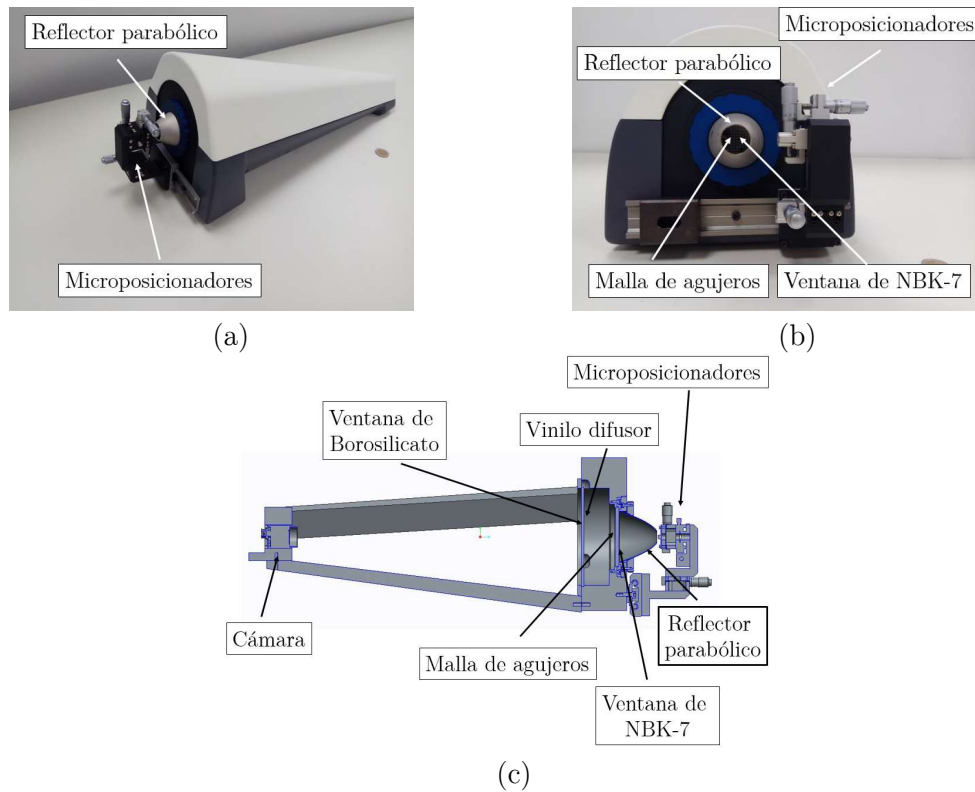
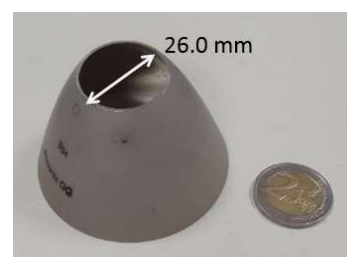
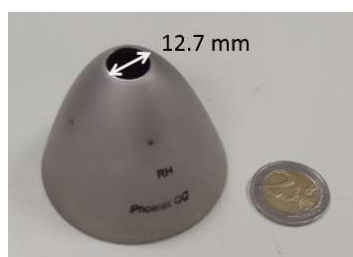


Figura 4.8 Vista en perspectiva (a), y frontal (b) del montaje del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$), donde se indican el reflector parabólico añadido al control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$). (c) Sección lateral del modelo 3D del montaje optomecánico del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) donde se indica los diferentes elementos que lo forman.

El reflector parabólico usado en la presente tesis es el modelo PA1.06 del fabricante Phoenix Electroformed Products, Inc. [111]. Ha sido necesario mecanizar el reflector para poder colocar los componentes fotónicos en el foco del mismo. Tal y como se observa en la Figura 4.9 (c) el reflector original tiene la posición de foco dentro de éste y en consecuencia se ha cortado una sección del reflector de modo que la posición del foco queda a 3.24 mm por fuera del reflector, en estas condiciones el diámetro inferior es de 26 mm, y para un componente fotónico situado en su foco el reflector recoge hasta los 76° de misión. Asimismo, el elemento que sujeta el reflector presenta un diámetro de 63 mm quedando limitado el menor ángulo que se recoge a 34.5° perdiéndose la información en una pequeña zona angular alrededor de los 35° . La Figuras 4.9 (a) presenta una vista del reflector comercial antes de recortar y la Figura 4.9 (b) una vez recortado.



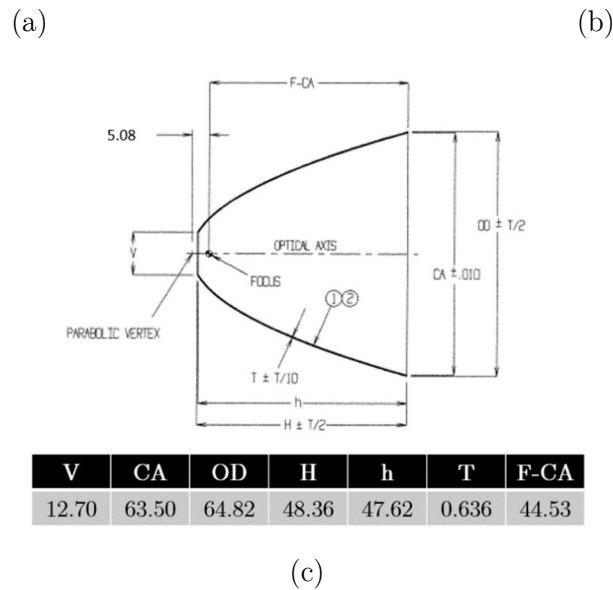


Figura 4.9 Vista en perspectiva del reflector parabólico comercial modelo PA1.06 (Phoenix Electroformed Products, Inc.) (a) nominal, (b) recortado, (c) plano del reflector nominal donde se indican las diferentes dimensiones y tolerancias en mm.

Finalmente, mencionar que la reflectancia angular del reflector parabólico se considera en una de las etapas de la calibración del montaje experimental.

4.4. Calibración del equipo de medida

Nuestro equipo, como todo equipo que realiza medidas, precisa de una etapa de calibración con el fin de disponer de referencias externas con las que comparar las magnitudes que nos proporciona. En nuestro caso hemos realizado dos calibraciones distintas: La primera es una calibración geométrica en la que empleando una malla cuadrículada situada en el plano del difusor nos permite calibrar el efecto de la distorsión del objetivo y obtener una relación fiable entre los distintos puntos del difusor y sus correspondientes imágenes sobre el sensor de la cámara. Esta calibración, de forma indirecta, asegura el valor angular proporcionado por el equipo. La segunda calibración es energética y en ella empleamos un radiómetro externo y un LED Lambertiano, con alimentación controlada, con el fin de poder establecer la relación entre los distintos niveles de gris de la cámara y el flujo radiante recibido para distintos valores angulares.

4.4.1. Calibración geométrica

La calibración geométrica que aplicamos a nuestro sistema de medida sólo será necesaria aplicarla si el objetivo empleado introduce distorsión en las imágenes del difusor, en nuestro caso el objetivo no introduce distorsión alguna por lo que la etapa de calibración geométrica se ha convertido en una etapa de verificación de la ausencia de distorsión. Para verificarlo hemos sustituido el vinillo difusor por una superficie con un patrón rectangular, Figura 4.10 (a), formado por cuadrados de 5 mm de lado.

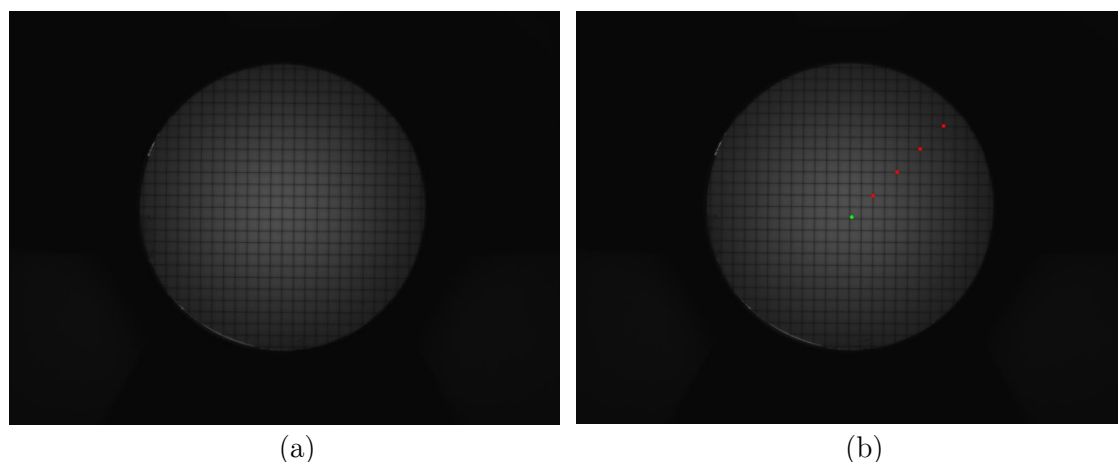


Figura 4.10 (a) Registro utilizado para la calibración geométrica del dispositivo experimental con el objetivo de mostrar que la óptica no introduce distorsión. (b) Registro donde se indica el centro de la imagen mediante un punto verde y las distintas distancias usadas para realizar la calibración.

Una vez obtenido el registro del patrón rectangular, hemos localizado el centro de la imagen, ya que este es el punto respecto al cual definimos el efecto de la distorsión [112]. Seguidamente, hemos localizado el centro del patrón rectangular, así como la posición de distintos vértices dentro del patrón, Figura 4.10 (b). Posteriormente, hemos calculado, usando la relación mm/píxel, sección 4.1, la distancia de los vértices al centro de la imagen y su desviación estándar mediante la propagación de incertidumbres. Finalmente, hemos comparado los valores obtenidos con el valor nominal del patrón rectangular. La Tabla 4.1 muestra ambos conjuntos de valores.

d nominal (mm)	1.298	2.712	4.12	5.54
d medida (mm)	1.285 ± 0.046	2.712 ± 0.098	4.10 ± 0.15	5.50 ± 0.20

Tabla 4.1 Distancias de los puntos de control usados (Figura 4.12 (b) (rojos)) para la calibración geométrica del dispositivo. Primera fila: valores en el registro. Segunda fila: valores nominales del patrón rectangular.

En vista de los valores que presentamos en la Tabla 4.1, podemos confirmar la ausencia de distorsión introducida por la óptica de la cámara. Por lo que no se requiere de aplicar ninguna corrección geométrica a las imágenes registradas.

4.4.2. Calibración energética

La calibración energética del dispositivo experimental se realiza a lo largo de tres fases. En la primera fase, estudiamos la respuesta energética del sensor de la cámara para diferentes tiempos de exposición. En la segunda fase, corregimos la respuesta energética que tiene el sistema para las diferentes condiciones de incidencia de la luz que se dan lugar

en la presente tesis. Finalmente, en la tercera fase, se obtiene la conversión entre el nivel de digitalización y la unidad de potencia W .

Para calibración energética se usará el componente LED Lambertiano, Capítulo 5 sección 5.2, al que aplicamos un voltaje de 2.88 V, y el montaje experimental en la disposición del test óptico en línea.

Primera fase

El estudio que llevamos a cabo en la primera fase es necesario realizarlo ya que en muchas ocasiones, para un tiempo de exposición dado, el rango dinámico del sensor es insuficiente para abordar las diferentes distribuciones energéticas. Si se trabaja con tiempos de exposición excesivamente bajos, se evita la saturación, pero a coste de tener ciertas regiones de la distribución mal muestreadas. Si se trabaja con tiempos de exposición altos, entonces aparece saturación. Como consecuencia, muchas veces se realizan diferentes registros con diferentes tiempos de exposición y luego se combinan las diferentes regiones usando la ley de reciprocidad que presenta el sensor de la cámara. Precisamente esta ley de reciprocidad entre los tiempos de exposición y la respuesta del sensor es la que se quiere encontrar en la presente fase.

Para obtener la respuesta del sensor se coloca el componente LED Lambertiano en la posición nominal, en ausencia de la malla de agujeros, reproduciendo las condiciones del test óptico en línea y se obtienen diferentes registros para los siguientes tiempos de exposición: 25 ms, 50 ms, 100 ms, 200 ms, 400 ms y 600 ms. De cada registro, extraemos el valor máximo de los valores de digitalización y verificamos que cumplen una relación lineal, en nuestro caso los 6 puntos se pueden ajustar mediante una recta con un coeficiente de correlación, $R^2=0.9998$. En la Figura 4.11. (a)-(f) se presentan los registros para cada uno de los tiempos de exposición mencionados y la Figura 4.11 (g) muestra la gráfica entre tiempo de exposición y nivel de digitalización en la que se ha sobrepuesto la recta de ajuste.

De este modo, la ecuación (4.1) nos indica cómo debemos tratar los valores de digitalización obtenidos para diferentes tiempos de exposición:

$$f(x) = 0.34x + 7.13 \quad (4.1)$$

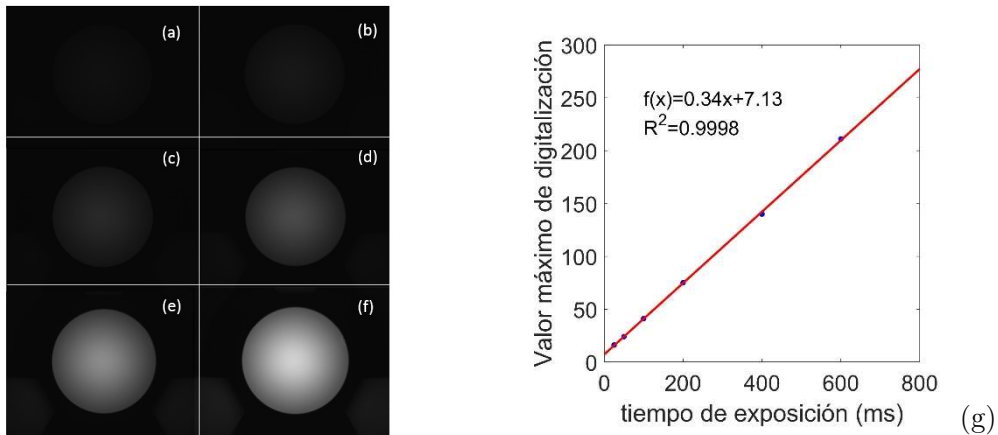


Figura 4.11 (a)-(f) Registros con tiempo de exposición de 25 ms, 50 ms, 100 ms, 200 ms, 400 ms y 600 ms, respectivamente. (g) Los puntos azules representan el valor máximo de los valores de digitalización en función de los diferentes tiempos de exposición. En rojo se muestra la recta con la que se interpola la distribución de valores.

Segunda fase

La segunda fase se implementa con tres objetivos. En primer lugar, queremos saber cómo varía la respuesta energética del sistema de medida en función del campo de visión de nuestra cámara, en segundo lugar, queremos cuantificar dicha respuesta energética para un ángulo de incidencia dado sobre el difusor y en tercer lugar, queremos conocer la influencia del reflector.

Para llevar a cabo esta segunda fase usaremos, de nuevo, el LED Lambertiano como fuente y mediremos la distribución de irradiancia del LED mediante el radiómetro IL1700 Research Radiometer de International Light TechnologiesTM [113], sobre una superficie colocada a 1 m de distancia del componente a intervalos de 100 mm a lo largo de un meridiano principal. La Figura 4.12 muestra la distribución de irradiancia medida (rojo) junto con la distribución de irradiancia teórica esperada de un componente Lambertiano ideal (azul).

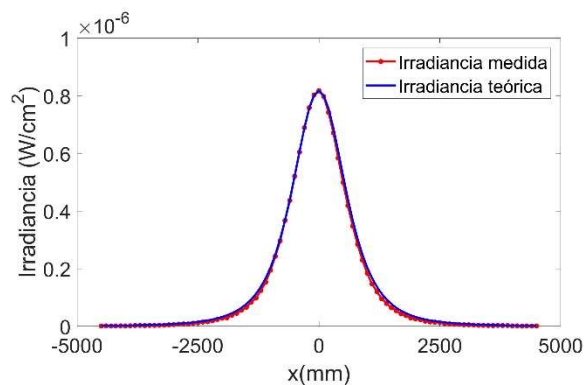


Figura 4.12 Distribución de irradiancia medida (rojo) a intervalos de 100 mm y distribución de irradiancia teórica de un componente Lambertiano ideal (azul).

Se observa que, más allá de variaciones intrínsecas a toda medida experimental, podemos considerar que el componente LED Lambertiano se comporta como un Lambertiano teórico.

Una vez, confirmado el comportamiento Lambertiano del componente que usamos para la calibración estamos en condiciones de abordar el primer objetivo de esta segunda fase: la variación de la respuesta energética a lo largo del campo de la cámara. Con dicho objetivo, colocamos el componente emisor en la posición nominal y tomamos un registro con un tiempo de exposición $t=600$ ms. La Figura 4.13 (a) muestra dicho registro y la Figura 4.13 (b) presenta el corte horizontal del registro (rojo) junto con el corte que debería presentar el componente LED Lambertiano (azul). Se observa como a medida que nos alejamos del centro las dos curvas se distancian. Este hecho nos lleva a concluir que hay una dependencia de la respuesta energética con la posición en la que nos encontremos del campo de la cámara. La Figura 4.13 (c) presenta la función de corrección (rojo) que es necesario aplicar a los registros experimentales para obtener la respuesta correcta y en azul la función de ajuste que es una suma de senos con la siguiente expresión:

$$f(x) = 2.06 \sin(0.03x + 1.56) + 1.51 \sin(0.05x - 1.59) + \quad (4.2)$$

$$+ 4.00 \sin(0.09x + 1.5) + 3.51 \sin(0.09x - 1.60),$$

donde x es la distancia respecto al centro de la superficie difusora en mm.

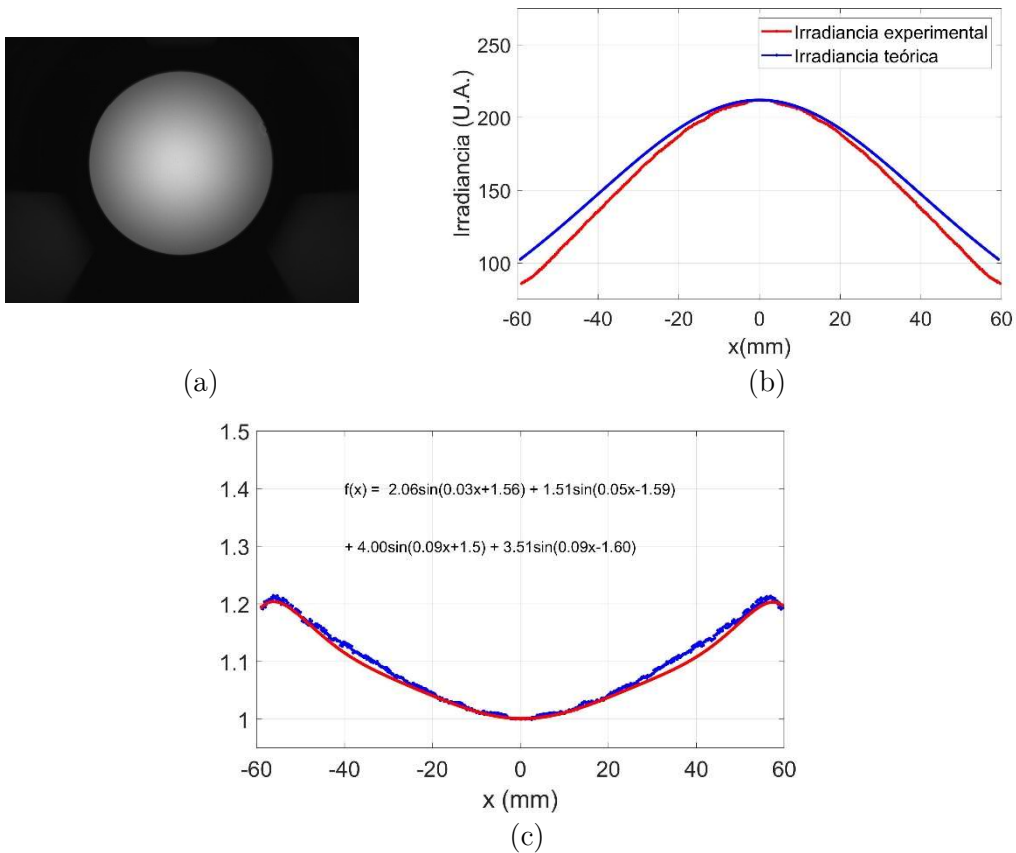


Figura 4.13 (a) Registro con un tiempo de exposición $t=600$ ms. (b) Corte horizontal del registro (rojo) junto con el corte que debería presentar el componente LED Lambertiano (azul). Se observa como a medida que nos alejamos del centro las dos curvas se distancian. (c) En azul observamos los distintos valores por lo que hay que multiplicar los valores experimentales para obtener los valores teóricos para el LED Lambertiano. En rojo se muestra presentamos la función de corrección, ecuación (4.2), que es necesario aplicar a las medidas experimentales para obtener los valores correctos.

Si bien hemos corregido la respuesta energética de nuestro sistema de medida para diferentes posiciones del campo de nuestra cámara, es necesario confirmar que este comportamiento no es debido únicamente al ángulo de incidencia. Por este motivo, realizamos una segunda prueba. Esta segunda prueba consiste en desplazar la fuente emisora de luz horizontalmente y observar cómo cambia el valor del máximo de la distribución. Dado que nosotros conocemos la relación entre píxeles y mm en el registro, sabemos cuántos píxeles se debe desplazar el máximo para un desplazamiento dado del componente.

En esta prueba realizamos dos conjuntos registros. El primer conjunto se realiza en posiciones cercanas de la zona central, $x=0$ mm, desplazando el microposicionado respecto a la posición nominal dentro de su máximo recorrido, Figura 4.14 (a)-(f). El segundo conjunto de registros se realiza alrededor de $x=-21$ mm, Figura 4.14 (g)-(n). Para todas ellas La figura 4.14 (o) representa el valor de su máximo sin aplicar la función de corrección,

ecuación (4.2), y la Figura 4.14 (p) presenta los mismos valores que la Figura 4.14. (o) pero corregidos.

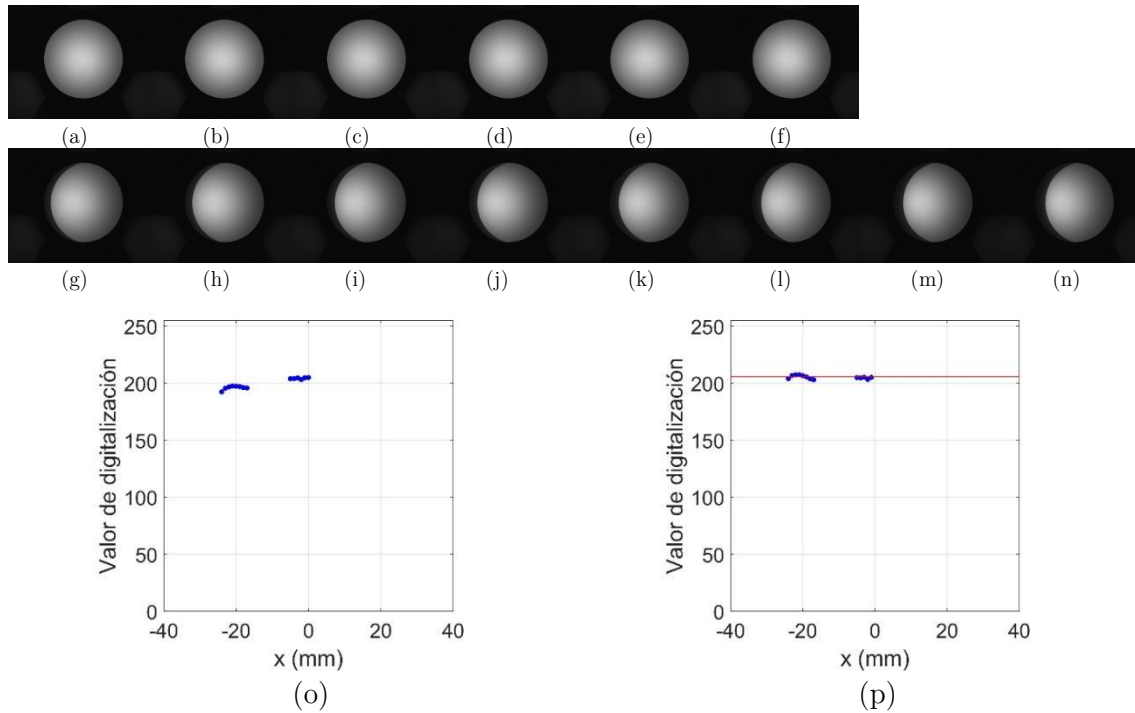


Figura 4.14 (a)-(f) Registros alrededor la zona central, $x=0$ mm para distintas posiciones del microposicionador. (g)-(n) Registros alrededor de la posición $x=-24$ mm. para distintas posiciones del microposicionador. (o) Nivel de digitalización de los máximos sin aplicar la función de corrección de la ecuación (4.2). (p) Niveles de digitalización corregidos.

Puede observarse como una vez aplicada la función de corrección, los valores de digitalización son prácticamente constantes. Este hecho nos lleva a concluir que dentro de la ventada angular con la que trabajamos en el dispositivo experimental, el comportamiento del sistema es aproximadamente independiente del ángulo de incidencia. De este modo, no tenemos que generar una función de corrección adicional.

Por último, para finalizar la fase 2, abordamos la caracterización de la distribución en presencia del reflector parabólico. Primero corregimos la falta de simetría en el registro, Figura 4.15 (a), debido a la presencia de inclinación del reflector, empleando el mismo registro rotado 90° tres veces y posteriormente promediando los cuatro registros. Figura 4.15 (b), 90° ; (c), 180° ; (d), 270° y (e) registro promediado y simétrico.

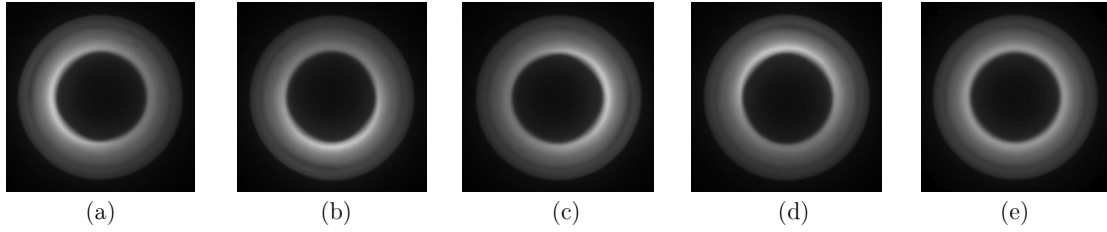


Figura 4.15 (a) Registro original donde presentamos la distribución de irradiancia debida únicamente a la presencia del reflector. (b), (c) y (d) Registro mostrado en (a) rotado 90°, 180° y 270° respectivamente. (e) Registro resultado del promedio de los registros (a), (b), (c) y (d).

Posteriormente empleamos el corte central de la Figura 4.15 (e), Figura 4.16 (a), corregido mediante la ecuación (4.2), Figura 4.16 (b), para obtener el comportamiento energético en la zona donde se ha producido reflexión de la luz sobre el reflector parabólico.

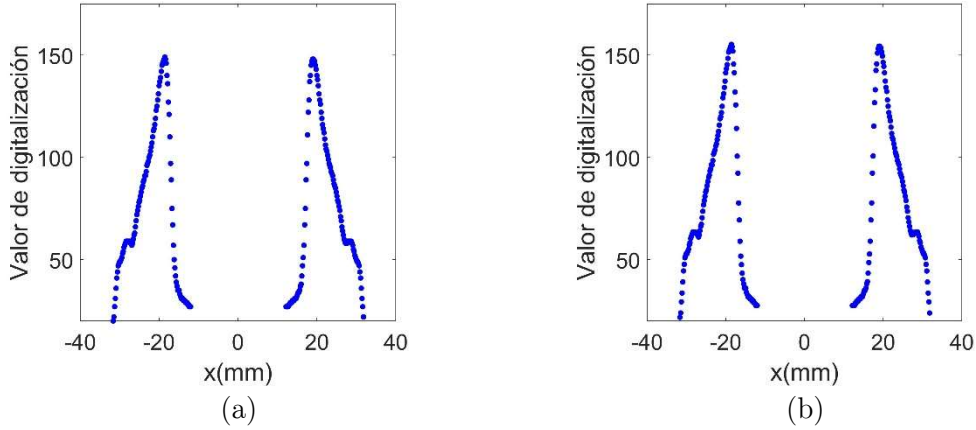


Figura 4.16 (a) Corte horizontal correspondiente al registro que presenta la Figura 4.15 (e) sin corregir. (b) Corte horizontal presentado en (a) corregido mediante la ecuación (4.2).

Para obtener el impacto del reflector parabólico es necesario extraer el comportamiento de la distribución de la Figura 4.16 (b) y corregirlo para que éste tenga un comportamiento Lambertiano. El primer paso es identificar los ángulos que corresponden a los distintos radios del anillo, valores que pueden extraerse de la posición relativa entre el componente LED Lambertiano y el reflector y de la ecuación que define la superficie del reflector.

Como ya hemos mencionado a lo largo de la tesis, el componente se sitúa en la posición de foco del reflector. Si centramos nuestro sistema de coordenadas en la posición del foco, la ecuación del reflector es la que sigue:

$$\frac{x^2}{4F} - F = z. \quad (4.3)$$

Donde z es la componente en la dirección del eje óptico, x es la componente perpendicular al eje óptico y $F=5.08$ mm, es la distancia foco del reflector. Por otro lado, el ángulo que subtende la superficie del reflector desde la posición del foco es:

$$\tan \theta = \frac{x}{z}. \quad (4.4)$$

Si combinamos (4.3) y (4.4), y además, asumimos que una vez que los rayos inciden en el reflector estos emergen paralelos al eje z , la coordenada x de la superficie del reflector coincide con la coordenada x de la superficie del difusor. Como consecuencia, tenemos:

$$\tan \theta = \frac{x}{z} = \frac{4Fx}{x^2 - 4F^2}. \quad (4.5)$$

donde θ es el ángulo de emisión del componente y x es ahora la distancia horizontal sobre el difusor. En nuestro caso, tal y como muestra la Figura 4.16 (b) $x \in [14, 31]$ mm, lo que implica que $\theta \in [71.92^\circ, 36.30^\circ]$.

La Figura 4.17 (a) muestra el corte positivo de la Figura 4.16 (b), al que se ha corregido su nivel de digitalización adaptándolo al que tendría con un tiempo de exposición $t=600$ ms (rojo) mediante la relación que presenta la Figura 4.11, ecuación (4.1), junto a la curva que presenta el componente LED Lambertiano para los ángulos correspondientes al anillo (azul). La Figura 4.17 (b) presenta la función de corrección que interpola los puntos extraídos de la ratio entre curvas que muestra la Figura 4.17 (a).

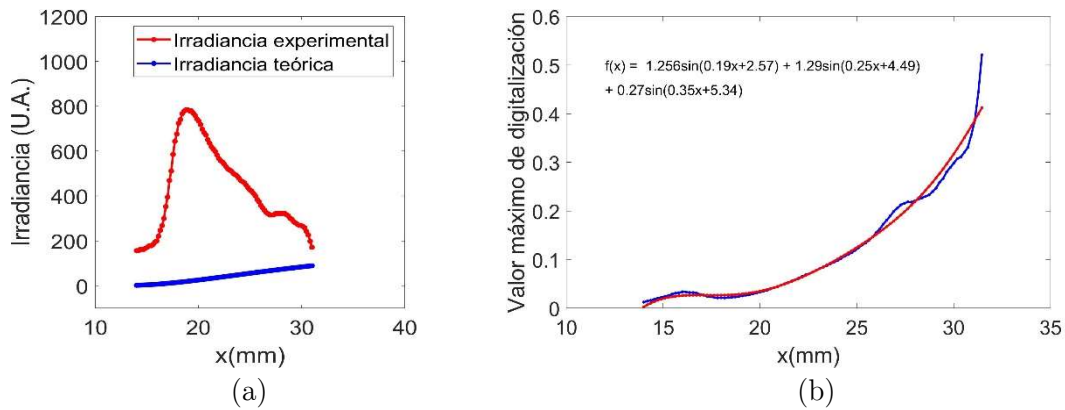


Figura 4.17 (a) (Rojo) Corte positivo de la Figura 4.16 (b), al que se ha corregido su nivel de digitalización adaptándolo al que tendría con un tiempo de exposición $t=600$ ms (rojo) mediante ecuación (4.1). (Azul) Curva que presenta el componente LED Lambertiano para los ángulos correspondientes al anillo. (b) En azul mostramos la relación entre los niveles de digitalización medidos y esperados correspondientes a las líneas rojas y azules de (a). En rojo mostramos la función de corrección, ecuación (4.6), que interpola los puntos la curva azul.

La función interpolada es una suma de senos con la siguiente expresión:

$$f(x) = 1.26 \sin(0.19x + 2.57) + 1.29 \sin(0.25x + 4.49) + 0.27 \sin(0.35x + 5.34), \quad (4.6)$$

donde, de nuevo, x es la distancia respecto al centro de la superficie difusora en mm.

Finalmente, la Figura 4.18 presenta la distribución de irradiancia correspondiente al componente LED Lambertiano que deberíamos obtener, en azul. En rojo, presentamos la distribución que obtenemos una vez aplicadas las correcciones. Ambas curvas se expresan en función del ángulo de emisión, θ .

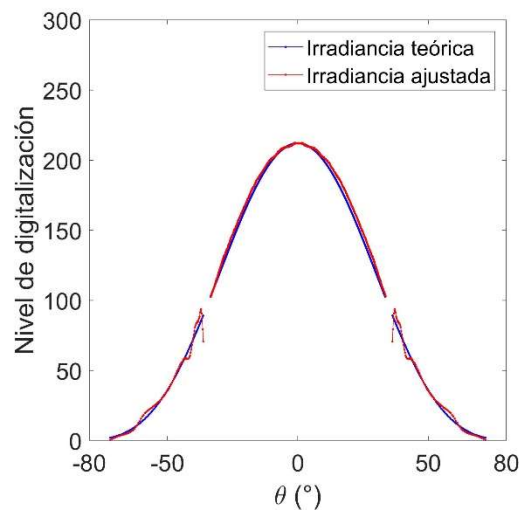


Figura 4.18 (Azul) Nivel de digitalización que deberíamos obtener mediante el uso del equipo de medida. (Rojo) Nivel de digitalización obtenido después de aplicar las funciones de corrección mostradas en el presente capítulo.

Tercera fase

Para finalizar, en la tercera y última fase queremos asociar al nivel de digitalización un valor concreto de W . Con este objetivo, precedemos de la siguiente manera.

En primer lugar, obtenemos la potencia total W , en un área de $50 \times 50 \text{ mm}^2$ en el centro de la distribución de irradiancia medida (W/cm^2) del componente LED Lambertiano situado a 1 m de distancia. Dicha potencia es de $8.11 \cdot 10^{-5} \text{ W}$, Figura 4.19 (a). A continuación, calculamos el ángulo sólido de dicha área, 0.0025 sr , y lo empleamos para calcular a cuántos píxeles equivale en la superficie difusora en nuestro montaje experimental a una distancia de $d = 89.5 \text{ mm}$, obteniendo un valor 25×25 píxeles², Figura 4.19 (b) (cuadrado rojo).

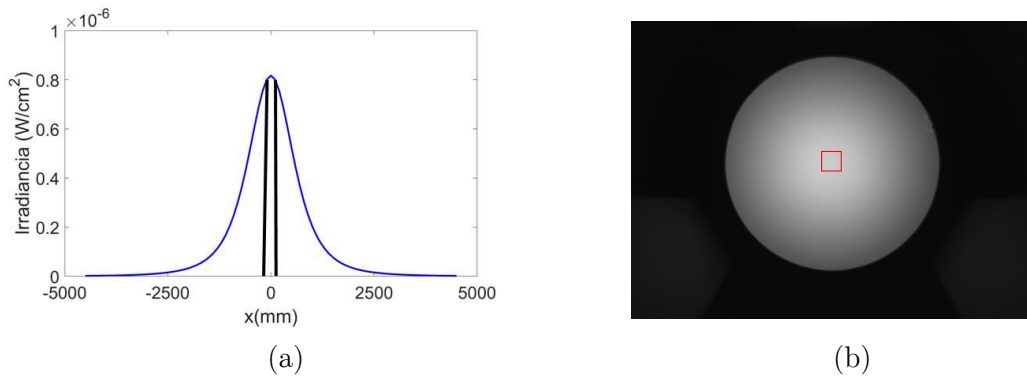


Figura 4.19 (a) Distribución de irradiancia del componente LED Lambertiano medido sobre una superficie a 1 m de este. Entre las dos líneas verticales se indica el área integrada que contiene $8.11 \cdot 10^{-5} \text{ W}$. Registro correspondiente al componente LED Lambertiano, en rojo se indica la zona de 25×25 píxeles² que subtiende el mismo ángulo sólido, en las condiciones de nuestro dispositivo experimental, que la región de integración a 1 metro indicada en (a).

El nivel de digitalización que presenta la zona de píxeles es de $5.26 \cdot 10^5$. Este nivel de digitalización tiene dimensiones de energía, sin embargo, nuestra medida con el radiómetro tiene dimensión de Energía/tiempo, tomando el tiempo en segundos. Como consecuencia, para equipararlas, ambas magnitudes deben presentar las mismas dimensiones. Si dividimos el valor $8.11 \cdot 10^{-5} \text{ W}$ entre el nivel de digitalización, obtenemos la siguiente relación:

$$1 \text{ ND} = 1.54 \cdot 10^{-10} \text{ W} \cdot t_e \quad (4.7)$$

Donde ND es el nivel de digitalización y t_e es el tiempo de exposición en segundos. En nuestro $t_e = 0.6 \text{ s}$, de modo que tenemos la siguiente relación:

$$1 \text{ ND} = 9.25 \cdot 10^{-10} \text{ W} \quad (4.8)$$

4.5. Repetitividad del equipo de medida

Tan importante como la calibración de nuestro equipo de medida es su estudio de repetitividad; por ello hemos sometido a distintas pruebas de repetitividad al equipo en sus tres distintas configuraciones; test óptico en línea, control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) y control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$). Para cada una de las configuraciones hemos seleccionado tres posiciones distintas de la muestra y para cada posición se han realizado 7 registros distintos

4.5.1. Pruebas de repetitividad del test óptico en línea

Las pruebas de repetitividad del test óptico en línea se han llevado a cabo empleando el LED Lambertiano y situándolo en tres posiciones distintas: La posición nominal $(0, 0, 0)$ mm y en dos posiciones más: $\Delta\vec{x}_{r1} = (-0.5, 0, 0)$ mm y $\Delta\vec{x}_{r2} = (-1, 0, 0)$ mm. Para cada una de estas tres posiciones se han realizado 7 registros y para cada uno de éstos se han extraído las magnitudes correspondientes al test óptico en línea: el nivel en escala de grises total y la excentricidad del anillo definido alrededor de la posición del máximo de la distribución.

La Tabla 4.2 muestra las magnitudes asociadas al test óptico en línea para la posición nominal, $\Delta\vec{x}_{r1}$ y $\Delta\vec{x}_{r2}$.

Posición nominal		Posición $\Delta\vec{x}_{r1}$		Posición $\Delta\vec{x}_{r2}$	
digitalización total	ϵ	digitalización total	ϵ	digitalización total	ϵ
$5.46 \cdot 10^7$	0.276	$5.56 \cdot 10^7$	0.328	$5.57 \cdot 10^7$	0.310
$5.61 \cdot 10^7$	0.293	$5.53 \cdot 10^7$	0.297	$5.60 \cdot 10^7$	0.325
$5.61 \cdot 10^7$	0.314	$5.55 \cdot 10^7$	0.297	$5.56 \cdot 10^7$	0.327
$5.54 \cdot 10^7$	0.300	$5.56 \cdot 10^7$	0.288	$5.56 \cdot 10^7$	0.313
$5.58 \cdot 10^7$	0.282	$5.57 \cdot 10^7$	0.323	$5.50 \cdot 10^7$	0.284
$5.58 \cdot 10^7$	0.299	$5.46 \cdot 10^7$	0.311	$5.58 \cdot 10^7$	0.345
$5.53 \cdot 10^7$	0.274	$5.47 \cdot 10^7$	0.281	$5.42 \cdot 10^7$	0.294

Tabla 4.2 Magnitudes obtenidas al aplicar el test óptico de calidad al componente LED Lambertiano situado en la posición nominal, $\Delta\vec{x}_{r1}$ y $\Delta\vec{x}_{r2}$.

Con el objetivo de extraer información relevante de las medidas de repetitividad mostradas en las anteriores tablas, calculamos la media y la desviación estándar para ambas magnitudes, Tabla 4.3.

	Media		Desviación estándar	
	digitalización total	ϵ	digitalización total	ϵ
Nominal	$5.54 \cdot 10^7$	0.291	$5.2 \cdot 10^6$	0.014
$\Delta\vec{x}_{r1}$	$5.53 \cdot 10^7$	0.304	$4.4 \cdot 10^6$	0.018
$\Delta\vec{x}_{r2}$	$5.53 \cdot 10^7$	0.314	$5.8 \cdot 10^6$	0.021

Tabla 4.3 Media y desviación estándar de las magnitudes que obtenemos al aplicar el test óptico para cada una de las tres posiciones: nominal, $\Delta\vec{x}_{r1}$ y $\Delta\vec{x}_{r2}$.

En lo que respecta a la primera magnitud, el nivel de digitalización total, observamos que para la posición nominal, $\Delta\vec{x}_{r1}$ y $\Delta\vec{x}_{r2}$ la media presenta un valor de $5.54 \cdot 10^7$, $5.53 \cdot 10^7$, y $5.53 \cdot 10^7$, respectivamente, mientras que la desviación estándar presenta valores un orden de magnitud más pequeño: $5.2 \cdot 10^6$, $4.4 \cdot 10^6$, $5.8 \cdot 10^6$. Asimismo, los valores de las desviaciones estándar para las tres posiciones son muy cercanos, lo que nos confirma que la repetitividad no depende de la posición en la que se sitúe el componente fotónico.

En lo que respecta a la segunda magnitud, la excentricidad de la zona anular, la media presenta unos valores de 0.291, 0.304 y 0.314 para cada una de las posiciones: nominal, $\Delta\vec{x}_{r1}$ y $\Delta\vec{x}_{r2}$. La desviación estándar es un orden de magnitud menor que el valor de la media, siendo 0.014, 0.018 y 0.021 para cada una de las tres posiciones. De nuevo, los tres valores de las desviaciones estándar son muy cercanos entre ellos, lo que nos permite afirmar que la repetitividad de esta segunda magnitud tampoco depende de la posición del componente fotónico.

4.5.2. Pruebas de repetitividad del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)

Las pruebas de repetitividad del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) se han llevado a cabo de forma análoga a las del test óptico en línea. Se ha elegido el mismo LED Lambertiano situado en la posición nominal (0, 0, 0) mm y en dos posiciones más: $\Delta\vec{x}_{r1} = (-0.5, 0, 0)$ mm y $\Delta\vec{x}_{r2} = (-1, 0, 0)$ mm. De igual modo, para cada una de estas tres posiciones se han realizado 7 registros y para cada uno de éstos se han extraído las magnitudes correspondientes al test óptico en línea: las componentes del vector posición, $\vec{x} = (x, y, z)$ y las asimetrías de las distribuciones de los valores de u y v , $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$. La Tabla 4.4, 4.5 y 4.6 muestran respectivamente dichas magnitudes.

	x (mm)	y (mm)	z (mm)	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$
Nominal	-0.197	0.2855	-49.205	$1.275 \cdot 10^{-3}$	$-3.26 \cdot 10^{-3}$
Nominal	-0.208	0.3013	-49.247	$1.330 \cdot 10^{-3}$	$-3.54 \cdot 10^{-3}$
Nominal	-0.229	0.2994	-49.418	$1.328 \cdot 10^{-3}$	$-3.38 \cdot 10^{-3}$
Nominal	-0.198	0.2876	-49.222	$1.146 \cdot 10^{-3}$	$-3.38 \cdot 10^{-3}$
Nominal	-0.206	0.2821	-49.332	$1.327 \cdot 10^{-3}$	$-3.45 \cdot 10^{-3}$
Nominal	-0.218	0.2919	-49.384	$1.404 \cdot 10^{-3}$	$-3.57 \cdot 10^{-3}$
Nominal	-0.206	0.2893	-49.345	$1.153 \cdot 10^{-3}$	$-3.37 \cdot 10^{-3}$

Tabla 4.4 Valores de las componentes del vector posición $\vec{x} = (x, y, z)$ y de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, asimetrías de la distribución de valores de u y v para la posición nominal del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$).

	x (mm)	y (mm)	z (mm)	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	-0.699	0.2918	-49.203	$9.44 \cdot 10^{-4}$	$-3.26 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	-0.697	0.2914	-49.259	$1.040 \cdot 10^{-3}$	$-3.63 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	-0.705	0.2865	-49.296	$1.045 \cdot 10^{-3}$	$-3.71 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	-0.699	0.2994	-49.245	$1.042 \cdot 10^{-3}$	$-3.57 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	-0.708	0.3016	-49.280	$1.046 \cdot 10^{-3}$	$-3.59 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	-0.712	0.2986	-49.313	$1.038 \cdot 10^{-3}$	$-3.58 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	-0.733	0.2989	-49.388	$8.65 \cdot 10^{-4}$	$-3.26 \cdot 10^{-3}$

Tabla 4.5 Valores de las componentes del vector posición $\vec{x} = (x, y, z)$ y de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, asimetrías de la distribución de valores de u y v para $\Delta\vec{x}_{r1}$ del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$).

	x (mm)	y (mm)	z (mm)	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	-1.177	0.3074	-49.217	$7.54 \cdot 10^{-4}$	$-3.38 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	-1.197	0.3023	-49.179	$8.37 \cdot 10^{-4}$	$-2.95 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	-1.205	0.2918	-49.396	$9.55 \cdot 10^{-4}$	$-3.61 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	-1.204	0.3074	-49.265	$9.49 \cdot 10^{-4}$	$-3.64 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	-1.205	0.2917	-49.394	$9.52 \cdot 10^{-4}$	$-3.65 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	-1.196	0.2988	-49.284	$9.44 \cdot 10^{-4}$	$-3.64 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	-1.189	0.2928	-49.359	$9.57 \cdot 10^{-4}$	$-3.59 \cdot 10^{-3}$

Tabla 4.6 Valores de las componentes del vector posición $\vec{x} = (x, y, z)$ y de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, asimetrías de la distribución de valores de u y v para $\Delta\vec{x}_{r2}$ del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$).

De igual modo que antes, para cada magnitud calculamos la media y la desviación estándar. La Tabla 4.7 muestra la media y la desviación estándar de las componentes del vector posición mientras que la Tabla 4.8 muestra tales variables para la asimetría de u y v : $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$.

	Media (mm)			Desviación estándar (mm)		
	x	y	z	x	y	z
Nominal	-0.209	0.2910	49.307	0.011	0.0071	0.083
$\Delta\vec{x}_{r1}$	-0.707	0.2954	49.283	0.012	0.0055	0.059
$\Delta\vec{x}_{r2}$	-1.196	0.2988	49.299	0.010	0.0070	0.086

Tabla 4.7 Valores de la media y de la desviación estándar del vector posición $\vec{x} = (x, y, z)$. Para la posición nominal, $\Delta\vec{x}_{r1}$ y $\Delta\vec{x}_{r2}$ del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$).

	Media (mm)		Desviación estándar (mm)	
	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$
Nominal	$1.280 \cdot 10^{-3}$	$-3.42 \cdot 10^{-3}$	$9.7 \cdot 10^{-5}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	$1.003 \cdot 10^{-3}$	$-3.51 \cdot 10^{-3}$	$7.1 \cdot 10^{-5}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	$9.07 \cdot 10^{-4}$	$-3.49 \cdot 10^{-3}$	$8.0 \cdot 10^{-5}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$

Tabla 4.8 Valores de la media y de la desviación estándar de, $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, asimetría de la distribución de valores de u y v del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$).

En lo que respecta a las componentes del vector posición $\vec{x} = (x, y, z)$ fijémonos primero en la componente x ya que es la dirección en la que aplicamos el desplazamiento entre las diferentes posiciones. La componente x presenta los siguientes valores medios para cada uno de los 3 desplazamientos: -0.209, -0.707 y -1.196 mm. Podemos observar un desplazamiento constante de -0.5 mm entre desplazamiento para cada valor medio. Asimismo, la desviación estándar para estos valores es de 0.011, 0.012 y 0.010 mm, un orden de magnitud menos que los valores medios. En lo que respecta a las otras dos componentes, y y z observamos que presentan medias alrededor de 0.3 y 49.30 mm respectivamente. Como cabía esperar, las medias y las desviaciones estándar de la

componente x e y son del mismo orden de magnitud. En la dirección z , sin embargo, las desviaciones estándar son cerca de un orden de magnitud mayores que las de las componentes x e y . Este hecho es consecuencia de que el sistema de medida tiene simetría cilíndrica y no esférica. De todas formas, en el caso de la dirección z la desviación estándar es tres órdenes de magnitud menor que el valor de la media.

4.5.3. Pruebas de repetitividad del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)

Las pruebas de calibración de la repetitividad del control óptico de calidad ($\theta > 35$) se han llevado a cabo de forma análoga al control óptico de calidad ($\theta < 35$) con una diferencia en la magnitud de los desplazamientos introducidos. En este caso, se ha colocado el LED Lambertiano en la posición nominal (0, 0, 0) mm y en dos posiciones más: $\Delta\vec{x}_{r1} = (-0.1, 0, 0)$ mm y $\Delta\vec{x}_{r2} = (-0.2, 0, 0)$ mm. La modificación en el desplazamiento se ha realizado ya que debido a la presencia del reflector parabólico para un valor de $\Delta\vec{x}_{r1} = (-0.5, 0, 0)$ mm ya no es posible aplicar el control óptico de calidad ($\theta > 35$) tal como se justificará en la a sección 6.2.3.1.

Para las nuevas posiciones de desplazamiento, del mismo modo que antes, se han realizado 7 registros. En cada registro se han computado las magnitudes correspondientes al control óptico de calidad ($\theta > 35$): las componentes del vector posición, $\vec{x} = (x, y, z)$ y las asimetrías de las dsitrbuciones de los valores de u y v , $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, para el primer conjunto de rayos (antes de interaccionar con el reflector parabólico) y para el segundo conjunto de rayos (después de interaccionar con el reflector parabólico). La Tabla 4.9, 4.10 y 4.11 recogen dichos resultados

	x (mm)	y (mm)	z (mm)	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$
Nominal	0.10	5.70	1859	$-3.12 \cdot 10^{-2}$	$-3.46 \cdot 10^{-2}$
Nominal	0.30	5.20	1893	$-3.11 \cdot 10^{-2}$	$-3.48 \cdot 10^{-2}$
Nominal	9.00	5.70	2185	$-2.87 \cdot 10^{-2}$	$-3.09 \cdot 10^{-2}$
Nominal	6.00	5.90	2113	$-3.03 \cdot 10^{-2}$	$-3.64 \cdot 10^{-2}$
Nominal	5.20	4.40	1770	$-3.18 \cdot 10^{-2}$	$-3.11 \cdot 10^{-2}$
Nominal	8.90	6.00	2071	$-2.61 \cdot 10^{-2}$	$-3.68 \cdot 10^{-2}$
Nominal	5.40	4.20	1928	$-2.75 \cdot 10^{-2}$	$-3.56 \cdot 10^{-2}$

Tabla 4.9 Valores de las componentes del vector posición $\vec{x} = (x, y, z)$ y de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, asimetrías de la distribución de valores de u y v para la posición nominal y el primer conjunto de rayos.

	x (mm)	y (mm)	z (mm)	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	7.20	4.80	2081	$-3.35 \cdot 10^{-2}$	$-3.37 \cdot 10^{-2}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	6.30	2.20	1895	$-3.89 \cdot 10^{-2}$	$-3.06 \cdot 10^{-2}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	4.90	2.80	1897	$-3.72 \cdot 10^{-2}$	$-3.06 \cdot 10^{-2}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	4.20	3.30	1989	$-3.39 \cdot 10^{-2}$	$-3.49 \cdot 10^{-2}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	4.10	5.50	1964	$-3.52 \cdot 10^{-2}$	$-3.22 \cdot 10^{-2}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	4.50	5.80	2081	$-3.64 \cdot 10^{-2}$	$-3.27 \cdot 10^{-2}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	6.10	-3.90	1561	$-3.35 \cdot 10^{-2}$	$-3.30 \cdot 10^{-2}$

Tabla 4.10 Valores de las componentes del vector posición $\vec{x} = (x, y, z)$ y de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, asimetrías de la distribución de valores de u y v para $\Delta\vec{x}_{r1}$ y el primer conjunto de rayos.

	x (mm)	y (mm)	z (mm)	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	9.20	5.50	2143	$-4.09 \cdot 10^{-2}$	$-3.63 \cdot 10^{-2}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	10.00	5.70	2164	$-3.55 \cdot 10^{-2}$	$-3.50 \cdot 10^{-2}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	6.60	4.50	2183	$-3.86 \cdot 10^{-2}$	$-3.33 \cdot 10^{-2}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	2.40	-0.40	1796	$-3.88 \cdot 10^{-2}$	$-3.87 \cdot 10^{-2}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	11.80	3.40	2046	$-4.00 \cdot 10^{-2}$	$-3.49 \cdot 10^{-2}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	12.00	4.60	2362	$-3.29 \cdot 10^{-2}$	$-3.38 \cdot 10^{-2}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	10.40	-4.90	1919	$-3.23 \cdot 10^{-2}$	$-3.62 \cdot 10^{-2}$

Tabla 4.11 Valores de las componentes del vector posición $\vec{x} = (x, y, z)$ y de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, asimetrías de la distribución de valores de u y v para $\Delta\vec{x}_{r2}$ y el primer conjunto de rayos.

Para cada magnitud calculamos la media y la desviación estándar. La Tabla 4.12 muestra la media y la desviación estándar de las componentes del vector posición mientras que la Tabla 4.13 muestra las mismas variables para la asimetría de u y v : $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$.

	Media (mm)			Desviación estándar (mm)		
	x	y	z	x	y	z
Nominal	4.99	5.30	1974	3.62	0.73	151
$\Delta\vec{x}_{r1}$	5.32	2.92	1924	1.20	3.30	177
$\Delta\vec{x}_{r2}$	8.91	2.62	2087	3.39	3.90	186

Tabla 4.12 Valores de la media y de la desviación estándar del vector posición $\vec{x} = (x, y, z)$. Para la posición nominal, $\Delta\vec{x}_{r1}$ y $\Delta\vec{x}_{r2}$ del primer conjunto de rayos.

	Media (mm)		Desviación estándar (mm)	
	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$
Nominal	$-2.95 \cdot 10^{-2}$	$-3.43 \cdot 10^{-2}$	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	$-3.55 \cdot 10^{-2}$	$-3.25 \cdot 10^{-2}$	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	$-3.70 \cdot 10^{-2}$	$-3.55 \cdot 10^{-2}$	$3.3 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$

Tabla 4.13 Valores de la media y de la desviación estándar de, $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, asimetría de la distribución de valores de u y v del primer conjunto de rayos.

Empezamos analizando los valores del vector posición $\vec{x} = (x, y, z)$, al igual que en la sección del control anterior, y dado que el sistema de medida tiene simetría cilíndrica, las componentes x e y tienen un comportamiento semejante entre ellas, mientras que la componente z presenta un comportamiento claramente distinto. En el caso de las componentes x e y la media y la desviación estándar presentan valores del mismo orden de magnitud e indican una repetitividad baja. Tal y como se ha mencionado anteriormente este hecho es debido a que el componente se encuentra cerca de foco. Por otro lado, la componente z presenta valores de la media un orden de magnitud mayores a los valores asociados de la desviación estándar. Sin embargo, los valores son tan cercanos que no se aprecia el efecto del desplazamiento relativo entre los distintos casos.

Respecto a las asimetrías, $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, de la distribución de los valores de u y v , tenemos que para la posición nominal, $\Delta\vec{x}_{r1}$ y $\Delta\vec{x}_{r2}$ $\tilde{\mu}_{3u}$ tiene los siguientes valores: $-2.95 \cdot 10^{-2}$ - $3.55 \cdot 10^{-2}$ y $-3.70 \cdot 10^{-2}$ mientras que $\tilde{\mu}_{3v}$ presenta los siguientes valores: $-3.43 \cdot 10^{-2}$, $-3.25 \cdot 10^{-2}$ y $-3.55 \cdot 10^{-2}$. En primer lugar, observamos que los desplazamientos en la dirección x ahora sí aumenta, debido a la presencia del reflector, el valor de la variable $\tilde{\mu}_{3u}$ respecto a la de $\tilde{\mu}_{3v}$ que presenta valores muy cercanos. Este comportamiento se volverá a ver en el Capítulo 6, donde mostramos las medidas experimentales. En segundo lugar, observamos como los valores de la media y la desviación estándar de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$ son del mismo orden e magnitud, siendo la desviación estándar un orden de magnitud menor que la media.

A continuación, presentaremos los valores obtenidos para el segundo conjunto de rayos (después de interactuar con el reflector parabólico). Las Tablas 4.14, 4.15 y 4.16 muestran respectivamente las magnitudes asociadas al control óptico de calidad ($\theta > 35$) para la posición nominal, $\Delta\vec{x}_{r1}$ y $\Delta\vec{x}_{r2}$.

	x (mm)	y (mm)	z (mm)	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$
Nominal	-0.173	0.192	-48.731	$3.51 \cdot 10^{-4}$	$2,00 \cdot 10^{-3}$
Nominal	-0.169	0.179	-48.583	$4.38 \cdot 10^{-4}$	$1,35 \cdot 10^{-3}$
Nominal	-0.187	0.184	-48.642	$2.94 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \cdot 10^{-3}$
Nominal	-0.187	0.185	-48.670	$4.67 \cdot 10^{-4}$	$1,62 \cdot 10^{-3}$
Nominal	-0.186	0.190	-48.693	$3.65 \cdot 10^{-4}$	$1,50 \cdot 10^{-3}$
Nominal	-0.188	0.185	-48.713	$4.17 \cdot 10^{-4}$	$1,99 \cdot 10^{-3}$
Nominal	-0.189	0.181	-48.771	$4.54 \cdot 10^{-4}$	$1,90 \cdot 10^{-3}$

Tabla 4.14 Valores de las componentes del vector posición $\vec{x} = (x, y, z)$ y de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, asimetrías de la distribución de valores de u y v para la posición nominal y el segundo conjunto de rayos.

	x (mm)	y (mm)	z (mm)	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	-0.324	0.186	-48.637	$8.91 \cdot 10^{-4}$	$1.70 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	-0.295	0.205	-48.717	$1.10 \cdot 10^{-3}$	$1.60 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	-0.324	0.206	-48.670	$1.07 \cdot 10^{-3}$	$1.50 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	-0.324	0.205	-48.698	$9.51 \cdot 10^{-4}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	-0.295	0.214	-48.674	$9.90 \cdot 10^{-4}$	$1.70 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	-0.295	0.212	-48.848	$7.96 \cdot 10^{-4}$	$2.00 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	-0.295	0.207	-48.761	$7.86 \cdot 10^{-4}$	$1.30 \cdot 10^{-3}$

Tabla 4.15 Valores de las componentes del vector posición $\vec{x} = (x, y, z)$ y de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, asimetrías de la distribución de valores de u y v para $\Delta\vec{x}_{r1}$ y el segundo conjunto de rayos.

	x (mm)	y (mm)	z (mm)	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	-0.430	0.205	-49.290	$8.0 \cdot 10^{-4}$	$9.3 \cdot 10^{-4}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	-0.402	0.206	-49.432	$9.2 \cdot 10^{-4}$	$1.30 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	-0.430	0.205	-49.415	$1.15 \cdot 10^{-3}$	$1.40 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	-0.430	0.185	-49.584	$1.35 \cdot 10^{-3}$	$1.60 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	-0.403	0.190	-49.412	$9.3 \cdot 10^{-4}$	$1.30 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	-0.431	0.185	-49.494	$9.6 \cdot 10^{-4}$	$1.20 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	-0.431	0.186	-49.306	$1.05 \cdot 10^{-3}$	$1.30 \cdot 10^{-3}$

Tabla 4.16 Valores de las componentes del vector posición $\vec{x} = (x, y, z)$ y de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, asimetrías de la distribución de valores de u y v para $\Delta\vec{x}_{r2}$ y el segundo conjunto de rayos

Para cada magnitud calculamos la media y la desviación estándar. La Tabla 4.17 muestra la media y la desviación estándar de las componentes del vector posición mientras que la Tabla 4.18 muestra las mismas variables para la asimetría de u y v : $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$.

	Media (mm)			Desviación estándar (mm)		
	x	y	z	x	y	z
Nominal	-0.1828	0.1851	-48.686	$8.2 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-3}$	$6.2 \cdot 10^{-2}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	-0.307	0.2051	-48.714	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$9.2 \cdot 10^{-3}$	$7.1 \cdot 10^{-2}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	-0.422	0.194	-49.42	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-1}$

Tabla 4.17 Valores de la media y de la desviación estándar del vector posición $\vec{x} = (x, y, z)$. Para la posición nominal, $\Delta\vec{x}_{r1}$ y $\Delta\vec{x}_{r2}$ del segundo conjunto de rayos.

	Media (mm)		Desviación estándar (mm)	
	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$
Nominal	$3.98 \cdot 10^{-4}$	$1.68 \cdot 10^{-3}$	$6.3 \cdot 10^{-4}$	$2.8 \cdot 10^{-4}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	$9.40 \cdot 10^{-3}$	$1.69 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	$1.03 \cdot 10^{-2}$	$1.29 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$2.0 \cdot 10^{-4}$

Tabla 4.18 Valores de la media y de la desviación estándar de, $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, asimetría de la distribución de valores de u y v del segundo conjunto de rayos.

Empezamos analizando los valores del vector posición $\vec{x} = (x, y, z)$. Observamos como al aplicar la ley de Snell en los rayos del primer conjunto, recuperamos la precisión en los valores de las componentes. De nuevo, como pasaba en el control óptico de calidad ($\theta < 35$) hay una constante de -0.2 mm en las tres posiciones en x : -0.1828 mm, -0.307 mm y -0.422 mm, respecto a las posiciones introducidas por los microposicionadores: 0 mm -0.1 mm y -0.2 mm. La componente y presenta medias alrededor de 0.2 mm ya que en esta dirección no se introduce ningún desplazamiento. Tanto para la componente x como para la y la desviación estándar presenta un valor un orden de magnitud menor que la media. En el caso de la componente z , la desviación estándar es dos órdenes de magnitud menor que la media, confirmando la simetría cilíndrica del sistema de medida.

Adicionalmente, nos gustaría añadir un comentario acerca de la repetitividad de la componente z entre los dos controles. En el control óptico de calidad ($\theta < 35$), las medias de la componente z son 49.307 mm, 49.283 mm 49.299 y mm. Mientras que para el control óptico de calidad ($\theta < 35$) las medias tienen un valor de: -48.686 mm, -48.714 mm y -49.420 mm. Dado que la posición en z no se ha modificado entre la implementación de los dos test podemos extraer dos conclusiones. En primer lugar, La introducción del reflector provoca que el método de los mínimos cuadrados no reproduzca la misma posición en z que en ausencia del éste. En segundo lugar, los desplazamientos en el plano xy producen variaciones en el valor la componente z . Este hecho de nuevo, es consecuencia de la presencia de pequeñas inclinaciones en el montaje experimental.

Respecto a las asimetrías, $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, de la distribución de los valores de u y v , tenemos que para la posición nominal, $\Delta\vec{x}_{r1}$ y $\Delta\vec{x}_{r2}$ $\tilde{\mu}_{3u}$ tiene los siguientes valores: $3.98 \cdot 10^{-4}$, $9.4 \cdot 10^{-4}$, $1.03 \cdot 10^{-3}$, mientras que $\tilde{\mu}_{3v}$ presenta los siguientes valores: $1.68 \cdot 10^{-3}$, $1.69 \cdot 10^{-3}$ y $1.29 \cdot 10^{-3}$. En primer lugar, observamos que los desplazamientos en la dirección x , como pasaba en el caso del control óptico de calidad ($\theta < 35$), no varía apreciablemente el valor de la variable $\tilde{\mu}_{3u}$ respecto a la de $\tilde{\mu}_{3v}$. En segundo lugar, observamos esta vez que los valores de la media y la desviación estándar de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$ son del mismo orden e magnitud, siendo la desviación estándar un orden de magnitud menor que la media.

Si comparamos los valores de, $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$ con los del control óptico de calidad ($\theta < 35$), notamos que presenta valores muy similares en el caso de $\tilde{\mu}_{3u}$, siendo estos del mismo orden de magnitud. Sin embargo los valores de $\tilde{\mu}_{3v}$ presentan una diferencia de un orden de magnitud, lo que confirma que la introducción del reflector, debido a la presencia de inclinaciones en el montaje experimental, induce cambios en la asimetría.

4.6. Descripción del entorno de simulación

En la presente sección describimos el entorno de simulación utilizado en la presente tesis. En primer lugar, presentamos la motivación del uso de un entorno simulado en la presente tesis. En segundo lugar, presentamos brevemente el software de simulación utilizado, así como los elementos que utilizamos en las simulaciones.

En la presente tesis hemos desarrollado una estrategia de medida y un dispositivo experimental que permite implementarla. Ambos se han utilizado, tal y como mostramos en el Capítulo 6, para evaluar de forma satisfactoria los componentes fotónicos. Sin embargo, el entorno simulado presenta ventajas respecto al entorno experimental que deben ser tenidas en cuenta. Gracias a permitir la ubicación teórica precisa de los elementos que forman parte del dispositivo de medida y de los propios componentes fotónicos se pueden abordar estudios sobre posible casuística de defectos en los componentes fotónicos más amplia que la que nos permite el entorno experimental. Con este objetivo añadimos el entorno simulado en la presente tesis.

Descripción del software

El entorno de simulación que utilizamos en la presente tesis es el programa de diseño óptico ZemaxTM distribuido por la empresa Zemax LLC [114]. Zemax presenta un entorno de diseño optimizado para la formación de imagen y otro entorno de diseño optimizado para sistemas de iluminación. Dado que en la presente tesis utilizamos componentes fotónicos no formadores de imagen, sino que estamos interesados en la distribución de flujo radiante que presentan, describimos únicamente el entorno optimizado para sistemas de iluminación.

El entorno optimizado para sistemas de iluminación, se basa en la definición de un espacio tridimensional en el cual el usuario puede definir y colocar diferentes tipos de objetos mediante el uso de un menú (Figura 4.20).

Object Type	Comment	Ref Object	Inside Of	X Position	Y Position
1	CAD Part:.. tx_optica_mue..	0	0	-0.780	3.250
2	Source Re..	0	1	0.000	0.000
3	CAD Part:.. malla_buena.s..	0	0	0.000	0.000
4	Annulus diaf_malla	0	0	0.000	0.000
5	Annulus diaf_sensor	0	0	0.000	0.000
6	Detector ..	0	0	0.000	0.000

Figura 4.20 Menú de ZemaxTM en el que se definen las características de los objetos que se crean: posición, dimensiones, parámetros ópticos, etc.

Descripción de los objetos simulados

La descripción de los objetos se ha clasificado de la siguiente manera. En primer lugar, presentar las tres categorías en las que pueden dividirse: modelos 2D y 3D, fuentes y sensores. En segundo lugar, presentamos la reproducción del control óptico de calidad ($\theta > 35$) mediante la conjunción de varios de estos objetos.

Modelos 2D y 3D

ZemaxTM permite tanto la importación de modelos 2D y 3D desde programas de modelado mecánico como la creación de estos modelos internamente. De este modo se permite la

creación y colocación y orientación de modelos de lentes mediante la asignación de un diámetro, un radio, una conicidad y un material, entre otros parámetros, Figura 4.21 (a). Del mismo modo también pueden crearse superficies 2D como por ejemplo coronas circulares, mediante la definición de un radio interior y un radio exterior, Figura 4.21 (b).

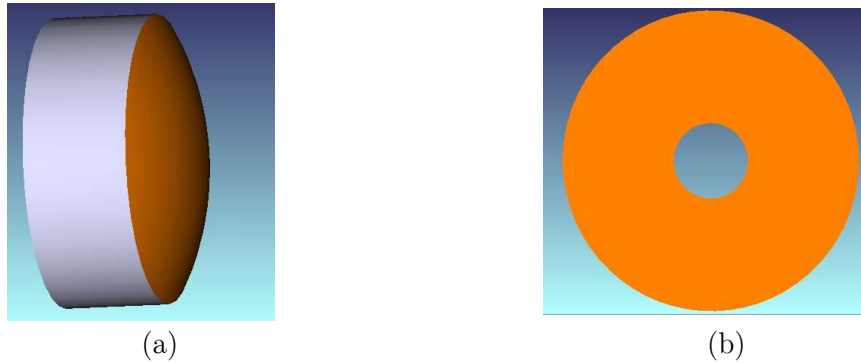


Figura 4.21 (a) Vista en perspectiva de una lente creada en el entorno de ZemaxTM. (b) Vista frontal de una corona creada en el entorno de ZemaxTM.

Fuentes

Las fuentes son los objetos desde los cuales ZemaxTM propaga los rayos. ZemaxTM permite la creación de fuentes de distintos tipos, como por ejemplo las fuentes puntuales y las fuentes rectangulares. En la presente tesis hemos utilizado el tipo de fuente rectangular definida por la altura y anchura de la fuente y el número de rayos que esta propagará. El parámetro con el cual se controla la distribución de intensidad radiante asociada a la fuente es el exponente del coseno, $I = I_0(\cos\theta)^n$, si el valor que se elige es 1, la fuente presenta una distribución de intensidad radiante Lambertiana. La Figura 4.22 muestra una fuente rectangular con algunos de sus rayos asociados.

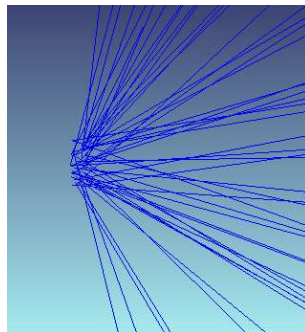


Figura 4.22 Vista de una fuente rectangular definida dentro del entorno de ZemaxTM. Puede observarse que no están definidas visualmente mediante una superficie sino por las coordenadas desde donde emergen los rayos indicados en azul.

Sensores

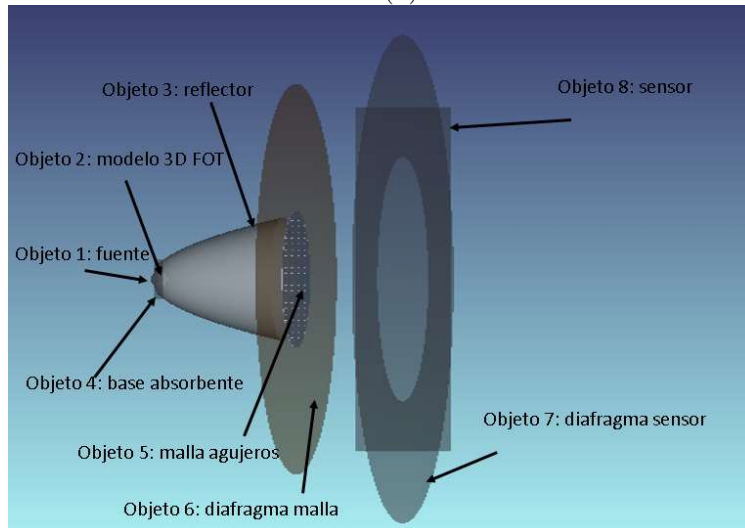
Los sensores son los objetos que utiliza el usuario en Zemax™ para cuantificar las diferentes magnitudes radiométricas asociadas al sistema que se está simulando. Hay diferentes tipos de sensores, en nuestro caso sólo hemos utilizado sensores rectangulares, cuyos parámetros principales son las dimensiones y el número de píxeles. De la relación entre ambos, Zemax™ asocia a los píxeles el tamaño correspondiente.

Reproducción del dispositivo del control óptico de calidad ($\theta > 35$) para el componente FOT

Una vez presentado brevemente los diferentes objetos de los que disponemos en Zemax™, con el objetivo de mostrar claramente como hemos reproducidos el entorno experimental, mostramos la reproducción del dispositivo del control óptico de calidad ($\theta > 35$) en el entorno simulado. De este modo podemos ilustrar como se han simulado dentro del entorno de Zemax™ los diferentes elementos optomecánicos junto con uno de los componentes evaluados en la presente tesis: el componente FOT. La Figura 4.23 (a) presenta el menú de Zemax™ donde se presentan los objetos utilizados para el entorno simulado del control óptico de calidad ($\theta > 35$) aplicado al componente FOT. La Figura 4.23 (b) presenta una vista en perspectiva de cada uno de los elementos presentados en el menú. El objeto 1 corresponde al modelo 3D del encapsulado del componente FOT, el objeto 2 corresponde a la fuente rectangular, el objeto 3 es el reflector parabólico, el objeto 4 es un rectángulo absorbente con el objetivo de bloquear los rayos emitidos hacia atrás, el objeto 5 es el modelo 3D de la malla de agujeros, el objeto 6 es el diafragma de la malla de agujeros, el objeto 7 es diafragma del sensor y por último, el objeto 8 el sensor. Nótese que, en el entorno simulado, el papel que llevan a cabo la cámara y la superficie difusora es reemplazada por un sensor debidamente diafragmado.

Object Type	Inside Of	X Position	Y Position
1 CAD Part:..	0	-0.780	3.250
2 Source Re..	1	0.000	-0.600
3 Standard ..	0	0.000	0.000
4 Rectangle	0	0.000	0.000
5 CAD Part:..	0	0.000	0.000
6 Annulus	0	0.000	0.000
7 Annulus	0	0.000	0.000
8 Detector ..	0	0.000	0.000

(a)



(b)

Figura 4.23 (a) Menú de Zemax™ donde se presentan los objetos utilizado para la reproducción en el entorno simulado del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) aplicado al componente FOT. (b) Vista en perspectiva de cada uno de los elementos presentes en el menú de (a): el modelo 3D del encapsulado del componente FOT, la fuente rectangular, el reflector parabólico, un rectángulo absorbente con el objetivo de bloquear los rayos emitidos hacia atrás, el modelo 3D de la malla de agujeros, el diafragma de la malla de agujeros, diafragma del sensor y el sensor.

5. Componentes medidos

El presente capítulo presentamos los 3 componentes fotónicos que han sido medidos con el equipo desarrollado en la presente tesis: el componente FOT (Fiber Optic Transmitter), un componente LED Lambertiano y el mismo componente LED con una lente secundaria. Para cada uno de ellos se justifica su inclusión, se especifican sus dimensiones y propiedades electroópticas.

5.1. Componente FOT

Tal como hemos mencionado en la introducción de la tesis su objetivo general es el desarrollo de una estrategia de medida que permita validar la funcionalidad óptica de componentes fotónicos. La motivación que subyace tras este desarrollo es el interés de SnellOpticsTM de poder validar, en línea la producción, los componentes FOT desarrollados en consorcio con QPOTM. Así pues, la inclusión de los componentes FOT en esta tesis es una consecuencia natural y directa del entorno en que se realiza.

La Figura 5.1 muestra varias fotografías del componente FOT, en las tres fotografías puede observarse que la encapsulación del componente y la superficie que actúa como óptica forman parte de la misma pieza de material plástico. Esto es consecuencia de que la encapsulación del componente fotónico y la dotación de funcionalidad óptica se realiza en un mismo proceso de inyección.

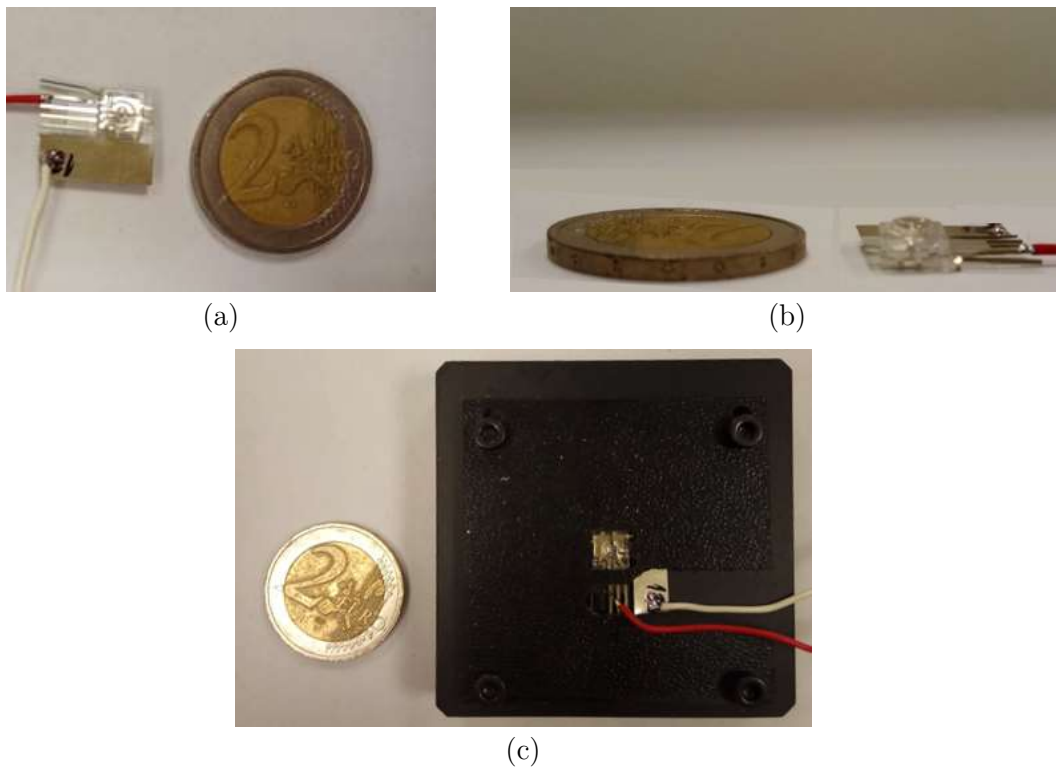


Figura. 5.1 Componente FOT (a) Vista superior (b) Vista lateral (c) Vista superior con en el zócalo fabricado con el fin de adaptarlo al equipo de medida.

Geometría del componente FOT

La Figura 5.2 muestra, en el modelo 3D y las dimensiones más relevantes del componente FOT. En la vista de la Figura 5.2 (a) se muestra la vista del encapsulado, concretamente, la superficie óptica del componente es la que se encuentra limitada por la corona anular. En la vista de la Figura 5.2 (b) se muestra una sección lateral donde se indican las dimensiones de la pieza y del chip del LED así como la distancia axial entre el chip del LED y la superficie óptica.

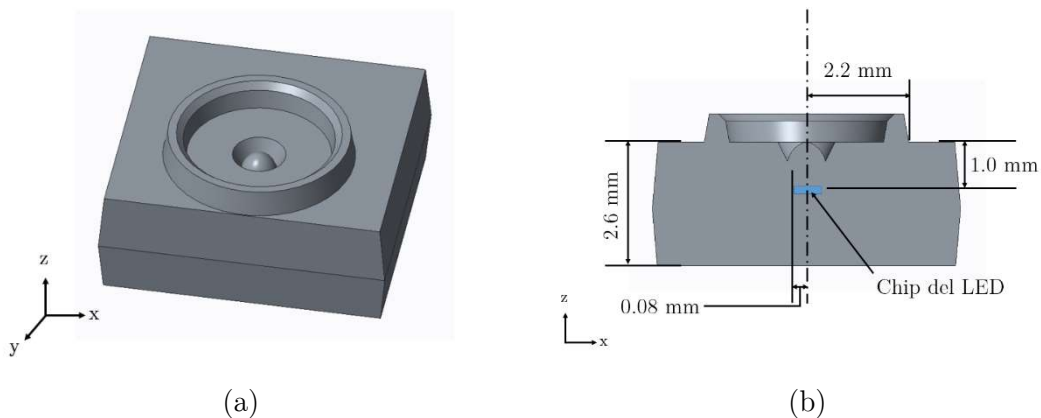


Figura 5.2 (a) Vista del modelo 3D de la pieza que supone tanto la encapsulación como la óptica del componente FOT. (b) Sección lateral del modelo 3D donde se indican las dimensiones de éste así como las dimensiones y posición del chip del LED (azul).

Tal y como se observa, la superficie óptica cuenta con dos regiones bien diferenciadas. Una región que presenta una superficie cónica y una región plana. La región cónica tiene el objetivo de refractar la luz emitida por el chip del LED para que la gran mayoría de la luz emitida emerja del componente fotónico dentro de una ventana angular de $\pm 7.5^\circ$. Dicha ventana angular está definida por la apertura numérica de la fibra óptica a la que se acopla el componente FOT. Por otro lado, la mayoría de los rayos que inciden en la superficie plana sufren reflexión total interna, de modo que no emergen directamente del componente fotónico.

El componente se fabrica empleando un polímero de olefina cíclica (COP, por sus siglas en inglés) en el proceso de inyección del componente, dicho material es el que le configura propiedades óptica y mecánicas al componente FOT.

Propiedades optoelectrónicas del componente FOT

Del emisor LED

El LED que forma parte del componente FOT es el modelo SR65-1T001 fabricado por la empresa Optowell™ [115]. Sus principales características como fuente de luz se especifican en la Figura 5.3, (a) representa el flujo radiante (mW) total emitido en función de la corriente aplicada (mA) (curva roja). Adicionalmente, el fabricante, añade la curva de tensión (V) en función de la corriente (mA) (curva azul). La Figura 5.3 (b) representa la distribución de intensidad radiante en escala porcentual. Recordemos que la intensidad radiante tiene dimensiones de energía entre estereorradián. La Figura 5.3 (b) nos indica como varía la energía emitida por estereorradián en función del ángulo con el que se emite. Necesariamente esta figura debe estar expresada en unidades relativas (en este caso en %), pues para conocer los valores absolutos debemos hacer uso de la información que contiene la Figura 5.3 (a).

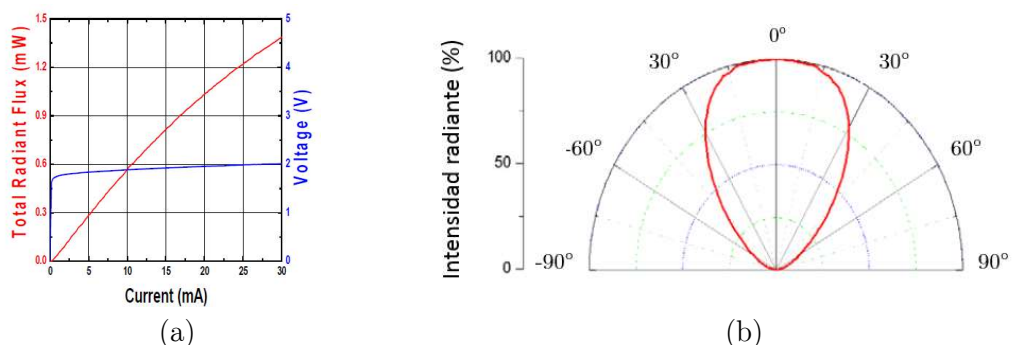


Figura 5.3 (a) (Rojo) Flujo radiante total emitido (mW) por el chip del LED del componente FOT en función de la corriente de trabajo (mA) de éste. (Azul) Tensión (V) que presenta el chip del LED del componente FOT en función de la corriente de trabajo (mW) de éste. (b) Curva que define la intensidad radiante (unidades relativas) del chip del LED del componente FOT en función del ángulo de emisión ($^\circ$).

Adicionalmente es necesario conocer el espectro de emisión del componente fotónico. La Figura 5.4 presenta la intensidad el espectro de emisión, de nuevo en unidades relativas, para las diferentes longitudes de onda en que emite el chip del LED. Esta información se debe tener en cuenta en el montaje experimental para evitar elementos que bloquen las longitudes de onda que emite el componente.

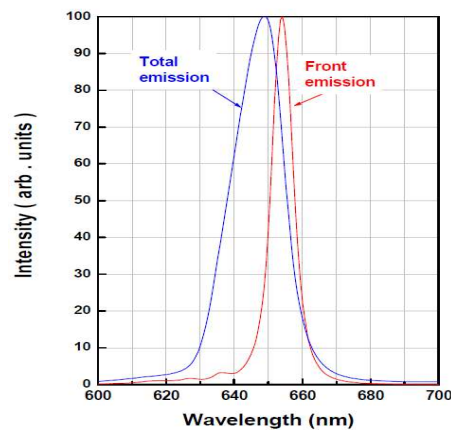


Figura 5.4 Intensidad el espectro de emisión (unidades relativas), para las diferentes longitudes de onda en que emite el chip del LED del componente FOT.

Del componente FOT

Las propiedades de componente FOT son el resultado de sobreponer las propiedades del LED con el comportamiento del encapsulado y su funcionalidad óptica, en este proceso modificamos la distribución de la intensidad radiante. En nuestro caso la intensidad radiante esperada es la que se representa en la Figura 5.5 y se ha obtenido mediante simulación.

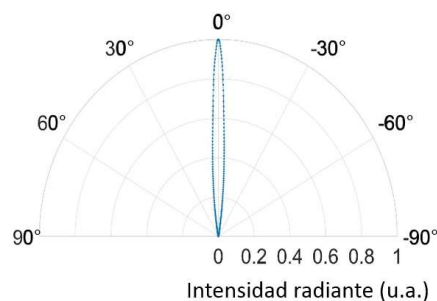


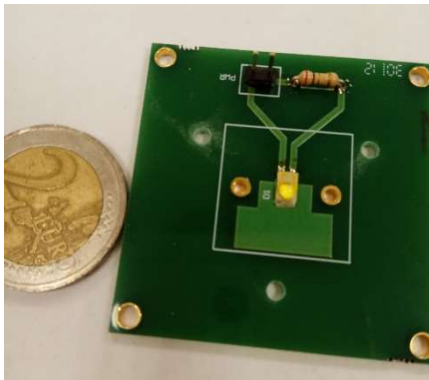
Figura 5.5 Intensidad radiante simulada (unidades relativas) del componente FOT en función del ángulo de emisión ($^\circ$). El FWHM de la distribución se encuentra en $\pm 3.5^\circ$

Podemos observar que, con el objetivo de que la gran mayoría de energía sea emitida dentro de una ventana angular de $\pm 7.5^\circ$, la intensidad radiante del componente FOT presenta una abertura de $\pm 3.5^\circ$ a media altura (FWHM)

5.2. Componente LED Lambertiano

El componente LED Lambertiano se incluye en la presente tesis por dos motivos: Para poder disponer de un componente comercial de referencia y porque, nominalmente, tiene una distribución de intensidad radiante Lambertiana. De la gran cantidad de LED con distribución Lambertiana disponibles en el mercado hemos seleccionado el LXML-PWN1-0100 de LUMILEDS™ [116] por ser de amplio uso en la producción de componentes para la automoción y la iluminación.

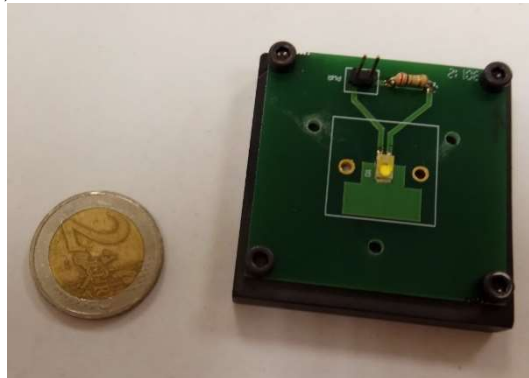
La Figura 5.6 (a) y (b) muestran respectivamente una vista superior y lateral del componente LED Lambertiano conectado en una PCB (de color verde) y la Figura 5.6 (c) muestra el componente junto a la PCB atornillada a la pieza mecánica que permite situar con precisión el componente en nuestro equipo de medida.



(a)



(b)



(c)

Figura. 5.6 Componente LED Lambertiano conectado en una PCB (de color verde). (a) Vista superior. (b) Vista lateral. (c) Vista superior de la PCB atornillada a la pieza mecánica para su colocación en el equipo de medida.

Puede observarse que sobre el chip del LED (amarillo) hay una lente de silicona ($1.37 < n < 1.57$) encargada de que la emisión del componente sea Lambertiana.

Geometría del componente LED Lambertiano

Las dimensiones de la superficie óptica del componente y la posición y dimensiones del chip del LED se muestran en la Figura 5.7. La Figura 5.7 (a) muestra el modelo 3D de la óptica de silicona del componente fotónico (gris), que tiene forma de casquete semiesférico y el chip del LED (azul). La Figura 5.7 (b) muestra una sección donde se indican el radio de dicho casquete y el tamaño y la posición del chip del LED.

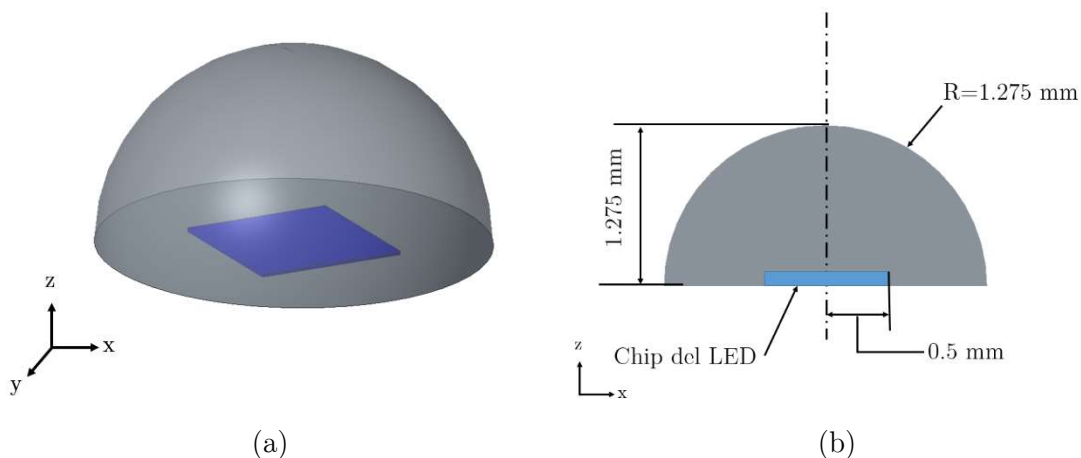


Figura 5.7 (a) Vista del modelo 3D de la lente de silicona (gris) que dota de distribución Lambertiana al componente LED y del chip del LED (azul). (b) Sección lateral de la lente de silicona (gris) y del chip del LED (azul) donde se indican las dimensiones de éstos.

Propiedades optoelectrónicas del componente LED Lambertiano

El componente LED Lambertiano que hemos utilizado en la presente tesis forma parte de una familia de componentes de gran uso en las aplicaciones industriales y se caracteriza por presentar variaciones energéticas pequeñas entre ellos. En el caso del componente elegido a una corriente de 350 mA éste emite un flujo luminoso de 180 lúmenes.

La Figura 5.8 (a) muestra la variación del flujo luminoso nominal respecto a la corriente de trabajo. Puede observarse que la unidad de flujo luminoso relativo corresponde a 350 mA. Todos los componentes de la familia LXML-PWN1 comparten esta curva y para obtener valores absolutos de flujo luminoso hay que multiplicarla por el valor de flujo típico correspondiente al componente, 180 lúmenes en el caso del modelo LXML-PWN1-0100.

La Figura 5.8 (b) presenta la distribución de intensidad lumínica en escala porcentual. Como hemos explicado en el caso del FOT, para dotar de valores absolutos a la distribución de intensidad lumínica hay que conocer la corriente de trabajo y hacer uso de la Figura 5.8 (a).

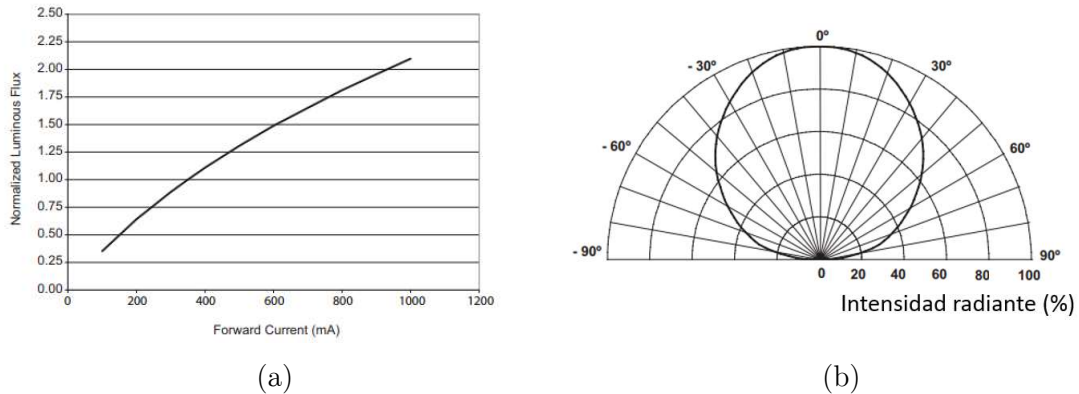


Figura 5.8 (a) Flujo luminoso total emitido (unidades relativas) por el chip del LED del componente LED en función de la corriente de trabajo (mA) de éste. En el caso de nuestro componente, LXML-PWN1-0100, para tener unidades absolutas, debe multiplicarse la curva por 180 lúmenes. (b) Curva de intensidad radiante (unidades relativas) del componente LED Lambertiano en función del ángulo de emisión ($^{\circ}$).

Finalmente, la Figura 5.9 presenta la distribución espectral de emisión en valores relativos para las diferentes longitudes de onda que forman parte del espectro visible.

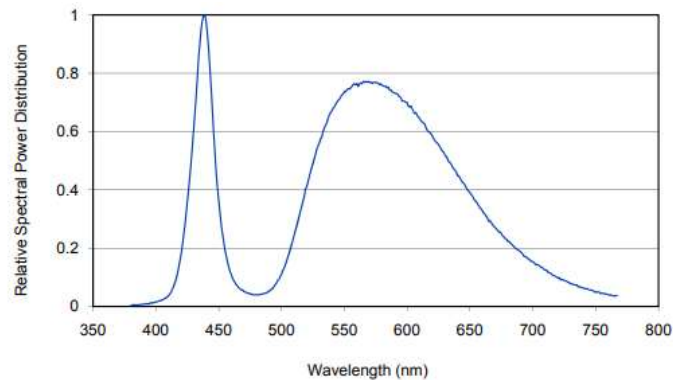


Figura 5.9 Intensidad el espectro de emisión (unidades relativas), para las diferentes longitudes de onda en que emite el componente LED Lambertiano.

5.3. Componente LED Lambertiano con lente secundaria

Hemos completado la selección de componentes fotónicos utilizados en esta tesis doctoral con un componente, diseñado por SnellOpticsTM, que presenta su emisión predominante para ángulos grandes con el fin de disponer de un componente con el que completar el análisis funcional de la estrategia de medida implementada.

El componente está formado por el LED Lambertiano descrito anteriormente, al que se ha añadido una óptica secundaria diseñada por SnellOpticsTM que modifica la distribución

Lambertiana del componente LED de tal modo que el conjunto distribuye la mayor cantidad de energía radiante emitida más allá de los 35° . Hemos incluido un componente con esta funcionalidad ya que es muy común en la iluminación de calles y carreteras.

Las Figuras 5.10 (a) y (b) muestran respectivamente una vista superior y lateral del componente LED Lambertiano con la lente secundaria diseñada por SnellOpticsTM fabricada en PMMA. Del mismo modo que antes, se ha añadido una vista, Figura 5.10 (c), donde se muestra la PCB atornillada a la pieza mecánica que permite situar con precisión el componente respecto a nuestro equipo de medida.

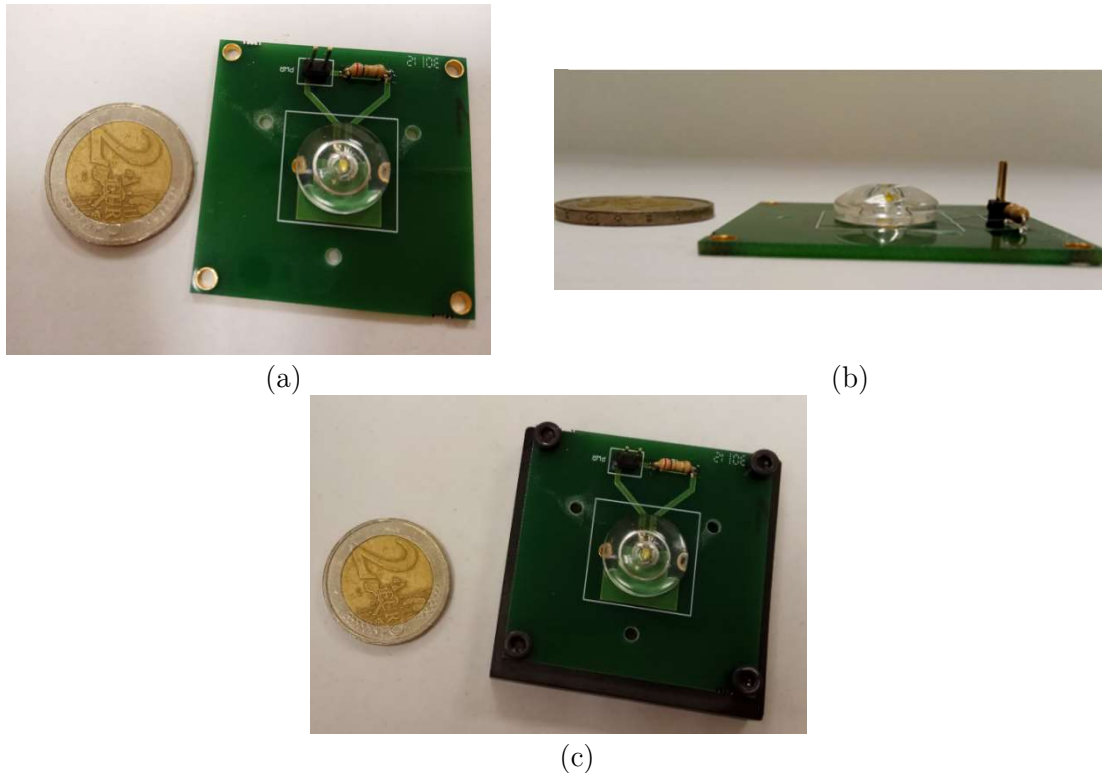


Figura 5.10 Componente LED Lambertiano con un modelo de lente secundaria conectado en una PCB. (a) Vista superior. (b) Vista lateral. (c) Vista superior con el componente atornillado a la pieza mecánica que sirve para ubicarlo en el equipo de medida.

Geometría del componente LED Lambertiano con lente secundaria

A continuación, mostramos las dimensiones de la lente secundaria y las distancias entre el componente LED Lambertiano y ésta. La Figura 5.11 (a) muestra el modelo 3D de lente secundaria. La Figura 5.11 (b) muestra una sección del conjunto, donde se indican las dimensiones de la lente secundaria, así como la posición de la lente de silicona del componente LED Lambertiano respecto a la lente secundaria.

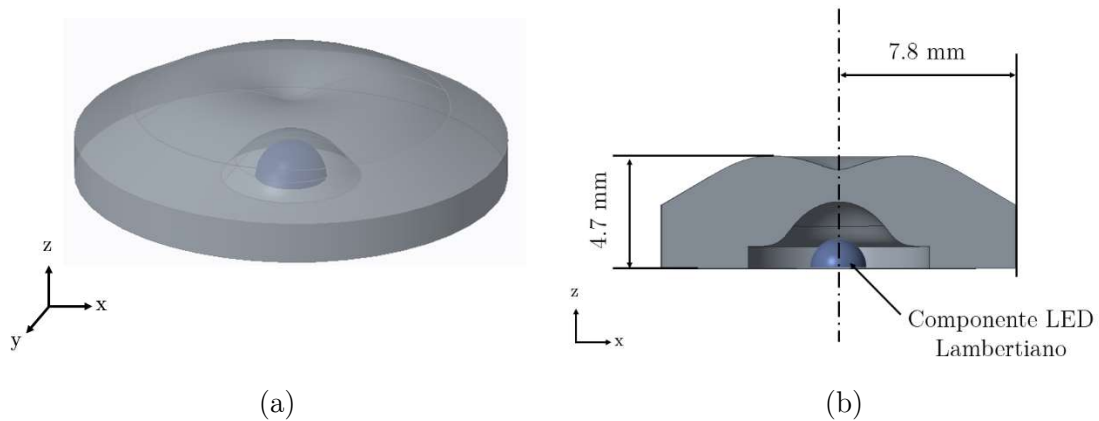


Figura 5.11 (a) Vista del modelo 3D de la lente secundaria (gris) colocada sobre el componente LED Lambertiano (azul). (b) Sección lateral del modelo 3D de la lente secundaria (gris) colocada sobre el componente LED Lambertiano (azul) donde se indican las dimensiones de ésta.

Propiedades optoelectrónicas del componente LED Lambertiano con lente secundaria

El comportamiento optoelectrónico es el mismo que el del LED Lambertiano, pues comparten fuente de emisión. Sin embargo, dado que hemos añadido una lente secundaria la intensidad radiante del sistema ya no es Lambertiana sino que presenta la distribución que muestra la Figura 5.12.

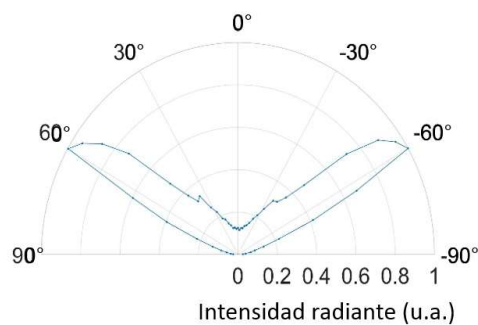


Figura 5.12 Intensidad radiante medida (unidades relativas) del componente LED Lambertiano con la lente secundaria. Se observa como la distribución presenta los máximos alrededor de $\pm 60^\circ$.

Tal y como hemos mencionado en la presentación del componente, observamos como la distribución de intensidad radiante presenta sus máximos alrededor de $\pm 60^\circ$, más allá de los 35° . Dado que nuestra estrategia de medida aborda de forma distinta los rayos emitidos a menos y a más de 35° tener componentes cuyo comportamiento difiere claramente a partir de 35° , ofrece más amplitud a la casuística que aborda la presente tesis.

5. COMPONENTES MEDIDOS

6. Medidas experimentales

En este capítulo presentamos las medidas experimentales de los tres componentes descritos en el capítulo anterior. Para cada uno de ellos se ha realizado una pequeña introducción de su funcionalidad experimental demandada y de los requisitos que ello impone en las funciones de mérito y criterios de calidad asociados. Posteriormente se implementan las estrategias de medida presentadas en el capítulo 3 y se realiza un breve comentario sobre los resultados.

Los registros presentados en este capítulo, medidos o simulados, tiene un tamaño de 240x175 mm² con un muestreo de 1294x970 píxeles² y la superficie de interés se limita a un círculo de 62.5 mm radio. Todos los registros tienen un nivel de digitalización de 256 niveles, los simulados se han normalizado a su valor máximo y en los experimentales se ha garantizado que no haya saturación de píxeles².

6.1. Componente FOT

La funcionalidad óptica requerida al componente FOT, presentado en la sección 5.1, es la de permitir el acoplamiento del mismo con una fibra óptica de telecomunicaciones y, para ello se debe caracterizar la dirección y forma del cono de luz que emite el componente. Experimentalmente contamos con un FOT comercial que nos proporciona información sobre los requisitos aceptados en el mercado, y con los dos primeros conjuntos de pruebas de FOTs cuya fabricación y diseño óptico ha estado bajo la responsabilidad de SnellOpticsTM. En el primer conjunto de pruebas los ángulos de emisión son mucho mayores que los demandados y en el segundo conjunto de pruebas los componentes presentan un ángulo de emisión correcto pero desalineado respecto al eje del componente.

Las medidas de los FOTs se presentan organizadas de la siguiente forma: Para el FOT comercial, debido a su bajo nivel de energía radiante y al desconocimiento exacto de su composición y estructura sólo se realizará su medida aplicando la configuración del test óptico en línea.

El primer conjunto de pruebas se medirá aplicando las configuraciones del test óptico en línea y del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) pero no será necesario realizar medidas aplicando la configuración del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) ya que con el control ($\theta < 35^\circ$) es suficiente para aportar información del tipo de defecto en el proceso de fabricación.

El segundo conjunto también se medirá aplicando la configuración del test óptico en línea, pero al presentar el eje de emisión del cono de irradiancia una desviación mayor de

35° los registros no alcanzan un nivel de irradiancia significativo y sólo tiene sentido realizar medidas aplicando la configuración de control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$). Con éste último seremos capaces de determinar la presencia de desalineado interno en el proceso de fabricación y adicionalmente, empleando el análisis del valor de la irradiancia de los spots, descrito en el apartado II de la sección 3.3.2.2, seremos capaces de identificar el origen de los rayos que no parten de la lente del componente FOT.

6.1.1. Medidas empleando la configuración del test óptico en línea

Tal y como presentamos en la sección 3.2.2.3 el test óptico en línea permite, a partir de los registros de irradiancia, la implementación de distintas funciones de mérito que junto con sus criterios asociados nos permiten clasificar al componente optoelectrónico como apto o no apto. En la propia sección 3.2.2.3 se presentaron dos funciones de mérito, junto con sus criterios asociados. La primera función de mérito analizaba el nivel de irradiancia total presente en el registro y la segunda analizaba la forma de dicha distribución.

No será posible aplicar la primera función de mérito, asociada a la cantidad total de irradiancia medida en el registro o bien porque del FOT comercial sólo se dispone de información sobre la forma de la distribución de emisión, o bien porque en las familias de pruebas aún no se tienen valores establecidos de corriente a la que se debe alimentar el FOT para alcanzar un determinado nivel de irradiancia. Sin embargo, si podemos aplicar la segunda función de mérito a las medidas de los conjuntos de prueba ya que disponemos de los valores de distribución simulados que debe presentar el componente.

Tal como ya comentamos en el Capítulo 3 los valores de los criterios de aceptación, e inclusive las propias funciones de mérito deben adaptarse al componente concreto que deseamos validar en el test óptico en línea. En el caso de los FOTs, no es necesario modificar ni la función de mérito asociada a la distribución de irradiancia ni sus criterios de aplicación. Así, seleccionaremos los valores de píxeles de los registros comprendidos entre el 67.5% y el 72.5 % del valor del máximo para determinar la región anular y emplearemos la relación (1:2) entre las excentricidades de los registros a evaluar y la nominal $\epsilon_e < 2\epsilon_n$, para dar el componente como válido, ecuaciones (3.14) (3.15) (3.21) y (3.22).

A continuación, mostramos los registros obtenidos y los resultados de implementar la segunda función de mérito de test óptico de calidad a las medidas del primer conjunto de pruebas.

FOT comercial

La Figura 6.1 (a) presenta el registro del FOT comercial, puede apreciarse la dificultad de la medida debido a la baja emisión del componente que ha servido de orientación para nuestro diseño. La Figura 6.1 (b) muestra el registro de la distribución de irradiancia simulada para nuestro diseño y que servirá de referencia para considerar válidos o no válidos los FOTs fabricados.



Figura 6.1 (a) Registro del FOT comercial, puede apreciarse la dificultad de la medida debido a la baja emisión del componente. (b) Registro de la distribución de irradiancia simulada para nuestro diseño. La dimensión de todos los registros es de $240 \times 175 \text{ mm}^2$ (1294×970 píxeles²), con 256 niveles de digitalización normalizados

Primer conjunto de pruebas

El primer conjunto de pruebas está formado por tres componentes identificados como #1.1 #1.2 y #1.3. La Figura 6.2 muestra sus respectivos registros y el registro del componente FOT nominal que se ha tomado como referencia.

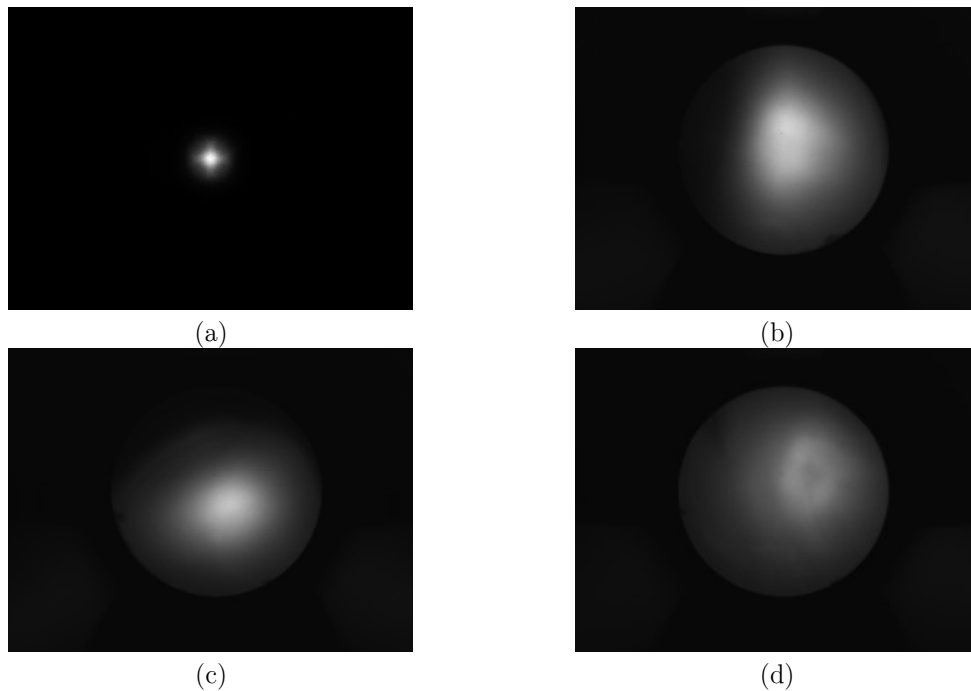


Figura 6.2 (a) Registro del FOT nominal simulado que se ha empleado como referencia. (b) (c) y (d) Registros de los componentes identificados como #1.1, #1.2, #3.3, respectivamente. Las dimensiones de todos los registros. La dimensión de todos los registros es de $240 \times 175 \text{ mm}^2$ (1294×970 píxeles²), con 256 niveles de digitalización normalizados a 255 en el registro simulado, mientras que el conjunto de los registros experimentales comparte normalización, cuyo máximo es 217.

La Figura 6.3. presenta las zonas anulares para cada uno de los registros mostrados anteriormente y empleadas para calcular los valores de las excentricidades de la elipse ajustada, ecuación (3.21), los resultados los muestra la Tabla 6.1. El valor de la excentricidad del registro nominal (0.13), es el valor base para determinar el umbral a partir del cual se consideran los componentes aptos, en nuestro caso como el criterio lo fijamos en 2 veces el valor del registro nominal, el umbral se sitúa en $2 \times 0.13 = 0.26$ siendo todos los componentes medidos considerados no aptos por el test de forma.

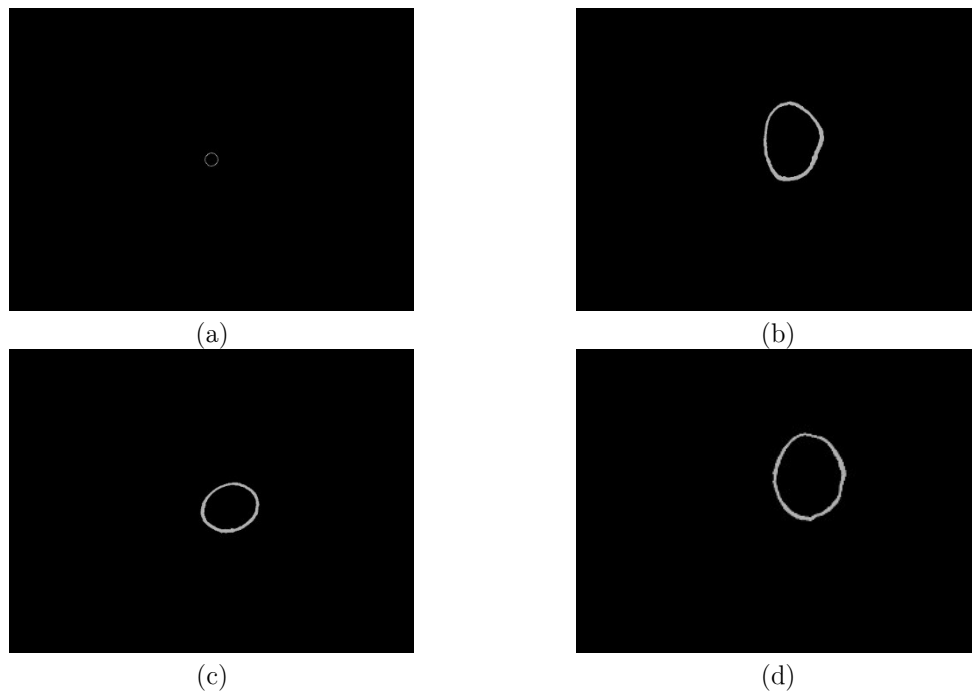


Figura 6.3 Regiones anulares fruto de aplicar el criterio de la ecuación (3.14) a los registros nominal, #1.1, #1.2, #3.3 (a), (b), (c) y (d), respectivamente. Los valores de excentricidad que presentan son: 0.13, 0.78, 0.52 y 0.75, respectivamente.

Registro	Valor de ϵ
Nominal	0.13
#1	0.78
#2	0.52
#3	0.76

Tabla 6.1 Valores de la excentricidad obtenidos para el registro nominal y para los registros de los componentes #1.1, #1.2, #3.3.

Segundo conjunto de pruebas

Como ya hemos mencionado, los registros del segundo conjunto de FOTs, formado por dos componentes identificados como #2.1 i #2.2, no presentan un nivel de irradiancia

relevante en los primeros 35° por lo que no se ha procedido a realizar el test de línea correspondiente.

6.1.2. Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)

Recordemos, brevemente, que el control óptico de calidad añade un elemento respecto al test óptico en línea: una malla rectangular de agujeros circulares. Tal y como explicamos en la sección 3.3.1.2, la presencia de la malla de agujeros nos permite realizar el trazado de rayos inverso. De este modo, el control óptico de calidad, mediante la realización del trazado de rayos inverso proporciona información visual y numérica acerca de la funcionalidad de los componentes fotónicos. Este hecho nos permite inferir defectos en los componentes.

La información numérica la obtenemos a partir de comparar los puntos de convergencia del trazado inverso de rayos del componente bajo control respecto al componente nominal, ecuación (3.32), y del cómputo del tercer momento estándar, también conocido como asimetría, de las distribuciones de u y v , ecuación (3.33).

Primer conjunto de pruebas

La Figura 5.4 presenta los registros del componente FOT nominal y de los componentes del primer conjunto de pruebas #1.1, #1.2, #1.3. En los registros se aprecian las distintas distribuciones de spots que permitirán obtener la información visual y numérica del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)

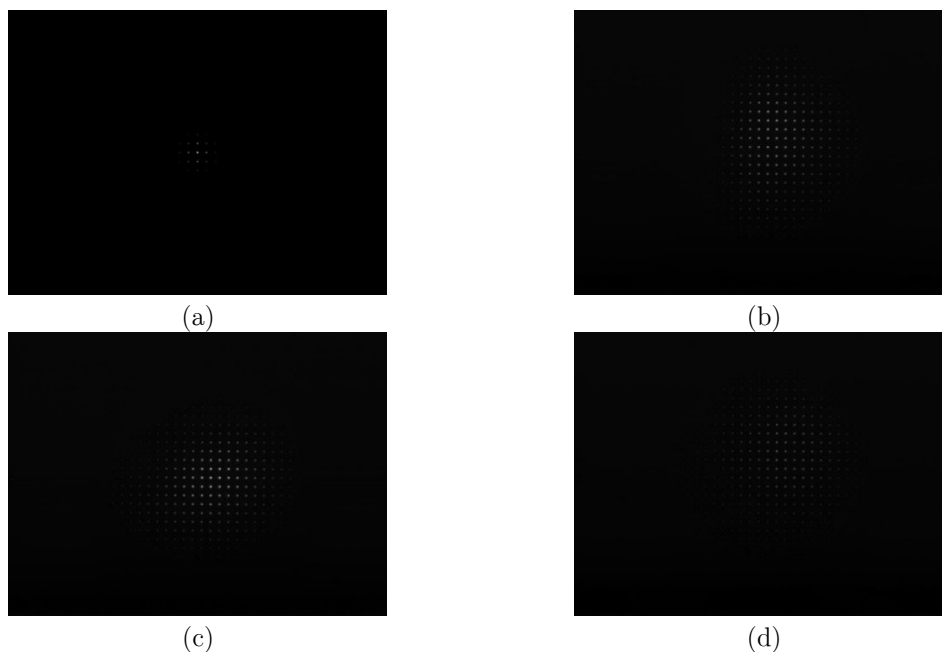


Figura 6.4 Registros de la configuración del control óptico de calidad para ($\theta < 35^\circ$) (a) nominal (b) (c) y (d) registros #1.1, #1.2, #1.3, respectivamente. La dimensión de todos los registros es de $240 \times 175 \text{ mm}^2$ (1294×970 píxeles²), con 256 niveles de digitalización normalizados a 255 en el registro simulado, mientras que el conjunto de los registros experimentales comparten normalización, cuyo máximo es 218.

6. MEDIDAS EXPERIMENTALES

A partir de la ubicación de los spots en los registros medidos podemos obtener, para cada registro, la posición de los centroides, el trazado inverso de rayos y la distribución de los valores (u, v) , tal y como presentamos en la Figura 6.5, 6.6, 6.7 y 6.8 para el registro nominal y para los componentes #1.1, #1.2, #3.3, respectivamente.

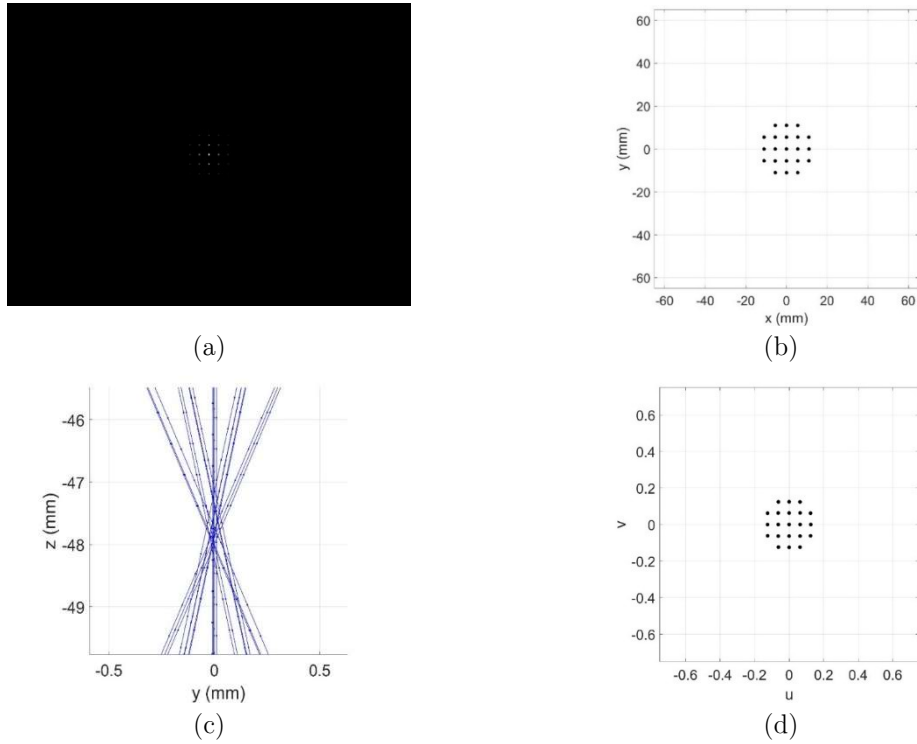


Figura 6.5 Información del componente nominal. (a) Registro original. (b) Posición de los centroides. (c) Trazado inverso de rayos. (d) Distribución de los valores (u, v) .

6. MEDIDAS EXPERIMENTALES

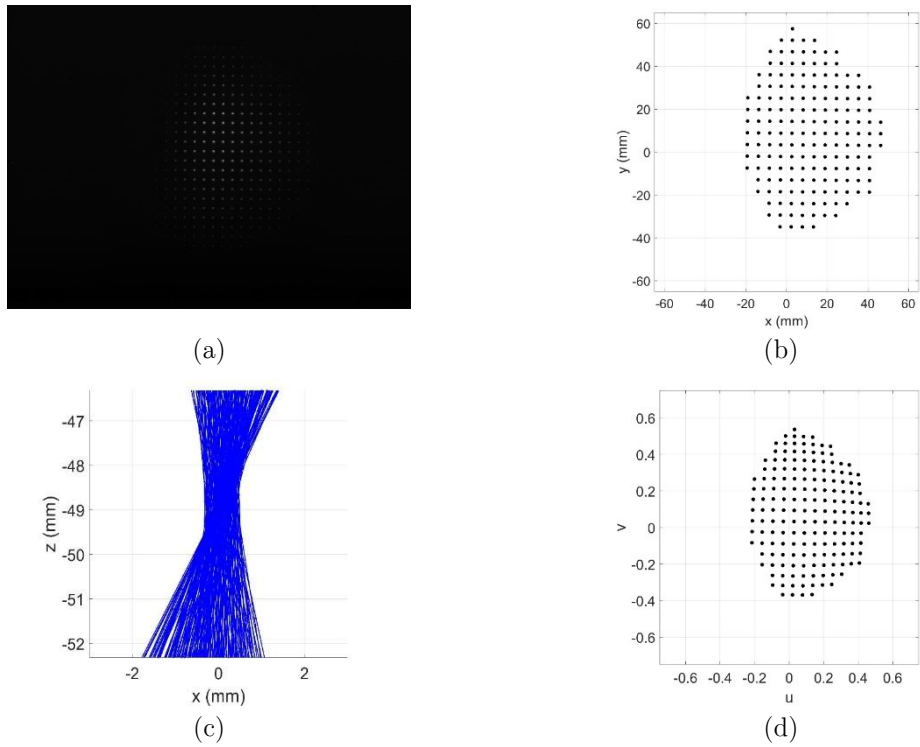


Figura 6.6 Información del componente #1.1. (a) Registro original. (b) Posición de los centroides. (c) Trazado inverso de rayos. (d) Distribución de los valores (u, v) .

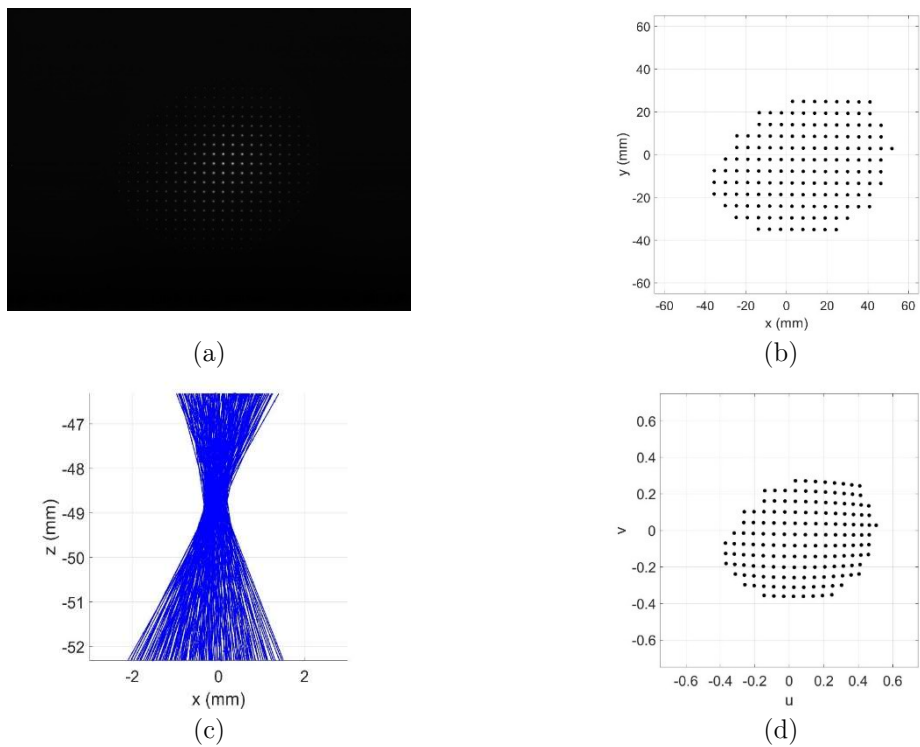


Figura 6.7 Información del componente #1.2. (a) Registro original. (b) Posición de los centroides. (c) Trazado inverso de rayos. (d) Distribución de los valores (u, v) .

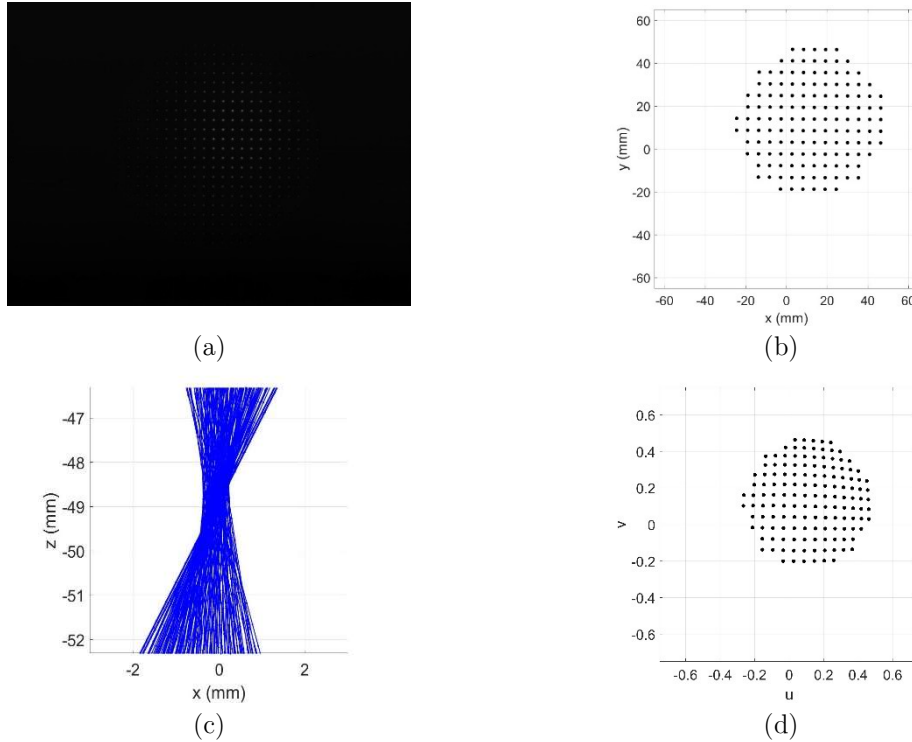


Figura 6.8 Información del componente #1.3. (a) Registro original. (b) Posición de los centroides. (c) Trazado inverso de rayos. (d) Distribución de los valores (u, v) .

La información visual que nos proporciona el tratamiento de los registros obtenidos mediante el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) nos permite determinar la causa por la que los FOTs pertenecientes al primer conjunto son considerados no válidos por el test óptico en línea. Tanto por la distribución de los spots como por la distribución de los valores (u, v) observamos que los componentes FOTs de este conjunto distribuyen la energía radiante en una distribución angular mayor que la del FOT nominal. Nótese que para el componente nominal los valores máximos son $(u, v) \approx (0.12, 0.12)$, mientras que para el resto de componentes los valores son mucho mayores. Para el componente #1.1 los valores máximos son $(u, v) \approx (0.51, 0.55)$ para #1.2 $(u, v) \approx (0.56, -0.39)$ y #1.3 $(u, v) \approx (0.46, 0.47)$. Además, no hay repetitividad en las distribuciones (u, v) de modo que podemos deducir que todas las ópticas son distintas entre sí.

La información anterior la podemos complementar con la proporcionada con las funciones de mérito:

Los valores numéricos de primera función de mérito, que nos proporciona información respecto a los puntos de convergencia del trazado inverso de rayos, ecuación (3.32), se muestra en la Tabla 6.2 y nos confirman que no hay variación en la posición de la superficie de emisión respecto a la óptica.

Registro	Vector \vec{x} (mm)	$\ \vec{x}_n - \vec{x}_e\ $ (mm)
Nominal	(-0.00011, -0.00154, -48.03750)	-
#1.1	(0.06097, 0.44429, -49.10025)	1.15409
#1.2	(-0.09516, -0.42882, -49.13914)	1.18542
#1.3	(-0.08972, -0.40498, -49.09093)	1.14362

Tabla 6.2 Valores de la posición del punto de convergencia para el componente nominal y los componentes del primer conjunto de pruebas #1.1, #1.2, #1.3. Para estos últimos se añade el valor de la función de mérito.

Los valores de la segunda función de mérito, que nos proporciona información sobre el tercer momento estándar de las distribuciones de u y v , también conocido como asimetría, presentada en la ecuación (3.34), nos permite extraer dos informaciones interesantes: primera, los propios valores de la asimetría: en el registro nominal los valores de asimetría son del orden de 10^{-4} , mientras que en los registros a evaluar, el valor menor es del orden de 10^{-3} y el mayor de 10^{-2} hecho que indica una gran variabilidad angular. Segunda, el valor de la función de mérito llega a ser casi 3 (2.91) para el componente #1.2.

Registro	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$	$abs\left(\frac{\tilde{\mu}_{3ue} \cdot \tilde{\mu}_{3vn}}{\tilde{\mu}_{3ve} \cdot \tilde{\mu}_{3uv}}\right)$
Nominal	-0.00049	0.00058	-
#1.1	0.00286	-0.00451	0.75
#1.2	0.01246	0.00506	2.91
#1.3	-0.00902	0.00679	1.57

Tabla 5.3. Valores del tercer momento estándar de las distribuciones de u y v para el componente nominal y los componentes del primer conjunto de pruebas #1.1, #1.2, #1.3, para estos últimos se añade el valor de la función de mérito

6.1.3. Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)

La configuración del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) añade un elemento respecto al control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$): un reflector parabólico que permite recoger la luz emitida hasta 76° . De este modo, mediante el trazado de rayos inverso, y considerando la presencia de la superficie parabólica, obtenemos información visual y numérica acerca de la funcionalidad de los componentes fotónicos para ángulos grandes, pudiendo inferir defectos que presentan los componentes.

Recordemos que la presencia de la superficie reflectora hace que sobre la superficie difusora de nuestro equipo se recoja doble información; la de conjunto de rayos que alcanzan directamente la malla de agujeros circulares y aquellos que han sufrido una reflexión sobre la superficie reflectora, los registros aquí presentados provienen de medidas en las que hay

presentes los dos conjuntos de rayos y de los que ya se ha filtrado los rayos que alcanzan la malla de agujeros directamente.

En la configuración del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) la información numérica, al igual que en el caso de la configuración del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$), la obtenemos a partir de comparar la posición de convergencia de los rayos trazados para el componente que estamos controlando con el trazada para el componente nominal, ecuación (3.49), y mediante el cómputo del tercer momento estándar, también conocido como asimetría, de las distribuciones de u y v , ecuación (3.51). Además, para este conjunto de pruebas podremos emplear el análisis del valor de la irradiancia de los spots, descrito en el apartado II de la sección 3.3.2.2 y distingue los spots vinculados a rayos que han pasado por la óptica del componente de los que no.

Segundo conjunto de pruebas

Si partimos del hecho que los ángulos de emisión de los FOTs deben ser menores de 35° no tendría ningún sentido realizar medidas de control óptico de calidad con ellos con un dispositivo pensado para ángulos comprendidos entre 35° y 76° . Sin embargo, la exploración visual del segundo conjunto de pruebas permite desprender que hay emisión presente para ángulos grandes y que es interesante cuantificar dicha información, eso sí, hay que tener presente que en este caso no hay valores de referencia sobre los que comparar para dicho intervalo angular y que el valor de referencia seguirá siendo el mismo que para los ángulos pequeños, Figura 6.5. Así los componentes del segundo conjunto de pruebas identificados como #2.1, #2.2, emplearan el mismo valor nominal de referencia que los del primer conjunto de pruebas, hecho completamente lógico ya que el objetivo de producción es único.



Figura 6.9 Registros de spots ($\theta > 35^\circ$) de los casos (a) #2.1 y (b) #2.2. La dimensión de todos los registros es de $240 \times 175 \text{ mm}^2$, ($1294 \times 970 \text{ píxeles}^2$), con 256 niveles de digitalización y valor máximo 193. La referencia es la misma que la configuración del control óptico de calidad para ($\theta < 35^\circ$).

De igual modo que para el caso del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$), a partir de los spots de los registros podemos obtener para cada uno de los registros, la posición de los centroides; el trazado inverso de rayos y la distribución de los valores (u, v) para los rayos antes de llegar al reflector (entre la malla y el reflector) y el trazado inverso de rayos y la

distribución de los valores (u, v) para los rayos después del reflector (entre el reflector y el componente). La Figura 6.10 y 6.11 muestran esta información para los componentes #2.1, #2.2, respectivamente.

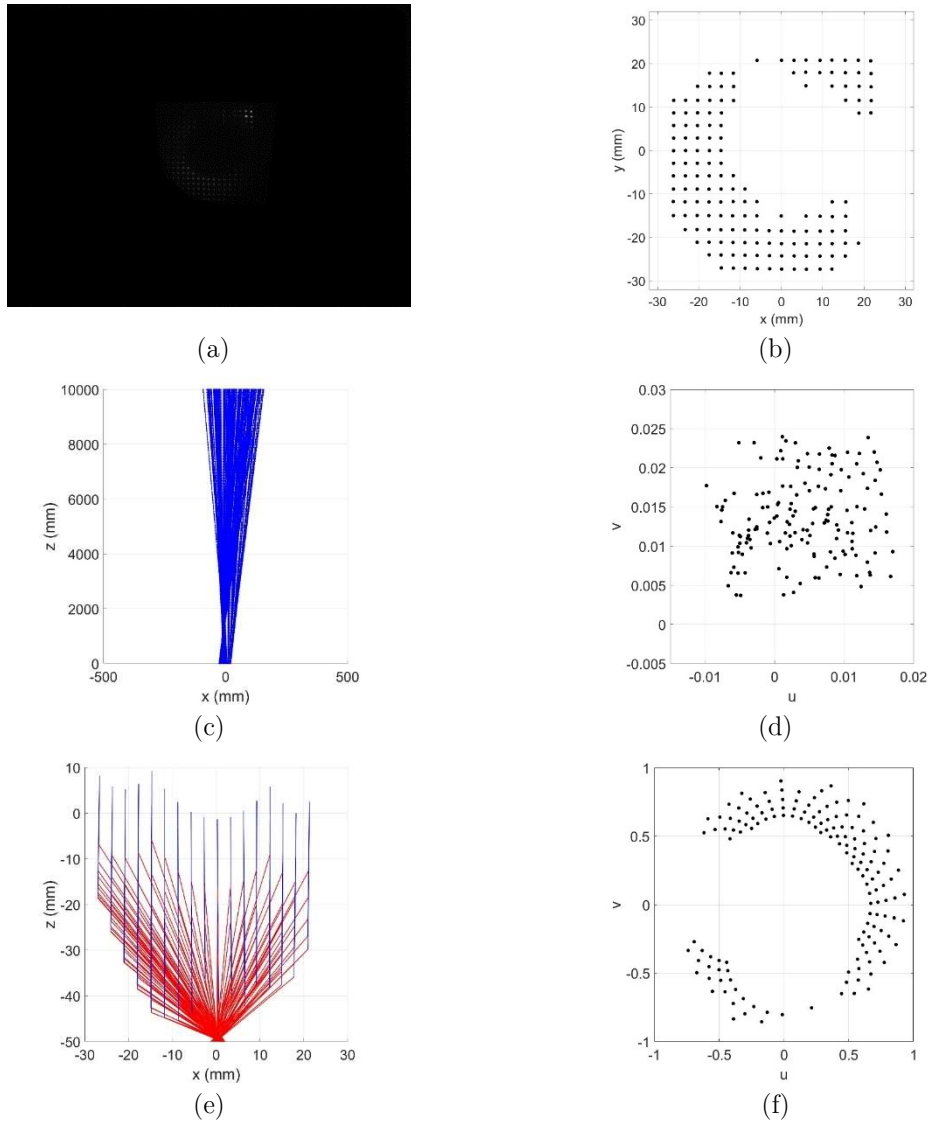


Figura 6.10 Información del componente #2.1. (a) Registro original. (b) Posición de los centroides. (c) Trazado inverso del primer conjunto de rayos. (d) Distribución de los valores (u, v) del primer conjunto de rayos. Trazado inverso del primer conjunto de rayos (Azul). Trazado inverso del segundo conjunto de rayos (rojo). (f) Distribución de los valores (u, v) del segundo conjunto de rayos.

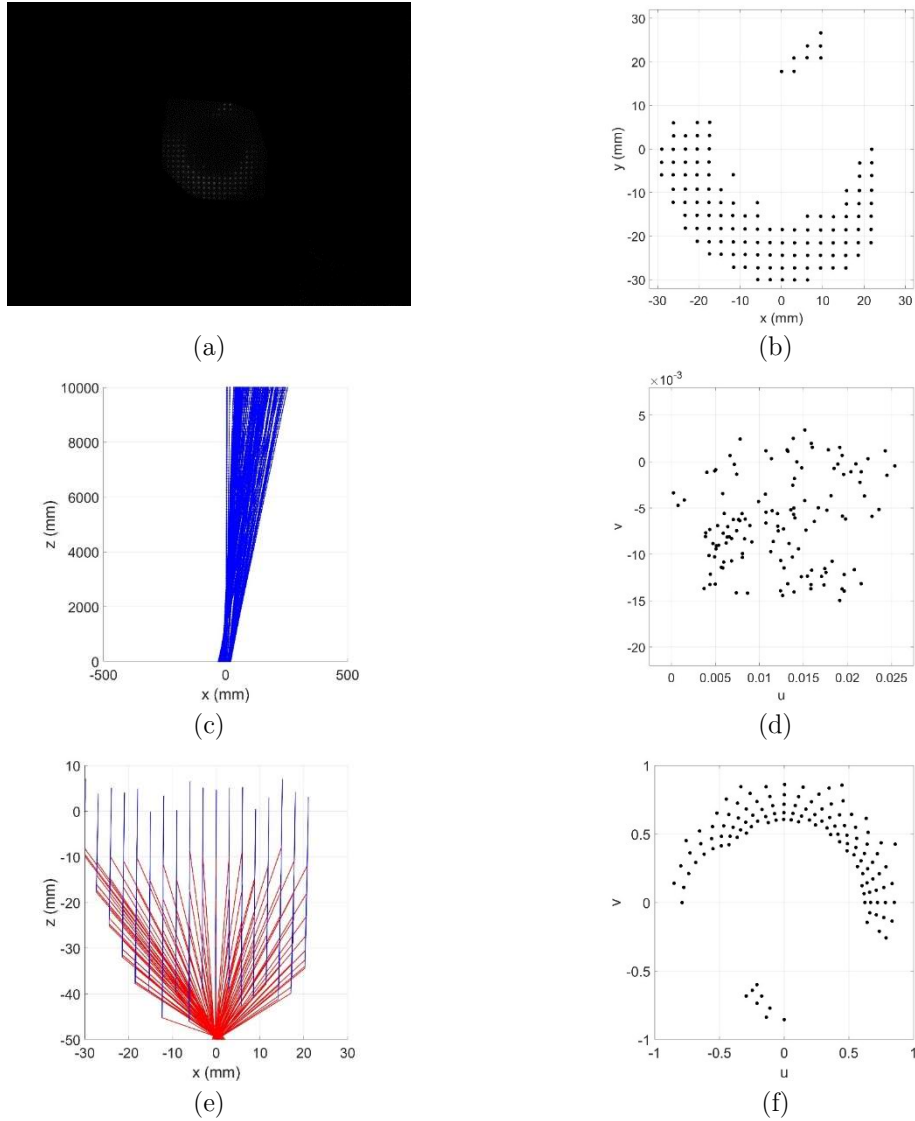


Figura 6.11 Información del componente #2.2 (a) Registro original. (b) Posición de los centroides. (c) Trazado inverso del primer conjunto de rayos. (d) Distribución de los valores (u, v) del primer conjunto de rayos. Trazado inverso del primer conjunto de rayos (Azul). Trazado inverso del segundo conjunto de rayos (rojo). (f) Distribución de los valores (u, v) del segundo conjunto de rayos.

La información visual que nos proporciona la implementación del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) nos indica un hecho muy claro. Tanto para el caso #2.1, como para el caso #2.2, las distribuciones de spots y la de los cosenos directores (u, v) del segundo conjunto de rayos presentan, claramente, dos agrupaciones. Una diferencia tan abrupta entre estas dos agrupaciones implica que los rayos sufren refracción en superficies diferentes. Si además observamos que uno de los grupos presenta una distribución de direcciones de propagación pequeña, podemos afirmar que esta agrupación corresponde a los rayos que interactúan con la óptica del componente FOT, mientras que el resto de rayos sufren

refracción en otras zonas del encapsulado FOT. Este hecho, claramente, indica la presencia de desalineado entre la óptica del componente FOT y el chip del LED.

A continuación, presentamos los valores de las dos funciones de mérito con los datos de los rayos después del reflector, tablas 5.4 y 5.5, que refuerzan las conclusiones observadas.

Registro	Vector \vec{x} (mm)	$\ \vec{x}_n - \vec{x}_e\ $ (mm)
Nominal	(-0.00011, -0.00154, -48.03750)	-
#2.1	(0.19115, -0.55853, -49.16501)	1.27204
#2.2	(0.07463, 0.00057, -48.70164)	0.66833

Tabla 6.4 Valores de la posición del punto de convergencia para el componente nominal y los componentes del segundo conjunto de pruebas #2.1, #2.2. Para estos últimos se añade el valor de la función de mérito. La función de mérito se ha aplicado a los datos del segundo conjunto de rayos.

Registro	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$	$abs\left(\frac{\tilde{\mu}_{3ue} \cdot \tilde{\mu}_{3vn}}{\tilde{\mu}_{3ve} \cdot \tilde{\mu}_{3uv}}\right)$
Nominal	-0.00049	0.00058	-
#2.1	-0.03118	-0.03799	0.97
#2.2	-0.02018	0.12724	-0.18

Tabla 6.5 Valores del tercer momento estándar de las distribuciones de u y v para el componente nominal y los componentes del segundo conjunto de pruebas #2.1, #2.2, para estos últimos se añade el valor de la función de mérito. La función de mérito se ha aplicado a los datos del segundo conjunto de rayos.

A diferencia de lo que observamos en el primer conjunto de pruebas, en este conjunto de pruebas los resultados de la Tabla 6.4 permiten apreciar un desplazamiento del punto de convergencia como consecuencia del desplazamiento que presenta el chip del LED. De los valores de la función de mérito asociada a la asimetría, Tabla 6.5, observamos la función de mérito tiene un valor muy alejado de la unidad para el componente #2.2, hecho esperable si observamos la distribución de valores (u, v) . Adicionalmente, en el caso #2.2 el gran valor que toma $\tilde{\mu}_{3v}$ respecto a $\tilde{\mu}_{3u}$ confirma el comportamiento que presenta la figura 5.5 (f) que nos indica un desalineado mucha más dominante en la dirección y que en la x .

Finalmente, para completar la información obtenida realizaremos el análisis del valor de la irradiancia de los spots, apartado II de la sección 3.3.2.2.

La Figura 6.12 y 6.13 presentan los registros asociados a los componentes #2.1 y #2.2. En ellas se ha añadido una vista en la que se destacan los spots que no cumplen el criterio de energía, ecuaciones (3.51) y (3.52), y las coordenadas de intersección de los rayos en un plano tangente al ápex nominal del componente, en los que se han destacado en rojo los rayos asociados a los spots anómalos energéticamente. Cabe destacar que en este caso la variable I_{ijn} de la ecuación (3.51) es $I_{ijn} = 0$, ya que el FOT nominal no presenta spots

asociados a ángulos mayores a 35° . En el caso actual hemos implementado el mismo criterio en la ecuación (3.52):

$$\Delta_{ij} > 0.5\bar{\Delta} + 0.05 \Rightarrow \text{spot } ij \text{ es anómalo,} \quad (6.1) \quad (3.52)$$

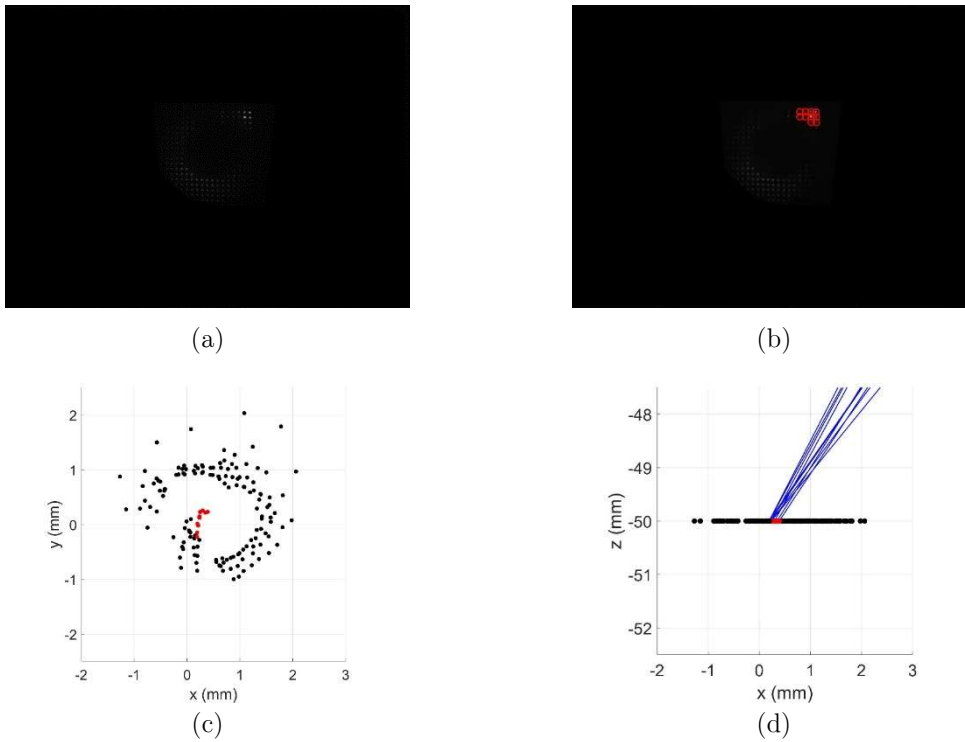


Figura 6.12 Registros asociados al componente #2.1. (a) Registro original. (b) Registro original en el que se destacan los spots que no cumplen el criterio de energía, ecuaciones (3.51) y (3.52). (c) Coordenadas de intersección de los rayos en un plano tangente al ápex nominal del componente, en rojo las intersecciones de los rayos de los spots anómalos energéticamente. (d) las mismas coordenadas vistas en el plano zx , se ha añadido el trazado de los rayos anómalos en azul.

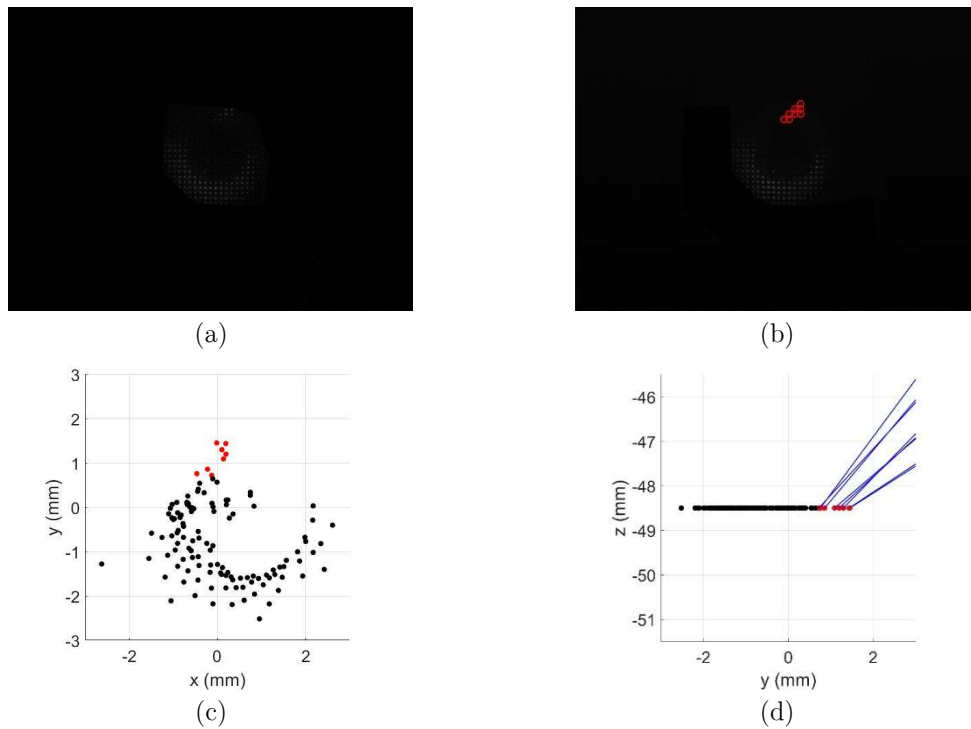


Figura 6.13 Registros asociados al componente #2.2. (a) Registro original. (b) Registro original en el que se destacan los spots que no cumplen el criterio de energía, ecuaciones (3.51) y (3.52). (c) Coordenadas de intersección de los rayos en un plano tangente al ápex nominal del componente, en rojo las intersecciones de los rayos de los spots anómalos energéticamente. (d) las mismas coordenadas vistas en el plano zx , se ha añadido el trazado de los rayos anómalos en azul.

De la observación de la Figuras 6.12 y 6.13 podemos afirmar que los spots más energéticos están vinculados a los rayos que sufren refracción con la óptica del componente FOT mientras que para los demás spots, la luz que emerge del componente de la zona exterior a la lente propiamente dicha, asimismo en la parte central de la lente no se observan intersecciones de los rayos con el plano, probablemente debido a que en esta zona la luz sufre reflexión total interna.

6.2. Componente LED Lambertiano

Tal y como se ha mencionado en el capítulo anterior, sección 5.2, el componente LED de emisión Lambertiana se ha incluido como componente nominal externo de referencia. Así pues, las medidas realizadas tienen como finalidad verificar el correcto funcionamiento del test óptico en línea y de los controles ópticos de calidad ($\theta < 35^\circ$) y ($\theta > 35^\circ$), para ello hemos incluido medidas con desplazamiento del LED así como series de medidas destinadas a comprobar la repetitividad de las medidas.

6.2.1. Medidas empleando la configuración del test óptico en línea

6.2.1.1. Registros empleados para verificar la invariancia del test bajo desplazamiento del componente (<1 mm)

En el test óptico en línea presentado en esta tesis doctoral tiene asociadas dos funciones de mérito, junto con sus criterios asociados. La primera función de mérito analiza el nivel de irradiancia total presente en el registro y la segunda analizaba la forma de dicha distribución. Para analizar la invariancia del test bajo desplazamiento del componente realizaremos tres registros del componente, uno nominal y dos con desplazamiento; y comparamos los valores de las funciones de mérito cuando se desplaza el led.

Adicionalmente, hemos realizado medidas vinculadas a la estrategia de medida. La estrategia de medida no se ha implementado con el fin de validarlo, ya que éste es nominal, sino con el objetivo de comparar los resultados de la estrategia de medida obtenidos para el LED Lambertiano en el entorno simulado y en el entorno experimental. Nuestro fin es sustentar la equiparación general entre el entorno simulado y el experimental en la comparación de los resultados particulares de este componente.

La Figura 6.14 se presentan los tres registros; (a) para la posición nominal, (b) desplazamiento #1, $\Delta\vec{x}_1 = (-0.5, 0, 0)$ mm, y (c) desplazamiento #2, $\Delta\vec{x}_2 = (-1, 0, 0)$ mm.

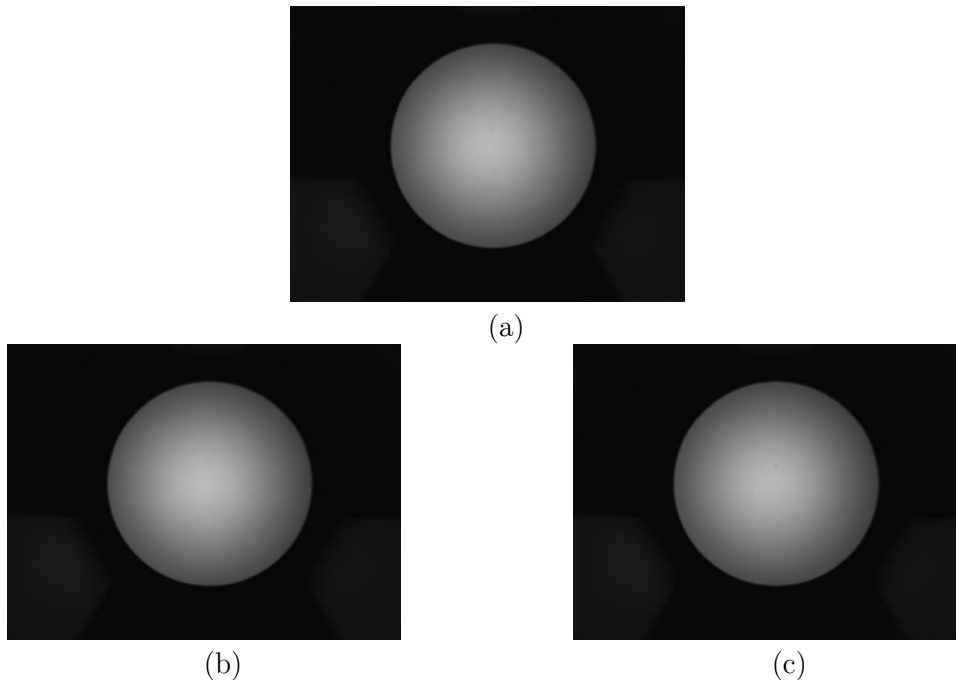


Figura 6.14 (a) Registro correspondiente a la posición nominal, (b) al desplazamiento #1, $\Delta\vec{x}_1 = (-0.5, 0, 0)$ mm y (c) al desplazamiento #2, $\Delta\vec{x}_2 = (-1, 0, 0)$ mm. La dimensión de todos los registros es de 240×175 mm² (1294×970 píxeles²), con 256 niveles de digitalización normalizados a un máximo común para los tres registros experimentales, cuyo valor es 192. Los de flujos radiantes totales en nivel de digitalización son $5.14 \cdot 10^7$, $5.18 \cdot 10^7$ y $5.10 \cdot 10^7$, respectivamente.

Y la Tabla 6.6 presenta los flujos radiantes totales en nivel de digitalización:

Registro	Flujo radiante total	$abs\left(\sum_{i=1}^N REp_i - \sum_{i=1}^N RNp_i\right)$
Posición nominal	$5.14 \cdot 10^7$	-
Desplazamiento 1	$5.18 \cdot 10^7$	$4.32 \cdot 10^5$
Desplazamiento 2	$5.10 \cdot 10^7$	$3.74 \cdot 10^5$

Tabla 6.6 Flujo radiante total y valor de la función de mérito en niveles de digitalización del caso nominal, desplazamiento #1 y desplazamiento #2.

El flujo radiante total en las posiciones desplazadas presenta variaciones menores al 15% respecto a la posición nominal [$4.37 \cdot 10^7$, $5.91 \cdot 10^7$] ya que los valores de la función de mérito son del orden de 10^5 . De este modo, tal y como esperábamos, los desplazamientos solidarios del componente LED Lambertiano producen registros que son catalogados como válidos por la función de mérito que analiza el flujo radiante total.

Del mismo modo verificamos que la implementación de la segunda función de mérito ofrece valores que aseguran la validez de los registros desplazados. La Figura 6.15 presenta las respectivas zonas anulares empleadas para calcular la excentricidad en cada uno de los registros anteriores. La Tabla 6.7 recoge los valores de la excentricidad. En este caso la excentricidad para el registro nominal es 0.26 y determina el margen del criterio de aceptación de registro válido ($< 2\epsilon_n$) = 0.52.

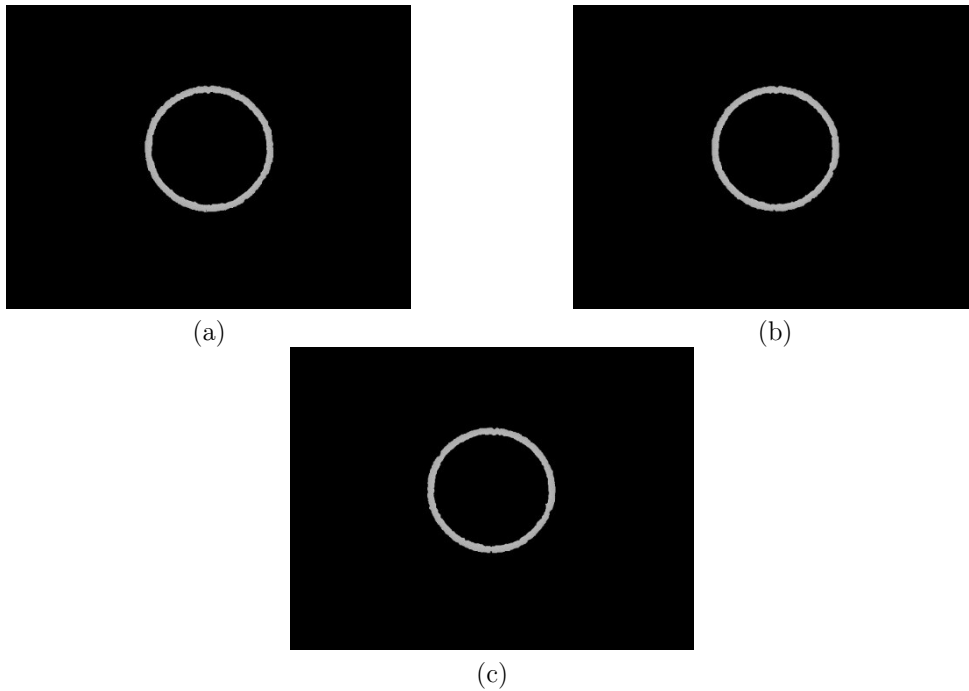


Figura 6.15 Regiones anulares fruto de aplicar el criterio de la ecuación (3.14) a los registros (a) nominal (b) desplazamiento #1 y (c) desplazamiento #2. Los valores de excentricidad que presentan son: 0.26, 0.28, y 0.32, respectivamente.

Registro	Valor de ϵ
Posición nominal	0.26
Desplazamiento #1	0.28
Desplazamiento #2	0.32

Tabla 6.7 Valores de excentricidad obtenidos para el registro nominal y los desplazamientos #1 y #2.

6.2.1.2. Registros empleados para verificar la repetitividad del test óptico en línea

A continuación, presentamos las medidas empleadas para verificar la repetitividad del test óptico en línea. La Figura 6.16 presenta la serie de 7 registros correspondientes a la posición nominal, desplazamiento #1, $\Delta\vec{x}_{r1} = (-0.5, 0, 0)$ mm y desplazamiento #2, $\Delta\vec{x}_{r2} = (-1, 0, 0)$ mm. La Tablas 6.8 y 6.9 presentan la media y la desviación estándar del flujo radiante total y de la excentricidad de la zona anular. Observamos como para ambas magnitudes la desviación estándar es un orden menor que la media.

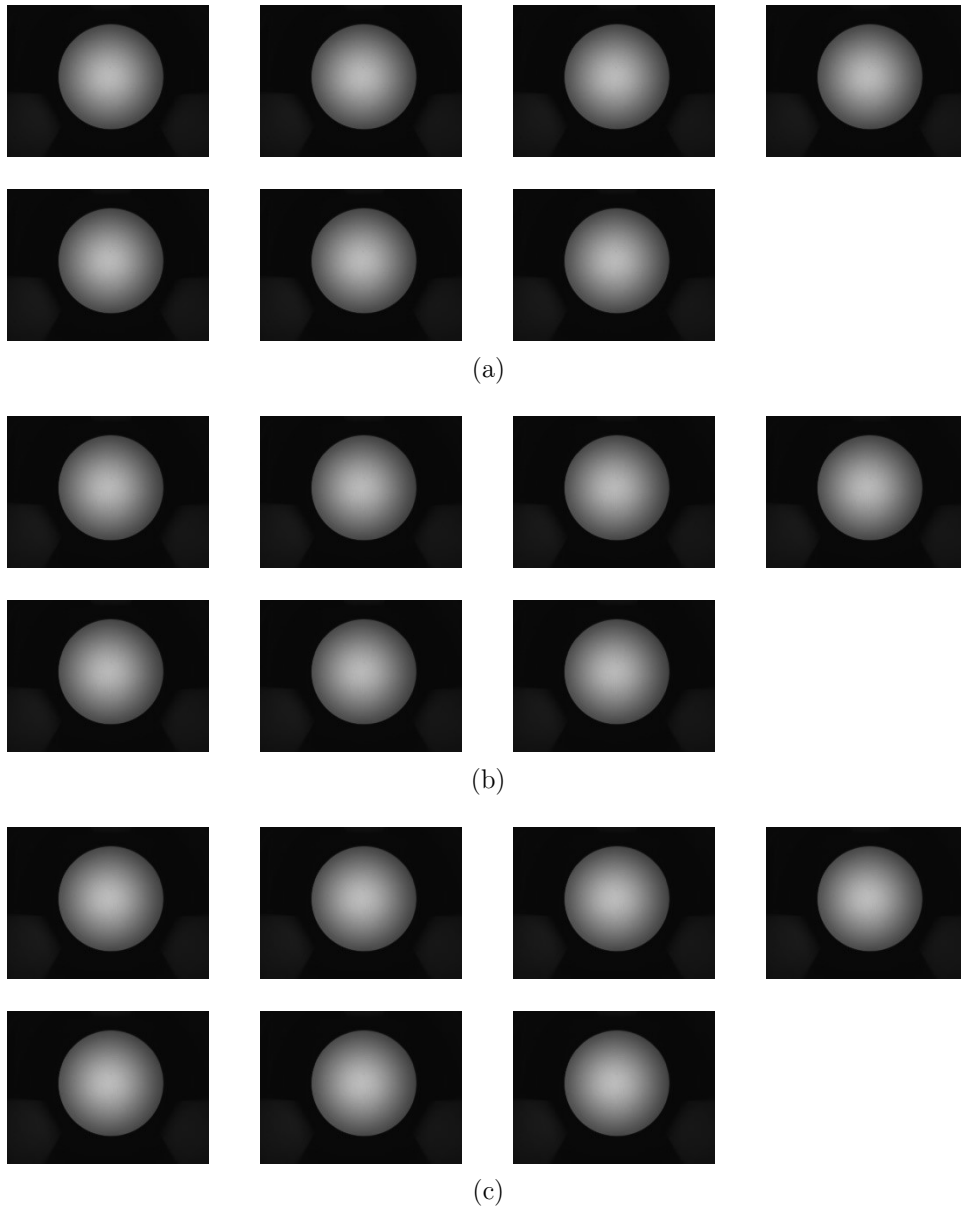


Figura 6.16 (a) Registros de repetitividad del test en la posición nominal, (b) en la posición del desplazamiento #1, $\Delta\vec{x}_{r1} = (-0.1, 0, 0)$ mm y (c) en la posición del desplazamiento #2, $\Delta\vec{x}_{r2} = (-0.2, 0, 0)$ mm.

Flujo radiante total	Media	Desviación estándar
Nominal	$5.54 \cdot 10^7$	$5.2 \cdot 10^6$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	$5.53 \cdot 10^7$	$4.4 \cdot 10^6$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	$5.53 \cdot 10^7$	$5.8 \cdot 10^6$

Tabla 5.8 Valores de la media y de la desviación estándar del flujo radiante total.

ϵ	Media	Desviación estándar
Nominal	0.291	0.014
$\Delta\vec{x}_{r1}$	0.304	0.018
$\Delta\vec{x}_{r2}$	0.314	0.021

Tabla 5.9 Valores de la media y de la desviación estándar de la excentricidad, ϵ , de las zonas anulares.

6.2.2. Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)

6.2.2.1. Registros empleados para verificar el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)

En este caso empleamos el componente LED Lambertiano analizando las mismas situaciones que en el test óptico en línea con el fin de verificar que tanto la información visual como los valores de las funciones de mérito ofrecen información coherente con los desplazamientos aplicados al componente.

Análisis de la posición de los spots

Con la implementación del análisis de la posición de los spots, mostramos como el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) es capaz de cuantificar el desplazamiento que presenta el LED Lambertiano en los diferentes registros. Del mismo modo, también mostramos como el desplazamiento no tiene repercusión destacable en el comportamiento de las distribuciones de u y v .

La Figura 6.17 presenta los registros del componente LED Lambertiano asociado a la posición nominal y a los desplazamientos #1 y #2.

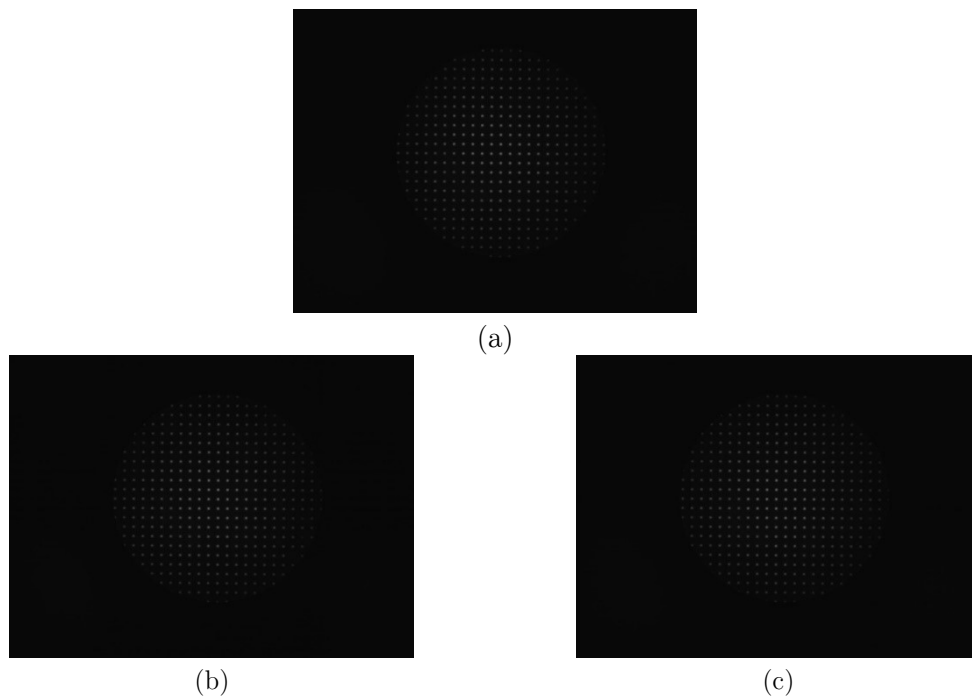


Figura 6.17 Registros de spots para $(\theta < 35^\circ)$ (a) nominal, (b) desplazamiento #1 y (c) desplazamiento #2. La dimensión de todos los registros es de $240 \times 175 \text{ mm}^2$ ($1294 \times 970 \text{ píxeles}^2$), con 256 niveles de digitalización normalizados a un máximo común para los tres registros experimentales, cuyo valor es 108.

A partir de a la distribución de spots podemos obtener la posición de los centroides, el trazado inverso de rayos y la distribución de los valores (u, v) , tal y como observamos en la Figura 6.18, 6.19 y 6.20 para el registro en la posición nominal, para el registro asociado al desplazamiento #1 y para el registro asociado al desplazamiento #2, respectivamente.

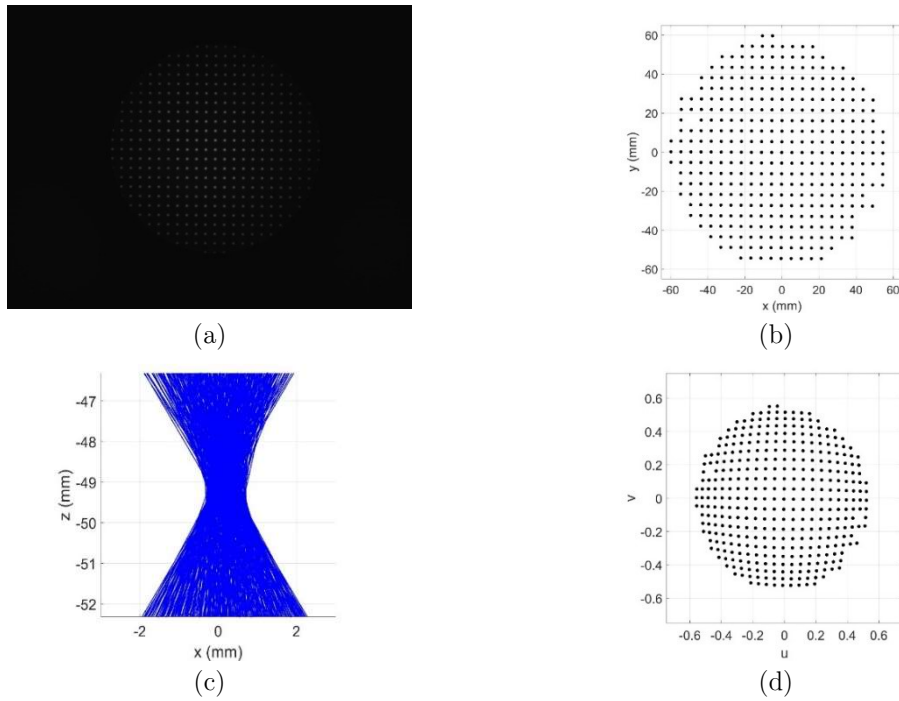


Figura 6.18 (a) Registro de la posición nominal. (b) Centroides de los spots del registro en (a). (c) Trazado inverso de rayos a partir de la posición de los spots en (b) y de la posición de los agujeros de la malla. (d) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) extraída a partir de la posición de los centroides (b) y de la posición de los agujeros de la malla.

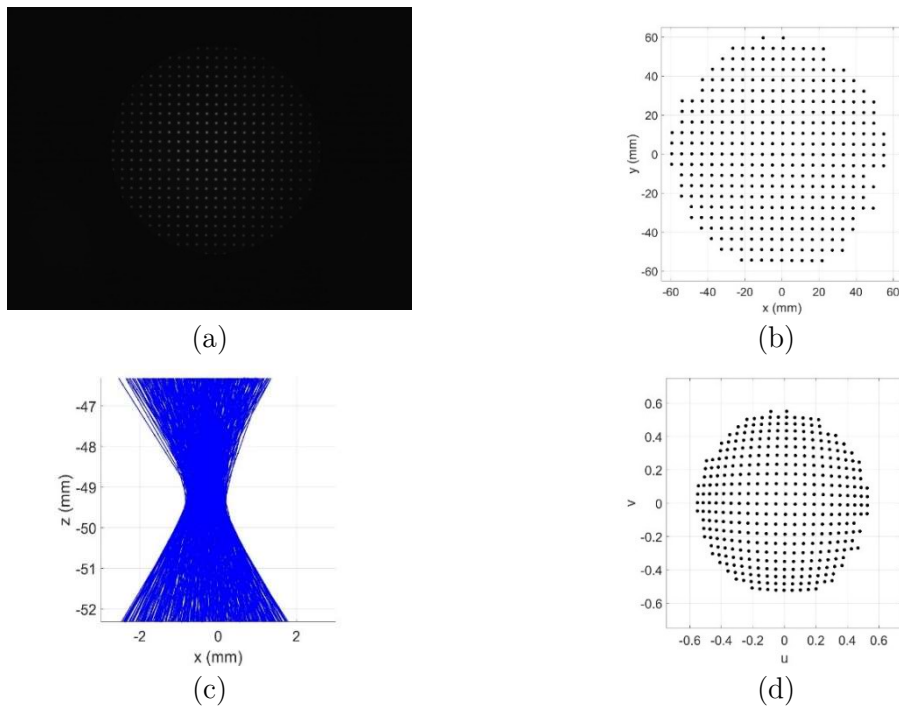


Figura 6.19 (a) Registro del desplazamiento #1. (b) Centroides de los spots del registro en (a). (c) Trazado inverso de rayos a partir de la posición de los spots en (b) y de la posición de los agujeros de la malla. (d) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) extraída a partir de la posición de los centroides (b) y de la posición de los agujeros de la malla.

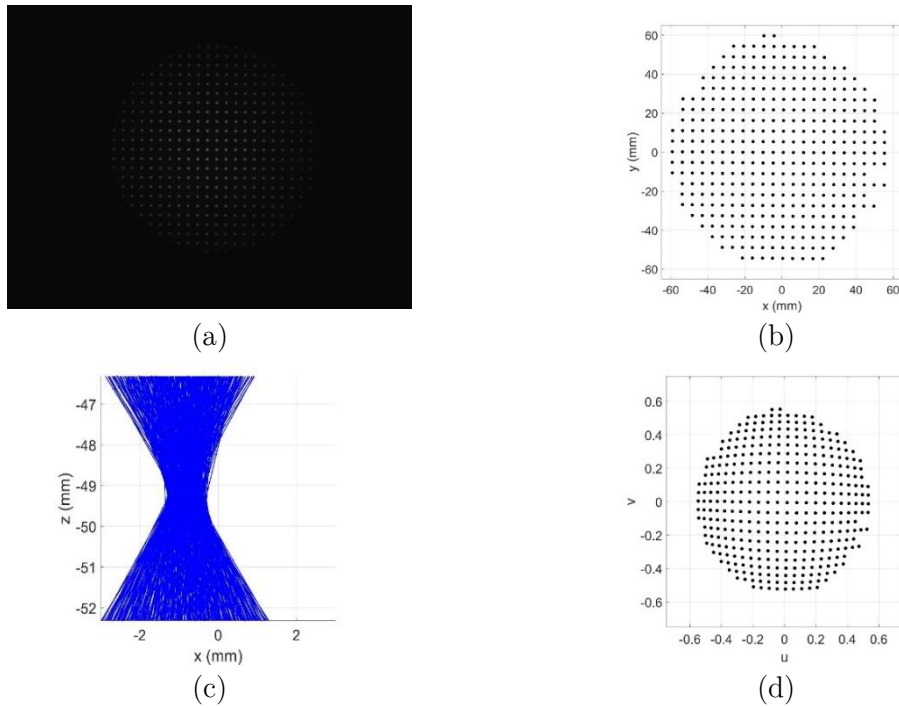


Figura 6.20 (a) Registro del desplazamiento #2. (b) Centroides de los spots del registro en (a). (c) Trazado inverso de rayos a partir de la posición de los spots en (b) y de la posición de los agujeros de la malla. (d) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) extraída a partir de la posición de los centroides (b) y de la posición de los agujeros de la malla.

La información visual nos permite observar el desplazamiento que presenta el componente LED Lambertiano respecto a la posición nominal. La Figura 6.18 (c) presenta un conjunto de rayos centrado aproximadamente en el eje x , mientras que tanto la Figura 6.19 (c) como la 6.20 (c) muestran como el conjunto de rayos presenta una convergencia desplazada. Sin embargo este desplazamiento no se aprecia en la distribución (u, v) .

A continuación, mostramos la implementación de las funciones de mérito.

En primer lugar, verificamos que la primera función de mérito cuantifica los desplazamientos en la zona de convergencia. La Tabla 6.10 presenta los valores del vector posición \vec{x} y los valores de la primera función de mérito mostrando el correcto funcionamiento de la misma.

Registro	Vector \vec{x} (mm)	$\ \vec{x}_n - \vec{x}_e\ $ (mm)
Posición nominal	(-0.054, -0.013, -49.4620)	-
Desplazamiento 1	(0.461, 0.017, -49.4344)	0.517
Desplazamiento 2	(-1.005, -0.019, -49.4529)	0.951

Tabla 6.10 Valores medidos del vector posición, \vec{x} , y de la primera función de mérito para cada uno de los dos desplazamientos.

Finalmente, la Tabla 5.11 muestra los valores de la asimetría de las distribuciones de (u, v) y los valores de la función de mérito para cada registro indicando con valores cercanos a 1 que un desplazamiento no implica cambio en las direcciones de propagación

Registro	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$	$abs\left(\frac{\tilde{\mu}_{3ue} \cdot \tilde{\mu}_{3vn}}{\tilde{\mu}_{3ve} \cdot \tilde{\mu}_{3un}}\right)$
Posición nominal	0.0012	0.0033	-
Desplazamiento #1	0.0010	0.0032	0.8503
Desplazamiento #2	0.0011	0.0034	0.8897

Tabla 6.11 Valores medidos de las asimetrías de las distribuciones de (u, v) , $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, y de la segunda función de mérito para cada uno de los registros.

6.2.2.2. Registros empleados para verificar la repetitividad del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)

Al igual que para el test óptico en línea hemos realizado las medidas de repetitividad para los registros del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$). La Figura 6.21 presenta los 7 registros correspondientes a la posición nominal, al desplazamiento #1 $\Delta\vec{x}_{r1} = (-0.5, 0, 0)$ mm y $\Delta\vec{x}_{r2} = (-1, 0, 0)$ mm. Los registros se emplean para calcular las dos funciones de mérito, desplazamiento y asimetría cuya media y la desviación estándar muestran la Tabla 6.12 y 6.13, pudiéndose observar la alta repetitividad de las medidas del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$).

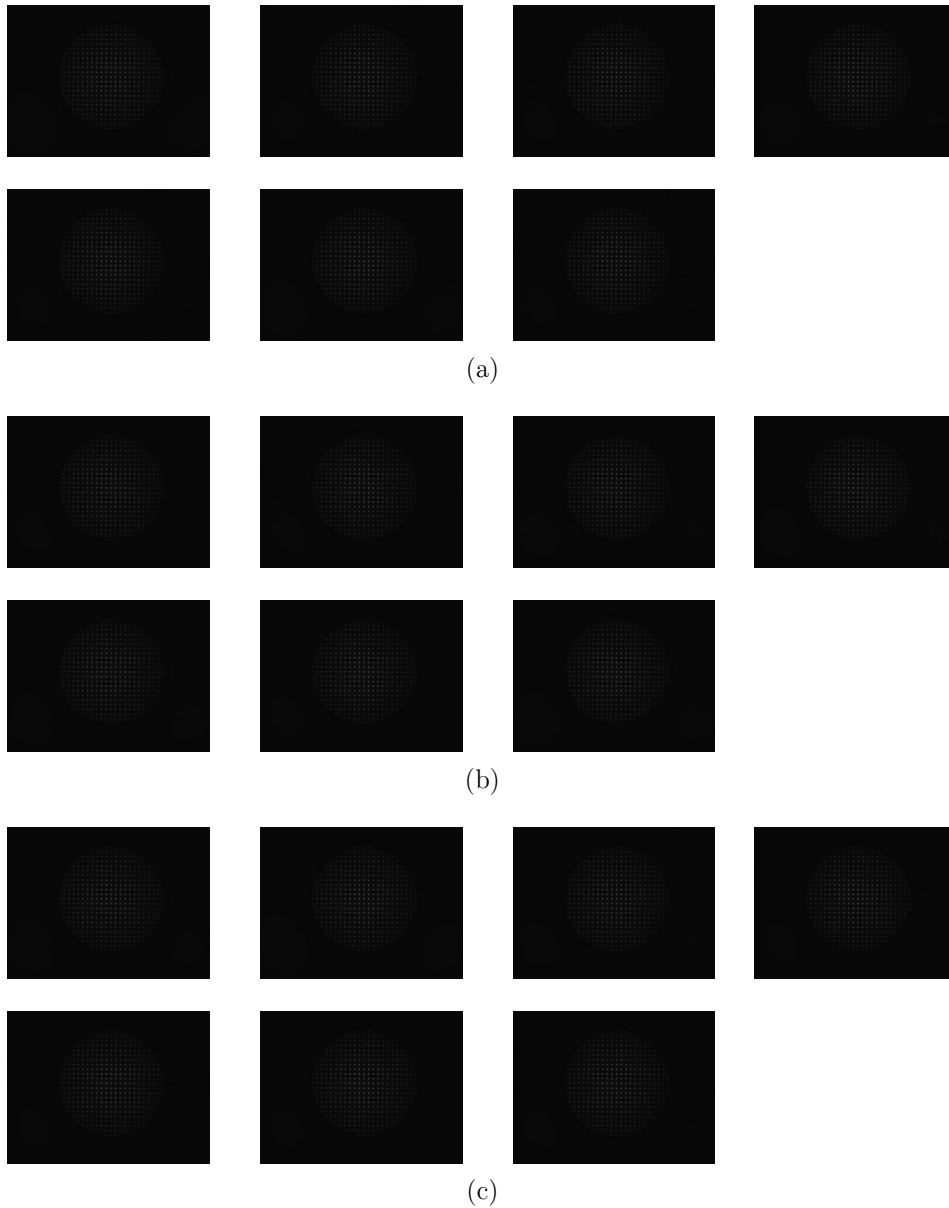


Figura 6.21 (a) Registros de repetitividad de control ($\theta < 35^\circ$) en la posición nominal. (b) Registros de repetitividad de control ($\theta < 35^\circ$) en la posición del desplazamiento #1, $\Delta \vec{x}_{r1} = (-0.1, 0, 0)$ mm. (c) Registros de repetitividad de control ($\theta < 35^\circ$) en la posición del desplazamiento #2, $\Delta \vec{x}_{r2} = (-0.2, 0, 0)$ mm.

	Media (mm)			Desviación estándar (mm)		
	x	y	z	x	y	z
Nominal	-0.209	0.2910	49.307	0.011	0.0071	0.083
$\Delta \vec{x}_{r1}$	-0.707	0.2954	49.283	0.012	0.0055	0.059
$\Delta \vec{x}_{r2}$	-1.196	0.2988	49.299	0.010	0.0070	0.086

Tabla 6.12 Valores de la media y de la desviación estándar del vector posición $\vec{x} = (x, y, z)$.

	Media (mm)		Desviación estándar (mm)	
	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$
Nominal	$1.280 \cdot 10^{-3}$	$-3.42 \cdot 10^{-3}$	$9.7 \cdot 10^{-5}$	$1.1 \cdot 10^{-4}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	$1.003 \cdot 10^{-3}$	$-3.51 \cdot 10^{-3}$	$7.1 \cdot 10^{-5}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	$9.07 \cdot 10^{-4}$	$-3.49 \cdot 10^{-3}$	$8.0 \cdot 10^{-5}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$

Tabla 6.13 Valores de la media y de la desviación estándar de, $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, asimetría de la distribución de valores de u y v .

6.2.3. Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)

6.2.3.1. Registros empleados para verificar el control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)

Como ya hemos mencionado, en el control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$), gracias a la presencia del reflector, podemos analizar luz emitida hasta 76° . De este modo, tal y como ya hemos presentado obtenemos información visual y numérica acerca de la funcionalidad de los componentes fotónicos.

Antes de presentar la implementación del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$), queremos mostrar por qué no se ha implementado en las posiciones $\Delta\vec{x}_1 = (-0.5, 0, 0)$ mm, y $\Delta\vec{x}_2 = (-1, 0, 0)$ mm.

La Figura 6.22 (a) muestra el registro de la posición $\Delta\vec{x}_1 = (-0.5, 0, 0)$ y la Figura 6.22 (b) muestra el mismo registro ampliando la zona central. En ella se puede observar que en la zona interior superior e inferior del anillo de spots, éstos pierden la distribución regular que se precisa para la aplicabilidad del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$). Tal y como mencionamos en la sección (3.3.2.2), para aplicar el control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) es necesario trabajar cerca del foco del reflector para garantizar que la distribución de spots posee una geometría y periodicidad muy similar a la de la malla de agujeros.

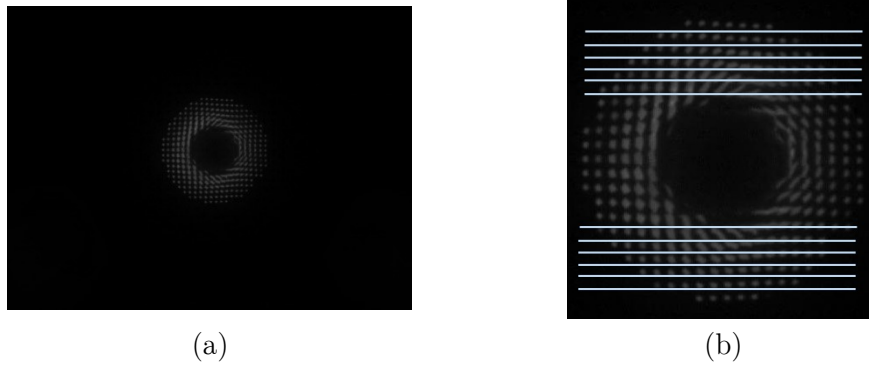


Figura 6.22 (a) Registro del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$), para la posición $\Delta\vec{x}_1 = (-0.5, 0, 0)$ mm. (b) Zona central ampliada de (a) donde se ha indicado mediante líneas paralelas, como la distribución de spots pierde la periodicidad necesaria para la aplicabilidad del control, ver sección (3.3.2.2).

Como resultado, a diferencia del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$), los casos que analizamos son: el caso nominal, desplazamiento #1' $\Delta\vec{x}'_1 = (-0.1, 0, 0)$ mm y el desplazamiento # 2' $\Delta\vec{x}'_2 = (-0.2, 0, 0)$ mm. La Figura 6.23 presenta los registros correspondientes al caso nominal, al desplazamiento #1' y al desplazamiento #2'.

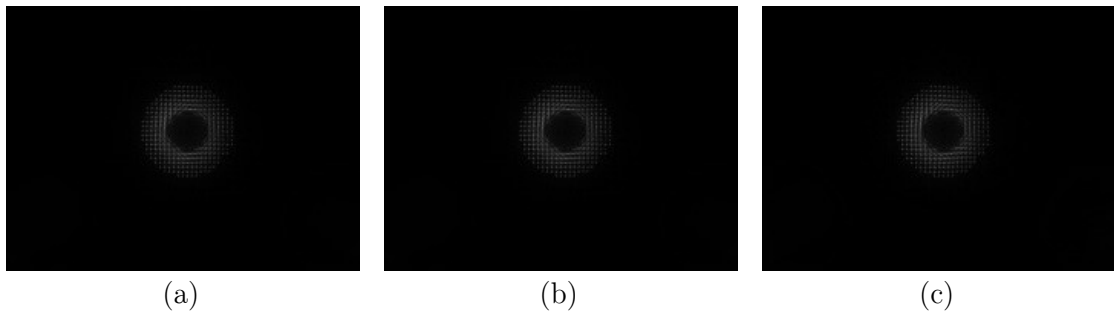


Figura 6.23 Registros de spots del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) (a) nominal, (b) desplazamiento #1', $\Delta\vec{x}'_1 = (-0.1, 0, 0)$ mm y (c) desplazamiento #2' $\Delta\vec{x}'_2 = (-0.2, 0, 0)$ mm. La dimensión de todos los registros es de 240×175 mm² (1294×970 píxeles²), con 256 niveles de digitalización normalizados a un máximo común para los tres registros experimentales, cuyo valor es 185.

Por claridad de la sección, analizamos primero los rayos antes de reflejarse y después los reflejados

Implementación del análisis en el primer conjunto de rayos (antes de reflejarse)

La Figura 6.24, 6.25 y 6.26 presentan la información visual para la posición nominal y los desplazamientos #1' y #2'. La Tabla 6.14 y 6.15 presentan respectivamente los valores del vector posición \vec{x}_1 y su función de mérito asociada y los valores de la asimetría de las distribuciones de (u, v) junto con su correspondiente función de mérito, para cada registro.

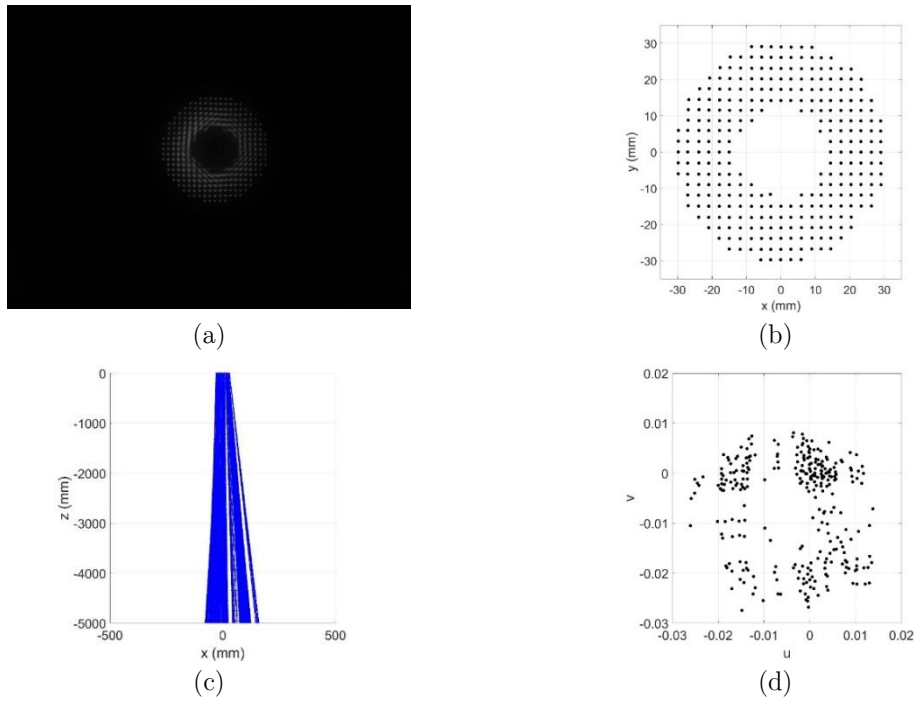


Figura 6.24 (a) Registro correspondiente a la posición nominal. (b) Centroides de los spots. (c) Trazado inverso de rayos a partir de la posición de los spots en (b) y de la posición de los agujeros de la malla. (d) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) extraída a partir de la posición de los centroides (b) y de la posición de los agujeros de la malla.

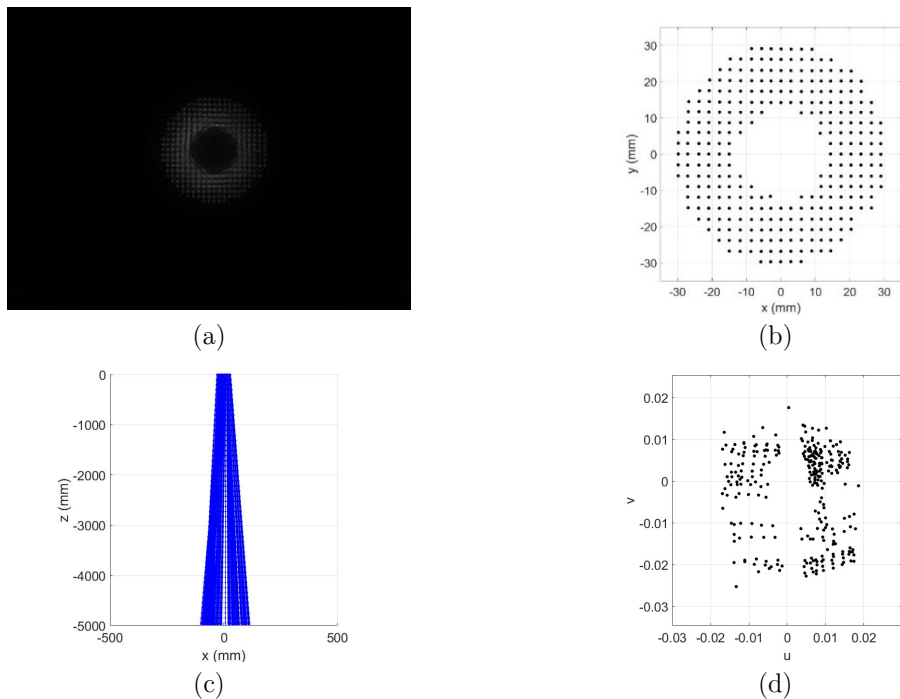


Figura 6.25 (a) Registro correspondiente al desplazamiento #1'. (b) Centroides de los spots. (c) Trazado inverso de rayos a partir de la posición de los spots en (b) y de la posición de los agujeros de la malla. (d) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) extraída a partir de la posición de los centroides (b) y de la posición de los agujeros de la malla.

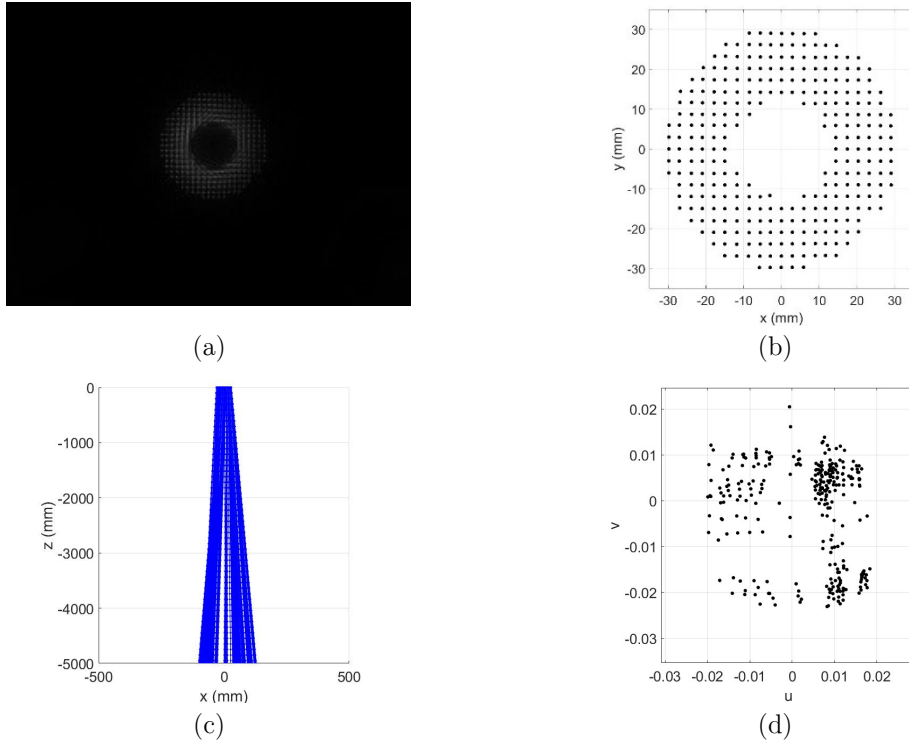


Figura 6.26 (a) Registro correspondiente al desplazamiento #2'. (b) Centroides de los spots. (c) Trazado inverso de rayos a partir de la posición de los spots en (b) y de la posición de los agujeros de la malla. (d) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) extraída a partir de la posición de los centroides (b) y de la posición de los agujeros de la malla.

Registro	Vector \vec{x}_1 (mm)	$\ \vec{x}_{n1} - \vec{x}_{e1}\ $ (mm)
Posición nominal	(0.15, 5.73, 1858.72)	-
Desplazamiento #1'	(7.26, 4.81, 2081.47)	222.86
Desplazamiento #2'	(9.26, 5.58, 2143.24)	284.67

Tabla 6.14 Valores medidos del vector posición, \vec{x}_1 , y de la primera función de mérito para los tres registros.

Registro	$\tilde{\mu}_{3u1}$	$\tilde{\mu}_{3v1}$	$abs\left(\frac{\tilde{\mu}_{3ue1} \cdot \tilde{\mu}_{3vn1}}{\tilde{\mu}_{3ve1} \cdot \tilde{\mu}_{3un1}}\right)$
Posición nominal	-0.031	-0.035	-
Desplazamiento #1'	-0.033	-0.034	1.106
Desplazamiento #2'	-0.041	-0.036	1.262

Tabla 6.15 Valores medidos de las asimetrías de las distribuciones de (u_1, v_1) , $\tilde{\mu}_{3u1}$ y $\tilde{\mu}_{3v1}$, y de la segunda función de mérito para cada uno de los registros.

En las tres distribuciones de (u, v) de las Figuras 5.23, 5.24 y 5.25, se observa como la forma de las distribuciones cambian ligeramente, arrastrando puntos hacia valores positivos de u . Los valores de la primera función de mérito, la asociada al vector posición, es alta como consecuencia de hallarse el componente cerca del foco del reflector, mientras que la función de mérito vinculada a la asimetría presenta valores incrementales para los distintos desplazamientos.

Implementación del análisis en el segundo conjunto de rayos (después de reflejarse)

La Figura 6.27, 6.28 y 6.29 presentan la información visual obtenida al implementar el análisis de la posición de los spots para la posición nominal, desplazamiento n^o1 y desplazamiento n^o 2.

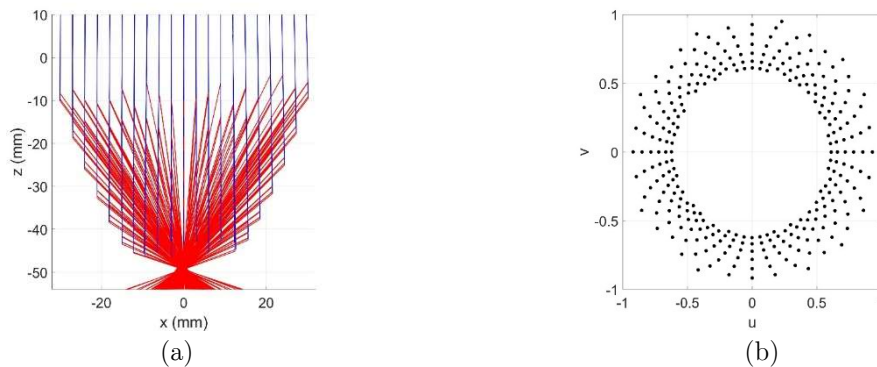


Figura 6.27 Posición nominal. (a) (Azul) trazado inverso de rayos del primer conjunto de rayos hasta la intersección con la superficie del reflector parabólico. (Rojo) Trazado inverso de rayos desde el reflector. (b) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) correspondientes a al segundo conjunto de rayos.

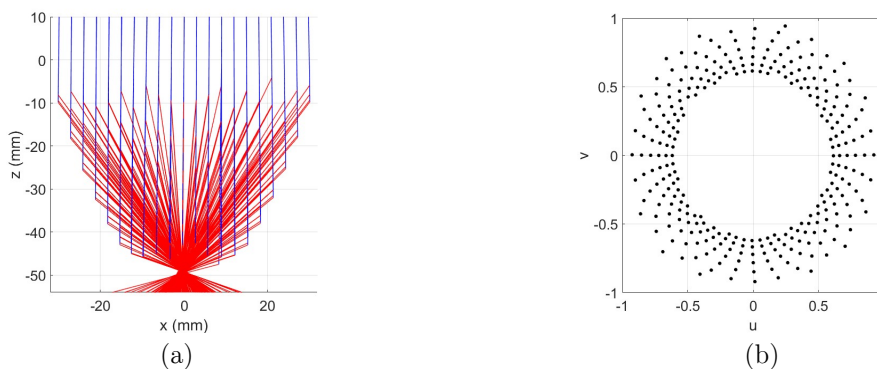


Figura 6.28 Desplazamiento #1'. (a) (Azul) trazado inverso de rayos del primer conjunto de rayos hasta la intersección con la superficie del reflector parabólico. (Rojo) Trazado inverso de rayos desde el reflector. (b) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) correspondientes a al segundo conjunto de rayos.

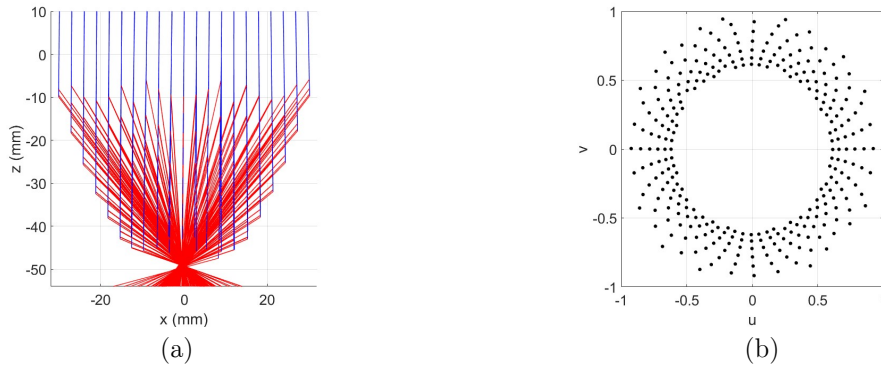


Figura 6.29 Desplazamiento #2'. (a) (Azul) trazado inverso de rayos del primer conjunto de rayos hasta la intersección con la superficie del reflector parabólico. (Rojo) Trazado inverso de rayos desde el reflector. (b) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) correspondientes a al segundo conjunto de rayos.

A continuación, mostramos la implementación de las funciones de mérito, en la Tabla 5.16 para los valores del vector posición \vec{x}_2 y su función de mérito asociada y en la Tabla 5.17 los valores de la asimetría de las distribuciones de (u, v) y los valores de su función de mérito asociada.

Registro	Vector \vec{x}_2 (mm)	$\ \vec{x}_{n1} - \vec{x}_{e1}\ $ (mm)
Posición nominal	(-0.17, 0.19, -48.73)	-
Desplazamiento 1'	(-0.32, 0.18, -48.64)	0.17
Desplazamiento 2'	(-0.43, 0.20, -49.29)	0.62

Tabla 6.16 Valores medidos del vector posición, \vec{x}_2 , y de la primera función de mérito para los tres registros.

Registro	$\tilde{\mu}_{3u2}$	$\tilde{\mu}_{3v2}$	$abs\left(\frac{\tilde{\mu}_{3ue2} \cdot \tilde{\mu}_{3vn2}}{\tilde{\mu}_{3ve2} \cdot \tilde{\mu}_{3un2}}\right)$
Posición nominal	0.00351	0.00200	-
Desplazamiento 1'	0.00894	0.00170	2.84565
Desplazamiento 2'	0.00813	0.00093	4.98116

Tabla 6.17 Valores medidos de las asimetrías de las distribuciones de (u_2, v_2) , $\tilde{\mu}_{3u2}$ y $\tilde{\mu}_{3v2}$, y de la segunda función de mérito para cada uno de los registros.

La Tabla 6.16 presenta valores con un desplazamiento claro en la dirección x , mientras que en la dirección y no se aprecia ningún desplazamiento notable y en la Tabla 6.17 podemos observar que el desplazamiento del componente LED respecto al reflector provoca un incremento en el valor de la función de mérito.

6.2.3.2. Registros empleados para verificar la repetitividad del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)

A continuación, la Figura 6.30 presenta los registros empleadas para realizar la medida de la repetitividad del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$). La Tabla 6.18 y 6.19 se presentan, respectivamente, la media y la desviación estándar de las componentes del vector posición $\vec{x} = (x, y, z)$ y de los valores de la asimetría, $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$ para el conjunto de rayos antes de reflejarse en el reflector parabólico (primer conjunto) mientras que la Tabla 6.20 y 6.21 presentan la misma información para los rayos después de reflejarse (segundo conjunto).

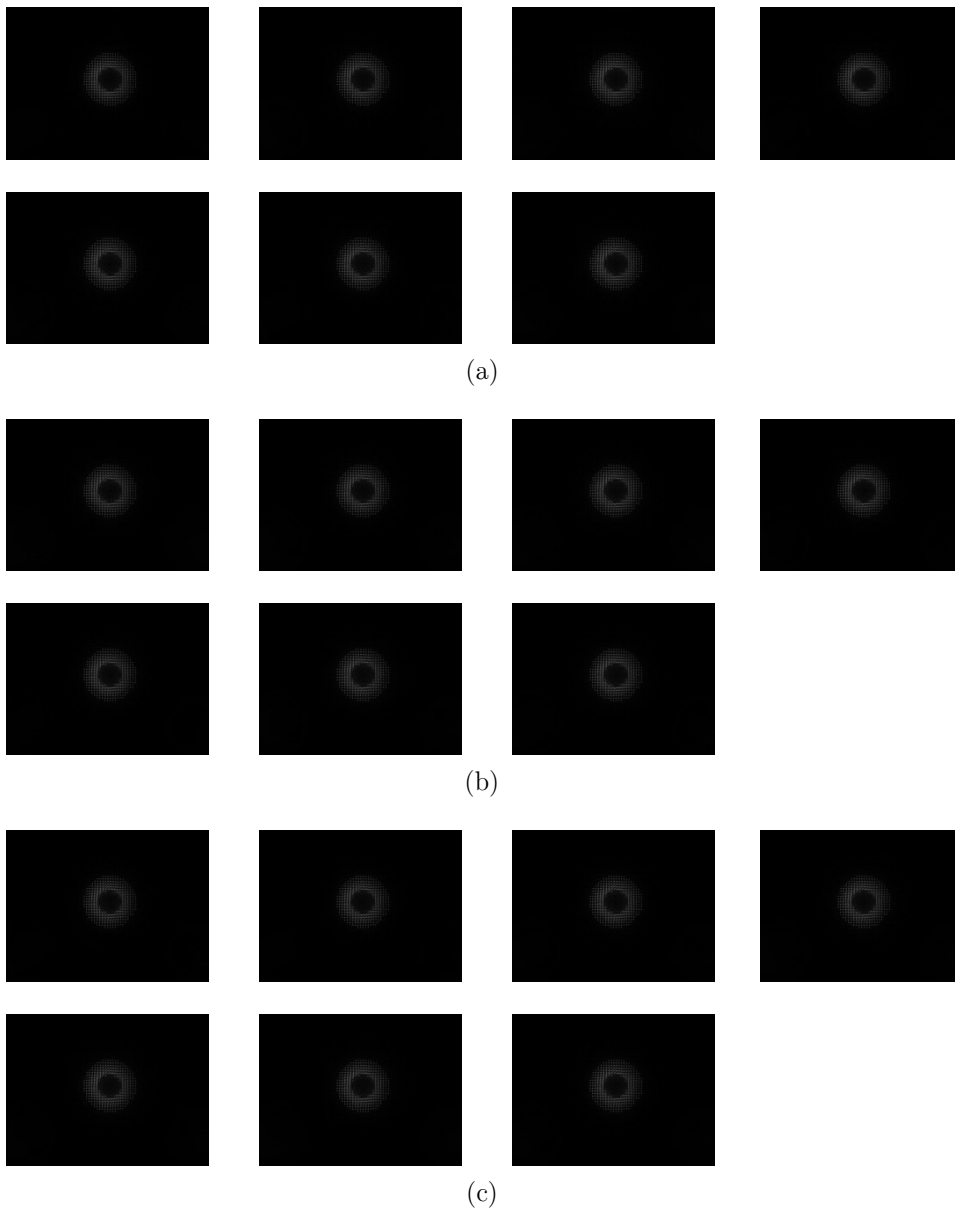


Figura 6.30 (a) Registros de repetitividad de control ($\theta > 35^\circ$) en la posición nominal. (b) en la posición $\Delta\vec{x}'_{r1} = (-0.1, 0, 0)$ mm. (c) en la posición $\Delta\vec{x}'_{r2} = (-0.2, 0, 0)$ mm.

	Media (mm)			Desviación estándar (mm)		
	x	y	z	x	y	z
Nominal	4.99	5.30	1974	3.62	0.73	151
$\Delta\vec{x}_{r1}$	5.32	2.92	1924	1.20	3.30	177
$\Delta\vec{x}_{r2}$	8.91	2.62	2087	3.39	3.90	186

Tabla 6.18 Valores de la media y de la desviación estándar del vector posición $\vec{x}_1 = (x, y, z)$.

	Media (mm)		Desviación estándar (mm)	
	$\tilde{\mu}_{3u1}$	$\tilde{\mu}_{3v1}$	$\tilde{\mu}_{3u1}$	$\tilde{\mu}_{3v1}$
Nominal	$-2.95 \cdot 10^{-2}$	$-3.43 \cdot 10^{-2}$	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$2.4 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	$-3.55 \cdot 10^{-2}$	$-3.25 \cdot 10^{-2}$	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	$-3.70 \cdot 10^{-2}$	$-3.55 \cdot 10^{-2}$	$3.3 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$

Tabla 6.19 Valores de la media y de la desviación estándar de, $\tilde{\mu}_{3u1}$ y $\tilde{\mu}_{3v1}$, asimetría de la distribución de valores de u_1 y v_1 .

	Media (mm)			Desviación estándar (mm)		
	x	y	z	x	y	z
Nominal	-0.182	0.185	-48.68	$8.2 \cdot 10^{-3}$	$4.5 \cdot 10^{-3}$	$6.2 \cdot 10^{-2}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	-0.307	0.205	-48.71	$1.5 \cdot 10^{-2}$	$9.2 \cdot 10^{-3}$	$7.1 \cdot 10^{-2}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	-0.422	0.194	-49.42	$1.3 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$1.0 \cdot 10^{-1}$

Tabla 6.20 Valores de la media y de la desviación estándar del vector posición $\vec{x}_2 = (x, y, z)$.

	Media (mm)		Desviación estándar (mm)	
	$\tilde{\mu}_{3u2}$	$\tilde{\mu}_{3v2}$	$\tilde{\mu}_{3u2}$	$\tilde{\mu}_{3v2}$
Nominal	$3.98 \cdot 10^{-3}$	$1.68 \cdot 10^{-3}$	$6.3 \cdot 10^{-4}$	$2.8 \cdot 10^{-4}$
$\Delta\vec{x}_{r1}$	$9.4 \cdot 10^{-3}$	$1.69 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{-4}$
$\Delta\vec{x}_{r2}$	$1.03 \cdot 10^{-2}$	$1.29 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$2.0 \cdot 10^{-4}$

Tabla 6.21 Valores de la media y de la desviación estándar de, $\tilde{\mu}_{3u2}$ y $\tilde{\mu}_{3v2}$, asimetría de la distribución de valores de u_2 y v_2 .

6.3. Componente LED Lambertiano con lente secundaria

En la sección 5.3 presentamos el componente LED al que se le ha añadido una lente secundaria. Como ya hemos mencionado, este componente tiene la característica de que emite gran parte de su flujo radiante más allá de los 35° . Esto hecho lo hace representativo de un grupo de componentes que se usan habitualmente en iluminación.

Del componente LED Lambertiano con lente secundaria mediremos seis casos distintos, distribuidos en dos conjuntos. El primer conjunto, con el LED en la posición de diseño, contempla tres casos; uno con el componente en la posición nominal de medida y los otros dos con el componente desplazado. En el segundo conjunto se ha descentrado el LED $\delta = (-0.5, 0.5, 0)$ mm respecto a la posición de diseño y se contemplan los tres casos equivalentes al primer conjunto, uno en posición nominal y los otros dos desplazados.

6.3.1. Medidas empleando la configuración del test óptico en línea

Como ya hemos presentado, a partir de los registros del test óptico en línea estamos en condiciones de obtener información relevante a partir de las funciones de mérito y los criterios asociados. La primera función de mérito del test óptico en línea analiza el nivel de irradiancia total presente en el registro y la segunda analizaba la forma de la distribución. La expresión de la primera función, así como su criterio, ecuación (3.13), no se ha modificado al ser implementados en los registros del presente componente. Del mismo modo, tampoco ha habido modificaciones en la implementación de la segunda función de mérito, ni en el valor del criterio.

Primer conjunto (sin descentrado del LED)

Tal y como hemos introducido al inicio de la presente sección el primer conjunto de registros consta de tres casos correspondientes a tres posiciones distintas del componente fotónico: posición nominal; desplazamiento #1, $\Delta\vec{x}_1 = (-0.5, 0, 0)$ mm; y desplazamiento #2, $\Delta\vec{x}_2 = (-1, 0, 0)$ mm.

La Figura 5.31 (a) presenta el registro correspondiente a la posición nominal, mientras que (b) y (c) presentan el registro correspondiente a los desplazamientos n°1 y n°2 respectivamente.

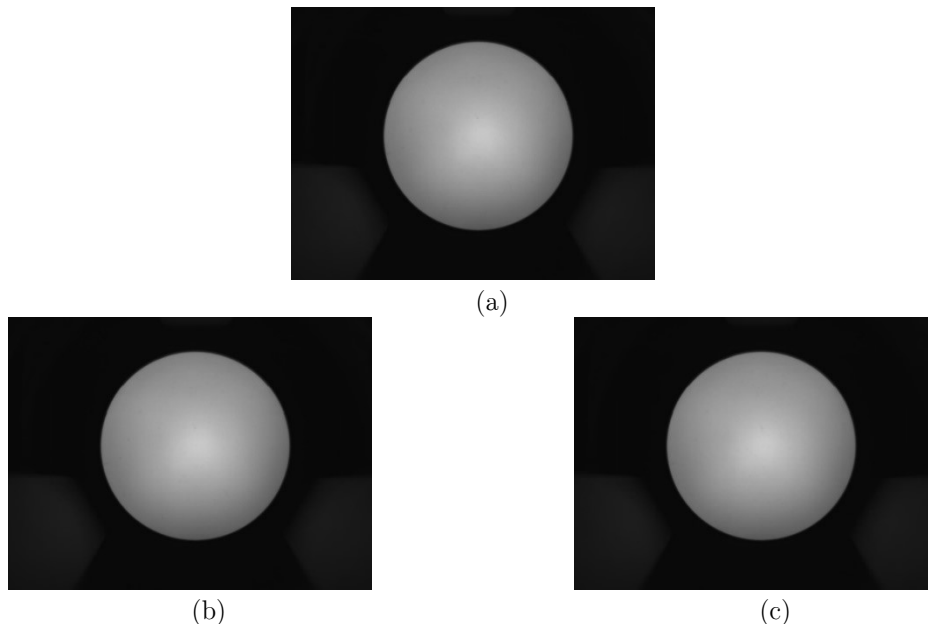


Figura 6.31 Conjunto de registros del test óptico en línea pertenecientes al primer conjunto. (a) Registro del LED Lambertiano con lente en su posición nominal. (b) y (c) Presentan los registros asociados al desplazamiento #1 y al desplazamiento #2, respectivamente. La dimensión de todos los registros es de 240×175 mm² (1294x970 píxeles²), con 256 niveles de digitalización. Los registros comparten normalización, cuyo máximo es 206.

A continuación, la Tabla 6.22 presenta los flujos radiantes totales en nivel de digitalización y el valor de la primera función de mérito:

Registro	Flujo radiante total	$abs\left(\sum_{i=1}^N REp_i - \sum_{i=1}^N RNp_i\right)$
Caso nominal	$3.07 \cdot 10^5$	-
Desplazamiento n°1	$3.06 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^3$
Desplazamiento n°2	$3.06 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^3$

Tabla 6.22 Flujo radiante total y valor de la función de mérito, en niveles de digitalización del caso nominal, desplazamiento #1 y desplazamiento #2.

El flujo radiante total en el caso nominal es $3.07 \cdot 10^5$, el 15% de este valor es $4.6 \cdot 10^4$, los registros para los desplazamientos #1 y #2 presentan valores de la función de mérito del orden de 10^3 . Tal y como esperábamos los desplazamientos solidarios del componente producen registros que son catalogados como válidos por la función de mérito que analiza el flujo radiante total.

A continuación, presentamos la implementación de la segunda función de mérito para estos mismos registros, la que analiza la forma de la distribución. La Figura 6.32 presenta las respectivas zonas anulares empleadas para ajustar una elipse y posteriormente hallar el valor de su excentricidad. Recordemos que la relación entre excentricidades debe ser inferior a (1:2) entre los registros a evaluar y la nominal, $\epsilon_e < 2\epsilon_n$, para dar el componente como válido, ecuaciones (3.14) (3.15) (3.21) y (3.22).

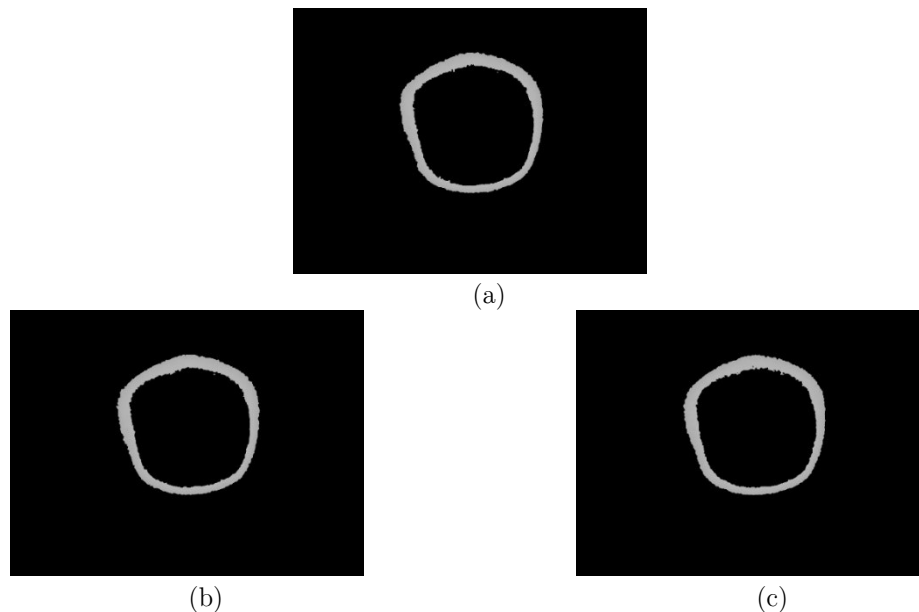


Figura 6.32 Regiones anulares resultado de aplicar el criterio de la ecuación (3.14) a los registros (a) nominal (b) desplazamiento #1 y (c) desplazamiento #2. Los valores de excentricidad que presentan son: 0.37, 0.40, y 0.39, respectivamente.

La Tabla 6.23 presenta los valores de las excentricidades obtenidos para cada zona anular, ecuación (3.21). El registro nominal, con un valor de excentricidad de 0.37, determina el umbral a partir del cual se consideran los componentes aptos. Para el presente componente el criterio está fijado en 2 veces el valor del registro nominal, de modo que el umbral se sitúa en $2 \times 0.37 = 0.74$. Consecuentemente, todos los componentes medidos son catalogados como aptos por el test de forma.

Registro	Valor de ϵ
Posición nominal	0.37
Desplazamiento n°1	0.40
Desplazamiento n°2	0.39

Tabla 6.23 Valores de excentricidad obtenidos para el conjunto sin descentrado del LED.

Segundo conjunto (con descentrado del LED)

El segundo conjunto de registros se ha realizado en las mismas posiciones que en el primer conjunto, pero con la presencia de descentrado en la posición del LED Lambertiano de $\delta = (-0.5, 0.5, 0)$ mm, respecto a la posición nominal de éste.

La Figura 6.33 (a) presenta el registro correspondiente a la posición nominal, mientras que (b) y (c) presentan el registro correspondiente al desplazamiento #1, y al desplazamiento #2, respectivamente.

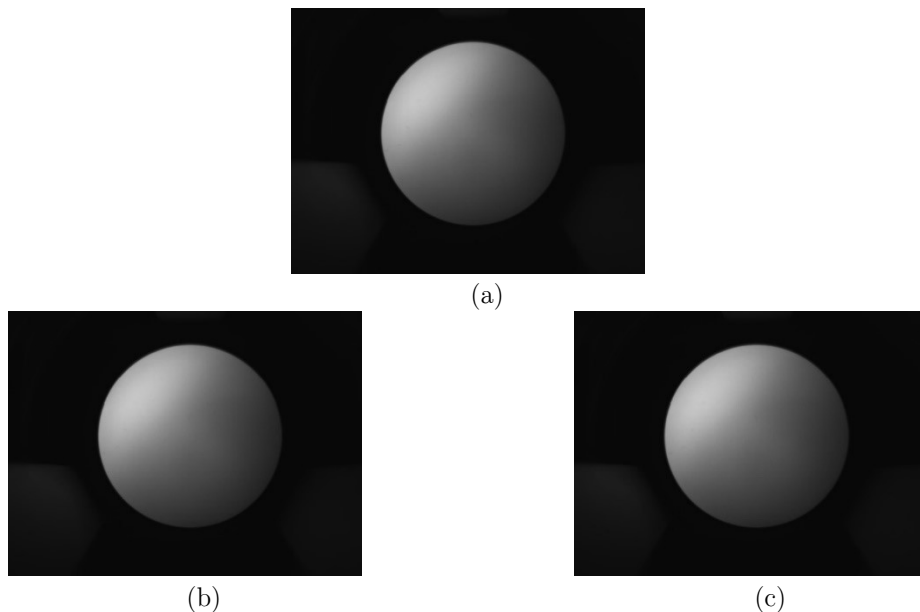


Figura 6.33 Registros pertenecientes al segundo conjunto. (a) Registro del LED Lambertiano con lente secundaria en su posición nominal. (b) y (c) Presentan los registros asociados al desplazamiento #1 y al desplazamiento #2, respectivamente. La dimensión de todos los registros es de 240×175 mm² (1294×970 píxeles²), con 256 niveles de digitalización. Los registros comparten normalización, cuyo máximo es 206.

A continuación, la Tabla 6.24 presenta los flujos radiantes totales en nivel de digitalización, en ella se observa que el flujo radiante total que presenta el registro correspondiente al caso nominal, sin descentramiento, y perteneciente al primer conjunto, Tabla 6.22, es $3.07 \cdot 10^5$, el 15% de este valor es $4.6 \cdot 10^4$. Todos los registros de este segundo conjunto presentan valores de la función de mérito mayores a este valor y en consecuencia ningún caso supera la implementación de la primera función de mérito y su criterio asociado.

Registro	Flujo radiante total	$abs\left(\sum_{i=1}^N REp_i - \sum_{i=1}^N RNp_i\right)$
Posición nominal	$2.32 \cdot 10^5$	$7.5 \cdot 10^4$
Desplazamiento n°1	$2.30 \cdot 10^5$	$7.7 \cdot 10^4$
Desplazamiento n°2	$2.29 \cdot 10^5$	$7.8 \cdot 10^4$

Tabla 6.24 Flujo radiante total y valor de la función de mérito en niveles de digitalización del caso en posición nominal, desplazamiento #1 y desplazamiento #2, pertenecientes al segundo conjunto.

Veamos ahora la implementación de la segunda función de mérito para estos mismos registros. La Figura 6.34 presenta las respectivas zonas anulares empleadas para calcular la excentricidad, Tabla 6.25

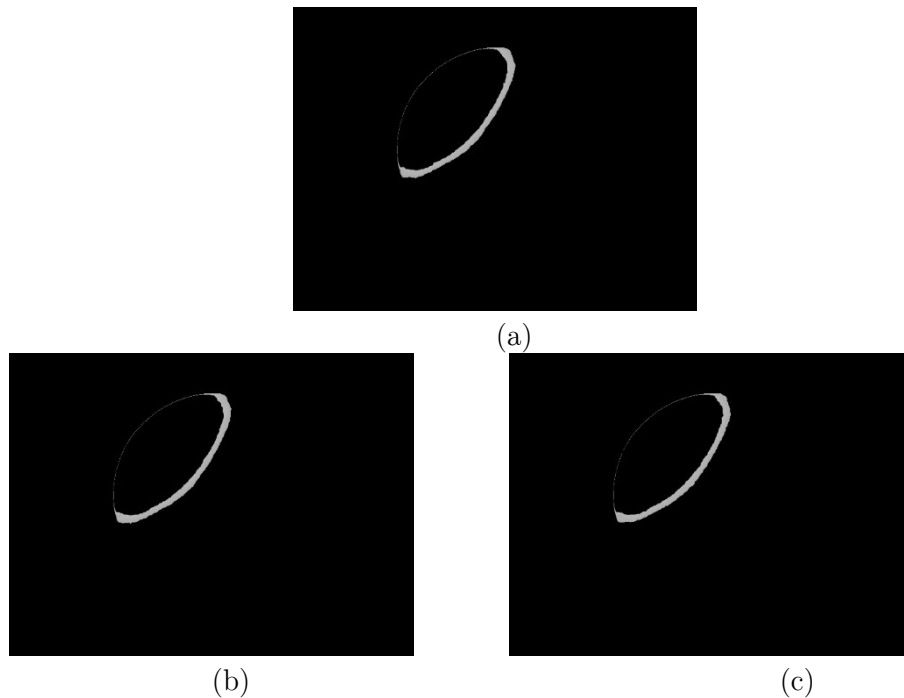


Figura 6.34 Regiones anulares resultado de aplicar el criterio de la ecuación (3.14) a los registros (a) nominal (b) desplazamiento #1 y (c) desplazamiento #2 del segundo conjunto. Los valores de excentricidad que presentan son: 0.87, 0.87, y 0.88, respectivamente.

La Tabla 6.25 presenta los valores de las excentricidades obtenidos para cada zona anular, ecuación (3.21). El registro nominal, perteneciente al primer conjunto, ver Tabla 5.23, tiene un valor de excentricidad de 0.37, valor que determina el umbral a partir del cual se consideran los componentes aptos. En nuestro caso, como el criterio lo fijamos en 2 veces el valor del registro nominal, el umbral se sitúa en $2 \times 0.37 = 0.74$ y en consecuencia todos los casos de este segundo conjunto son catalogados como no válidos por el test de forma.

Registro	Valor de ϵ
Posición nominal	0.87
Desplazamiento 1	0.87
Desplazamiento 2	0.88

Tabla 6.25 Valores de excentricidad obtenidos para el registro nominal y los desplazamientos #1 y #2 para el segundo conjunto (con descentrado del LED)

En resumen, de las medidas obtenidas al implementar el test óptico en línea catalogamos como no válidos los tres casos pertenecientes al segundo conjunto ya que han sido considerados no válidos tanto por el test de energía radiante como por el de forma. Como consecuencia, aplicamos el control óptico de calidad a los casos del segundo conjunto.

6.3.2. Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)

Como consecuencia de las medidas obtenidas al implementar el test óptico en línea, aplicamos el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) en el segundo conjunto. Por supuesto, también lo implementamos en el caso nominal, con el fin de comparar las medidas obtenidas. En primer lugar, implementamos el análisis de la posición de los spots y en segundo lugar implementamos el análisis del nivel de irradiancia de éstos.

Análisis de la posición de los spots

La Figura 6.35 presenta los registros correspondientes al caso nominal y a los tres casos del segundo conjunto.

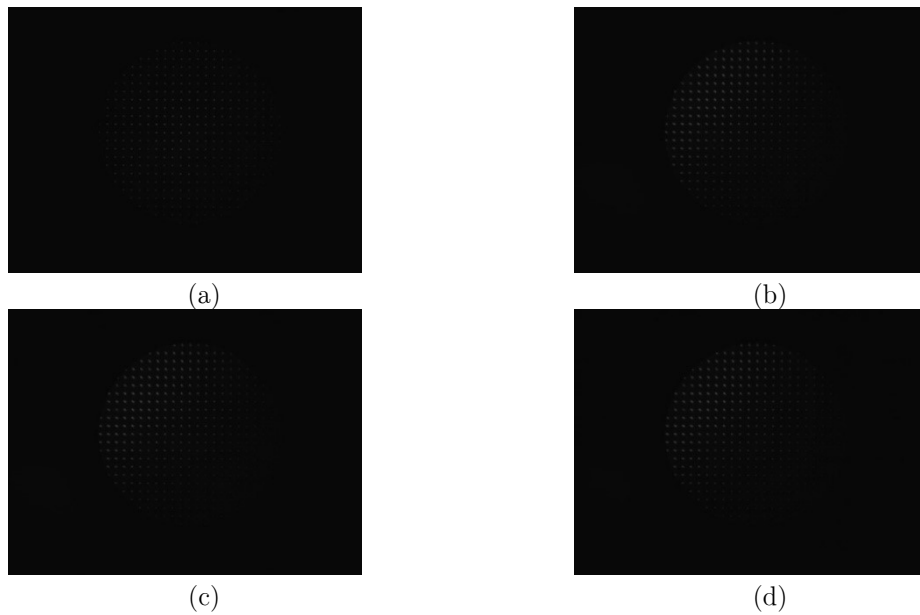


Figura 6.35 Registros de spots del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$). (a) Caso nominal, (b) posición nominal con descentramiento (c) desplazamiento #1 con descentramiento y (d) desplazamiento #2 con descentramiento. La dimensión de todos los registros es de $240 \times 175 \text{ mm}^2$ (1294×970 píxeles), con 256 niveles de digitalización normalizados a un máximo común para los cuatro registros experimentales, cuyo valor es 91.

A partir de la distribución de spots extraemos, para cada uno de los registros, la posición de los centroides, el trazado inverso de rayos y la distribución de los valores (u, v) , tal y como observamos en la Figura 6.36, 6.37, 6.38 y 6.39.

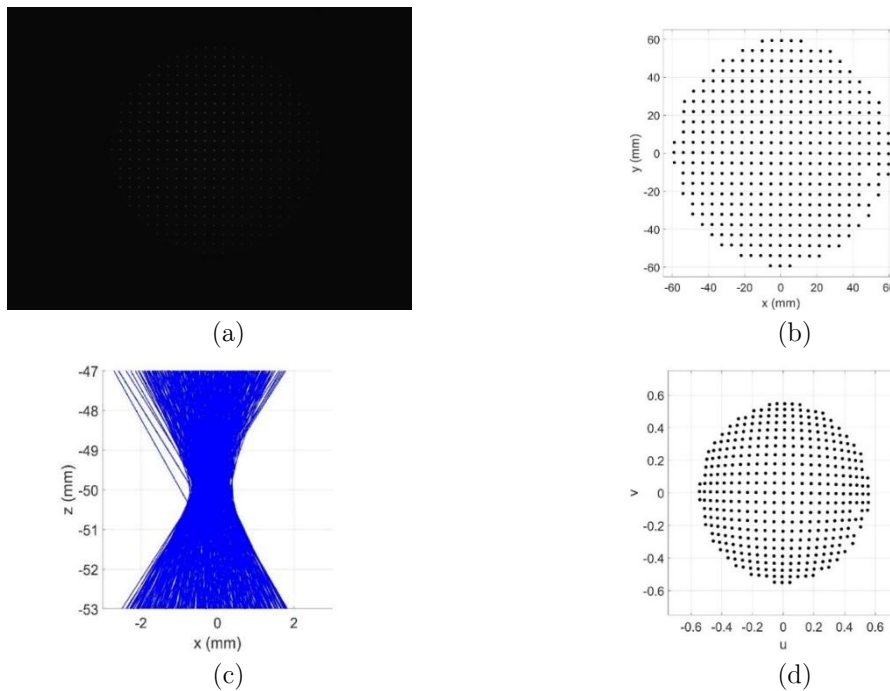


Figura 5.36 (a) Registro del caso nominal. (b) Centroides de los spots del registro en (a). (c) Trazado inverso de rayos a partir de la posición de los spots en (b) y de la posición de los agujeros de la malla. (d) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) extraída a partir de la posición de los centroides (b) y de la posición de los agujeros de la malla.

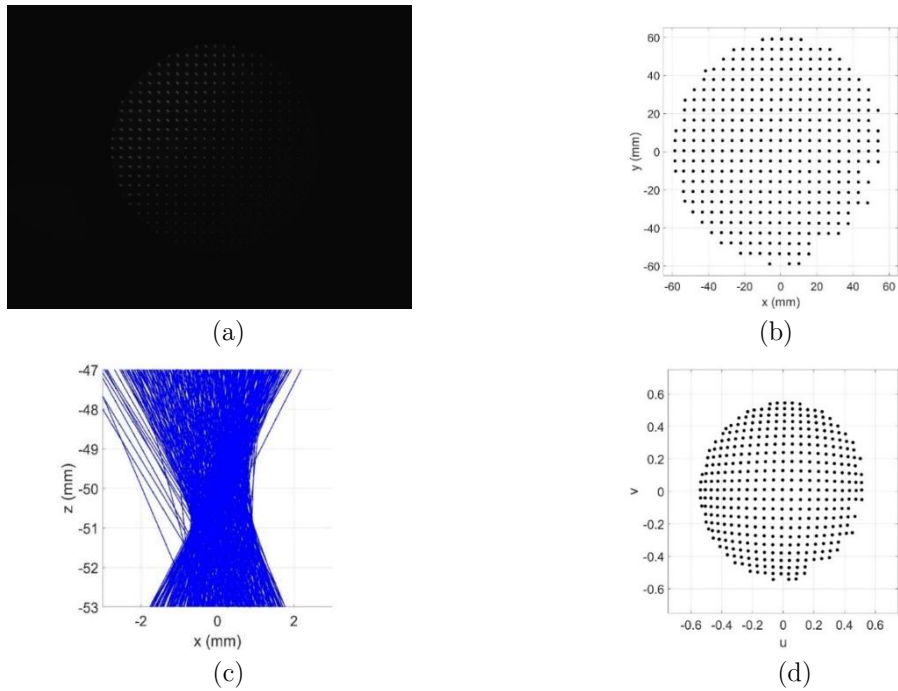


Figura 5.37 (a) Registro del primer caso del segundo conjunto (posición nominal con descentramiento). (b) Centroides de los spots del registro en (a). (c) Trazado inverso de rayos a partir de la posición de los spots en (b) y de la posición de los agujeros de la malla. (d) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) extraída a partir de la posición de los centroides (b) y de la posición de los agujeros de la malla.

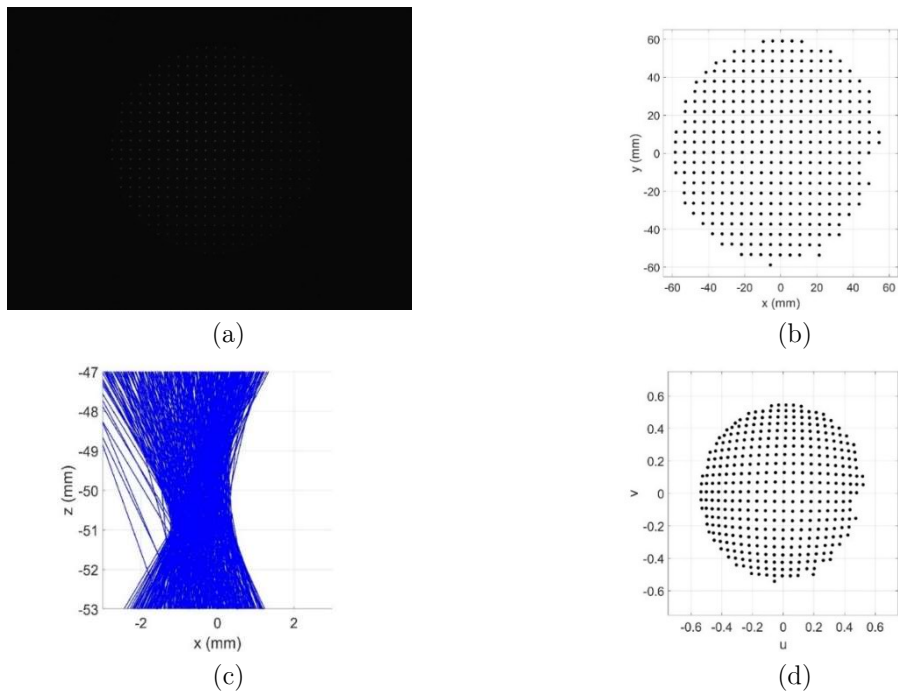


Figura 5.38 (a) Registro del segundo caso del segundo conjunto (desplazamiento #1 con descentramiento). (b) Centroides de los spots del registro en (a). (c) Trazado inverso de rayos a partir de la posición de los spots en (b) y de la posición de los agujeros de la malla. (d) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) extraída a partir de la posición de los centroides (b) y de la posición de los agujeros de la malla.

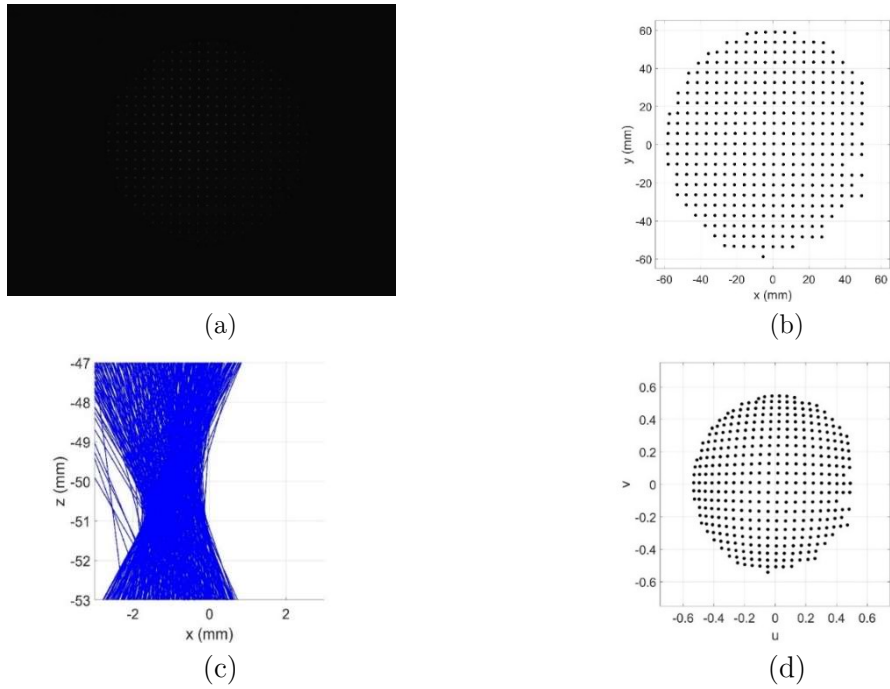


Figura 5.39 (a) Registro del tercer caso del segundo conjunto (desplazamiento #2 con descentramiento). (b) Centroides de los spots del registro en (a). (c) Trazado inverso de rayos a partir de la posición de los spots en (b) y de la posición de los agujeros de la malla. (d) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) extraída a partir de la posición de los centroides (b) y de la posición de los agujeros de la malla.

A partir de los trazados inversos de rayos presentados, observamos dos comportamientos muy claros. En primer lugar, observamos un cambio en la forma de la cáustica entre el registro nominal, Figura 6.36 (c), y los registros asociados a los casos del segundo conjunto, Figura 6.37 (c), Figura 6.38 (c) y Figura 5.39 (c). Tal y como ya hemos presentado a lo largo de la tesis, este cambio en la cáustica viene vinculado al desalineado que presentan los casos del segundo conjunto. En segundo lugar, observamos un desplazamiento de la zona de convergencia entre los casos del segundo conjunto. Este desplazamiento de la zona de convergencia es consecuencia directa del desplazamiento que hemos aplicado experimentalmente.

Finalmente podemos aplicar las funciones de mérito a los registros anteriores con el fin de obtener información cuantitativa, la Tabla 6.26 recoge los valores de la primera función de mérito, vinculada al vector posición \vec{x} y la Tabla 5.27 los valores de la segunda función de mérito vinculada los valores de la los valores de la asimetría de las distribuciones de (u, v) .

Registro	Vector \vec{x} (mm)	$\ \vec{x}_n - \vec{x}_e\ $ (mm)
Nominal	(-0.051, 0.057, -50.104)	-
Posición nominal con descentramiento del LED	(-0.225, 0.358, -50.734)	0.719
Desplazamiento #1 con descentramiento del LED	(-0.720, 0.355, -50.623)	0.898
Desplazamiento #2 con descentramiento del LED	(-1.195, 0.380, -50.658)	1.311

Tabla 6.26 Valores medidos del vector posición, \vec{x} , y de la primera función de mérito para cada uno de los registros.

Registro	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$	$abs\left(\frac{\tilde{\mu}_{3ue} \cdot \tilde{\mu}_{3vn}}{\tilde{\mu}_{3ve} \cdot \tilde{\mu}_{3un}}\right)$
Nominal	0.0010	-0.0012	-
Posición nominal con descentramiento del LED	0.0021	-0.0033	0.7532
Desplazamiento n°1 con descentramiento del LED	0.0018	-0.0038	0.5458
Desplazamiento n°2 con descentramiento del LED	0.0016	-0.0038	0.4982

Tabla 6.27 Valores medidos de las asimetrías de las distribuciones de (u, v) , $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, y de la segunda función de mérito para cada uno de los registros.

Los valores de la Tabla 6.26 nos confirman el desplazamiento que experimentalmente hemos introducido entre los distintos registros del LED Lambertiano con lente, así como la presencia de descentramiento del LED, visible, por ejemplo, en el cambio de valor de la componente y de los tres casos con descentramiento respecto al caso nominal. El efecto del descentramiento del LED también se observa en la Tabla 6.27 que muestra valores de la función de mérito alejados de la unidad.

Análisis del valor de irradiancia de los spots

En el caso del componente LED Lambertiano con lente secundaria, aplicamos el análisis del valor de irradiancia de los spots solo uno de los casos que presentan desalineado ya que la información obtenida es análoga para los tres.

La Figura 6.40 presenta el registro del caso posición nominal con descentramiento del LED, se ha indicado con un círculo rojo los spots que no cumplen el criterio de irradiancia, ecuaciones (3.35) y (3.36) y se han añadido las vistas xy y xz de la intersección de los rayos con una esfera de radio 16 mm, que correspondiente a la zona central de la lente, además a la vista xz se han añadido los rayos correspondientes a los spots anómalos.

La Figura 6.40 presenta como el descentrado del LED respecto a la óptica, $\delta = (-0.5, 0.5, 0)$ mm, provoca que dos zonas no cumplan el criterio. En la primera zona, superior izquierda, correspondiente a y positivas y x negativas, los spots presentan un exceso en el nivel de irradiancia. En la segunda zona, inferior derecha, correspondiente a y negativas y x positivas, los spots presentan un defecto en el nivel de irradiancia. Finalmente hay una zona central de transición donde los spots cumplen el criterio.

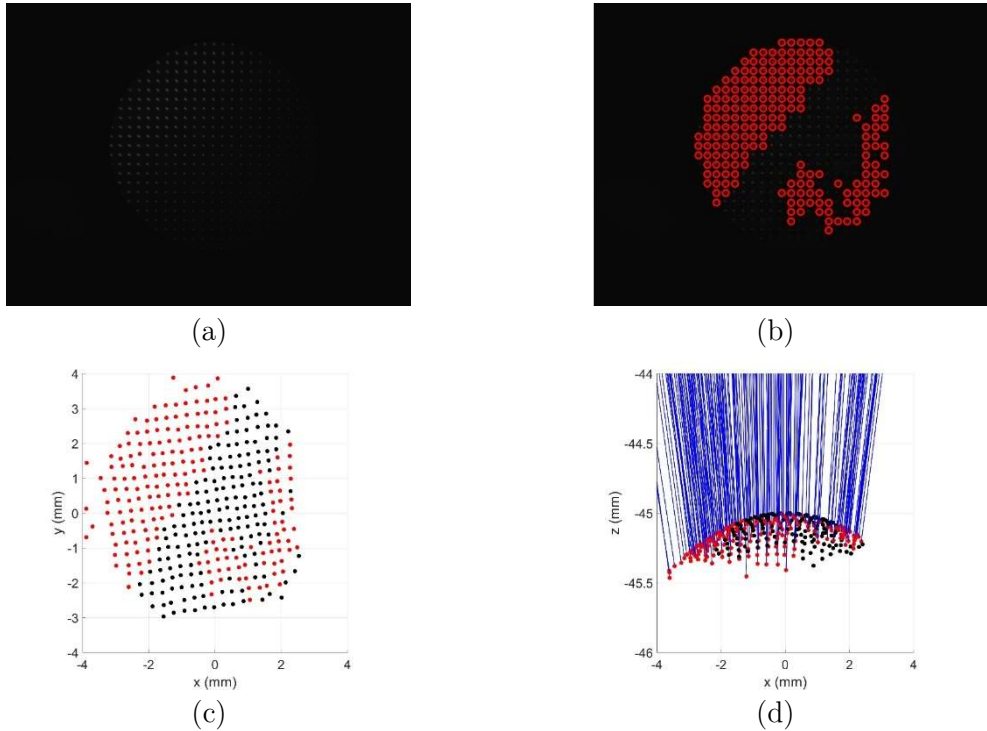


Figura 6.40 (a) Registro del caso posición nominal con descentramiento del LED. (b) Registro con los spots que no cumplen el criterio de irradiancia indicados en rojo. (c) y (d) Vistas xy y xz de la intersección de los rayos con una esfera de radio 16 mm, que correspondiente a la zona central de la lente. Adicionalmente en (d) se muestra el trazado de los rayos asociados a los spots anómalos.

6.3.3. Implementación del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)

Mediante la implementación del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$), gracias a la presencia del reflector, podemos analizar luz emitida hasta 76° . De este modo obtenemos información visual y numérica acerca de la funcionalidad de los componentes fotónicos con un gran ángulo de emisión.

La situación del componente LED Lambertiano con lente respecto a los desplazamientos $|\Delta\vec{x}| \geq 0.5$ mm es análoga a la del LED Lambertiano que hemos analizado en 6.2.3.1. y tampoco podremos aplicar el control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) en dichos casos. Por este motivo sólo implementamos el control óptico de calidad a dos registros; el registro nominal

y el registro del componente situado en la posición nominal, pero con el LED descentrado. La Figura 6.41 presenta los registros correspondientes a estos dos casos.



Figura 6.41 Registros de spots del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) (a) nominal y (b) componente situado en posición nominal pero con el LED descentrado. La dimensión de todos los registros es de $240 \times 175 \text{ mm}^2$ ($1294 \times 970 \text{ píxeles}^2$), con 256 niveles de digitalización normalizados a un máximo común para los tres registros experimentales, cuyo valor es 185.

Análisis de la posición de los spots

Recordemos que al implementar el análisis de los spots en el control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$), obtenemos dos conjuntos de datos: los que obtenemos de los rayos del primer conjunto y los que obtenemos de los rayos del segundo conjunto. Igual que en el anterior control óptico de calidad comparamos la posición de convergencia de los rayos trazados del componente que estamos evaluando respecto al componente nominal, ecuación (3.49), y los valores del tercer momento estándar, también conocido como asimetría, de las distribuciones de u y v , ecuación (3.50). De nuevo por claridad de la sección, analizamos primero los rayos antes de reflejarse y posteriormente analizaremos los que han sufrido la reflexión.

Implementación del análisis en el primer conjunto de rayos (antes de reflejarse)

Las Figura 6.42 y 6.43 presentan la información visual obtenida al implementar el análisis de la posición de los spots para el registro a evaluar y para el registro a evaluar correspondiente al primer conjunto de rayos.

6. MEDIDAS EXPERIMENTALES

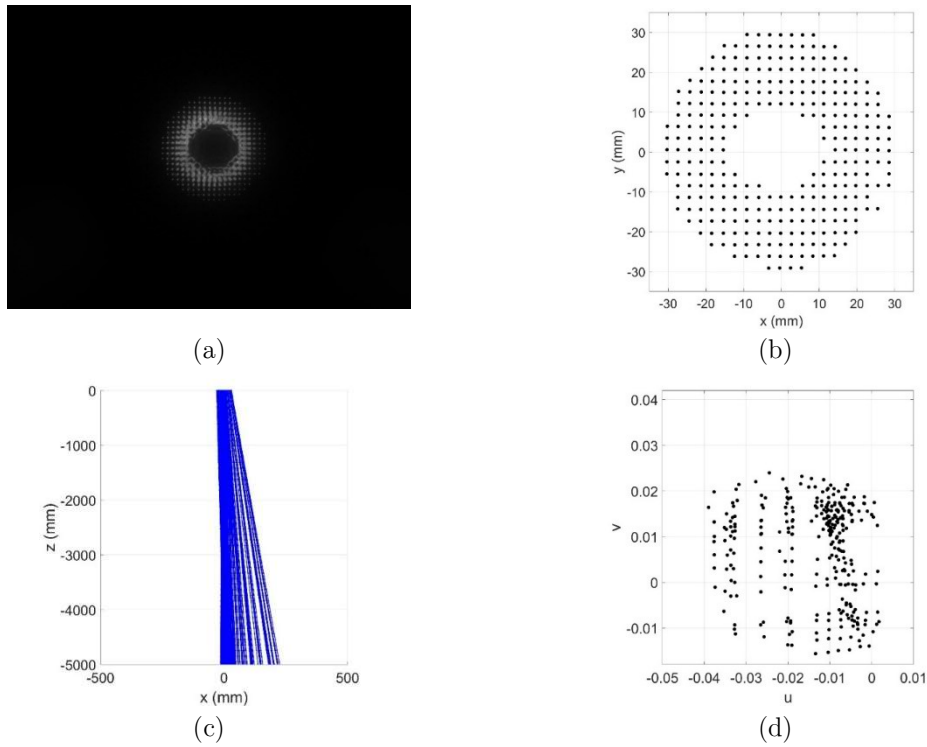


Figura 6.42 (a) Registro nominal. (b) Centroides de los spots del registro. (c) Trazado inverso de rayos. (d) Distribución de los cosenos directores (u, v) .

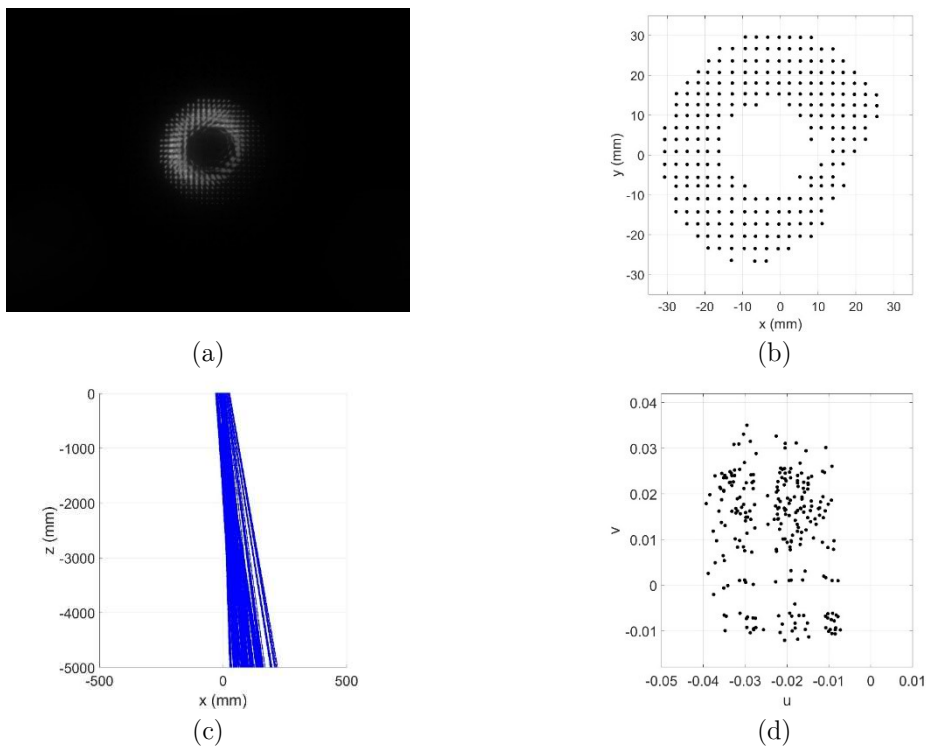


Figura 6.43 (a) Registro nominal con el LED descentrado. (b) Centroides de los spots del registro. (c) Trazado inverso de rayos. (d) Distribución de los cosenos directores (u, v) .

En las distribuciones (u, v) de las Figuras 6.42 y 6.43 se observa como hay un desplazamiento en el sentido negativo de u y en el sentido positivo de v del registro a evaluar respecto al registro nominal. Este hecho también se observa en el comportamiento del trazado inverso de rayos.

A continuación, en la Tabla 6.28 y 6.29 muestran los valores de las funciones de mérito; la Tabla 6.28 presenta los valores del vector posición \vec{x}_1 y su función de mérito asociada y la Tabla 6.29 muestra los valores de la asimetría de las distribuciones de (u, v) y el valor de la función de mérito para cada registro.

Registro	Vector \vec{x}_1 (mm)	$\ \vec{x}_{n1} - \vec{x}_{e1}\ $ (mm)
Nominal	(-9.39, 18.01, 643.73)	-
Posición nominal con el LED descentrado	(-6.00, 12.15, 733.19)	89.72

Tabla 6.28 Valores medidos del vector posición, \vec{x}_1 , y de la primera función para mérito.

Registro	$\tilde{\mu}_{3u1}$	$\tilde{\mu}_{3v1}$	$abs\left(\frac{\tilde{\mu}_{3ue1} \cdot \tilde{\mu}_{3vn1}}{\tilde{\mu}_{3ve1} \cdot \tilde{\mu}_{3un1}}\right)$
Nominal	-0.0485	-0.0339	-
Posición nominal con el LED descentrado	-0.0347	-0.0089	2.7143

Tabla 6.29. Valores medidos de las asimetrías de las distribuciones de $(u, v)_1$, $\tilde{\mu}_{3u1}$ y $\tilde{\mu}_{3v1}$, y de la segunda función de mérito.

Implementación del análisis en el segundo conjunto de rayos (después de reflejarse)

La Figura 6.44 y 6.45 presentan la información visual obtenida al implementar el análisis de la posición de los spots para el registro a nominal y para el registro a evaluar correspondiente al primer segundo de rayos.

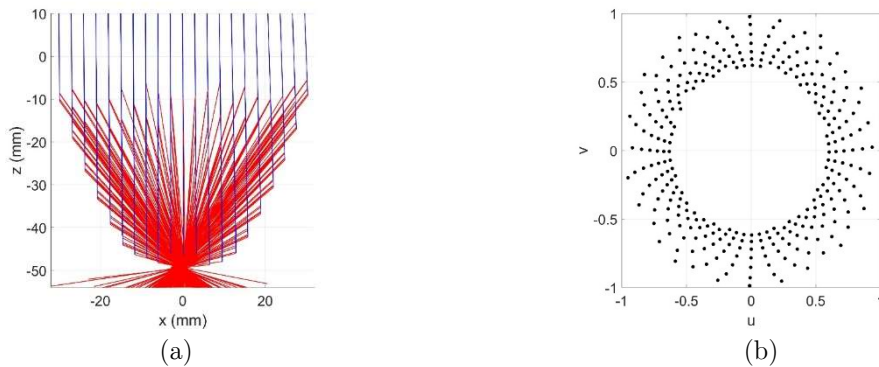


Figura 6.44 Registro nominal. (a) (Azul) trazado inverso de rayos hasta la intersección con el reflector. (Rojo) trazado inverso de rayos a partir del reflector parabólico. (b) Distribución de los cosenos directores de las componentes x y (u, v) correspondientes al segundo conjunto de rayos.

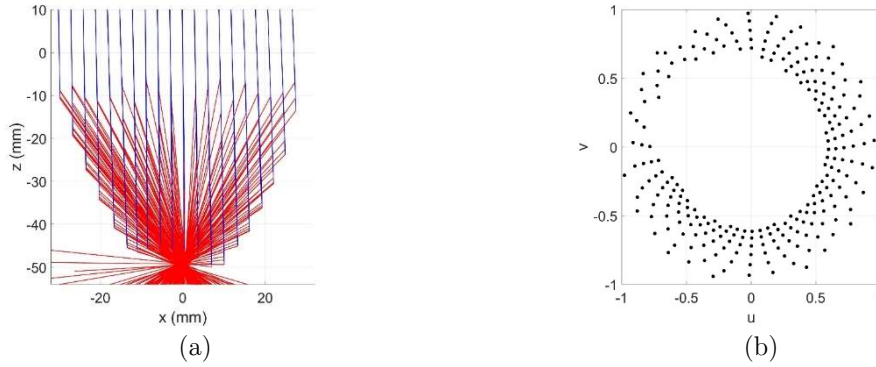


Figura 6.45 Registro en la posición nominal con el LED desplazado. (a) (Azul) trazado inverso de rayos hasta la intersección con el reflector. (Rojo) trazado inverso de rayos a partir del reflector parabólico. (b) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) correspondientes al segundo conjunto de rayos.

En las distribuciones de (u, v) de la Figura 6.44 y 6.45 notamos claramente como para el caso del registro en la posición nominal con el LED desplazado hay una pérdida de la simetría en la región de v positivas y u negativas.

A continuación, la Tabla 6.30 y 6.31 muestran la implementación de las funciones de mérito. La Tabla 6.30 presenta los valores del vector posición \vec{x}_2 y los valores de su función de mérito asociada y la Tabla 6.31 muestra los valores de la asimetría de las distribuciones de (u, v) y los valores de la función de mérito para cada registro.

Registro	Vector \vec{x}_2 (mm)	$\ \vec{x}_{n2} - \vec{x}_{e2}\ $ (mm)
Nominal	(0.1490, -0.4005, -49.7857)	-
Nominal con el LED descentrado	(0.3054, -0.6630, -50.2872)	0.5872

Tabla 6.30 Valores medidos del vector posición, \vec{x}_2 , y de la primera función para mérito ambos registros.

Registro	$\tilde{\mu}_{3u2}$	$\tilde{\mu}_{3v2}$	$abs\left(\frac{\tilde{\mu}_{3ue2} \cdot \tilde{\mu}_{3vn2}}{\tilde{\mu}_{3ve2} \cdot \tilde{\mu}_{3un2}}\right)$
Nominal	0.00050	0.00168	-
Nominal con el LED descentrado	0.01964	-0.01795	3.67280

Tabla 6.31 Valores medidos de las asimetrías de las distribuciones de (u_1, v_1) , $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, y de la segunda función de mérito para cada uno de los registros.

Observamos cómo, debido al descentrado del LED, la Tabla 5.30 muestra un desplazamiento de la zona de convergencia en los 3 ejes en el registro con el LED descentrado respecto al nominal y la Tabla 5.31 muestra como la función de mérito se desvía de la unidad, corroborando la presencia de desalineado.

Análisis del valor de irradiancia de los spots

El análisis del valor de irradiancia de los spots lo aplicamos al registro en la posición nominal con el LED desplazado tomando como referencia el mismo registro nominal como en todos los casos anteriores.

La Figura 6.46 presenta el registro del caso posición nominal con desplazamiento del LED, se ha indicado con un círculo rojo los spots que no cumplen el criterio de irradiancia, ecuaciones (3.35) y (3.36) y se han añadido las vistas xy y xz de la intersección de los rayos con una esfera de radio 16 mm, que corresponde a la zona exterior de la lente, además a la vista xz se han añadido los rayos correspondientes a los spots anómalos.

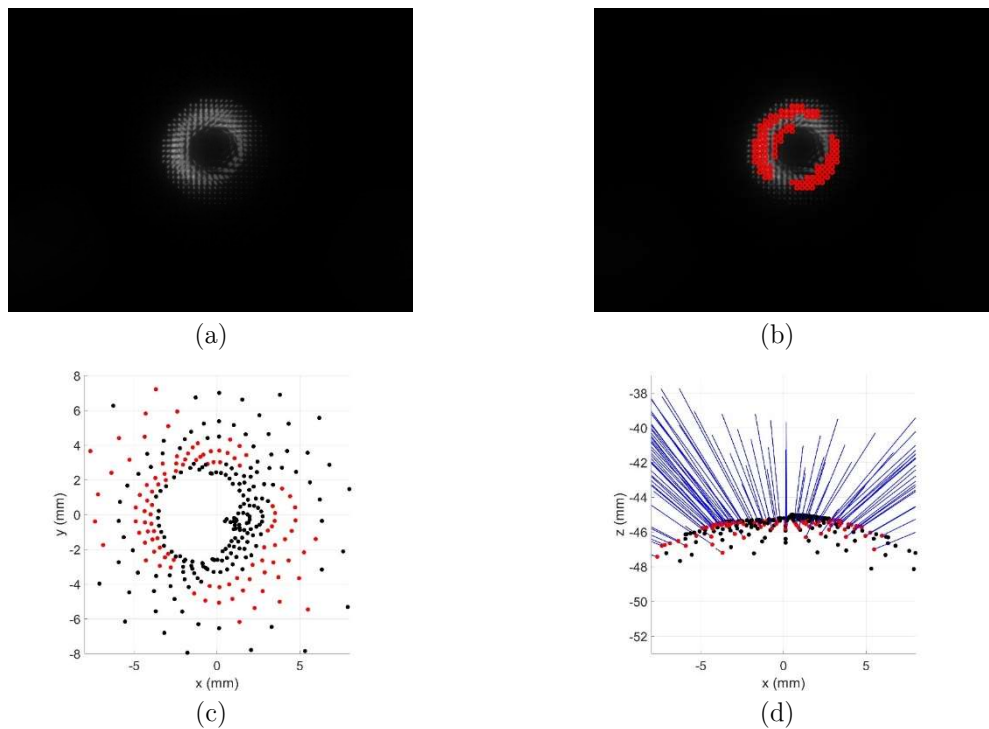


Figura 6.46 (a) Registro del caso posición nominal con descentramiento del LED (b) registro con los spots que no cumplen el criterio de irradiancia indicados en rojo. (c) y (d) Vistas xy y xz de la intersección de los rayos con una esfera de radio 16 mm, que corresponde a la zona central de la lente. Adicionalmente en (d) se muestra el trazado de los rayos asociados a los spots anómalos.

La situación es análoga a la del control ($\theta < 35^\circ$) con dos regiones de spots bien diferenciadas. Sin embargo, a diferencia del control óptico anterior, los spots interiores que no cumplen el criterio corresponden a regiones exteriores de la superficie de la lente.

7. Simulaciones

En el presente capítulo presentamos la implementación de la estrategia de medida a los registros obtenidos en el entorno de simulación. La importancia del capítulo reside en la equiparación entre los registros simulados y los experimentales. Este hecho permite realizar un análisis de los dispositivos antes de que estos se fabriquen, con el consecuente ahorro de tiempo y dinero.

Dado que el objetivo del capítulo es establecer relaciones entre los registros experimentales y los simulados analizamos los mismos componentes que en el capítulo anterior: componente LED Lambertiano, componente FOT y componente LED Lambertiano con lente secundaria.

Empezamos reproduciendo la implementación de la estrategia de medida en registros simulados del componente LED Lambertiano análogos a los mostrados en el Capítulo 6 ya que precisamente este componente se eligió con el objetivo de mostrar como al implementar la estrategia se obtienen resultados análogos entre los registros experimentales y los simulados. Posteriormente, presentamos la implementación de la estrategia en los registros simulados del componente FOT, donde se han considerado varios casos en que se varía la forma de la óptica y la posición del chip del LED y, finalmente, aplicamos la estrategia de medida a los registros simulados del componente LED Lambertiano con lente secundaria en un caso en que la lente presenta un defecto en la forma.

De igual modo que en el capítulo anterior, los registros presentados en este capítulo tiene un tamaño de $240 \times 175.0 \text{ mm}^2$ con un muestreo de 1294×970 píxeles² y la superficie de interés se limita a un círculo de 62.5 mm radio. Todos los registros presentan un nivel de digitalización de 256 niveles. Dado que el entorno simulado normaliza los registros a un valor máximo de 255, independientemente del nivel de energía, los valores de flujo radiante que presentan los registros se han obtenido a partir de los datos que proporciona el entorno de simulación.

7.1. Componente LED Lambertiano

Ya hemos mencionado en la introducción del presente capítulo que el componente LED Lambertiano se ha incluido con el objetivo de mostrar que los resultados de aplicar la estrategia de medida a registros simulados son análogos a los resultados que presenta cuando la aplicamos a registros experimentales. Como consecuencia, los casos estudiados para cada una de las etapas de la estrategia de medida son los mismos que en el capítulo anterior.

7.1.1. Implementación del test óptico en línea

La Figura 7.1 muestran los registros simulados correspondientes a la posición nominal, al desplazamiento #1, $\Delta\vec{x}_1 = (-0.5, 0, 0)$ mm, y al desplazamiento #2, $\Delta\vec{x}_2 = (-1, 0, 0)$ mm, respectivamente.

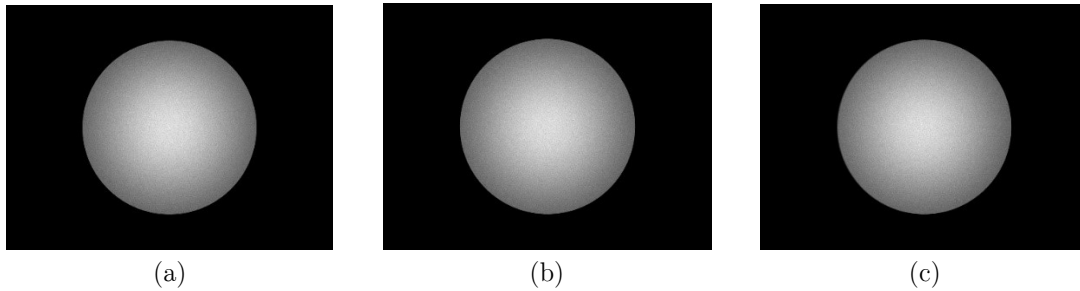


Figura 7.1 (a) Registro simulado correspondiente a la posición nominal, (b) al desplazamiento #1, $\Delta\vec{x}_1 = (-0.5, 0, 0)$ mm, y (c) al desplazamiento #2, $\Delta\vec{x}_2 = (-1, 0, 0)$ mm. La dimensión de todos los registros es de 240×175 mm² (1294×970 píxeles²), con 256 niveles de digitalización normalizados a 255. Los de flujos radiantes totales en unidades arbitrarias son 0.31444, 0.31443 y 0.31355, respectivamente.

La Tabla 7.1 muestra los valores correspondientes a la primera función de mérito, la que estudia la variación en el flujo radiante que incide sobre la superficie de estudio, en unidades arbitrarias.

Registro	Flujo radiante total	Variación
Posición nominal	0.31444	-
Desplazamiento 1	0.31443	0.00001
Desplazamiento 2	0.31355	0.00089

Tabla 7.1 Flujo radiante total y valor de la función de mérito en unidades arbitrarias para el caso nominal, desplazamiento #1 y desplazamiento #2 en el entorno simulado.

Recordemos que el criterio de validación es que los registros a evaluar presenten variaciones menores al 15% respecto al valor nominal. Las variaciones tienen valores de varios órdenes de magnitud menor $[0.00001, 0.00089]$ que el valor nominal, 0.31444. De este modo, de igual forma que en el entorno experimental, los desplazamientos no tienen gran incidencia en el flujo radiante total.

A continuación, presentamos la implementación de la segunda función de mérito. La Figura 7.2 presenta las zonas anulares correspondientes a los registros de la Figura 7.1. La Tabla 7.2 presenta los valores de excentricidad correspondientes a cada uno de los 3 casos.

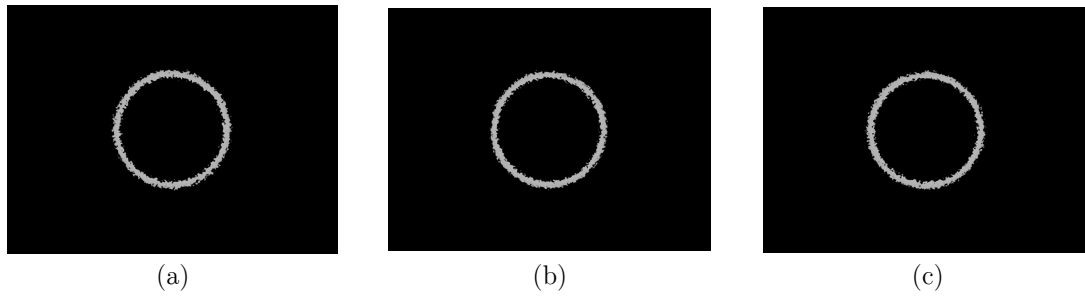


Figura 7.2 Regiones anulares fruto de aplicar el primer criterio de la segunda función de mérito a los registros (a) nominal (b) desplazamiento #1, $\Delta\vec{x}_1 = (-0.5, 0, 0)$ mm, y (c) desplazamiento #2, $\Delta\vec{x}_2 = (-1, 0, 0)$ mm. Los valores de excentricidad que presentan son: 0.20, 0.21, y 0.25, respectivamente.

Registro	Valor de ϵ
Posición nominal	0.20
Desplazamiento 1	0.21
Desplazamiento 2	0.25

Tabla 7.2 Valores de excentricidad obtenidos para el registro nominal y los desplazamientos #1 y #2 en el entorno simulado.

Recordemos que según el criterio, la excentricidad de los registros debe cumplir que esta sea menor a 2 veces la que presenta el registro nominal, $< 2\epsilon_n$. En este caso deben ser menor a $2 \times 0.20 = 0.40$. De nuevo, tal y como sucede en el entorno experimental ambos registros cumplen el criterio [0.21, 0.25].

7.1.2. Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)

Siguiendo la implementación del capítulo anterior, realizamos el análisis de la posición de los spots con el fin de mostrar que los resultados obtenidos son análogos al entorno experimental.

Análisis de la posición de los spots

La Figura 7.3 presenta los registros del componente LED Lambertiano asociado a la posición nominal y a los mismos desplazamientos que hemos analizado en el test óptico en línea.

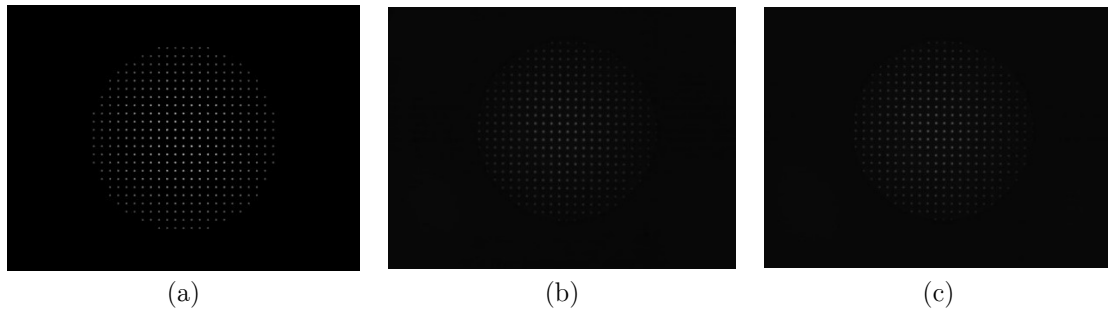


Figura 7.3 Registros de spots para ($\theta < 35^\circ$) (a) nominal (b) desplazamiento #1 de $\Delta\vec{x}_1 = (-0.5, 0, 0)$ mm. y (c) desplazamiento #2 de $\Delta\vec{x}_2 = (-1, 0, 0)$ mm. La dimensión de todos los registros es de 1294×970 píxeles², 233.3×174.0 mm², con 256 niveles de digitalización normalizados a 255.

Como ya hemos presentado, a partir de la distribución de spots podemos obtener la posición de los centroides, el trazado inverso de rayos y la distribución de los valores (u, v) , tal y como observamos en las Figuras 7.4, 7.5 y 7.6 para el registro en la posición nominal, para el registro asociado al desplazamiento #1 y para el registro asociado al desplazamiento #2, respectivamente.

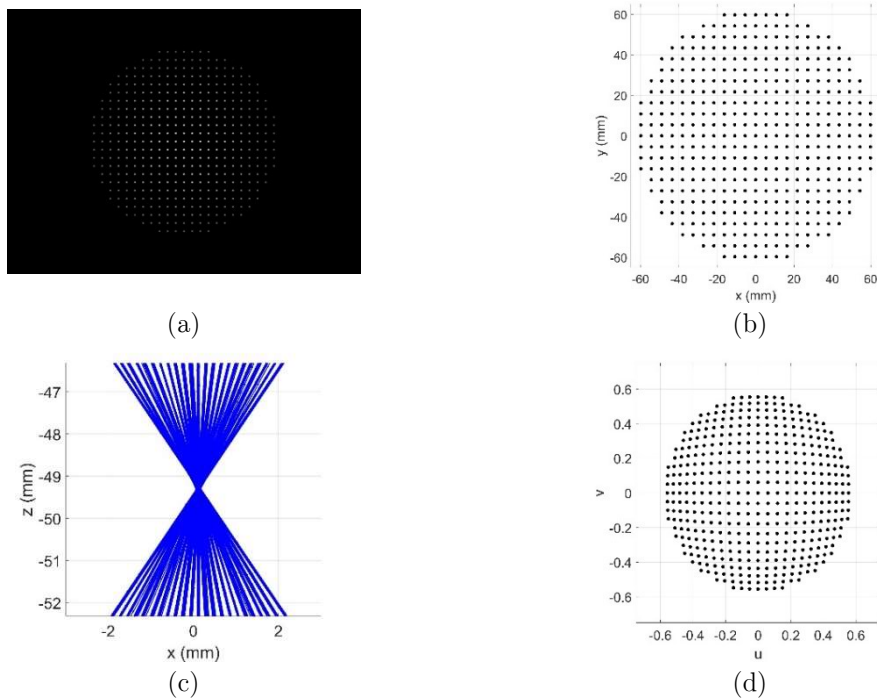


Figura 7.4 (a) Registro simulado de la posición nominal. (b) Centroides de los spots del registro en (a). (c) Trazado inverso de rayos. (d) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) .

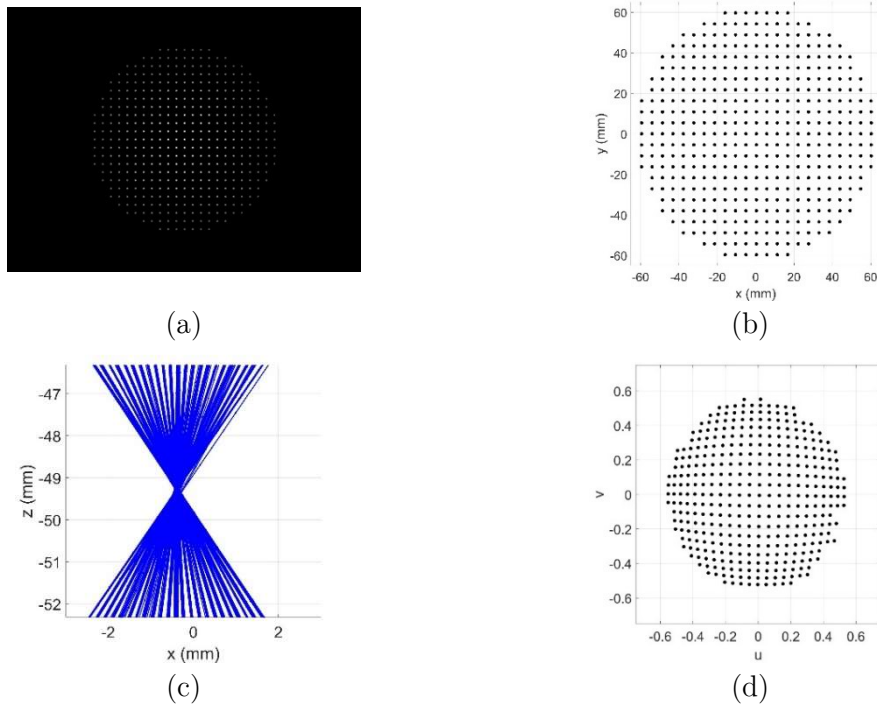


Figura 7.5 (a) Registro simulado del desplazamiento #1 de $\Delta\vec{x}_1 = (-0.5, 0, 0)$ mm. (b) Centroides de los spots del registro en (a). (c) Trazado inverso de rayos. (d) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) .

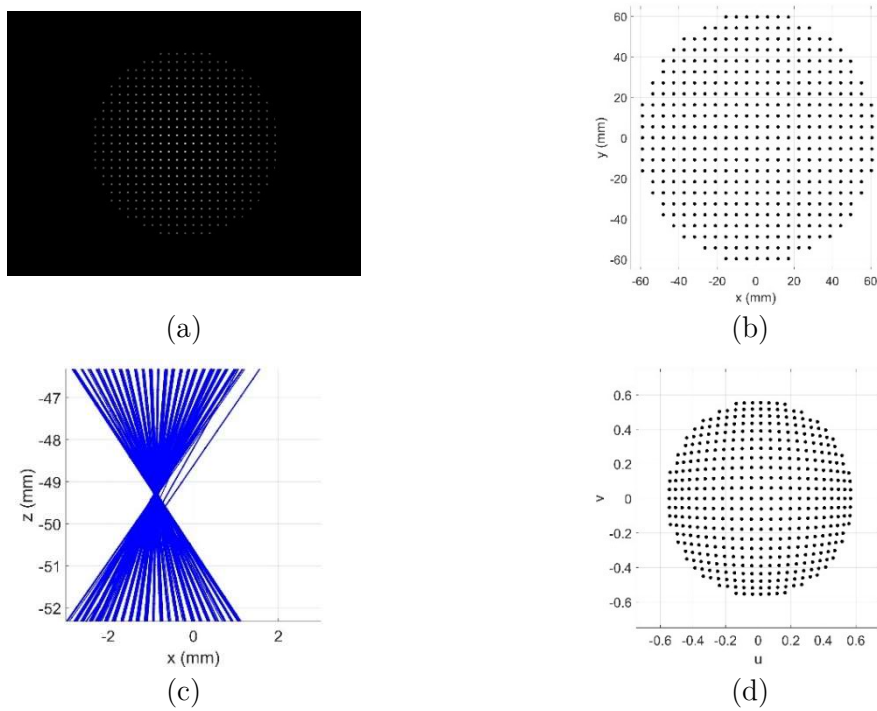


Figura 7.6 (a) Registro simulado del desplazamiento #2 de $\Delta\vec{x}_2 = (-1, 0, 0)$ mm. (b) Centroides de los spots del registro en (a). (c) Trazado inverso de rayos. (d) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) .

De forma análoga a la implementación experimental, observamos como los conjuntos de rayos presentan diferentes posiciones de convergencia dependiendo si corresponden a la posición nominal, al desplazamiento 1 o al desplazamiento 2. A continuación, mostramos la implementación de las funciones de mérito.

En primer lugar, mostramos como la primera función de mérito cuantifica los desplazamientos en la zona de convergencia que se observa claramente en las figuras, Tabla 7.3.

Registro	Vector \vec{x}	$\ \vec{x}_n - \vec{x}_e\ $
Posición nominal	(0.1158, -0.0010, -49.2620)	-
Desplazamiento #1	(-0.3734, -0.0017, -49.1138)	0.51116
Desplazamiento #2	(-0.8819, -0.0016, -49.3529)	1.0018

Tabla 7.3 Valores medidos del vector posición, \vec{x} , y de la primera función de mérito para cada uno de los registros.

Finalmente, la Tabla 7.4 muestra los valores de la asimetría de las distribuciones de (u, v) y los valores de la función de mérito para cada registro. Los valores de la función de mérito son próximos a 1 como ya sucedía en el entorno experimental.

Registro	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$	$abs\left(\frac{\tilde{\mu}_{3ue} \cdot \tilde{\mu}_{3vn}}{\tilde{\mu}_{3ve} \cdot \tilde{\mu}_{3un}}\right)$
Posición nominal	-0.000101	-0.000096	-
Desplazamiento #1	-0.000090	-0.000101	0.847471
Desplazamiento #2	-0.000092	-0.000092	0.929482

Tabla 7.4 Valores medidos de las asimetrías de las distribuciones de (u, v) , $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, y de la segunda función de mérito para cada uno de los registros.

7.1.3. Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)

La Figura 7.7 muestra los registros analizados mediante el control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$). Igual que en el caso experimental, las posiciones #1' y #2' corresponden a los nuevos desplazamientos $\Delta\vec{x}'_1 = (-0.1, 0, 0)$ mm y $\Delta\vec{x}'_2 = (-0.2, 0, 0)$ mm.

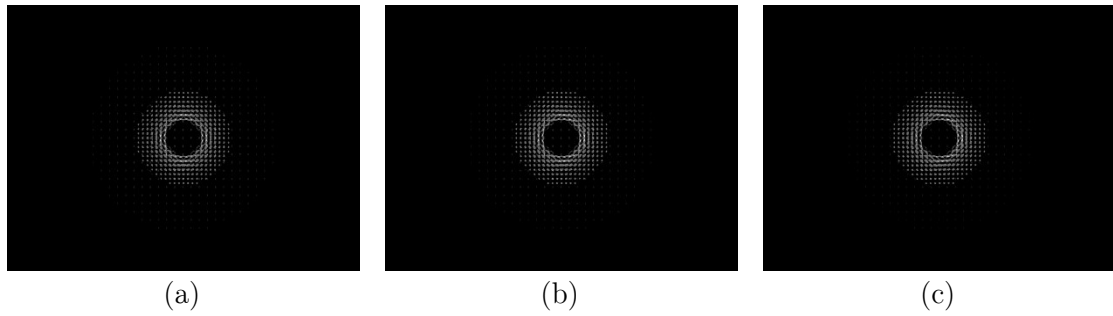


Figura 7.7 Registros de spots simulados del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) (a) nominal, (b) desplazamiento 1', $\Delta\vec{x}'_1 = (-0.1, 0, 0)$ y (c) desplazamiento 2' $\Delta\vec{x}'_2 = (-0.2, 0, 0)$. La dimensión de todos los registros es de $240 \times 175 \text{ mm}^2$ (1294×970 píxeles²), con 256 niveles de digitalización normalizados a 255.

Por claridad de la sección, analizamos primero los rayos antes de reflejarse y después los reflejados

Implementación del análisis en el primer conjunto de rayos (antes de reflejarse)

Igual que en el caso experimental, la Figura 7.8, 7.9 y 7.10 presentan la información visual para la posición nominal y los desplazamientos #1' y #2'. Las Tabla 7.5 y 7.6 presentan respectivamente los valores del vector posición \vec{x}_1 y su función de mérito asociada y los valores de la asimetría de las distribuciones de (u, v) junto con su correspondiente función de mérito para cada registro.

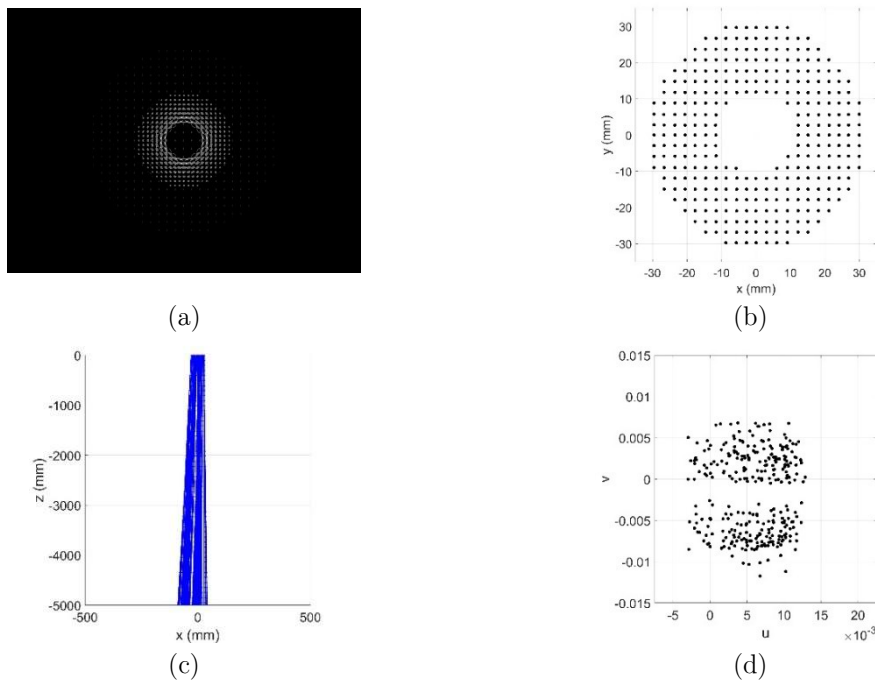


Figura 7.8 (a) Registro simulado de la posición nominal. (b) Centroides de los spots del registro en (a). (c) Trazado inverso de rayos. (d) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v)

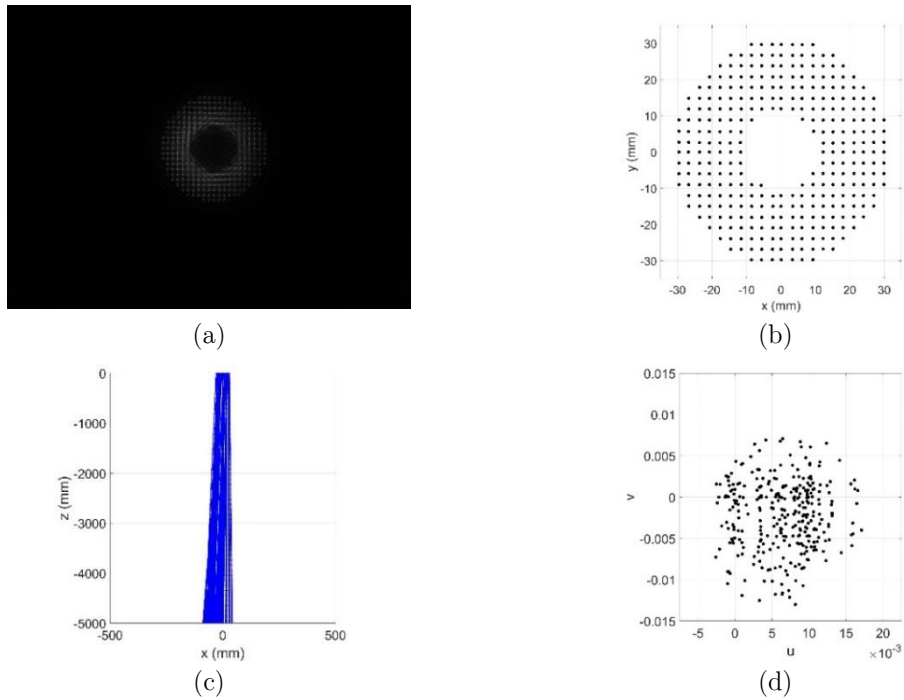


Figura 7.9 (a) Registro simulado del desplazamiento 1' $\Delta\vec{x}'_1 = (-0.1, 0, 0)$ mm. (b) Centroides de los spots del registro en (a). (c) Trazado inverso de rayos. (d) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v)

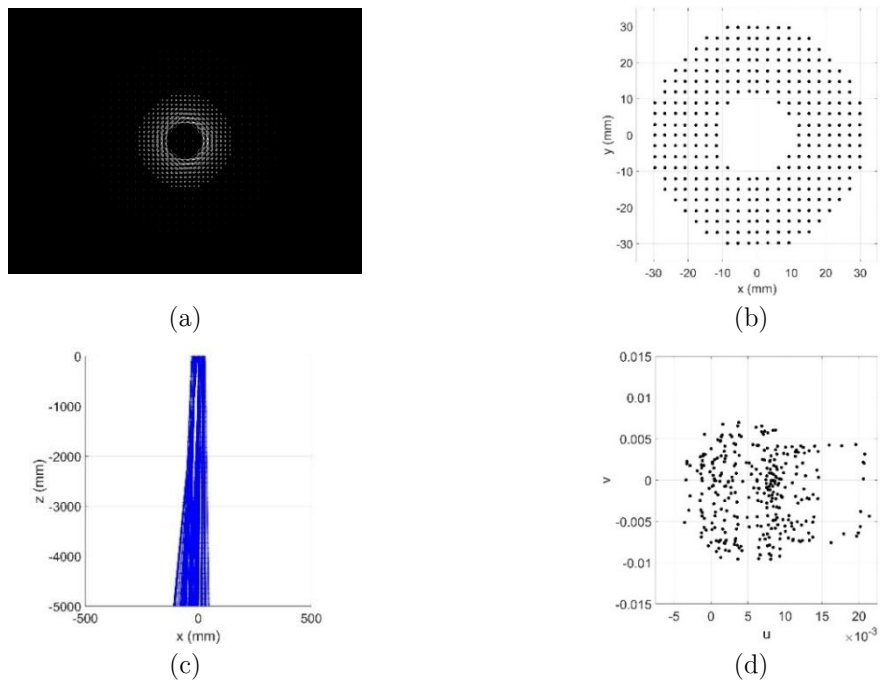


Figura 7.10 (a) Registro simulado del desplazamiento 2', $\Delta\vec{x}'_2 = (-0.2, 0, 0)$ mm. (b) Centroides de los spots del registro en (a). (c) Trazado inverso de rayos. (d) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v)

Registro	Vector \vec{x}_1 (mm)	$\ \vec{x}_{n1} - \vec{x}_{e1}\ $ (mm)
Posición nominal	(5.18, 5.38, 1894.33)	-
Desplazamiento #1'	(9.69, 2.19, 1946.61)	52.57
Desplazamiento #2'	(12.52, 4.58, 2205.97)	311.73

Tabla 7.5 Valores medidos del vector posición, \vec{x}_1 , y de la primera función de mérito para los tres registros.

Registro	$\tilde{\mu}_{3u1}$	$\tilde{\mu}_{3v1}$	$abs\left(\frac{\tilde{\mu}_{3ue1} \cdot \tilde{\mu}_{3vn1}}{\tilde{\mu}_{3ve1} \cdot \tilde{\mu}_{3un1}}\right)$
Posición nominal	-0.023	-0.025	-
Desplazamiento 1'	-0.026	-0.020	1.413
Desplazamiento 2'	-0.027	-0.021	1.397

Tabla 7.6 Valores medidos de las asimetrías de las distribuciones de (u_1, v_1) , $\tilde{\mu}_{3u1}$ y $\tilde{\mu}_{3v1}$, y de la segunda función de mérito para cada uno de los registros.

En las tres distribuciones de (u, v) de las Figuras 7.8, 7.9 y 7.10, observamos como ya pasara en el caso experimental, como los puntos sufren un desplazamiento hacia los valores positivos de u .

Implementación del análisis en el segundo conjunto de rayos (después de reflejarse)

Las Figuras 7.11, 7.12 y 7.13 presentan la información visual obtenida al implementar el análisis de la posición de los spots para la posición nominal, desplazamiento #1' y desplazamiento #2'.

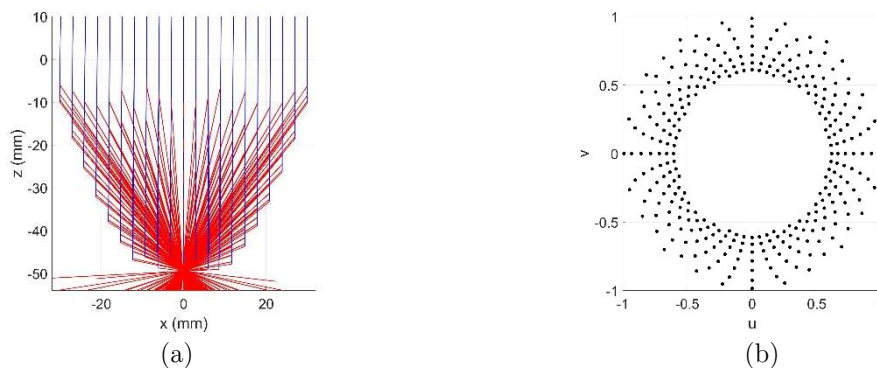


Figura 7.11 Posición nominal. (a) (Azul) Trazado inverso de rayos del primer conjunto de rayos hasta la intersección con la superficie del reflector parabólico. (Rojo) Trazado inverso del segundo conjunto de rayos. (b) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) correspondientes al segundo conjunto de rayos.

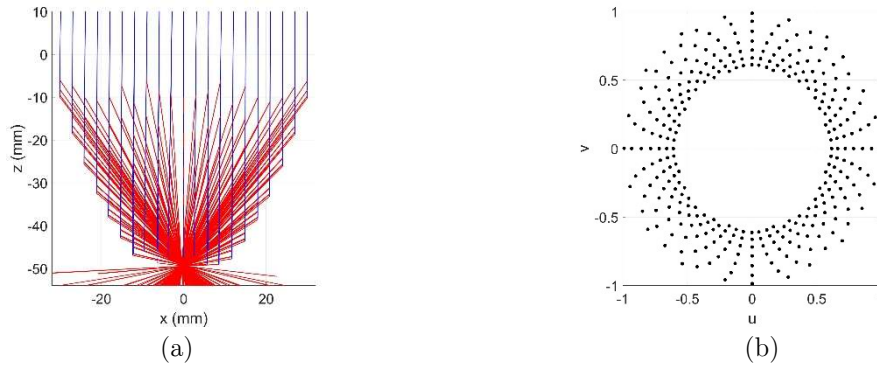


Figura 7.12 Desplazamiento #1', $\Delta\vec{x}'_1 = (-0.1, 0, 0)$ mm. (a) (Azul) Trazado inverso de rayos del primer conjunto de rayos hasta la intersección con la superficie del reflector parabólico. (Rojo) Trazado inverso del segundo conjunto de rayos. (b) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) correspondientes al segundo conjunto de rayos.

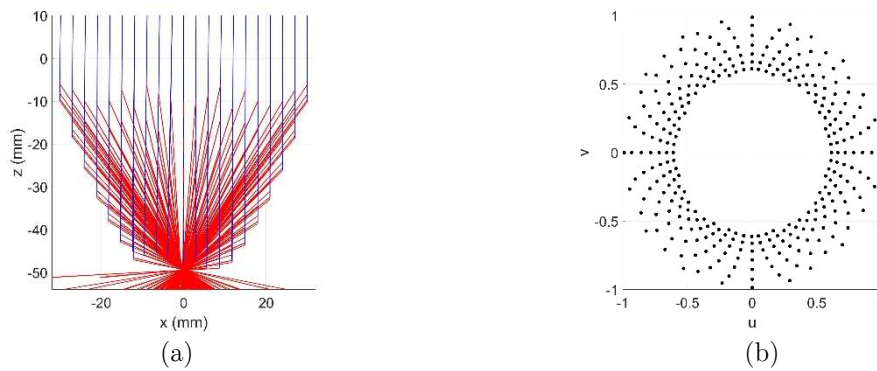


Figura 7.13 Desplazamiento #2', $\Delta\vec{x}'_2 = (-0.2, 0, 0)$ mm. (a) (Azul) Trazado inverso de rayos del primer conjunto de rayos hasta la intersección con la superficie del reflector parabólico. (Rojo) Trazado inverso del segundo conjunto de rayos. (b) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) correspondientes al segundo conjunto de rayos.

A continuación, mostramos la implementación de las funciones de mérito, en la Tabla 7.7 para los valores del vector posición \vec{x}_2 y su función de mérito asociada y en la Tabla 7.8 los valores de la asimetría de las distribuciones de (u, v) y los valores de su función de mérito asociada.

Registro	Vector \vec{x}_2 (mm)	$\ \vec{x}_{n1} - \vec{x}_{e1}\ $ (mm)
Posición nominal	(-0.17, 0.19, -49.26)	-
Desplazamiento 1'	(-0.32, 0.18, -49.46)	0.25
Desplazamiento 2'	(-0.48, 0.22, -49.72)	0.55

Tabla 7.7 Valores medidos del vector posición, \vec{x}_2 , y de la primera función de mérito para cada uno de los registros.

Registro	$\tilde{\mu}_{3u2}$	$\tilde{\mu}_{3v2}$	$abs\left(\frac{\tilde{\mu}_{3ue2} \cdot \tilde{\mu}_{3vn2}}{\tilde{\mu}_{3ve2} \cdot \tilde{\mu}_{3un2}}\right)$
Posición nominal	0.00186	0.00121	-
Desplazamiento 1'	0.00411	0.00097	2.75650
Desplazamiento 2'	0.00771	0.00154	3.25691

Tabla 7.8 Valores medidos de las asimetrías de las distribuciones de (u_2, v_2) , $\tilde{\mu}_{3u2}$ y $\tilde{\mu}_{3v2}$, y de la segunda función de mérito para cada uno de los registros.

Ta y como sucede en el caso experimental, se observa un incremento del valor de ambas funciones de mérito debido al desplazamiento del componente respecto al reflector parabólico.

7.2. Componente FOT

En el caso del componente FOT, algunas de las simulaciones que analizamos reproducen situaciones que nos hemos encontrado en el entorno experimental. A raíz de las medidas presentadas en el Capítulo 6, los defectos que abordamos en las simulaciones son los desalineados del LED y cambios en la forma de la óptica de este componente. Con el objetivo de ilustrar las consecuencias de estos defectos en el entorno simulado hemos abordado 3 formas distintas y tres posiciones del chip del LED distintas. La Tabla 7.9 presenta las combinaciones de defectos que presentan los casos utilizados, las casillas vacías son de combinaciones que producen registros no analizables.

		Posición del LED		
		Nominal	Posición #1	Posición #2
Forma	Nominal	Caso 1	Caso 4	Caso 6
	Forma #1	Caso 2	Caso 5	
	Forma #2	Caso 3		

Tabla 7.9 Las casillas en gris indican los casos del componente FOT que evaluamos en el presente capítulo. Las posiciones #1 y #2 corresponde a un desplazamiento respecto a la posición nominal del LED de $\Delta y_1 = (0, -0.2, 0)$ mm y $\Delta y_2 = (0, -0.6, 0)$ mm, respectivamente.

La Figura 7.14 (a) presenta una sección de la forma nominal de la óptica del componente FOT y la Figura 7.14 (b) y 7.14 (c) muestran respectivamente la misma sección del componente FOT pero con las nuevas formas #1 y #2 en la zona ópticamente activa. Las tres formas presentan simetría de rotación.

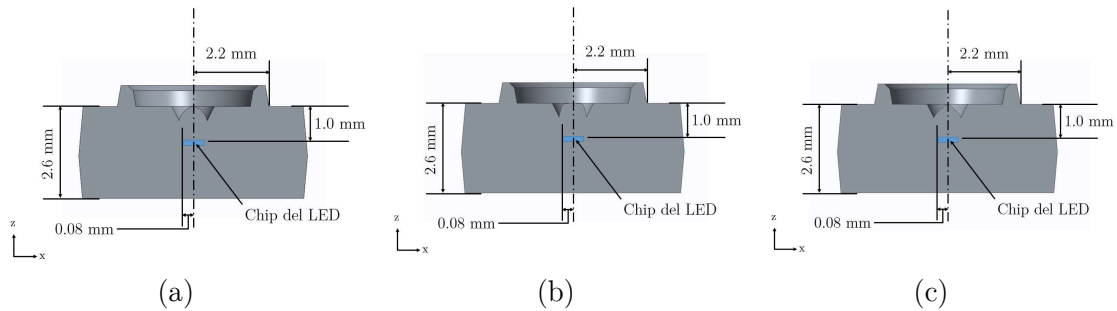


Figura 7.14 (a) Sección de la forma nominal de la óptica del componente FOT. (b) Sección de la forma #1. (c) Sección de la forma #2. Los cambios en la forma sólo afectan a la zona activa

Como ya sucedió en el capítulo anterior, los registros del test óptico en línea solo se evalúan para los casos en que el registro presenta datos. Como consecuencia, a los casos del 1 al 5 se les implementa tanto el test óptico en línea como el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$). Mientras que al caso 6, debido al grado de desalineado que presenta, solo es posible analizarlo mediante el control óptico de calidad de calidad ($\theta > 35^\circ$).

7.2.1. Implementación del test óptico en línea

Las Figuras 7.15 (a)-(e) muestran los registros simulados correspondientes al test óptico en línea para los casos del 1 al 5.

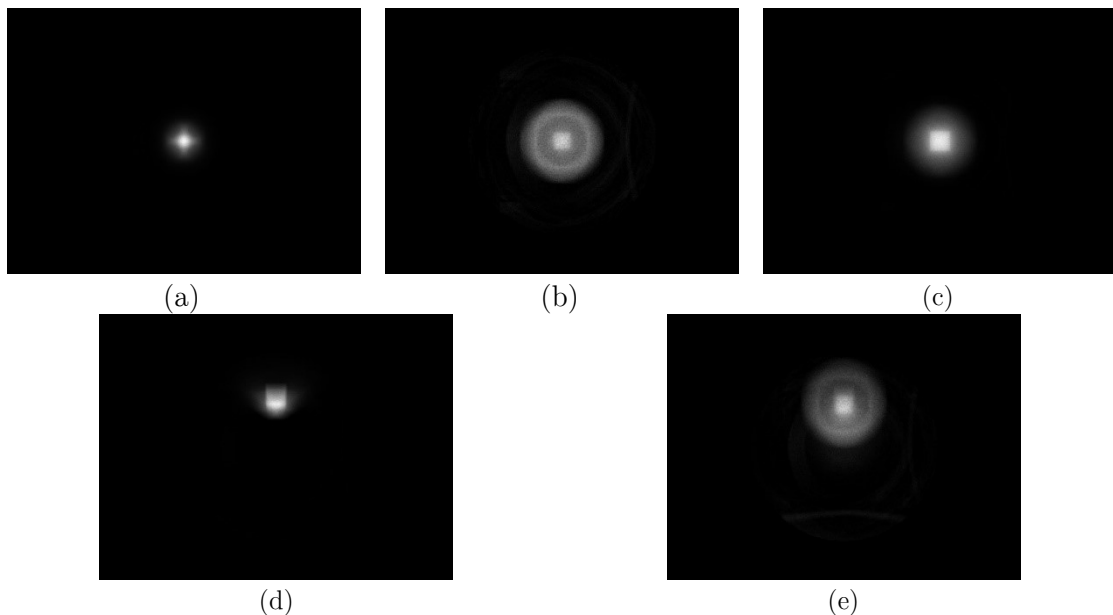


Figura 7.15 Registros simulados de (a) caso 1, (b) caso 2, (c) caso 3, (d) caso 4 y (e) caso 5. La dimensión de todos los registros es de $240 \times 175 \text{ mm}^2$ (1294×970 píxeles²), con 256 niveles de digitalización normalizados a 255.

La Tabla 7.10 muestra los valores correspondientes a la primera función de mérito.

Registro	Flujo radiante total	Variación
Caso 1	0.26	-
Caso 2	0.12	0.14
Caso 3	0.32	0.06
Caso 4	0.19	0.07
Caso 5	0.14	0.12

Tabla 7.10 Flujo radiante total y valor de la función de mérito en unidades arbitrarias para los casos del 1 al 5.

Dado que el criterio de la primera función de mérito es que la variación sea un 15% respecto al caso nominal, $0.26 \times 0.15 = 0.04$, en este caso ninguno de los componentes cumple el criterio.

La Figura 7.16 presenta las zonas anulares correspondientes a los registros de la Figura 7.15. La Tabla 7.11 presenta los valores de excentricidad correspondientes a cada uno de los casos.

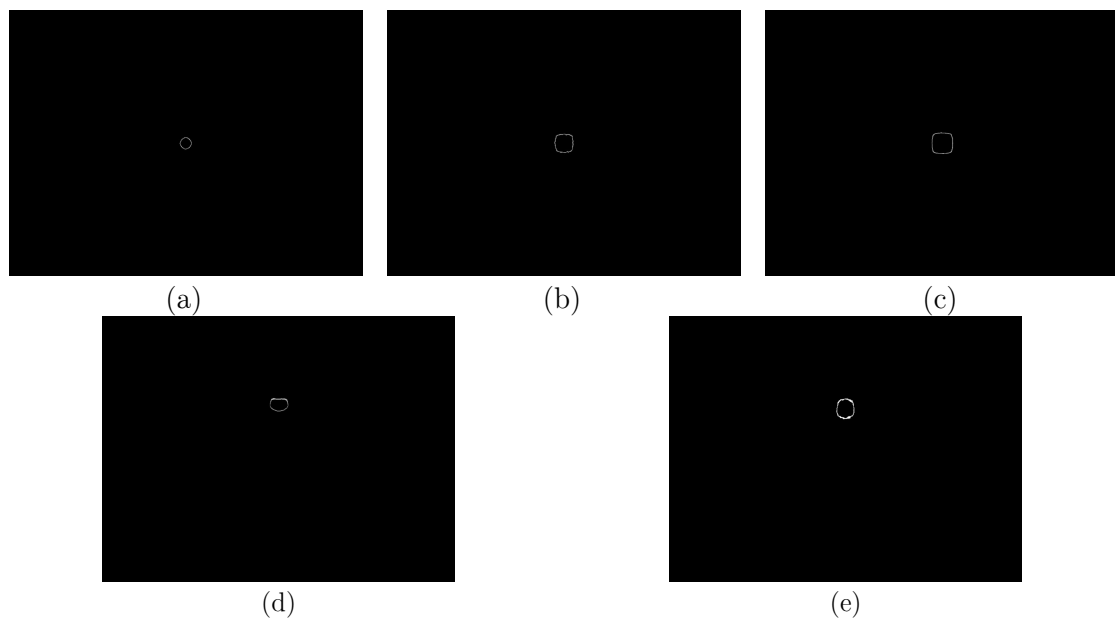


Figura 7.16 Regiones anulares fruto de aplicar el primer criterio de la segunda función de mérito a los registros de (a) caso 1, (b) caso 2, (c) caso 3, (d) caso 4 y (e) caso 5. Los valores de excentricidad que presentan son: 0.13, 0.44, 0.32, 0.75 y 0.55, respectivamente.

Registro	Valor de ϵ
Caso 1	0.13
Caso 2	0.44
Caso 3	0.32
Caso 4	0.75
Caso 5	0.55

Tabla 7.11 Valores de excentricidad obtenidos para para los casos del 1 al 5

El criterio sobre el valor de la excentricidad, establece que ésta debe ser menor a 2 veces la excentricidad que presenta el caso nominal (caso 1), $0.13 \times 2 = 0.26$. Los valores que presenta la Tabla 7.11 para cada uno de los casoa a evaluar, casos del 2 al 5, son mayores de lo que establece el criterio, de modo que ninguno lo cumple.

7.2.2. Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)

La Figura 7.17 presenta los registros correspondientes al control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) para cada uno de los casos a los que hemos aplicado el test óptico en línea.

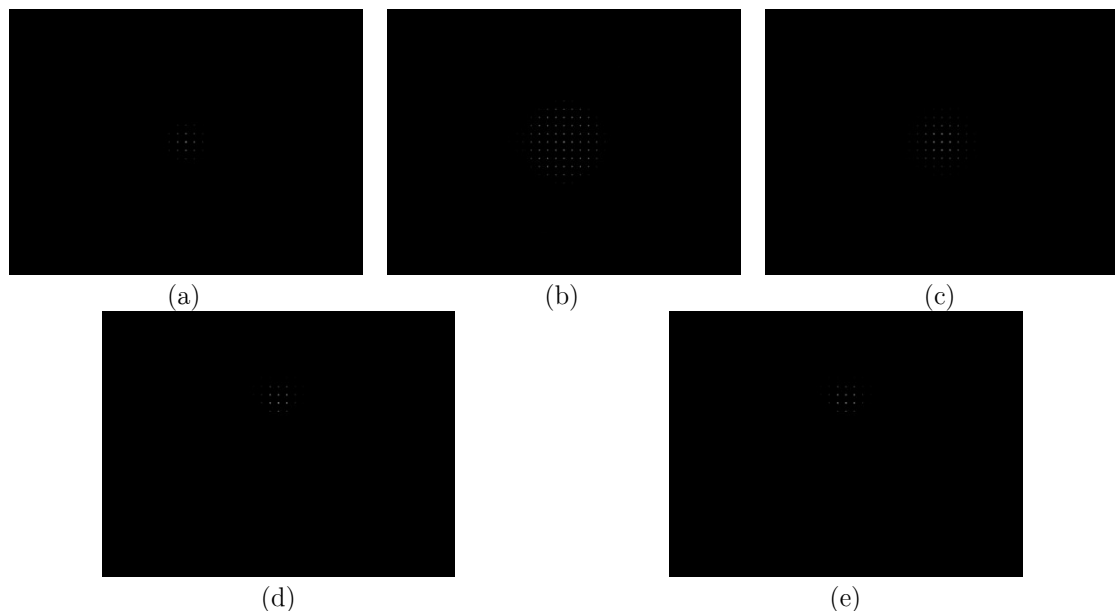


Figura 7.17 Registros de la configuración del control óptico de calidad para ($\theta < 35^\circ$) de (a) caso 1, (b) caso 2, (c) caso 3, (d) caso 4 y (e) caso 5.

De nuevo, a partir de la ubicación de los spots en los registros medidos podemos obtener: la posición de los centroides, el trazado inverso de rayos y la distribución de los valores (u, v) , tal y como presentamos en las Figuras 7.18, 7.19, 7.20, 7.21 y 7.22 correspondientes a los casos 1, 2, 3 4 y 5, respectivamente.

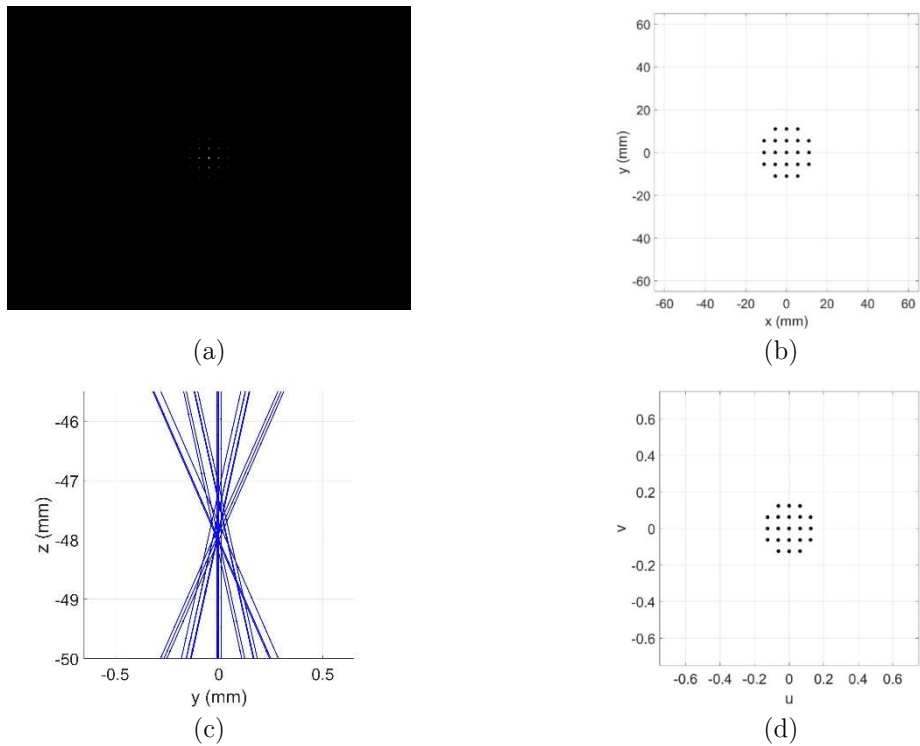


Figura 7.18 Información del caso 1. (a) Registro simulado original, (b) posición de los centroides, (c) trazado inverso de rayos y (d) distribución de los valores (u, v) .

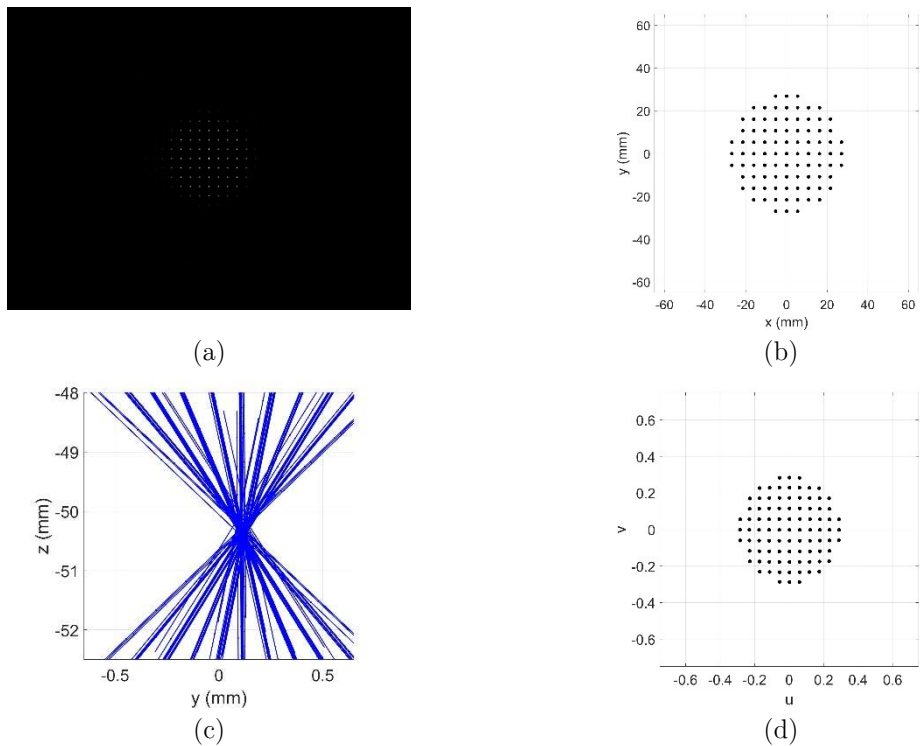


Figura 7.19 Información del caso 2. (a) Registro simulado original, (b) posición de los centroides, (c) trazado inverso de rayos y (d) distribución de los valores (u, v) .

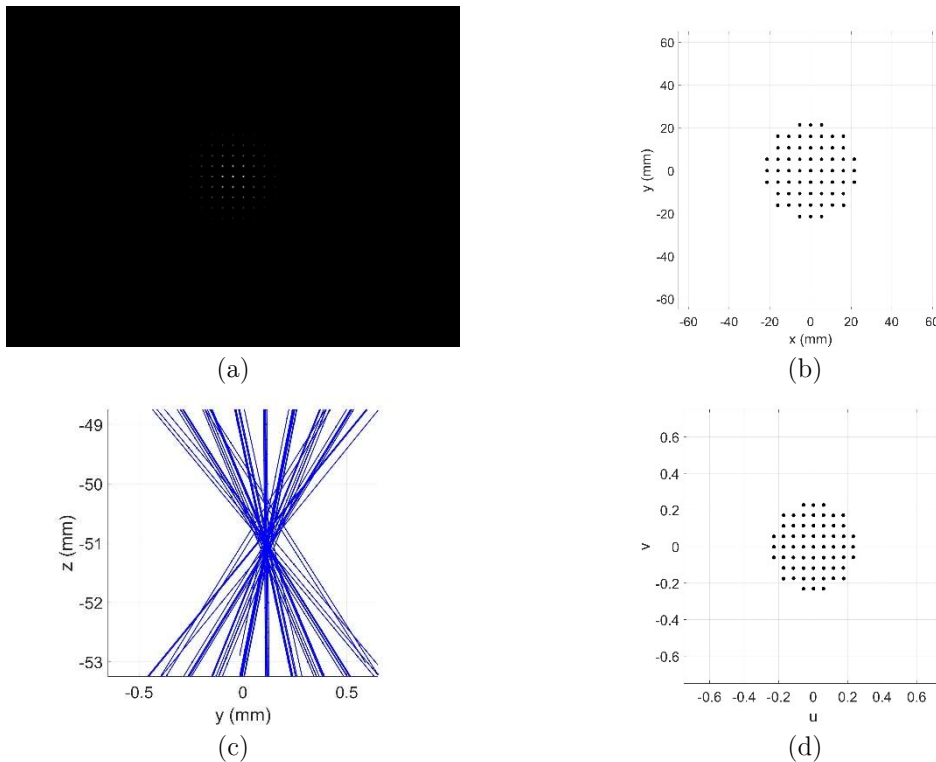


Figura 7.20 Información del caso 3. (a) Registro simulado original, (b) posición de los centroides, (c) trazado inverso de rayos y (d) distribución de los valores (u, v) .

Por un lado, comparando los casos 1, 2 y 3 observamos como el cambio en la forma ha comportado un desplazamiento en el eje z de la zona de convergencia de los rayos. Por otro lado, comparando el caso 1 con el caso 4; y el caso 2 con el caso 5, observamos como la presencia de desalineado tiene un impacto en la pérdida de simetría en la zona de convergencia entre las componentes x e y . Es decir, vemos como al comparar la vista xz con la vista yz , la zona de convergencia presenta diferente valor de la componente z .

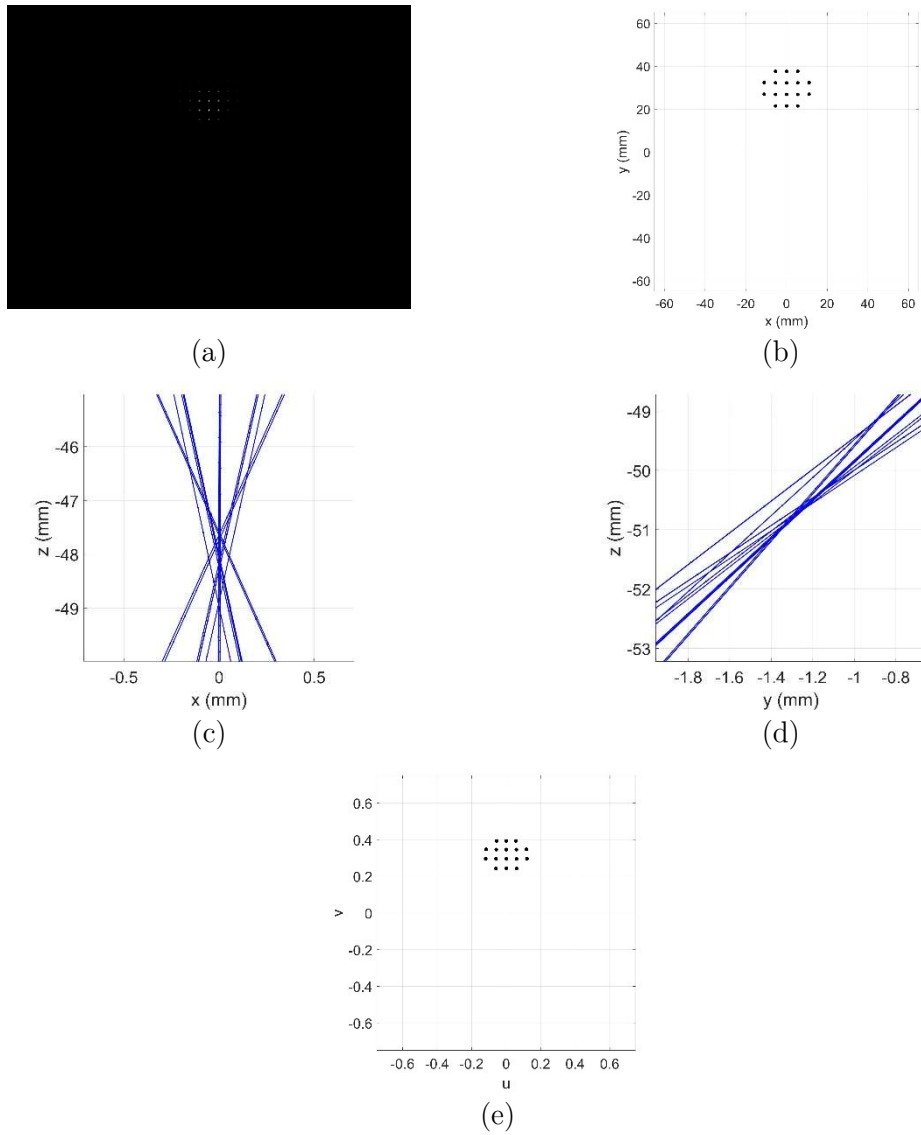


Figura 7.21 Información del caso 4. (a) Registro simulado original, (b) posición de los centroides, (c) vista xz del trazado inverso de rayos, (d) vista yz del trazado inverso de rayos y (e) distribución de los valores (u, v) .

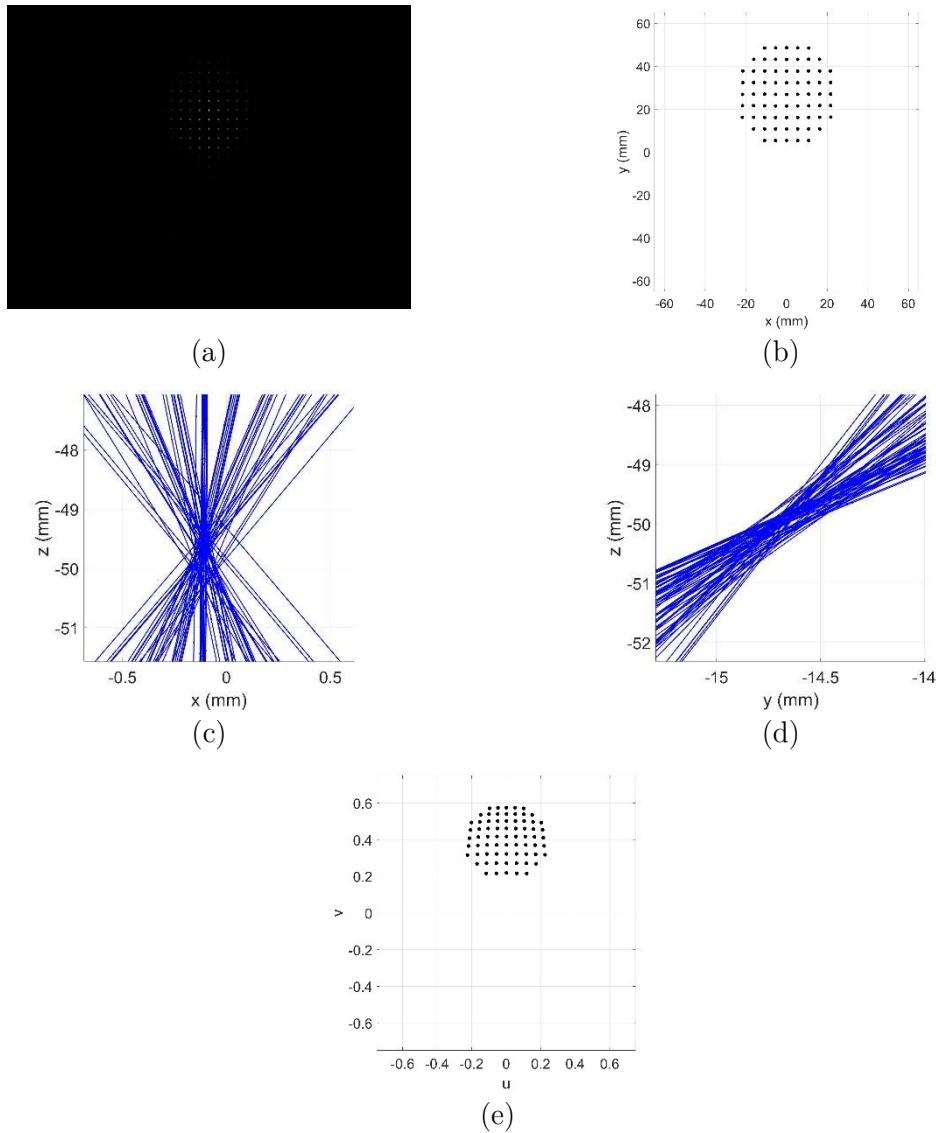


Figura 7.22 Información del caso 5. (a) Registro simulado original, (b) posición de los centroides, (c) vista xz del trazado inverso de rayos, (d) vista yz del trazado inverso de rayos y (d) distribución de los valores (u, v) .

A continuación, presentamos la implementación de las funciones de mérito.

La Tabla 7.12 presenta los valores numéricos de primera función de mérito, que nos proporciona información respecto a los puntos de convergencia del trazado inverso de rayos.

Registro	Vector x	$\ \vec{x}_n - \vec{x}_e\ $
Caso 1	(-0.00011, -0.00154, -48.03750)	-
Caso 2	(-0.11951, -0.11056, -52.22842)	4.19404
Caso 3	(-0.11263, 0.12214, -51.28010)	3.24691
Caso 4	(0.19657, -1.30143, -49.16821)	1.73404
Caso 5	(-0.11142, -14.83139, -49.96072)	10.95450

Tabla 7.12 Valores de la posición del punto de convergencia para los casos 1, 2, 3, 4 y 5. Para los últimos se presenta el valor de la función de mérito.

Tanto los valores de la función de mérito como los valores de las componentes de los distintos vectores \vec{x} confirman los desplazamientos que muestran las cásuticas. La Tabla 7.13 presenta los valores numéricos de segunda función de mérito, sobre la presencia de desalineado en el componente.

Registro	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$	$abs\left(\frac{\tilde{\mu}_{3ue} \cdot \tilde{\mu}_{3vn}}{\tilde{\mu}_{3ve} \cdot \tilde{\mu}_{3uv}}\right)$
Caso 1	-0.00049	0.00058	-
Caso 2	0.00062	0.00057	1.28750
Caso 3	0.00074	0.00081	1.08138
Caso 4	0.00056	-0.00187	0.35446
Caso 5	-0.00060	-0.02243	0.03166

Tabla 7.13 Valores del tercer momento estándar de las distribuciones de u y v para los casos 1, 2, 3, 4 y 5. Para los últimos se presenta el valor de la función de mérito.

Tal y como era de esperar los casos 2 y 3 presentan valores de la función de mérito cercanos a 1 ya que, aunque la forma de la óptica sea distinta, sigue teniendo simetría de rotación. Por otro lado, los casos 4 y 5 presentan valores cercanos a 0 debido al desalineado en la componente y .

7.2.3. Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)

Tal como hemos mencionado esta implementación sólo la realizamos para el caso 6. La Figura 7.23 (a) presenta el registro correspondiente al control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$). De igual modo, a partir de la posición de los spots del registro podemos obtener: la posición de los centroides; el trazado inverso de rayos y la distribución de los valores (u, v) para el segundo conjunto de rayos y el trazado inverso de rayos y la distribución de los valores (u, v) para el segundo conjunto de rayos, Figuras 7.23 (b)-(f).

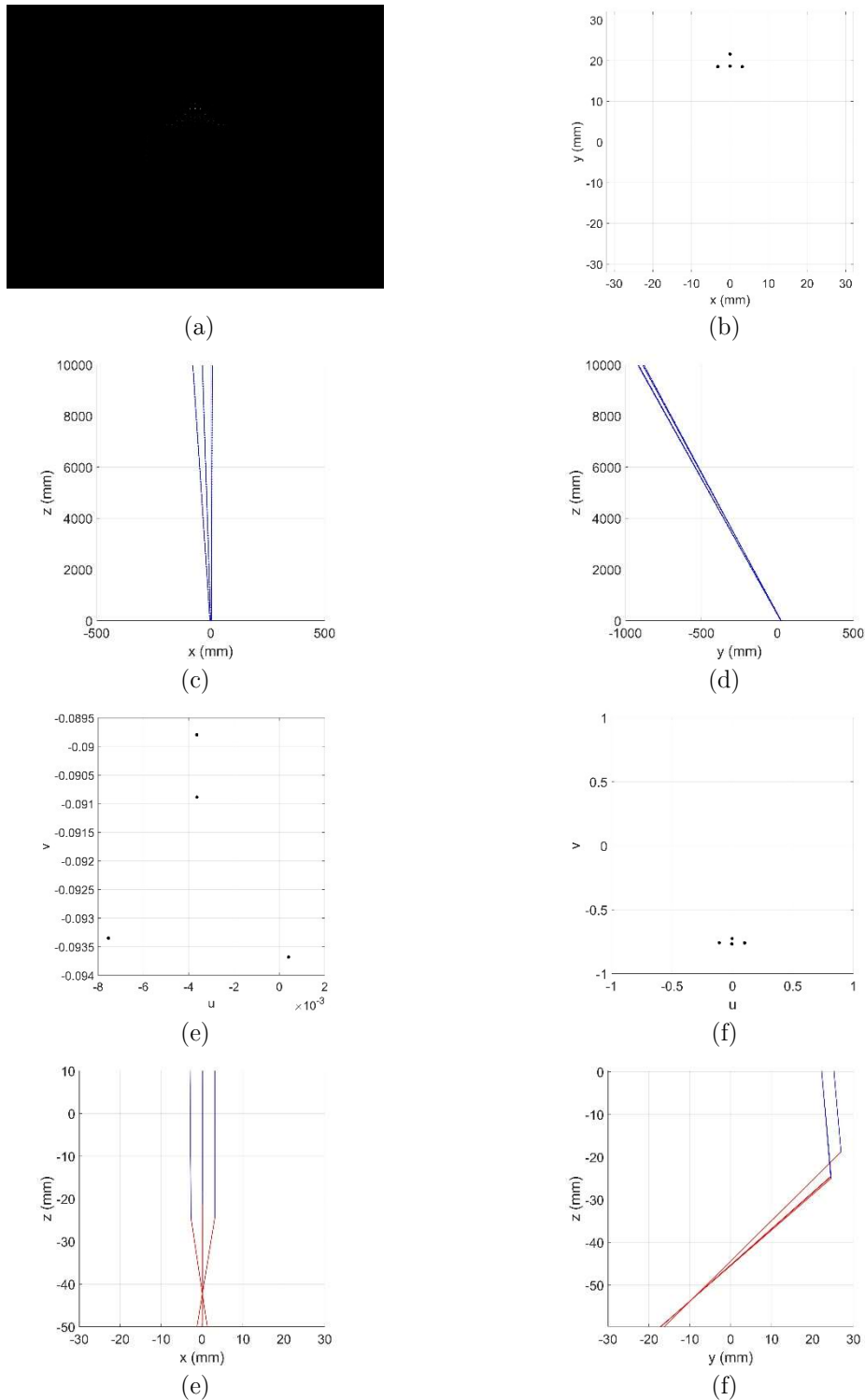


Figura 7.23 Información del caso 6. (a) Registro simulado original, (b) posición de los centroides, (c) vista xz del trazado inverso del primer conjunto de rayos, (d) vista yz del trazado inverso del primer conjunto de rayos, (e) distribución de (u, v) asociada al primer conjunto de rayos, (f) distribución de (u, v) asociada al segundo conjunto de rayos, (g) vista xz del trazado inverso del segundo conjunto de rayos y (h) vista yz del trazado inverso del segundo conjunto de rayos.

Observamos como en este caso únicamente contamos con 4 spots relevantes en el registro, este hecho disminuye la información presente en el registro y no es la condición óptima para la aplicación de las funciones de mérito. Sin embargo, el pequeño número de spots no impide que las representaciones de la Figura 7.23 presenten información cualitativa acerca de desalineado presente en el componente.

A continuación, presentamos los valores de las dos funciones de mérito con los datos de los rayos después del reflector, Tabla 7.14 y 7.1 5

Registro	Vector \mathbf{x}	$\ \vec{\mathbf{x}}_n - \vec{\mathbf{x}}_e\ $
Caso #1	(-0.00011, -0.00154, -48.03750)	-
Caso #6	(0.31302, -5.89403, -50.7729)	6.50399

Tabla 7.14 Valores de la posición del punto de convergencia para los casos 1 y 6, así como el valor de la primera función de mérito para éste último.

Observamos como el vector $\vec{\mathbf{x}}$ presenta una variación en las componentes y y z consistente con la presencia desalineado. La pequeña variación en la componte x , que no debería estrar presente, la asociamos al error en la aplicación del método de los mínimos cuadrados al contar solo con 4 ecuaciones

Registro	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$	$abs\left(\frac{\tilde{\mu}_{3ue} \cdot \tilde{\mu}_{3vn}}{\tilde{\mu}_{3ve} \cdot \tilde{\mu}_{3uv}}\right)$
Caso #1	-0.00049	0.00058	-
Caso #6	-0.00733	0.47512	0.01826

Tabla 7.15 Valores del tercer momento estándar de las distribuciones de u y v para los casos 1 y 6, así como el valor de la segunda función de mérito para éste último.

Vemos como el valor de la segunda función de mérito tiene un valor muy cercano a 0, debido al gran valor que presenta $\tilde{\mu}_{3v}$ para el caso 6. Si bien este hecho es coherente con la presencia de desalineado en la dirección y , hay que tener en cuenta que únicamente contamos con 4 puntos.

7.3. Componente LED Lambertiano con lente secundaria

Tal y como hemos mencionado en la introducción del presente capítulo, en el caso de componente LED Lambertiano con lente, estudiamos el caso en que hay un error en la forma de a lente, debido a una burbuja superficial en la segunda cara. En estos casos, la zona que sufre la deformación no tiene el mismo pulido que el resto de la lente, de modo que hemos considerado esa región como difusa. La Figura 7.24 (a) muestra el perfil de la

superficie nominal y la Figura 7.24 (b) muestra el perfil de la superficie con la burbuja superficial.

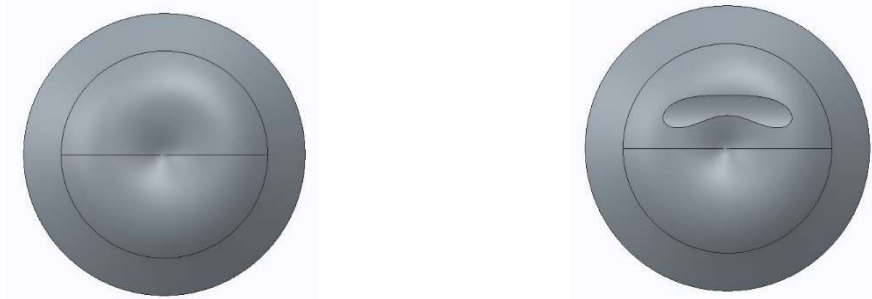


Figura 7.24 (a) Perfil de la lente con su forma nominal. (b) Perfil de la lente con una burbuja en la segunda cara.

7.3.1. Implementación del test óptico en línea

La Figuras 7.25 (a) y (b) presentan, respectivamente, los registros simulados correspondientes al caso nominal y al caso con defecto.



Figura 7.25 Registro simulado correspondiente al caso nominal (a), y al caso con defecto, (b). La dimensión de todos los registros es de $240 \times 175 \text{ mm}^2$ (1294×970 píxeles²), con 256 niveles de digitalización normalizados 255. Los de flujos radiantes totales en unidades arbitrarias son 0.3148 y 0.2679, respectivamente.

A continuación, la Tabla 7.16 presenta los flujos radiantes totales en nivel de digitalización y el valor de la primera función de mérito:

Registro	Flujo radiante total	Variación
Caso nominal	0.3148	-
Caso con defecto	0.2679	0.0515

Tabla 7.16 Flujo radiante total y valor de la variación, en unidades arbitrarias del caso nominal y del caso con defecto.

El flujo radiante total en el caso nominal es 0.3148, el 15% de este valor es 0.0479, dado que la variación es de 0.0515 el caso con defecto no cumple el criterio.

A continuación, presentamos la implementación de la segunda función de mérito para estos mismos registros, la que analiza la forma de la distribución. La Figura 7.26 presenta las respectivas zonas anulares empleadas para ajustar una elipse y posteriormente hallar el valor de su excentricidad. Recordemos que la relación entre excentricidades debe ser inferior a (1:2) entre los registros a evaluar y la nominal, $\epsilon_e < 2\epsilon_n$, para dar el componente como válido, ecuaciones (3.14) (3.15) (3.21) y (3.22).



Figura 7.26 Regiones anulares resultado de aplicar el criterio de la ecuación (3.14) a los registros (a) nominal (b) con defecto. Los valores de excentricidad que presentan son: 0.23 y 0.40.

La Tabla 7.17 presenta los valores de las excentricidades obtenidos para cada zona anular, ecuación (3.21). El registro nominal, con un valor de excentricidad de 0.23, determina el umbral a partir del cual se consideran los componentes aptos. Para el presente componente el criterio está fijado en 2 veces el valor del registro nominal, de modo que el umbral se sitúa en $2 \times 0.23 = 0.46$. Consecuentemente, el caso con defecto cumple el criterio de forma. Este se debe a que la caída en la energía es en una zona cercana a la periferia de la superficie de análisis, de modo que la zona anular no sufre una gran modificación.

Registro	Valor de ϵ
Caso nominal	0.23
Caso con defecto	0.40

Tabla 7.17 Valores de excentricidad obtenidos para el caso nominal y el caso con defecto.

7.3.2. Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)

Dado que hay un defecto en la forma de a lente, en primer lugar, implementamos el análisis de la posición de los spots para ver como ha afectado la presencia del defecto y, en segundo, lugar implementamos el análisis de la energía de los spots.

Análisis de la posición de los spots

La Figura 7.27 presenta los registros correspondientes al caso nominal y al caso con defecto.



Figura 7.27 Registros de spots del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$). (a) Caso nominal, (b) caso con defecto. La dimensión de todos los registros es de $240 \times 175 \text{ mm}^2$ (1294×970 píxeles²), con 256 niveles de digitalización normalizados a 255.

Como ya hemos presentado, a partir de la distribución de spots extraemos, la posición de los centroides, el trazado inverso de rayos y la distribución de los valores (u, v) , tal y como observamos en las Figuras 7.28 y 7.29, para cada uno de los registros.

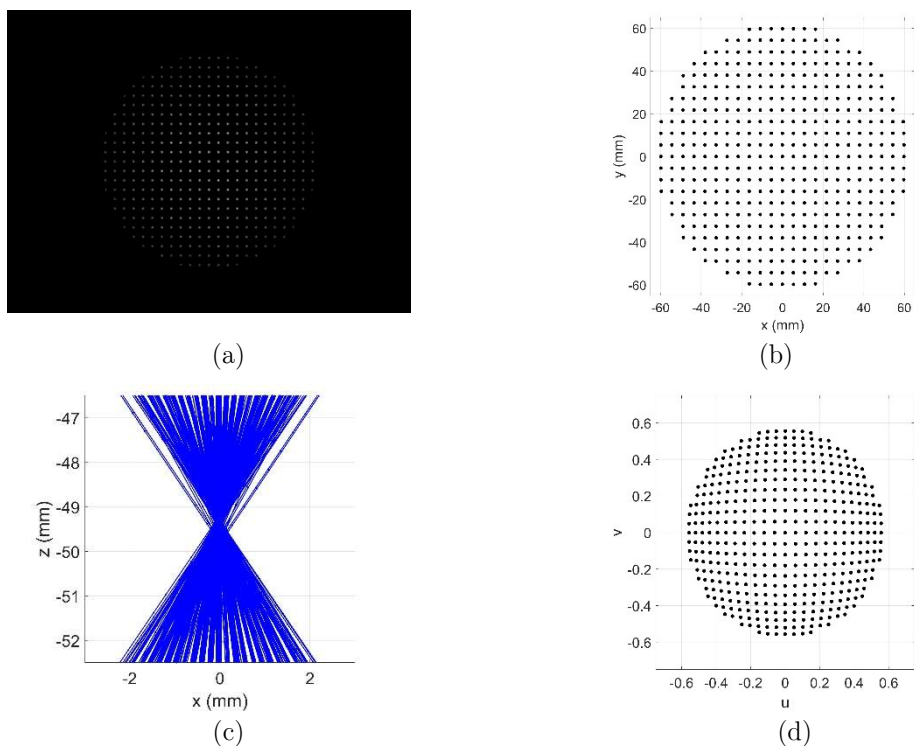


Figura 7.28 (a) Registro nominal. (b) Centroides de los spots del registro en (a). (c) Trazado inverso de rayos. (d) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) .

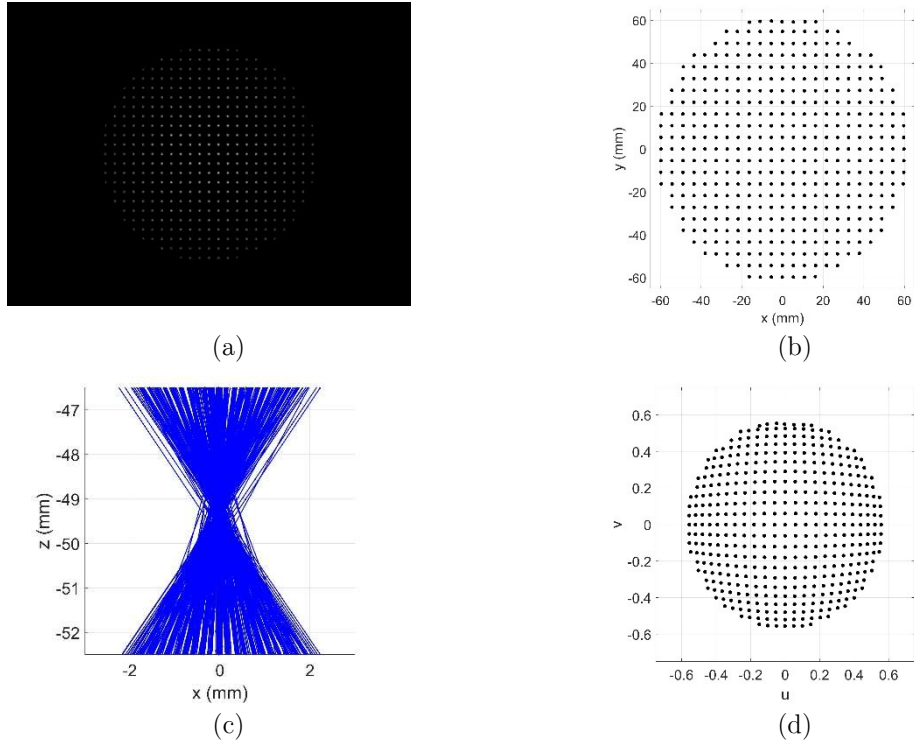


Figura 7.29 (a) Registro con defecto. (b) Centroides de los spots del registro en (a). (c) Trazado inverso de rayos. (d) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) .

Observamos claramente como la presencia del defecto en la segunda superficie de la lente provoca cambios en la región cercana de la cáustica. La Figura 7.28 (c) correspondiente al caso nominal presenta una cáustica más definida que la que presenta el trazado de rayos correspondiente al componente con defecto, Figura 7.29 (c).

A continuación, aplicamos ambas funciones de mérito. La Tabla 7.18 recoge los valores de la primera función de mérito, vinculada al vector posición \vec{x} y la Tabla 7.19 los valores de la segunda función de mérito vinculada los valores de la los valores de la asimetría de las distribuciones de (u, v) .

Registro	Vector \vec{x} (mm)	$\ \vec{x}_n - \vec{x}_e\ $ (mm)
Caso nominal	(-0.073, 0.0384, -49.6771)	-
Caso con defecto	(-0.0430, 0.0287, -49.2397)	0.4385

Tabla 7.18 Valores medidos del vector posición, \vec{x} , y de la primera función de mérito para cada uno de los dos registros.

Registro	$\tilde{\mu}_{3u}$	$\tilde{\mu}_{3v}$	$abs\left(\frac{\tilde{\mu}_{3ue} \cdot \tilde{\mu}_{3vn}}{\tilde{\mu}_{3ve} \cdot \tilde{\mu}_{3un}}\right)$
Caso nominal	0.0037	-0.0041	-
Caso con defecto	0.0083	-0.0172	0.5347

Tabla 7.19 Valores medidos de las asimetrías de las distribuciones de (u, v) , $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, y de la segunda función de mérito para cada uno de los dos registros.

Podemos observar como la presencia del efecto tanto tiene un impacto en la región de la cáustica, en la que convergen los rayos, como en los valores de la asimetría de las componentes de los cosenos directores.

Análisis del valor de irradiancia de los spots

La Figura 7.30 presenta la implementación del análisis de la energía de los spots. La Figura 7.30 (a) muestra el registro asociado al componente con el defecto. La Figura 7.30 (b) indica en rojo los spots que no cumplen con el criterio de energía al compararlos con los spots correspondientes del registro nominal. Finalmente las Figuras 7.30 (c) y (d) muestran, respectivamente, la vista xy y xz de la intersección de los rayos con una superficie esférica de un radio de 16 mm, utilizada para representar la zona central de la superficie de la lente. Se han indicado en rojo los puntos de intersección con los rayos correspondientes a los spots que no cumplen con el criterio de energía.

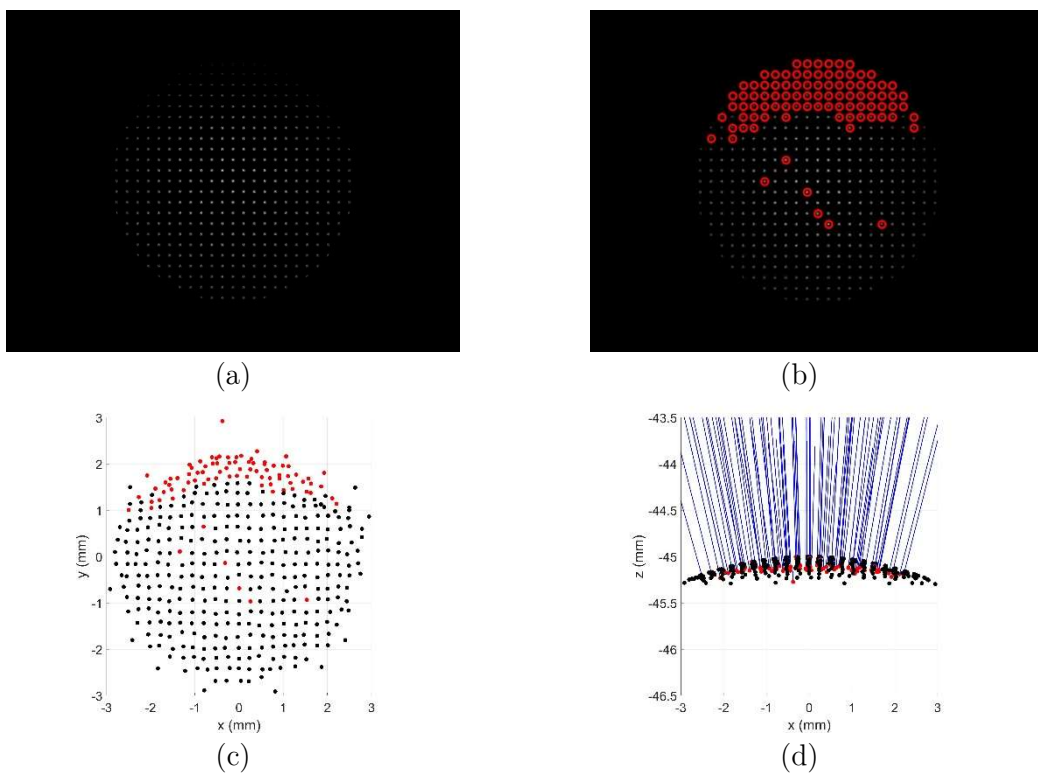


Figura 7.30 (a) Registro simulado del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) del caso con defecto. (b) Registro en (a) con los spots que no cumplen el criterio de irradiancia indicados en rojo. (c) y (d) Vistas xy y xz de la intersección de los rayos con una esfera de radio 16 mm, que corresponde a la zona central de la lente. Adicionalmente en (d) se muestra el trazado de los rayos asociados a los spots anómalos.

La Figura 7.30 (c) muestra como la zona superior presenta un achatamiento respecto a la inferior. Este hecho es clara consecuencia del error en la forma presente en la zona.

7.3.3. Medidas empleando la configuración del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)

A continuación, presentamos un estudio análogo utilizando la información de los rayos emitidos a ($\theta > 35^\circ$). De igual modo realizado el estudio de la posición de los spots, así como de la energía de estos. Las Figuras 7.31 (a) y (b) presentan los spots correspondientes únicamente a la luz que ha incidido sobre el reflector parabólico, para el caso nominal y el caso con defecto, respectivamente.



Figura 7.31 Registros de spots del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$). (a) Caso nominal, (b) caso con defecto. La dimensión de todos los registros es de $240 \times 175 \text{ mm}^2$ ($1294 \times 970 \text{ píxeles}^2$), con 256 niveles de digitalización normalizados a 255.

Análisis de la posición de los spots

Como ya hemos realizado anteriormente, en primer lugar, analizamos los rayos antes de que estos sufran reflexión en la superficie del reflector y posteriormente analizamos los rayos después de sufrir la reflexión.

Implementación del análisis en el primer conjunto de rayos (antes de reflejarse)

La Figura 7.32 y 7.33 presentan la información visual obtenida al implementar el análisis de la posición de los spots para el registro nominal y para el registro a evaluar correspondiente al primer conjunto de rayos.

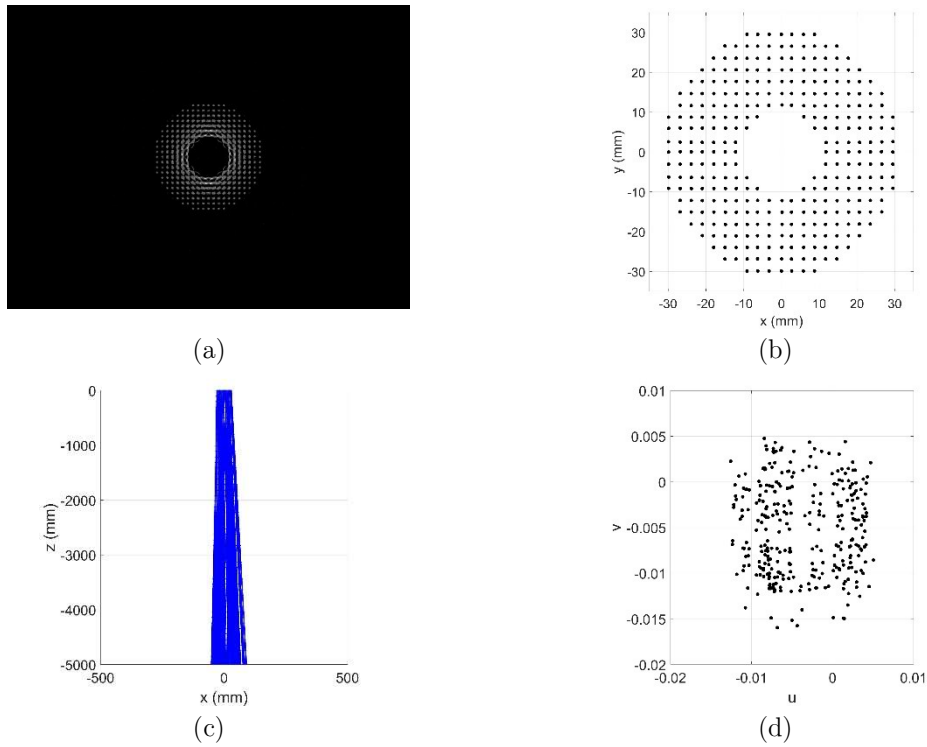


Figura 7.32 (a) Registro nominal. (b) Centroides de los spots del registro. (c) Trazado inverso de rayos. (d) Distribución de los cosenos directores (u, v) .

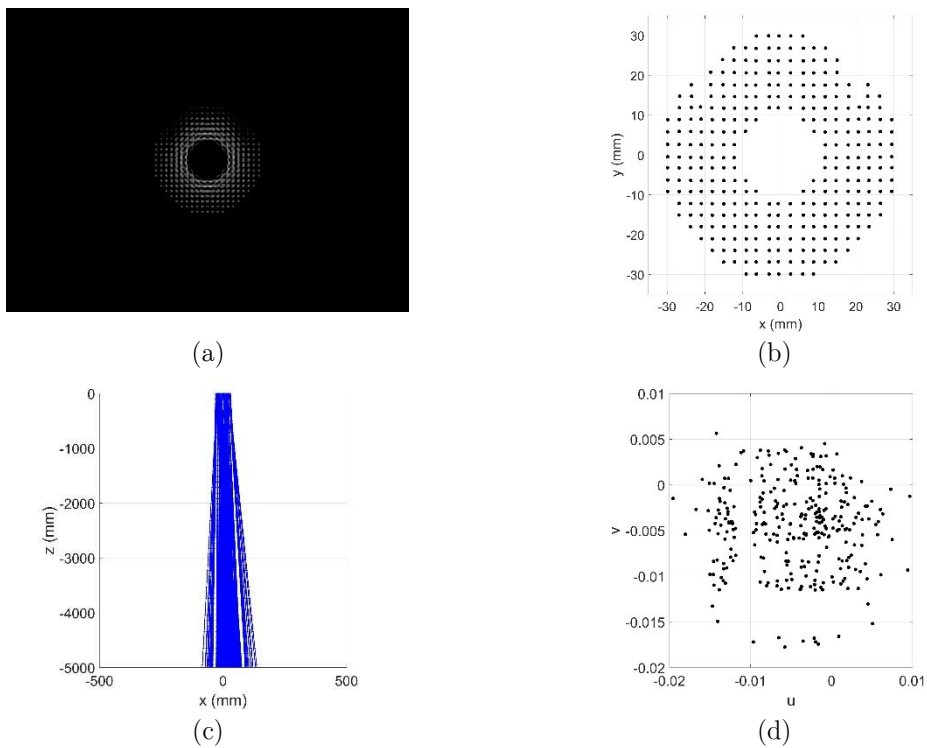


Figura 7.33 (a) Registro con defecto. (b) Centroides de los spots del registro. (c) Trazado inverso de rayos. (d) Distribución de los cosenos directores (u, v) .

En las distribuciones (u, v) de las Figuras 7.32 y 7.33 se observa como hay un ensanchamiento de la distribución a lo largo de la dirección de u en el caso que presenta defecto respecto al caso nominal. Este hecho también se observa en el comportamiento del trazado inverso de rayos.

A continuación, las Tablas 7.19 y 7.20 muestran los valores de las funciones de mérito; la Tabla 7.19 presenta los valores del vector posición \vec{x}_1 y su función de mérito asociada y la Tabla 7.20 muestra los valores de la asimetría de las distribuciones de (u, v) y los valores de la función de mérito para cada registro.

Registro	Vector \vec{x}_1 (mm)	$\ \vec{x}_{n1} - \vec{x}_{e1}\ $ (mm)
Caso Nominal	(-9.39, 3.82, 702.41)	-
Caso con defecto	(28.01, 5.17, 826.43)	129.54

Tabla 7.19 Valores medidos del vector posición, \vec{x}_1 , y de la primera función para mérito.

Registro	$\tilde{\mu}_{3u1}$	$\tilde{\mu}_{3v1}$	$abs\left(\frac{\tilde{\mu}_{3ue1} \cdot \tilde{\mu}_{3vn1}}{\tilde{\mu}_{3ve1} \cdot \tilde{\mu}_{3un1}}\right)$
Caso Nominal	0.0273	0.0306	-
Caso con defecto	-0.0728	-0.0493	1.6552

Tabla 7.20 Valores medidos de las asimetrías de las distribuciones de (u_1, v_1) , $\tilde{\mu}_{3u1}$ y $\tilde{\mu}_{3v1}$, y de la segunda función de mérito.

Implementación del análisis en el segundo conjunto de rayos (después de reflejarse)

La Figura 7.34 y 7.35 presentan la información visual obtenida al implementar el análisis de la posición de los spots para el registro a evaluar y para el registro a evaluar correspondiente al primer conjunto de rayos.

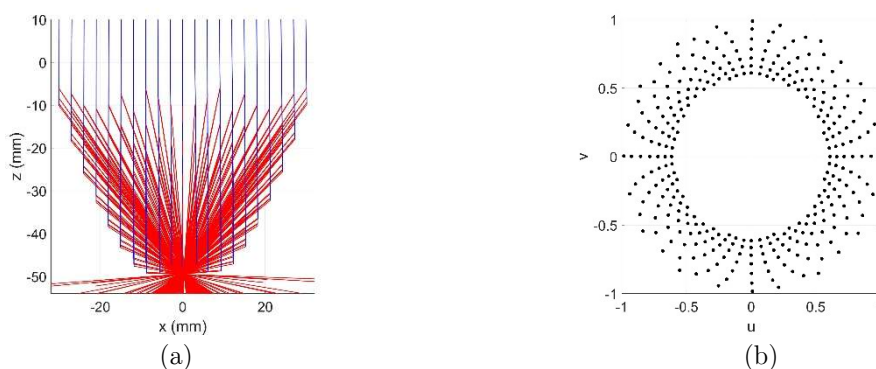


Figura 7.34 Registro nominal. (a) (Azul) Trazado inverso de rayos del primer conjunto de rayos. (Rojo) Trazado inverso de del segundo conjunto de rayos. (b) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) correspondientes al segundo conjunto de rayos.

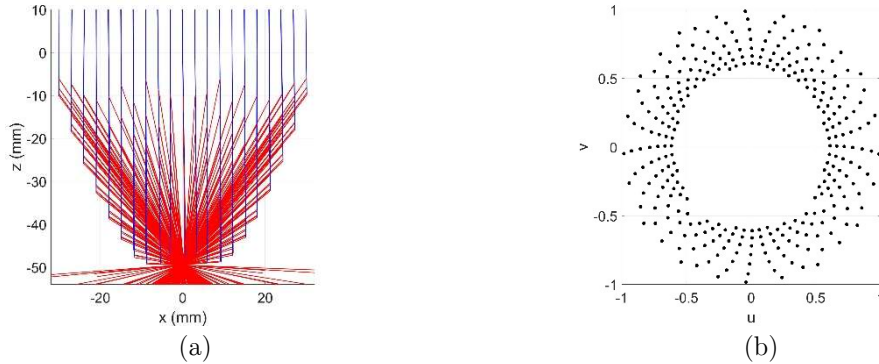


Figura 7.35 Registro con defecto. (a) (Azul) Trazado inverso de rayos del primer conjunto de rayos. (Rojo) Trazado inverso de del segundo conjunto de rayos. (b) Distribución de los cosenos directores de las componentes x e y , (u, v) correspondientes al segundo conjunto de rayos.

En las distribuciones de (u, v) de las Figuras 7.34 y 7.34 notamos un cambio en la distribuciones para valores negativos de v . Notese que en el caso con defecto los puntos están más separados entre sí en esa región que en el caso nominal.

A continuación, la Tabla 7.21 y 7.22 muestran la implementación de las funciones de mérito. La Tabla 7.21 presenta los valores del vector posición \vec{x}_2 y el valor de su función de mérito asociado y la Tabla 7.22 muestra los valores de la asimetría de las distribuciones de (u, v) y el valor de la función de mérito.

Registro	Vector \vec{x}_2 (mm)	$\ \vec{x}_{n2} - \vec{x}_{e2}\ $ (mm)
Caso Nominal	(-0.1070, 0.0098, -50.0210)	-
Caso con defecto	(-0.1576, 0.1864, -49.9178)	0.2107

Tabla 7.21 Valores medidos del vector posición, \vec{x}_2 , y de la primera función para mérito ambos registros.

Registro	$\tilde{\mu}_{3u2}$	$\tilde{\mu}_{3v2}$	$abs\left(\frac{\tilde{\mu}_{3ue2} \cdot \tilde{\mu}_{3vn2}}{\tilde{\mu}_{3ve2} \cdot \tilde{\mu}_{3un2}}\right)$
Caso Nominal	0.00184	0.00274	-
Caso con defecto	0.00387	0.00622	0.9265

Tabla 7.22 Valores medidos de las asimetrías de las distribuciones de (u_1, v_1) , $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, y de la segunda función de mérito para ambos registros.

Observamos como la presencia del defecto no tiene una gran incidencia en el desplazamiento de la cáustica, si bien incrementa los valores de las asimetrías de los valores de (u_1, v_1) .

Análisis del valor de irradiancia de los spots

La Figura 7.36 (a) presenta el registro con defecto, se ha indicado con un círculo rojo los spots que no cumplen el criterio de irradiancia, Figura 7.36 (b), ecuaciones (3.35) y (3.36) y se han añadido las vistas xy y xz de la intersección de los rayos con una esfera de radio 16 mm, que corresponde a la zona central de la lente, además a la vista xz se han añadido los rayos correspondientes a los spots anómalos.

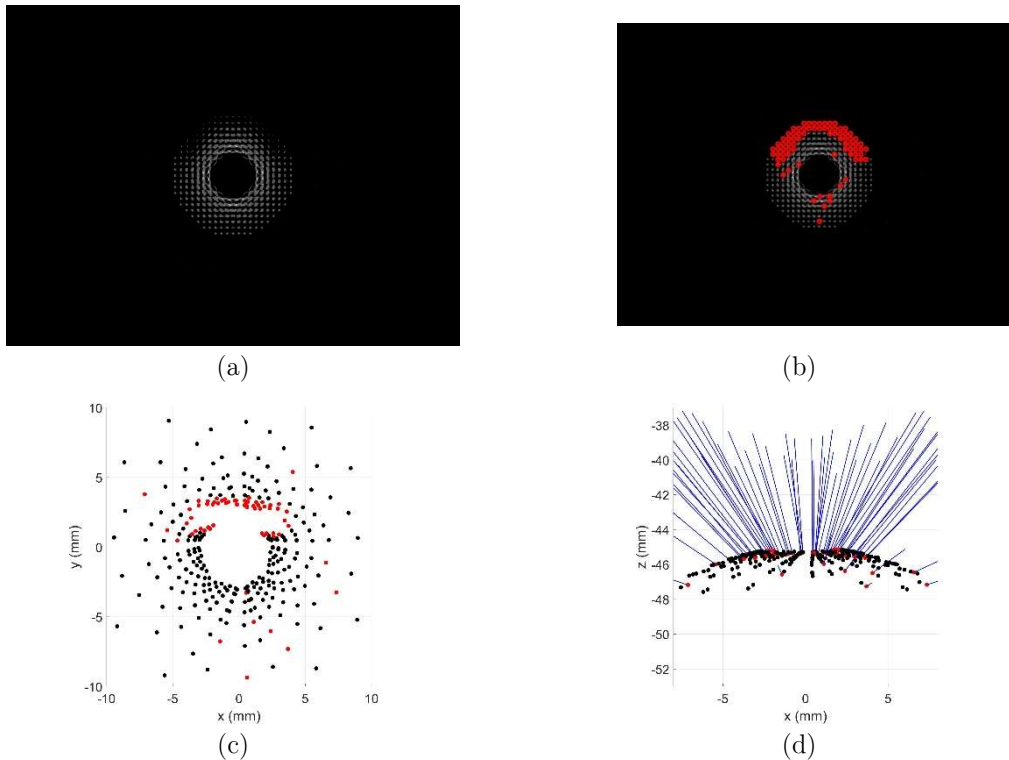


Figura 7.36 (a) Registro simulado del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) del caso con defecto. (b) Registro en (a) con los spots que no cumplen el criterio de irradiancia indicados en rojo. (c) y (d) Vistas xy y xz de la intersección de los rayos con una esfera de radio 16 mm, que corresponde a la zona central de la lente. Adicionalmente en (d) se muestra el trazado de los rayos asociados a los spots anómalos.

La situación es análoga a la del control ($\theta < 35^\circ$) con dos regiones de spots bien diferenciadas. Podemos observar en la Figura 7.36 (a) como los spots rojos definen un contorno con la misma forma que el defecto, Figura 7.24 (b).

7. SIMULACIONES

8. Interpretación de los resultados

Este capítulo está dedicado a la interpretación de los resultados experimentales y simulados de forma conjunta. Dicho análisis nos sirve como herramienta para comprobar que la implementación de la estrategia de medida desarrollada en la presente tesis permite la validación de componentes fotónicos en las condiciones de producción en línea y en el laboratorio. El capítulo lo hemos organizado analizando en primer lugar los resultados del componente LED Lambertiano, en segundo lugar, los resultados del componente FOT y finalmente los resultados del componente LED Lambertiano con lente secundaria.

8.1. Componente LED Lambertiano

Hemos elegido los resultados del componente LED Lambertiano para realizar la primera interpretación de resultados ya que ha sido el componente puente entre el entorno experimental y el entorno simulado y, además, se ha utilizado para realizar las pruebas de repetitividad de cada una de las tres partes de la estrategia de medida.

Test óptico en línea

La primera observación destacable es la total similitud entre los registros experimentales y los registros simulados en todos los casos analizados, Figura 6.14 y 7.1 respectivamente. Este hecho se ve confirmado al implementar las dos funciones de mérito. Al aplicar la función de mérito relativa al flujo radiante observamos que los desplazamientos analizados siempre presentan variaciones menores al 15%, Tabla 6.6 y Tabla 7.1 respectivamente. Del mismo modo, al aplicar la función de mérito relativa a la forma de la distribución de irradiancia, observamos que los anillos asociados a los registros a evaluar, Figura 6.15 (b) y (c); Figura 7.2 (b) y (c), presentan un desplazamiento en la posición respecto al caso nominal Figura 5.15 (a) y Figura 7.2 (a), pero no un cambio de forma relevante. Este hecho concuerda con que ninguno de los registros a evaluar presenta valores de la excentricidad que sean superiores a dos veces la excentricidad del registro nominal, Tabla 6.7 y Tabla 7.2.

Estudio de repetitividad

El estudio de repetitividad del test óptico en línea se ha hecho para las dos magnitudes que se analizan en el test: el nivel de irradiancia total registrada (en unidades arbitrarias de digitalización) y la excentricidad de las zonas anulares. Los casos analizados han sido los mismos en la implementación del test. La Tabla 5.8 y 5.9 recogen los resultados donde observamos que en todos los casos las desviaciones estándar son un orden de magnitud

menor que las medias; desviación estándar $\sim 5 \cdot 10^6$ para un nivel de irradiancia $\sim 5.5 \cdot 10^7$ y desviaciones estándar ~ 0.018 para un valor de excentricidad ~ 0.3 y 0.314 .

Control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)

De nuevo observamos como los registros experimentales, Figura 6.17, y simulados, Figura 7.3 presentan un gran parecido y en ambos casos somos capaces de aplicar el control óptico y obtener la información visual asociada, Figuras 6.18-20 y Figuras 7.4-6. En particular, es interesante observar cómo tanto la distribución de los centroides de los spots como la distribución de (u, v) son muy parecidas.

La única diferencia visual que destaca es que en los registros simulados las cáusticas son mucho más definidas, pero en ambos entornos observamos como la posición de la cáustica se desplaza en concordancia con el desplazamiento del componente. Además, el vector \vec{x} presenta valores coherentes con la posición de las cáusticas tal y como refleja la primera función de mérito, Tabla 6.10 y Tabla 7.3. En lo que respecta a los valores de la asimetría de la distribución de (u, v) , $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, observamos en la Tabla 6.11 y Tabla 7.4 que estos no presentan grandes desviaciones respecto al caso nominal. Este hecho es consecuencia de que los descentramientos que presentan los registros no tienen impacto en la asimetría de la distribución. Como consecuencia, los valores de la función de mérito, tanto para los registros experimentales como para los nominales, presentan valores cercanos a la unidad.

Estudio de repetitividad

El estudio de repetitividad del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) se ha hecho para las componentes del vector \vec{x} y para los valores de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$. La Tabla 6.12 presenta la media y la desviación estándar correspondiente a las componentes del vector \vec{x} . Observamos como el valor medio de la componente x aumenta en función de su desplazamiento y como las desviaciones estándar de las componentes x e y son del mismo orden de magnitud y un orden de magnitud menor que sus respectivas medias. Para la componente z las desviaciones estándar son un orden de magnitud mayor que las de las componentes x e y pero a su vez son tres órdenes de magnitud menores a su media. La Tabla 6.13 presenta los valores de la media y de las desviaciones estándar de los valores de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$ en todos los casos ambas magnitudes presentan medias un orden de magnitud superiores a sus desviaciones estándar.

Control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)

Los registros experimentales y simulados presentan un gran parecido, Figura 6.23 y 7.7 respectivamente, hecho especialmente importante ya que nos permite afirmar que el efecto del reflector parabólico lo podemos simular con garantías. En el control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) analizamos el conjunto de rayos tanto antes de reflejarse en la superficie parabólica como después de reflejarse.

Lo que mayor información visual proporciona del conjunto de rayos antes de reflejarse en la superficie parabólica es la distribución de los valores de (\mathbf{u}, \mathbf{v}) , 7.8-10 (d) 6.24-26 (d) y en todos los casos las nubes de valores presentan desplazamientos de ciertos puntos hacia valores positivos de u como consecuencia de los desplazamientos del componente hacia valores negativos de x . En el caso del cómputo del valor de \vec{x} , Tabla 6.14 y Tabla 7.5, los valores obtenidos para las componentes x e y no tienen gran relevancia si consideramos que la convergencia de los rayos se halla en el infinito óptico, lo que concuerda con los grandes valores que presenta la componente z . Como consecuencia, el valor de la primera función de mérito cuantifica, principalmente, el desplazamiento en el eje z de la zona de convergencia. Si realizamos el cálculo de la asimetría ($\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$), y la implementación de la segunda función de mérito, Tabla 6.15 y Tabla 7.6, hay concordancia con lo observado en las distribuciones de (\mathbf{u}, \mathbf{v}) : el valor de $\tilde{\mu}_{3u}$ aumenta con el valor del desplazamiento que presenta el registro como consecuencia del desplazamiento de ciertos puntos de la nube hacia valores positivos de u . En todos los casos hay concordancia entre valores experimentales y simulados.

Para el segundo conjunto de rayos, después de reflejarse en la superficie parabólica, contamos con la información visual del trazado de rayos que nos indica en qué zona del reflector inciden los rayos y como convergen posteriormente, así como la distribución de los cosenos directores (\mathbf{u}, \mathbf{v}) de los rayos convergentes, Figuras 6.27-29 y Figuras 7.11-13. El trazado de rayos muestra asimetría en la zona de incidencia de los rayos sobre el reflector como consecuencia de los desplazamientos del componente, aquí hay que destacar que este hecho es más notable en los registros experimentales que en los simulados. En lo que respecta a las distribuciones de (\mathbf{u}, \mathbf{v}) , al presentar una escala mucho mayor las diferencias visuales quedan atenuadas. Al calcular el vector \vec{x} , Tabla 6.16 y Tabla 7.7, observamos como al presentar el componente un pequeño desalineado respecto al reflector, tanto la componente x como la z varían; variación que se ve incrementada a mayor desplazamiento del componente. Del mismo modo, la variación en la distribución de (\mathbf{u}, \mathbf{v}) que no se aprecia visualmente, si se aprecia en el cómputo de $\tilde{\mu}_{3u2}$, Tabla 6.17 y Tabla 7.8, que presenta valores incrementales a mayor desplazamiento del componente, lo que se corresponde con valores incrementales de la función de mérito.

Estudio de repetitividad

El estudio de repetitividad del control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$) se ha hecho para las componentes del vector \vec{x}_1 y para los valores de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$ y se ha realizado de forma separada para el primer conjunto de rayos y para el segundo. Respecto al primer conjunto, la Tabla 6.18 muestra la media y la desviación estándar correspondiente a las componentes del vector \vec{x}_1 y observamos que las componentes x e y presentan unos valores de la media y de la desviación estándar del mismo orden de magnitud, presentando una repetitividad baja. En cambio la componente z presenta unos valores de la desviación estándar un orden de magnitud menor que la media. Este hecho es consecuencia de la simetría cilíndrica del sistema de medida. La Tabla 6.19 presenta los valores de la media y de las desviaciones

estándar de los valores de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$ para cada uno de los tres casos. De nuevo, en todos los casos ambas magnitudes presentan medias un orden de magnitud superior a sus desviaciones estándar.

Respecto al segundo conjunto, la Tabla 6.20 presenta la media y la desviación estándar correspondiente a las componentes del vector \vec{x}_2 y en este caso observamos que para las componentes x , y , y z los valores de las medias y las desviaciones estándar presentan un comportamiento análogo que para el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$). Destacando el hecho de que la media de la componente x incrementa su valor como consecuencia del desplazamiento entre registros. La Tabla 6.21 presenta los valores de la media y de las desviaciones estándar de los valores de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$ para cada uno de los tres casos. Podemos observar cómo estas magnitudes se comportan también de modo análogo a como se comportaban en el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$), presentando medias un orden de magnitud superiores a sus desviaciones estándar.

En resumen, la implementación de la estrategia de medida desarrollada en la presente tesis nos permite la validación de componentes fotónicos en las condiciones de producción en línea y en el laboratorio. La repetitividad de las medidas es suficiente para discriminar si el componente es apto, o no, tal como hemos visto en los valores de las desviaciones estándar calculadas.

Asimismo, podemos afirmar que la estrategia de medida es simulable. Es decir, que los resultados que obtenemos experimentalmente se reproducen en gran medida cuando los registros se han obtenido dentro del entorno de simulación.

Por último, las funciones de mérito y controles de ópticos calidad propuestos promocionan información válida respecto a la posición de componente cuando éste se desplaza

8.2. Componente FOT

El componente LED Lambertiano nos ha servido para mostrar que la estrategia de medida es simulable y además nos ha permitido realizar un estudio de la repetitividad de ésta. Las medidas, y simulaciones, realizadas tanto al componente FOT como al componente LED Lambertiano con lente son ejemplos de aplicabilidad de la estrategia de medida presentada en esta tesis, para la interpretación de resultados seguiremos la misma estructura que en el apartado anterior.

Experimentalmente contamos con dos grupos de componentes FOTs. El primer grupo presenta distribución de intensidad dentro de la ventana angular $\theta < 35^\circ$ y el segundo grupo en la ventana angular $\theta > 35^\circ$. De este modo al primer grupo se le ha aplicado el test óptico en línea y el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) y al segundo grupo únicamente el control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$). En el entorno de simulación hemos introducido defectos en el componente FOT y los registros presentan el mismo comportamiento que los experimentales: intensidad radiante dentro de la ventana angular ($\theta < 35^\circ$) o en ($\theta > 35^\circ$).

Test óptico en línea

El test óptico en línea se ha empleado para el primer grupo de componentes FOTs, Figura 6.2. Los registros experimentales presentan distribuciones de irradiancia muy distintas al caso nominal (simulado). Este hecho se observa en las zonas anulares, Figura 6.3 y al hacer el cómputo de la excentricidad éste varía de 0.13 para el registro nominal hasta 0.52 y 0.78, Tabla 6.1. Dado que el criterio de validez está fijado en 2 veces el valor de la excentricidad nominal los FOTs experimentales no cumplen el criterio de forma del test óptico en línea.

Al realizar el cómputo de la excentricidad en los registros simulados para diferentes formas de la óptica y posiciones del chip del LED observamos que dichas variaciones tienen un gran impacto en la forma anular correspondiente a cada registro, Figura 7.16 y Tabla 7.11. Los valores de las excentricidades en los casos simulados están comprendidos entre 0.32 y 0.75, valores que indican la falta de cumplimiento del criterio de forma.

Gracias a que el test óptico en línea es simulable, el criterio de aceptación de los componentes FOTs se puede apoyar en la simulación. Esto implica que podemos relacionar la funcionalidad con la forma del componente. De este modo mediante simulación podemos marcar los límites en la variación de la forma para las cuales el componente seguirá cumpliendo el criterio de aceptación.

Control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)

En la implementación del control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) analizamos los mismos casos que en el test óptico en línea. La Figura 6.4 muestra el registro nominal y los registros experimentales a evaluar. Las Figuras 6.5-8 muestran la información visual obtenida al implementar el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) para cada uno de los registros. Observamos que, debido a que el cono de luz es mayor, el número de spots en los registros a analizar supera al registro nominal y cómo ni la distribución de los spots ni la de cosenos directores son simétricas ni están centradas. Este hecho se plasma en los valores del vector \vec{x} y de la primera función de mérito, Tabla 6.2. Del mismo modo, observamos un impacto en los valores de, $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$, que presentan valores de varios ordenes de magnitud mayores que para el caso nominal, Tabla 6.3, como consecuencia los valores de la función de mérito se separan notablemente de la unidad, llegando a alcanzar el valor de 2.91 en un caso.

En el caso de los registros simulamos también implementamos el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$) a los casos ya analizados mediante el test óptico en línea. Es especialmente interesante analizar los casos que presentan un cambio de la óptica del componente, Figura 7.19, 7.20 y 7.22 en las que observamos un mayor número de spots como consecuencia de la variación en la divergencia que presenta el componente, mientras que en el caso de la Figura 7.21, que presenta desplazamiento del chip del LED sin cambio de forma, únicamente se observa un desplazamiento en la posición de los spots. En los casos en que únicamente hay cambio en la forma, Figura 7.19 y 7.20, observamos un cambio destacable únicamente en la componente z del vector, mientras que en los casos en que hay

desplazamiento del chip del LED en la dirección y , se observa un cambio en dicha componente además de en la componente z , Tabla 7.12. La presencia o no de desalineado de nuevo queda cuantificado por el valor de las magnitudes $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$ y de la segunda función de mérito. Mientras que los sistemas que únicamente tienen modificación en la óptica, presenta valores de la función de mérito cercanos a la unidad, en los casos en que hay desalineados obtenemos valores de 0.35 y 0.032.

Control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)

Como hemos presentado al inicio de esta sección, hay un segundo grupo de componentes FOTs fabricados que sólo se ha evaluado mediante el control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$). La Figura 6.9 presenta los registros de dos componentes FOTs pertenecientes a este segundo grupo y la Figura 6.10 y 6.11 muestran la información visual obtenida vinculada al control óptico en la que observamos que hay dos conjuntos de spots bien diferenciados: los correspondientes a la luz que atraviesa la zona de la óptica del componente (con un número de spots pequeño) y los que no (resto de spots). Esta separación de los spots en dos grupos se aprecia claramente en el trazado inverso de rayos como una asimetría en la convergencia de los rayos y en especial en la distribución de (u, v) correspondiente al segundo conjunto de rayos, después de interactuar con el reflector, Figuras 6.10-6.11 (f). Además, observamos como en el trazado inverso del segundo conjunto de rayos apreciamos la presencia de asimetría en la zona de convergencia. El valor del vector \vec{x} denota la presencia de desalineado al igual que los valores de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$ y de la segunda función de mérito.

Adicionalmente, dada la diferencia notoria en nivel de irradiancia que presentan los dos grupos de spots de la Figuras 6.10 y 6.11, aplicamos el análisis de la energía de los spots en estos dos registros indicado en rojo los spots que presentan un nivel de irradiancia por encima del criterio establecido, ecuación (6.1) y presentando la intersección de los rayos correspondientes a los spots de los registros con un plano situado en la posición del componente FOT. Se observa claramente como los spots negros, correspondientes a los rayos que no atraviesan la óptica presentan una distribución circular semejante a la corona del FOT.

En el entorno simulado, a diferencia de sus análogos experimentales, contamos con un pequeño grupo de spots, correspondientes a los rayos que se propagan a través de la óptica que permite implementar la estrategia de medida, de modo que somos capaces de extraer la información visual correspondiente al componente. De hecho, tanto en el trazado inverso del primer conjunto de rayos Figura 7.21 (c-d) como en el del segundo conjunto Figura 7.21 (g-h), o en la distribución de sus respectivos cosenos directores, Figura 7.21 (e-f), se observa claramente la presencia de desplazamiento del chip del LED. La Tabla 7.5 presenta los valores de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$ y de la segunda función de mérito, que de nuevo confirman la presencia de desalineado.

Al aplicar la estrategia de medida al componente FOT, extraemos varias conclusiones. En primer lugar, observamos como el criterio de aceptación de los componentes FOTs se puede apoyar en la simulación. De modo que mediante simulación podemos marcar los límites en la variación de la forma para las cuales el componente seguirá cumpliendo el criterio de aceptación. Además, hemos observado como las modificaciones en la forma de una óptica de dimensiones reducidas como la del componente FOT son fácilmente reconocibles por el incremento de spots que presenta el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$). Adicionalmente, el trazado inverso presenta zonas variables en su zona de convergencia a lo largo del eje z , tal y como reflejan los valores del vector \vec{x} y de la primera función de mérito. Asimismo, la presencia de desalineado en el componente FOT implica el desplazamiento de los spots, así como un incremento en los valores de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$ y de la segunda función de mérito.

8.3. Componente LED Lambertiano con lente secundaria

Como ya se ha mencionado, la introducción del componente LED Lambertiano con lente secundaria tiene el mismo objetivo que el del componente FOT: ejemplificar la aplicabilidad de la estrategia de medida desarrollada en la presente tesis. Como el LED Lambertiano con lente presenta una funcionalidad óptica muy distinta a la del componente FOT su inclusión proporciona diversidad en la ejemplificación de la estrategia de medida

Test óptico en línea

En la implementación experimental del test óptico en línea se han analizado dos conjuntos de registros. El primero en que no hay desalineado entre el componente LED Lambertiano y la lente y un segundo en el que sí la hay.

La Figura 6.31 presenta los registros correspondientes al primer grupo, estos únicamente presentan desplazamiento respecto al sistema de medida y en todos ellos se cumplen la función de mérito relativa al flujo radiante y la de distribución de irradiancia, Tabla 6.24.

La Figura 6.33 presenta los registros correspondientes al segundo grupo, y aunque el componte tiene el LED desplazado respecto a la óptica los registros únicamente presentan desplazamiento respecto al sistema de medida. En este caso todos los resultados son muy similares entre sí, pero se alejan del valor nominal, no cumpliendo ninguno de ellos el criterio de calidad, Tabla 6.25.

En el entorno simulado, hemos considerado dos casos: el caso nominal, Figura 7.24 (a), y un caso con defecto en la lente, Figura 7.24 (b). Debido a la modificación en la forma se observa claramente como hay una región del registro Figura 7.25 (b) que presenta una disminución de la irradiancia. Este hecho queda cuantificado cuando se compara el nivel de irradiancia en el plano de interés y se observa una disminución superior al 15% del registro nominal, Tabla 7.16. Asimismo, cuando observamos los anillos correspondientes a cada uno de los registros, Figura 7.26, observamos un ligero achatamiento en el anillo correspondiente al registro a evaluar. Sin embargo, tal y como muestran los valores de la

excentricidad, 0.23 y 0.40, Tabla 7.17, el valor de la excentricidad del registro a evaluar está dentro de lo que establece el criterio, $0.40 < 2 \times 0.23 = 0.46$.

Control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$)

En el entorno experimental este control se aplica únicamente al segundo conjunto, los que tienen el componente con el LED ligeramente descentrado respecto a la óptica. La Figura 6.35 muestra los registros correspondientes al caso nominal y a los tres casos del segundo conjunto. Las Figuras 6.36-39 presentan la información visual obtenida al aplicar el control óptico de calidad ($\theta < 35^\circ$). En todos los registros a evaluar, la cáustica presenta una pérdida de la simetría debido al desalineado del LED y adicionalmente, entre las cáusticas correspondientes a los registros del segundo grupo, se aprecia un desplazamiento debido al desplazamiento que presenta el conjunto del componente para cada uno de los registros. El cómputo del vector \vec{x} así como de la primera función de mérito, Tabla 6.26, muestran valores coherentes con el desplazamiento que existe entre los registros del segundo grupo. Del mismo modo los valores de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$ y de la segunda función de mérito confirman el desalineado presente en los registros del segundo grupo respecto al registro nominal, y observamos como los valores de la segunda función de mérito: 0.7532, 0.5458 y 0.4982 se alejan de la unidad.

El análisis de la energía de los spots se realiza únicamente en uno de los registros del segundo grupo ya que todos presentan el mismo desalineado, Figura 6.40, y se observa como en el desalineado hay dos zonas de spots Figura 6.40 (b) que no cumplen el criterio de energía, dada la distribución de estos puntos, podemos afirmar que el desalineado se ha producido tanto en la dirección x como en la y , hecho que queda confirmado al observar los puntos de intersección Figura 6.40 (c-d).

En el entorno simulado, analizamos los mismos casos que en el test óptico en línea. La Figura 7.27 presenta los registros de ambos casos. Observamos claramente como la zona de la cáustica, se ensancha respecto al caso nominal y como en la distribución de (u, v) se observa una variación local de las posiciones cerca de $v=0.6$ respecto a la distribución nominal, Figura 7.28 (d) y Figura 7.29 (d), respectivamente. En el cómputo del vector \vec{x} se observa como el cambio que predomina es en la dirección z , Tabla 7.18. En los valores de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$ se observa un incremento respecto al caso nominal y la función de mérito presenta un valor lejano a la unidad, Tabla 7.18.

Adicionalmente, aplicamos el análisis de la energía de los spots en el registro a evaluar. La Figura 7.30 (b) presenta una zona concreta donde los spots no cumplen el criterio de energía, hecho que concuerda con una variación local de la forma de la lente. Al realizar la intersección de los rayos observamos la región de la lente en la que se halla la variación de la forma, Figura 7.30 (c-d).

Control óptico de calidad ($\theta > 35^\circ$)

En el entorno experimental, este último control se aplica únicamente a uno de los registros del segundo grupo, el que presenta la posición nominal, Figura 6.41. En primer lugar, observamos como el desalineado comporta que en el registro haya una zona en la que no hay spots presentes respecto al caso nominal, Figura 6.42-43 (b). Asimismo el desalineado también provoca una asimetría en la convergencia del trazado inverso de rayos, Figuras 6.42-43 (c) y un cambio en la forma de la distribución (u, v) , Figuras 6.42-43 (d). Estos hechos no se ven reflejados drásticamente en los valores de las componentes del vector \vec{x}_1 ni en el valor de la primera función de mérito, Tabla 6.28. Pero sí que tienen gran impacto en los valores de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$ y de la segunda función de mérito, que presenta un valor de 2.71, alejado de la unidad, Tabla 6.29.

La Figura 6.44 y 6.45 presentan la información visual correspondiente al segundo conjunto de rayos. Tanto en la convergencia de los rayos Figuras 6.44-45 (a), como en la distribución de los cosenos directores Figuras 6.44-45 (b) se aprecia el efecto de la presencia del desalineado. De nuevo, no son ni el valor del vector \vec{x}_2 ni de la primera función de mérito los que presentan valores más notorios, Tabla 6.30, sino los de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$ y de la segunda función de mérito, 3.67280, Tabla 6.31.

En el análisis del nivel de irradiancia de los spots, Figura 6.46, se observan dos regiones de spots que no cumplen el criterio de energía como consecuencia del desalineado presente tanto en la dirección x como en la y .

En el entorno simulado observamos como el cambio local de la forma provoca una modificación en la distribución de los valores de los cosenos directores Figuras 7.32-33 (d), así como en la convergencia del trazado inverso de rayos Figuras 7.32-33 (c). Estos dos hechos tienen un impacto moderado en el valor del vector \vec{x}_1 y en la primera función de mérito, Tabla 7.19, así como en los valores de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$ y de la segunda función de mérito Tabla 7.20. Si nos fijamos en el segundo conjunto de rayos, después de reflejarse en el reflector parabólico, tanto en la convergencia de los rayos Figuras 7.34-35 (a), como en la distribución de los cosenos directores Figuras 7.34-35 (b) no se aprecia el efecto de la variación local de la forma. De nuevo, ni el valor del vector \vec{x}_2 ni de la primera función de mérito, Tabla 7.21 ni de $\tilde{\mu}_{3u}$ y $\tilde{\mu}_{3v}$ ni de la segunda función de mérito Tabla 7.22 muestran valores indicativos del defecto.

Si bien en el análisis de la posición de los spots no se aprecia una gran incidencia debida al defecto local de la forma, ésta si es visible al aplicar el análisis de la energía de los spots. La Figura 7.36 presenta la información visual obtenida al aplicar este análisis. Se observa claramente, que hay una región donde los spots no cumplen el criterio de energía Figura 7.36 (b). Adicionalmente, al presentar la intersección de los rayos, Figura 7.36 (c), observamos como los spots rojos definen un contorno con la misma forma que el defecto, Figura 7.24 (b).

8. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

En resumen, podemos afirmar en base a los casos estudiados del LED Lambertiano con lente secundaria que la estrategia de medida nos permite distinguir claramente cuando una disminución del nivel de irradiancia es debido a un defecto en la forma o a la presencia de desalineado. En el test óptico en línea no tenemos herramientas para distinguir ambos casos, sin embargo, en ambos controles ópticos de calidad sí. En el caso de la presencia de desalineado, destaca el hecho de la pérdida de la simetría de la cáustica que se ve reflejada cuantitativamente en los valores de la segunda función de mérito. En el caso del defecto local, este no tiene un gran impacto visual ni en los valores de la primera ni de la segunda función de mérito. Sin embargo, ambos casos tienen impacto en la energía individual de los spots.

9. Conclusiones

El objetivo general de esta tesis es el desarrollo e implementación de una estrategia de medida que permita la validación de la funcionalidad óptica de componentes fotónicos en la misma línea de fabricación y el control óptico de calidad complementario en el entorno de laboratorio. Es decir, el sistema debe permitir la validación de la funcionalidad óptica de los componentes fotónicos en la línea de producción y, además, añadiendo pequeñas variaciones en el montaje, debe permitir la implementación de un control óptico de calidad en el entorno de laboratorio para dar una primera respuesta a los motivos por los que ciertos componentes han sido descartados por el test óptico en línea.

La presente tesis se desarrolla en el contexto del nuevo método de fabricación desarrollado por SnellOpticsTM junto con la UPC, para el embebido funcional de componentes fotónicos y que ha sido sufragado, en parte, a través de los proyectos ENCAP y FLOIM con financiación nacional i europea respectivamente. En este nuevo proceso de fabricación el encapsulado óptico del componente no es una simple cúpula esférica de resina, sino que se inyecta el material con las superficies ópticas adecuadas para que el componente fotónico posea la función óptica específica requerida, además de actuar como *package*, protegiendo el componente. Los componentes fabricados mediante este nuevo método presentan un alto valor añadido debido a que la funcionalidad óptica se consigue en el mismo proceso de *packaging*. Por este motivo es necesario la implementación de un test en la misma línea de producción de los componentes fotónicos que permita, en tiempo real, validar su funcionalidad óptica individualmente. Adicionalmente, la implementación de un control óptico de calidad en el entorno de laboratorio que sea capaz de detectar los defectos presentes, de un modo sencillo, agiliza la toma de decisiones en el control de producción.

Conclusiones

1. El estudio del estado del conocimiento ha permitido determinar la novedad del sistema propuesto y en consecuencia se ha protegido la propiedad intelectual e industrial de la estrategia de medida y su implementación mediante la solicitud de patente 18382831.8.
2. Se ha desarrollado una estrategia de medida capaz de validar la funcionalidad óptica de los componentes fotónicos a partir de la medida de la distribución de iluminación en un plano cercano. Para ello se han desarrollado las siguientes funciones de mérito y criterios de aceptación:

- a. Una primera función de mérito asociada al flujo radiante total junto con su correspondiente umbral de aceptabilidad.
 - b. Una segunda función de mérito asociada a la distribución de iluminación, para insensibilizar dicha función frente a posibles desplazamientos del componente en la línea de producción se ha empleado la excentricidad de la distribución de irradiancia como elemento discriminador.
3. Se han desarrollado dos controles ópticos de calidad, en entorno de laboratorio, que permiten detectar defectos en los componentes fotónicos rechazados en línea de producción.

El primero, para la medida de ángulos menores de 35° , se ha implementado añadiendo una malla de agujeros entre el componente y el plano de medida de iluminación, dicha malla actúa como selector de pendientes.

El segundo, para la medida de ángulos mayores de 35° , se ha implementado añadiendo un reflector parabólico al primer control.

En ambos casos se han desarrollado funciones de mérito que facilitan la detección de los defectos. Y se pueden agrupar en dos categorías:

- a. Análisis de la posición de los spots

A partir del trazado inverso de rayos generados mediante el conjunto de direcciones medido, se determina la zona de convergencia de éstos. La diferencia entre el vector posición de dicha zona respecto a la posición nominal nos permite construir la primera función de calidad. Esta función se ha aplicado en tres ocasiones: una para el control de ángulos menores de 35° y dos para el control de mayores de 35° , al conjunto de rayos antes de interactuar con el reflector y al conjunto de después de dicha interacción.

Asimismo, a partir de la misma información base se ha obtenido una segunda función de mérito basada en comparar los valores de la asimetría que presentan los cosenos directores (u, v) , que se emplea para determinar si en la dirección de propagación de los rayos existe un predominio en la dirección x o y .

- b. Análisis del valor de irradiancia de los spots

El objetivo de la función de mérito y de su correspondiente criterio es determinar las discrepancias en el nivel de irradiancia de los spots respecto a su valor nominal. Para el conjunto de spots que no cumplen el criterio se determina a que región corresponden gracias al trazado inverso de rayos.

4. Se ha desarrollado un equipo de laboratorio capaz de implementar tanto el test óptico en línea como los controles de calidad descritos en el apartado anterior.

Dicho equipo ha sido calibrado, tanto geoméricamente como energéticamente, y se han realizado pruebas de repetitividad de sus medidas.

5. Se ha verificado, gracias al uso de un LED Lambertiano, que el equipo, los criterios y todas las funciones de calidad son susceptibles de ser simuladas con anterioridad a su implementación y que dicha capacidad permite establecer patrones de referencia según las prescripciones funcionales que se soliciten a cada componente fotónico particular.
6. El equipo se ha empleado para la medida de la funcionalidad óptica de las primeras pruebas de manufactura del componente FOT y de un componente LED Lambertiano con una óptica secundaria diseñada por SnellOptics™. La elección de dichos componentes viene motivada por el interés en validar, en línea la producción, los componentes FOT desarrollados en consorcio con QPO™.
7. La implementación de la estrategia de medida desarrollada permite la validación de componentes fotónicos en las condiciones de producción en línea y en el laboratorio. Este hecho permite que, mediante simulación, podemos fijar los límites en la variación de la forma para las cuales el componente seguirá cumpliendo el criterio de aceptación.

La estrategia de medida, apoyándonos en la simulación, nos permite distinguir entre la presencia de un desplazamiento global del componente, la presencia de desalineado entre los elementos del componente y la presencia de un defecto local en la óptica de éste.

Trabajo futuro

La línea de trabajo desarrollada en la presente tesis doctoral muestra la implementación de la estrategia de medida en únicamente dos componentes, que presentan una funcionalidad óptica muy distinta. Sin embargo, la estrategia se implementará a un número mayor de componentes fotónicos a medida que la empresa SnellOptics™ lo requiera. Muy probablemente, para estos nuevos componentes fotónicos se deban modificar las funciones de mérito y los criterios que presentamos para adaptarlos a la funcionalidad óptica que presentan.

Adicionalmente, el proceso de encapsulado óptico desarrollado por SnellOptics™ puede implementarse en componentes fotónicos no emisores de luz, como por ejemplo sensores. Para este tipo de componentes deberemos adaptar la estrategia desarrollada considerando que el componente a evaluar, en lugar de emitir luz, la detecta.

9. CONCLUSIONES

Apéndice A

El presente apéndice tiene por objetivo facilitar la consulta de las magnitudes radiométricas empleadas, la literatura dedicada a la misma es muy amplia [117-119] por lo que aquí sólo hemos presentado las magnitudes de interés. El apéndice está dividido en dos partes. En primer lugar, presentamos las principales cantidades que se usan en el ámbito de la radiometría hasta presentar la ecuación fundamental de la transferencia de radiación. En segundo lugar, presentamos brevemente la relación que existe entre las cantidades radiométricas y sus equivalentes fotométricos.

El flujo radiante, ϕ , se define como el ratio de energía radiante por segundo (Watt).

$$\phi = \frac{dQ}{dt}, \quad (\text{A.1})$$

donde dQ es el elemento diferencial de energía radiante (Joule) y dt es el elemento diferencial de tiempo en segundos.

La densidad superficial de flujo radiante se conoce genéricamente como irradiancia, E (Watt · m⁻²).

$$E = \frac{d\phi}{ds_0}, \quad (\text{A.2})$$

donde $d\phi$ es el elemento infinitesimal de flujo radiante emergente o incidente en el elemento infinitesimal de área ds_0 . La irradiancia que emite una superficie, debe referirse como exitancia radiante, mientras que la irradiancia que llega a una superficie es conocida como incidancia radiante.

Análogamente, la densidad en ángulo sólido de flujo radiante se conoce como intensidad radiante, I (Watt · sr⁻¹):

$$I = \frac{d\phi}{d\omega}, \quad (\text{A.3})$$

donde $d\phi$ es el elemento infinitesimal de flujo radiante incidente o emergente de un punto dentro de un elemento diferencial de ángulo sólido, $d\omega$.

Por último, la radiancia es la densidad de flujo radiante por unidad de área y ángulo sólido. Es decir, el flujo radiante por unidad de área proyectada y por unidad de ángulo sólido incidente o emergente en una dirección específica de un punto de estudio en una superficie dada.

$$L = \frac{d^2\phi}{d\omega ds} = \frac{d^2\phi}{d\omega ds_0 \cos\theta}, \quad (\text{A.4})$$

donde $ds = ds_0 \cos\theta$ es el elemento de área proyectada del elemento de área ds_0 que contiene el punto de estudio en un plano normal a la dirección de propagación, $d\omega$ es el elemento de ángulo sólido definido en la dirección de propagación y θ es el ángulo que forman la dirección de propagación y el vector normal en el punto de estudio perteneciente al elemento de superficie ds_0 .

A partir de la definición de radiancia, podemos deducir la ecuación fundamental de la transferencia de radiación entre dos puntos (P y Q) que pertenecen a los elementos de área ds_0 y da_0 , respectivamente. Desde el punto P del elemento de área ds_0 el elemento de ángulo sólido que presenta el elemento de superficie da en el que se encuentra Q , viene dado por:

$$d\omega = \frac{da}{R^2}, \quad (\text{A.5})$$

Donde R es la distancia entre los puntos P y Q . De este modo, si consideramos que $da = da_0 \cos\psi$, donde ψ es el ángulo entre la dirección de propagación del flujo radiante y la normal en el punto Q del elemento da_0 , Figura 1, obtenemos:

$$L = \frac{R^2 d^2\phi}{da ds_0 \cos\theta} = \frac{R^2 d^2\phi}{da_0 \cos\psi ds_0 \cos\theta}, \quad (\text{A.6})$$

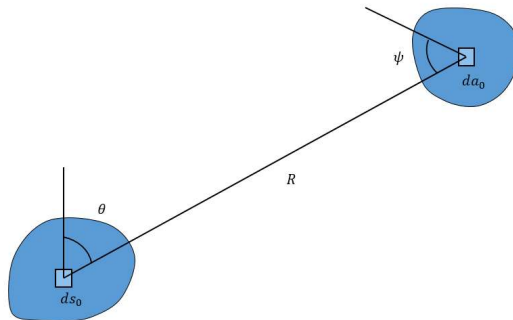


Figura A.1 Representación esquemática de la ecuación fundamental de transferencia de radiación.

Finalmente, el flujo radiante que intercambian ambos elementos de superficie es:

$$\phi = \int_{s_0} \int_{a_0} L \frac{ds_0 \cos\theta da_0 \cos\psi}{R^2}, \quad (\text{A.7})$$

La expresión (A.7) es conocida como la ecuación fundamental de la transferencia de radiación en forma integral.

La relación entre las cantidades radiométricas y fotométricas se vincula a la función de luminosidad fotópica, definida en 1924 por la Comisión Internacional de la Iluminación [120]. La función de luminosidad, Figura 2, describe la sensibilidad espectral asociada al concepto visual de brillo.

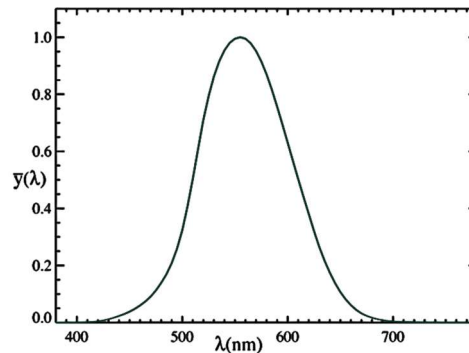


Figura A.2 Función de luminosidad fotópica, definida en 1924 por la Comisión Internacional de la Iluminación. Se observa como el máximo de la función se halla en 555 nm y ésta se anula para valores inferiores a 380 nm y superiores a 780 nm [120].

La función de luminosidad presenta su valor máximo para una longitud de onda de 555 nm, lo que la define como la longitud para la cual el ojo presenta mayor sensibilidad. Asimismo, la función se anula para longitudes de onda inferiores a 380 nm y mayores de 780 nm, lo que establece que esos rangos de longitudes de onda no son percibidos en visión humana.

De este modo para cualquier cantidad radiométrica, C_r , puede computarse su análogo fotométrico C_f , mediante la siguiente expresión:

$$C_f = 683 \int_0^{\infty} C_r V(\lambda) d\lambda = 683 \int_{380}^{780} C_r V(\lambda) d\lambda, \quad (\text{A.8})$$

donde λ viene expresada en nm. El término 683 tienen en cuenta la conversión entre la unidad de potencia radiométrica (Watt) y la unidad de potencia fotométrica (lumen). De

este modo, un flujo radiante de 1 W de luz monocromática de una longitud de onda de 555 nm, tiene asociado 1 lm.

Finalmente, presentamos una tabla donde mostramos las magnitudes radiométricas presentadas y sus equivalentes fotométricos.

Cantidad radiométrica	Unidades	Cantidad fotométrica	Unidades
Flujo radiante	W	Flujo luminoso	lm (lumen)
Intensidad radiante	$W \cdot sr^{-1}$	Intensidad lumínica	$lm \cdot sr^{-1}=cd$ (candela)
Irradiancia	$W \cdot m^{-2}$	Iluminancia	$lm \cdot m^{-2}=lx$ (lux)
Radiancia	$W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$	Luminancia	$lm \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}=cd \cdot m^{-2}$

Tabla A.1 Magnitudes radiométricas y sus equivalentes fotométricos

Apéndice B

Al igual que hemos mencionado en el apéndice anterior, la bibliografía que trata sobre la ley de la reflexión es sumamente extensa, como muestra podemos citar [121-123], y en este apéndice simplemente reflejamos, por comodidad del lector, la deducción en su expresión vectorial ya que nos ha sido de gran utilidad en la presente tesis doctoral. Así presentamos la ley de Snell en su versión vectorial (3D) deducida a partir de la versión 2D ecuación (B.1).

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \quad (\text{B.1})$$

donde n_1 es el índice de refracción del primer material, θ_1 es el ángulo que forma el rayo de luz incidente con la normal de la superficie en el lugar de incidencia, n_2 es el índice de refracción del segundo material y θ_2 es el ángulo que forma el rayo de luz refractado con la normal de la superficie en el lugar de incidencia, Figura B1.

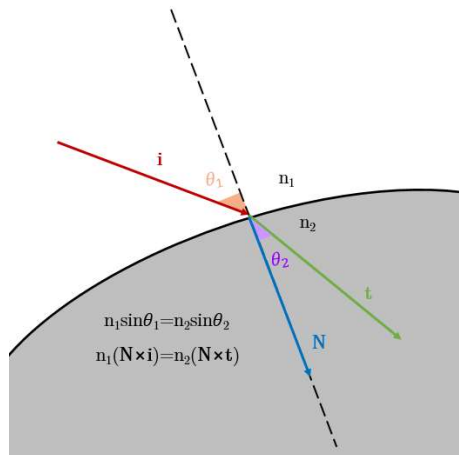


Figura B.1 Representación gráfica de la ley de Snell. Un rayo cuyo vector director es \vec{i} incide en un punto sobre una superficie donde el vector normal a ésta es, \vec{N} , que apunta del material con índice de refracción n_1 al material con índice de refracción n_2 . θ_1 y θ_2 son los ángulos que forman \vec{i} y \vec{t} respectivamente con \vec{N} .

Los términos $\sin \theta_1$ y $\sin \theta_2$ pueden substituirse por el producto vectorial del vector director del rayo incidente, \vec{i} , y del rayo refractado transmitido, \vec{t} , respectivamente, por el

vector normal en el punto de incidencia, \vec{N} , que apunta hacia el segundo material. Si consideramos que todos los rayos son unitarios:

$$n_1(\vec{N} \times \vec{i}) = n_2(\vec{N} \times \vec{t}). \quad (\text{B.2})$$

Con el objetivo de obtener la expresión del vector \vec{t} , expresamos los vectores \vec{i} y \vec{t} en una base ortogonal usando el vector \vec{N} [124]:

$$\vec{i} = (\vec{N} \cdot \vec{i})\vec{N} + (\vec{N} \times \vec{i}) \times \vec{N}, \quad (\text{B.3})$$

$$\vec{t} = (\vec{N} \cdot \vec{t})\vec{N} + (\vec{N} \times \vec{t}) \times \vec{N}, \quad (\text{B.4})$$

la Figura B.2 muestra gráficamente el uso de esta base con un vector arbitrario, \vec{r} :

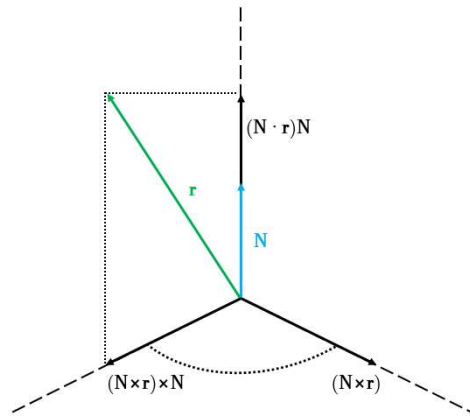


Figura B.2 Creación de una base ortogonal tridimensional a partir de los vectores \vec{r} y \vec{N} .

A partir de la expresión (B.2) y (B.4), obtenemos:

$$\vec{t} = (\vec{N} \cdot \vec{t})\vec{N} + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)(\vec{N} \times \vec{i}) \times \vec{N}. \quad (\text{B.5})$$

A continuación, computamos el módulo de la ecuación B.5, considerando que $(\vec{N} \cdot \vec{t})\vec{N}$ es perpendicular a $(\vec{N} \times \vec{i}) \times \vec{N}$:

$$1 = (\vec{N} \cdot \vec{t})^2 + \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \|(\vec{N} \times \vec{i})\|^2, \quad (\text{B.6})$$

aislamos, $(\vec{N} \cdot \vec{t})$ y tomamos el valor positivo de la raíz cuadrada, ya que el ángulo que forman se encuentra entre 0° y 90° :

$$(\vec{N} \cdot \vec{t}) = \left(1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \|\vec{N} \times \vec{t}\|^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.7})$$

Finalmente, combinamos (B.4) y (B.7):

$$\vec{t} = \left(1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \|\vec{N} \times \vec{t}\|^2\right)^{\frac{1}{2}} \vec{N} + \left(\frac{n_1}{n_2}\right) (\vec{N} \times \vec{t}) \times \vec{N} \quad (\text{B.8})$$

Bibliografía

- [1]https://www.ledinside.com/knowledge/2008/7/led_packaging_technology_20_080702. *A Brief Discussion on LED Packaging Technology*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [2]<http://www.electronicshobby.com/important-sectors/the-led-packaging-technology-aims-at-tenth-of-present-cost/>. LED packaging technology can cut cost drastically. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [3]<http://www.camnano.com/markets/led-substrates/>. LED module substrates. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [4]<http://www.radio-electronics.com/info/data/semicond/leds-light-emitting-diodes/led-configurations-packages-smt.php>. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [5]<http://www.lighting.philips.com/main/support/support/faqs/technicalfaqs/LED-chip-packages>. *What are the various types of LED chip packages available in the market?* [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [6]<https://www.vehicode.com/blog/what-are-the-various-types-of-led-chip-packages-available-in-the-market.html>. *What are the types of LED chip packages in the market?* [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [7]https://www.yujiintl.com/posts/view/understanding_led_components_led_packages. *Understanding LED components - LED Packages*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [8]<https://global.kyocera.com/prdct/semicon/semi/compo/led.html>. *LED Packages*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [9]<http://gc-lighting.com/led-education/why-led/>. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [10]MILLS, Alan. Advances in LED packaging. *III-Vs Review*, 2004, 17.9: 16.
- [11]<https://www.forbes.com/sites/greatspeculations/2013/06/11/ge-lighting-sees-brighter-future-with-led-growth/#4cf9a5d92422>. *GE Lighting Sees Brighter Future With LED Growth*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [12]<https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-led-lighting-market>. *LED Lighting Market Size Worth \$108.99 Billion By 2025 | CAGR 14.4%*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].

- [13]http://www.semiconductortoday.com/news_items/2018/sep/ledinside_250918.shtml. *Micro-LED and mini-LED market to rise to \$1.38bn by 2022*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [14]LIU, Sheng; LUO, Xiaobing. *LED packaging for lighting applications: design, manufacturing, and testing*. John Wiley & Sons, 2011.
- [15]http://www.innovdaysplasturgie.com/innovdays/Illustrations/Documents/InnovDays/2013/20131212_microsystemes_sur_plastique/1-PHILIPS-12dec2013.pdf. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [16]https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1266595. *LED industry enters third growth cycle*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [17]https://www.ledinside.com/knowledge/2009/7/LED_Encapsulation_Process_200907. *LED Encapsulation Process*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [18]https://www.photonics.com/a32565/A_Simpler_Fabrication_Technique_for_LEDs. *A Simpler Fabrication Technique for LEDs*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [19]<https://www.electrolube.com/products/polyurethane-epoxy-resins.html>. *Encapsulation Resins*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [20] <http://www.epicresins.com/LEDEncapsulants>. *LIGHT EMITTING DIODE (LED) POTTING APPLICATIONS AND LED ENCAPSULANTS*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [21]http://www.ciencia.gob.es/stfls/MICINN/Ayudas/PE_2013_2016/PE_IDi_Orientada_a_los_Retos_de_la_Sociedad/FICHEROS/Retos_Colaboracion/Publicacion_RTC_2015_PRP.pdf. INFORMACIÓN SOBRE LA PUBLICACIÓN DE LA PROPUESTA DE RESOLUCIÓN PROVISIONAL DE LA CONVOCATORIA RETOS-COLABORACIÓN 2015. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [22]<https://cordis.europa.eu/project/rcn/218169/factsheet/en>. *Flexible Optical Injection Moulding of optoelectronic devices*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [23]<https://web.archive.org/web/20090505080533/http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/comparing.html>, *Solid-State Lighting: Comparing LEDs to Traditional Light Sources*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [24]https://web.archive.org/web/20090205040334/http://www.dialight.com/Assets/Brochures_And_Catalogs/Indication/MDEI5980603.pdf, *Dialight Micro LED SMD LED "598 SERIES" Datasheet*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].

- [25]<https://web.archive.org/web/20090410145015/http://www1.eere.energy.gov/buildings/ssl/lifetime.html>, *Using Light-Emitting Diodes: Lifetime of White LEDs*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [26]https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/lifetime_white_leds_aug16_r1.pdf. *Lifetime of White LEDs*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [27]<https://www.ledsmagazine.com/articles/2010/01/led-advantages-outweigh-potential-snow-hazards-in-traffic-signals.html>, *LED advantages outweigh potential snow hazards in traffic signals*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [28]<https://www.energy.gov/eere/ssl/l-prize-competition>. *L Prize Competition*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [29]<https://www.nytimes.com/2007/06/24/business/yourmoney/24novel.html>. *In Pursuit of Perfect TV Color, With L.E.D.'s and Lasers*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [30]http://ntv.ifmo.ru/en/article/11192/chastotnye_harakteristiki_sovremennyh_svetodiodnyh_lyuminoformnyh_materialov.htm. *FREQUENCY CHARACTERISTICS OF MODERN LED PHOSPHOR MATERIALS*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [31]WOLFE, William L. *Introduction to radiometry*. SPIE Press, 1998.
- [32]MCCLUNEY, William Ross. *Introduction to radiometry and photometry*. Artech House, 2014.
- [33]PALMER, James M.; GRANT, Barbara Geri. *The art of radiometry*. Bellingham: SPIE Press, 2010.
- [34]STAMM, Robert F.; GARCIA, Mario L.; FUCHS, Judith J. *The optical properties of human hair I. Fundamental considerations and goniophotometer curves*. *J. Soc. Cosmet. Chem*, 1977, 28.9: 571.
- [35]APIAN-BENNEWITZ, Peter; VON DER HARDT, Jochen. Enhancing and calibrating a goniophotometer. *Solar energy materials and solar cells*, 1998, 54.1-4: 309-322.
- [36]ANDERSEN, Marilyne. *Innovative bidirectional video-goniophotometer for advanced fenestration systems*. EPFL, 2004.
- [37]ANDERSEN, Marilyne; DE BOER, Jan. *Goniophotometry and assessment of bidirectional photometric properties of complex fenestration systems*. *Energy and buildings*, 2006, 38.7: 836-848.
- [38]LINDEMANN, Matthias; MAASS, Robert. Photometry and colorimetry of reference LEDs by using a compact goniophotometer. *Mapan*, 2009, 24.3: 143.

- [39]APIAN-BENNEWITZ, Peter. New scanning gonio-photometer for extended BRDF measurements. In: *Reflection, Scattering, and Diffraction from Surfaces II*. International Society for Optics and Photonics, 2010. p. 779200.
- [40]ROOSJEN, Peter PJ, et al. A laboratory goniometer system for measuring reflectance and emittance anisotropy. *Sensors*, 2012, 12.12: 17358-17371.
- [41]*Measurement of Absolute Luminous Intensity Distributions*, CIE Publication 70, 1987.
- [42]<http://www.optronik.de/en/products/goniophotometers/goniometer-types-abc/>. *The goniometer types A / B / C*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [43]*Measurement of Luminous Flux*, CIE Publication 70, 1989.
- [44]ARRANZ, María Jesús, et al. Measurement of the photometric distribution of light sources by deflectometric techniques. In: *Emerging Technologies and Factory Automation, 2001. Proceedings. 2001 8th IEEE International Conference on*. IEEE, 2001. p. 695-698.
- [45]ROYO, Santiago, et al. NICOLAU: compact unit for photometric characterization of automotive lighting from near-field measurements. In: *Photonics in the Automobile*. International Society for Optics and Photonics, 2005. p. 76-86.
- [46]MOECK, Martin; ANAOKAR, Smita. Illuminance analysis from high dynamic range images. *Leukos*, 2006, 2.3: 211-228.
- [47]WIENOLD, Jan; CHRISTOFFERSEN, Jens. Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. *Energy and buildings*, 2006, 38.7: 743-757.
- [48]WÜLLER, Dietmar; GABELE, Helke. The usage of digital cameras as luminance meters. In: *Digital Photography III*. International Society for Optics and Photonics, 2007. p. 65020U.
- [49]MEYER, Jason E., et al. *Development and validation of a luminance Camera*. Virginia Tech. Virginia Tech Transportation Institute, 2009.
- [50]BEVILACQUA, Alessandro; GHERARDI, Alessandro; CAROZZA, Ludovico. An automatic system for the real-time characterization of vehicle headlamp beams exploiting image analysis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59.10: 2630-2638.
- [51]BELLIA, Laura; MUSTO, Marilena; SPADA, Gennaro. Illuminance measurements through HDR imaging photometry in scholastic environment. *Energy and buildings*, 2011, 43.10: 2843-2849.
- [52]HISCOCKS, Peter D.; ENG, P. Measuring luminance with a digital camera. *Syscomp electronic design limited*, 2011, 16.

- [53]KONTAXIS, P. A., et al. Applications of CCD sensors in photometry and in daylight responsive systems. *Balkan Light 2012*, 2012, 331-338.
- [54]BELLIA, L.; SPADA, G. Photometric characterisation of small sources with high dynamic range illuminance mapping. *Lighting Research & Technology*, 2014, 46.3: 329-340.
- [55]TYUKHOVA, Yulia; WATERS, Clarence. An assessment of high dynamic range luminance measurements with LED lighting. *Leukos*, 2014, 10.2: 87-99.
- [56]FRYC, Irena; DIMITROVA-GREKOW, Teodora. An automated system for evaluation of the quality of light sources. In: *Lighting Conference of the Visegrad Countries (Lumen)*, IEEE. IEEE, 2016. p. 1-4.
- [57]GBOLOGAH, Franklin E., et al. Calibration of a digital camera for rapid auditing of in situ intersection illumination. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2017, 2617: 35-43.
- [58]FERNANDEZ-BALBUENA, A. A., et al. Real time 3D photometry. In: *Nonimaging Optics: Efficient Design for Illumination and Solar Concentration XIV*. International Society for Optics and Photonics, 2017. p. 103790W
- [59]BLANCO, P., et al. Efficient LED spatial measurement to improve optical modeling. In: *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V*. International Society for Optics and Photonics, 2007. p. 661648.
- [60]JOO, Jae Young, et al. LED beam shaping lens based on the near-field illumination. *Optics Express*, 2009, 17.26: 23449-23458.
- [61]RYKOWSKI, Ronald. Spectral ray tracing from near field goniophotometer measurements. *Light and Engineering*, 2011, 19.1: 23.
- [62]LINDEMANN, M.; MAASS, R.; SAUTER, G. Robot goniophotometry at PTB. *Metrologia*, 2015, 52.2: 167.
- [63]JACOBS, V., et al. Near-field and far-field goniophotometry of narrow-beam LED arrays. *Lighting Research & Technology*, 2015, 47.4: 470-482.
- [64]SCHMÄHLING, Franko, et al. Virtual experiment for near-field goniophotometric measurements. *Applied optics*, 2014, 53.7: 1481-1487.
- [65]JACOBS, Valéry A., et al. Near-field and far-field goniophotometry of focused LED arrays. In: *Optical Modelling and Design III*. International Society for Optics and Photonics, 2014. p. 913104.
- [66]HSIEH, Chi-Chang; LI, Yan-Huei; HUNG, Chih-Ching. Modular design of the LED vehicle projector headlamp system. *Applied optics*, 2013, 52.21: 5221-5229.

- [67]GE, Peng, et al. LED high-beam headlamp based on free-form microlenses. *Applied optics*, 2014, 53.24: 5570-5575.
- [68]ZHU, Jun, et al. Generating optical freeform surfaces considering both coordinates and normals of discrete data points. *JOSA A*, 2014, 31.11: 2401-2408.
- [69] TSAI, Chung-Yu. Design of free-form reflector for vehicle LED low-beam headlamp. *Optics Communications*, 2016, 372: 1-13.
- [70] *Reglamento no 113 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE). Prescripciones uniformes relativas a la homologación de los faros de vehículos de motor que emiten un haz de cruce simétrico o un haz de carretera, o ambos, y están equipados con fuentes luminosas de incandescencia o de descarga de gas o con módulos LED*, Diario Oficial de la Unión Europea, 2014
- [71]CATTOEN, Michel, et al. Compact system for photometric characterization of automotive headlamps. In: *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2005. IMTC 2005. Proceedings of the IEEE*. IEEE, 2005. p. 1669-1674.
- [72]ROYO, Santiago, et al. Compact low-cost unit for photometric testing of automotive headlamps. *Optical Engineering*, 2006, 45.6: 063602.
- [73]WU, Hsien-Huang P.; LEE, Yi-Ping; CHANG, Shih-Hsin. Fast measurement of automotive headlamps based on high dynamic range imaging. *Applied optics*, 2012, 51.28: 6870-6880.
- [74]WU, Hsien-Huang P.; LEE, Yi-Ping; CHANG, Shih-Hsin. Fast measurement of automotive headlamps based on high dynamic range imaging. *Applied optics*, 2012, 51.28: 6870-6880.
- [75]LIN, Yandan, et al. An Automatic Evaluation System for the Photometric Performance of Vehicle Headlamps Using Image Processing Algorithms. In: *International Conference on Mechatronics, Control and Electronic Engineering (MCE-14)*. Atlantis Press. 2014.
- [76]AYAS, MUSTAFA ŞİNASİ; ALTAŞ, İSMAİL HAKKI; ALCELIK, Turhan. Fast measurement of headlamps by means of a developed fuzzy luxmeter based on a fuzzy mapping algorithm. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 2016, 24.4: 2627-2637.
- [77]<https://www.besi.com/products-technology/product-details/product/fico-ams-w/#tabs-97>. *Fico AMS-W*. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [78]<https://www.averna.com/en/home/>. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [79]<https://www.pruftechnik.com/>. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [80]<https://www.maximintegrated.com/en.html>. [Visitado por última vez: 13/12/2018].

- [81]<https://atesolutions.co.uk/>. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [82]<http://www.chromaate.com/>. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [83]<https://atesolutions.co.uk/fully-automated-in-line-test-system-for-led-light-engines/>. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [84]<https://www.chromaus.com/datasheet/58158-SC.pdf>. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [85]PRIDDY, Randolph W. Dynamic energy centroid locator and processor (declp). U.S. Patent No 4,600,305, 1986.
- [86]<https://www.labsphere.com/>. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [87]<https://www.technoteam.de/>. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [88]<http://www.everfine.net/en/about.php>. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [89]<http://www.instrumentsystems.com/>. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [90]<https://www.intl-lighttech.com/>. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [91]<http://www.wphotronics.com/>. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [92]https://www.technoteam.de/produktuebersicht/goniophotometer/produkte/rigo801____600/index_ger.html. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [93]<https://www.labsphere.com/labsphere-products-solutions/light-metrology/goniophotometers/type-c-moving-mirror/>. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [94]<http://www.instrumentsystems.com/products/imaging-photometers-and-colorimeters/346/>. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [95]http://www.wphotronics.com/product_cm80.php. [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [96]BINDER, Ulrich, et al. Goniophotometer. U.S. Patent No 7,256,880, 2007.
- [97]PAN, Jian-gen. Goniophotometer. U.S. Patent No 7,800,745, 2010.
- [98]PAN, Jian-gen. Goniophotometer. U.S. Patent No 7,800,745, 2010.
- [99]KUO, Hung-Pin. Optical measurement system. U.S. Patent No 8,564,765, 2013.
- [100]KUO, Hung-Pin. Goniophotometer for measuring 3D light intensity distribution of light source. U.S. Patent No 8,520,198, 2013

- [101]HEIJ, Christiaan, et al. *Econometric methods with applications in business and economics*. Oxford University Press, 2004.
- [102]http://eeweb.poly.edu/iselesni/lecture_notes/least_squares/least_squares_SP.pdf
[Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [103]FUSCO, T., et al. Optimization of center of gravity algorithms in a shack-hartmann sensor. In: *Advances in Adaptive Optics II*. International Society for Optics and Photonics, 2006. p. 627219.
- [104]DOANE, David P.; SEWARD, Lori E. Measuring skewness: a forgotten statistic? *Journal of Statistics Education*, 2011, 19.2.
- [105]<https://www.alliedvision.com/en/products/cameras/detail/Guppy%20PRO/F-503/action/pdf.html> [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [106]<https://www.edmundoptics.com/p/125mm-diameter-x-33mm-thickness-uncoated-borofloatreg-window/2770/> [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [107]<http://multimedia.3m.com/mws/media/823536O/3m-diffuser-film-3635-30-3635-70.pdf> [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [108]Información enviada, via correo electrónico por EdmundOptics.
- [109]<https://www.edmundoptics.com/p/30mm-side-drive-thru-hole-05-travel-metric-micrometer/20916/> [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [110]<https://www.edmundoptics.com/p/75mm-dia-4mm-thick-vis-nir-coated-lambda4-n-bk7-window/27464/> [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [111]<http://www.phoenixelectroforms.com/PA1%20SERIES1.pdf> [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [112]<https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/imaging/distortion/>
[Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [113]http://www.uvprocess.com/Data%20Sheets/radiometers_il1400_and_il1700/DSO-RADIOMTR%20G_IL1700.pdf [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [114]<https://www.zemax.com/> [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [115]http://www.opt-ron.com/images/SR65-1T001_Rev2.1_2013_0621.pdf [Visitado por última vez: 13/12/2018].
- [116]<https://www.lumileds.com/uploads/28/DS64-pdf> [Visitado por última vez: 13/12/2018].

- [117]MCCLUNEY, William Ross. *Introduction to radiometry and photometry*. Artech House, 2014.
- [118]WOLFE, William L. *Introduction to radiometry*. SPIE Press, 1998.
- [119]DECUSATIS, Casimer (ed.). *Handbook of applied photometry*. American Inst. of Physics, 1997.
- [120]COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. CIE Proceedings 1924. 1926.
- [121]PELÁEZ, Justiniano Casas. *Óptica*. Universidad de Zaragoza, Cátedra de Optica, 1980.
- [122]PEDRO, Mejias Arias, et al. *Optica geometrica*. 2000.
- [123]SMITH, Warren J. *Modern optical engineering*. Tata McGraw-Hill Education, 1966.
- [124]QUINTANA, Joan Costa; AGUILAR, Fernando López. *Interacción electromagnética. Teoría clásica*. Reverté, 2007.

