



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



**Máster Universitario**  
en Tecnologías, Sistemas y  
Redes de Comunicaciones

# Sistemas de focalización óptica para comunicaciones ópticas de espacio libre (FSO)

*Autor:* Juan Andrés Apolo Gonzaga.

*Directora:* Beatriz Ortega Tamarit.

*Fecha de comienzo:* 25/05/20.

**Lugar de trabajo:** Photonics Research Labs (Instituto de  
Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia).

*Objetivos*— El objetivo general de este trabajo es analizar los diferentes sistemas de focalización óptica en aplicaciones VLC. Concretamente: i) se plantea el diseño de colimadores ópticos para LD's y LED's en el espectro visible; ii) mejorar el rendimiento de sistemas VLC mediante el diseño de sistemas ópticos que permitan disminuir las pérdidas y maximizar la potencia; y iii) analizar y comparar diferentes lentes comerciales con el fin de cumplir los objetivos anteriores en función de características específicas de un sistema VLC.

*Metodología*—Con el fin de cumplir con los objetivos planteados se realiza una recopilación y análisis de publicaciones relacionadas a sistemas de focalización en VLC. El análisis se centra en el uso de sistemas de focalización óptica para mejorar la potencia recibida. A continuación, se plantea una base matemática para el diseño y análisis de concentradores ópticos utilizando óptica geométrica. Al mismo tiempo se utiliza un complejo simulador comercial tanto para la validación de los fundamentos geométricos como para extender los resultados y el análisis que pudieran verse limitados si se utilizara solo óptica geométrica. Finalmente se describen las ventajas y desventajas de sistemas de focalización utilizando diferentes lentes comerciales en función de características específicas de un sistema VLC.

*Resultados*—Se presentan y analizan diferentes propuestas de uso de sistemas de focalización en sistemas VLC. Concretamente se analiza el uso de lentes de imágenes como colimadores y antenas ópticas para mejorar la SNR en un sistema de colimación utilizando LD's y LED's como fuentes ópticas. Se propone el uso de lentes esféricas como lentes colimadoras en sistemas VLC para mejorar la distancia de haz colimado. Se describen las principales ventajas e inconvenientes del uso de lentes de imagen en función de su geometría para sistemas LOS utilizando LED's como fuente óptica. Este trabajo pretende ser una base para la correcta elección de sistemas de focalización en aplicaciones VLC reales.

*Líneas futuras*— Este trabajo se desarrolla en el marco del proyecto de investigación RTI2018-101658-B-I00 FOCAL titulado “Redes Ópticas Híbridas Energéticamente Eficientes para Comunicaciones e Iluminación en Interiores”. Las fuentes ópticas propuestas en este trabajo son algunas de las fuentes ópticas adquiridas para el desarrollo del proyecto por lo que en una primera etapa experimental se pretende realizar medidas de potencia y de throughput en señales moduladas utilizando esquemas M-QAM. Comprobando así la mejora en el rendimiento de un sistema VLC real con el uso de las lentes propuestas.

*Publicaciones* — De los resultados obtenidos en este trabajo junto a medidas experimentales de laboratorio se pretende la elaboración de un paper que será presentado en el congreso ‘*Spie Optics & Optoelectronics*’ a desarrollarse en Praga en 2021.

*Abstract* — Visible light communication technology (VLC) is emerging as an alternative to RF communications especially for wireless communications in indoor environments. VLC is an emerging technology that uses light in the spectrum from 380nm to 750nm instead of radio frequency signals for data transmission. The use of imaging lenses as collimators and optical antennas to improve the SNR in VLC systems is analyzed using LD's and LED's as optical sources. Firstly, a design of spherical lens is proposed to collimate a light source of gaussian angular distribution using geometric methods. At the same time, ZEMAX commercial simulator is used both for the validation of the geometric fundamentals and to extend the results and the analysis that could be limited if only geometric optics were used. The use of aspherical lenses is also

proposed to improve the performance of the VLC system. The results show that the use of aspherical lenses as a collimating lens reduces the divergence angles of the beam improving collimation distances. Finally, the advantages and disadvantages of different commercial lenses on non-directed LOS and directed LOS links using an LED as an optical source are described.

Autor: Apolo Gonzaga, Juan Andrés email: [juaapgon@teleco.upv.es](mailto:juaapgon@teleco.upv.es)

Directora: Ortega Tamarit, Beatriz email: [bortega@dcom.upv.es](mailto:bortega@dcom.upv.es)

Fecha de entrega: 25-08-202

**Índice**

1	Introducción, objetivos y estructura.....	3
2	Estado del arte de los sistemas VLC.....	4
2.1	Fibra óptica de polímero ( <i>Polymer Optical Fibre</i> , POF).....	4
2.1.1	Estructura y materiales de las POF.....	5
2.1.2	Máxima capacidad de las POF.....	7
2.1.3	Acoplamiento.....	8
2.1.4	Transmisión de alta velocidad en enlaces basados en POF.....	9
2.1.5	Enlaces VLC utilizando POF.....	10
2.2	Enlaces ópticos inalámbricos mediante haz.....	11
2.2.1	Fuentes ópticas: Diodos laser.....	11
2.2.2	Enlaces VLC.....	12
2.3	Enlaces ópticos inalámbricos dispersos.....	13
2.3.1	Detección en sistemas VLC de haz disperso.....	14
2.3.2	Concentrador Parabólico Compuesto ( <i>Compound Parabolic Concentrator</i> , CPC).....	16
3	Fundamentos de Óptica geométrica.....	16
3.1	Colimación.....	17
3.2	Número F ( <i>F number</i> , F#) y Apertura numérica de una lente.....	17
3.3	Lentes esféricas.....	18
3.3.1	Trazado de rayos a través de lentes gruesos.....	18
3.3.2	Ecuaciones de refracción.....	18
3.3.3	Ecuación de traslación.....	19
3.3.4	Aproximación paraxial.....	20
3.3.5	Longitud focal.....	21
3.3.6	Campo de vision angular ( <i>Angular Field of View</i> , AFoV ).....	21
3.4	Lentes Asféricas.....	22
3.5	Zemax OpticStudio®.....	23
4	Lentes comerciales.....	23
4.1	Materiales.....	23
4.2	Revestimientos ópticos.....	25
5	Diseño de colimadores ad-hoc.....	25
5.1	Sistema VLC punto-punto (PtP) utilizando un LD como fuente óptica.....	26
5.1.1	Elección de una lente de colimación para un diodo láser particular.....	26
5.1.2	Sistema de lentes asféricas.....	30
5.1.3	Análisis y comparación de las lentes propuestas.....	31
5.2	Sistema VLC <i>directed</i> - LOS utilizando un LED como fuente óptica.....	32

---

5.2.1	Comparación de lentes en un sistema VLC <i>directed</i> LOS. ....	34
5.3	Enlace VLC <i>non-directed</i> LOS utilizando un LED como fuente óptica. ....	36
5.3.1	Comparación de lentes en un sistema <i>non-directed</i> LOS utilizando un LED como fuente óptica. ....	37
6	Conclusiones y líneas futuras. ....	40
7	Bibliografía.....	41
A.	ANEXOS .....	44
A.3	Familia de lentes comerciales de Thorlabs. ....	44
A.2.	Características de los principales materiales ópticos utilizados en lentes comerciales.....	46
A3.	Diseño de una lente colimadora utilizando óptica geométrica. ....	47

## 1 Introducción, objetivos y estructura.

Desde su aparición hace más de tres décadas, las tecnologías móviles inalámbricas han evolucionado hasta convertirse en una utilidad similar al agua y la electricidad. Debido al creciente número de usuarios, el despliegue de tecnologías como Internet de las cosas (IoT) y el consumo de servicios de alta calidad, en especial servicios de *streaming*, la demanda de la capacidad de datos está creciendo exponencialmente. Se espera que para 2022 el tráfico IP sea mayor que todo el tráfico creado en los 32 años desde el comienzo de Internet hasta 2016. En donde se estima que el 60% de la población mundial será usuario de Internet y el video represente el 82% de todo el tráfico IP [1], ver Fig. 1.1.a La Fig. 1.1. b muestra la tendencia en el número promedio de dispositivos y tráfico por hogar. Cada año un número creciente de aplicaciones M2M, como medidores inteligentes, videovigilancia, dispositivos médicos, etc., contribuyen de manera importante al crecimiento de dispositivos, conexiones y tráfico IP. Cisco prevé que para 2023, las conexiones M2M representen el 50% del total de dispositivos y conexiones.

Para afrontar los desafíos planteados por este crecimiento de datos, han surgido importantes avances en tecnologías de radiofrecuencia (RF); sin embargo, el espectro de RF disponible se está congestionando rápidamente.

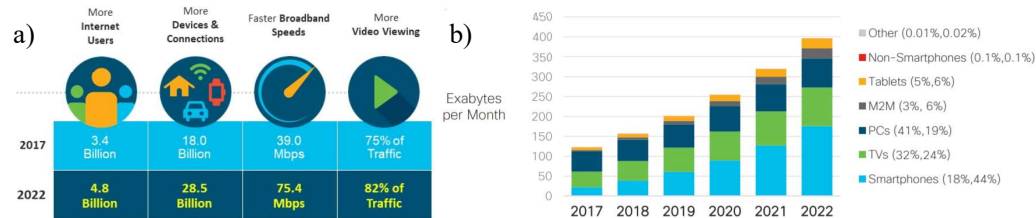


Fig. 1.1. a) Crecimiento y tendencias globales de Internet; b) Crecimiento global de dispositivos/conexiones por tipo [1].

La tecnología de comunicación de luz visible (*visible light communications*, VLC) está surgiendo como una alternativa a las comunicaciones de RF sobre todo para comunicaciones inalámbricas en ambientes interiores. VLC es una tecnología emergente que utiliza luz en el espectro de 380 nm a 750 nm en lugar de señales de radiofrecuencia para la transmisión de datos [2]. Algunas de las principales ventajas de VLC son: i) el espectro electromagnético no están regulado ni licenciado; ii) proporciona iluminación de bajo consumo y comunicaciones de alta velocidad simultáneamente; iii) inmunidad a interferencias electromagnéticas; y, iv) las comunicaciones tienen un alto grado de seguridad [3]. Además, el uso de frecuencias ópticas permite un espectro más amplio en muchos órdenes de magnitud, un alto grado de multiplexación espacial y la posibilidad de comunicarse a una velocidad de datos más alta [2].

En la actualidad, VLC está destinado principalmente a aplicaciones de corto alcance en interiores, conocido como enlaces de última milla. Comúnmente se utilizan diodos emisores de luz (*light-emitting diode*, LED) como fuente óptica en este tipo de comunicaciones [4]. La capacidad de transmisión está determinada por el ancho de banda (AB) del canal y la relación señal a ruido (SNR, por sus siglas en inglés), sin embargo, el principal problema en este tipo de sistemas, es el ancho de banda de modulación de un LED; alrededor de 3 MHz para un LED de fósforo blanco [5] y más de 20 MHz para un LED RGB (rojo, verde y azul) [6]. No obstante, este ancho de banda no es suficiente para lograr un alto régimen binario en enlaces típicos de unos pocos metros, por lo que lograr una alta relación señal a ruido es particularmente importante en VLC.

Se han propuesto varias técnicas para mitigar estas limitaciones de bajo ancho de banda de modulación del LED, y así aumentar las tasas de transmisión de datos en sistemas VLC. Por ejemplo, la implementación de técnicas MIMO [7]; esquemas de modulación multiportadora, como multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) y modulación de amplitud y fase sin

portadora (CAP) [8], [9]; esquemas de ecualización [10]; el uso de  $\mu$ LED's, que combinado con una modulación OFDM, puede alcanzar velocidades de 3 Gb/s como se ha demostrado en [11].

Otro candidato potencial como fuente óptica en sistemas VLC es el diodo laser (*laser diode*, LD) en el espectro visible. En comparación con los LED's, los LD proporcionan mayor eficiencia, mayor rango de iluminación y mayor velocidad de modulación [12]. Se ha demostrado que a pesar de que los LD son fuentes de luz cuyo ancho de línea es estrecho; el uso de múltiples LD de diferentes longitudes de onda pueden reproducir luz blanca. Por lo tanto, el uso de LD para iluminación de estado sólido y transmisión de datos en sistemas VLC podría convertirse en una realidad [13].

El uso de lentes colimadoras como antenas ópticas puede resultar especialmente interesante en aplicaciones VLC punto a punto para garantizar una alta SNR y lograr un mayor alcance de la señal transmitida. Por ejemplo en [14] se utiliza un LED de 1W de potencia como fuente óptica primaria y una lente colimadora para lograr una velocidad de transmisión de datos de 210 Mbit/s con un BER de  $10e-3$  en 90 m. Además, se ha demostrado que se pueden lograr mejoras significativas en las velocidades de transmisión en sistemas VLC reemplazando los LED con LD junto con el uso de lentes de imágenes en recepción en lugar de receptores con un campo de visión (*field of view*, FOV) amplio [15].

En principio, se puede obtener una señal de recepción alta con la recolección de una gran cantidad de luz en el receptor. Esto puede lograrse de dos formas; i) aumentar el área del fotodetector lo que normalmente limitaría el ancho de banda y aumentaría su costo; y, ii) iluminar el fotodetector utilizando un elemento óptico, como una lente o un reflector parabólico compuesto (*compound parabolic reflector*, CPC) [16].

El objetivo general de este trabajo es analizar los diferentes sistemas de focalización óptica en aplicaciones VLC. Concretamente: i) se plantea el diseño de colimadores ópticos para LD's y LED's en el espectro visible; ii) mejorar el rendimiento de sistemas VLC mediante el diseño de sistemas ópticos que permitan disminuir las pérdidas y maximizar la potencia; y iii) analizar y comparar diferentes lentes comerciales con el fin de cumplir los objetivos anteriores en función de características específicas de un sistema VLC.

El documento se divide en seis capítulos, incluida esta introducción. El capítulo dos presenta una base teórica de los principales conceptos y elementos de sistemas VLC. El capítulo tres contiene una descripción general de conceptos de óptica geométrica necesarios para el diseño de lentes de imagen. El capítulo cuatro presenta una revisión de materiales y características de lentes de imagen disponibles comercialmente. El capítulo cinco se centra en el diseño de lentes para diferentes aplicaciones en sistemas VLC, también incluye un resumen de los escenarios de simulación que se utilizaron y, finalmente, el último capítulo contiene las conclusiones de la investigación con alguna indicación para un posible trabajo futuro.

## **2 Estado del arte de los sistemas VLC.**

En este capítulo se describen las características de los distintos componentes de sistemas VLC en redes domésticas e incluye una revisión bibliográfica del estado actual de la fibra óptica de polímero para comunicaciones cableadas en sistemas VLC.

### **2.1 Fibra óptica de polímero (*Polymer Optical Fibre*, POF).**

En las redes de telecomunicaciones domésticas (también llamadas Edge Networks), la demanda de comunicaciones más rápidas está creciendo y continuará haciéndolo en el futuro. Estas redes tradicionalmente son heterogéneas, es decir, coexiste una combinación de varias tecnologías cableadas e inalámbricas. Cada una diseñada para un propósito específico: redes de par trenzado de

cobre para telefonía y fax, cable coaxial para servicios de TV, video y radio, cableado Ethernet para PC, servidores, impresoras, etc., tecnología WIFI para laptops, dispositivos móviles, sensores IoT, entre otros. La Fig. 2.1 muestra el estado de la penetración de las distintas tecnologías de banda ancha fija hasta el año 2019 y predice su comportamiento hasta el año 2027 en Latinoamérica. Al combinar la entrega de todos estos servicios en una sola red, se puede obtener beneficios económicos, de rendimiento e interoperabilidad [17]. Es por esto, que en los últimos años se ha prestado especial atención a la fibra óptica de polímero.

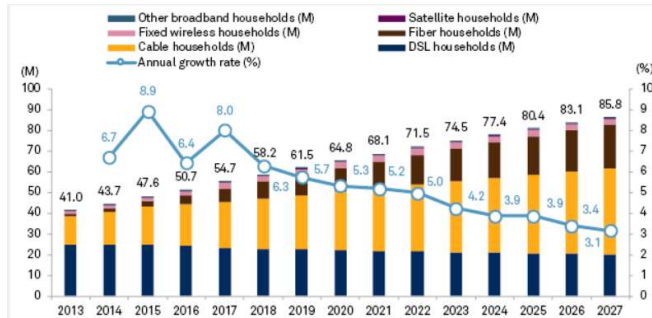


Fig. 2.1 Suscriptores de banda ancha fija por plataforma en Latinoamérica [18].

La facilidad de instalación, uso de fuentes de luz visible de baja potencia, inmunidad a interferencias electromagnética y resistencia al agua convierten a la fibra de polímero en una opción para integrar todos estos servicios en redes domésticas de corto alcance. A diferencia de la fibra óptica de vidrio (*Glass Optical Fibre*, GOF) convencional, este tipo de fibra está hecha esencialmente de plástico que permite la transmisión de luz y, por tanto, datos. Su ventaja clave es el gran tamaño del núcleo (típico 1 mm); un diámetro de núcleo tan grande permite una conexión rápida y fácil sin necesidad de técnicas precisas de alineación y acoplamiento. Además, POF tiene varias ventajas sobre GOF, tales como: flexibilidad mecánica, ligereza, costos reducidos de fabricación e instalación, y es adecuada para trabajar en el rango de longitud de onda visible [19], ver Fig. 2.2.

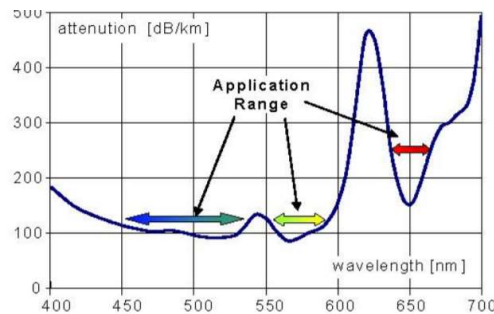


Fig. 2.2 Espectro de atenuación de una fibra PMMA-SI-POF estándar de 1 mm [20].

### 2.1.1 Estructura y materiales de las POF.

Las fibras ópticas de polímero son fibras construidas de materiales ópticos plásticos. Tanto el núcleo de la fibra como el revestimiento están formados por polímeros. Si bien este tipo de fibra no puede alcanzar el rendimiento de las fibras ópticas de vidrio en aspectos como las pérdidas de propagación y la capacidad de transmisión de datos, son mecánicamente más robustas y permiten soluciones más baratas en algunas áreas de aplicación. Algunas de las aplicaciones típicas son: i) la transmisión de datos de corto alcance, por ejemplo, en entornos industriales, hogares y automóviles, donde altas pérdidas de propagación son aceptables ( $\sim 106$  dB/Km); ii) iluminación; y iii) sensado, existe una gran variedad de sensores construidos a partir de POF como sensores de temperatura, humedad, deformación mecánica, entre otros [19].

Existe una amplia gama de posibles materiales para la construcción de fibras de polímero. El material utilizado depende del tipo de aplicación, sin embargo, el material más utilizado para este tipo de



fibras ópticas es el metilmetacrilato (*Poly Methyl Methacrylate*, PMMA) cuyo límite de pérdida teórico es de 106 dB/Km en la ventana de transmisión de 650 nm, otras características físicas del material se resumen en la Tabla 2.1. Otros polímeros que se utilizan para POF son policarbonato y poliestireno, usados en aplicaciones que requieren una mayor estabilidad térmica [21].

Parámetro	Unidad	Valor
Índice de refracción	-	1.492
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	1.18
Conductividad térmica	W/mK	0.17
Fuerza de tensión	N/mm <sup>2</sup>	76
Resistividad	Ohm cm	1.50e16
Temperatura de combustión espontanea	°C	430 aprox.

Tabla 2.1 Propiedades de PMMA (valores típicos) [19].

La Fig. 2.3 muestra las pérdidas en dB/Km de fibras construidas a partir de PMMA, fluoropolímero CYTOP™ (*cyclic transparent optical polymer*) y sílice. El fluoropolímero exhibe mejores características de atenuación que el PMMA a partir de los 600 nm. Además, las fibras construidas de este material pueden tener un perfil de índice gradual soportando anchos de banda mayores.

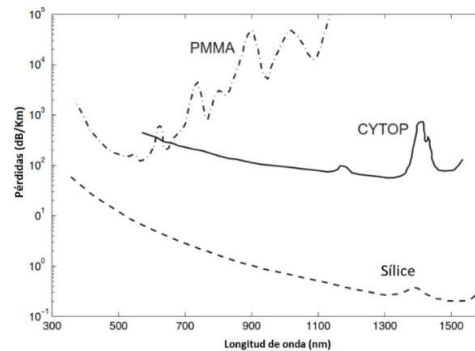


Fig. 2.3 Curva de atenuación de sílice, CYTOP y PMMA [21].

Respecto a los tipos de POF disponibles comercialmente, las que domina son las fibras ópticas de polímero de índice escalonado (SI-POF) con un 94% de cuota de mercado. Le siguen las fibras de polímero de índice gradual (GI-POF) y las fibras micro estructuradas con el 4% y 2% respectivamente [22], ver Fig. 2.4.

CUOTA DE MERCADO POR TIPO DE FIBRA

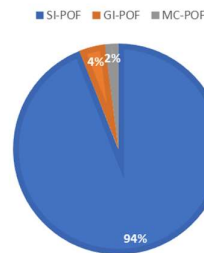


Fig. 2.4 Cuota de mercado por tipo de fibra.

Las SI-POF consisten en un núcleo transparente y un revestimiento con un índice de refracción más pequeño. Su costo de producción es bajo y se pueden obtener en una variedad de diámetros, aperturas numéricas (*numeric aperture*, N.A), atenuaciones y revestimientos. La mayoría de las SI-POF comerciales tienen una N.A aproximada de 0.50. Una desventaja de una N.A grande es la mayor diferencia en el retraso de tiempo entre las diferentes rutas de luz, limitando el ancho de banda y las distancias de transmisión [19]. Por otro lado, las GI-POF, tienen un perfil de índice que disminuye de manera gradual siendo este más pequeño en las regiones más alejadas del núcleo, ver Fig. 2.5.

Esto con el fin de cancelar por completo la dispersión intermodal. En la práctica, no se consigue eliminar la dispersión por completo, sin embargo, es posible aumentar el ancho de banda en dos o tres órdenes de magnitud en comparación con SI-POF. En la Tabla 2.2 se resumen las características de GI-POF comerciales del fabricante Chromis Fiberoptics.

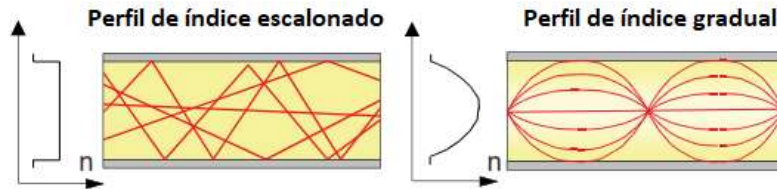


Fig. 2.5 Perfil de índice escalonado e índice gradual de una fibra óptica.

Chromis Fiberoptics			
Serie	50SR	62SR	120SR
Perfil de índice	Índice gradual (GI)		
Atenuación @850 nm	<60 dB/Km		
Ancho de Banda @850 nm	>300 Mhz-Km		
N.A	0.19	0.19	0.185
Diámetro del núcleo (µm)	50	62.5	120
Fuerza de tensión Máxima [N]	7		
Radio de curvatura, largo plazo (mm)	5	5	5

Tabla 2.2 Características de fibras ópticas de polímero de índice gradual (GI-POF) de Chromis Fiberoptics.

La Tabla 2.3 resume las principales características de las fibras ópticas de polímero disponibles comercialmente del fabricante Mitsubishi.

Mitsubishi Chemical Corp.				
Serie	SH	GH	MH	BH
Perfil de índice	Índice escalonado (SI)	Índice escalonado (SI)	Índice escalonado doble (Double step index, DSI)	Índice escalonado (SI)
Diámetro de la fibra (mm)	0.25-2	1	1	0.5&1
Rango de temperatura (°C)	-55 a 70	-55 a 85	-55 a 85	-55 a 105
Material del núcleo	PMMA	PMMA	PMMA	PMMA
Aplicación	Datos, sensores, iluminación	Industria	Datos, gran ancho de banda	Industria, datos, sensores, resistente a las altas temperaturas
Atenuación (dB/Km) *	190	170	160	200
Fuerza de Tensión (N)*	70	70-420**	70 y 140**	70
N.A*	0.5	0.5	0.3	0.58

Tabla 2.3 Características de fibras ópticas de polímero comerciales de Mitsubishi.

\* Especificaciones de una fibra de 1mm de diámetro.

\*\*Depende del tipo de chaqueta o recubrimiento de la fibra.

### 2.1.2 Máxima capacidad de las POF.

Teóricamente para calcular el ancho de banda de una fibra con perfil de índice escalonado se necesita conocer la máxima diferencia de tiempo de propagación ec.(2.1), esta diferencia está condicionada por el índice de refracción del núcleo y la apertura numérica [25]. Donde,  $L$  es la longitud de la fibra;  $n_1$  y  $n_2$  son los coeficientes de refracción del núcleo y el recubrimiento respectivamente;  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío; y, NA es la apertura numérica.

$$\partial t = \frac{L \cdot n_1^2}{c \cdot n_2} \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1} \right) \approx \frac{L \cdot NA^2}{2 \cdot c \cdot n_1} \quad (2.1)$$

El ancho de banda aproximado  $B_m$  en Hz de una SI-POF se puede estimar como [22]:

$$B_m \approx \frac{0.4}{\partial t} \quad (2.2)$$

Es importante tomar en cuenta la N.A, una gran N.A ocasiona una mayor diferencia en los tiempos de retraso entre los diferentes caminos de luz que viajan en la fibra, es decir, más dispersión intermodal y por lo tanto un menor ancho de banda por unidad de longitud. Debido a la gran apertura numérica de las SI-POF (N.A ~ 0.3 – 0.50) el ancho de banda está en el orden de 20-100 MHz a 100 m. La dispersión intermodal puede ser corregida con fibras de índice gradual; típicamente, las GI-POF tienen un ancho de banda mayor en dos o tres órdenes de magnitud que las SI-POF [19].

En la práctica, para determinar el ancho de banda de una fibra óptica, influyen varios factores que deben ser considerados. En fibras multimodo la dispersión intermodal y la dispersión cromática son los factores más importantes involucrados. En concreto, la dispersión intermodal depende la longitud de onda, las condiciones de inyección de la luz, el perfil de índice de refracción, y la homogeneidad de sus características físicas. En la Fig. 2.6 se muestra la medición del ancho de banda de una SI-POF EH-4001 de Mitsubishi con un N.A de 0.47. La medición se realiza con un pulso láser de 660 nm (150 ps) [19]. De la gráfica se puede concluir que el ancho de banda real de una SI-POF es mayor que los valores teóricos dependiendo de las condiciones de inyección de la luz y de la longitud de la fibra.

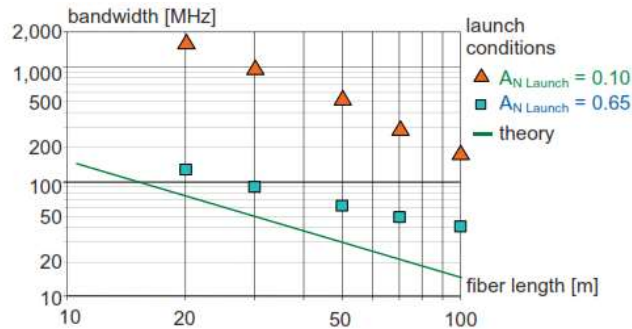


Fig. 2.6 Medición de ancho de banda de una SI-POF EH-4001 [19].

### 2.1.3 Acoplamiento.

El acoplo de luz en una fibra óptica multimodo se puede abordar con conceptos de óptica geométrica en donde; los rayos de luz emitidos por la fuente óptica primaria deben cumplir con ciertas condiciones para producir un modo guiado en la fibra óptica.

En términos generales, desde el punto de vista de la óptica geométrica, para una buena eficiencia de acoplamiento en fibras multimodo, se debe cumplir [43]:

- i). El punto enfocado debe ser comparable al tamaño del núcleo.
- ii). El haz enfocado debe centrarse en el núcleo de fibra.
- iii). El ángulo del cono incidente no debe exceder la N.A de la fibra.

Las dos primeras condiciones son fáciles de cumplir debido a los diámetros de núcleo de las fibras multimodo. La tercera condición depende del ángulo de divergencia de la fuente y de no cumplirse se puede utilizar una lente de enfoque cuyo diseño se puede lograr aplicando conceptos de óptica geométrica.

Para cumplir con las condiciones de reflexión total interna (TIR) en la fibra, el ángulo de incidencia de la luz lanzada en la fibra debe ser menor que cierto ángulo (ver Fig. 2.7 ), que se define como el ángulo de aceptación  $\theta_{acc}$ .

$$\sin \theta_{acc} = \frac{n_1}{n_2} = \cos \theta_t \quad (2.3)$$

$$n * \sin \theta_{acc} = n_1 \sqrt{1 - \cos^2 \theta_t} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.4)$$

Donde  $n_1$  es el índice de refracción del núcleo de la fibra,  $n_2$  es el índice de refracción del revestimiento de la fibra,  $n$  es el índice de refracción del medio exterior,  $\theta_{crit}$  es el ángulo crítico y  $\theta_{acc}$  es la mitad del ángulo de aceptación de la fibra. La apertura numérica es una cantidad adimensional que especifica el ángulo de aceptación de la luz de una fibra óptica [37].

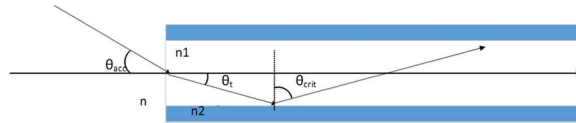


Fig. 2.7 Reflexión total interna en una fibra óptica.

En la Fig. 2.8.a se observa los tipos de pérdidas que pueden existir al iluminar directamente la fibra con un chip LED sin un sistema óptico de enfoque. El rayo 1 cumple con las condiciones de TIR; el rayo 2 es reflejado en la superficie del núcleo de la fibra, eso se debe a que si existen imperfecciones en la cara del núcleo puede ocasionar reflexiones; el rayo 3 no cae en la superficie del núcleo; el rayo 4 no es guiado ya que no cumple con las condiciones de TIR, es decir el ángulo del rayo es mayor que el ángulo de aceptación. La manera más eficiente, para lograr un buen acoplamiento de un LED es equiparlo con una micro-lente instalada por el fabricante, como se muestra en la Fig. 2.8.b. Otro aspecto que se debe tomar en cuenta cuando se realiza el acoplamiento de una fuente óptica son las condiciones de inyección de luz, ya que como se explica en el apartado 2.1.2; las condiciones de inyección de luz también afectan el ancho de banda por unidad de longitud de una SI-POF.

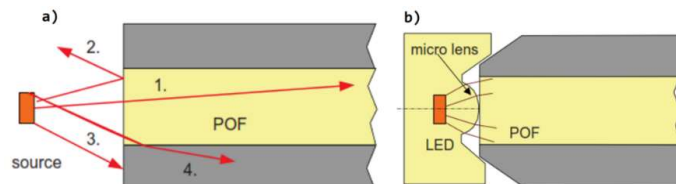


Fig. 2.8.a) Principales motivos de pérdidas por acoplamiento en POF; b). Proyección de un chip LED en POF a través de una micro lente [19].

Respecto a los tipos de LED utilizados para la transmisión de datos en POF, se resumen en la Tabla 2.4. El ancho de banda de modulación de este tipo de LED's es de unos pocos MHz (5-10 MHz aproximadamente).

Color de emisión	Longitud de onda aproximada [nm]	Material
Azul	430	Nitruro de galio (GaN)
Verde	520	Nitruro de indio y galio (InGaN)
Rojo	650	Arseniuro de aluminio y galio (AlGaAs)

Tabla 2.4 Ejemplos de LED's utilizados como transmisor en fibras ópticas de polímero.

#### 2.1.4 Transmisión de alta velocidad en enlaces basados en POF.

La limitación en las tasas de transmisión debido al problema de ancho de banda limitado de las POF se puede mejorar con el uso de técnicas de transmisión que mejoren la eficiencia espectral o con técnicas complejas de ecualización. Existen varios documentos que proponen diferentes soluciones. Uno de ellos [24] presenta un esquema de transmisión de 3 Gbit/s a 10 m para la capa física óptica destinada a la interconexión de componentes multimedia en automóviles y otros vehículos. Utilizan POF y LED's de bajo costo. Para alcanzar la velocidad de transmisión deseada se combina una precodificación Tomlinson Harashima (THP), que es una técnica de procesamiento no lineal, con un ecualizador lineal de avance (*Feed-Forward Equalizer*, FFE) y con esto logran mitigar el problema de propagación de error en un ecualizador DFE (*Decision-Feedback Equalizer*).

En [25] se compara directamente las modulaciones PAM (*pulse-amplitude modulation*) y CAP (*carrierless amplitude phase*). Utilizan un ecualizador DFE (*Decision Feedback Equalization*) y

modifican los tamaños de la modulación. Como transmisor óptico se utiliza un diodo láser ADL-65104TL equipado con un controlador, acoplado a una fibra SI-POF de 1 mm de diámetro Mitsubishi GH-4001. Alcanzan una tasa máxima de transmisión de 5 Gbit/s sobre 50 m con una modulación 16 CAP con +6 dBm de potencia acoplada a la fibra y BER de  $10^{-3}$ .

El artículo [26] presenta una descripción general para comparar los formatos de modulación más comunes para la transmisión de 10.7 Gbit/s sobre SI y GI-POF. La comparación se realiza en términos de máxima longitud de transmisión y complejidad del sistema. Compara transmisiones NRZ (*Non-return-to-zero*) sin ecualización y con ecualización (FFE y DFE), modulaciones PAM y DMT (*Discreet Multitone Modulation*). Se demuestra que la mayor distancia de transmisión, 23 m, se consigue con una modulación 4-PAM (utilizando DFE) en una fibra SI-POF. Utilizando DMT y NRZ+DFE se consiguen distancias de transmisión similares, alrededor de 17 m.

### 2.1.5 Enlaces VLC utilizando POF.

La transmisión por fibra óptica de radiación láser tiene ventajas prácticas en soluciones de comunicaciones ópticas inalámbricas. En la mayoría de las aplicaciones, la salida del haz de luz en la fibra debe colimarse adecuadamente utilizando elementos ópticos. Estos a su vez, están compuestos por una o varias lentes esféricas o asféricas. Las lentes esféricas tradicionales tienen una forma simple que puede describirse como un lente con una forma similar a una porción de esfera, y pueden especificarse utilizando un radio de curvatura. Estas lentes son simples y de bajo costo de fabricación, sin embargo, sufren de un defecto inherente a su geometría denominado aberración esférica. La estructura de una lente asférica tiene la forma ideal para la colimación y el enfoque sin aberraciones. Esta estructura es más compleja y generalmente está definida por: un perfil de superficie (hundimiento o sag)  $z$ ; un radio de curvatura  $R$ , un término parabólico (cónico)  $k$ , y varios coeficientes de orden superior  $A_i$  [31]. La ec.(2.5) define el sag o perfil de superficie donde  $C$  es el inverso del radio; y,  $r$  representa la distancia desde el eje óptico (ver Fig. 2.9).

$$z(r) = \frac{Cr^2}{1 + \sqrt{1 - C^2(1+k)}} + \sum_{i=2}^M A_i r^{2i} \quad (2.5)$$

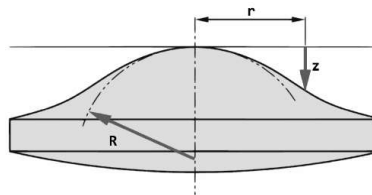


Fig. 2.9 Representación de una lente asférica.

En comparación con una lente esférica tradicional, esta lente puede corregir la aberración esférica y mantener el tamaño del haz prácticamente sin cambios a lo largo de la distancia. En [31] se presenta el diseño de una lente asférica plano-convexa para un colimador de fibra óptica utilizando conceptos de óptica geométrica.

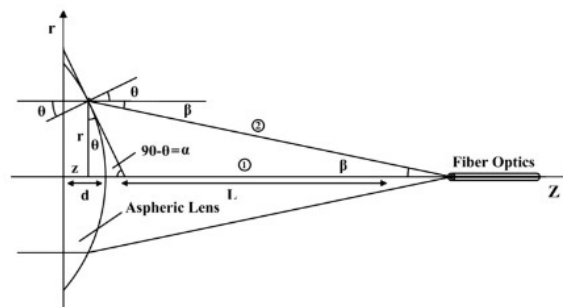


Fig. 2.10 Diseño del colimador de fibra óptica presentado en [31].

A partir del análisis geométrico de la Fig. 2.10, se encuentra una ecuación diferencial que describe la forma de la superficie esférica.

$$\frac{dz}{dr} = \frac{\sqrt{1-[(L+(d-z))/(L+n(d-z))]^2}}{n-[(L+d(d-z))/(L+n(d-z))]} \quad (2.6)$$

A continuación, se resuelve la ecuación diferencial (2.4) a partir de los parámetros iniciales impuestos por el autor que se resumen en la Tabla 2.5 en donde :  $\lambda = 532$  es la longitud de onda de la fuente óptica a partir de la cual se obtiene el índice de refracción  $n$  del material ;  $L$  es la separación o distancia entre la lente y la fibra;  $y$ ,  $d$  el grosor de la lente.

Parámetros iniciales	Valor	Unidad
Diámetro del núcleo de la fibra	600	$\mu\text{m}$
Diámetro del lente	25.4	mm
Radio del haz de salida (colimado)	10	mm
Longitud de onda	532	nm
Índice de refracción	1.46071	--
Distancia entre la terminación de la fibra y el vértice del lente	42.32	mm

Tabla 2.5 Parámetros iniciales de diseño del colimador de fibra óptica.

Finalmente utilizando un algoritmo genético (*genetic algorithm*, GA), convierten los valores que describen la superficie esférica, obtenidos en la ec.(2.6) a la representación polinómica de una lente esférica ec.(2.5).

Mediante un software óptico comercial (ZEMAX) se analiza la superficie esférica y se concluye que la lente propuesta corrige la aberración esférica, lo que implica un aumento en la distancia de colimación a la salida de la fibra óptica.

## 2.2 Enlaces ópticos inalámbricos mediante haz.

### 2.2.1 Fuentes ópticas: Diodos laser.

En el funcionamiento de un diodo láser, la cavidad activa tiene una sección transversal de forma rectangular, con un lado vertical más corto que el horizontal, esto ocasiona que la divergencia del campo lejano del haz sea diferente en las direcciones vertical y horizontal. Debido a la diferencia de divergencia, la forma del haz es elíptica (ver Fig. 2.11). La divergencia del haz es mayor en la dirección vertical, generalmente esta dirección se denomina "*fast axis*" mientras que la dirección horizontal se denomina "*slow axis*" [27].

La forma del haz de un diodo láser está determinada por la estructura de la capa activa. La ganancia dentro de la capa activa y las pérdidas fuera de esta, también afectarán las formas del haz. Existen diferentes estructuras de capa activa y no existe un modelo matemático único que pueda describir con precisión todos los modos de propagación. Sin embargo, según [27] en la mayoría de las aplicaciones prácticas, todos estos modos pueden describirse con un error insignificante por un modelo de haz gaussiano, siendo este el modelo más simple y ampliamente utilizado. En óptica, un haz gaussiano es un haz de radiación electromagnética monocromática cuya envoltura de amplitud en el plano transversal está definido por una función gaussiana; esto también implica un perfil de intensidad gaussiana (irradiancia). Este modo gaussiano transversal fundamental ( $\text{TEM}_{00}$ ) puede describir la salida del haz de la mayoría de los LD's

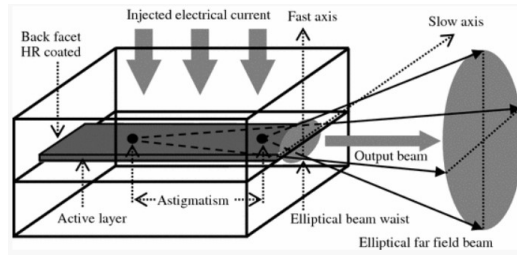


Fig. 2.11 Características del haz emitido por un diodo laser.

Este perfil de haz gaussiano se describe como: un haz con una sección transversal de forma circular y un perfil de intensidad gaussiana (ver Fig. 2.12. a) . Las características de un haz gaussiano se pueden describir mediante un conjunto de tres ecuaciones [27].

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \tag{2.7}$$

$$z_R = \frac{\pi \omega_0^2 n}{\lambda} \tag{2.8}$$

$$R(z) = z \left[ 1 + \left(\frac{z_R}{z}\right)^2 \right] \tag{2.9}$$

$$I(r, z) = I_0(z) e^{-2r^2/\omega(z)^2} \tag{2.10}$$

Donde el radio del haz se define por  $\omega(z)$ ;  $\omega_0$  es el radio del haz  $1/e^2$ ;  $z$  es la distancia axial;  $z_R$  es la distancia o rango de Rayleigh;  $\lambda$  es la longitud de onda,  $n$  es el índice de refracción del medio de propagación;  $R(z)$  es el radio de curvatura del frente de onda del haz en función de  $z$ ;  $I(r, z)$  es la distribución radial de la intensidad del haz en un plano de sección transversal de  $z$  (ver Fig. 2.12.b); e  $I_0(z)$  es el pico de intensidad del haz.

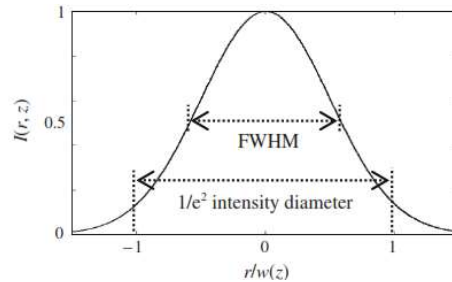


Fig. 2.12. Distribución de intensidad gaussiana normalizada [27].

### 2.2.2 Enlaces VLC.

En un LD con emisión de haz gaussiano, el frente de onda es plano en la cintura del haz ( $z=0$ ), luego el radio de curvatura del frente de onda disminuye desde el infinito hasta un valor mínimo en el rango de Rayleigh, y finalmente tiende al infinito a medida que se propaga en  $z$  [27] (ver Fig. 2.13). Es por esto que la mayoría de los sistemas ópticos que incluyen un LD requieren la manipulación del haz. Esto se puede lograr utilizando componentes ópticos como lentes, espejos, prismas, etc.

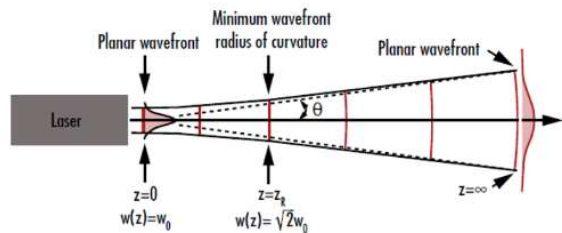


Fig. 2.13. Curvatura del frente de onda de un haz gaussiano [28].

En este punto es importante mencionar que la propagación de un haz gaussiano a través de un sistema óptico puede abordarse desde la óptica geométrica, debido a la característica en la transformada de Fourier de la función gaussiana que no necesita una integral para describir la evolución del perfil de intensidad en función de la distancia. Debido a que la distribución sigue siendo gaussiana en cada punto del sistema, solo cambian el radio de curvatura del frente de onda. En sistemas VLC, de manera general los LD ofrecen mayores anchos de banda de modulación y mayores distancias de transmisión que los LED's. Además, convertir un haz divergente de un LD puede ser particularmente importante para extender los rangos de transmisión.

Existen varios trabajos en donde se demuestra el uso de LD's en el espectro visible para comunicaciones VLC punto a punto de alta velocidad. Por ejemplo en [29] los autores, utilizan un VCSEL (*Vertical-cavity surface-emitting laser*) de 682 nm con un ancho de banda de modulación de 1 GHz bajo una corriente de polarización de 3.5 mA, utilizan un sistema óptico colimador a la salida del LD demostrando una transmisión VLC de espacio libre de 1.2 m con una velocidad de transmisión de datos de 11.1 Gbps.

En otro trabajo se utiliza un LD azul de nitruro de galio (GaN) como fuente óptica primaria en un sistema VLC. Utilizan una modulación multiportadora 64QAM-OFDM (32 subportadoras) logrando una velocidad de 9 Gbps en un enlace de espacio libre de 5 m. El ancho de banda de modulación analógica del LD es de 900 MHz bajo una corriente de polarización de 65 mA y temperatura controlada a 25 °C [30].

### 2.3 Enlaces ópticos inalámbricos dispersos.

Los LED son la forma más simple de un dispositivo semiconductor para la conversión eléctrica a óptica. Características como su simplicidad, fiabilidad y bajo costo son muy atractivas para el uso en sistemas de transmisión óptica de corto alcance [23].

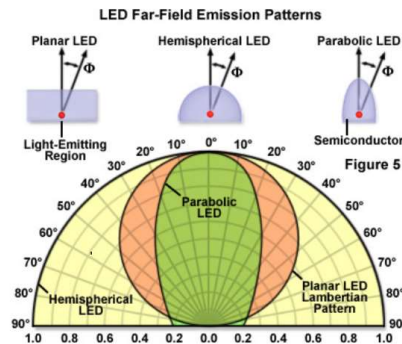


Fig. 2.14.a Diagrama de emisión de campo lejano para un LED con diferentes tipos de lentes [35].

El color de emisión de un LED está determinado por la combinación de los materiales utilizados en el proceso de fabricación. Las características de la luz de un LED pueden variar desde un perfil estrecho a un perfil altamente divergente, y está condicionado por: el tamaño, materiales y geometría del semiconductor; y, la geometría de la carcasa o lente (en el caso de tenerla). En la Fig. 2.14 se puede notar claramente como la geometría del lente incorporado en la carcasa del chip LED afecta su patrón de radiación así: un chip LED (planar LED) tendrá un patrón de característica lambertina; un chip LED con un lente tipo domo o hemisférico tendrá un patrón de radiación más amplio; y una chip LED con un lente tipo parabólico tendrá un patrón de radiación más directivo. La mayoría de los LED's tienen un patrón de intensidad de radiación a una distancia  $r$  de característica lambertiana donde el perfil de intensidad es proporcional al coseno del ángulo de emisión ec.(2.11) [23].

$$I_{\text{aire}}(\Phi) = \frac{P_{\text{fuente}}}{4\pi r^2} \frac{n^2}{n_s^2} \text{Cos}(\Phi) \quad (2.11)$$



Donde  $P_{fuente}$  es la potencia total emitida por el semiconductor;  $\Phi$  el ángulo de emisión respecto a la normal de la superficie;  $n$  es el índice de refracción del aire; y,  $n_s$  es el índice de refracción del semiconductor.

La mayoría de los sistemas VLC que combinan características de iluminación y comunicaciones se basa en LED's blancos, actualmente en el mercado hay dos tipos de LED's blancos que se utilizan en sistemas VLC: LED's con base de fósforo; y, LED's RGB.

El LED con base de fósforo es el tipo de LED más utilizado, utiliza luz azul para estimular una capa de fósforo amarillo, parte de la luz azul es absorbida por el fosforo, emitiendo así luz amarilla, la porción de luz azul que no se absorbe se combina la luz amarilla para producir luz blanca. Este tipo de LED tiene una estructura simple, un costo de producción pequeño y una complejidad de modulación relativamente baja. Sin embargo, el ancho de banda de modulación es muy bajo (alrededor de 5 MHz), esto es causado por la baja velocidad de respuesta del fósforo amarillo. Debido a esta limitación de ancho de banda, antes de la detección de la señal se puede agregar un filtro azul para filtrar las componentes espectrales de luz con una respuesta lenta, aumentando así el ancho de banda (entre 20-30 MHz).

Otro tipo común de LED es el RGB (*Red, Green, Blue*). Su propósito es encapsular los chips LED rojos, verdes y azules y mezclar la luz emitida para producir luz blanca. El RGB-LED tiene un ancho de banda de modulación mayor (10~20 MHz).

### 2.3.1 Detección en sistemas VLC de haz disperso.

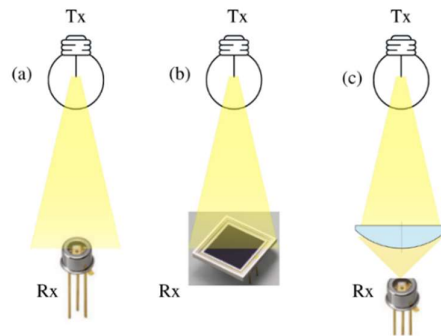


Fig. 2.15 (a) Fotodetector con gran AB y área efectiva pequeña. (b) Fotodetector con limitado AB y mayor área efectiva. (c) Fotodetector con gran AB y área efectiva pequeña con un concentrador óptico.

La potencia óptica detectada por un fotodiodo es proporcional a su área efectiva, sin embargo, el aumento del área disminuye el ancho de banda y aumenta el nivel de ruido. Un concentrador óptico es un elemento pasivo que aumenta el área efectiva del detector sin afectar los otros parámetros del fotodiodo. Este dispositivo compensa una parte de la atenuación en espacio libre transformando los rayos de luz incidentes de un área amplia en un conjunto de rayos que emerge en un área más pequeña. En aplicaciones ópticas inalámbricas, los concentradores ópticos generalmente se emplean para mejorar la eficiencia de recolección de luz en el receptor [16]. Los concentradores ópticos se pueden clasificar en dos categorías: concentradores de imágenes y concentradores sin imagen. En términos generales, los concentradores de imágenes están representados por lentes convencionales (planos, convexos, cóncavos, esféricos, etc.) (ver Fig. 2.16.a). Por otro lado, los concentradores sin imagen intentan crear un sistema óptico para transferir de energía de una fuente a un objetivo (ver Fig. 2.16.b) [32]. Por ejemplo: si usamos un concentrador de imágenes como una lupa (una lente biconvexa) para concentrar la luz del sol; al enfocarlo sobre una superficie, concentrará la luz del sol y al mismo tiempo crea una imagen óptica del sol en la superficie, al contrario, si se usa un concentrador óptico sin imagen este concentrará la energía de la fuente, en este caso el sol, sin crear una imagen.

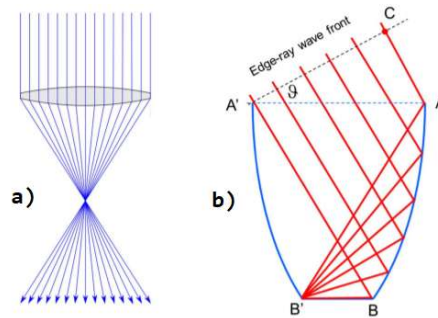


Fig. 2.16 Diferencia entre un: a) concentrador de imagen; y, b) un concentrador sin imagen [32].

Los concentradores ópticos sin imagen tienen diferentes aplicaciones prácticas sobre todo en el campo de la energía solar; como sistemas de calentamiento de agua que están disponibles comercialmente para instalación en viviendas. Sin embargo, una de las aplicaciones que ha despertado el interés en los últimos años es su uso para aumentar la potencia óptica en la recepción en sistemas de comunicaciones ópticos inalámbricos.

En [33] se presenta el diseño y construcción de un concentrador óptico compacto para comunicaciones ópticas inalámbricas en interiores. El diseño se fundamenta en el modelo geométrico presentado en [34]. Utilizan un script de Matlab con los siguientes parámetros de entrada: el área de salida del concentrador (correspondiente al área del fotodetector), el ángulo de aceptación en la entrada del concentrador y el índice de refracción del material; para calcular las dimensiones físicas del concentrador (diámetro de entrada y longitud del concentrador). Una vez diseñado el concentrador se evalúa la ganancia del concentrador usando un método de trazado de rayos. Los prototipos parabólicos están diseñados y fabricados en PMMA utilizando una micro fresadora 3D. Las ganancias ópticas máximas alcanzadas para una fuente laser (633nm) son de 13.7 dB.

En un sistema VLC de haz disperso, la distancia y el ángulo de incidencia de la luz en el detector afectan el rendimiento del sistema. Para mejorar el rendimiento del receptor en sistemas VLC de iluminación y datos varios autores proponen el diseño e implementación de concentradores ópticos de imagen acoplados a un fotodetector. En [35], analizan diferentes lentes hemisféricas para un fotodetector en particular. En concreto se realiza una comparación de la SNR recibida en función de diferentes configuraciones de la lente hemisférica. De su análisis se puede concluir que la geometría de la lente afecta al rendimiento del sistema, entre más plana es una lente peor será su rendimiento debido a que pequeños cambios en el ángulo de la lente y/o de la fuente óptica impactan en la SNR recibida. Si bien en este documento se comparan diferentes lentes hemisféricas no se realiza una comparación del SNR en función del diámetro de la lente. En otro documento [35] se propone el diseño de una lente de imagen para recibir simultáneamente señales de diferentes fuentes LED. Utilizan una estructura de lente hemisférica (Fig. 2.17) demostrando así que el uso de una lente de imagen mejora la SNR del sistema.

Otra de las ventajas de utilizar concentradores de imágenes en sistemas VLC es la disminución de la correlación entre los elementos de la matriz de canal en esquemas MIMO. En [35] se analiza el efecto de utilizar concentradores de imagen (lente plano-convexa) en el receptor para mejorar el rendimiento del BER en esquemas de modulación MIMO como GSM, QCM y DCM. Como fuente óptica utilizan un LED blanco no polarizado con patrón de radiación lambertiano. Se concluye que el uso de concentrados de imágenes mejora el rendimiento en sistemas VLC con esquemas de modulación MIMO mejorando el BER para una misma SNR en comparación a un concentrador óptico sin imagen.

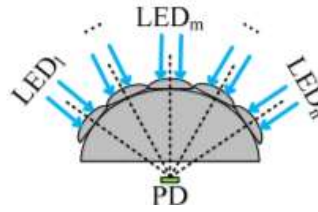


Fig. 2.17 Estructura de la lente propuesta en [35].

### 2.3.2 Concentrador Parabólico Compuesto (*Compound Parabolic Concentrator, CPC*).

Es un concentrador con una sección transversal conformado de dos secciones parabólicas en donde el foco de cada sección es la esquina inferior de la otra. EL CPC puede construirse como un cono hueco con material reflectante o como un paraboloide sólido compuesto de material dieléctrico. El CPC sólido tiene un factor de aceptación (ganancia óptica) mayor que el CPC hueco. La Fig. 2.18 muestra como los rayos de luz entran, son refractados y se produce reflexión total interna (TIR) en la pared paraboloide del CPC hasta alcanzar la apertura de salida donde se acopla el detector, la máxima ganancia óptica  $G_{\max}$  esta dada por la ec. (2.10) [16].

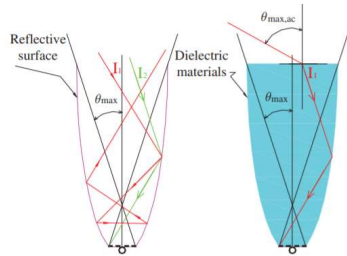


Fig. 2.18 Diagrama esquemático de: (a)CPC hueco; (b)CPC sólido [36].

Donde  $n$  es el índice de refracción del material y  $\theta_{\max}$  el ángulo de aceptación. Cuando el ángulo de incidencia de los rayos de luz es menor que el ángulo  $\theta_{\max}$  los rayos incidentes son recogidos por CPC; de lo contrario el CPC no puede recogerlos.

$$G_{\max} = \frac{n^2}{\sin^2(\theta_{\max})} \quad (2.12)$$

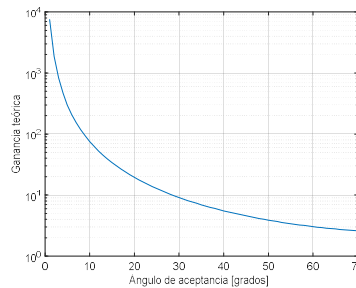


Fig. 2.19. Relación entre FOV y ganancia óptica de un CPC de material dieléctrico  $n=1.51$ .

La Fig. 2.19 muestra la relación de la ganancia óptica en función del FOV del CPC. Se puede observar que si el FOV es pequeño o estrecho la ganancia óptica es alta, por lo tanto, se limita las aplicaciones prácticas, por otro lado, para un FOV de  $60^\circ$ , la ganancia es aproximadamente 3.

## 3 Fundamentos de Óptica geométrica.

La luz es una onda electromagnética y por tanto se propaga en forma de dos componentes vectoriales mutuamente acopladas, una componente de campo eléctrico y una componente de campo magnético. Sin embargo, es posible describir muchos fenómenos ópticos utilizando una teoría aproximada. Cuando la luz se propaga a través y alrededor de objetos cuyas dimensiones son mucho mayores que

la longitud de onda, la naturaleza electromagnética de la luz no se distingue fácilmente, por lo que su comportamiento puede describirse adecuadamente mediante rayos que obedecen a un conjunto de reglas geométricas. Este modelo de luz se llama óptica de rayos o simplemente óptica geométrica. El estudio de la propagación de la luz en el ámbito de la óptica geométrica emplea el concepto de rayos. Los rayos ópticos son el concepto más simple de la luz. La luz se describe como rayos que viajan en diferentes medios ópticos en concordancia a un conjunto de reglas geométricas. Estrictamente, la óptica geométrica es el límite de la óptica electromagnética cuando la longitud de onda es infinitesimal [37].

El campo de la óptica geométrica puede estudiarse utilizando el principio de Fermat que determina el camino de los rayos. *'El trayecto seguido por la luz al propagarse de un punto a otro es tal que el tiempo empleado en recorrerlo es estacionario respecto a posibles variaciones de la trayectoria'* [38].

### 3.1 Colimación

Dado que la luz emitida por los LD's y LED's es divergente, en algunas aplicaciones VLC se necesita el diseño óptico de un sistema de conformación de haces utilizando óptica física o geométrica. No existe un método de conformación de haces que se pueda utilizar para todas las aplicaciones. Cuando los efectos de difracción no son importantes, la óptica geométrica, mediante el trazado de rayos se puede utilizar para diseñar un sistema óptico que incluya elementos como lentes esféricas, esféricas o lentes de índice gradual que permitan cambiar el perfil de irradiancia de una fuente óptica.

Un colimador es un sistema que a partir de un haz divergente obtiene un "haz" paralelo. Sirve para homogeneizar las trayectorias o rayos que, emitidos por una fuente, salen en todas direcciones y obtiene un conjunto de rayos paralelos. Conceptualmente si se coloca una fuente puntual en el punto focal del sistema de lentes colimadoras. El colimador transfiere la luz al infinito ya que los rayos refractados viajan paralelos al eje óptico [39].

Un haz de luz colimado se define cuando cada rayo dentro del haz es paralelo a cualquier otro rayo. Para producir luz colimada, se puede colocar una fuente infinitamente pequeña exactamente a una distancia focal de un sistema óptico con una distancia focal positiva o se puede observar la fuente puntual desde una distancia infinita. En la práctica, ninguno de estos escenarios es posible. Además, la teoría de la difracción nos dice que incluso si uno de estos escenarios se cumpliera, aún existiría alguna divergencia en el sistema.

Para minimizar la divergencia de un haz colimado, deben equilibrarse dos factores: i) la distancia focal del sistema de colimación; y, ii) el tamaño de la fuente de luz.

Para lograr la colimación ideal, se debe minimizar el tamaño de la fuente de iluminación o se debe aumentar la distancia focal del sistema de colimación, sin embargo, a medida que se aumenta la distancia focal el sistema de enfoque capturará menos luz y, por lo tanto, la potencia total del haz resultante disminuye.

### 3.2 Número F (*F number*, F#) y Apertura numérica de una lente.

La apertura numérica y el número F de una lente miden la cantidad de luz que puede recolectar en función de: la distancia focal ( $f$ ); el diámetro de la lente ( $D$ ); el índice de refracción ( $n$ ); y, el ángulo de aceptación ( $\theta$ ). La apertura numérica se define en la ec.(3.1) y puede expresarse con una aproximación matemática de acuerdo con la ec.(3.2). Una buena regla general es elegir una lente con una N.A dos veces mayor que la NA de la fuente óptica. La ec.(3.4) define la relación existente entre N.A y F#

$$NA_i = n \sin \theta = n \sin \left[ \arctan \left( \frac{D}{2f} \right) \right] \quad (3.1)$$

$$NA_i \approx \frac{D}{2*f} \quad (3.2)$$

$$F\# \approx \frac{f}{D} \quad (3.3)$$

$$NA_i = \frac{1}{2*F\#} \quad (3.4)$$

### 3.3 Lentes esféricas.

Una lente es un dispositivo óptico que enfoca o dispersa un haz de luz debido a la refracción. Una lente esférica está limitada por dos superficies, siendo curva al menos una de ellas.

Las lentes esféricas tienen tres configuraciones básicas: planas, cóncavas y convexas. Elegir la forma correcta de la lente es fundamental para minimizar las aberraciones ópticas, en donde los rayos incidentes cerca del eje óptico se refractan de manera diferente a los más cercanos al borde del lente [39].

Se pueden usar múltiples lentes donde una lente puede cancelar la aberración causada por otra. En general cuando la aplicación es la colimación de luz en un extremo de la lente, una lente plano-convexa, plano-cóncava o una lente doble acromática funcionará mejor que otras configuraciones. Cuando se trabaja en sistemas de enfoque óptico, en donde el plano focal es finito, una configuración de lente biconvexa o bicóncava podría funcionar mejor.

#### 3.3.1 Trazado de rayos a través de lentes gruesos

En el caso particular de una lente esférica de espesor  $d$  existen tres ecuaciones que describen como un rayo: i) atraviesa la primera superficie; ii) se desplaza a través de la lente y; iii) atraviesa la segunda superficie (ver Fig. 3.1). Las ecuaciones que describen el comportamiento del rayo al atravesar una superficie se denominan ecuaciones de refracción, mientras las que describen como un rayo atraviesa un medio homogéneo son las ecuaciones de traslación.

#### 3.3.2 Ecuaciones de refracción.

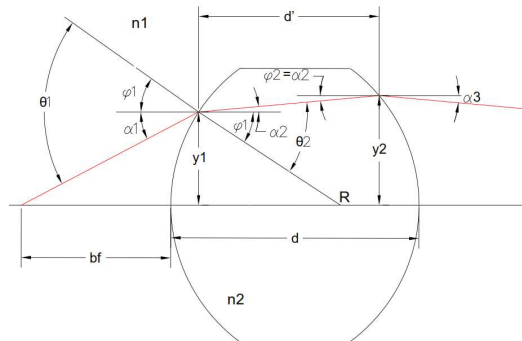


Fig. 3.1 Análisis geométrico de una lente gruesa de espesor  $d$ .

En este apartado se formulan las ecuaciones que representan el efecto de refracción y traslación a través de una lente esférica de curvatura  $R_1$  y  $R_2$ .

Para la formulación de las ecuaciones se parte del análisis geométrico de la Fig. 3.1 y se deben tomar en cuenta la transición del rayo entre la primera y segunda superficie. De acuerdo con la ley de Snell:

$$n_1 \text{Sen}\theta_1 = n_2 \text{Sen}\theta_2 \quad (3.5)$$

Tanto el ángulo de incidencia  $\theta_1$  como el ángulo refractado  $\theta_2$  respecto a la normal de la superficie esférica forman dos ángulos respecto al eje óptico horizontal  $\alpha$  y  $\phi$ .  $\alpha_1$  es el ángulo de incidencia del

rayo respecto al eje óptico horizontal y  $\alpha_2$  es el ángulo del rayo refractado en la primera superficie, el mismo será utilizado como ángulo incidente cuando se refracte en la segunda superficie.

$$\theta_1 = \phi_1 + \alpha_1 \quad (3.6)$$

$$\theta_2 = \phi_1 + \alpha_2 \quad (3.7)$$

Reemplazando (3.6) y (3.7) en (3.5)

$$n_1 \text{Sen}(\phi_1 + \alpha_1) = n_2 \text{Sen}(\phi_1 + \alpha_2) \quad (3.8)$$

$$\text{Sen}\phi_1 = \frac{y_1}{R_1} \quad (3.9)$$

Reemplazando (3.9) en (3.8):

$$n_1 \text{Sen}\left(\text{Arcsin}\left(\frac{y_1}{R_1}\right) + \alpha_1\right) = n_2 \text{Sen}\left(\text{Arcsin}\left(\frac{y_1}{R_1}\right) + \alpha_2\right) \quad (3.10)$$

En el caso que  $R \rightarrow \infty$  la ec.(3.10) se simplifica a la forma básica de la ley de Snell.

### 3.3.3 Ecuación de traslación.

La ecuación de traslación describe que ocurre con un rayo cuando viaja a través de un medio homogéneo de índice de refracción  $n$ . En la Fig. 3.2:  $y_1$  es la distancia sobre el eje óptico del punto de entrada;  $y_2$  es la distancia sobre el eje óptico del punto de salida;  $\alpha_1$  es el ángulo que forma el rayo respecto al eje óptico;  $y$ ,  $d$  es la distancia que viaja el rayo en el medio homogéneo.

La ecuación de traslación se define en (3.12)

$$\tan(\alpha_1) = \frac{y_2 - y_1}{d} \quad (3.11)$$

Siendo rigurosos en los cálculos, en la Fig. 3.1 se observa que  $d \neq d'$  por lo tanto es necesario plantear las ecuaciones necesarias para su cálculo.

$$\tan(\alpha_1) = \frac{y_2 - y_1}{d'} \quad (3.12)$$

$$\text{Sen}\theta_1 = \frac{y_1}{R_1} \quad (3.13)$$

$$\text{Sen}\theta_2 = \frac{y_2}{R_2} \quad (3.14)$$

$$d' = d - [R_1(1 - \text{Cos}(\theta_1)) + R_2(1 - \text{Cos}(\theta_2))] \quad (3.15)$$

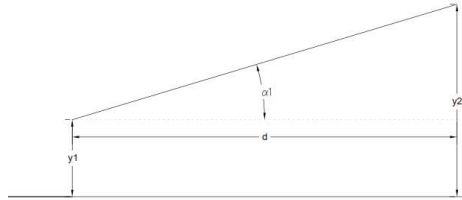


Fig. 3.2. Efecto de traslación de un rayo en un medio homogéneo.

Donde:  $y_1$  es la altura respecto al eje óptico del rayo refractado en la primera superficie;  $y_2$  es la altura respecto al eje óptico del rayo refractado en la segunda superficie;  $\theta_1$  es el ángulo que forma al trazar una línea entre  $R_1$  e  $y_1$ ;  $\theta_2$  es el ángulo que se forma al trazar una línea entre  $R_2$  e  $y_2$ ;  $R_1$  es el radio de la primera superficie y  $R_2$  el radio de la segunda superficie.

### 3.3.4 Aproximación paraxial

Las ecuaciones planteadas en los apartados 3.3.2 y 3.3.3 se pueden simplificar con la aproximación paraxial (su definición se expresa en la ec.(3.17)) : “*Los rayos paraxiales se definen como aquellos cuya desviación angular del eje óptico es lo suficientemente pequeña como para que el seno y la tangente del ángulo se aproxime al mismo ángulo* [38]”.

$$\text{Sen}\theta \approx \theta \quad (3.16)$$

Si se utiliza la aproximación paraxial, la ec.(3.10) se puede simplificar:

$$n_1 \left( \frac{y_1}{R_1} + \alpha_1 \right) = n_2 \left( \frac{y_1}{R_1} + \alpha_2 \right) \quad (3.17)$$

$$n_2 \alpha_2 = n_1 \frac{y_1}{R_1} + n_1 \alpha_1 - n_2 \frac{y_1}{R_1} \quad (3.18)$$

Reescribiendo la ec.(3.19) se obtiene la ecuación de refracción que describe la refracción de un rayo a través de la primera superficie esférica de la lente.

$$n_2 \alpha_2 = n_1 \alpha_1 - \left( \frac{n_2 - n_1}{R_1} \right) y_1 \quad (3.19)$$

Donde

$$D = \frac{n_2 - n_1}{R} \quad (3.20)$$

D se conoce como la potencia de la superficie; en una superficie esférica es la medida de la capacidad de refracción para convertir un haz paralelo en uno divergente o convergente [40].

La altura de incidencia del rayo antes y después de ser refractado es la misma, por lo que usamos una ecuación auxiliar para construir la matriz

$$y_1' = 0 + y_1 \quad (3.21)$$

La ec.(3.21) y ec.(3.22) pueden expresarse de manera matricial:

$$\begin{bmatrix} n_2 \alpha_2 \\ y_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -D_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \alpha_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

La refracción a través de una superficie esférica se puede caracterizar con una matriz de dimensiones 2x2:

$$\mathfrak{R} = \begin{bmatrix} 1 & -D_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Siguiendo la misma secuencia se puede encontrar la ecuación y matriz de refracción para la segunda superficie. El ángulo refractado en la primera superficie,  $\alpha_2$ , es el ángulo de incidencia en la segunda superficie,  $\phi_2$ .

$$\phi_2 = \alpha_2 \quad (3.24)$$

$$n_1 \alpha_3 = n_2 \alpha_2 - \left( \frac{n_1 - n_2}{R_2} \right) y_2 \quad (3.25)$$

$$\begin{bmatrix} n_1 \alpha_3 \\ y_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -D_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_2 \alpha_2 \\ y_2 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

La ecuación de traslación de la Fig. 3.1 se puede escribir como:

$$y_2 = d * \tan(\alpha_2) + y_1 \quad (3.27)$$

A diferencia de la ec.(3.17) no se toma en cuenta la curvatura de la lente y se aproxima  $d' = d$ . Utilizando la aproximación paraxial para ángulos pequeños en ec.(3.28):

$$y_2 = d * \alpha_2 + y_1 \quad (3.28)$$

El efecto de la traslación a través de una distancia  $d$  en un medio homogéneo de índice de refracción  $n_2$  está completamente caracterizada por una matriz de  $2 \times 2$ .

$$\begin{bmatrix} n_2 \alpha_2 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ d/n_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_2 \alpha_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

De manera similar que la ecuación de refracción, la ecuación de traslación se puede caracterizar con una matriz con dimensiones  $2 \times 2$ :

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ d/n_2 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Combinando las tres ecuaciones que describen el efecto de refracción y traslación a través de una lente esférica de curvatura  $R_1$  y  $R_2$  ec.(3.26), ec.(3.29) y ec.(3.30), obtenemos una expresión global.

$$\begin{bmatrix} n_1 \alpha_3 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -D_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ d/n_2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -D_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \alpha_1 \\ y_1 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Donde  $n_1 \alpha_3$  es el ángulo refractado en la segunda superficie esférica;  $y_2$  es la altura con respecto al eje óptico del punto de salida del rayo (Fig. 3.1).

### 3.3.5 Longitud focal

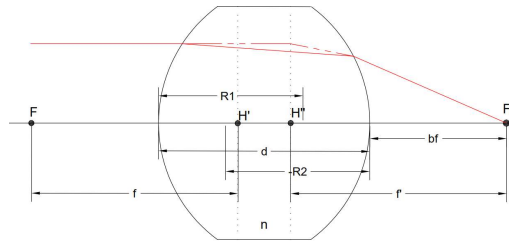


Fig. 3.3 Lente gruesa de índice de refracción  $n$ , grosor  $d$  y longitud focal  $f$ .

La longitud focal  $f$  de una lente gruesa de índice de refracción  $n$ , espesor  $d$ , y superficies esféricas de radios de curvatura  $R_1$  y  $R_2$  como se muestra en la Fig. 3.3, está dado por la ec.(3.32) [40]

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n-1)d}{nR_1R_2} \right] \quad (3.32)$$

La distancia focal de la lente es la distancia entre el plano principal ( $H'$ ) y el punto focal  $F$  (ver Fig. 3.3). Las posiciones principales del plano de una lente gruesa se pueden calcular con la ec.(3.33) y ec.(3.34), para lentes simétricas donde  $R_1 = -R_2$ ,  $H' = -H''$ .

$$H' = \frac{f(n_1-1)d}{R_2 n_1} \quad (3.33)$$

$$H'' = \frac{f(n_1-1)d}{R_1 n_1} \quad (3.34)$$

Finalmente, la longitud focal posterior ( $f_b$ ) también llamada longitud focal de trabajo que es la distancia entre el punto focal y el borde de la lente se puede calcular con la ec.(3.35)

$$H'' = f - f_b \quad (3.35)$$

### 3.3.6 Campo de vision angular (Angular Field of View, AFoV).

El campo de visión (*Field of View*, FoV) de un sensor o elemento óptico es el ángulo sólido a través del cual un elemento óptico es sensible a la radiación electromagnética [41]. En [42] se define como la extensión angular del campo que se puede observar con un instrumento óptico o con el ojo.



Una lente convencional de focal fija, tiene un campo de visión angular (AFOV) fijo. El AFOV generalmente se especifica como el ángulo completo (en grados) asociado con la dimensión del sensor o detector con el que se utiliza la lente. La distancia focal de una lente y el tamaño del sensor define el campo de visión angular de la lente ec.(3.36), donde  $f$  es la distancia focal en milímetros y  $h$  es la dimensión horizontal del sensor en milímetros. Para un tamaño de sensor dado, cuanto más corta sea la distancia focal, más amplio será el campo angular de la lente. Así mismo, cuanto más corta sea la distancia focal de la lente, menor será el tamaño del sensor necesario para obtener el mismo campo de visión en comparación con una lente de mayor distancia focal (Fig. 3.4):

$$\text{AFOV} = 2 * \text{Tan}^{-1} \left( \frac{h}{2f} \right) \quad (3.36)$$

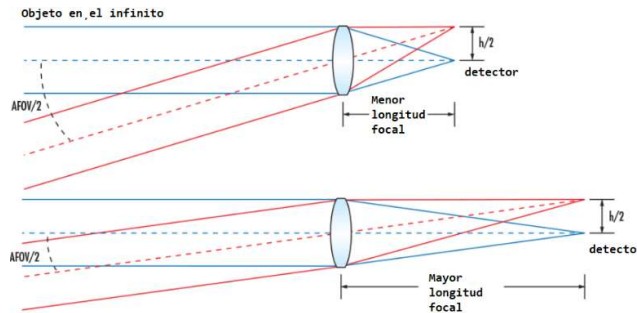


Fig. 3.4 Campo de visión angular de una lente biconvexa simple, para un tamaño de sensor  $h$ , las distancias focales más cortas producen AFOV más amplios.

### 3.4 Lentes Asféricas.

Debido a su geometría, las superficies esféricas introducen aberración esférica a un sistema óptico independientemente de la alineación o errores de fabricación; para corregirla se puede usar lentes esféricas en cascada de tal manera que el sistema resultante anule la aberración esférica de las lentes individuales o utilizar una superficie no esférica (asférica). Al ajustar la constante cónica y los coeficientes asféricos del perfil de superficie (ec.2.4) de una lente asférica se puede optimizar para minimizar o anular la aberración. La Fig. 3.5 muestra la diferencia entre una superficie esférica y una asférica.

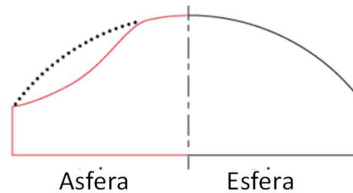


Fig. 3.5 Diferencias entre una superficie esférica y asférica.

Como se menciona las lentes asféricas corrigen aberraciones usando menos elementos que con los componentes esféricos convencionales, minimizando los costos, así como el tamaño total del sistema. Un sistema óptico con más elementos puede afectar tanto parámetros ópticos como mecánicos agregando procedimientos de alineación, y un incremento en la necesidad de revestimientos anti reflejantes.

Las lentes asféricas de un solo elemento suelen ser utilizadas para colimar o enfocar haces de luz porque son más pequeñas y livianas que un sistema de lentes esféricas. En el apartado 2.1.5 se describe la forma matemática de su perfil de superficie. En el mercado existe gran disponibilidad de diferentes tipos de lentes asféricas especialmente diseñadas y fabricadas para la colimación de luz.

En el mercado existen menos lentes asféricas diseñadas y fabricadas para enfocar directamente un haz de diodo láser. El uso de una lente asférica, diseñada para colimar, causará una aberración severa

si se utiliza para para enfocar un haz; la forma más común de enfocar un haz de diodo láser es combinar dos lentes colimadoras

Otra opción para enfocar o colimar la luz de un diodo laser es a través del uso de lentes de índice gradual, estos lentes se usan de manera particular para acoplar haces de diodo láser en fibras monomodo.

### 3.5 Zemax OpticStudio®.

Zemax es una empresa de software de diseño óptico y OpticStudio es uno de sus productos. OpticStudio es un programa de diseño óptico que se utiliza para diseñar y analizar sistemas de imágenes o sistemas de iluminación. Funciona mediante el trazado de rayos; modelando la propagación de rayos a través de un sistema óptico. Puede modelar el efecto de elementos ópticos como lentes simples, lentes asféricas, lentes de índice de gradual, espejos, elementos ópticos difractivos, etc., generando diagramas de análisis. También puede modelar el efecto de los recubrimientos ópticos en las superficies de los componentes. Incluye una biblioteca de lentes comerciales en existencia. Además cuenta con herramientas de optimización de que se pueden utilizar para mejorar el diseño inicial de la lente ajustando distintos parámetros de diseño para mejorar la eficiencia y rendimiento del sistema óptico simulado [44]. Existen textos como [46],[47] que son una guía práctica en el proceso de diseño de lentes e incluyen instrucciones y ejemplos del uso de Zemax OpticStudio.

Zemax ofrece dos modos de configuración para el trazado de rayos: i) secuencial; y ii) no secuencial. En el modo secuencial, las fuentes ópticas están limitadas a fuentes puntuales y el trazado de rayos se realiza de manera secuencial utilizando óptica geométrica, es decir existe una secuencia predefinida de superficies a las que los rayos que se están trazando deben impactar. El modo no secuencial permite una mayor libertad en la definición del sistema. Mediante el trazado de rayos no secuencial, las fuentes se pueden colocar en cualquier lugar, en cualquier orientación, e incluso se pueden colocar dentro de otros objetos. En este modo las fuentes ópticas pueden variar desde fuentes puntuales simples (como las que se usan en el modo secuencial) hasta distribuciones de fuentes tridimensionales complejas; permitiendo así importar datos de fuentes reales de proveedores o programas externos.

## 4 Lentes comerciales

Existe una extensa lista de fabricantes, lentes y materiales para diferentes aplicaciones. En este apartado se analizan las lentes más relevantes y comunes para aplicaciones VLC, posibilitando así una elección correcta de materiales transparentes en el espectro de luz visible. En el anexo A.1 se resumen las lentes esféricas y asféricas disponibles comercialmente del fabricante Thorlabs.

### 4.1 Materiales

Los materiales ópticos de manera general alteran la radiación electromagnética en las regiones espectrales ultravioleta (UV), visible o infrarroja (IR). Dichos materiales se utilizan para fabricar elementos ópticos como lentes, espejos, ventanas, prismas, polarizadores, detectores, moduladores, etc., y se pueden usar para refractar, reflejar, transmitir, dispersar, polarizar, detectar y transformar la luz [47].

La lista de materiales disponibles para el rango de longitud de onda visibles es extensa, se listan y analizan los materiales ópticos más comunes disponibles comercialmente para aplicaciones VLC. En la Tabla 4.1 se resume las principales características de algunos materiales ópticos. En el anexo A.2 se presentan todas las características ópticas de los materiales listados en este apartado.

Material	Rango de Transmisión. (nm)	Costo	Característica
BK 7	380–2100	Bajo	Alta transmisión para aplicaciones visibles a infrarrojo cercano, el vidrio óptico más común.
UVFS	195–2100	Moderado	Excelente homogeneidad y baja expansión térmica, alta resistencia al daño por láser
CaF2	170–8000	Alto	Alta transmisión para aplicaciones de UV a infrarrojos profundos
MgF2	150–6500	Alto	Material birrefringente, excelente para su uso en UV profundo a infrarrojo
ZnSe	600–16000	Alto	Excelente opción para aplicaciones IR. Candidato perfecto para usar con láser infrarrojo de alta potencia debido a su bajo coeficiente de absorción.
N-SF11	420 – 2300 nm	Moderado	Tiene un alto poder dispersivo y es ideal para aplicaciones en el rango visible que requieren alta dispersión.

Tabla 4.1 Resumen de materiales ópticos de las lentes

Existen diversos factores a considerar antes de decidir qué material usar en una lente, para una aplicación en particular. Las propiedades materiales más importantes a tener en cuenta son:

La dispersión describe el cambio del índice de refracción respecto a la longitud de onda. La dispersión causa aberración cromática en lentes. La propiedad óptica que cuantifica la dispersión de un material es el número de Abbe (ec. 4.1). Donde  $n_d$ ,  $n_f$  y  $n_c$ , son los índices de refracción del material en tres líneas espectrales estándar en la región visible, (587.6 nm, 486.1 nm y 656.3 nm respectivamente). Un alto número de Abbe es indicativo de baja dispersión, mientras que un bajo número de Abbe indica alta dispersión.

$$v_d = \frac{n_d - 1}{n_f - n_c} \quad (4.1)$$

Un diagrama de Abbe (Fig. 4.1), se realiza trazando el número de Abbe  $v_d$  de un material frente a su índice de refracción  $n_d$ . Este diagrama clasifica a los vidrios ópticos en Crown y Flint. Los vidrios ópticos con un número de Abbe relativamente bajo de  $<50$  (es decir, con una dispersión relativamente alta) Crown, mientras que los vidrios con un número de Abbe más alto se denominan Flint.

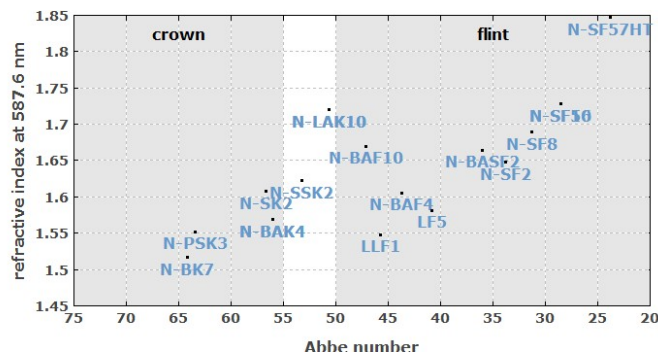


Fig. 4.1 Diagrama de Abbe [48]

El índice de refracción de un material no solo depende de la longitud de onda de la luz; también depende de la temperatura. Este cambio en el índice de refracción con la temperatura se conoce como coeficiente termo-óptico y se escribe como  $dn/dT$ . Debido a que el coeficiente termo-óptico varía tanto con la temperatura como con la longitud de onda, se selecciona un rango de temperatura estándar y una longitud de onda de prueba al informar esta especificación para un material. El cambio en el índice de refracción de un componente óptico con la temperatura ( $dn/dT$ ) puede conducir a un cambio en la longitud focal de la lente ( $\Delta f$ ), cambiando la posición de enfoque.

En óptica, la transmisión es la propiedad de un medio que permite que la luz atraviese el medio y que parte o nada de la luz incidente sea absorbida durante el proceso. Los diferentes materiales ópticos tienen un rango de transmisión diferente, permitiendo que ciertas longitudes de onda atraviesen el medio.

Se deben tener en cuenta las propiedades mecánicas del material como la densidad, dureza y elasticidad. La densidad del material define el peso del objeto según su volumen. La dureza puede tener un efecto al fabricar el material en cierta forma, lo que afecta el costo del producto, así como la durabilidad de la óptica. La dureza del material también determina la resistencia al rayado de la óptica. La elasticidad del material indica su capacidad para soportar diferenciales fuerza antes de romperse.

En aplicaciones prácticas el coste juega un factor importante al seleccionar sus componentes ópticos para diseñar el sistema dentro de un presupuesto especificado. Como regla general entre mejores son las especificaciones ópticas más costosas resultan las lentes debido a materiales, tiempo y técnicas de fabricación.

## 4.2 Revestimientos ópticos.

Los recubrimientos ópticos se utilizan para mejorar las propiedades de transmisión, reflexión o polarización de un componente óptico. El rendimiento de un recubrimiento óptico depende del número de capas, su grosor y la diferencia de índice de refracción entre ellas.

Debido a la reflexión de Fresnel, a medida que la luz pasa del aire a través de un sustrato de vidrio sin recubrimiento, aproximadamente el 4% de la luz se reflejará en cada interfaz. Esto da como resultado una transmisión total de solo el 92% de la luz incidente. El exceso de luz reflejada reduce el rendimiento y puede provocar daños en aplicaciones láser. Los recubrimientos antirreflejantes (AR) se aplican a las superficies ópticas para aumentar el rendimiento de un sistema y reducir los riesgos causados por las reflexiones. Muchos sistemas limitados en potencia incorporan ópticas con revestimiento AR para permitir un uso eficiente de la potencia óptica. En la Fig. 4.2 se muestran los recubrimientos ópticos disponibles en las lentes comerciales de Thorlabs.

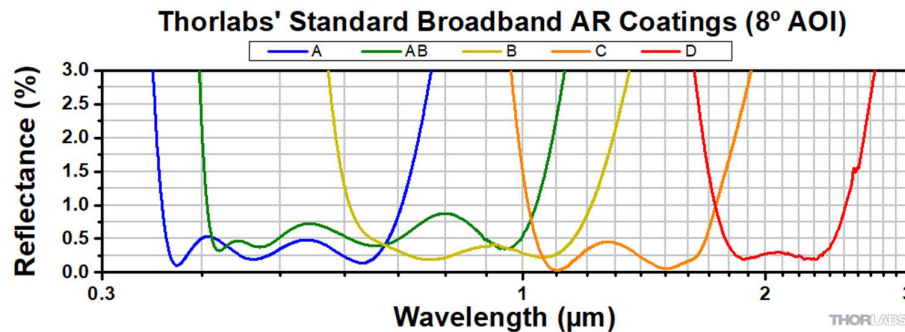


Fig. 4.2 Rangos de longitud de onda para recubrimientos ópticos de Thorlabs[49].

## 5 Diseño de colimadores ad-hoc

Uno de los criterios más comunes para la clasificación de sistemas ópticos inalámbricos se basa en la existencia de una ruta ininterrumpida de línea de visión entre el transmisor y el receptor. Los enlaces LOS (Line of Sight) dependen de dicha ruta, mientras que los enlaces NLoS (Non Line of Sight) se basa en reflexiones de la luz en superficies circundantes, como paredes y techo [50].

En el caso de sistemas VLC las configuraciones LOS, también conocidas como *directed-LOS* son las que proporcionan la máxima eficiencia energética debido a que la potencia transmitida se concentra en un cono de emisión estrecho, además, esto permite el uso de receptores con un FOV estrecho,

minimizando la probabilidad de tener energía no deseada incidente en el detector; lo que reduce los problemas de ruido y distorsión causada por el multi trayecto. Esto implica que, para una distancia dada, un sistema LOS requiere una divergencia de haz emitido muy pequeña. Este haz estrecho puede ser proporcionado por: una fuente con una divergencia muy pequeña  $\sim 1^\circ$ ; o a través de un sistema óptico que modifique el diagrama de radiación de la fuente óptica.

Como se menciona, otra de las ventajas de una configuración LOS, son los receptores con un FOV muy estrecho los cuales pueden incorporar concentradores de alta ganancia con imagen o sin imagen permitiendo así el uso de dispositivos más pequeños. Las desventajas de la configuración LOS incluyen su susceptibilidad al bloqueo, su movilidad restringida (a menos que el sistema contenga un mecanismo de seguimiento) y el hecho de que requiere una orientación cuidadosa del transmisor y el receptor.

Por otra parte, para aplicaciones VLC en interiores donde se requiera tanto datos como iluminación, la configuración *non-directed* LOS es la más flexible. En esta configuración generalmente se utilizan LED's como fuentes ópticas primarias; receptores con FOV amplios. Este tipo de enlaces son adecuados para aplicaciones de transmisión punto a multipunto. Las topologías *non-directed* LOS aumentan la robustez del enlace permitiendo que el sistema funcione incluso cuando los obstáculos bloquean el camino directo entre el transmisor y el receptor, proporcionando así cierta movilidad en el receptor, además, no se requiere alineación ni seguimiento. Sin embargo, esta configuración implica que las pérdidas de propagación serán altas, además se debe tener en cuenta la dispersión inducida por los múltiples trayectos limita la velocidad de datos. Finalmente, cualquier topología utilizada debe tener la capacidad de operar en entornos con niveles de luz ambiental intensa, lo que convierte a los concentradores ópticos especialmente importantes para mejorar rendimiento del sistema.

## 5.1 Sistema VLC punto-punto (PtP) utilizando un LD como fuente óptica

En el diseño de colimadores para el caso particular de la transmisión PtP (*point to point*, PtP) en un sistema VLC utilizando un LD como fuente óptica se consideran dos sistemas de lentes: el primero es el sistema para la colimación del haz del LD; y el segundo es el sistema para enfocar el haz colimado en el detector.

En este apartado se analizan las características del sistema óptico, su eficiencia y rendimiento de manera concreta utilizando dos tipos de lentes: i) lentes esféricas plano-convexas y; ii) lentes esféricas.

La fuente óptica, utilizada en los ejemplos que se presentan a continuación, es un diodo laser L650P007 ( $\lambda = 650\text{nm}$ ) de Thorlabs, los ángulos de divergencia del láser son asimétricos:  $9^\circ$  en dirección horizontal (*slow axis*) y  $28^\circ$  en dirección vertical (*fast axis*).

### 5.1.1 Elección de una lente de colimación para un diodo láser particular.

Siguiendo los principios de la óptica geométrica y el trazado de rayos se pueden plantear ecuaciones para el diseño de una lente esférica (anexo A.3), sin embargo, la manera más sencilla para la elección de una lente esférica o esférica en un sistema VLC PtP es conocer las lentes comercialmente disponibles y se puede realizar a partir de tres parámetros: i) la divergencia del diodo láser (especificada por el fabricante); ii) la distancia focal de la lente y; iii) el diámetro del haz colimado deseado.

Respecto al LD generalmente las hojas de datos especifican la divergencia del haz en función de la anchura a media altura,  $\Delta S_{\text{FWHM}}$  (*Full Width at Half Maximum*). Sin embargo, una mejor práctica es usar el diámetro del haz a  $1/e^2$  del máximo ( $W$ ). Para un perfil de haz gaussiano, el diámetro  $W_0 \cong 1.665 \Delta S_{\text{FWHM}}$ . El uso del diámetro del haz  $W_0$ , minimiza la difracción de campo lejano (recortando menos luz incidente)[49].

Por ejemplo, consideremos el caso de buscar un haz colimado con diámetro  $\Delta S_{FWHM}$  Ø3 mm; y se desea conocer que lente es la más adecuada para cumplir con los requerimientos planteados. A lo largo de este apartado se presentan varias opciones de lentes esféricas y asféricas con y sin recubrimiento óptico; para finalmente analizar las ventajas, inconvenientes de cada una de ellas.

Para recolectar tanta luz como sea posible durante el proceso de colimación, se considera el mayor de los ángulos de divergencia del LD (28° para el LD L650P007). Con esta información la longitud focal del lente se puede determinar utilizando la aproximación de lentes delgadas ec.(5.1). Donde  $f=6.01$  es la longitud focal y  $r$  el radio del haz deseado.

$$\tan(14^\circ) = \frac{r}{f} \tag{5.1}$$

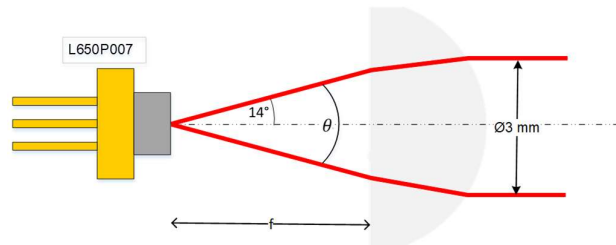


Fig. 5.1 Configuración de un LD L650P007 y una lente plano-convexa para la colimación de luz.

Una vez conocida esta información es el momento de elegir la lente de colimación adecuada. Los fabricantes ofrecen una gran variedad de lentes y modelos, lo ideal es buscar una lente con una distancia focal similar a la calculada en la ec.(5.1). Se selecciona la lente LA1036, sus características ópticas se listan en la Tabla 5.1. De las configuraciones de lentes esféricas de un solo elemento, la configuración plano-convexa es la mejor para la colimación de luz. Las lentes plano-convexas pueden enfocar un haz colimado o colimar la luz desde una fuente puntual.

Diámetro [mm]	Longitud focal [mm] @587.6 nm	Radio de curvatura [mm]	Espesor [mm]	Espesor del borde [mm]	Longitud focal posterior @587.6 nm
3.0	6.0	3.1	1.5	1.0	5.01

Tabla 5.1 Características del lente LA1036

Para minimizar la aberración esférica, una fuente de luz colimada debe ser incidente en la superficie curva de la lente cuando se enfoca y una fuente de luz puntual debe ser incidente en la superficie plana cuando se colima (ver Fig. 5.2).

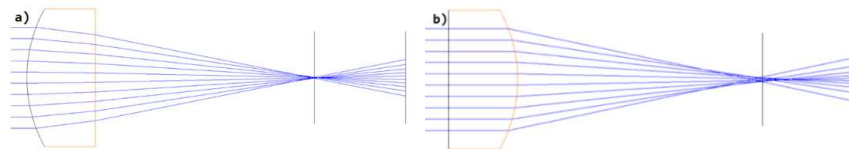


Fig. 5.2 Aberración esférica de una lente plano-convexa. a) una fuente de luz colimada incidente en la superficie curva de la lente; b) una fuente de luz puntual incidente en la superficie plana de la lente

A continuación, es fundamental verificar que la apertura numérica de la lente sea mayor que la de la fuente óptica. Con el uso de las ec.(3.1-3.4) se obtiene que  $NA_{lente} > NA_{laser}$ , puesto que  $0.2500 > 0.2419$ .

El siguiente parámetro que se debe calcular es el *Focal Shift*. Si la longitud de onda de la fuente óptica es diferente a la longitud de onda de diseño de la lente comercial, la longitud focal será diferente (a la proporcionada por el fabricante) debido a que el índice de refracción del material

depende de la longitud de onda. En una lente esférica la longitud focal se puede calcular utilizando la ec.(3.32).

En la Tabla 5.2, se resumen los valores calculados con las ec. (3.32 - 3.35) de: longitud focal ( $f$ ); longitud focal posterior ( $f_b$ ); y, plano principal ( $H''$ ), de la lente LA1036 utilizando el LD L650P007 como fuente óptica a una longitud de onda de 650 nm. El índice de refracción del material óptico de la lente (N-BK7) para una longitud de onda de 650 nm es de 1.514520309.

LA1036		
Longitud focal (mm) @650 nm	Longitud focal posterior (mm) @650 nm	Plano principal (mm) @650 nm
6.02	5.034	0.99

Tabla 5.2 Longitud focal ( $f$ ), longitud focal posterior ( $f_b$ ) y planos principales ( $H'$  y  $H''$ ) de la lente LA1036

Finalmente, se calcula el ángulo de divergencia y el radio del haz colimado. En la Tabla 5.3 se comparan los resultados obtenidos a través de las ec.(3.5-3.15) sin aproximación paraxial, la ec.(3.31) y los resultados de la simulación. Se puede observar que los métodos de análisis geométricos en lentes esféricas utilizando fuentes con divergencias pequeñas son válidos.

	Divergencia (deg)	Radio del haz (mm)
Simulador	-0.948	1.4348
Ec.3.31	-0.18	1.491
Ec.(3.5-3.15)	-0.950	1.435

Tabla 5.3. Comparación de resultados analíticos con una simulación.

En este punto a través del trazado de rayos de un simulador o el uso de óptica geométrica se puede: conocer si una lente esférica es adecuada para la colimación de un LD; y, conocer tanto el ángulo de divergencia del haz colimado como su radio de propagación. Sin embargo, en la práctica, debido a la aberración esférica, los rayos incidentes con ángulos mayores convergen y los rayos paraxiales más cercanos al eje óptico están colimados (Fig. 5.3a.). Para corregir esta divergencia y aumentar así la distancia de colimación se recomienda acercarse ligeramente la lente a la fuente óptica (Fig. 5.3,b), la mejor posición depende de la lente, la fuente de luz y su aplicación.

Para cuantificar la distancia óptima entre la lente y la fuente se plantea el uso del simulador ZEMAX en donde se configura un sistema VLC PtP con dos lentes esféricas LA1036; una para la colimación y otra como lente de enfoque acoplada a un detector de  $\varnothing 1$ mm. La separación entre lentes (distancia de enlace) se configura en 1m y se utiliza un haz gaussiano en el espectro visible como fuente óptica, las características del haz gaussiano simulado corresponden al LD L650P007.

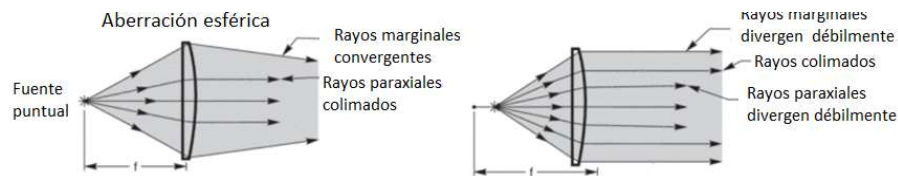


Fig. 5.3. a. Efecto de la aberración esférica en una lente planoconvexa. b. Balance de la aberración esférica acercando la lente a la fuente óptica.

Una vez configurados los parámetros de la simulación, se utilizan las herramientas de optimización del software. A través de una gráfica es posible visualizar la potencia recibida en la superficie de la lente de enfoque en función de la distancia entre la lente colimadora y la fuente (Fig. 5.4). La distancia que maximiza la potencia según la simulación es de 4.96 mm.



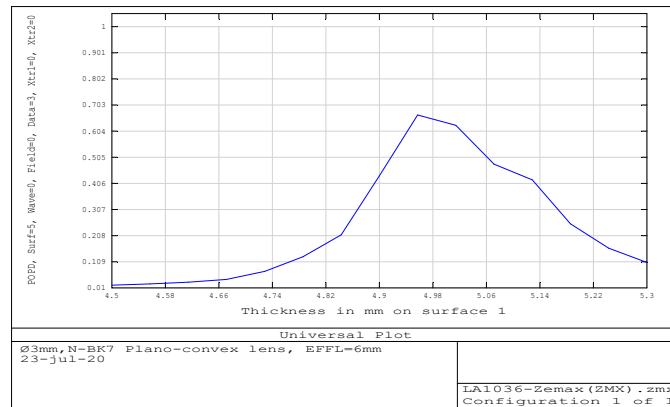


Fig. 5.4 Distancia entre la fuente óptica y la lente colimadora vs potencia captada por la superficie de la lente de enfoque.

Con esta corrección la divergencia del haz será menor y se puede alcanzar mayores distancias. Sin tomar en cuenta las pérdidas de propagación en espacio libre y con ayuda del simulador se pueden obtener las pérdidas en función de la distancia entre las lentes. En la Fig. 5.5 se muestra la potencia óptica recibida en la superficie de la lente de enfoque en función de la distancia con la lente de colimación. Como es de esperar la divergencia del haz limita la distancia de colimación. La distancia inicial entre lentes es de 1m (1000mm). Los resultados arrojan que las lentes se pueden alejar 1.7m (1700mm) adicionales antes que la potencia decaiga 3 dB, es decir para una distancia inicial de 1m la potencia decae 3dB en 2.7m.

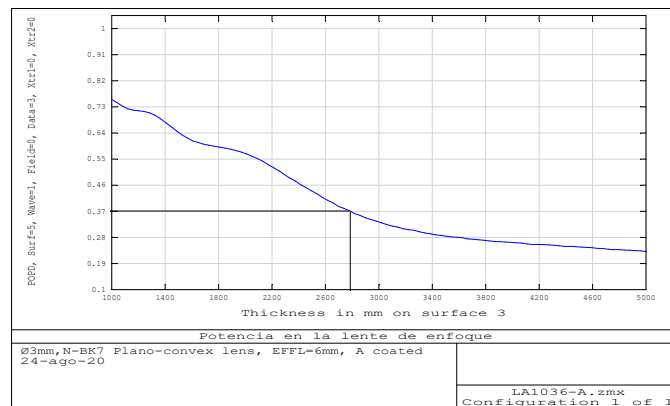


Fig. 5.5 Potencia óptica en la superficie de la lente de enfoque (Watts) en función de la distancia(mm).

Como se ha demostrado, la divergencia del haz colimado causada por la aberración esférica es uno de los factores que afecta la eficiencia del sistema. Como se menciona en el capítulo 4 el recubrimiento AR de una lente también puede tener efectos su eficiencia. Para cuantificar el impacto en términos de potencia de un recubrimiento óptico se realiza una simulación con la misma configuración, pero agregando un recubrimiento AR en ambas caras de las lentes. Los resultados de las simulaciones se resumen en la Tabla 5.5 en donde se especifica la potencia incidente en cada uno de los elementos del sistema con recubrimiento AR y sin recubrimiento AR.

De los resultados de las simulaciones se puede concluir que la divergencia del haz introduce 1.79 dB de pérdidas; las reflexiones producidas por las lentes sin recubrimiento AR disminuye la eficiencia del sistema. El esquema de simulación de lentes con recubrimiento AR presenta una eficiencia de ~11% superior que el esquema sin recubrimiento AR; si bien las lentes pueden introducir pérdidas debido al tamaño de punto de enfoque para el caso particular de la lente LA1036 la eficiencia es ~100% ya que tamaño de punto de enfoque es menor al tamaño del fotodetector (Fig. 5.6.a).



Otro efecto de la aberración es la deformación del haz gaussiano a medida que este se propaga. En la Fig. 5.6.a se observa la distribución de potencia en la superficie de la lente de enfoque en donde la distribución del haz tiene muchas franjas de interferencia y no se parece a un haz con perfil gaussiano.

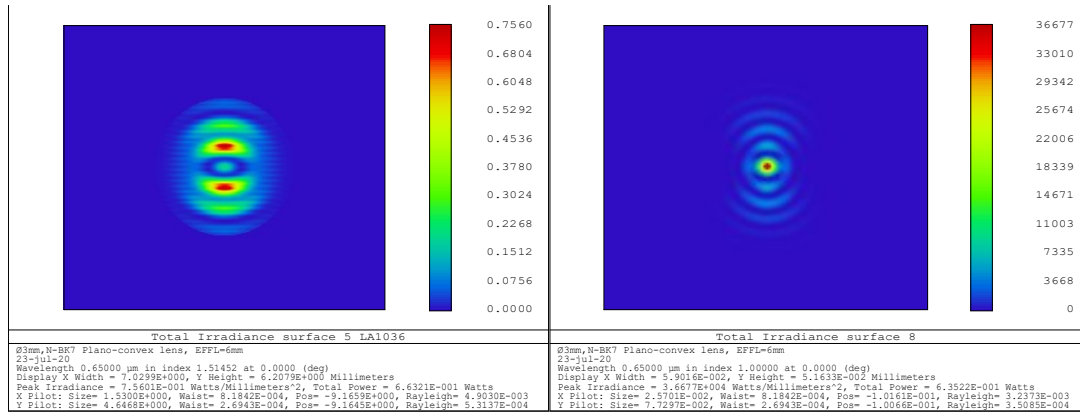


Fig. 5.6 Distribución de potencia: a) en la superficie de la lente de enfoque; b) en el fotodetector

### 5.1.2 Sistema de lentes esféricas.

Las lentes esféricas de un solo elemento pueden refractar la luz solo en ángulos pequeños antes de que se introduzca aberración esférica y a menudo se requieren varias lentes en cascada para la corrección de este problema, introduciendo costes adicionales y complejidad al sistema óptico. Por otro lado, una sola lente esférica es capaz de producir un haz colimado sin introducir aberración esférica al sistema. Además, comercialmente existen lentes esféricas de acrílico o plástico, que son más baratas y livianas que lentes fabricadas de vidrio óptico. Por esto se plantea el uso de lentes esféricas en el sistema VLC PtP planteado en el apartado anterior. Se selecciona dos lentes: una lente esférica de acrílico de bajo costo; y, una lente de vidrio óptico H-LAK54 cuyas características se resumen en la Tabla 5.4.

Lente	Material	Diámetro [mm]	Longitud focal [mm]	N.A	Espesor [mm]	Espesor del borde [mm]	Longitud focal de trabajo
<b>APL0606</b>	Acrílico	6.0	6.05 @633 nm	0.38	4.5	2.7	2.942 @633 nm
<b>A110</b>	H-LAK54	7.20	6.24 @780 nm	0.40	5.36	3.78	3.29 @780 nm

Tabla 5.4 Características ópticas de las lentes esféricas APL0606 y A110.

Por las características geométricas de la lente no es necesaria una corrección de la distancia de la fuente a la lente, ya que esta corrige la aberración esférica casi por completo. La distancia entre la fuente y la lente es exactamente la distancia focal de trabajo proporcionada por el fabricante: 2.942mm y 3.29mm para las lentes APL0606 y A110 respectivamente. El *setup* de las simulaciones es el mismo utilizado para la lente esférica LA1036. La Fig. 5.7 muestra la corrección de las aberraciones a través de la distribución de potencia incidente en la lente de enfoque, se observa claramente que la potencia sigue un patrón de haz gaussiano prácticamente perfecto, para comprobarlo se grafica la distribución de la potencia en un corte transversal en la superficie de la lente de enfoque (Fig. 5.7.b) donde el perfil corresponde a una distribución gaussiana sin distorsiones.

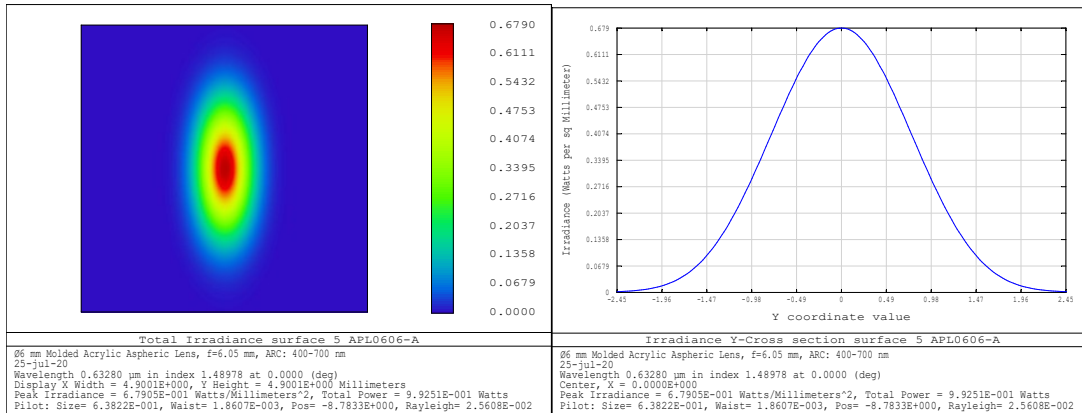


Fig. 5.7 a) Irradiancia en la superficie de la lente de enfoque APL0606; b) corte transversal de la irradiancia en la superficie de enfoque APL0606.

Finalmente, la Tabla 5.5 resume los resultados de las pérdidas introducidas por cada uno de los elementos del sistema utilizando diferentes tipos de lentes con y sin recubrimiento AR.

Lente	Recubrimiento	Rol del componente en el sistema	Diámetro [mm]	Potencia incidente en la superficie [Watts]	Pérdidas [dB]
<b>Lente ASFÉRICA APL606 (acrílico)</b>	Sin recubrimiento	Lente colimadora	6	0.961	-0.17
		Lente de enfoque		0.888	-0.51
		Detector	1	0.853	0.7
	Recubrimiento antireflectante (350nm-700nm)	Lente colimadora	6	0.998	0
		Lente de enfoque		0.992	-0.03
		Detector	1	0.990	-0.04
<b>Lente ASFÉRICA A110 (H-LAK54)</b>	Sin recubrimiento	Lente colimadora	7.2	0.929	-0.31
		Lente de enfoque		0.799	-0.97
		Detector	1	0.741	-1.3
	Recubrimiento antireflectante (350nm-700nm)	Lente colimadora	7.2	0.991	-0.03
		Lente de enfoque		0.970	-0.13
		Detector	1	0.958	-0.18
<b>Lente esférica LA1036</b>	Sin recubrimiento	Lente colimadora	3	0.935	-0.3
		Lente de enfoque		0.661	-1.79
		Detector	1	0.633	-1.78
	Recubrimiento anti reflectante (350nm-700nm)	Lente colimadora	3	0.973	-0.11
		Lente de enfoque		0.747	-1.26
		Detector	1	0.744	-1.11

Tabla 5.5 Resultados de las simulaciones de un sistema VLC PtP utilizando lentes esféricas APL606 y A110 y esférica LA1036.

### 5.1.3 Análisis y comparación de las lentes propuestas.

La Tabla 5.6 presenta un resumen del rendimiento total del sistema VLC PtP utilizando diferentes tipos de lentes esféricas y esféricas, además de comparar los ángulos de divergencia del haz colimado y el costo de las lentes individuales. De manera general se puede decir que la aberración esférica introducida por un lente limita la distancia de colimación de un haz gaussiano; la corrección de la aberración esférica aumenta la distancia de colimación de un LD; los recubrimientos ópticos AR aumentan la eficiencia de un sistema óptico; como se esperaba entre más pequeño es el ángulo de divergencia del haz se introducen menos pérdidas al sistema y la distancia de colimación será mayor.

En una aplicación VLC PtP de baja potencia el uso de lentes esféricas acrílicas o plásticas son la mejor opción para la colimación de un haz gaussiano debido a su bajo coste y peso. Así mismo el uso de recubrimientos ópticos AR mejora el rendimiento del sistema, sumándole la poca diferencia en el precio se convierten en una opción casi obligada al momento de la elección de una lente en particular.

		Eficiencia [%]	Costo [€]	Diámetro del haz [mm]	Divergencia [deg]
<b>LENTE ESFÉRICA LA1036</b>	Sin recubrimiento	66.3	50.9	2.84	0.79*
	Recubrimiento antireflectante (350nm-700nm)	74.4	56.36		
<b>LENTE ASFÉRICA APL606</b>	Sin recubrimiento	85.3	18.1	2.86	0.0008**
	Recubrimiento antireflectante (350nm-700nm)	99	24.84		
<b>LENTE ASFÉRICA A110</b>	Sin recubrimiento	74.1	71.57	2.98	0.011**
	Recubrimiento antireflectante (350nm-700nm)	95.8	76.48		

Tabla 5.6 Comparación de la eficiencia del sistema de colimación PtP con diferentes tipos de lentes.

\*El valor se obtiene de las ecuaciones 3.31

\*\*El valor se obtiene de las simulaciones

## 5.2 Sistema VLC *directed*- LOS utilizando un LED como fuente óptica.

Para el caso particular de la transmisión Point to Point (PtP) en un sistema VLC utilizando un LED como fuente óptica se consideran dos sistemas de lentes: el primero es el sistema para la colimación del LED; y el segundo es el sistema para enfocar el haz colimado en el detector (Fig. 5.8). Esta configuración se utiliza para enlaces de comunicación punto-punto principalmente en exteriores y, en algunos casos, también en interiores. La potencia se concentra en un haz muy estrecho, exhibiendo así requisitos de baja potencia y creando una densidad de flujo de alta potencia en el fotodetector.

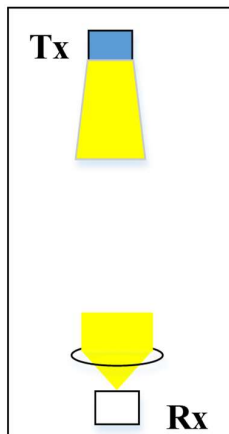


Fig. 5.8 Enlace VLC directed-LOS propuesto.

El diseño del sistema óptico de colimación depende del patrón de radiación de la fuente óptica y su área de emisión, en los siguientes apartados se analizan LED's de alta potencia de color blanco, uno de ellos con una lente tipo domo en el encapsulado y el otro sin lente. Las características de los LED's se resumen en la Tabla 5.7.

Modelo	Voltaje (V)	Intensidad (mA)	SFWMH (deg)	CCT* (K)	Lente	Área de emisión (mm)	Potencia (W)
XHP50A-00-0000-0D0BH430E-SB01	12	700	120	3000	Domo	5x5	8.4
L2C530901205F1300	35	600	115	3000	--	Ø13	21

Tabla 5.7 Características de los LED's usados en la simulación.

\*Temperatura de Color Correlacionada (CCT)

Antes de la elección de una lente en particular es necesario analizar las características físicas y ópticas de las fuentes para una correcta elección de lentes. Debido a los ángulos de divergencia de un LED y a la aberración esférica, los métodos geométricos de diseño de lentes esféricas no son adecuados. Así mismo para el análisis del rendimiento del sistema óptico no se busca un radio de haz colimado objetivo como en el apartado anterior.

Para que la lente colimadora capte toda la luz de la fuente y no la recorte se debe cumplir que  $NA_{lente} > NA_{fuente}$ ; sin embargo, debido al patrón de radiación del LED encontrar una lente comercial con una N.A tan alta puede resultar especialmente complicado. Otro aspecto que se debe tomar en cuenta es el tamaño de la fuente, si el área de emisión de la fuente es mayor que el diámetro de la lente, la luz será irradiada fuera de la superficie de la lente y como resultado se tendrá un sistema muy ineficiente y poco práctico para la mayoría de las aplicaciones.

Para un análisis correcto del sistema es fundamental una buena configuración de la fuente óptica en el simulador ya que si se configura como una fuente puntual con un ángulo de divergencia igual al de los LED's planteados los resultados no serán próximos a la realidad. Es por esto que se utiliza un fichero .ray de los LED's utilizados en la configuración de la fuente en el simulador. Un archivo .ray es un archivo de datos creado por los programas de diseño de iluminación que contiene datos sobre los rayos de luz, incluyen la longitud de onda, colores y origen. Los archivos .ray se utilizan para simular la apariencia de los rayos de luz reales. En la Fig. 5.9.b y Fig. 5.10.b se muestra el diagrama de radiación polar de los archivos .ray para el LED L2C5-0901205F1300 [51] y XHP50A-00-0000-0D0BH430E-SB01[52], respectivamente. Como se menciona en el apartado 2.3 una lente incorporada afecta el patrón de radiación de un LED, para el caso particular del LED de la Fig. 5.10 la lente hemisférica modifica el perfil de radiación ampliando el patrón de radiación y por lo tanto la divergencia mientras que el LED de la Fig. 5.9 tiene un patrón lambertiano.

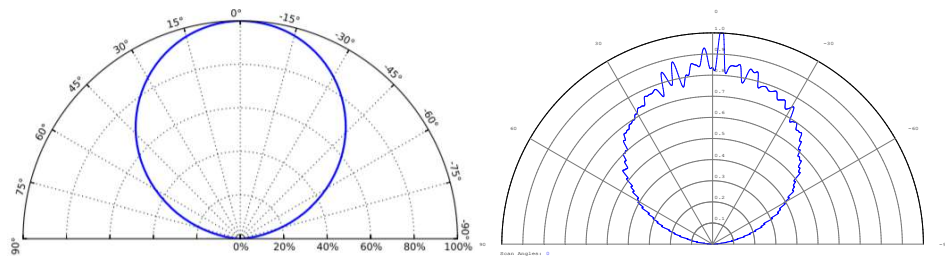


Fig. 5.9 Diagrama de radiación polar para el LED L2C5-30901205F1300. a) especificada por el fabricante; b) utilizado en la simulación.

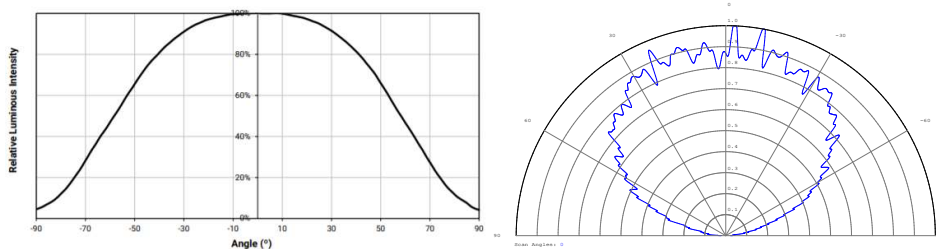


Fig. 5.10 Diagrama de radiación para el LED XHP50A-00-0000-0D0BH430E -SB01: a) especificada en la hoja de datos del fabricante; b) utilizado en la simulación

Para la elección de los componentes ópticos se utilizan varios criterios: i) geometría: la aberración de una lente esférica introducida al sistema debido a los ángulos de divergencia de la fuente afectaría de manera considerable a la eficiencia como se demostró en el apartado anterior por lo que se propone el uso de lentes asféricas; ii) diámetro: cuando el área de emisión de la fuente óptica no puede considerarse una fuente puntual, el diámetro en relación con el área de emisión afecta a la eficiencia del sistema, por esto se plantea el uso de lentes con diferentes diámetros para analizar el impacto que este puede tener en el sistema; iii) curvatura de la lente: si bien en el caso particular de un enlace *directed* LOS este parámetro no tiene mucha relevancia; en un enlace *non-directed* LOS sí lo tiene. En el capítulo 2 se mencionan varios trabajos que utilizan lentes hemisféricas para mejorar la SNR y la movilidad en un sistema VLC *non-directed* LOS, por lo tanto, se escogen lentes tipo domo o hemisféricas para comparar su utilidad y rendimiento en el sistema. Finalmente se plantea como alternativa el uso de una lupa convencional (lente biconvexa) como elección de bajo costo. Las características ópticas de las lentes seleccionadas se resumen en la Tabla 5.8 y Tabla 5.9.

Lente	Diámetro (mm)	Longitud focal (mm) @600nm	N.A	Espesor (mm)	Espesor del borde [mm]	Longitud focal de trabajo [mm]	Recubrimiento AR
ACL2018U-A	20	18.1	0.52	8.0	1.8	13	350 - 700 nm
ACL25416U-A	25.4	16	0.79	14	1.2	7.3	350 - 700 nm
ACL7560U-A	75	60	0.61	30	2.3	40	350 - 700 nm

Tabla 5.8 Características ópticas de las lentes utilizadas en la configuración LOS [49]

Diámetro (mm)	Longitud focal (mm)	Dioptría	Radio de curvatura (mm)	N.A	Espesor (mm)	Espesor del borde (mm)	Longitud focal de trabajo (mm)
60 mm	51	20	51	0.58	25	5.48	44.86

Tabla 5.9 Características ópticas de una lupa genérica de vidrio óptico [53].

### 5.2.1 Comparación de lentes en un sistema VLC *directed* LOS.

Para realizar un análisis completo y entender el impacto de los componentes ópticos de manera individual en las pérdidas de potencia del sistema se compara: i) las pérdidas por recortes de luz debido a la N.A de la lente colimadora; ii) el patrón de radiación emitido por la lente colimadora (que tan buena es la colimación de luz); y, iii) el tamaño de punto de enfoque de la lente en la recepción. Para esto se realizan ocho simulaciones utilizando cada una de las dos fuentes ópticas con cada una de las cuatro lentes seleccionadas.

El setup de los componentes ópticos en el espacio de trabajo del simulador se realiza configurando el LED en el punto focal de la lente colimadora procurando que la cara plana sea incidente a la fuente óptica; la distancia entre la lente colimadora y la lente de enfoque es de un 1m y están completamente alineadas la una de la otra; el tamaño del detector se configura en 1mm; la potencia del LED se configura según los parámetros del fabricante. En la Tabla 5.10 se resumen los valores de potencia incidentes en cada una de las superficies de los elementos ópticos utilizados en el sistema, las pérdidas en dB hacen referencia a la cantidad de potencia que se pierde con respecto a la potencia total de la fuente, en la simulación no se toman en cuenta las pérdidas por espacio libre.

La Fig. 5.11 muestra las pérdidas que cada uno de los elementos introduce al sistema; la barra de color azul representa las pérdidas introducidas por el recorte de la luz en la lente de colimación; la barra de color naranja representa las pérdidas introducidas por la divergencia del haz colimado; y, la barra gris ilustra las pérdidas debido al tamaño del punto de enfoque producido por la lente en la recepción. Estos valores se han obtenido de las simulaciones realizadas con la configuración ya mencionada.



Fig. 5.11 Resumen de las pérdidas de potencia en dB de los resultados de las simulaciones en Zemax.

La N.A es un factor clave al momento de la elección de un lente en un sistema de colimación. Lo deseable es que  $NA_{\text{lente}} > NA_{\text{fuente}}$ , en el caso particular que no se llegue a cumplir esta condición, por ejemplo en la colimación de un LED, entre más cercana sea la N.A de la lente a la N.A de la fuente menores serán las pérdidas por recortes de luz, esto hace referencia a la potencia irradiada por la fuente que no es captada por la lente. También se puede notar que las pérdidas por recorte de la luz son mayores para el LED XHP50A que para el LED L2C5, es decir la fuente con el patrón de radiación más amplio es la que menor cantidad de potencia irradiada incide en la superficie de la lente colimadora.

El siguiente punto importante es el patrón de radiación a la salida de la lente colimadora, es decir, la manera como la lente modifica el patrón de radiación lambertiano de la fuente en un patrón de radiación estrecho o colimado. En la Fig. 5.12 se muestra la comparación del patrón de radiación de las lentes ACL7560U-A y ACL25416U-A utilizando el LED XHP50A como fuente óptica. Se observa que la lente ACL7560U-A introduce pérdidas de 2.39 dB produciendo un patrón de radiación mucho más estrecho mientras que la lente ACL25416U-A introduce 20.24 dB de pérdidas. A pesar de que las dos lentes comparadas son esféricas la mayor diferencia es su tamaño. La fuente óptica no puede considerarse una fuente puntual por lo tanto su área de emisión afecta directamente a la forma del haz a la salida de la lente. Así mismo si comparamos la misma lente, por ejemplo, la ACL7560U-A, pero se usa una fuente óptica diferente, tanto el patrón de radiación como las pérdidas serán diferentes para este caso en particular la fuente LED L2C5 introduce más pérdidas en la colimación de luz, esto por su mayor área de emisión.

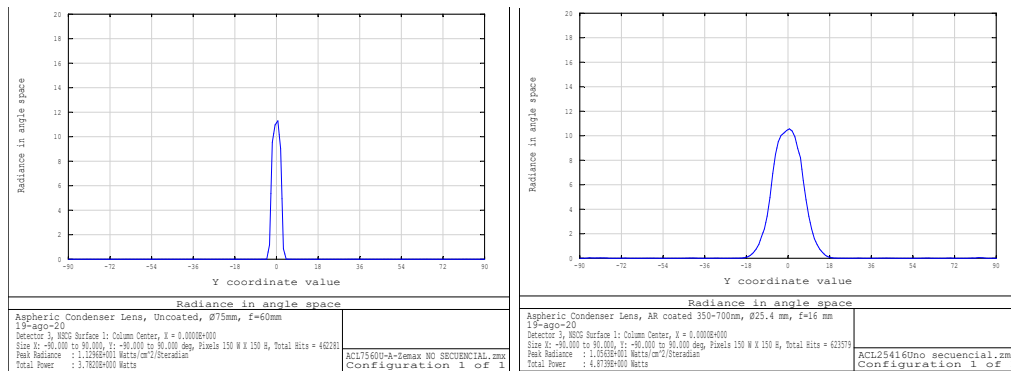


Fig. 5.12 Diagrama de radiación del haz colimado por la lente: a) ACL7560U-A y b) ACL25416U-A. Utilizando el LED XHP50A-00-0000-0D0BH430E-SB01 como fuente óptica.

Respecto a las pérdidas en el detector por el tamaño de punto de enfoque producido por la lente acoplada al fotodetector se puede notar claramente en la Fig. 5.11 que las lentes esféricas de menor diámetro son las que menos pérdidas introducen al sistema, es decir estas lentes anulan casi por completo la aberración produciendo tamaños de punto de enfoque más pequeños. Para maximizar la potencia en el detector se puede utilizar una segunda lente de enfoque o utilizar un detector de mayor área. La lente con peor desempeño es la biconvexa (lupa convencional) esto por su geometría; dos

superficies esféricas introducen mayor aberración en el sistema produciendo tamaños de punto más grandes, esto implica que de la potencia enfocada por la lente no toda es incidente en el fotodetector.

De los resultados también se puede inferir que entre más grande es el área de emisión de la fuente, se necesitaran lentes de mayor diámetro para mejorar el rendimiento del sistema. Al momento de la elección de una lente en particular es importante tomar en cuenta las necesidades y limitaciones de una aplicación específica. Por ejemplo, el sistema de lentes que mejor desempeño muestra, según las simulaciones, es la lente esférica ACL7560U-A, sin embargo, es costosa y por sus dimensiones físicas tanto el sistema colimador como el sistema de enfoque no será el más compacto, algo similar ocurre con una lupa convencional. Sin embargo, la lupa presenta características costo-beneficio interesantes. Si la aplicación requiere que tanto el sistema colimador como el sistema de enfoque sea compacto, liviano y discreto la lente ACL25416U-A ofrece esas características a un precio razonable.

Respecto a la fuente óptica para mejorar un sistema de colimación se busca que no incorpore lentes que extiendan su patrón de radiación y su área de emisión sea lo más pequeña posible.

Lente	Fuente óptica	Rol del componente en el sistema	Potencia de la fuente (Watts)	Potencia incidente en la superficie (Watts)	Pérdidas (dB)	Precio (€)
ACL2018U-A	XHP50A-00-0000-0D0BH430E-SB01	Lente colimadora	8.4	3.54	3.75	26.32
		Lente de enfoque		1.68e-2	26.98	
		Detector		1.6e-2	27.2	
	L2C5-30901205F1300	Lente colimadora	21	16.03	1.18	
		Lente de enfoque		2.32e-2	29.56	
		Detector		2.18e-2	29.83	
ACL25416U-A	XHP50A-00-0000-0D0BH430E-SB01	Lente colimadora	8.4	4.87	2.36	26.56
		Lente de enfoque		4.52e-2	22.6	
		Detector		3.4e-2	23.9	
	L2C5-30901205F1300	Lente colimadora	21	16.16	1.13	
		Lente de enfoque		2.96e-2	28.65	
		Detector		2.13e-2	29.9	
ACL7560U-A	XHP50A-00-0000-0D0BH430E-SB01	Lente colimadora	8.4	3.78	3.56	64.42
		Lente de enfoque		2.13	5.95	
		Detector		0.55	11.8	
	L2C5-30901205F1300	Lente colimadora	21	20.7	0.06	
		Lente de enfoque		3.15	8.26	
		Detector		1.40	11.8	
Lupa	XHP50A-00-0000-0D0BH430E-SB01	Lente colimadora	8.4	2.27	5.68	1.50
		Lente de enfoque		0.7	10.8	
		Detector		0.155	17.3	
	L2C5-30901205F1300	Lente colimadora	21	20	0.21	
		Lente de enfoque		1.6	11.18	
		Detector		0.33	18.0	

Tabla 5.10 Resumen de simulaciones para un sistema VLC LOS.

### 5.3 Enlace VLC *non-directed* LOS utilizando un LED como fuente óptica.

Para aplicaciones VLC en interiores, la configuración *non-directed* LOS se considera la configuración más flexible, utiliza transmisores de haz ancho y receptores con FOV amplios. Este tipo de enlace es adecuado para aplicaciones de transmisión punto a multipunto. Ofrece robustez al bloqueo y no requiere alineación ni seguimiento, sin embargo, incurren en una alta pérdida de potencia debido al patrón de radiación de la fuente. El escenario óptico inalámbrico propuesto se muestra en la Fig. 5.13, donde el transmisor proporciona tanto datos como iluminación.

Son muchas las variables que afectan la potencia recibida principalmente tenemos: las fuentes ópticas utilizadas; la ubicación y tamaño del fotodetector; el campo de visión de la lente de enfoque; la orientación de la lente; y, la distancia y el ángulo entre la fuente óptica y la lente.

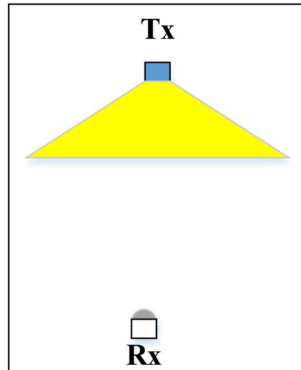


Fig. 5.13 Enlace VLC *non-directed* LOS propuesto.

La elección de los componentes ópticos se realiza tomando los criterios del apartado anterior por lo tanto la configuración del simulador es exactamente la misma con la única diferencia que no existe una lente colimadora.

### 5.3.1 Comparación de lentes en un sistema *non-directed* LOS utilizando un LED como fuente óptica.

Para el análisis individual del rendimiento de los componentes se realiza la comparación de: i) la cantidad de luz y por lo tanto potencia incidente en la superficie de la lente; ii) el campo de visión angular de las lentes; y, iii) el tamaño de punto de enfoque de las lentes. En la Tabla 5.12 se presentan los resultados de cada una de las simulaciones realizadas. Los resultados son producto de ocho simulaciones, en donde se configuran las fuentes ópticas de la Tabla 5.7 con cada una de las lentes propuestas en la Tabla 5.8 y Tabla 5.9. El objetivo de esta configuración es analizar que parámetro óptico de la lente mejora la potencia en el receptor, además se busca confirmar que una lente hemisférica (tipo domo) mejora la movilidad en sistemas *non-directed* LOS VLC.

Las pérdidas máximas en el sistema de enfoque son de 39.11 dB, estas pérdidas se consiguen utilizando la lente de diámetro más pequeño (ACL2018U-A) y el LED XHP50A. En la Fig. 5.14 se observa que a medida que el diámetro de la lente aumenta, las pérdidas se reducen; esto debido a que, al tener una superficie más grande, la lente puede captar mayor cantidad de luz, así la lente ACL7560U-A con la misma fuente óptica consigue pérdidas de 28.3 dB. Por otra parte, si se compara la misma lente, pero con diferente fuente óptica se encuentra que el LED L2C5 introduce menos pérdidas, este resultado es el esperado debido al diagrama de radiación del LED. Es importante destacar que el análisis se centra en las pérdidas que cada elemento introduce en el sistema y no la potencia recibida ya que la diferencia de potencia de las fuentes es muy grande y se perdería la perspectiva de la comparación.

Dependiendo del tipo de aplicación el uso de una u otra lente de las comparadas puede ser discutible. Por ejemplo, si no existe limitación en el tamaño del receptor el uso de lentes de mayor diámetro mejora el rendimiento del sistema, por otro lado, la geometría de la lente es otro punto importante: al existir mayores pérdidas por la divergencia de la fuente, enfocar y transferir toda la potencia incidente en la superficie de la lente hacia el fotodetector se vuelve un factor más importante. En la Fig. 5.14 se observa que la lupa es la lente que más pérdidas introduce debido al tamaño del punto de enfoque. Si bien por su bajo coste es una opción a tomar en cuenta no deben existir limitaciones en el peso y tamaño del sistema de detección.



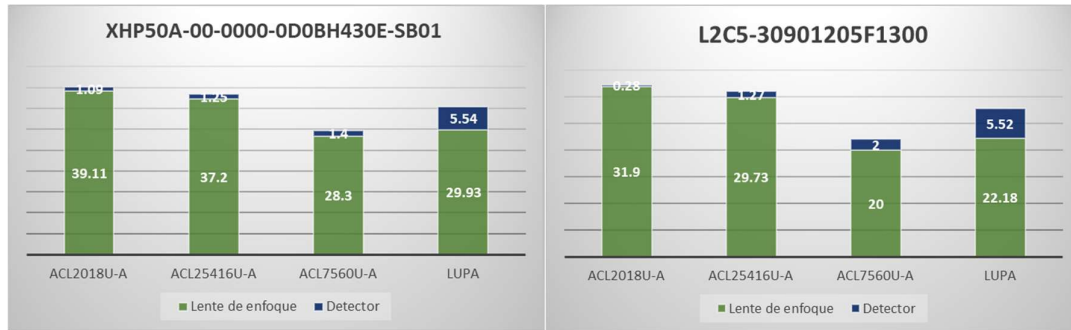


Fig. 5.14 Resumen de las pérdidas de potencia en dB de los resultados de las simulaciones en Zemax.

Otro factor por tomar en cuenta es la movilidad. Algunos autores utilizan lentes hemisféricas para mejorar la movilidad en el receptor, sin embargo, hay algunos detalles que no quedan claros. Como se explica en el capítulo 3 el AFOV depende tanto del tamaño del detector como de la longitud focal de la lente. En la ec.(3.32) se establece que la longitud focal es proporcional al radio de curvatura es decir que entre más plano es el lente mayor será su longitud focal y por tanto menor su AFOV. En este sentido una lente hemisférica no necesariamente será mejor que una lente plana, todo depende de su AFOV (lente y tamaño del detector). Utilizar un detector más grande implica reducir su ancho de banda por lo que se recomienda el uso de lentes con longitudes focales más cortas.

Para calcular el AFOV de una lente de imagen se utiliza la ec.(3.38), los cálculos se resumen en la Tabla 5.11 Para validar los resultados de los cálculos, se utilizan las herramientas de optimización del simulador y a través de una gráfica se puede comparar la potencia recibida en el fotodetector en función del ángulo de inclinación de la lente. Como valor puntual de AFOV se toma el ángulo para el cual la potencia ha caído a la mitad (criterio de 3dB) ver Fig. 5.15.

Al ser una ecuación sencilla sin más variables se puede concluir que la lente que mejor movilidad presenta es la lente con la menor longitud focal (ACL2018U-A) ya que el tamaño del detector es el mismo para todas las lentes. Con estos resultados se puede comprobar que una lente plana (lupa) tiene un AFOV similar a una lente tipo domo.

Lente	AFOV calculado (deg)	AFOV simulado (deg)
ACL2018U-A	3.16	3.2
ACL25416U-A	3.57	3.55
ACL7560U-A	0.95	1.35
Lupa	1.23	1.13

Tabla 5.11 Comparación del AFOV calculado vs los resultados de la simulación utilizando el LED L2C5.

En resumen, se puede decir que el grado de movilidad en el detector depende del AFOV (longitud focal y tamaño del detector) y no necesariamente de que tan hemisférica es una lente. Para captar la mayor cantidad de luz en el receptor se recomienda el uso de lentes de mayor diámetro. Una lente esférica introduce mas pérdidas en el sistema de detección que una lente esférica debido al tamaño del punto de enfoque.

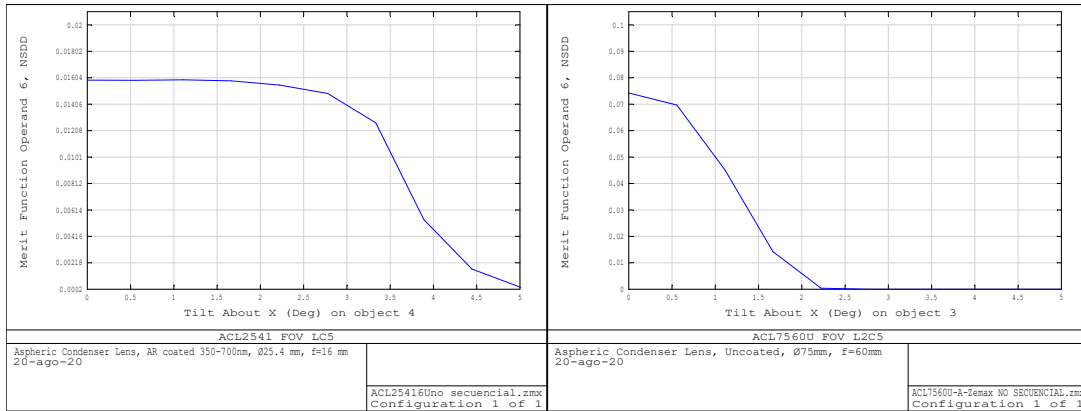


Fig. 5.15 Potencia incidente el fotodetector en función del ángulo de inclinación de la lente: a) ACL25416U-A; y, b) ACL7560U-A

Lente	Fuente óptica	Rol del componente en el sistema	Potencia de la fuente (Watts)	Potencia incidente en la superficie (Watts)	Pérdidas (dB)	Precio (€)
ACL2018U-A	XHP50A-00-0000-0D0BH430E-SB01	Lente de enfoque	8.4	1.03e-3	39.11	26.32
		Detector		0.80e-3	40.2	
	L2C5-30901205F1300	Lente de enfoque	21	1.35e-2	31.9	
		Detector		1.27e-2	32.18	
ACL25416U-A	XHP50A-00-0000-0D0BH430E-SB01	Lente de enfoque	8.4	1.58e-3	37.2	26.56
		Detector		1.20e-3	38.45	
	L2C5-30901205F1300	Lente de enfoque	21	2.23e-2	29.73	
		Detector		1.58e-2	31	
ACL7560U-A	XHP50A-00-0000-0D0BH430E-SB01	Lente de enfoque	8.4	1.24e-2	28.30	64.42
		Detector		0.9e-2	29.7	
	L2C5-30901205F1300	Lente de enfoque	21	0.18	20	
		Detector		0.13	22	
Lupa	XHP50A-00-0000-0D0BH430E-SB01	Lente de enfoque	8.4	8.52e-3	29.93	1.50
		Detector		2.38e-3	35.47	
	L2C5-30901205F1300	Lente de enfoque	21	0.127	22.18	
		Detector		3.56e-2	27.7	

Tabla 5.12 Resumen de simulaciones para un sistema VLC NLOS

## 6 Conclusiones y líneas futuras.

Este documento presenta un análisis del funcionamiento de diferentes lentes esféricas y esféricas en sistemas VLC. De manera general se ha demostrado que el uso de la óptica geométrica es válido para el diseño y análisis de lentes esféricas en sistemas de colimación utilizando fuentes láser. El uso de un software complejo de simulación permite el análisis, comparación y optimización de diferentes componentes ópticos comerciales con el fin de mejorar el rendimiento de sistemas VLC. El uso de lentes de imagen como colimadores y concentradores ópticos mejora el rendimiento, en términos de potencia en un sistema VLC.

En un sistema VLC PtP utilizando el LD (L650P007) como fuente óptica el uso de lentes esféricas mejora las prestaciones del sistema disminuyendo la divergencia del haz colimado y aumentando la distancia de colimación del haz. Utilizar un recubrimiento óptico AR también es importante para disminuir las pérdidas debido a reflexiones. El uso de lentes esféricas plásticas o acrílicas para la colimación de una fuente láser se convierte en la mejor opción por su bajo coste, peso y tamaño. Si bien la óptica geométrica es útil tanto para el diseño como para el análisis de radios y divergencia de un haz producido por una lente esférica se recomienda el uso de un software de diseño avanzado para ampliar los resultados. El software es útil para el análisis de los elementos individuales; cuantificar las pérdidas de potencia que cada uno de los elementos puede introducir al sistema; y, tener una idea muy próxima a la realidad del comportamiento y eficiencia de un diseño de focalización. No se debe olvidar que una correcta configuración de los parámetros a simular es fundamental para que los resultados sean correctos y no exista una mala interpretación de datos. Cuando los ángulos de divergencia de la fuente y el diámetro de la lente son relativamente pequeños el tamaño de punto de enfoque no se convierte en un factor crítico. Se demuestra que la aberración producida por una lente esférica distorsiona el perfil de haz gaussiano de la fuente. Las herramientas de optimización del simulador son de gran utilidad cuando se requiere mejorar las prestaciones del sistema óptico.

En un sistema VLC *directed* LOS la elección de lentes dependerá de la fuente óptica utilizada. Los resultados de las simulaciones arrojan que el LED XHP50A introduce menos pérdidas al sistema que el LED L2C5. De esto se puede concluir que el área de emisión de la fuente puede convertirse en un factor más importante que su patrón de radiación por lo que se recomienda el uso de fuentes con áreas de emisión pequeñas. Si el tamaño y el peso de los componentes ópticos no es un factor crítico en aplicaciones concretas el uso de lentes esféricas de bajo costo es una muy buena opción a considerar. Por otro lado, si lo que se busca es maximizar la potencia del sistema se recomienda el uso de lentes esféricas con una N.A muy alta y longitudes focales cortas.

En un sistema VLC non-*directed* LOS una lente hemisférica no necesariamente presenta mejores prestaciones de movilidad que una lente plana. El AFOV depende tanto de la longitud focal de la lente como del tamaño del detector. Si se requiere un mayor rango de movilidad en el receptor se recomienda el uso de lentes con focales cortas, sin embargo, por lo general una lente de longitud focal corta tendrá diámetros menores recolectando menor cantidad de luz y por lo tanto la potencia óptica recibida será menor. Como en cualquier sistema de comunicación es importante guardar un equilibrio en los parámetros del sistema; en este caso se puede mejorar el rango de movilidad en el detector a costa de recibir menos potencia.

El trabajo se desarrolla en el marco del proyecto de investigación RTI2018-101658-B-I00, titulado “Redes Ópticas Híbridas Energéticamente Eficientes para Comunicaciones e Iluminación en Interiores”. Este documento y sus resultados servirán como punto de partida en el desarrollo del proyecto como investigador predoctoral contratado. El proyecto consiste en la definición de la arquitectura de una red híbrida (POF+VLC) en interiores empleando el espectro visible (Fi2VLC) para dar cobertura y servicios a las redes 5G en residencias y oficinas. En una primera etapa se espera realizar medidas experimentales de throughput utilizando esquemas M-QAM, utilizando los componentes ópticos recomendados en este trabajo para aumentar las distancias de transmisión y las

velocidades de datos. En una segunda etapa se buscará utilizar lentes de imagen como concentradores ópticos en esquemas MIMO.

## 7 Bibliografía.

- [1] Cisco, “Cisco VNI Global IP Traffic Forecast, 2017-2022,” 2018.
- [2] L. U. Khan, “Visible light communication: Applications, architecture, standardization and research challenges,” *Digital Communications and Networks*, vol. 3, no. 2. pp. 78–88, 2017.
- [3] H. Le Minh, Z. Ghassemlooy, D. O’Brien, and G. Faulkner, “Indoor Gigabit optical wireless communications: Challenges and possibilities,” *2010 12th Int. Conf. Transparent Opt. Networks, Ict. 2010*, vol. 1, pp. 1–6, 2010.
- [4] Z. Lu *et al.*, “Active tracking system for visible light communication using a GaN-based micro-LED and NRZ-OOK,” *Opt. Express*, vol. 25, no. 15, p. 17971, 2017.
- [5] P. Pesek, S. Zvanovec, P. Chvojka, Z. Ghassemlooy, and P. A. Haigh, “Demonstration of a hybrid FSO/VLC link for the last mile and last meter networks,” *IEEE Photonics J.*, vol. 11, no. 1, 2019.
- [6] G. Cossu, A. M. Khalid, P. Choudhury, R. Corsini, and E. Ciaramella, “34 Gbit/s visible optical wireless transmission based on RGB LED,” *Opt. Express*, vol. 20, no. 26, p. B501, 2012.
- [7] T. Fath and H. Haas, “Performance comparison of MIMO techniques for optical wireless communications in indoor environments,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 2, pp. 733–742, 2013.
- [8] P. Chvojka *et al.*, “On the m-CAP Performance with Different Pulse Shaping Filters Parameters for Visible Light Communications,” *IEEE Photonics J.*, vol. 9, no. 5, 2017.
- [9] R. Deng, J. He, M. Chen, and Y. Zhou, “Experimental Demonstration of a Real-Time gigabit OFDM-VLC system with a cost-efficient precoding scheme,” *Opt. Commun.*, vol. 423, no. April, pp. 69–73, 2018.
- [10] S. Rajbhandari *et al.*, “A review of gallium nitride LEDs for multi-gigabit-per-second visible light data communications,” *Semicond. Sci. Technol.*, vol. 32, no. 2, 2017.
- [11] D. Tsonev *et al.*, “A 3-Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a gallium nitride  $\mu$  LED,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 26, no. 7, pp. 637–640, 2014.
- [12] A. R. Ndjongue and K. Ouahada, “Capacity of Outdoor VLC Links Using a Visible LASER Beam,” in *2019 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*, 2019, pp. 1–6.
- [13] A. Neumann, J. J. Wierer, W. Davis, Y. Ohno, S. R. J. Brueck, and J. Y. Tsao, “Four-color laser white illuminant demonstrating high color-rendering quality,” *Opt. Express*, vol. 19, no. S4, p. A982, 2011.
- [14] Y. Chen, S. Wen, Y. Wu, Y. Ren, W. Guan, and Y. Zhou, “Long-range visible light communication system based on LED collimating lens,” *Opt. Commun.*, vol. 377, pp. 83–88, 2016.
- [15] A. T. Hussein and J. M. H. Elmirghani, “Mobile Multi-Gigabit Visible Light Communication System in Realistic Indoor Environment,” *J. Light. Technol.*, vol. 33, no. 15, pp. 3293–3307, 2015.
- [16] R. Mulyawan *et al.*, “A comparative study of optical concentrators for visible light communications,” *Broadband Access Commun. Technol. XI*, vol. 10128, p. 101280L, 2017.
- [17] A. M. J. Koonen, H. P. A. Van Den Boom, E. Tangdiongga, H. D. Jung, and P. Guignard, “Designing in-building optical fiber networks,” *Opt. InfoBase Conf. Pap.*, no. 1, pp. 2–4, 2010.
- [18] G. Jordan and K. Campos, “Latin America Broadband Roundup: Top 4 Markets Generated \$11.93 Billion In 2018 | S&P Global Market Intelligence,” 13-May-2019. [Online]. Available: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/research/latin-america-broadband-roundup-top-4-markets-generated-12-billion-in-2018>. [Accessed: 25-Jun-2020].
- [19] O. Ziemann, J. Krauser, P. E. Zamzow, and W. Daum, *POF Handbook*. Berlin, Heidelberg: Springer

- Berlin Heidelberg, 2008.
- [20] R. Gindera, I. Mollers, M. Bulters, D. Kalinowski, and D. Jager, "Recent Developments in Polymer Optical Fiber (POF) Transceivers," in *2007 9th International Conference on Transparent Optical Networks*, 2007, vol. 00, pp. 54–57.
- [21] M. C. J. Large, L. Poladian, G. W. Barton, and M. A. Van Eijkelenborg, *Microstructured polymer optical fibres*. 2008.
- [22] P. Kröplin *et al.*, "Overview of the POF market," in *Polymer Optical Fibres*, Elsevier, 2017, pp. 349–400.
- [23] G. Stepniak, M. Schüppert, and C.-A. Bunge, "Polymer-optical fibres for data transmission," in *Polymer Optical Fibres*, Elsevier, 2017, pp. 217–310.
- [24] Y. Wang, J. Muller, and J. Speidel, "3Gbit/s transmission over plastic optical fiber with adaptive Tomlinson-Harashima precoded systems," *Dig. Tech. Pap. - IEEE Int. Conf. Consum. Electron.*, pp. 629–632, 2013.
- [25] R. Kruglov, S. Loquai, C. A. Bunge, M. Schueppert, J. Vinogradov, and O. Ziemann, "Comparison of PAM and CAP modulation schemes for data transmission over SI-POF," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 25, no. 23, pp. 2293–2296, 2013.
- [26] S. Loquai *et al.*, "Comparison of modulation schemes for 10.7 Gb/s transmission over large-core 1 mm PMMA polymer optical fiber," *J. Light. Technol.*, vol. 31, no. 13, pp. 2170–2176, 2013.
- [27] H. Sun, *A Practical Guide to Handling Laser Diode Beams*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2015.
- [28] Edmund Optics, "Gaussian Beam Propagation ." [Online]. Available: <https://www.edmundoptics.es/knowledge-center/application-notes/lasers/gaussian-beam-propagation/>. [Accessed: 27-Jun-2020].
- [29] I. C. Lu, C. H. Yeh, D. Z. Hsu, and C. W. Chow, "Utilization of 1-GHz VCSEL for 11.1-Gbps OFDM VLC Wireless Communication," *IEEE Photonics J.*, vol. 8, no. 3, pp. 1–6, 2016.
- [30] Y.-C. Chi, D.-H. Hsieh, C.-T. Tsai, H.-Y. Chen, H.-C. Kuo, and G.-R. Lin, "450-nm GaN laser diode enables high-speed visible light communication with 9-Gbps QAM-OFDM," *Opt. Express*, vol. 23, no. 10, p. 13051, 2015.
- [31] S. H. Ghasemi *et al.*, "Designing a plano-convex aspheric lens for fiber optics collimator," *Opt. Lasers Eng.*, vol. 50, no. 2, pp. 293–296, 2012.
- [32] R. Winston, L. Jiang, and M. Ricketts, "Nonimaging optics: a tutorial," *Adv. Opt. Photonics*, vol. 10, no. 2, p. 484, 2018.
- [33] H. Al Hajjar, B. Fracasso, and F. Lamarque, "Mini optical concentrator design for indoor high bit rate optical wireless communications," *Proc. 2013 2nd Int. Work. Opt. Wirel. Commun. IWOW 2013*, pp. 147–151, 2013.
- [34] W. T. WELFORD and R. WINSTON, *High Collection Nonimaging Optics*. Elsevier, 1989.
- [35] B. Yu *et al.*, "Performance Investigation on Hemispherical Lens used in Photodetector for Visible Light Communications," *2019 20th Int. Conf. Electron. Packag. Technol. ICEPT 2019*, pp. 20–23, 2019.
- [36] G. Li, Y. Su, G. Pei, X. Yu, J. Ji, and S. Riffat, "Preliminary experimental comparison of the performance of a novel lens-walled compound parabolic concentrator (CPC) with the conventional mirror and solid CPCs," *Int. J. Green Energy*, vol. 10, no. 8, pp. 848–859, 2013.
- [37] B. Saleh, "Fundamentals of Photonics." 1991.
- [38] A. Ghatak, *Optics*, McGraw-Hil. International Society for Optical Engineering, 2007.
- [39] M. A. Stepanov and I. I. Sukhanov, "The spherical and aspheric surfaces lens collimators: The aperture and aberration features," *2016 13th Int. Sci. Conf. Actual Probl. Electron. Instrum. Eng. APEIE 2016 - Proc.*, vol. 2, pp. 187–189, 2016.

- [40] V. N. Mahajan, *Fundamentals of Geometrical Optics*. SPIE, 2014.
- [41] W. D. Philpot and W. Philipson, “Remote Sensing Fundamentals,” 2012.
- [42] “RP Photonics Encyclopedia - Abbe number, chromatic dispersion, constringence, V-number, focal length mismatch.” [Online]. Available: [https://www.rp-photonics.com/abbe\\_number.html](https://www.rp-photonics.com/abbe_number.html). [Accessed: 26-Jul-2020].
- [43] “Fiber Optic Physics.” [Online]. Available: <https://www.newport.com/n/fiber-optic-physics>. [Accessed: 07-Jun-2020].
- [44] “OpticStudio | Optical, Illumination & Laser System Design Software - Zemax.” [Online]. Available: <https://www.zemax.com/products/opticstudio>. [Accessed: 21-Jul-2020].
- [45] J. M. Geary, *Introduction to Lens Design: With Practical ZEMAX Examples*. Willmann-Bell, 2002.
- [46] H. Sun, *Lens Design: A Practical Guide*. CRC Press, 2016.
- [47] V. Sudarsan, “Optical Materials,” in *Functional Materials*, Elsevier, 2012, pp. 285–322.
- [48] A. Symmons, “Abbe Diagram,” in *Field Guide to Molded Optics*, SPIE PRESS.
- [49] Thorlabs, “Thorlabs.” [Online]. Available: <https://www.thorlabs.com/index.cfm>. [Accessed: 23-Aug-2020].
- [50] J. M. Kahn, “Wireless infrared communications,” *Proc. IEEE*, vol. 85, no. 2, pp. 265–298, 1997.
- [51] LUMILEDS, “LUXEON CoB Core Range Product Datasheet,” 2019.
- [52] CREE, “PRODUCT FAMILY DATA SHEET Cree ® XLamp ® XHP50 LEDs PRODUCT DESCRIPTION,” 2014.
- [53] “Lupa 60mm 5X.” [Online]. Available: [https://es.aliexpress.com/item/4000996305673.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.70e5120f10dlus&algo\\_pvid=8d2566b4-0c79-4b5c-91b9-4f5497a74b41&algo\\_expid=8d2566b4-0c79-4b5c-91b9-4f5497a74b41-18&btsid=0b0a01f815977889690894895e2ce8&ws\\_ab\\_test=searchweb0\\_0,searchweb201602\\_,searchweb201603\\_](https://es.aliexpress.com/item/4000996305673.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.70e5120f10dlus&algo_pvid=8d2566b4-0c79-4b5c-91b9-4f5497a74b41&algo_expid=8d2566b4-0c79-4b5c-91b9-4f5497a74b41-18&btsid=0b0a01f815977889690894895e2ce8&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_,searchweb201603_). [Accessed: 19-Aug-2020].

## A. ANEXOS

### A.1 Familia de lentes comerciales de Thorlabs.

#### Lentes planoconvexas.

Las lentes planoconvexas de Thorlabs tienen una distancia focal positiva y se pueden usar para enfocar luz colimada o para colimar una fuente puntual. La Tabla A.1 resume los diferentes tipos de lentes planoconvexas de Thorlabs y sus características ópticas.

Sustrato	Diámetro	Calidad de superficie	Longitud focal	Recubrimientos
N-BK7	2 mm and 3 mm	60-40 Scratch-Dig	4 mm-2500mm	Uncoated A Coating (350 - 700 nm) AB Coating (400 - 1100 nm) B Coating (650 - 1050 nm) C Coating (1050 - 1700 nm) D Coating (1650 - 3000 nm)
	6 mm, 9 mm, 1/2", 18 mm, 25 mm, 1", 30 mm, 2", y 75 mm	40-20 Scratch-Dig		
UVFS	2 mm and 3 mm	60-40 Scratch-Dig	4mm-1000mm	Uncoated, B Coating (650 - 1050 nm) C Coating (1050 - 1700 nm) YAG V-Coating (532/1064 nm) YAG V-Coating (532/1064 nm) 532 V-Coating (532 nm) 633 V-Coating (633 nm) 1064 V-Coating (1064 nm)
	5 mm, 6 mm, 1/2", 1", 2", y 3"	40-20 Scratch-Dig		
N-SF11	2 mm y 3 mm	60-40 Scratch-Dig	4 mm, 6 mm, and 9 mm	Uncoated: 420 nm - 2.3 $\mu$ m, A Coated: 350 - 700 nm, B Coated: 650 - 1050 nm, C Coated: 1050 - 1700 nm,
CaF2	1/2", 1" y 2"	40-20 Scratch-Dig	20.0 mm - 1000.0 mm	Uncoated (0.18 - 8.0 $\mu$ m) D Coated (1.65 - 3.0 $\mu$ m) E Coated (2 - 5 $\mu$ m)
MgF2	1"	40-20 Scratch-Dig	200 nm 486 nm 633 nm 2.0 $\mu$ m	Uncoated (200 nm - 6 $\mu$ m)
Si	1/2" y 1"	60-40 Scratch-Dig	15.0 mm - 1000.0 mm	E Coated (2 - 5 $\mu$ m)
ZnSe	1/2" y 1"	60-40 Scratch-Dig	15.0 mm to 1000.0 mm	E2 Coated (4.5 - 7.5 $\mu$ m) E3 Coated (7 - 12 $\mu$ m)

Tabla A.1 Características ópticas de lentes planoconvexas de Thorlabs.

#### Lentes esféricas

Las lentes esféricas de Thorlabs están disponibles moldeadas, pulidas con CNC o pulidas con MRF (*Magnetorheological finishing*), con o sin recubrimientos antirreflectantes. En comparación con sus contrapartes de lentes esféricas moldeadas, las lentes pulidas por CNC están disponibles en tamaños más grandes, proporcionan una mejor calidad de superficie y por tanto de imagen.

Lentes esféricas moldeadas			
Recubrimiento	Longitud focal efectiva	N. A	Calidad de superficie
Uncoated	4.51 mm	0.55	40-20 Scratch-Dig
	6.24 mm	0.4	
	8.00 mm	0.5	
	11.00 mm	0.26	
350 - 700 nm (-A Coating)	1 mm-18.40 mm	0.15-0.7	60-40 Scratch-Dig
600 - 1050 nm (-B Coating)	1 mm-18.40 mm	0.15-0.8	

1050 - 1700 nm (-C Coating)	1.873 mm - 1.59 mm	0.5-0.85
405 o 1064 nm V-Coating	4mm-18 mm	0.15-0.60

Tabla A.2 Características ópticas de lentes esféricas moldeadas de Thorlabs.

<b>Lentes esféricas pulidas de precisión</b>				
<b>Diámetro</b>	<b>Longitud focal efectiva</b>	<b>Sustrato</b>	<b>N. A</b>	<b>Recubrimiento</b>
10 mm -100 mm	8mm -200mm	N-BK7 / S-LAH64	0.23-0.61	A:350 - 700 nm B:650 - 1050 nm C:1050 - 1700 nm
13 diámetros diferentes: 10mm - 75 mm	8mm-60mm	B270	0.52-0.79	Uncoated: 380 - 2100 nm A: 350 - 700 nm B: 650 - 1050 nm

Tabla A.3 Características ópticas de lentes esféricas pulidas de Thorlabs

Las lentes de condensador esférico de Thorlabs ofrecen N.A más grandes, y distancias focales pequeñas. Por lo tanto, estas lentes son ideales para aplicaciones de iluminación de alta eficiencia o para colimar la luz de una lámpara, LED o fuente de luz similar.

<b>Lentes de condensador esféricas</b>				
<b>Diámetro</b>	<b>Longitud focal efectiva</b>	<b>Sustrato</b>	<b>N. A</b>	<b>Recubrimiento</b>
13 diámetros diferentes: 10mm - 75 mm	8mm-60mm	B270	0.52-0.79	Uncoated: 380 - 2100 nm A: 350 - 700 nm B: 650 - 1050 nm

Tabla A.4 Características ópticas de lentes esféricas (tipo condensador) de Thorlabs

Las lentes esféricas de Thorlabs con difusores están diseñadas para colimar la luz de lámparas, LED o fuentes similares en un patrón de iluminación altamente uniforme.

<b>Diámetro</b>	<b>Longitud focal efectiva</b>	<b>Sustrato</b>	<b>N. A</b>	<b>Recubrimiento</b>
25 mm y 50 mm	12mm-26mm	B270	0.6	Uncoated: 380 - 2100 nm A: 350 - 700 nm B: 650 - 1050 nm

Tabla A.5 Características ópticas de lentes esféricas con superficie difusora de Thorlabs



## A.2. Características de los principales materiales ópticos utilizados en lentes comerciales.

Sustrato	Rango de transmisión sin recubrimiento óptico	Número de Abbe	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Dureza de Knoop (kg/mm <sup>2</sup> )	Young's Modulus (GPa)	Shear Modulus (GPa)	Bulk Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Coefficiente de expansión térmico (x 10 <sup>-6</sup> /°C)	Specific Heat (J/(g*°K))	Softening Point (°C)	dn/dTd (x 10 <sup>-6</sup> /°C)
Acrílico	380 nm - 1.6 $\mu$ m	52.6	1.18	-	3.2	1.2	3.6	0.35	70	1.465	100	-85
D-K59	380 nm - 2 $\mu$ m	63.1	-	-	-	-	-	-	6.5	-	-	4.3
H-LAK54	380 nm - 2.05 $\mu$ m	51.05	4.01	770	113.87	44	92.1	0.294	5.2	0.528	639	5.7 @ 1014 nm
Policarbonato	380 nm - 1.6 $\mu$ m	27.56	1.21	-	2.24	0.82	2.9	0.37	70.2	1.3	130	-107
ZnSe	600 nm - 16 $\mu$ m	-	5.27	112	67.2	n/a	40°	0.28	7.1	0.399	1520	61 @ 10.6 $\mu$ m
NBK7	380 nm - 2.1 $\mu$ m	64.17	2.51	520	82	34	46.5	0.206	7.1	0.858	550	2.4 @ 10.6 $\mu$ m
UVFS	195 nm - 2.1 $\mu$ m	67.82	2.203	461	73.6	31.4	37.2	0.17	0.55	0.736	1585	11.9 @ 10.6 $\mu$ m
CAF2	170 nm - 8 $\mu$ m	95.31	3.18	158.3	75.8	33.77	82.71	0.26	18.85	0.854	1418	10.6 @ 10.6 $\mu$ m
MgF2	150 nm - 6.5 $\mu$ m	106.22	3.177	415	138.5	54.66	101.32	0.276	13.7	1.003	1255	2.3 @ 400 nm
N-SF11	420 nm - 2.3 $\mu$ m	25.68	3.22	615	92	36.6	63.1	0.257	8.5	0.71	592	0.1 @ 10.6 $\mu$ m

### A3. Diseño de una lente colimadora utilizando óptica geométrica.

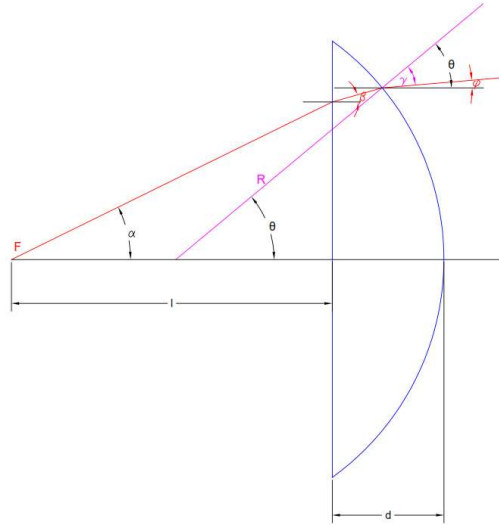


Fig. A.1 Trazado de rayos a través de una lente planoconvexa.

Primero se considera el caso de una lente planoconvexa como se muestra en la Fig. A.1. Según la ley de Snell ec.3.6 y siguiendo los principios de óptica geométrica se plantean las siguientes ecuaciones:

$$n_2 \sin(\theta - \beta) = \sin \gamma \quad (\text{A.1})$$

$$\phi = \theta - \gamma \quad (\text{A.2})$$

$$\tan(\beta) = \frac{R \sin(\theta) - l \tan(\alpha)}{d - R(1 - \cos(\theta))} \quad (\text{A.3})$$

Para lograr la colimación del haz  $\phi = 0$ . Los parámetros iniciales de diseño se resumen en la Tabla A.6. donde:  $\alpha$  es la mitad del ángulo de divergencia del láser L650P007;  $n_2$  es el índice de refracción del lente;  $d$  es el espesor del lente;  $l$  es la distancia entre la fuente óptica y la primera superficie del lente (longitud focal de trabajo);  $R$  es el radio de curvatura del lente,  $y$ ;  $D$  es el diámetro del lente

$\alpha$ (deg)	$n_2$ K9	$d$ (mm)	$l$ (mm)	$D$ (mm)
14	1.514	0.65	8.0	5

Tabla A.6 Parámetros iniciales de diseño.

Para obtener el radio de curvatura de la lente se despeja la ec.(A.3,)

$$R = \frac{d \tan(\theta) + l \tan(\alpha)}{\sin(\theta) + \tan(\beta)(1 - \cos(\theta))} \quad (\text{A.4})$$

En este punto para resolver la ec.(A.4) todas las variables son conocidas a excepción de  $\theta$ . Para calcular  $\theta$  a partir de las ec.(A.1) y ec.(A.2) se plantea:

$$\beta = \text{ArcSin}\left(\frac{\sin(\alpha)}{n_2}\right) \quad (\text{A.5})$$

$$\gamma = \text{ArcSin}(n_2 \text{Sin}(\theta - \beta)) \quad (\text{A.6})$$

$$0 = \theta - \gamma = \theta - \text{ArcSin}(n_2 \text{Sin}(\theta - \beta)) \quad (\text{A.7})$$

Utilizando las ecuaciones planteadas se resuelve numéricamente la ec.7.4 obteniendo un radio de curvatura  $R=5.02$ .

Finalmente, a través de la ec.(3.31) se calcula el ángulo de divergencia  $\theta_d = 1.1^\circ$  y el radio de colimación  $R=1.340\text{mm}$ .