

FACULTAD DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA



IK4  TEKNIKER  
Research Alliance

DISPOSITIVO DE DIODOS LÁSER PARA  
MICROSOLDADURA DE TERMOPLÁSTICOS: ESTUDIO,  
DISEÑO Y DESAROLLO DE UN PROTOTIPO INDUSTRIAL

TESIS DOCTORAL

MEMORIA PRESENTADA POR

Eva Rodríguez Vidal

Santander, Noviembre 2015



Departamento de Física Aplicada

Facultad de Ciencias

Universidad de Cantabria

Tesis Doctoral

**Dispositivo de diodos láser para microsoldadura de termoplásticos: estudio, diseño y desarrollo de un prototipo industrial**

---

**A diode laser sstem for welding thermoplastics: study, design and development of an industrial prototype**

Eva Rodríguez Vidal

Tesis dirigida por:

Prof. Francisco González Fernandez

Prof. Fernando Moreno Gracia

Iban Quitana Fernández

Santander, Noviembre 2015



Profs. Francisco González y Fernando Moreno, catedráticos de óptica de la Universidad de Cantabria e Iban Quintana, investigador del centro tecnológico IK4-TEKNIKER, **certifican**:

Que la presente memoria, titulada "***Dispositivo de diodos láser para microsoldadura de termoplásticos; estudio, diseño y desarrollo de un prototipo industrial***", ha sido realizada bajo nuestra dirección, por Eva Rodríguez Vidal y constituye su Tesis para optar al grado de Doctora en Ciencias Físicas por la Universidad de Cantabria. Asimismo emitimos nuestra conformidad para que dicha memoria sea depositada, y una vez cumplidos los trámites legales, defendida ante el tribunal designado para tal efecto.

Santander, 14 de Septiembre 2015

Fdo. Prof. Francisco González

Fdo. Prof. Fernando Moreno

Fdo. Dr. Iban Quintana



## AGRADECIMIENTOS

Sin ningún lugar a dudas estas son las páginas de la Tesis que con más ansia he esperado que vean la luz. Como no podía ser de otra manera comienzo mostrando mi más sincero agradecimiento a mis directores de Tesis: Paco, Fernando e Iban. Paco, mil gracias por proporcionarme en cada momento las dosis de cal y arena que necesito. Lo llevas haciendo desde que comenzamos a trabajar juntos en mi proyecto Fin de Carrera, he aprendido mucho con ello y espero seguir haciéndolo. Mil gracias por las charlas técnicas que han acabado en charlas personales. Fernando, agradezco enormemente el minucioso trabajo que has realizado en la revisión de la Tesis. Iban, que te voy a contar... Gracias por luchar para que en cada momento tuviese el tiempo necesario de dedicación a la Tesis, por enseñarme a ser crítica con mi trabajo, por enseñarme a pensar. Por supuesto, agradezco a IK4-TEKNIKER y a la Fundación Iñaki Goenaga la oportunidad que me han proporcionado poniendo a mi disposición los medios necesarios para el desarrollo de la presente Tesis.

El trabajo que aquí presentamos no hubiese podido ser llevado a cabo sin el esfuerzo del grupo humano de IK4-TEKNIKER. Etxarri, gracias por estar siempre ahí cuando hay un problema en el laboratorio, por la fabricación de los mil utillajes para las mil y una pruebas. Urko, gracias por el desarrollo mecánico pero sobre todo, gracias por tu implicación, entusiasmo y curiosidad. Maddi y Patxi, que decir del sistema de refrigeración, mil gracias por las ganas y sobre todo por el trabajo bien hecho. Deitze, gracias por iniciarme en el mundo de la investigación y gracias por los buenos momentos que hemos pasado en congresos, incluso aquellos en los que te repetía la presentación por décima vez!. Rocío, gracias por tener siempre un hueco para caracterizar probetas y por hacer que las cosas parezcan sencillas. Gracias al equipo de Tecnologías Avanzadas de Fabricación y a todas las personas que día a día han hecho y hacen que trabajar en IK4-TEKNIKER merezca tanto la pena.

Gracias a las personas que, de una manera u otra, han sido claves en mi vida personal a lo largo de los años de desarrollo de esta Tesis. Maddi, gracias por los momentos en los que la conversación ha dolido y por supuesto, gracias por aquellos en los que nos hemos reído del mundo. Josu, gracias por el día a día, por aportar calma cuando "entro en resonancia", por las explicaciones "barrio-sésamo" que tanto me ayudan y por enseñarme que lo realmente importante son las pelotas de golf. Rosa, gracias por los buenos consejos y la amistad. Juan, gracias por tu paciencia, por apoyarme en todo momento y por los buenos momentos vividos. Gracias a todas las personas que cada cierto tiempo me han preguntado eso de... ¿cómo va la Tesis? Aunque en algún momento no haya mostrado una cara amigable agradezco enormemente el interés.

Gracias a los dos pilares de mi vida a quienes este trabajo pertenece tanto como a mí. Mamá, gracias por el esfuerzo que siempre has realizado para proporcionarnos una educación sólida, por habernos inculcado el valor del trabajo, la constancia, la humildad y por encima de todo gracias por habernos enseñado a ser personas. Xabi, gracias por hacer tuyos mis proyectos, por estar incondicionalmente a mi lado, en los buenos y malos momentos, animándome siempre a continuar. Gracias por los esfuerzos que te ha tocado hacer para que este trabajo vea la luz. Y sobre todo, gracias por hacerme feliz.

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS .....</b>	<b>21</b>
<b>3.</b>	<b>CONSIDERACIONES PREVIAS.....</b>	<b>25</b>
3.1	Diseño óptico .....	25
3.1.1	Un ejemplo: diseño de un sistema de iluminación LED.....	28
3.1.2	El LED como fuente de luz extensa.....	28
3.1.3	Anteproyecto, diseño inicial y proceso de optimización .....	30
3.1.4	Descripción del sistema .....	34
3.1.5	Resultados .....	37
3.1.6	Conclusiones.....	42
3.2	Láseres de semiconductor y su acoplamiento a fibra óptica.....	43
3.3	Calidad de un haz láser .....	45
3.4	Caracterización de la radiación generada por una barra de diodos láser .....	51
3.5	Técnicas de conformado del haz ( <i>Beam Shaping</i> ) para acoplamiento a fibra óptica .....	53
3.5.1	Técnicas de multiplexado .....	54
<b>4.</b>	<b>MODELIZACIÓN ÓPTICA DEL PROTOTIPO LÁSER DE DIODOS .....</b>	<b>63</b>
4.1	Modelización del sistema óptico de acoplamiento a fibra de una barra de diodos láser mediante ZEMAX® .....	63
4.1.1	La fuente láser .....	63
4.1.2	Modelo de conformado del haz: acoplamiento a fibra óptica. ....	69
4.2	Modelización del sistema óptico de acoplamiento a fibra de dos barras de diodos láser mediante ZEMAX® .....	100

4.2.1	Biplexado por polarización .....	100
4.2.2	Sistema de enfoque .....	107
<b>5.</b>	<b>DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL PROTOTIPO LÁSER DE DIODOS .....</b>	<b>113</b>
5.1	Acoplamiento a fibra de una barra de diodos láser .....	113
5.1.1	Caracterización de haz.....	114
5.1.2	Eficiencia del sistema óptico y del acoplamiento a fibra óptica .....	135
5.2	Acoplamiento a fibra de dos barras de diodos láser .....	139
5.2.1	Desarrollo mecánico, eléctrico y termoelectrico del prototipo láser.....	139
5.2.2	Desarrollo óptico .....	153
5.3	Integración del prototipo láser en máquina .....	169
5.3.1	Montaje del prototipo láser en máquina .....	169
5.3.2	Integración del prototipo láser en máquina (integración de elementos mecánicos y de control).....	172
5.3.3	Cabezal óptico para soldadura de termoplásticos.....	174
<b>6.</b>	<b>APLICACIÓN DEL PROTOTIPO LÁSER A LA MICROSOLDADURA DE TERMOPLÁSTICOS .....</b>	<b>183</b>
6.1	Introducción .....	184
6.2	Materiales y método.....	189
6.2.1	Caracterización mecánica de los materiales.....	189
6.2.2	Caracterización óptica de los materiales .....	191
6.2.3	Caracterización térmica de los materiales.....	195
6.3	Soldadura láser por transmisión .....	196
6.3.1	Metodología .....	196
6.3.2	Resultados y discusión.....	199

<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>211</b>
<b>8.</b>	<b>PUBLICACIONES.....</b>	<b>217</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXO I.....</b>	<b>218</b>



# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Si nos tumbamos al sol en un día soleado de verano notamos cómo la temperatura de nuestra piel aumenta al cabo de unos minutos. Pero, ¿por qué ocurre esto? La luz que nos llega del sol transporta cierta energía que, al ser absorbida –al menos en parte– por las células de nuestra piel provoca que ésta se caliente aumentando así su temperatura.

Uno de los factores más relevantes a la hora de determinar el grado de calentamiento que produce un haz de luz sobre un objeto es la intensidad o densidad de potencia de dicho haz al llegar a la superficie del objeto, en otras palabras, cómo de concentrada está la luz (existen también otros factores como el tiempo de exposición o la capacidad de absorción del objeto). Por ejemplo, podemos emplear las lentes de unas gafas para concentrar la luz que llega del sol aumentando su intensidad en un factor de 20-30. Lo anterior nos permite – si somos lo suficientemente hábiles– encender una pequeña hoguera tras un naufragio en una isla desierta perdida en el océano pacífico.

¿Qué podríamos hacer con un haz de luz aún más intenso? Si aumentásemos la intensidad de la luz que nos llega del sol en un factor de 10.000, podríamos calentar una chapa de acero varios cientos de grados, alterando así sus propiedades mecánicas. Si vamos más allá, y alcanzamos una intensidad 1.000.000 o 10.000.000 de veces superior a la del sol, podríamos incluso fundir la superficie de dicha chapa. Si aumentásemos aún más la

## Introducción

intensidad de nuestro haz de luz, podríamos evaporar o sublimar la región irradiada de la superficie de la chapa de acero e incluso podríamos llegar a transformar el material en plasma (el cuarto estado de la materia) produciendo la llamada ablación.

Todo esto y mucho más, lo podemos conseguir con el LÁSER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*). Los haces láser permiten alcanzar hoy en día intensidades de hasta  $10^{22}$  (diez mil trillones) veces superiores a la de la luz del sol que llega a nuestro planeta. Esto es posible gracias a las propiedades únicas que posee este tipo de luz o radiación: *monocromaticidad* (un único color o longitud de onda) y *coherencia* (una definida relación de fase entre los fotones o partículas de luz que constituyen el haz láser). Los haces láser no sólo permiten obtener altas intensidades en comparación con fuentes de luz convencionales como las lámparas de tungsteno, mercurio, halógenas o LED, sino que además, es posible mantenerlos concentrados a lo largo de grandes distancias, etc... Por ejemplo, un profesor podría emplear una linterna para alumbrar la pizarra de un aula poco iluminada, de forma que cuanto más se aleje de la pizarra iluminará una porción mayor de ella pero con menor intensidad. Sin embargo, si apunta hacia la pizarra con un puntero láser, incluso en un aula debidamente iluminada e independientemente de la distancia a la que se encuentra de la pizarra, podrá señalar cualquier detalle de las fórmulas o garabatos que ha escrito en ella. Es decir, el puntero láser permite obtener un haz más concentrado a mayor distancia. Este comportamiento está directamente relacionado con la excelente calidad de un haz láser frente a la radiación electromagnética emergente de otro tipo de fuente.

La coherencia de un haz láser está íntimamente relacionada con el predominio de la emisión estimulada frente a la espontánea [1.1]. En 1917 **Albert Einstein** postuló los principios del efecto láser cuando introdujo el concepto de *emisión estimulada*. En ella, un fotón interacciona con una molécula o átomo excitado y provoca la emisión de un fotón secundario que tiene la misma frecuencia, fase, polarización y dirección que el fotón que provocó la excitación. No fue hasta **1960** cuando **Theodore Maiman** desarrolló el primer láser en los laboratorios HRL (*Hughes Research Laboratories, Malibú, United States*) y su artículo describiendo el funcionamiento del primer láser fue publicado en *Nature* tres meses después: *Stimulated optical radiation in ruby*, *Nature* 187 (1960), 493-494. Desde entonces, más de 55.000 patentes relacionadas con el efecto láser han sido concedidas sólo en Estados Unidos. Los desarrollos de hoy día y sus aplicaciones son el resultado de esfuerzos conjuntos, aunque el trabajo de prestigiosos científicos que fueron líderes en el campo de la óptica y la fotónica ha marcado el curso de la historia del láser. Entre muchos otros, merece la pena destacar a Charles Townes, Arthur Schawlow y Gordon Gould.

A partir de los años 1960, el desarrollo de nuevas y potentes fuentes de radiación láser inició un rápido avance en las técnicas de procesamiento de materiales que eran tecnológicamente y económicamente viables desde un punto de vista industrial. Por **procesado de materiales**

**con láser** se entiende la variedad de operaciones industriales en las que esta fuente opera sobre una pieza de material con el fin de modificar sus propiedades físico-químicas y/o su morfología a través del fundido o eliminación de material. Algunas de las posibles aplicaciones son: soldadura de materiales similares y disimilares, corte, aporte de material, texturizado/funcionalización de superficies, micromecanizado y pulido [1.2 - 1.5]. Hasta hace aproximadamente dos décadas, el coste del empleo de sistemas láser era alto comparado con otras técnicas de procesamiento convencionales (endurecimiento de metales por inducción, soldadura de polímeros por ultrasonidos o mediante adhesivos). En consecuencia, la tecnología láser sólo se utilizaba en procesos muy específicos en los que el uso de la herramienta convencional implicaba problemas. El continuo desarrollo de la tecnología láser fue cambiando esta situación y actualmente ofrece importantes ventajas frente a las tecnologías convencionales. De esta manera nació el mercado mundial de los láseres industriales, el cual no ha parado de crecer hasta la actualidad. Desarrollos en automoción, procesos de monitorización y sistemas de control han facilitado la integración de sistemas láser en entornos industriales. En algunos casos, el empleo de sistemas ya desarrollados ha adaptado el propio proceso, mientras que en otras situaciones, los requerimientos de la aplicación imponían las propiedades del haz, lo que implicaba la necesidad de desarrollar nuevos sistemas [1. 1]. Mediante una comparativa con tecnologías de procesamiento de materiales convencionales, la tecnología láser ofrece una serie de importantes ventajas [1. 6]:

- Es posible alcanzar altos valores de irradiancia de forma localizada ( $\approx 10^7$  W/cm<sup>2</sup>).
- Minimización de la zona afectada térmicamente.
- El propio sistema láser es perfectamente compatible con la automatización. Lo que industrialmente representa una enorme ventaja.
- Gran parte de los procesos llevados a cabo pueden ser monitorizados y por tanto, susceptibles de ajustar los diferentes parámetros durante el propio proceso (por ejemplo lazo cerrado de control potencia-temperatura durante procesos de soldadura o endurecimiento de metales).
- No hay contacto entre el cabezal óptico y el material a procesar, por lo que se minimizan los problemas de contaminación.
- En los procesos de texturizado y micromecanizado, es posible generar patrones con periodicidades del orden de la micra e incluso de nanómetros de una manera precisa y controlada.
- Es posible realizar microsoldaduras sobre objetos miniaturizados para aplicaciones del sector biomédico.

## Introducción

- El haz láser puede acceder, mediante su transformación a través de un sistema óptico adecuado, a zonas difícilmente tratables mediante tecnologías convencionales.

Por otro lado, existen ciertas limitaciones en el procesamiento de materiales mediante tecnología láser, a destacar:

- El coste inicial de la implantación de esta tecnología puede ser alto y depende de la aplicación.
- En ciertas aplicaciones, como la soldadura y el endurecimiento de metales, la profundidad de penetración del haz se encuentra limitada, excepto para láseres de alta potencia (>4kW). Lo anterior conlleva una elevada inversión inicial para cumplir los requisitos del proceso.
- En el proceso de texturizado, la calidad de los patrones así como su profundidad se encuentra limitada por las características del haz: duraciones de pulso, frecuencias de repetición y potencia óptica.

En una gran cantidad de aplicaciones, las ventajas poseen más peso que las limitaciones. Así, el procesamiento de materiales por láser ha sido utilizado para resolver problemas cuya solución era difícilmente alcanzable mediante técnicas convencionales. Algunos ejemplos son:

- La necesidad de minimizar la zona afectada térmicamente en procesos como endurecimiento de aceros y soldadura de materiales (similares y disimilares).
- La necesidad de eliminar deposición de carga eléctrica en la pieza a procesar.
- El uso de materiales con cierta problemática como puede ser el texturizado sobre cerámicas.

Por tanto, la tecnología láser es clave en economías altamente industrializadas ya que modifica sus procesos de fabricación reduciendo sustancialmente los tiempos de tratamiento y aumentando la calidad, fiabilidad y flexibilidad del proceso. En lo que respecta al potencial técnico y difusión en el mercado, esta tecnología experimentó hace poco más de una década una verdadera expansión gracias a la inclusión en el mercado de los **láseres de diodo** (láseres de semiconductor) [1. 6]. Durante varias décadas, estos láseres en el rango de potencias de emisión de mW fueron empleados en telecomunicaciones, dispositivos CD-DVD y escáneres de códigos de barras entre otras. Los sistemas de diodos láser de potencia media ( $\approx 100\text{W}$ ) fueron introducidos a finales de los años 90 y sus prometedoras características superaron las expectativas creadas en cuanto a su aplicación en entornos industriales. Se alcanzaron niveles de potencia de emisión de 50W en sistemas de 1cm de longitud con eficiencias en torno al 50%. La continua mejora de la eficiencia de estos sistemas, junto con

innovadores desarrollos relativos al método de refrigeración dieron lugar, años después, a la aparición de elementos modulares que combinaban varias barras de diodos de forma apilada formando “*stacks*” de hasta 25 barras. El proceso de escalado de los niveles de potencia hasta multi-kW en dimensiones similares a la de una caja de zapatos se convirtió en una realidad en torno al año 2010 [1. 6]. En lo relativo a su aplicación a nivel industrial, no sólo fueron consideradas las ventajas relativas a la eficiencia, diseño compacto y funcionamiento con mínima actividad de mantenimiento, sino también la posibilidad de adaptar el perfil del haz láser a la geometría de la pieza objeto del proceso.

Por otro lado, uno de los mayores inconvenientes de los sistemas de diodos es la **baja calidad del haz** emergente. La calidad de un haz láser se define como la medida de cuánto puede ser focalizado bajo determinadas condiciones (limitación en la divergencia). La falta de calidad del haz y por tanto la falta de capacidad para enfocar la radiación en un punto implica que la densidad de potencia sobre la pieza a procesar esté limitada, generando un problema ante el gran número de procesos que demandan densidades de potencia del orden de  $10^6 \text{W/cm}^2$  o incluso superiores. Al principio, esta limitación supuso restricciones en cuanto a las aplicaciones que podían ser abordadas con este tipo de láseres. Por otro lado, muchas de las aplicaciones industriales requieren el guiado de la radiación a través de fibra óptica para disponer de una mayor flexibilidad. Para ello, es necesario focalizar el haz en la entrada de fibras ópticas con diámetros del orden de centenas de micras. Sin embargo, la baja calidad de este tipo de haces láser no permite realizar el acoplamiento a fibra de una manera directa. Para lograr dicho acoplamiento es necesario llevar a cabo **técnicas de conformado del haz** (*beam shaping*). Éstas se definen como el conjunto de procesos de redistribución de la intensidad y la fase de un haz mediante **diseño óptico**. La distribución de intensidad define el perfil del haz como Gaussiano, circular o rectangular, mientras que la fase del haz, para una determinada distribución de intensidad, determina sus propiedades de propagación [1. 8]. En consecuencia, diferentes técnicas de conformado del haz han sido desarrolladas con el fin de incrementar la simetría del haz, mejorar su calidad y por tanto conseguir acoplamientos eficientes a fibra óptica. Además, estas técnicas juegan un papel muy relevante en el diseño de sistemas ópticos para el aumento de la potencia óptica sin afectar a la calidad del haz [1. 7].

Así, la aplicación de la tecnología láser en el procesado de materiales requiere de una adecuación de las características del haz, principalmente en términos de dimensiones espaciales y perfil de irradiancia, al proceso concreto así como a los materiales y piezas sobre los que se va a aplicar el tratamiento. Por tanto, en el campo del procesado de materiales mediante láser, el diseño óptico juega un papel esencial tanto en el desarrollo de la propia fuente luminosa como de los cabezales ópticos para el conformado y guiado del haz hasta la pieza a procesar.

### Referencias

1. 2 *Laser processing of engineering materials: Principles procedure and industrial applicaions*, John C. Ion, Elsevier (2005).
1. 3 *Industrial Application of Lasers. Second Edition*. John F. Ready, Academic Press (1978).
1. 4 *High-Power Diode Lasers, Fundamentals, Technology, Applications*, R. Diehl. Springer (2010).
1. 5 *Laser beam shaping applications*. F.M.Dickey, S.C. Holswade, D. L Shealy, CRC Press (2005).
1. 6 A. Olowinsky, A Boglea, *Extending the process limits of laser polymer welding with high-brilliance beam sources (recent status and prospects of POLYBRIGHT)*. Proc. SPIE 7921, Laser-based Micro and Nanopackaging and Assembly V (2011).
1. 7 N.Amanat, N.L. James, DR. McKenzie, *Welding methods for joining thermoplastic polymer for the hermetic enclosure of medical devices*. Medical Engineering & Physics 32 (7) (2010), 690-9.
1. 8 P.A. Hilton, I. A. Jones, Y. Kennish, *Transmisión Laser Welding of Plastics*. Proc. SPIE 4831, First International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing (2003) 44.
1. 9 E. Haberstroh, W. M. Hoffmann, *Laser transmission welding of transparent plastics part in micro technology*. Conference Paper, 4M (2007)
1. 10 E. Rodríguez-Vidal, I. Quintana, C. Gadea, *Laser transmission welding of ABS: Effect of CNTs concentration and process parameters on material integrity and weld formation*. Optics & Laser Technology 57 (2014), 194–201.
1. 11 S. Abed, P. Laurens, C. Carretero, J.R. Deschamps, C. Duval, *Diode laser Welding of Polymers: Microstructures of the Welded Zones for Polipropylene*. Conference Paper 20th International Congress on ICALEO 2001: Applications of Lasers & Electro-Optics; Jacksonville, FL; USA; 15-18 (2001), 1499-1507.
1. 12 A. Olowinsky, A.Boglea, *Extended the process limits of laser polymer welding with brilliance beam sources (recent status and prospects of POLYBRIGHT)*. Proc SPIE 7921, Laser-based Micro and Nanopackaging and Assembly V, (2011) 792107.
1. 13 I Mingareev, F. Weirauch, A.Olowinsky, *A welding of polymers using a 2 mm thulium fiber laser*. Optics & Laser Technology 44(7) (2012), 2095–9.

1. 14 W. Pfleging, O. Baldus, M. Bruns, A. Baldini, E. Bemporad, *Laser-assisted welding of transparent polymers for microchemical engineering and life science*. Proc SPIE 5713, Photon Processing in Microelectronics and Photonics IV (2005), 479–88.
1. 15 F. Becker, H. Potente, *A step towards understanding the heating phase of laser transmission welding in polymers*. Polymer Engineering & Science 42(2) (2002), 365–74.
1. 16 A. Boglea, A. Olowinsky, A. Gillner, *Fibre laser welding for packaging of disposable polymeric microfluidic-biochips*. Applied Surface Science 254 (2007), 1174–8.

## *Introducción*

# CAPÍTULO 2

## 2. OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

El objetivo general de este trabajo es el desarrollo de un prototipo láser de diodos orientado a la microsoldadura de termoplásticos. El tipo de láser objeto de este desarrollo ha sido elegido en base a los requerimientos de la aplicación y de la industria. Así, el uso de láseres de diodos para soldadura de termoplásticos a nivel industrial ha experimentado un revelador incremento en la última década. Las principales razones son: su bajo coste, posibilidad de realizar el guiado de la radiación por fibra óptica y su alta eficiencia frente al resto de competidores.

La metodología seguida ha sido la siguiente:

- Caracterización experimental de las fuentes de radiación utilizadas. Dicha caracterización ha sido llevada a cabo desde el punto de vista de su potencia, polarización y calidad del haz.
- Modelado óptico de las fuentes láser seleccionadas, así como del sistema óptico de conformado del haz y el análisis de su calidad a lo largo de cada uno de los componentes ópticos que constituyen el sistema óptico de acoplamiento a fibra. Dicha modelización ha sido realizada mediante el software comercial de diseño óptico ZEMAX®.

## *Objetivo y Estructura de la Tesis*

- Desarrollo experimental del prototipo modelado. Se han validado los resultados experimentales predichos por el modelo. Esto ha conllevado, además de un fuerte contenido de desarrollo óptico, importantes contribuciones de otras disciplinas como la electrónica, mecánica y de manera reseñable la termofluídica.

En lo relativo a la aplicación en la microsoldadura de termopolímeros, el termoplástico considerado para el estudio ha sido el ABS (acrylonitrile/butadiene/styrene). El estudio de dicho proceso ha sido llevado a cabo siguiendo los siguientes pasos:

- Caracterización de los materiales empleados en el proceso: ABS sin aditivos y ABS con dos concentraciones diferentes de nanotubos de carbono (CNTs). Dicha caracterización ha sido llevada a cabo desde un punto de vista térmico, óptico y mecánico. La razón por la cual se han considerado dos concentraciones diferentes de CNTs ha sido la realización del estudio de los parámetros óptimos de proceso en función de la aditivación del termoplástico absorbente.
- Estudio de la calidad de las microsoldaduras realizadas entre las dos láminas de ABS (una aditiva y la otra sin aditivar). Dicho estudio ha sido llevado a cabo mediante el análisis del efecto de los parámetros involucrados en el proceso (potencia y velocidad de proceso, concentración de CNTs) sobre la integridad y resistencia mecánica de las microsoldaduras. Adicionalmente, el efecto de los parámetros de proceso ha sido analizado mediante caracterizaciones microscópicas de la parte superior y de la sección transversal de las soldaduras.

La presente Tesis se encuentra organizada en los siguientes capítulos:

**Capítulo 3. Consideraciones previas.** A lo largo de este capítulo se describen los conceptos utilizados en el desarrollo de la Tesis: descripción del tipo de láser sobre los que se centran el desarrollo de la Tesis (láser de semiconductor: diodos láser), calidad de un haz láser, técnicas de conformado del haz y aspectos relativos al diseño óptico y la herramienta de modelado a utilizar: ZEMAX®.

**Capítulo 4. Modelización óptica del prototipo láser de diodos.** En este capítulo se detalla la modelización óptica del sistema mediante el software de trazado de rayos ZEMAX®. A lo largo del capítulo se estudia el efecto que cada componente óptico produce sobre el haz láser. Dicho análisis es realizado en una primera fase de acoplamiento a fibra de la radiación procedente de una barra de diodos. Dado que para la aplicación considerada son necesarios niveles de potencias más altos, posteriormente, y en base a los resultados de la primera fase, se presenta el diseño y análisis del sistema óptico de acoplamiento a fibra de la radiación procedente de dos barras de diodos unidas mediante un bplexado por polarización.

**Capítulo 5. Desarrollo experimental del prototipo láser de diodos.** En primer lugar se presenta el desarrollo y caracterización experimentales del sistema propuesto. Los resultados serán comparados con los obtenidos mediante el modelo óptico presentado en el capítulo anterior. Los resultados experimentales serán utilizados como referencia para el montaje y validación del prototipo, objetivo de la presente Tesis, en el cual dos barras de diodos son acopladas a fibra óptica mediante un biplejado por polarización. Los resultados obtenidos de la fase experimental son comparados y analizados con los obtenidos en la fase de modelado (Capítulo 4). Adicionalmente, en este capítulo se detallan los aspectos más relevantes relativos al diseño mecánico y eléctrico del prototipo, así como los correspondientes al desarrollo de su sistema de refrigeración. Por último, se presenta una breve descripción de las principales fases llevadas a cabo para integrar el prototipo desarrollado a nivel de laboratorio en una máquina destinada a la soldadura de termoplásticos.

**Capítulo 6. Aplicación del prototipo láser a la microsoldadura de termoplásticos.** Este capítulo presenta la aplicación del prototipo láser desarrollado a la microsoldadura del termoplástico ABS. En primer lugar se presenta la caracterización de los termoplásticos a utilizar desde un punto de vista óptico, térmico y mecánico. A continuación se detalla el proceso de soldadura de los termoplásticos seleccionados llevado a cabo mediante el prototipo descrito en los capítulos anteriores. Posteriormente, se describe el estudio de la calidad de las soldaduras realizadas entre dos láminas de ABS, una sin aditivos y la otra aditivada con dos concentraciones diferentes de nanotubos de carbono (CNTs). A lo largo del capítulo se presenta el análisis del efecto de los parámetros involucrados en el proceso sobre la integridad y carga de rotura de las soldaduras realizadas.

*Objetivo y Estructura de la Tesis*

# **CAPÍTULO 3**

## **3. CONSIDERACIONES PREVIAS**

En primer lugar se describe, de una forma genérica, el procedimiento llevado a cabo en el diseño de sistemas ópticos. Como paso previo al diseño y análisis del sistema óptico objeto de la presente Tesis, se ha modelizado un primer diseño consistente en un sistema de iluminación LED con el fin de alcanzar un grado satisfactorio de familiarización con la herramienta de diseño (sección 3.1). En la sección 3.2 se describen las bases de funcionamiento de los láseres de semiconductor así como la evolución de dicha tecnología y la problemática del acoplamiento a fibra. A continuación, se definen los principales parámetros utilizados para caracterizar la calidad de un haz láser (sección 3.3) y más concretamente, la radiación emergente de una barra de diodos láser (sección 3.4). La sección 3.5 presenta una revisión de las principales técnicas de conformado de haces procedentes de diodos láser para conseguir un eficiente acoplamiento a fibra óptica.

### **3.1 Diseño óptico**

El proceso completo de diseño de cualquier sistema óptico incluye los siguientes pasos (Figura 3. 1) [3.1, 3. 2]:

## Consideraciones Previas

1. *Especificaciones del sistema.* Éstas comprenden la elección de los valores límites de la longitud focal del sistema, rango espectral de trabajo, importancia de cada una de las limitaciones impuestas, así como las condiciones límite en cuanto al tipo de material y la forma de las superficies de los componentes ópticos.
2. *Prediseño o anteproyecto.* Con el fin de encontrar la configuración que mejor satisfaga las especificaciones para una aplicación específica, se deben tomar decisiones sobre propiedades generales del sistema óptico, tales como la utilización de elementos reflectivos (espejos), refractivos (dioptrios) o una combinación de los anteriores (sistemas catadióptricos), así como del número de elementos o el tamaño global del sistema.
3. *Análisis del anteproyecto (sin optimizar).* Realización de un primer análisis evaluando lo cerca que se encuentra el diseño inicial de las especificaciones finales, con el fin de ayudar a seleccionar las variables más adecuadas en el proceso de optimización (parámetros como el radio de curvatura de las superficies, espesores, etc...).

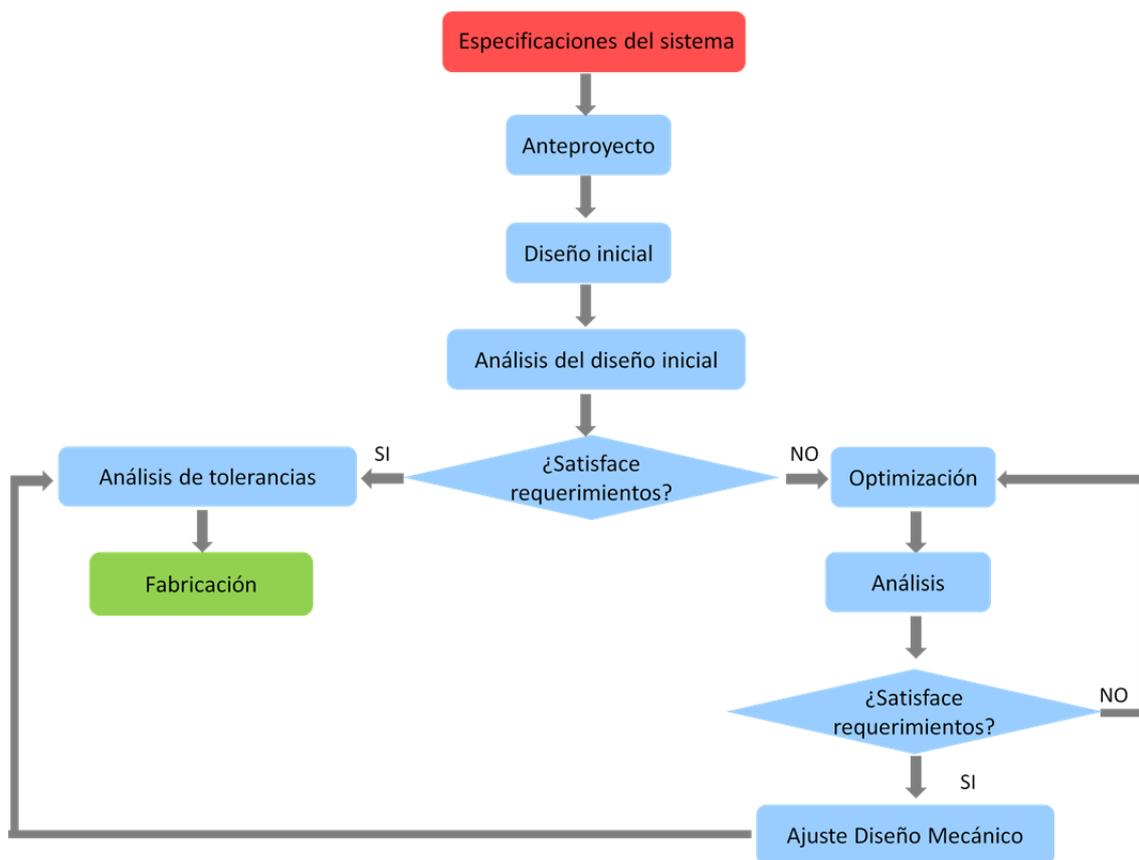


Figura 3. 1: Diagrama de flujo para el proceso de diseño y fabricación de un sistema óptico.

4. *Optimización del diseño inicial.* Una vez que están definidos los parámetros característicos del sistema (que serán variables a lo largo del resto del proceso), y sus valores límite se procede al proceso de optimización. Mediante dicho proceso se trata de minimizar el valor de la función de mérito o función error con el fin de obtener un sistema que se aproxime lo más posible a las especificaciones impuestas.
5. *Análisis del diseño obtenido tras la optimización.* Una vez minimizada la función error se deben estudiar los valores que determinan directamente la calidad del sistema óptico, tales como la energía concentrada en un determinado radio o PSF (del inglés *Point Spread Function*) o la función de transferencia del sistema MTF (del inglés *Modulation Transfer Function*). Si éstos valores no cumplen las especificaciones impuestas en el punto 1 se repite el proceso de optimización (Figura 3. 1).
6. *Repetición del proceso de optimización (en caso de ser necesario).* En los casos en los que el análisis del sistema no cumpla con las especificaciones deseadas se repite el proceso de optimización. Para ello se añaden nuevas variables o se modifican las restricciones sobre ellas con el objetivo de obtener resultados más cercanos a los deseados para el diseño final.
7. *Preparación para la fabricación: análisis de tolerancias.* Una vez obtenido un diseño óptico con las especificaciones deseadas comienza una nueva tarea en la cual se debe preparar dicho diseño para su posterior fabricación. Esta preparación conlleva un estudio de las tolerancias de los distintos parámetros mecánicos del sistema, es decir, el margen de precisión del que se dispone en la fabricación de los elementos sin perder efectividad en el diseño.

Como ejemplo de operatividad con el método de diseño óptico y como paso previo al diseño y desarrollo del sistema objeto de nuestra investigación, se ha modelizado un sistema de iluminación LED que surgió como encargo por parte de una empresa española a IK4-TEKNIKER. Aunque no está vinculado con el diseño del prototipo láser, nos ha permitido establecer un patrón metodológico a seguir, poner a punto la herramienta de diseño y alcanzar un grado satisfactorio de familiarización con dicha herramienta.

Actualmente existen en el mercado diversos paquetes de software específicos para la realización del proceso de diseño óptico: ZEMAX®, CodeV®, OSLO® [3. 3]. Uno de los de uso más extendido es ZEMAX® ya que permite el diseño y análisis de sistemas ópticos orientados a un gran rango de aplicaciones: iluminación, visión, telescopios, láseres y fibras. Como consecuencia de su extendido uso en el modelado de sistemas de conformado de haz láser,

dicho software ha sido elegido para el modelado del prototipo láser cuyo desarrollo constituye el objetivo de la presentes Tesis.

### 3.1.1 Un ejemplo: diseño de un sistema de iluminación LED

En esta sección se presenta la metodología de diseño óptico descrita previamente, mediante el uso de la herramienta ZEMAX® para el desarrollo de un sistema de iluminación LED. El objetivo perseguido es transformar los rayos emergentes de una fuente extensa en un haz colimado con una distribución espacial de intensidad controlable (semi-ángulos de divergencia  $< 4^\circ$ ). El sistema está formado por los siguientes elementos: i) una fuente LED, ii) un sistema de lentes que colima los rayos con bajas aperturas numéricas NA ( $NA < 0.26$ ) (del inglés *Numerical Aperture*), iii) un sistema de dos espejos mediante el que se consigue colimar los rayos con NA intermedias ( $0.26 < NA < 0.86$ ) y iv) un espejo externo para alcanzar la homogenización del perfil del haz a una cierta distancia de trabajo actuando sobre los rayos emergente de la fuente LED con altas divergencias ( $NA > 0.86$ ). Como se mostrará a continuación, el diseño propuesto permite tanto colimar un haz como producir determinadas distribuciones espaciales de intensidad a una distancia de trabajo o generar un perfil de intensidad uniforme (*top-hat* en terminología anglosajona).

El análisis presentado se estructurará de acuerdo a las siguientes secciones: la 3.1.2 contiene las principales consideraciones sobre la simulación de la fuente LED. La sección 3.1.3 detalla los aspectos relativos al diseño inicial, así como el proceso de optimización seleccionado. En la sección 3.1.4 se describen de manera detallada los parámetros del sistema obtenidos tras el proceso de optimización. En la sección 3.1.5 se detallan y discuten los resultados obtenidos mediante el sistema propuesto en términos de calidad del haz (grado de colimación e irradiancia) para distintas distancias de trabajo. Finalmente las principales conclusiones se presentan en la sección 3.1.6.

### 3.1.2 El LED como fuente de luz extensa

Las ventajas de las fuentes LED en cuanto a consumo de potencia o vida media han dado lugar a un incremento de su uso en dispositivos ópticos y numerosos sistemas de iluminación [3. 4]. Así, la creación de diodos emisores de luz azul por parte de I. Akasaki, H. Amano and S. Nakamura en 2014 [3. 5, 3. 6] ha supuesto el inicio de una fuente lumínica sostenible y eficiente desde el punto de vista energético. Este descubrimiento les valió el Premio Nobel de Física en 2014. Gracias a su aportación, es posible crear lámparas LED blancas que presentan importante ventajas en cuanto al uso eficiente de energía, los tiempos de vida y los niveles de eficiencia y flujo lumínico por watio.

Sin embargo, en muchos casos el flujo de luz procedente de una fuente LED debe ser espacialmente controlado para alcanzar los requerimientos de iluminación en cada caso. Esta es la razón por la que una tarea básica en el diseño de una fuente LED es generar un haz colimado. En la actualidad existen varios desarrollos de diseños ópticos capaces de coleccionar la máxima cantidad de luz emergente de la fuente LED para posteriormente redistribuirla de la manera más adecuada en cada caso. Así, existen ópticas de conformado del haz para transformar un perfil de intensidad Gaussiano en un perfil tipo sombrero de copa (*o top-hat*) sobre un determinado plano de trabajo [3. 7]. En la actualidad, hay varios tipos de sistemas ópticos comerciales para colimar fuentes LED. En general, pueden ser divididos en dos grandes grupos: sistemas ópticos que están compuestos por lentes termoplásticas que se basan en la reflexión total interna para alcanzar la colimación del haz [3. 8, 3. 9, 3. 11 , 3. 12], y colimadores constituidos por espejos parabólicos [3. 13, 3. 14]. La eficiencia de este último grupo es proporcional a la apertura de estos sistemas, es decir, al diámetro del espejo parabólico.

El LED elegido es de alto brillo y emite en una longitud de onda  $\lambda = 525 \pm 15 \mu\text{m}$  [3. 15]. (Figura 3. 2).

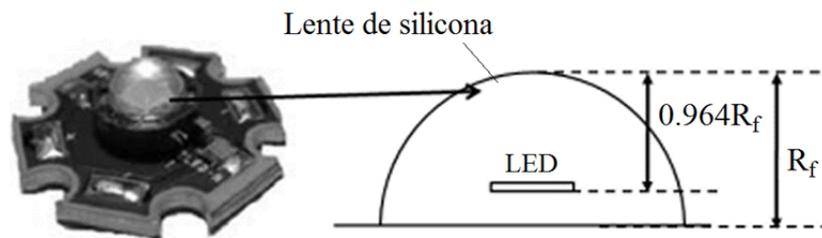


Figura 3. 2: Fuente LED con lente de silicona semiesférica de protección ( $R_f=2.7\text{mm}$ ).

Las dimensiones de la fuente (indicada con la palabra LED en la figura 3.2) fueron medidas mediante un microscopio óptico e introducidas en ZEMAX®. La Figura 3. 3 muestra las dimensiones de la fuente obtenidas como la imagen de la fuente LED producida a través de la lente de silicona ( $R_f=2.7\text{mm}$ , Figura 3. 2). Aunque el tamaño real de la fuente podría ser fácilmente evaluado por óptica geométrica, la imagen producida por la lente de silicona actúa como fuente real del resto del sistema. Además, las especificaciones de la fuente LED en términos de intensidad son dadas teniendo en cuenta esta lente. En este sentido, la única restricción fue impuesta en la localización de la fuente, de manera que mantuviese una distancia mínima entre la fuente LED y el primer componente óptico igual o superior al espesor de lente protectora de silicona ( $\approx 0.964R_f$ ).

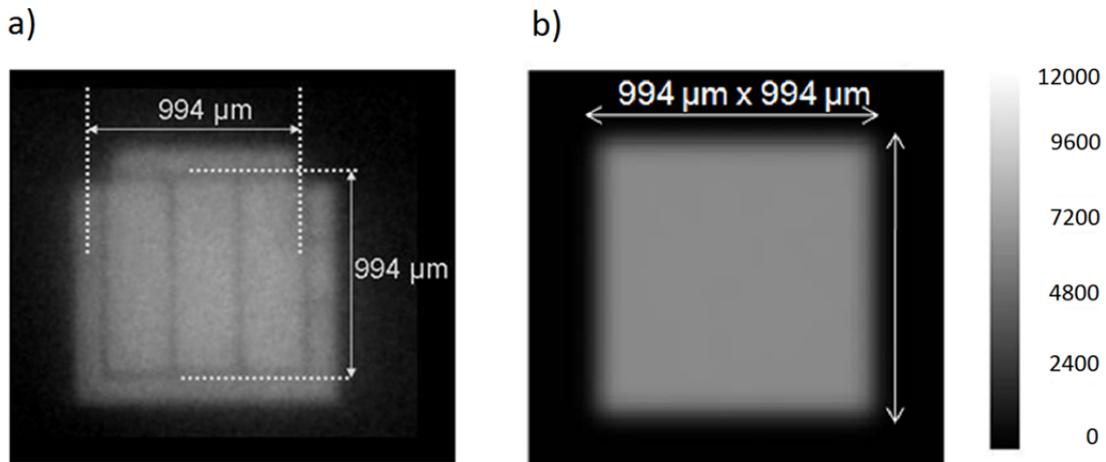


Figura 3. 3: Dimensiones de la fuente LED vistas a través de la lente de silicona: a) imagen real; b) modelada en ZEMAX®.

La direccionalidad en la emisión de la fuente LED (flujo luminoso en función del ángulo de emisión) ha sido modelada de acuerdo con las especificaciones de la fuente. Su distribución angular es la misma en las dos direcciones y el máximo ángulo de emisión es aproximadamente de  $130^\circ$ .

### 3.1.3 Anteproyecto, diseño inicial y proceso de optimización

La finalidad del sistema óptico propuesto es colimar la luz procedente de la fuente LED descrita en la sección anterior. Además, el sistema presentado puede proporcionar un perfil de intensidad uniforme a determinadas distancias de trabajo mediante un sub-sistema óptico diseñado para tal fin. La luz emergente de la fuente viajará a través de uno u otro sistema dependiendo de la apertura numérica de los rayos (Figura 3. 4): para  $NA_1 < 0.26$  el proceso de colimación es llevado a cabo por un sistema de tres lentes; para  $0.26 < NA_2 < 0.68$ , los rayos son colimados a través de un sistema de dos espejos (espejo hiperbólico + espejo interno parabólico). Finalmente, los rayos con  $NA_3 > 0.86$  son focalizados a través de un espejo externo elíptico que modifica el perfil resultante del haz colimado a una determinada distancia de trabajo. Los parámetros de curvatura de este espejo externo serán optimizados en función del perfil de irradiancia requerido a una cierta distancia de trabajo (es decir, la distancia desde la última superficie óptica del sistema en la dirección de propagación hasta el plano del detector). Este grado de libertad proporciona versatilidad al sistema propuesto.

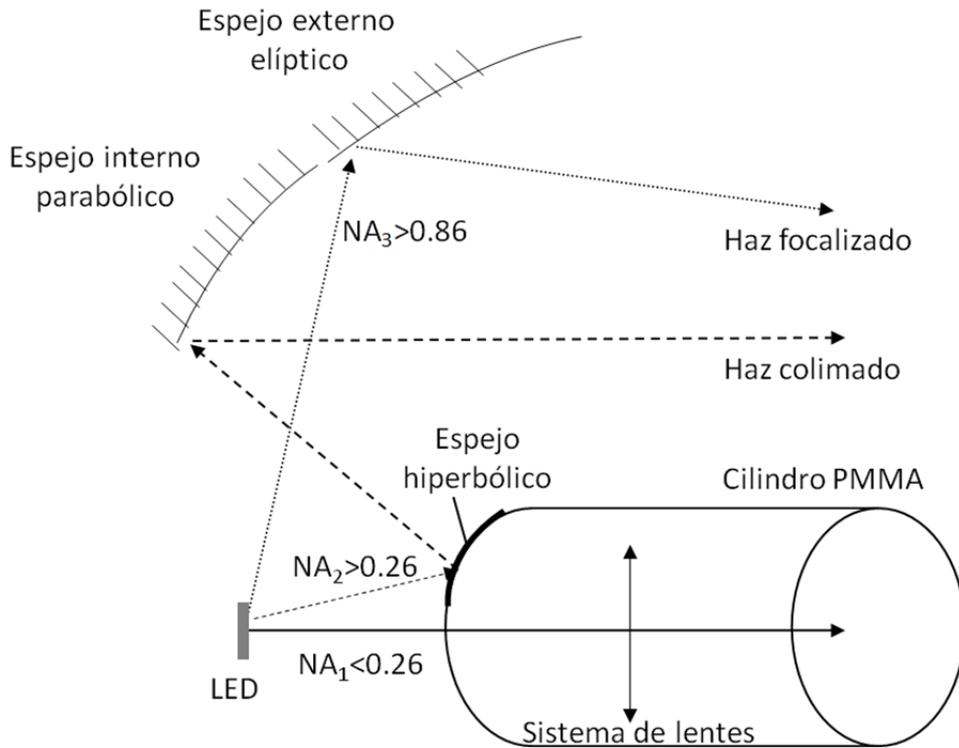


Figura 3. 4: Descripción esquemática de los diferentes sistemas, cada uno de ellos trabajando en un intervalo de NA's.

### 3.1.3.1 Restricciones del sistema

Cada elemento del diseño anterior posee ciertas limitaciones para que el sistema completo sea consistente. Aunque estas condiciones implican que los subsistemas sean dependientes entre sí, dan lugar a un diseño viable y robusto con un comportamiento versátil y eficiente.

La primera superficie del sistema de lentes ( $NA_1 < 0.26$ ) y el primer espejo son en realidad partes de la misma superficie hiperbólica (la parte frontal de la primera lentes se encuentra parcialmente metalizada) (Figura 3. 4). Esta condición reduce el número de piezas en el sistema e introduce una considerable ventaja en el alineamiento para bajas y moderadas aperturas numéricas ( $NA < 0.86$ ).

El sistema de lentes es posicionado en el interior de un cilindro de Poli-Metil-Metacrilato (PMMA), dando lugar a un sistema mecánicamente viable.

El espejo interno parabólico ( $0.26 < NA_2 < 0.86$ ) es situado a lo largo del eje óptico en una posición tal que la distancia entre su vértice y la fuente virtual (imagen virtual de la fuente dada por el espejo hiperbólico) es igual a su focal (condición natural de colimación). La

## Consideraciones Previas

apertura interna del espejo parabólico es dimensionada para producir rayos colimados viajando fuera del cilindro de PMMA (Figura 3. 4).

### 3.1.3.2 Diseño inicial

Las posiciones ( $Z$ ), diámetros ( $\phi$ ) y los principales radios de curvatura ( $R$ ) de los elementos del sistema siguen un orden dado por las condiciones del diseño y las opciones impuestas por el diseño y mostradas en el esquema representado en la Figura 3. 5.

La primera lente es situada inmediatamente después de la fuente LED “encapsulada”,  $Z_{L1}$  (Figura 3. 5). Para  $NA=0.26$  (límite impuesto al sistema de colimación de lentes) se calcula el diámetro  $\Phi_{L1}$  (diámetro de la parte no espejada de la primera lente). El diseño de las lentes de colimación permite definir el diámetro de todo el sistema de lentes, denotado por  $\Phi_{L3}$ , en referencia a la tercera lente. Las condiciones (2) y (3) de la Figura 3. 5 proporcionan una estimación del diámetro externo del espejo  $M_1$  ( $\Phi_{M1}^e$ ) y del diámetro interno del espejo  $M_2$  ( $\Phi_{M2}^i$ ). Además, del análisis del diagrama de flujo de la Figura 3. 5 se obtiene:

- El radio de curvatura del espejo  $M_1$  ( $R_{L1}$ ) es obtenido a partir de la condición 1, teniendo en cuenta que los rayos con  $NA=0.26$  (rayos limitantes) reflejados en  $M_1$  deben alcanzar  $M_2$  a aproximadamente  $\Phi_{M2}^i$ .
- Para aperturas numéricas  $0.26 < NA_2 < 0.86$  los rayos se reflejarán en  $M_1$  y, alcanzado  $M_2$ , deben cumplir la condición 3. Esto proporciona la posición  $Z_{M2}$  y su radio de curvatura  $R_{M2}$ .
- El impacto de los rayos limitantes  $NA=0.86$  en  $M_2$  aporta el valor del diámetro externo de dicho componente  $\Phi_{M2}^e = \Phi_{M3}^i$ .
- El radio de curvatura del espejo  $M_3$  ( $R_{M3}$ ) viene dado por la condición de imagen impuesta en el sistema (la distribución de intensidad a una cierta distancia de trabajo  $WD$ , del inglés *Working Distance*) para rayos con  $NA_3 > 0.86$ . El diámetro externo de  $M_3$  ( $\Phi_{M3}^e$ ) es obtenido para los rayos con  $NA=0.86$  que no alcanzan el espejo  $M_1$ . La distancia de trabajo ( $WD$ ) es definida como la distancia desde el extremo del tubo de PMMA hasta el plano de medida de la distribución de intensidad.

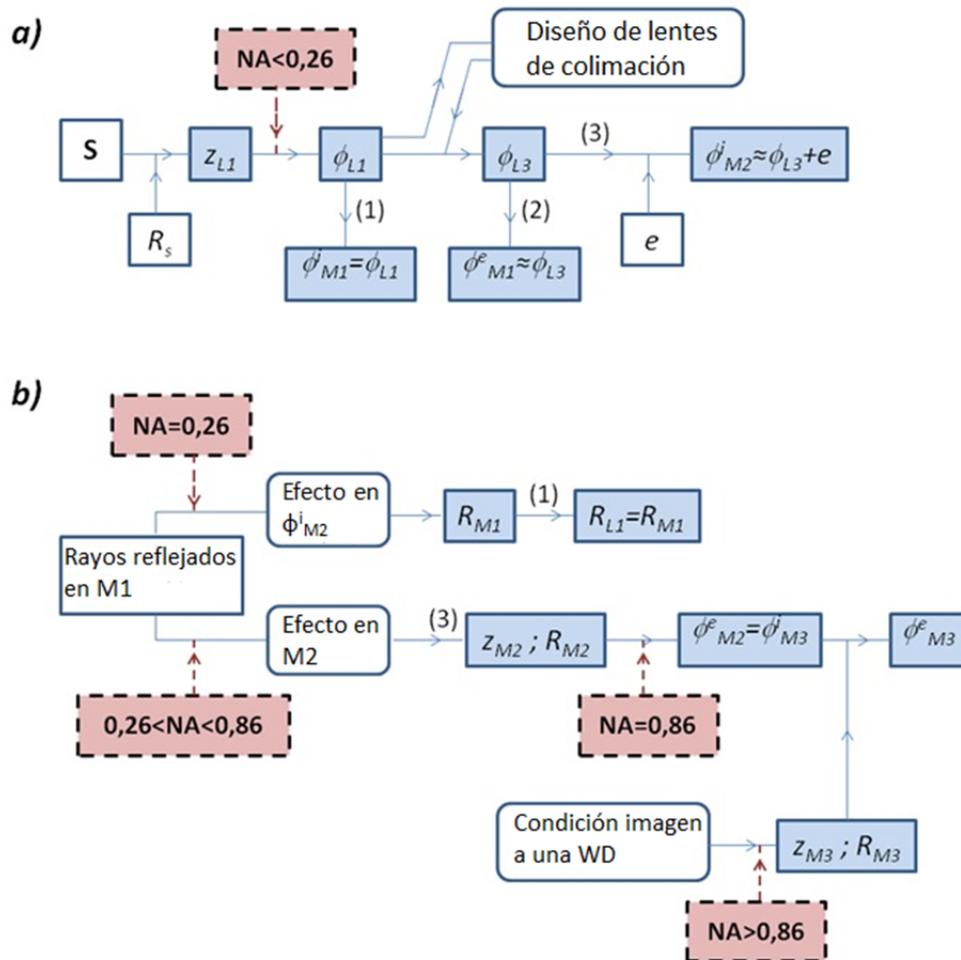


Figura 3. 5: Diagrama de flujo del proceso de diseño: a) bajas NA; b) moderadas a altas NA. L y M denotan lentes y espejos respectivamente (M del inglés Mirror, S= fuente (del inglés Source), R= radio de curvatura principal; Z= posición a lo largo del eje óptico,  $\phi$  = diámetro, e=espesor.

### 3.1.3.3 Técnica de optimización

El proceso de optimización del sistema propuesto hace uso del algoritmo no lineal *Damped Least Square* (DLS) de ZEMAX®. Dicho proceso es llevado a cabo a través de la función de mérito *MF* (del inglés *Merit Function*), la cual indica cómo de cerca se encuentra nuestro sistema óptico de alcanzar las especificaciones impuestas. La definición de la MF se realiza a través de:

- Selecciones de las *variables* del sistema (radios de curvatura, espesores, distancias, constantes cónicas, etc.):  $V_i, i=1, \dots, n^{\circ}$  variables.
- Especificaciones de los *operandos* (requerimientos),  $T_i$ , a los que, en una situación ideal, se pretende que llegue el sistema óptico. Dichos operandos se

## Consideraciones Previas

pueden referir tanto a la magnitud de distintas aberraciones, de las divergencias residuales, de la focal del sistema, del porcentaje de concentración de energía en una determinada área, etc...

La función de mérito  $MF$  se define como

$$MF^2 = \frac{\sum_i W_i (V_i - T_i)^2}{\sum_i W_i} . \quad (3.1)$$

Mediante su minimización en el proceso de optimización se pretenden encontrar los parámetros característicos del sistema que proporcionan una solución del sistema lo más cercana posible a los requerimientos,  $T_i$ . En la ec.(3.1),  $W_i$  son los valores absolutos de los pesos asignados a cada uno de los valores deseados de los operandos  $T_i$  y  $V_i$  definidos anteriormente. Estos últimos representan los valores de los operandos en cada iteración del proceso de optimización.

En el diseño propuesto los operandos  $T_i$  corresponden a los ángulos de divergencia de los rayos emergentes de cada una de las lentes. Por otro lado las variables  $V_i$  son los radios y constantes cónicas de cada una de las superficies ópticas, quedando fijado de antemano los índices de refracción de las diferentes lentes.

### 3.1.4 Descripción del sistema

#### 3.1.4.1 Sistema de lentes

Los índices de refracción de las lentes son valores comerciales obtenidos del catálogo de Schott (para vidrios BK7 y SF2). El sistema de lentes se encuentra alojado en el interior de un tubo cilíndrico de espesor 1mm. Este conjunto (sistema de lentes + tubo cilíndrico) es fijado al resto del sistema formado por la fuente LED y los espejos. Las superficies de las tres lentes ( $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$ , Figura 3. 6) vienen dadas por la geometría esférica [3. 16] obtenida tras el proceso de optimización

$$z = \frac{R \cdot \rho^2}{1 + \sqrt{1 - (k + 1)R^2 \rho^2}} + \sum_{i=1}^N \alpha_i \rho^i . \quad (3.2)$$

Donde  $R$  es el radio de curvatura,  $k$  la constante cónica,  $\rho$  la coordenada radial y los términos  $\alpha_i$  son los coeficientes esféricos.

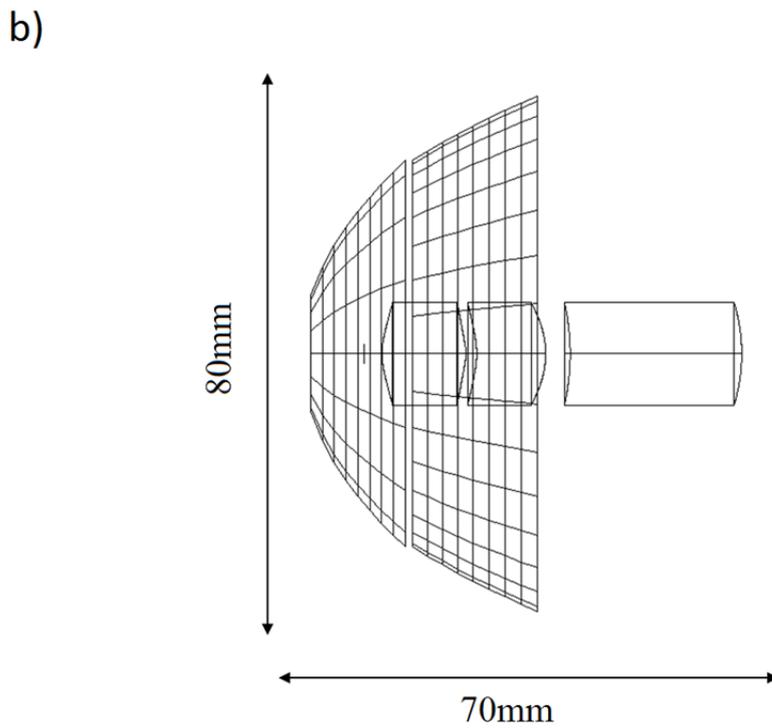
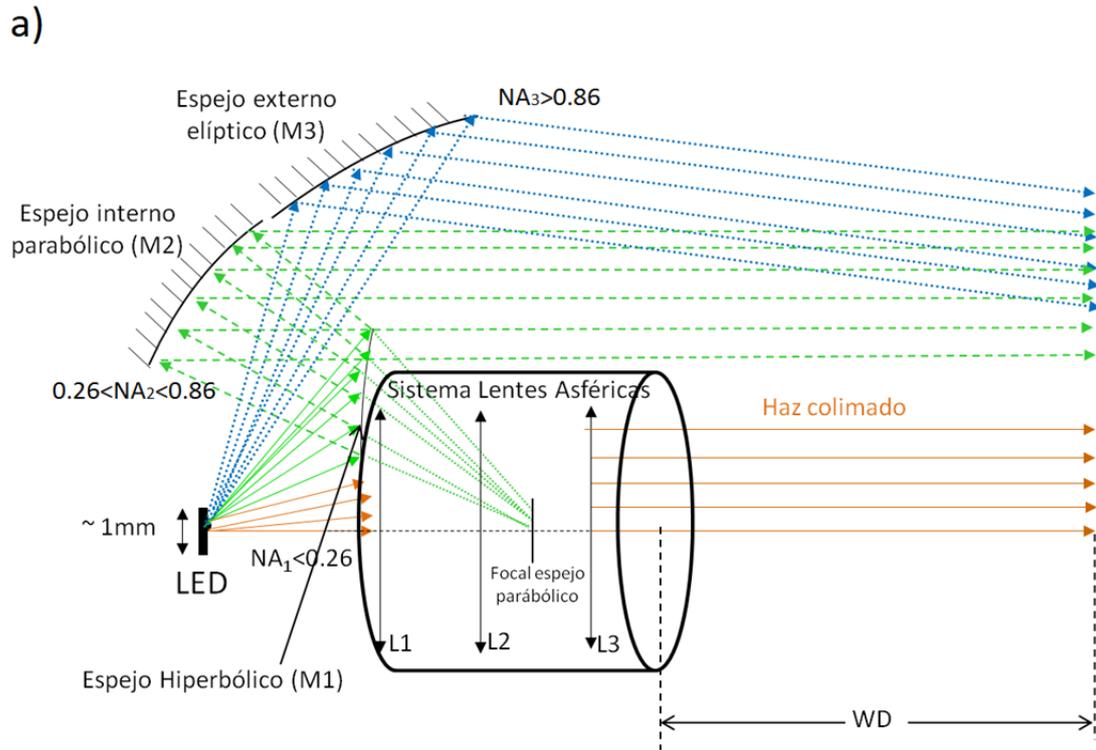


Figura 3. 6: a) Descripción esquemática de los diferentes sistemas, cada uno de ellos trabajando en un intervalo de NA  
 b) Sección transversal del sistema tal como lo representa ZEMAX®.

## Consideraciones Previas

Tras el proceso de optimización, se obtienen los valores de las distintas variables del sistema de lentes. La Tabla 3. 1 muestra los valores resultantes para cada una de las seis superficies.

Superficie	Radio de curvatura (mm)	Distancia previa a la superficie (mm)	Medio	Constante cónica
1	10.00	2.66	Air / BK7	-11.96
2	-2.41	13.00	BK7 / Air	-30.00
3	-12.00	1.60	Air /SF2	-16.39
4	-13.90	10.63	SF2 /Air	-1.22
5	-35.15	3.80	Air / BK7	-1.57
6	-27.16	26.44	BK7 / Air	-0.40

Tabla 3. 1: Especificaciones del diseño para bajas NA del sistema de lentes junto con el espejo hiperbólico.

### 3.1.4.2 Sistema de colimación mediante espejos

Los espejos parabólico e hiperbólico ( $M_1$  y  $M_2$  en la Figura 3. 6) se combinan para producir un sistema de colimación eficiente para aperturas  $0.26 < NA_2 < 0.86$ . Los correspondientes parámetros optimizados (curvaturas y aperturas) son mostrados en la Tabla 3. 2:

Espejo	Radio de curvatura (mm)	Constante cónica	Radio mínimo (mm)/ Apertura	Radio máximo (mm)/ Apertura
Hiperbólico (M1)	10.00	-11.96	0.72 / 0.26	12 / 0.86
Parabólico (M2)	28	-1.00	9 / 0.26	30 / 0.86

Tabla 3. 2: Especificaciones del diseño para el sistema de colimación mediante espejos.

Para los cálculos, ambos espejos fueron considerados metalizados mediante un recubrimiento de aluminio ya que proporciona altos valores de reflectancia (>90%) en todo el espectro visible, incluyendo el rango espectral de emisión de la fuente LED considerada ( $\lambda = 525 \pm 15 \mu\text{m}$ ).

### 3.1.4.3 Sistema de focalización

El espejo elíptico externo ( $M_3$  en Figura 3. 6, también recubierto de aluminio) colecta la mayor parte de los rayos marginales emitidos por la fuente LED ( $NA_3 > 0.86$ ) y los redirecciona a un plano determinado. Dicho plano es situado a una distancia  $WD = 125\text{mm}$  ya que supone una distancia de trabajo típica en distintas aplicaciones médicas. Para dicho valor de  $WD$  la distribución de luz puede ser optimizada para producir un haz con perfil de intensidad homogéneo o *top-hat*. Los parámetros de curvatura y apertura para esta  $WD$  son presentados en la Tabla 3. 3. Adicionalmente, resultados para otros valores de  $WD$  serán presentados en la siguiente sección. Finalmente, si este espejo es considerado como una pieza con posición variable, cambios de  $\pm 1\text{ mm}$  a lo largo del eje de propagación (eje óptico) pueden dar lugar a nuevos perfiles de irradiancia para una  $WD$  dada. Esta posibilidad será explorada en la sección de resultados.

Espejo	Radio de curvatura (mm)	Constante cónica	Radio mínimo (mm)/ Apertura	Radio máximo (mm)/ Apertura
Elíptico externo ( $M_3$ )	21.25	-0.905	30 / 0.86	40 / 0.92

Tabla 3. 3: Especificaciones del diseño del espejo de focalización ( $M_3$ ).

### 3.1.5 Resultados

La calidad del haz que emerge del sistema óptico es analizada mediante el estudio de los siguientes parámetros: eficiencia de colección ( $\epsilon_c$ ), uniformidad ( $U$ ) y, sólo para la parte de colimación, la divergencia residual ( $\theta_c$ ). Dichos parámetros han sido utilizados por otros autores para evaluar la calidad de diferentes sistemas de colimación comerciales [3. 17, 3. 15, 3. 18, 3. 19]. Sus valores han sido obtenidos para un cierto número de planos localizados en las siguientes  $WD$ s: 100, 125 y 150mm tras la última superficie. El perfil de haz en el plano de observación fue medido por un detector virtual simulado con ZEMAX® (80x80mm<sup>2</sup>, 300x300 pixels).

#### 3.1.5.1 Eficiencia de colección ( $\epsilon_c$ )

La iluminancia  $E$  (flujo luminoso incidente sobre una superficie por unidad de área) producida por un sistema óptico en cada punto de una cierta superficie es proporcional a la densidad de rayos que impactan sobre dicha superficie. Para un tamaño de superficie dado

## Consideraciones Previas

(denominado detector), el número total de rayos que lo alcanzan es el flujo de luz colectado ( $F_c$ ). La eficiencia de colección ( $\varepsilon_c$ ) se define como

$$\varepsilon_c = \frac{F_c}{F_s}. \quad (3.3)$$

Este parámetro da cuenta de pérdidas de potencia lumínica a lo largo del sistema óptico. La eficiencia de colección de todo el sistema obtenida mediante ZEMAX<sup>®</sup> es de aproximadamente el 85%. La fracción de este flujo por cada subsistema óptico es: i) sistema de lentes: 5.8%; ii) sistema de colimación mediante espejos: 68.0%; iii) espejo externo elíptico: 26.2%. Cada una de las anteriores con eficiencias individuales de: i) 98.3%, ii) 88.4% and iii) 73.7% respectivamente.

La Figura 3. 7 muestra la distribución espacial de iluminancia ( $E_c$ ) proporcionada por el sistema completo de iluminación para tres distancias de trabajo diferentes (la condición de perfil “sombbrero de copa” aparece a WD=125mm). La contribución individual de cada sistema es representada por su sección transversal. La iluminación proporcionada por la parte central de colimación (sistema de lentes) decae ligeramente desde la parte central para las tres posiciones analizadas. Este tiende a complementarse con la segunda parte de colimación (espejo interno parabólico). Sin embargo, la distribución de intensidad producida por el espejo externo elíptico cambia de manera más acusada para cada una de las WDs consideradas, como corresponde a un sistema no afocal (sistema que posee una longitud focal infinita y por tanto no produce ni convergencia ni divergencia del haz). Este puede ser utilizado no sólo para incrementar la eficiencia global del sistema sino para proporcionar una perfil de iluminancia tipo “sombbrero de copa” a una WD=125mm.

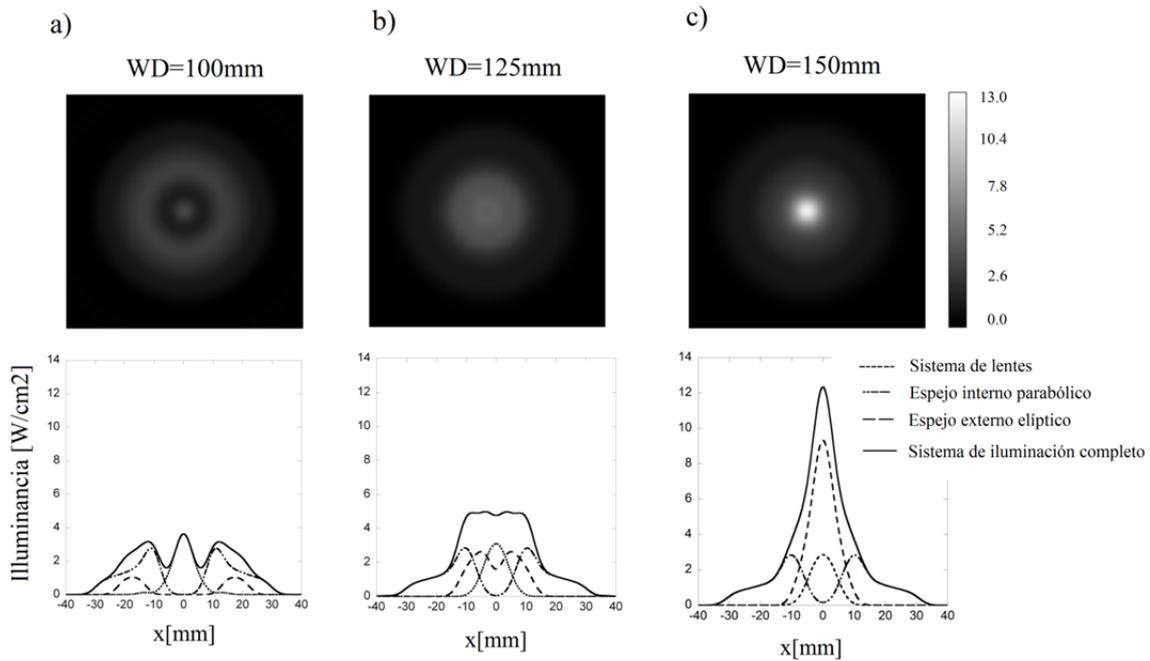


Figura 3. 7: Distribución espacial y sección transversal de la iluminancia obtenida para la condición de “sombrero de copa” o top-hat a  $WD=125\text{mm}$ . Perfiles para a)  $WD = 100\text{ mm}$ ; b)  $WD = 125\text{ mm}$ ; c)  $WD = 150\text{ mm}$ .

El espejo de focalización (espejo externo elíptico,  $M_3$ ), junto con la alta eficiencia que proporciona para rayos con altas NA ( $NA_3 > 0.86$ ), produce un perfil de irradiancia homogéneo rotacionalmente simétrico. Dicha distribución es fuertemente dependiente no sólo de la WD, sino también de la posición longitudinal de la fuente. Es decir, pequeños cambios en la posición del espejo elíptico pueden producir cambios significativos en la distribución espacial en un plano imagen dado. Como ejemplo, en la Figura 3. 8 se representan los perfiles de iluminación obtenidos para  $WD=125\text{mm}$  y variaciones en la posición del espejo externo elíptico  $\Delta = \pm 0.5, \pm 1\text{ mm}$ . La variación obtenida en los perfiles se pone claramente de manifiesto, desde un perfil de silla de montar *saddle* ( $\Delta = +1\text{mm}$ ) a un perfil Gaussiano ( $\Delta = -1\text{mm}$ ).

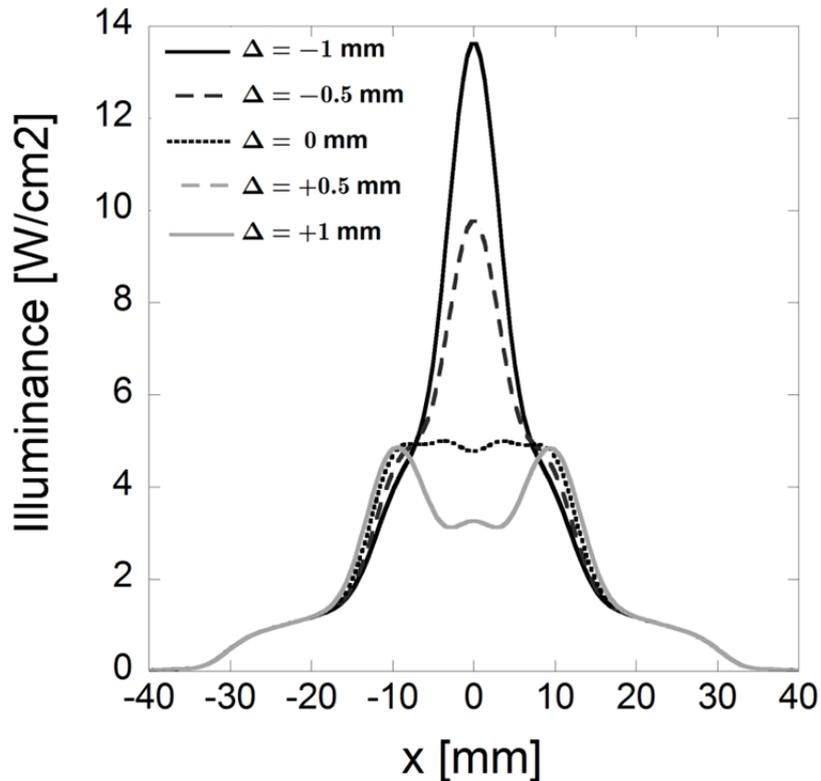


Figura 3. 8: Perfiles de iluminancia correspondientes a diferentes posiciones del espejo externo elíptico a una WD=125mm.

### 3.1.5.2 Uniformidad (U)

Un parámetro frecuentemente utilizado para caracterizar la calidad de un perfil de iluminancia es la uniformidad ( $U$ ) definida como [3. 19, 3. 20]

$$U = \frac{E_{C_{\max}} - E_{C_{\min}}}{E_{C_{\max}} + E_{C_{\min}}} \quad (3. 4)$$

Donde  $E_{C_{\max}}$  y  $E_{C_{\min}}$  son, respectivamente, los valores máximo y mínimo de la iluminancia a lo largo del área contenida en un plano transversal a la dirección de iluminación a una WD dada.

La Figura 3. 9 muestra los perfiles correspondientes al sistema de colimación y al sistema completo de iluminación sobre una apertura central de 18mm a una WD=125mm. Los correspondientes porcentajes de  $U$  sobre esta apertura son 15.4% y 2.5% para el sistema de colimación y de iluminación “sombbrero de copa” respectivamente. Por tanto, el uso de un espejo externo elíptico mejora notablemente la uniformidad del perfil de iluminancia del haz sobre una apertura de 18mm. Además, se observa un incremento de la iluminancia sobre la

zona de uniformidad cuando se considera la presencia del espejo elíptico  $M_3$  (aproximadamente un incremento del 37%).

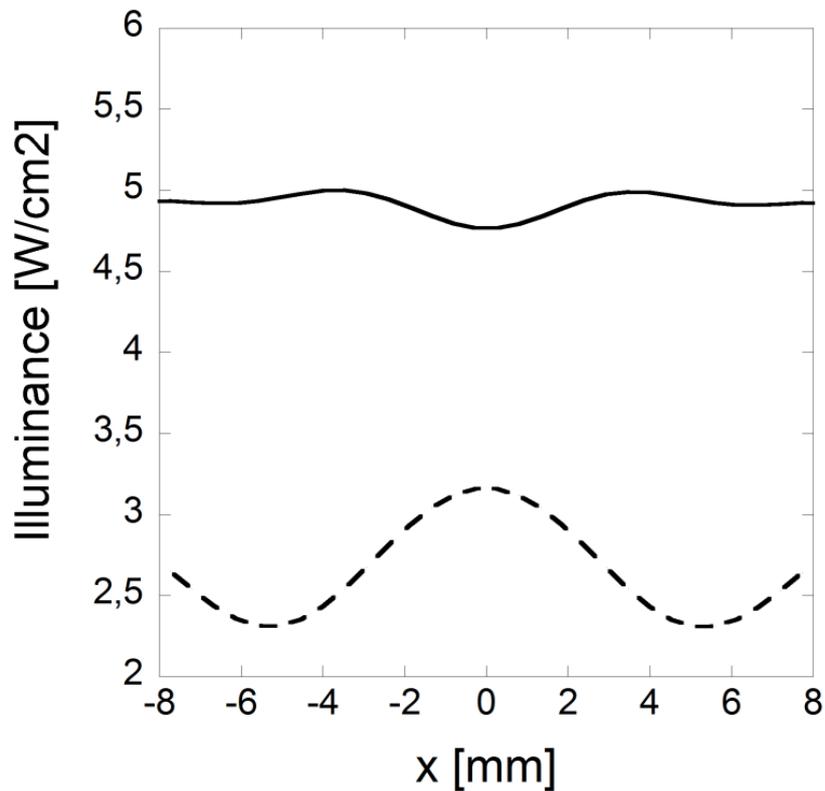


Figura 3. 9: Perfiles de iluminancia correspondientes a diferentes posiciones del espejo externo elíptico a una  $WD=125mm$ .

### 3.1.5.3 Divergencia residual ( $\theta_c$ )

El histograma de divergencia de los rayos emergentes del sistema (excluyendo el espejo externo elíptico  $M_3$ ) muestra, como se espera de un haz colimado, una típica forma simétrica con un máximo central. El valor en el que divergencia cae un factor  $e^{-2}$  del máximo de la curva es definido como divergencia residual  $\theta_c$ . Este parámetro es evaluado únicamente en la parte de colimación del sistema de iluminación LED.

El ángulo de divergencia de los rayos emergentes es representado en el histograma de la Figura 3. 10a) junto con una vista 3D del subsistema de colimación (Figura 3. 10b). La divergencia residual del haz colimado es  $\theta_c = 1.46^\circ$ . Dicho valor resulta consistente con el tamaño del LED y la distancia focal de los sistemas de colimación. Por tanto, el tamaño finito de la lente limita la capacidad de colimación del sistema propuesto con este objetivo.

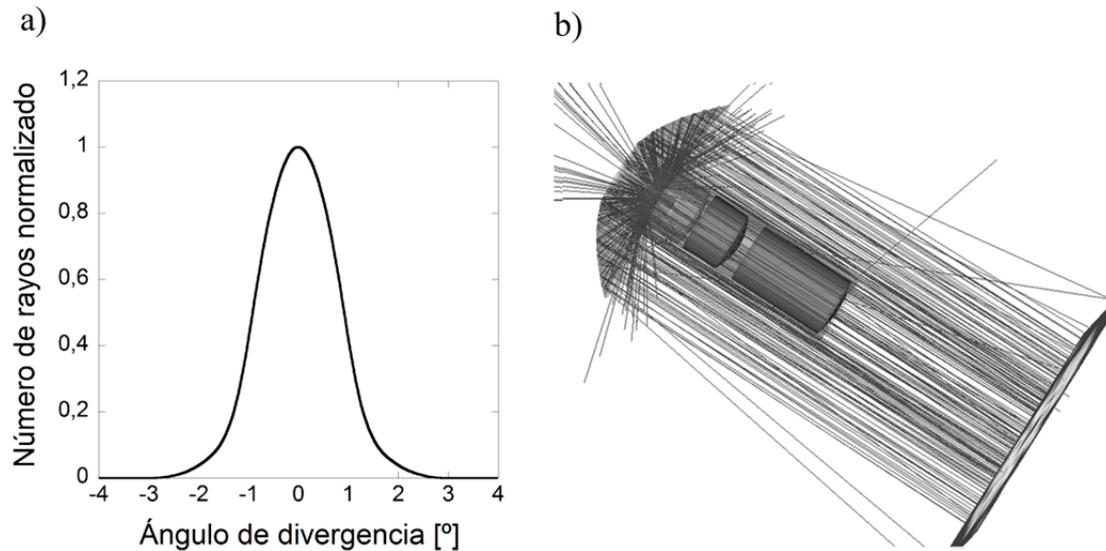


Figura 3. 10: Desarrollo del subsistema de colimación (sistema de lentes y espejos): a) Representación del trazado de rayos; b) Histograma de divergencia.

Así, el sistema de lentes junto con el sistema de espejos hiperbólico y parabólico constituye un sistema de colimación que proporciona un ángulo de divergencia significativamente bajo para un diámetro de haz de 20mm. Además, el actual desarrollo del sistema puede ser mejorado, en términos de eficiencia de colección y uniformidad, considerando la focalización de los rayos emergentes de la fuente con altas aperturas numéricas.

### 3.1.6 Conclusiones

En primer lugar, el diseño del sistema de iluminación LED ha constituido un punto de partida en el aprendizaje del manejo del software utilizado para el diseño y desarrollo del prototipo láser de diodos, objetivo principal de la presente Tesis. Además, dicho trabajo ha permitido establecer el patrón metodológico a seguir en el proceso de diseño óptico.

En cuanto al ejemplo seleccionado para el aprendizaje de la herramienta ZEMAX®, se ha diseñado un sistema de iluminación para colimar la luz procedente de una fuente LED. Además, el sistema proporciona un perfil de intensidad uniforme o *top-hat* a una distancia de trabajo de  $WD=125\text{mm}$ . La divergencia residual alcanzada por el sistema de colimación es de  $\theta_c=1.46^\circ$ . La eficiencia se encuentra en torno al 85% para todo el sistema y cerca del 65% si sólo es considerada la parte de colimación (96% considerando sólo  $NA<0.86$ ). El sistema proporciona un perfil de intensidad con una uniformidad del 2.5% sobre una apertura de 18mm. Dicha uniformidad es alcanzada gracias a una adecuada focalización mediante un espejo elíptico.

### 3.2 Láseres de semiconductor y su acoplamiento a fibra óptica

Como se ha expuesto previamente, los *láseres de diodos* (láseres de semiconductor) constituyen un tipo de láser que en la última década ha sido implantado en la industria de manera significativa y por tanto ha experimentado un importante nivel de desarrollo.

La emisión láser requiere de dos elementos esenciales: predominio de la emisión estimulada del medio activo para conseguir amplificación y resonador. El umbral de la emisión láser es obtenido cuando la ganancia en el resonador equilibra el conjunto de pérdidas. Por supuesto, ambos elementos se dan en los diodos láser. En ellos el resonador está formado por la propia estructura del semiconductor. La Figura 3. 11 muestra un esquema típico de un láser de semiconductor basado en hetero-uniones (dos materiales semiconductores de diferentes composición química) que permite obtener altas potencias de emisión ( $\approx 10\text{-}20\text{W}$  por emisor) disminuyendo considerablemente la densidad de corriente umbral en la unión p-n del semiconductor necesaria para producir la emisión láser. El bombeo se produce aplicando una corriente eléctrica a través de los contactos n y p. Este láser hace uso de la conductividad de ciertos semiconductores para el proceso de dopaje, lo que se consigue embebiendo impurezas con mayor o menor número de electrones en la bandas más externas. Estos átomos crean estados mecánico-cuánticos dentro del gap de energía. Si los nuevos estados están cerca del borde de la banda de valencia, los electrones ocuparán dichos estados dejando agujeros en la banda de valencia (*p-doping*). Si por el contrario, los nuevos estados se encuentran cerca de la banda de conducción, los electrones serán térmicamente excitados a la banda de conducción (*n-doping*). De esta manera, un diodo láser consiste en una parte dopada-p y otra dopada-n. La ganancia óptica es generada en la unión p-n (Figura 3. 11).

## Consideraciones Previas

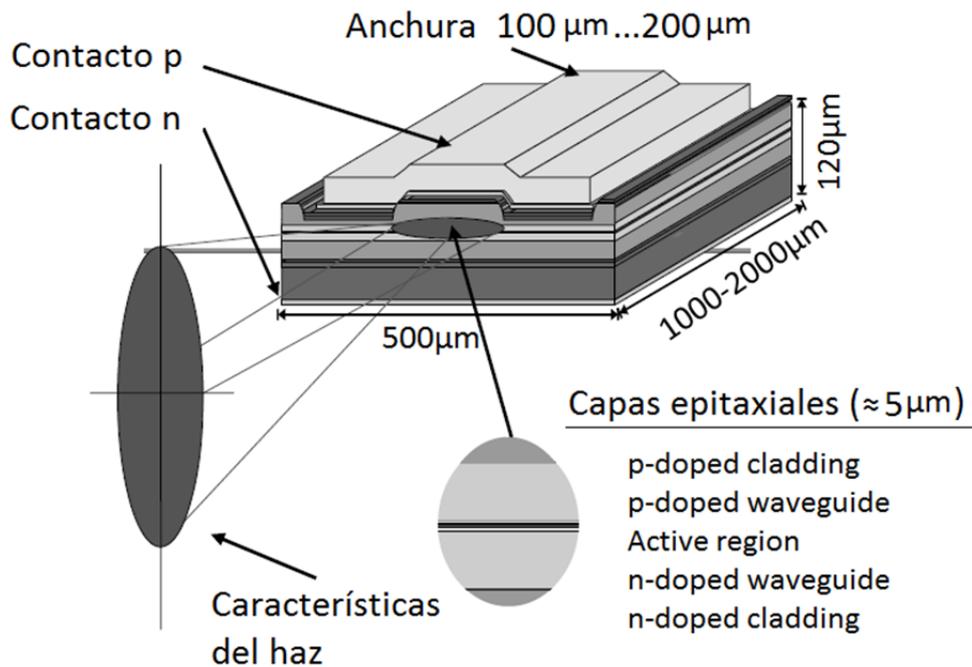


Figura 3. 11: Esquema de un diodo láser semiconductor con heterouniones [3. 21].

Las aplicaciones de sistemas láser de diodos de alta potencia se han incrementado notablemente en los últimos años. Las ventajas que presentan estos sistemas frente a otro tipo de láseres (principalmente láseres de estado sólido) son:

- alta eficiencia electro-óptica
- diseño compacto
- altos tiempo de vida
- disminución de costes.
- pueden ser guiados por fibra óptica, lo que permite una configuración más versátil en entornos industriales.

En la actualidad, se dispone de sistemas que proporcionan elevadas potencias (>5kW) con calidades de haz en continua mejora. Lo anterior es consecuencia del desarrollo de nuevos materiales como medio activo, relevantes avances relativos a intercambiadores de calor y mejoradas tecnologías de ensamblaje. Como consecuencia de la evolución de esta tecnología, el uso de sistemas láser de diodo ha experimentado un importante aumento en aplicaciones como procesado de materiales, tratamientos médicos o bombeo de láseres de estado sólido [3. 22 - 3. 24]. Para muchas de estas aplicaciones son requeridas altas densidades de potencia y, en muchos casos, es ventajoso proporcionar el guiado del haz láser hasta la zona de trabajo mediante fibra óptica.

Por otro lado, una de las principales desventajas que presentan estos láseres es la baja calidad óptica de la radiación emitida [3. 21]. La calidad de un haz láser representa la capacidad del mismo para ser enfocado. Mayor calidad del haz implica menor tamaño de spot en el plano de focalización y por tanto mayores densidades de potencia. La descripción analítica de este parámetro será presentada en la sección 3.3. En consecuencia, para llevar a cabo de manera eficiente el acoplamiento de la radiación procedente de este tipo de láseres a fibra óptica (sistemas de barras o pilas) se requieren técnicas de conformado del haz que mejoren su calidad [3. 25]. Mediante dicha mejora es posible acoplar la radiación a la entrada de una fibra [3. 26]. Las principales técnicas de conformado del haz desarrolladas en los últimos años serán descritas en detalle en la sección 3.5.

### 3.3 Calidad de un haz láser

La calidad de un haz láser representa una medida de su grado de enfoque bajo ciertas condiciones intrínsecas al haz como es su divergencia. En el estudio de la calidad de un haz láser es esencial conocer las propiedades de propagación de una haz Gaussiano monocromático. Dichas propiedades serán utilizadas para aproximar el comportamiento de haces que no son perfectamente gaussianos, es decir, haces que representan la “envolvente” de un haz Gaussiano. Este tipo de haz es conocido como haz Gaussiano Empotrado (EGB del inglés *Embedded Gaussian Beam*).

Como paso previo a la especificación de los parámetros que definen la calidad de una haz láser, se definen sus modos transversales, ya que están involucrados en los conceptos de haz Gaussiano y haz Gaussiano Empotrado. El modo transversal TM (del inglés *Transversal Mode*) de un haz de radiación electromagnética describe el patrón de radiación medido en un plano perpendicular al de propagación del haz (transversal). Los modos transversales se describen mediante la combinación de un perfil de haz Gaussiano con polinomios de Laguerre. Estos modos se denotan por  $TEM_{nm}$  donde  $n$  y  $m$  son números enteros que representan los órdenes del modo radial y angular respectivamente. Así, el modo  $TEM_{00}$  corresponde al estado fundamental (haz Gaussiano puro). Los modos de más alto orden presentan lóbulos en las direcciones vertical y horizontal [3. 27].

El perfil de intensidad de un haz idealmente Gaussiano en una dimensión ( $TEM_0$ ), viene descrito por

$$u(r, z) = \left( \frac{2}{\pi w^2(z)} \right)^{1/4} \cdot \exp \left[ -r^2/w^2(z) \right]. \quad (3.5)$$

## Consideraciones Previas

Donde  $r$  ( $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ) representa la distancia axial del punto (x,y) considerado al eje de propagación, mientras que  $w = w(z)$  y  $R = R(z)$  representan respectivamente, la dependencia del radio del haz y del radio del frente de onda con la posición a lo largo del eje de propagación (Figura 3. 12). Dichos parámetros vienen dados por

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left( \frac{(z - z_0)^2}{z_R^2} \right)}, \quad (3.6)$$

$$R(z) = (z - z_0) \sqrt{1 + \left( \frac{z_R^2}{(z - z_0)^2} \right)}, \quad (3.7)$$

respectivamente, donde  $z_0$  es la posición de la cintura del haz Gaussiano y

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}. \quad (3.8)$$

es la longitud de Rayleigh, que representa la distancia desde la posición de la cintura del haz ( $z_0$ ) a la cual el valor de la cintura del haz se incrementa en un factor  $\sqrt{2}$  ( $w(z_R) = \sqrt{2} \cdot w_0$ ). Tanto el diámetro del haz ( $2w(z)$ ) como el radio de curvatura del frente de onda  $R(z)$  vienen descritos por una hipérbola a lo largo del eje de propagación (Figura 3. 12). A largas distancias de la posición de la cintura del haz ( $z_0$ ),  $|z - z_0| \gg z_R$ , el radio de curvatura inicialmente tiende a  $R \rightarrow (z - z_0)$  y después, el frente de onda llega a ser plano  $|R| \rightarrow \infty$  cuando  $|z - z_0| \rightarrow \infty$ , y además es plano en la posición  $(z - z_0) = 0$ . La zona  $|z - z_0| \gg z_R$  es denominada **campo lejano**, y cobra especial importancia en la medida de la divergencia del haz durante el estudio de la calidad del haz láser. Por otro lado, la región a lo largo del eje de propagación situada dentro de la longitud de Rayleigh (ec.3. 8), se denomina **campo cercano** [3. 21, 3. 28]. El perfil de intensidad en campo lejano revela detalles de la divergencia del haz que en campo cercano sólo pueden ser obtenidos a través de la medida del frente de onda del haz.

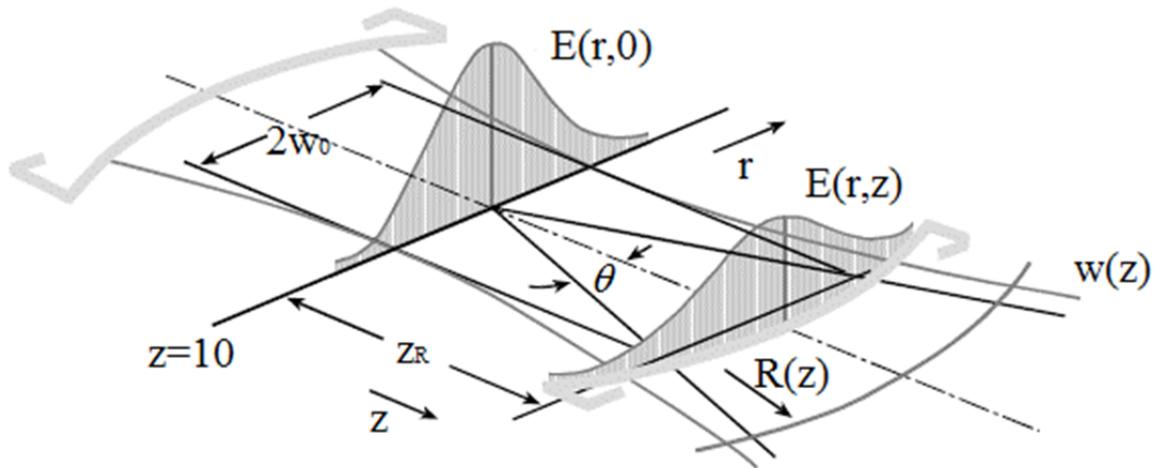


Figura 3. 12: Descripción esquemática de la dependencia de la cintura del haz y su frente de onda a lo largo del eje de propagación [3. 29].

Sin embargo en los casos donde se consideren haces láser multimodo, por ejemplo para guiado por fibras multimodo o en una gran cantidad de aplicaciones en el procesamiento de materiales, el perfil del haz que es presentado como Gaussiano es en realidad un haz Gaussiano Empotrado EGB debido a que contiene una superposición incoherente de modos de más alto orden ( $TEM_{01}$ ,  $TEM_{10}$ ,  $TEM_{11}$ ,  $TEM_{20}$ , etc.).

El factor que da cuenta del grado de aproximación de un haz real a un haz Gaussiano es el **Factor de Propagación del haz  $M^2$** . Dicho parámetro proporciona una medida de la calidad de un haz láser arbitrario con respecto a un haz ideal Gaussiano [3. 28]. Mediante dicho factor  $M^2$  es posible describir cuantitativamente la calidad del haz láser en el espacio libre y a través de lentes, respecto a un haz láser perfectamente Gaussiano ( $TEM_{00}$ ). La cintura de un haz arbitrario puede ser medida a través del *Factor de Propagación del haz* definido como [norma UNE-EN ISO 11146-1:2003]

$$M^2 = \frac{\pi W_0^2}{\lambda z_R} . \quad (3.9)$$

Algunas de las características del factor de propagación de haz son:

- Los valores de  $M_x^2$  y  $M_y^2$  son  $\geq 1$  para haces reales o no-Gaussianos, con el límite de  $M^2=1$  en el caso de un haz Gaussiano monocromático  $TEM_{00}$ .
- El valor de  $M^2$  limita el grado en que el haz puede ser focalizado para un ángulo de divergencia y un diámetro de haz dados. Junto con la potencia óptica, este factor determina el brillo/irradiancia de un haz láser.

## Consideraciones Previas

- El valor de  $M^2$  es un invariante del haz y es conservado cuando el haz se propaga a través de elementos ópticos sin aberraciones [3. 30].

El radio de un haz láser multimodo ( $W(z)$ ) y el radio de su frente de onda ( $R(z)$ ) pueden ser expresados para todos los puntos a lo largo del eje de propagación mediante

$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left( \frac{(z - z_0)^2}{z_R^2} \right)}, \quad (3. 10)$$

$$R(z) = (z - z_0) \sqrt{1 + \left( \frac{z_R^2}{(z - z_0)^2} \right)}, \quad (3. 11)$$

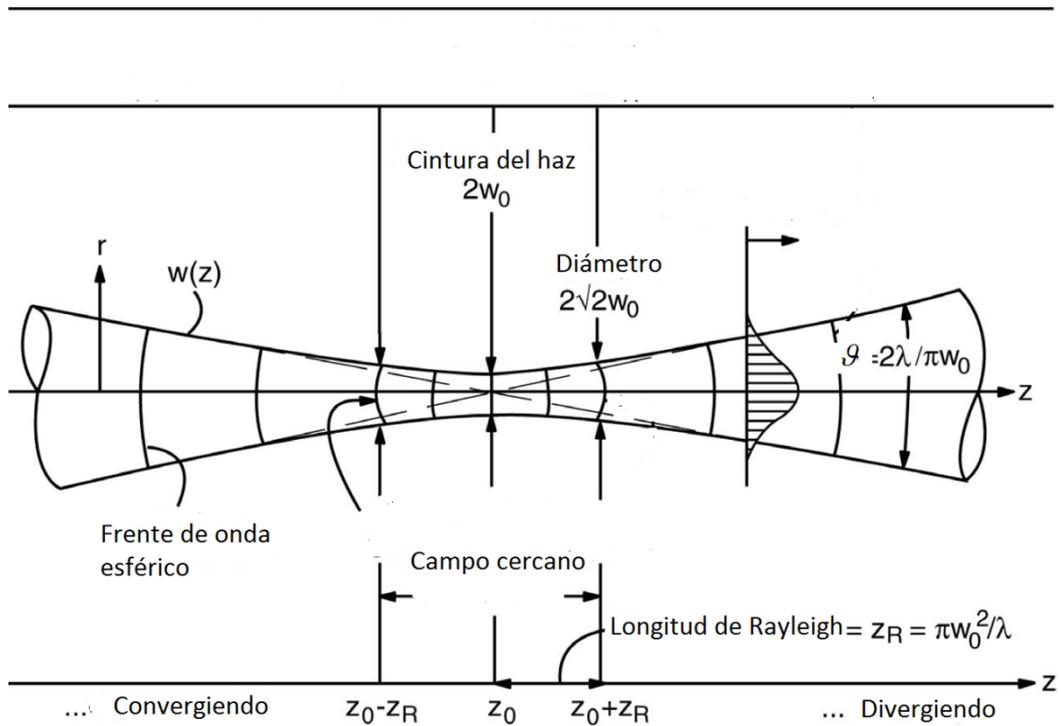
$$z_R = \frac{\pi W_0^2}{M^2 \lambda} = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} = z_R. \quad (3. 12)$$

Sustituyendo en la ec.(3.12)  $W_0 = M \cdot w_0$ , puede observarse que la longitud de Rayleigh es la misma para el haz Gaussiano TEM<sub>00</sub> y el correspondiente haz Gaussiano Empotrado [3. 28].

Si a lo largo de dos planos perpendiculares (x,z) (y,z) se consideran propagaciones diferentes, es necesario especificar dos constantes para la definición de la propagación del haz láser:  $M_x^2$  y  $M_y^2$  respectivamente.

La Figura 3. 13a) muestra una representación esquemática de la propagación de un haz Gaussiano, mientras que en la Figura 3. 13b) puede observarse la propagación de un haz Gaussiano real en cuyo interior se encuentra embebido el correspondiente haz Gaussiano. Dicha representación informa sobre la evolución del radio del haz a lo largo del eje de propagación y es conocida como **cáustica**.

a)



b)

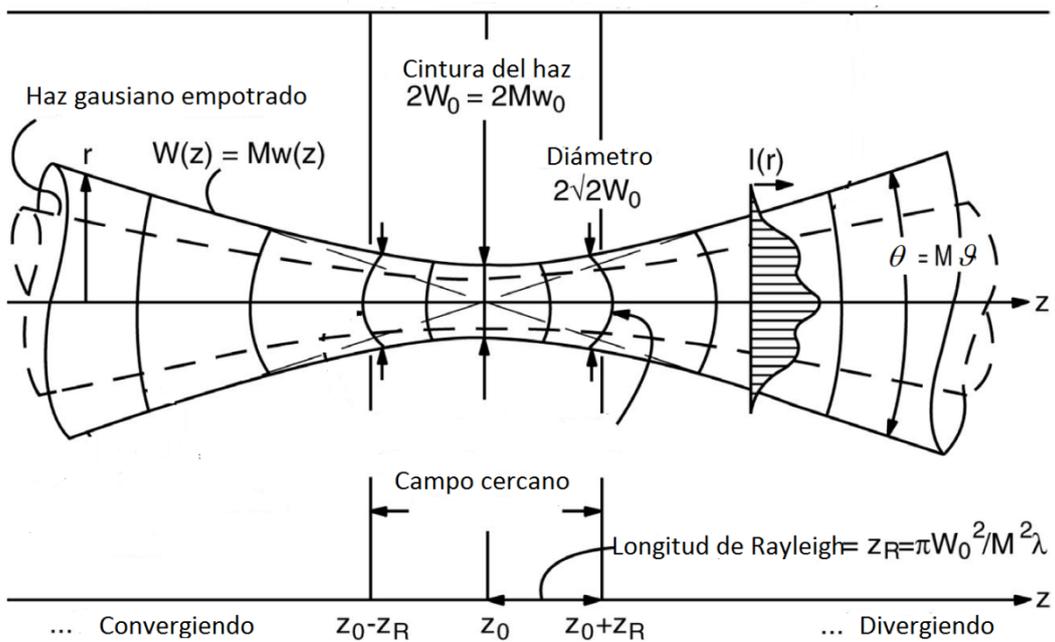


Figura 3. 13: Propiedades de propagación de un a) haz ideal Gaussiano; b) haz real con  $M^2=2.6$ . [3. 28].

## Consideraciones Previas

Otro parámetro empleado para la medida de la calidad del haz láser y que está relacionado con el factor de propagación de haz  $M^2$ , es el **Producto del Haz BPP** (del inglés *Beam Parameter Product*) que, de acuerdo con la norma ISO1146 [ISO 11146-2:2005], es definido como

$$BPP = W \cdot \theta \equiv \frac{\lambda}{\pi} \cdot M^2. \quad (3.13)$$

Donde  $W$  y  $\theta$  denotan la anchura del haz medida en campo cercano y el semiángulo de divergencia medido en campo lejano [3. 29, 3. 30-3. 33]. El valor del BPP toma el valor mínimo ( $BPP_{min}$ ), llamado "límite de difracción" para haces Gaussianos monocromáticos ( $M^2=1$ ). En el caso de haces reales (no-Gaussianos), el BPP es definido como el producto de  $M^2$  veces el BPP del haz Gaussiano empotrado ( $BPP_{min}$ ), de tal forma que

$$M^2 = \frac{BPP}{BPP_{min}}. \quad (3.14)$$

La divergencia del haz en campo lejano [ $\theta$ ] se define como el semiángulo que forman la asíntota a la que tiende el radio y el propio eje  $z$  cuando el valor de  $z \rightarrow \infty$

$$\theta = \lim_{z \rightarrow \infty} \arctan \frac{w(z)}{z} = \lim_{z \rightarrow \infty} \arctan \frac{w_0 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]^{1/2}}{z} = \frac{\lambda}{\pi w_0} = \frac{w_0}{z_R}. \quad (3.15)$$

Otro parámetro frecuentemente utilizado en el contexto de haces láser es el **Brillo (B)**. Dicho parámetro es definido como la potencia óptica dividida entre el producto del área de la sección del haz láser en foco y en ángulo sólido en campo lejano y por tanto está relacionado con la calidad del haz láser [3. 21].  $B$  viene definido como

$$B = \frac{P}{\pi w_0^2 \cdot \pi \theta^2} = \frac{P}{\pi^2 \cdot BPP_x \cdot BPP_y} = \frac{P}{\lambda^2 \cdot M_x^2 \cdot M_y^2} \quad (3.16)$$

Tanto el Brillo como el Producto del Haz se conservan a lo largo de un sistema óptico sin aberraciones para una longitud de onda y un estado de polarización dados [3. 35].

### 3.4 Caracterización de la radiación generada por una barra de diodos láser

En la mayor parte de los casos, los sistemas láser de diodos de alta potencia están basados en la unión de un conjunto de barras constituidas por este tipo de diodos. La Figura 3.14 muestra la estructura básica de una de estas barras. En la dirección  $y$  (dirección perpendicular al plano de la unión p-n) la calidad del haz, en términos generales, se encuentra próxima al límite de una haz perfectamente Gaussiano dado que el haz emerge de una región que tiene una anchura del orden de la micra. El ángulo de divergencia correspondiente es alto, pudiendo alcanzar valores en torno a  $100^\circ$  (ángulo completo). Dado que el haz diverge de manera rápida en esta dirección a lo largo del eje de propagación, el eje  $y$  es conocido como **eje rápido FA** (del inglés *Fast Axis*). Por el contrario, la anchura emisora del diodo en el eje  $x$  es mayor que en el eje  $y$ , tomando valores típicos del orden de las 100 micras. La calidad del haz en este eje es considerablemente menor que en el FA. Dado que los ángulos de divergencia en este eje son del orden de varios grados, su lenta divergencia a lo largo del eje de propagación le confiere el nombre de **eje lento SA** (del inglés *Slow Axis*) (Figura 3.14) [3. 21]. Por tanto, la emisión de estas barras presenta importantes dificultades para la manipulación óptica de la radiación debido a las diferentes propiedades en la emisión entre los dos ejes transversales  $x$  e  $y$ . Estas diferencias inducen un notable astigmatismo y asimetría en el haz generado. Como consecuencia, su calidad es muy diferente en ambos ejes. Adicionalmente, la radiación en el SA puede ser considerada como la superposición de la radiación procedente de varios diodos láser. Las dimensiones típicas en el SA ( $2w_x$  en Figura 3.14) varían en el rango  $50\text{-}200\mu\text{m}$  con distancias entre centros emisores ( $p$  en Figura 3.14)) que varían entre  $100$  y  $500\mu\text{m}$ .

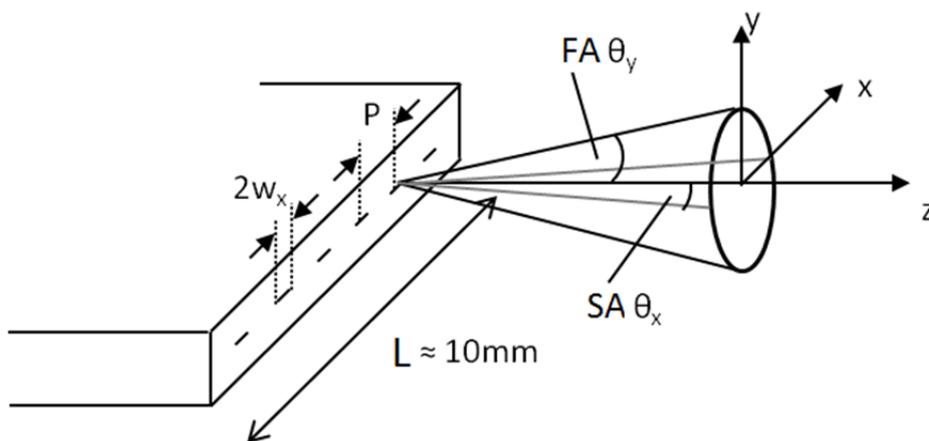


Figura 3.14: Geometría típica de una barra de diodos láser con dimensión total  $L \approx 10\text{mm}$  [3. 36].

La relación entre tamaño de los emisores (Figura 3. 15) y la separación entre sus centros se denomina **Factor de Llenado FF** (del inglés *Fill Factor*) y es un parámetro de

## Consideraciones Previas

significativa importancia para este tipo de configuraciones y sus diferentes variantes de apilado. El  $FF$  resultante  $(2 \cdot w_{x(emitter)} / p)$  permite la clasificación de este tipo de sistemas en sistemas con un alto  $FF$  ( $>90\%$ ) o bajo  $FF$  ( $<30\%$ ) [3. 35, 3. 36]. Las dimensiones verticales de los emisores son típicamente del orden de  $2 \cdot w_y = 1 \mu m$ . El número de emisores y el espaciado entre ellos ( $FF$ ) depende de la carga térmica y pueden ser optimizados por un amplia variedad de requisitos de funcionamiento [3. 37].

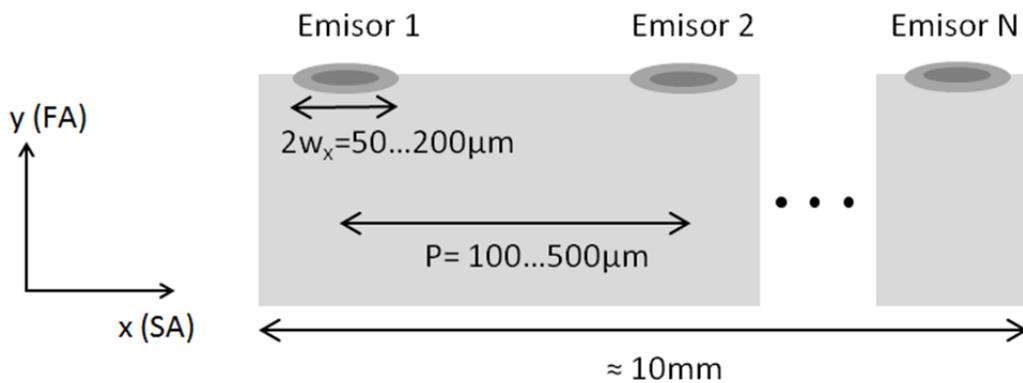


Figura 3. 15: Vista frontal esquemática de la disposición de emisores a lo largo del SA.

Debido al tamaño micrométrico y sección no circular de la región activa, la radiación emitida en la dirección perpendicular al chip semiconductor (plano  $yz$ , unión p-n, eje rápido FA), posee una alta divergencia, del orden de  $20-45^\circ$ , mientras que en la dirección paralela al chip (plano  $xz$ , eje lento SA), los valores típicos de divergencia se encuentran en torno a los  $5-20^\circ$ . En consecuencia, el factor de propagación de haz  $M^2$  (ec. (3.9)) es aproximadamente 1 en la dirección del FA y en torno a 1700 en la dirección del SA. Por esta razón, es frecuente la utilización de micro-óptica de colimación al menos en el FA (*Fast Axis Collimation* FAC), aunque cada vez son más comunes las barras o apilamientos de diodos láser con micro-óptica de colimación en ambos ejes (SAC y FAC). Dicha colimación es llevada a cabo mediante una barra de micro-lentes cilíndricas situadas inmediatamente después de los diodos emisores y donde la precisión en el posicionamiento es crítica para evitar la degradación del haz láser causada por posibles desalineamientos entre las microlentes y cada uno de los diodos emisores [3. 39].

La distribución angular en campo lejano en el FA es cercana a la gaussiana, mientras que en el SA varía, tanto en divergencia como en forma, en función de la corriente inyectada en los diodos y por lo tanto es función de la potencia óptica de emisión. Dicha distribución es usualmente descrita por una función super-gaussiana o un perfil sombrero de copa (*top-hat*) [3. 36-3. 39].

Por lo tanto, la manipulación de la radiación generada por diodos láser de alta potencia requiere técnicas de conformado del haz debido a la asimetría de su calidad. Estas técnicas son ampliamente utilizadas en sistemas ópticos destinados al guiado de haces láser procedentes de diodos y su posterior acoplamiento a fibra óptica.

### 3.5 Técnicas de conformado del haz (*Beam Shaping*) para acoplamiento a fibra óptica

En sistemas de diodos láser acoplados a fibra óptica, la simetría circular del núcleo de la fibra óptica requiere disponer, a la entrada de la fibra, de un haz láser cuyos  $BPP$ 's en los ejes SA y FA sean simétricos. La cantidad de radiación que puede ser acoplada en una fibra óptica viene gobernada por el **Producto del Haz de la fibra óptica** ( $BPP_f$ ), dado por

$$BPP_f = \frac{d_{fibra}}{2} \cdot NA \equiv M^2_{fibra} \cdot \frac{\lambda}{\pi} . \quad (3.17)$$

Donde  $NA$  y  $d_{fibra}$  denotan la apertura numérica y el diámetro del núcleo de la fibra óptica respectivamente [3. 32, 3. 40].

A partir de los valores de calidad del haz láser en los ejes lento y rápido ( $BPP_{SA}$  y  $BPP_{FA}$  respectivamente) es posible definir un valor global del Producto del Haz ( $BPP_{total}$ ) que contiene la información relativa a ambos ejes [3. 41]

$$BPP_{total} = \sqrt{BPP_{SA}^2 + BPP_{FA}^2} . \quad (3.18)$$

La eficiencia del acoplamiento a fibra de una haz láser viene determinada por

$$BPP_{total} \leq BPP_f . \quad (3.19)$$

Por lo tanto, un eficiente acoplamiento a fibra es sólo posible si los  $BPP$ s en las direcciones transversales de propagación ( $BPP_{SA}$  y  $BPP_{FA}$ ) son transformados para conseguir su simetrización. De la ec. (3.18) se extrae que una minimización del  $BPP_{total}$  conlleva una simetrización de  $BPP$ s.

La propuesta básica de las técnicas de transformación de haces láser consiste en el cambio del tamaño del haz y el ángulo de divergencia en las dos dimensiones laterales (SA y FA) mientras se mantiene constante el brillo del haz (ec.3.16). Diferentes técnicas han sido desarrolladas con el fin de manipular o transformar la radiación láser para obtener un eficiente acoplamiento a fibra óptica. Estas soluciones se pueden dividir en dos tipos:

## Consideraciones Previas

soluciones para formación de imagen y soluciones de iluminación (*imaging and non-imaging solutions* respectivamente). En la primera de ellas cada emisor es acoplado a fibra mediante micro-componentes ópticos que rotan su divergencia con el fin de alcanzar la simetrización de *BPPs* [3. 42, 3. 43]. En muchos casos estas soluciones van acompañadas de una notable reducción del brillo. Además, el hecho de estar basadas en micro-componentes ópticos y óptica difractiva supone una dificultad añadida en la fabricación y en el alineamiento para las tolerancias requeridas [3. 44, 3. 45]. Las soluciones de iluminación abordan la problemática de *conformado del haz* subdividiendo la radiación láser colimada del FA de la barra de diodos y recombinándola con el fin de simetrizar la calidad del haz en los dos ejes ortogonales (ec.(3.18)). Dentro de este tipo de soluciones, Clarkson et al. [3. 44] propusieron un sistema de conformado del haz compuesto por dos espejos planos, paralelos, descentrados y separados una cierta distancia, mediante el que se realiza la simetrización de la barra de diodos. P.Y. Wang et al. [3. 46] desarrollaron un sistema para conformado del haz que opera en reflexión total interna con prismas de ángulo recto, los cuales forman un apilamiento descentrado. Ehlers et al. [3. 47] and Treush et al. [3. 37] emplearon dos escalas de espejos para redistribuir la radiación emitida por una barra de diodos y realizar el acoplamiento a fibra óptica. Esta solución es hoy día una conocida y eficiente técnica con ciertas ventajas frente a las soluciones para formación de imagen: requerimientos menos restrictivos en cuanto al alineamiento y bajos costes en la fabricación de los componentes ópticos. Ésta última opción ha sido la elegida en el desarrollo del presente trabajo.

Tras el conformado del haz, un proceso de similar relevancia es aquel que permite incrementar la potencia del sistema láser con el fin de ampliar su rango de aplicaciones. La superposición incoherente de la radiación emitida por varias fuentes láser (método de multiplexado) es ampliamente utilizada en este tipo de sistemas para procesado de materiales, aplicaciones médicas o bombeo de láseres de estado sólido. Mediante estas técnicas de superposición se logra aumentar la potencia de salida, manteniendo casi invariante la calidad del haz y por lo tanto la eficiencia en el acoplamiento a fibra óptica. De esta manera es posible aumentar el brillo del haz (ec.3.16). A continuación se presenta una descripción de las diferentes técnicas de multiplexado empleadas en la actualidad para aumentar el brillo de los haces procedentes de fuentes de diodos láser.

### 3.5.1 Técnicas de multiplexado

Los principales técnicas de superposición utilizadas en los sistemas de diodos láser de alto brillo son mostrados en la Figura 3. 16. La técnica más común se basa en "*multiplexado espacial*" (Figura 3. 16a), mediante la cual los haces láser individuales son dispuestos uno al lado del otro en una o dos dimensiones. De esta manera se incrementa la potencia de salida,

incrementado también el tamaño del haz y por lo tanto reduciendo la calidad del mismo (ec.(3.9)). Dos técnicas complementarias, que incrementan la potencia de salida manteniendo constante el tamaño del haz son el “*biplexado por polarización*” (Figura 3. 16b) y el “*multiplexado en longitud de onda*” (Figura 3. 16c). En sistemas con biplexado por polarización dos haces linealmente polarizados con polarizaciones perpendiculares entre sí (denotadas por *S* y *P* respectivamente) son unidos mediante un divisor de haces sensible al estado de polarización. Los sistemas que utilizan multiplexado en longitud de onda pueden superponer varios haces láser con diferentes longitudes de onda realizando dicha unión mediante componentes dicróicos [3. 21].

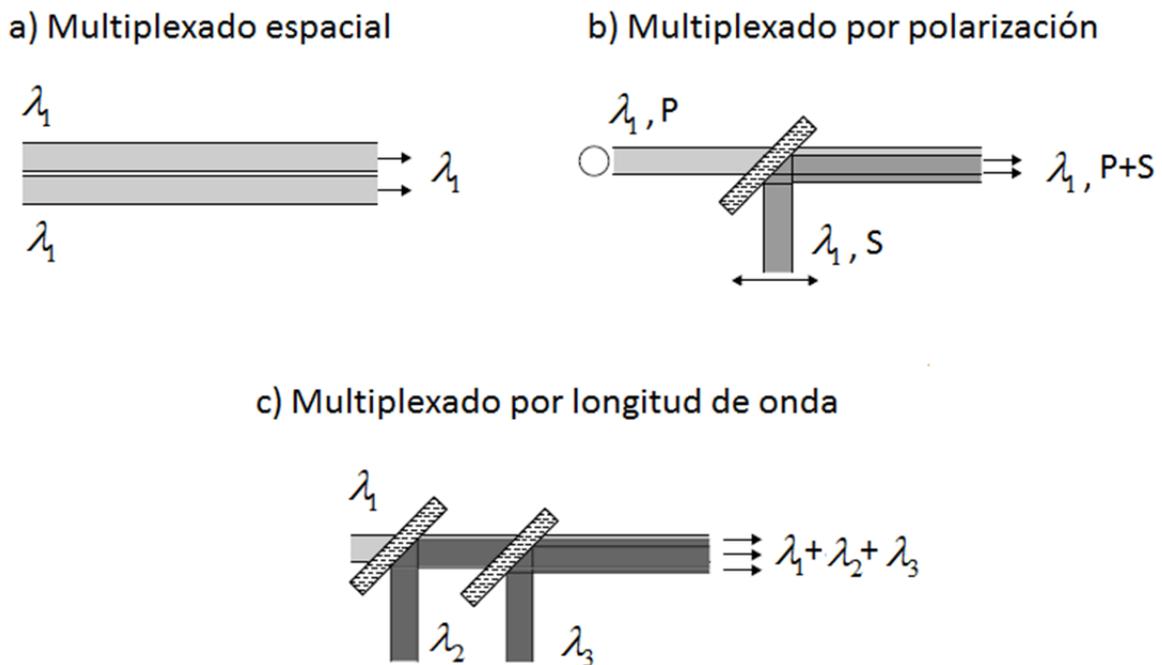


Figura 3. 16: Técnicas básicas de superposición incoherente de haces láser.

Los niveles de potencia necesarios para la aplicación abordada en esta Tesis (microsoldadura de termoplásticos) implican la necesidad de llevar a cabo uno de los multiplexados presentados. El multiplexado espacial no ha sido utilizado dado que, como consecuencia de la notable pérdida de calidad del haz en este proceso, son necesarios sistemas ópticos de formateo de importante complejidad [3. 48]. Por otro lado, los requerimientos en cuanto a monocromaticidad requeridos por la aplicación hacen que la utilización del multiplexado por longitud de onda no sea viable en nuestro prototipo. En base a lo expuesto y teniendo en cuenta que las barras de diodos láser elegidas para el desarrollo del sistema de este trabajo poseen un alto grado de polarización, la técnica de multiplexado elegida ha sido la mostrada en la Figura 3. 16b): el ***biplexado por polarización***.

## Consideraciones Previas

Dado que la técnica seleccionada tiene como concepto básico el de la polarización de la luz y requiere de su conocimiento tras cada uno de los componentes ópticos del sistema bajo análisis, es necesario describir la herramienta matemática que nos permitirá realizar este análisis. Esta herramienta, conocida como *método de Jones*, consiste en la formulación del estado de polarización de la luz mediante vectores 2x2 y en la de los diferentes componentes ópticos con los que el haz polarizado interacciona mediante matrices 2x2. A esos vectores y matrices se les denomina **vectores y matrices de Jones**.

El formalismo de Müller es el más aceptado por la comunidad científica para representar la polarización de un haz de radiación electromagnética, cualquiera que sea su estado: completamente polarizado, parcialmente polarizado o completamente despolarizado (haz incoherente). Además de este formalismo general, para el caso de haces completamente polarizados o coherentes, el físico americano R. Clark Jones, introdujo en 1941 otro formalismo más simple, conocido como formalismo de Jones. Según este formalismo, el campo eléctrico de un haz coherente puede representarse mediante un vector 2x2 dado por [3. 1]

$$\vec{E} = \begin{bmatrix} E_x(t) \\ E_y(t) \end{bmatrix}. \quad (3.20)$$

Donde  $E_x(t)$  y  $E_y(t)$  son las componentes escalares instantáneas del vector  $\vec{E}$  en dos direcciones ortogonales entre sí, x e y, y ortogonales a la dirección de propagación z. Conociendo este vector, disponemos de toda la información sobre su estado de polarización. Si mostramos analíticamente la información relativa a la fase, la ec. (3.20) se transforma en

$$\vec{E} = \begin{bmatrix} E_{0x} \cdot e^{i\varphi_x} \\ E_{0y} \cdot e^{i\varphi_y} \end{bmatrix}. \quad (3.21)$$

Donde  $\varphi_x$  y  $\varphi_y$  son las fases correspondientes a las dos componentes del campo eléctrico. El vector campo eléctrico mostrado en la ec.(3.21) es el vector de Jones, que representa la amplitud y fase relativas del campo eléctrico en las direcciones x e y. En una gran variedad de aplicaciones no es necesario conocer el valor exacto de esas amplitudes y sus fases. En estos casos, es posible normalizar el valor de la irradiancia a la unidad y simplificar las expresiones. De esta forma es posible identificar los estados de polarización más comunes con los correspondientes vectores de Jones. Algunos ejemplos son mostrados en la Tabla 3. 4.

Estado de polarización	Vector de Jones
Polarización lineal en la dirección x	$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$
Polarización lineal en la dirección y	$\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$
Polarización circular dextrógira	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$
Polarización circular levógira	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$

Tabla 3. 4: Vectores de Jones normalizados de los estados de polarización más utilizados.

Si suponemos un haz polarizado representado por su vector de Jones  $\tilde{E}_i$  que pasa a través de un componente óptico, el vector de Jones del haz emergente, correspondiente a la onda transmitida, viene representado por  $\tilde{E}_t$ . El componente óptico ha transformado el vector  $\tilde{E}_i$  en  $\tilde{E}_t$ , proceso que puede ser descrito matemáticamente mediante una matriz A de dimensiones 2x2

$$\tilde{E}_t = A \cdot \tilde{E}_i. \quad (3.22)$$

Donde  $A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$  con lo que la ec.(3.22) puede ser reescrita como

$$\begin{pmatrix} \tilde{E}_{tx} \\ \tilde{E}_{ty} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \tilde{E}_{ix} \\ \tilde{E}_{iy} \end{pmatrix}. \quad (3.23)$$

La Tabla 3. 5 presenta un breve listado de las matrices de Jones de algunos componentes ópticos habituales.

## Consideraciones Previas

Componente óptico	Matriz de Jones
Polarizador lineal horizontal	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$
Polarizador lineal vertical	$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
Polarizador lineal a 45°	$\frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$
Polarizador lineal a -45°	$\frac{1}{2}\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}$
Lámina de media onda ( $\lambda/2$ )	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$
Lámina de cuarto de onda ( $\lambda/4$ )	$\begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix}$

Tabla 3. 5: *Matrices de Jones de los componentes ópticos más comunes*

## Referencias

3. 1. *Modern Lens Design*. Warren J. Smith. SPIE Press (2005), McGraw&Hill.
3. 2. Optical Research Associates (<http://www.opticalres.com/>)
3. 3 <http://optics.org/article/17912>. Opto & Laser Europe, *Design Software: which package do you need?*, July 2013
3. 4 A. García-Botella, D. Vázquez and E. Bernabeu, *Geometric and thermal design for a new concentrator collimator lighting system based on LED technology*. Metrologia 37 607 (2000).
3. 5 I. Akasaki, H. Amano, H. Murakami, M. Sassa, H. Kato, K. Manabe. *Growth of GaN and AlGaIn for UV/blue p-n junction diodes*. *Journal of Crystal Growth* 128 1–4 (1993), 379-383.
3. 6 F. Sasaki, S. Kobayashi, T. Tani, Y. Yamada, T. Taguchi, S. Nakamura, G. Shinomiya. Highly excited luminescence in InGaIn epitaxial films: Origins of the blue-green emission. *Journal of Luminescenc* 76-77 (1998), 242-245.
3. 7 P. Benitez, Juan.C. Miñano. *The Futures of Illumination Design*. Optics and Photonics News 18 (5) (2007), 20-25.
3. 8 D. Vázquez-Moliní, M. González-Montes, A. Álvarez and E. Bernabéu. *High-efficiency light-emitting diode collimator*. *Optical Engineering* 49 (2010), 123001-1\_8.
3. 9 S. Kudaev and P. Schreiber. *Optimization of symmetrical free-shape non-imaging concentrators for LED light source applications*. Proc. SPIE 5942, Nonimaging optics and efficient illumination systems II (2005).
3. 10 <http://www.carclo-optics.com/>
3. 11 <http://www.carclo-optics.com/>
3. 12 <http://www.philipslumileds.com>
3. 13 <http://www.ledil.fi/>
3. 14 J. Bortz and N. Shatz. *Optimal design of a nonimaging tir doublet lens illumination system using a LED source*. Proc. SPIE 5529, Nonimaging optics and Efficient Illumination systems (2004).
3. 15 <http://www.dotlight.de> (Seoul Z-LED P4- green).
3. 16 *Modern Optical Engineering*. Warren J. Smith. SPIE Press (2000), McGraw&Hill.
3. 17 *Nonimaging Optics*. R. Winston, J.C. Miñano, P.G. Benitez. Elsevier Academic Press, (2005).

## Consideraciones Previas

3. 18 ZEMAX®: Software For Optical System Design. ZEMAX Development Corporation. <https://www.zemax.com/home>
3. 19 M. Karlsson, F. Nikolajeff. *Fabrication and evaluation of a diamond diffractive fan-out element for high power lasers*. Optics Express 11 (2003), 191-198.
3. 20 L. Jinsong, M.J. Thomson, A. Waddie, M.R. Taghizadeh. *Design of diffractive optical elements for high-power laser applications*. Optical Engineering 43 (2004), 2541-2548.
3. 21 *High-Power Diode Lasers Fundamentals, Technology, Applications*, R.Diehl Springer, Berlin, 2000.
3. 22 R. Witte, H. J. Herfurth, and I. Bauer. *Microjoining of dissimilar materials for optoelectronic and biomedical applications*. Proc. SPIE 4979, Micromachining and Microfabrication Process Technology VIII (2003), 226–232.
3. 23 J. Lai, X. Chen, X. Wang, X. Yi, and S. Liu. *Laser bonding and packaging of plastic microfluidic chips*. Proc. IEEE ICEPT (2003), 168–171.
3. 24 C. Wessling, St. Hengesbach, J. Geiger, J. Dolkemeyer, M. Traub, D. Hoffmann. *50 W passively cooled, fiber coupled diode laser at 976 nm for pumping fiber lasers using 100µm fiber bundles*. Proc. SPIE 6876 High-Power Diode Laser Technology and Applications VI, 687614, (2008).
3. 25 T. Koenning; K. Alegria; Z. Wang; A. Segref; D. Stapleton; W. Faßbender; M. Flament; K. Rotter; A. Noeske; J. Biesenbach. *Macro-channel cooled high power fiber coupled diode lasers exceeding 1.2kW of output power*. Proc. SPIE 7918, High-Power Diode Laser Technology and Applications IX, 79180E (2011).
3. 26 T.Y. Fan. *Laser Beam Combining for High-Power, High-Radiance Sources*. IEEE J. SEL. Top Quantum Electron. 11 (3) (2005), 567
3. 27 *Handbook of Optical Engineering*, D. Malacara, B.J. Thompson, Marcel Dekker (2001).
3. 28 *Handbook of Optical and Laser Scanning*, Gerald F.Marshall, Glenn E.Stutz, CRC Press, Second Edition (2001).
3. 29 *Caracterización de haces láser empleados en la industria*, Tesis Doctoral, Jose A. Ramos de Campos (2012).
3. 30 P.A. Belanger. *Beam propagation and the ABCD ray matrices*. Optics Letters 16 (1991), 196–198.
3. 31 A. E. Siegman. *How to (Maybe) measure laser beam quality*. Conference Paper. Diode Pumped Solid State Lasers: Applications and Issues (1998).

3. 32 Z. Wang, S. Drows, A. Segref, T.Koenning, R. Pandey. *Fiber coupled Diode Laser Beam Parameter Product Calculation and Rules for Optimized Design*. Proc. SPIE 7918, High-Power Diode Laser Technology and Applications IX (2011).
3. 33 Curso SPIE, *Laser Beam Quality*. SC818.
3. 34 *Laser and Electro-Optics: Fundamentals and Engineering*. C. C. Davis, Cambridge University Press, Cambridge (UK), 2002.
3. 35 Curso SPIE, Introduction to High Power Diode Laser Technology. SC877
3. 36 P. Schreiber, B. Hoefler, P. Dannberg, Uwe D. Zeitner. *High-brightness fiber-coupling schemes for diode laser bars*. Proc. SPIE 5876, Laser Beam Shaping VI (2005).
3. 37 H.G.Treusch, K. Du, M. Baumann, V. Sturm, B. Ehlers, P.Loosen. Fiber-coupling technique for high-power diode laser arrays. Proc. SPIE 3267, Laser Resonators 98 (1998).
3. 38 William S.C. Chang, *Principles of Lasers and Optics*, Cambridge University Press (2007)
3. 39 N.Coluccelli. *Non-sequential modeling of laser diode stacks using Zemax: simulation, optimization and experimental validation*. Applied Optics 49 (22) (2010), 4237-4245.
3. 40 C. Wessling, St. Hengesbach, J. Geiger, J.Dolkemeyer, M. Traub, D. Hoffmann. *50W passively cooled, fiber coupled diode laser at 976nm for pumping fiber lasers using 100 $\mu$ m fiber bundles*. Proc. SPIE 6876, High-Power Diode Laser Technology and Applications VI (2008).
3. 41 B. Köhler, T. Brand, M. Haag, J. Biesenbach. *Wavelength stabilized high-power diode laser modules*. Proc. SPIE 7198, High-Power Diode Laser Technology and Applications VII (2009)
3. 42 S. Yamaguchi, T. Kobayashi, Y.Sauto, K. Chiba. *Collimation of emissions from a high-power multistriple laser-diode bar with multiprism array coupling and focusing to a small*. Optics Letters 20 (8) (1995), 898.
3. 43 D. Keming, P. Loosen. *Arrangement for guiding and shaping beams from a rectilinear laser diode array*. U.S. Patent 5887096 (1999).
3. 44 W. A. Clarkson, D. D. Hanna. *Two mirror beam-shaping technique for high-power diode bars*. Optics Letters 21 (6) (1996), 375-377.
3. 45 S. Bonora, P. Villorosi. *Diode laser bar beam shaping by optical path equalization*. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics 9 (5) (2007), 441.
3. 46 P. Y. Wang, A. Gheen, Z. Wang. *Beam shaping technology for laser diode arrays*. Proc. SPIE 4770 Laser Beam Shaping III, 131 (2002).

## *Consideraciones Previas*

3. 47 B. Ehlers, K. Du, M. Baumann, H-G. Treusch, P.Loosen, R. Poprawe. *Beam shaping and fiber coupling of high-power diode laser arrays*. Proc. SPIE 3097, Lasers in Material Processing 639 (1997).
3. 48 H. Schlüter; C. Tillkorn; U. Bonna; G. Charache; J. Hostetler; T. Li; C. Miester; R. Roff; T. Vethake; C. Schnitzler. *Dense Spatial Multiplexing Enables High Brightness multi-kW Diode Laser System*. Proc. SPIE 6104, High-Power Diode Laser Technology and Applications IV, 21 (2006).
3. 49 Handbook of Optics, Vol I: *Geometrical and Physical Optics, Polarized Light, Components and Instruments*. Third Edition, McGrawHill, 2009.

# CAPÍTULO 4

## 4. MODELIZACIÓN ÓPTICA DEL PROTOTIPO LÁSER DE DIODOS

En este capítulo se presenta la modelización del sistema de diodos láser acoplados a fibra óptica mediante el software de trazado de rayos ZEMAX®. Esto se lleva a cabo mediante el análisis del efecto de cada uno de los componentes ópticos sobre la calidad del haz láser. Inicialmente se describe en detalle la modelización de las fuentes láser utilizadas, así como el sistema óptico de conformado del haz procedente de una única barra de diodos para su acoplamiento a fibra óptica (sección 4.1). En la sección 4.2 se presenta la simulación de la técnica de bplexado por polarización. Siguiendo el mismo procedimiento que en la sección 4.1, la sección 4.2 presenta el análisis de la calidad del haz láser resultante de la superposición de los dos haces y la cáustica de focalización para la entrada en la fibra óptica.

### 4.1 Modelización del sistema óptico de acoplamiento a fibra de una barra de diodos láser mediante ZEMAX®.

#### 4.1.1 La fuente láser

La fuente de diodos láser utilizada consiste en una barra de diodos comerciales (Jenoptik Laser GmbH, JOLD-50-CPBN-1L (CO\_51778 y CO\_51974)). Cada una de las barras

## Modelización Óptica del Prototipo Láser de Diodos

posee 19 diodos. Los detalles relativos a su geometría y distribución se encuentran detallados en la Tabla 4. 1, donde se especifican los parámetros característicos representados en la vista esquemática de la Figura 3.14. Cada uno de los emisores posee micro-óptica de colimación en ambos ejes: colimación del eje lento (SAC-lenses) y colimación del eje rápido (FAC-lenses) [4.1].

JOLD-50-CPBN-1L	
Parámetro	Característica
Modo operación	CW
Max. Potencia óptica tras colimación (W)	50
Longitud de onda central a 25°C (nm)	$808 \pm 4$
Corriente Umbral Típica (A)	10
Número de emisores	19
Divergencia eje rápido (FA), Full Power (°)	< 0.5
Divergencia eje lento (SA), Full Power (°)	< 4
Fill Factor (%)	30
$2W_x$ ( $\mu\text{m}$ )	150
$2W_y$ ( $\mu\text{m}$ )	1
$P$ ( $\mu\text{m}$ )	500
Polarización	TE-pol.
Temperatura de Operación (°C)	15 ... 30

Tabla 4. 1: Especificaciones técnicas de JOLD-50-CPBN-1L.

Para completar la descripción de la emisión de la fuente láser utilizada es necesario proporcionar información acerca de:

- Eficiencia electro-óptica,  $\epsilon_{e-o}$ . Representa la razón entre la potencia eléctrica consumida y la potencia óptica emitida.

- Curvas de potencia de emisión frente a la corriente/voltaje de la fuente,  $P(I)$ - $V(I)$ . Proporcionan información relativa tanto de la potencia óptica emergente ( $P(I)$ ) de la fuente láser como del voltaje( $V(I)$ ) aplicado en función de la corriente de inyección. Estas curvas son de suma importancia para el control de calidad en la producción de barras de diodos ya que dan cuenta de su eficiencia electro-óptica.
- Potencia disipada,  $Q$ . Es la potencia disipada en forma de calor durante la transformación de la potencia eléctrica en potencia óptica.

La Figura 4. 1 muestra la curva de emisión potencia - intensidad de corriente, obtenida experimentalmente para las fuentes láser consideradas. En dicha curva puede observarse como la intensidad de corriente umbral, a partir de la cual comienza la emisión láser se encuentra en torno a los 10A. A partir de dicha intensidad la evolución de la potencia óptica con la intensidad de corriente inyectada es perfectamente lineal, llegando a un valor máximo en torno a 50W para una intensidad de corriente de 50A.

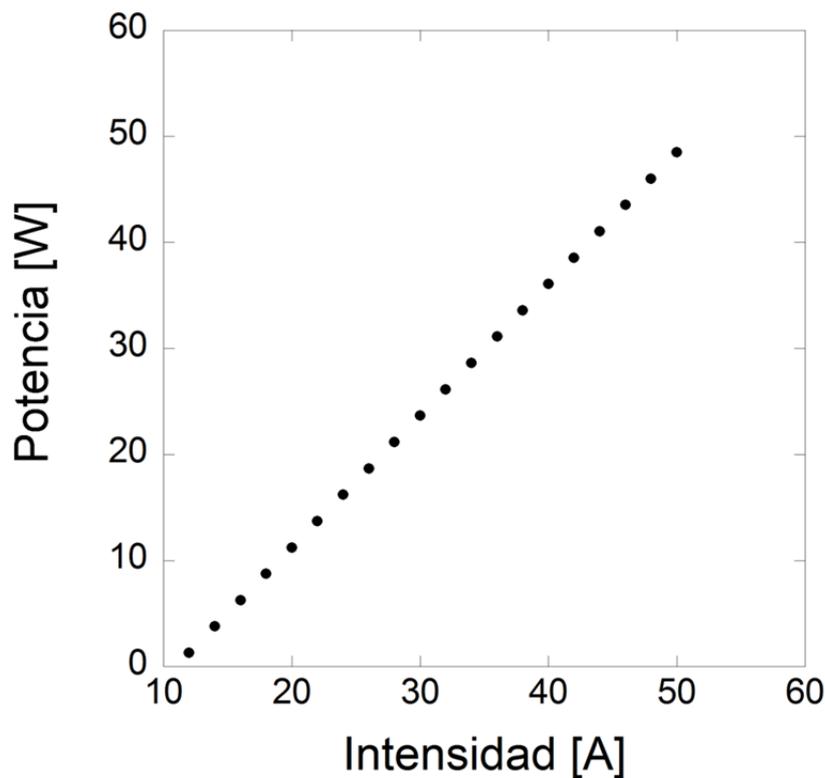


Figura 4. 1: Curva experimental de emisión potencia óptica- intensidad de corriente para las barras de diodos consideradas.

Mediante las características electro-ópticas de las dos barras utilizadas es posible obtener su eficiencia electro-óptica [4. 1]. En la Figura 4. 2 se presentan las curvas experimentales de eficiencia electro-óptica y potencia disipada en forma de calor. Dado que

## Modelización Óptica del Prototipo Láser de Diodos

Las curvas características de ambas fuentes son similares se presenta únicamente una curva. Se observa cómo la eficiencia en la conversión de potencia eléctrica en radiación láser no es lineal con la corriente, creciendo de manera exponencial hasta los 30A para estabilizarse en torno a 45-50% de eficiencia para una intensidad de corriente a partir de 30A. Por otro lado, la potencia disipada en forma de calor, sigue un comportamiento cuasi-lineal con la intensidad. Tanto la eficiencia electro-óptica como la potencia disipada, serán tratadas en detalle en el Capítulo 5, en la sección que describe el sistema de refrigeración diseñado para evacuar el calor disipado y garantizar así el óptimo funcionamiento del prototipo.

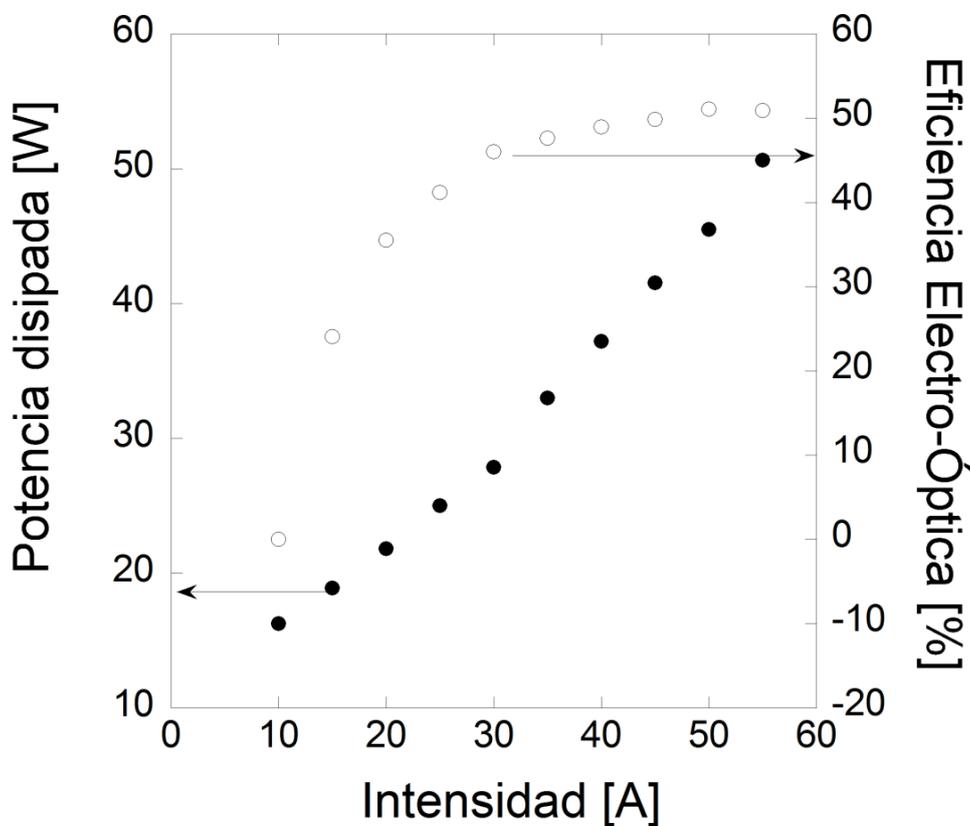


Figura 4. 2: Eficiencia electro-óptica (círculos vacíos) y potencia disipada (círculos rellenos) correspondientes a las barras de diodos CO\_51778 y CO\_51974.

Las fuentes láser JOLD-50-CPBN-1L han sido modeladas mediante ZEMAX® a través de la librería de NSC (*Non-Sequential Components*): "Source Diode". Dicho modelo representa una herramienta flexible para la simulación de la emisión de un diodo, un array de diodos 1D o 2D. En particular, proporciona una distribución angular de intensidad para cada diodo dada por

$$I(\theta_x, \theta_y) = I(0, 0) \cdot \exp \left\{ -2 \cdot \left[ \left( \frac{\theta_x}{\alpha_x} \right)^{2G_x} + \left( \frac{\theta_y}{\alpha_y} \right)^{2G_y} \right] \right\} \quad (4. 1)$$

Donde para la dirección  $x$ ,  $\alpha_x$  representa el ángulo de divergencia en grados,  $G_x$  el factor supergaussiano angular que da cuenta de cuánto se acerca el perfil de distribución angular a un perfil sombrero de copa o *top-hat*. Definiciones similares se dan para las otras dos constantes en la dirección  $y$ .

La mayor parte de los fabricantes de diodos especifican los ángulos de divergencia en campo lejano como la anchura a media altura (FWHM del inglés *Full Width at Half Maximum*) de la curva de una de las secciones transversales de intensidad radiante (flujo emitido/recibido por unidad de ángulo sólido):  $\theta_{FWHM}$ . Para una distribución Gaussiana ideal ( $G_x = 1$ ), suponiendo  $\theta_y = 0$ , igualando la ec.(4.1) a  $(1/2)I_0$  y sustituyendo  $\theta_x = 0$  por  $(1/2)\theta_{FWHM}$ , el ángulo de divergencia  $\alpha_x$  viene dado por

$$\alpha_x = \frac{\theta_{FWHM}}{\sqrt{2Ln(2)}}. \quad (4. 2)$$

La distribución espacial de la intensidad que emana de la fuente viene dada por

$$I(x, y) = I(0, 0) \cdot \exp \left\{ -2 \cdot \left[ \left( \frac{x}{W_x} \right)^{2H_x} + \left( \frac{y}{W_y} \right)^{2H_y} \right] \right\}. \quad (4. 3)$$

Donde  $W_x$  representa el valor del radio en el que la intensidad gaussiana cae un factor  $e^{-2}$  del máximo de la curva,  $H_x$  es el factor supergaussiano espacial que da cuenta de cuánto se acerca el perfil de distribución espacial a un perfil *top-hat*, ambos en la dirección  $x$  (con definiciones similares para los términos definidos en la dirección  $y$ ).

La Tabla 4. 2 muestra los parámetros de entrada para el modelado de las fuentes láser JOLD-50-CPBN-1L en ZEMAX®:

- Éstas han sido consideradas incoherentes tanto desde el punto de vista espacial como temporal. Las distribuciones de potencia tanto angulares como espaciales han sido supuestas Gaussianas a lo largo del FA y supergaussianas a lo largo del SA en base a la teoría proporcionada por estudios previos [4. 2].

## Modelización Óptica del Prototipo Láser de Diodos

- Los radios del haz  $W_x$  y  $W_y$  han sido supuestos igual a la semianchura de cada emisor a lo largo del SA y FA respectivamente. El factor supergaussiano espacial  $H_x$  a lo largo del SA ha sido supuesto igual a 10, dado que cada emisor tiene una distribución de intensidad casi rectangular [4. 3].
- Las divergencias a lo largo del SA y FA ( $\alpha_x$  y  $\alpha_y$ ), así como el factor angular supergaussiano a lo largo del SA ( $G_x$ ) han sido obtenidos a partir de los datos mostrados en la Tabla 4. 1 y ajustados a través de medidas experimentales que se detallarán en el Capítulo 5.
- Todos los emisores a lo largo de la barra poseen la misma geometría y distribución de intensidad, así como semejantes características electro-ópticas. Esto implica que haces generados por distintos emisores y a distintas intensidades de corriente poseen la misma forma y anchuras en las distribuciones espacial y angular.
- No se han tenido en cuenta posibles efectos de *sonrisa* (o *smile*). Este efecto ocurre si alguno de los diodos emisores se encuentra desplazado una pequeña distancia (del orden de la micra) de su posición alineada a lo largo del SA. Debido a la corta longitud focal de las microlentes de colimación (FAC y SAC), el efecto *smile* puede tener una influencia significativa sobre la divergencia del haz [4. 1 , 4. 4].

Modelización JOLD-50-CPBN-1L	
Parámetro	Característica
Divergencia $x$ , $\alpha_x$ (°)	1.3
Divergencia $y$ , $\alpha_y$ (°)	0.1
Factor angular supergaussiano $G_x$	3.0
Factor espacial supergaussiano $H_x$	10.0
Anchura gaussiana de la distribución espacial $W_x$ ( $\mu\text{m}$ )	150
Factor angular supergaussiano $G_y$	1.0
Factor espacial supergaussiano $H_y$	1.0
Anchura gaussiana de la distribución espacial $W_y$ ( $\mu\text{m}$ )	1
Número de emisores $x$	19
Número de emisores $y$	1
$P$ ( $\mu\text{m}$ )	500

Tabla 4. 2: Parámetros de modelización de JOLD-50-CPBN-1L.

#### 4.1.2 Modelo de conformado del haz: acoplamiento a fibra óptica.

Como se expuso en la sección 3.5, el proceso de acoplamiento a fibra óptica presenta una destacada problemática como consecuencia de la asimetría de la radiación emergente de las fuentes láser. Un estudio más detallado de tal problemática puede ser realizado a través de la caracterización de la calidad del haz láser mediante el Producto del Haz  $BPP$  ó el Factor de Propagación  $M^2$ . De acuerdo con las ecs. (3.12) y (3.13) junto con las especificaciones técnicas de la Tabla 4. 1, la calidad de la radiación de un emisor en el FA es  $(M^2_{FA})_{barr} \approx 1$ , ya que es un simple emisor con un perfil de emisión casi perfectamente Gaussiano. Dicho valor se incrementa ligeramente (en detrimento de la calidad del haz) si se consideran efectos *smile* [4. 5]. Del mismo modo, la calidad del haz de un emisor a lo largo

del SA toma un valor máximo aproximado de  $(M^2_{SA})_{emisor} \approx 11$ . Considerando que a lo largo del SA disponemos de 19 emisores cuyos centros se encuentran separados una distancia  $p=150\mu\text{m}$  (Figura 3.14), el valor del Factor de Propagación  $M^2$  teniendo en cuenta las áreas de no emisión se calcula suponiendo una anchura dada por:  $[(N-1)P]/2+Wx$  [4. 5]. De este modo, a partir de la ec.(3.9) se obtiene  $(M^2_{SA})_{barra} \approx 1227$ .

Las características de las fibras ópticas utilizadas en este trabajo se muestran en la Tabla 4. 3. Los valores correspondientes al Producto del Haz ( $BPP_f$ ) y Factor de Propagación de haz ( $M_f^2$ ) asociados a cada una de la fibras se calculan a partir de la ec. (3.17). Por lo tanto, para alcanzar un eficiente acoplamiento es necesario simetrizar la calidad del haz de los dos ejes (SA y FA) y así minimizar el  $M^2$  (o  $BPP$ ) del haz [4. 5].

Fibras ópticas				
	$d_{fibra} [\mu\text{m}]$	NA [mrad]	BPP [mm.mrad]	$M_f^2$
Fibra 1	600	221.5	66.5	256
Fibra 2	400	221.5	44.3	171

Tabla 4. 3: Parámetros característicos de las fibras ópticas consideradas.

El trabajo presentado en esta sección muestra el modelado del diseño óptico que permitirá establecer la configuración experimental adecuada para aprovechar la máxima potencia emitida por las barras de diodos seleccionadas. Para implementar dicha configuración se ha hecho uso de componentes comerciales. Dada la complejidad del objetivo planteado (modelado del haz y acoplamiento a fibra) y teniendo en cuenta todos los elementos ópticos considerados, el papel que juega cada uno de ellos se irá planteando a lo largo de este apartado. La Figura 4. 3 presenta de manera esquemática los diferentes componentes ópticos utilizados para el guiado del haz láser desde la emisión hasta su acoplamiento a la fibra óptica. La radiación emergente de la fuente es transformada a través de dos conjuntos de componentes ópticos (I (escala de espejos) y II (prismas anamórficos+colimación) y que luego describiremos en detalle) y focalizado mediante un sistema de enfoque (III) en la entrada de la fibra óptica (IV).

El efecto de cada uno de los componentes ópticos será descrito y analizado a través de ZEMAX®.



Figura 4. 3: Esquema del sistema óptico de acoplamiento a fibra de una barras de diodos láser.

### I) Escala de espejos

Con el fin de obtener una redistribución de la radiación entre SA y FA, se ha empleado la técnica de conformado del haz a través de la solución de iluminación basada en la transformación de la radiación introducida por dos escalas de espejos. Dicha técnica ha sido descrita por Ehlers et al. [4. 4] y Treush et al. [4. 7]. Por tanto, el primero de los componentes ópticos a describir es el sistema de escala de espejos.

Este componente óptico está formado por N espejos planos altamente reflejantes, los cuales están dispuestos según indica la Figura 4. 4. Continuando con la notación introducida en la Figura 3.14, la Figura 4. 4a) muestra la disposición de los ejes del haz (SA y FA) antes y después de incidir en la escala de espejos. Antes, el SA del haz se encuentra alineado con el eje x mientras que el FA lo está con el eje y. Para completar la definición del sistema de coordenadas utilizado, el eje z se corresponde con la dirección de propagación del haz láser. Tras la escala de espejos, denotamos por SA el eje en el que, como se detallará posteriormente, se encuentra el mayor valor de la divergencia de la emisión de la fuente.

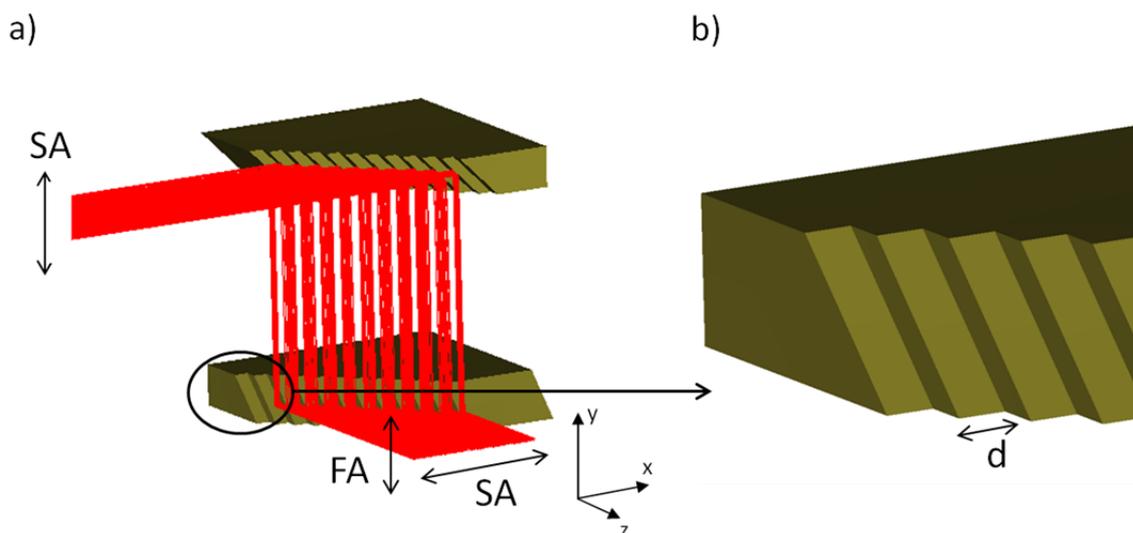


Figura 4. 4: a) Vista esquemática de la transformación del haz sufrida en la escala de espejos; b) Detalle de la escala de espejos.

## Modelización Óptica del Prototipo Láser de Diodos

Como se observa en la Figura 4. 4b), cada superficie plana espejada de la primera escala de espejos se encuentra inclinada  $45^\circ$  en torno al SA y separada del espejo contiguo una distancia  $d$  a lo largo del eje x (SA). Esta distancia  $d$  se corresponde con la anchura de cada espejo. Los centros de cada uno de los espejos que conforman la escala presentan una inclinación de  $45^\circ$  respecto al eje de propagación.

El haz procedente de las microlentes de colimación FAC y SAC, incide en la primera escala de espejos. Aquí es dividido en  $N$  sub-haces a lo largo del SA (siendo  $N$  el número de escalas de espejos con anchura  $d$ ) y reflejado en la dirección del FA. Cada sub-haz reflejado por cada uno de los espejos de la primera escala incide posteriormente sobre la segunda. Las superficies de ésta se encuentran dispuestas de tal modo que los sub-haces son reflejados en la dirección del SA. Mediante la reflexión por las dos escalas de espejos, se realiza una redistribución de la radiación emitida por la barra de diodos [4. 8, 4. 9]. Antes de incidir sobre la escala de espejos, el SA posee las características más desfavorables para la calidad del haz en términos de ángulo de divergencia y tamaño de haz. Tras la escala de espejos, el SA mantiene la divergencia inicial pero reduce en un factor significativo la anchura, factor que es introducido en el FA.

Antes de la incidencia sobre las escala de espejos, los sub-haces se encuentran localizados uno al lado de otro a lo largo del SA con un  $(M^2_{SA})_{barra} \approx 1227$ . Tras la redistribución de la radiación, los sub-haces emergentes de la escala de espejos se encuentran dispuestos en una línea a lo largo del FA (Figura 4. 4a). De esta manera, y despreciando efectos de difracción, el  $M^2$  a lo largo del FA tras el sistema de  $N$  escalas de espejos  $(M^2_{FA})'_{barra}$  viene dado por

$$(M^2_{FA})'_{barra} = N \cdot (M^2_{FA})_{barra} . \quad (4. 4)$$

Donde  $(M^2_{FA})_{barra}$  denota el factor de propagación del haz a lo largo del FA antes de incidir sobre la escala de espejos.

Por otro lado, la calidad del haz en el SA  $(M^2_{SA})'_{barra}$  presenta una mejora del mismo factor  $N$

$$(M^2_{SA})'_{barra} = \frac{(M^2_{SA})_{barra}}{N} . \quad (4. 5)$$

Donde  $(M^2_{SA})_{barra}$  denota el factor de propagación del haz a lo largo del SA antes de incidir sobre la escala de espejos.

De esta manera, el factor N puede ser elegido como el número de escalas de espejos que proporcionen un  $M^2$  simétrico en FA y SA ( $(M^2_{FA})'_{barra} \approx (M^2_{SA})'_{barra}$ ). Así

$$N^2 = \frac{(M^2_{SA})'_{barra}}{(M^2_{FA})'_{barra}}. \quad (4.6)$$

Dado que el factor de llenado después de la transformación no es conocido hasta no determinar el sistema de escala de espejos a utilizar, se ha partido de un sistema comercial [4. 10] donde cada escala está constituida por 12 espejos cuyos centros se encuentran separados una distancia  $d=1\text{mm}$ .

En adelante se estudiará el efecto de cada uno de los elementos ópticos sobre: a) la **irradiancia**, definida como la razón de flujo energético que recibe en total y en todas las direcciones una determinada área del receptor; b) la **intensidad radiante**, definida como el número de rayos que incidente sobre el detector virtual en función de su ángulo de incidencia [4. 11]. Dichas curvas serán analizadas a través de los parámetros característicos [4. 12]

- $2W_{1/e^2}$ : la distancia desde el eje z con la que la irradiancia cae un factor  $e^{-2}$  del valor máximo en el eje.
- $2W_{86\%}$ : radio del círculo centrado en el centroide del perfil del haz y que contiene el 86% de la potencia del haz.
- $\theta_{1/e^2}$ : separación angular con respecto a  $\theta=0^\circ$  con la que la intensidad radiante cae un factor  $e^{-2}$  del valor máximo en el eje.

Dado que cada uno de los dos dispositivos experimentales empleados para la caracterización del perfil de intensidad (Anexo I) utiliza criterios de medida de la anchura del haz diferentes ( $2W_{1/e^2}, 2W_{86\%}$ ), el resultado del modelo será presentado con el criterio adecuado para posteriormente realizar la comparativa con el dato experimental.

La Figura 4. 5a) muestra el trazado de rayos desde la barra de diodos láser hasta la transformación llevada a cabo por la escala de espejos. Dicha modelización ha sido llevada a cabo en base a los parámetros de entrada mostrados en la Tabla 4. 2 [4. 10]. El efecto de la escala de espejos sobre la irradiancia es evaluado antes de la incidencia en la escala de espejos (detector 1, Figura 4. 5b)) y después de dicho componente (detector 2, Figura 4. 5c)). En dichas figuras puede observarse como la irradiancia registrada tras la barra de diodos láser es “fileteada” es 11 sub-haces procedentes de la reflexión en 11 de las 12 parejas de espejos de las que consta el sistema. Se observa que la distribución de irradiancia presenta

## *Modelización Óptica del Prototipo Láser de Diodos*

menor intensidad y tamaño en los sub-haces emergentes de los espejos externos. Este efecto podría ser causado por el hecho de que el ángulo sólido de emisión en el SA no ilumine por completo los espejos externos [4. 4].

Los planos 1 y 2 representan detectores virtuales en los cuales ZEMAX® evalúa la distribución de irradiancia

## Modelización Óptica del Prototipo Láser de Diodos

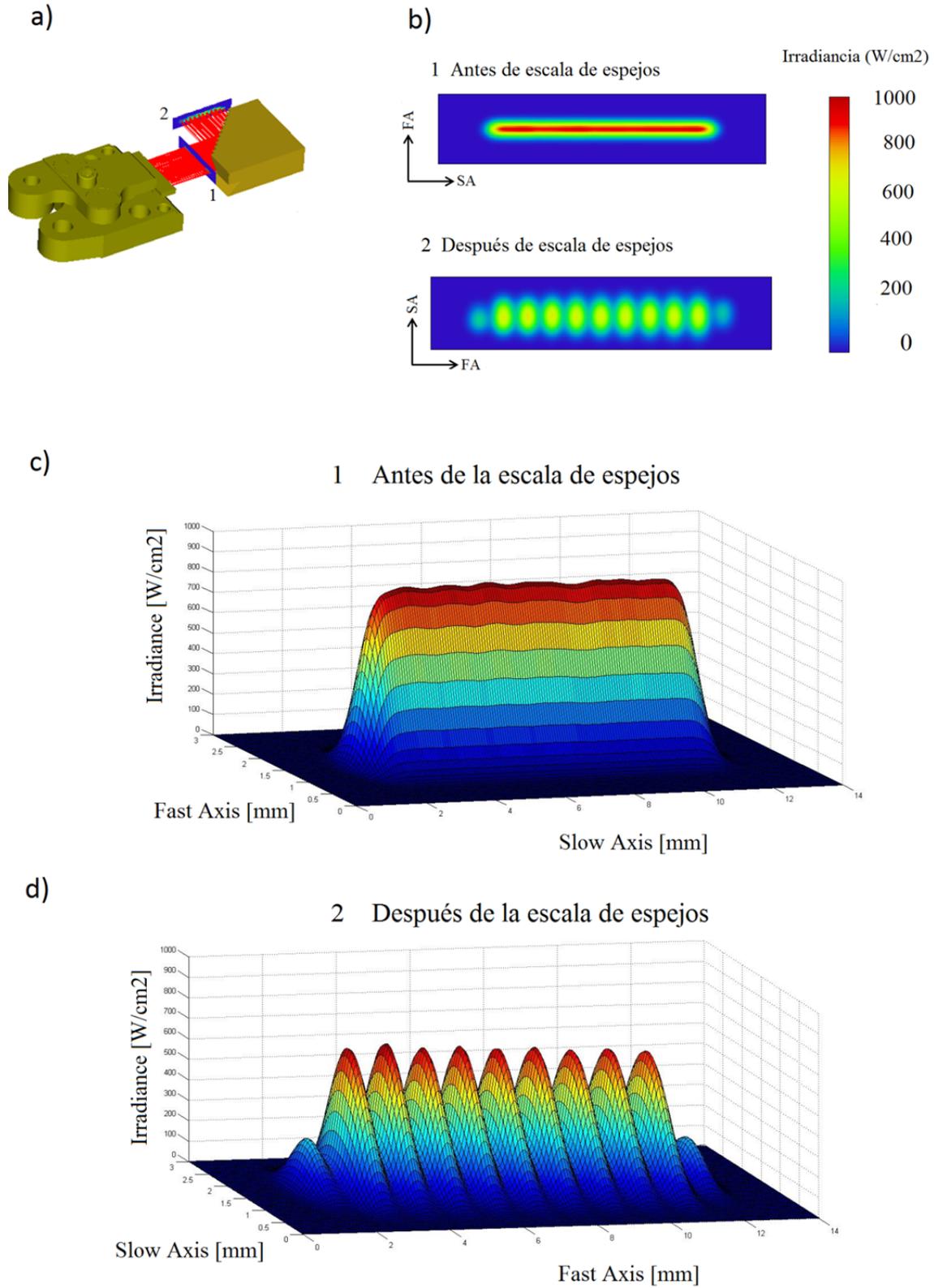


Figura 4. 5: a) Trazado de rayos del modelo óptico para la caracterización de la radiación tras el sistema de escala de espejos mediante la irradiancia recogida en los detectores virtuales 1 y 2 (14x3mm<sup>2</sup>, 200x50pixels); b) Perfil de irradiancia 2-D c)Perfiles de irradiancia 3D sobre dichos detectores.

## Modelización Óptica del Prototipo Láser de Diodos

Con el objetivo de entender más a fondo el efecto de la escala de espejos hace sobre el haz láser, se analizan a continuación tanto la irradiancia como la intensidad radiante sobre los detectores 1 (antes de la escala de espejos) y 2 (antes de la escala de espejos).

La Figura 4. 6a) muestra la irradiancia 2D sobre el detector 1 (Figura. 4.5a) así como los perfiles de irradiancia obtenidos a lo largo de los ejes SA y FA para una potencia de emisión de 50W. De manera complementaria, la Figura 4. 6b) presenta una representación 2D, junto con los correspondientes perfiles transversales, del número de rayos recogidos sobre el detector virtual en función de su ángulo de incidencia sobre dicho detector (intensidad radiante). Dichos resultados ponen de manifiesto que antes de la incidencia sobre la escala de espejos el SA posee los valores más altos de anchura de haz y de divergencia frente a los encontrados en el FA. Por lo tanto, los dos parámetros que entran en juego en el  $M^2$  (o  $BPP$ ) son notablemente mayores en el SA.

De manera análoga, la Figura 4. 7 presenta los resultados del análisis en términos de irradiancia e intensidad radiante de la radiación emergente de la escala de espejos (detector 2 en la Figura. 4.5a). En la Figura 4. 7a) es posible observar a lo largo del FA el perfil de irradiancia de cada uno de los sub-haces generados por la escala de espejos. Dicha figura pone de manifiesto la redistribución de la intensidad dado que sobre este detector la anchura del haz en el SA ha sido reducida significativamente. Los valores máximos de irradiancia son inferiores a los encontrados en la Figura 4. 6a) dado que cuando la radiación impacta sobre el detector 2 la anchura a lo largo del SA se incrementa (con respecto a la anchura del perfil de irradiancia a lo largo del FA en la Figura 4. 6a) como consecuencia de la divergencia del SA. La Figura 4. 7b) pone de manifiesto que la divergencia máxima asociada a cada uno de los ejes es constante a la salida de la escala de espejos.

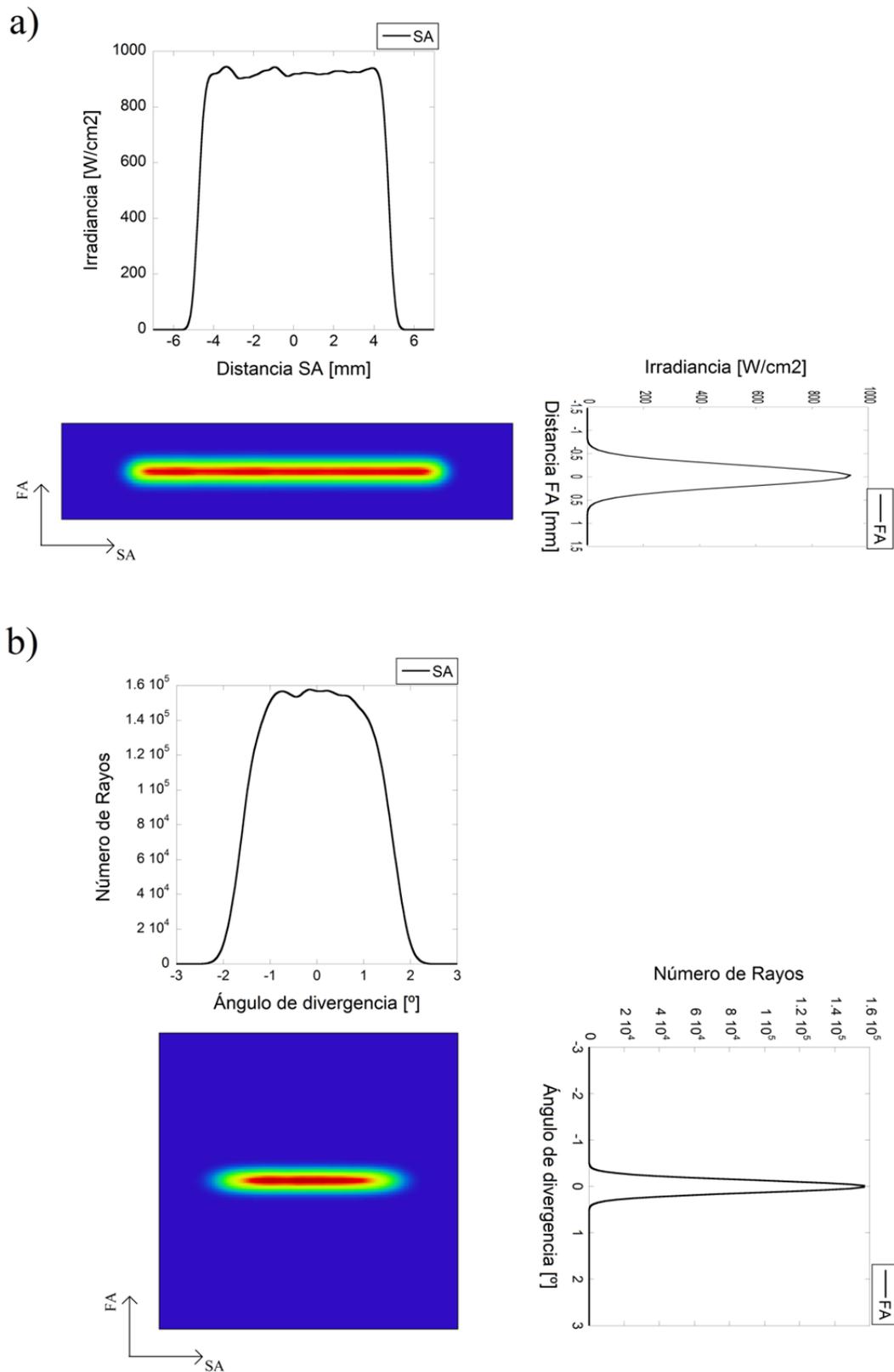


Figura 4. 6: Perfiles de a) irradiancia; b) número de rayos en función de su ángulo de divergencia a lo largo de SA y FA antes de la incidencia en el sistema de escala de espejos (detector 1 en Figura. 4.5a).

## Modelización Óptica del Prototipo Láser de Diodos

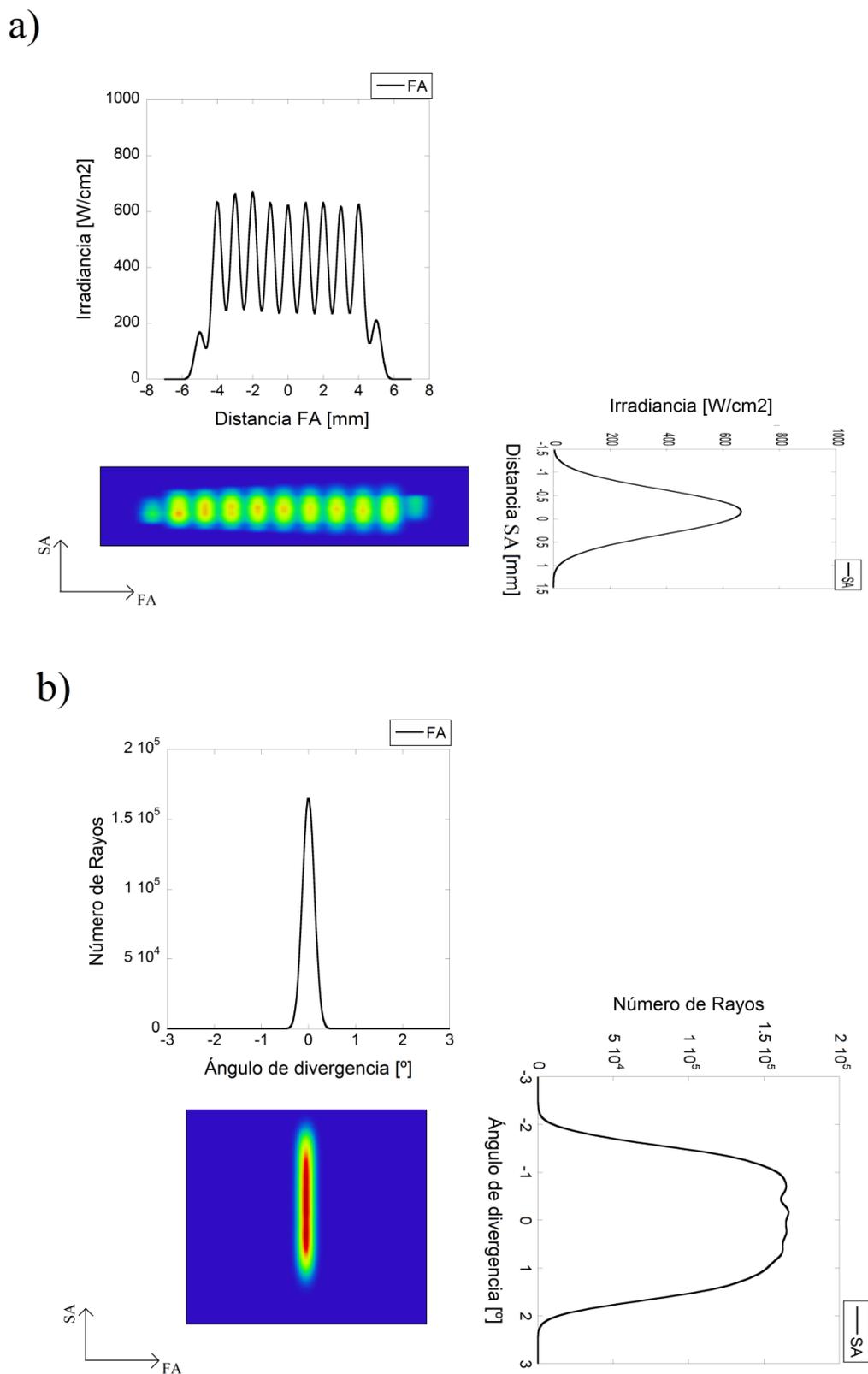


Figura 4. 7: Perfiles de a) irradiancia; b) número de rayos en función de su ángulo de divergencia a lo largo de SA y FA tras la redistribución de la radiación llevada a cabo por el sistema de escala de espejos (detector 2 en Figura. 4.5a).

La Tabla 4. 4 recoge los parámetros característicos relativos a radios del perfil de irradiancia y ángulos de divergencia del haz. En ella se presenta una descripción cuantitativa del proceso conformado del haz llevado a cabo por el sistema de escala de espejos (Figura 4. 6 y Figura 4. 7).

	Antes escala de espejos		Tras escala de espejos	
	SA	FA	SA	FA
$W_{1/e^2}$ [mm]	5.0	0.5	0.8	5.3
$\theta_{1/e^2}$ [°]/[mrad]	1.3/22.7	0.8/13.9	1.5/26.2	0.2/3.5
$BPP$ [mm.mrad]	113.5	6.8	21	18.6
$BPP_{total}$ [mm.mrad]		113.7		28.1
$M^2$	1227	1	26.5	94.4

Tabla 4. 4: Valores característicos del haz láser (en términos de calidad del haz) antes y después de la escala de espejos.

Dichos resultados reflejan cómo, tras la incidencia en el sistema de escala de espejos, la mayor contribución en la anchura del haz pasa de encontrarse en el SA a ser introducida en el FA. Por otro lado, las divergencias en ambos ejes se mantienen en las mismas proporciones antes y después del sistema de escala de espejos.

La distribución transversal de irradiancia recogida tras el sistema de escala de espejos (Figura 4. 7a)) a lo largo del FA permite obtener su *Factor de Llenado FF*, el cual, como se expuso previamente, debe ser tenido en cuenta en el cálculo del  $(M^2_{FA})'_{barra}$  tras el proceso de conformado del haz. El *factor de llenado* de los sub-haces es calculado como el cociente de la anchura a media altura de los picos de irradiancia entre la distancia entre ellos, resultando un *factor de llenado* de 0.49. Teniendo en cuenta lo anterior y sustituyendo en las ecs. (4.4) y (4.5) se obtiene:  $(M^2_{FA})'_{barra} = 26.5$ ;  $(M^2_{SA})'_{barra} = 94.4$ , valores que presentan una clara simetrización del haz con respecto a los valores previos a la incidencia en el sistema de escala de espejos:  $(M^2_{FA})_{barra} \approx 1$ ;  $(M^2_{SA})_{barra} \approx 1227$ .

Con el objetivo de validar el modelo realizado en ZEMAX®, en el Capítulo 5 se presentará la comparativa de los resultados del modelo obtenidos después de cada uno de los componentes ópticos con las correspondientes medidas experimentales. Como consecuencia de las limitaciones de espacio encontradas en el montaje experimental, no es

## Modelización Óptica del Prototipo Láser de Diodos

posible llevar a cabo experimentalmente las medidas de irradiancia de acuerdo a la configuración mostrada en la Figura 4. 5a) (detectores 1 y 2 respectivamente). Por tanto, a continuación se presenta una segunda caracterización del más realista modelo, realizada en base a los dispositivos y tamaños de los mismos (Anexo I: *Analizador de haz BeamMonitor60 Primes*) que serán empleados en el diseño del prototipo final y que se han presentados en el Capítulo 5.

La Figura 4. 8 muestra el modelo de trazado de rayos desarrollado en ZEMAX® para caracterizar la irradiancia emergente tras el sistema de escala de espejos de una barra de diodos láser. El posicionamiento del detector virtual ha sido realizado en base a la posición de la cámara CCD con la que se ha realizado la correspondiente caracterización experimental del perfil de intensidad tras las escalas de espejos (Capítulo 5). Dicha caracterización ha sido realizada a una distancia  $D=176.5\text{mm}$  desde las escalas de espejos.

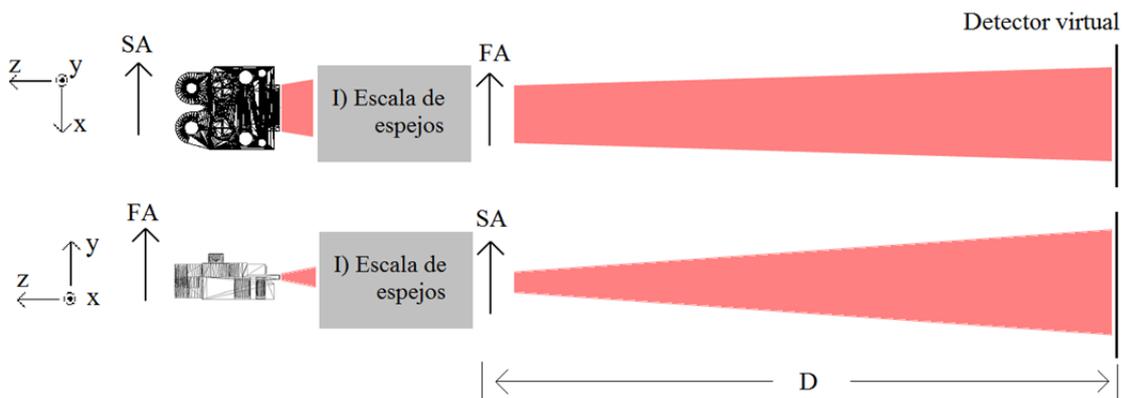


Figura 4. 8: Trazado de rayos del modelo óptico para la caracterización de la irradiancia emergente del sistema de escala de espejos.

La Figura 4. 9 muestra la irradiancia recogida en el detector virtual para una potencia de emisión de 8W. Se presentan tanto la vista 2D como los perfiles transversales de irradiancia. Se observa que la distribución de irradiancia que emerge del sistema de escala de espejos consiste en 11 líneas de radiación que proceden de la reflexión de cada una de las parejas de escalas espejos con anchura  $d$  [4. 13, 4. 14]. La distribución de irradiancia a lo largo del FA no presenta diferencias significativas con respecto a la mostrada en la Figura 4. 7a), dado que la divergencia en este eje es residual. En cambio, la distribución transversal de irradiancia a lo largo del SA presenta un notable aumento de anchura con respecto a la presentada en la Figura 4. 7a), como consecuencia de un valor de la divergencia significativamente mayor en el SA (Figura 4. 7b)). Dicha comparativa puede ser realizada a través de los parámetros característicos de la Tabla 4. 4. Asimismo, las dos líneas de irradiancia situadas en las posiciones más externas presentan un corte que puede ser debido al hecho de que las dos parejas de escalas de espejos situadas en los extremos no se

encuentren iluminados completamente por todo el ángulo sólido subtendido en la dirección de SA [4. 4].

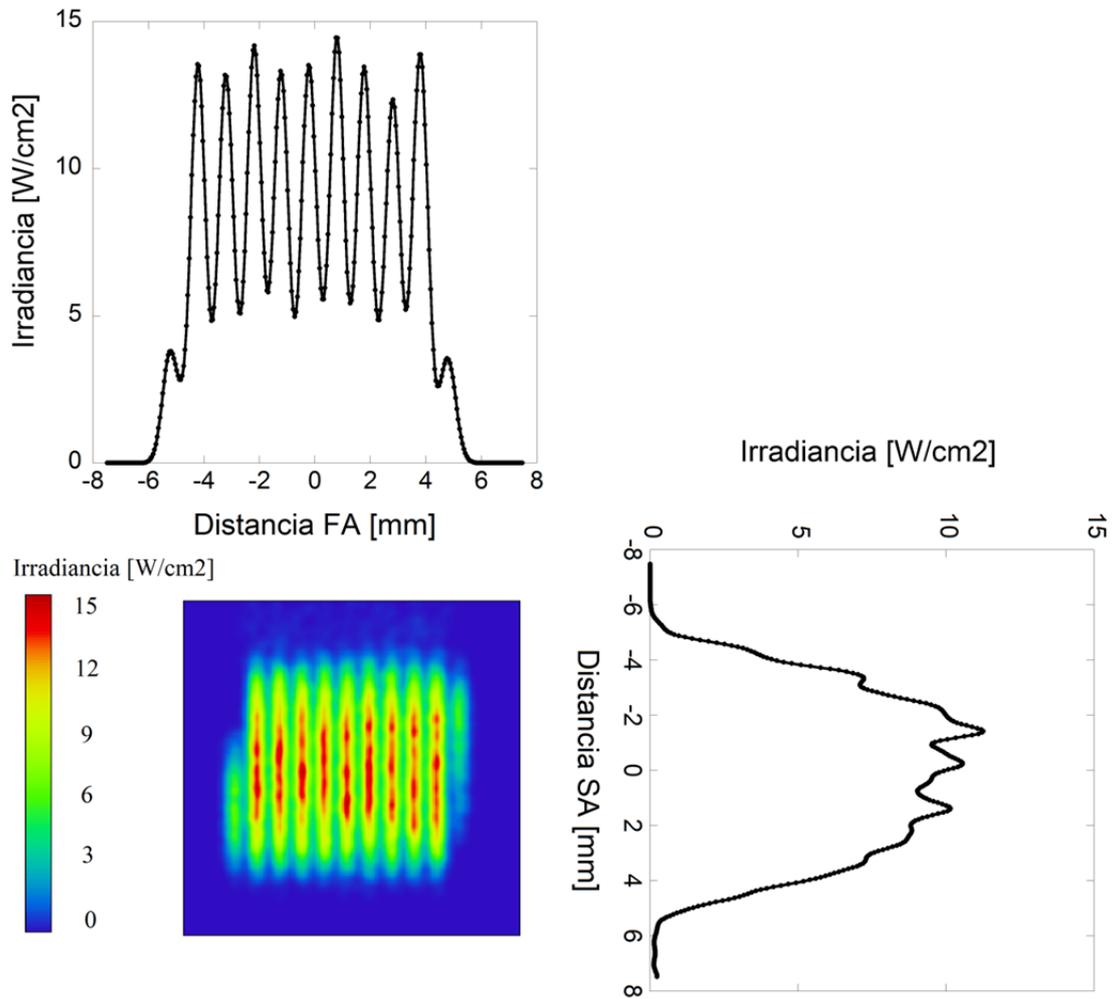


Figura 4. 9: Perfiles de irradiancia a lo largo de SA y FA sobre un detector virtual posicionado a  $D=176.5\text{mm}$  tras el sistema de escala de espejos.

La Tabla 4. 5 muestra los parámetros característicos relativos al radio del haz a lo largo de los FA y SA. La diferencia entre los valores de  $W_{86\%}$  y  $W_{1/e^2}$  para cada uno de los ejes son debidas a las diferencia entre las distribuciones de intensidad. Los resultados presentados en la Tabla 4. 5 serán utilizados en el Capítulo 5 para la validación experimental del modelo.

	$W_{86\%}$ [mm]	$W_{1/e^2}$ [mm]
SA	4.1	4.9
FA	3.6	5.3

Tabla 4. 5: Caracterización del perfil de irradiancia tras la escala de espejos.

## II) Prismas anamórficos + colimación SA

El haz emergente de la escala de espejos, está constituido por 11 sub-haces dispuestos a lo largo del FA. Con el fin de disminuir la anchura del haz a lo largo de dicho eje (y así mejorar la simetrización del  $M^2/BPP$ , Tabla 4. 4), se han utilizado dos prismas anamórficos comerciales (NT47-224 Edmund Optics), mediante los cuales se comprime su anchura (según la especificaciones proporcionadas por el fabricante) en torno a 1/3 de la anchura de entrada en dicho componente óptico. La Figura 4. 10 muestra el posicionamiento de los prismas que garantiza dicha reducción:  $\alpha_1 = -0.9^\circ$ ,  $\alpha_2 = -29.7^\circ$ ,  $V=2.56\text{mm}$ ,  $D=5.45\text{mm}$ . Estos datos han sido incorporados al programa de diseño con el fin de encontrar, para las características de nuestro haz, el posicionamiento óptimo de los dos prismas que garantice la mencionada reducción de la anchura del haz a lo largo del FA

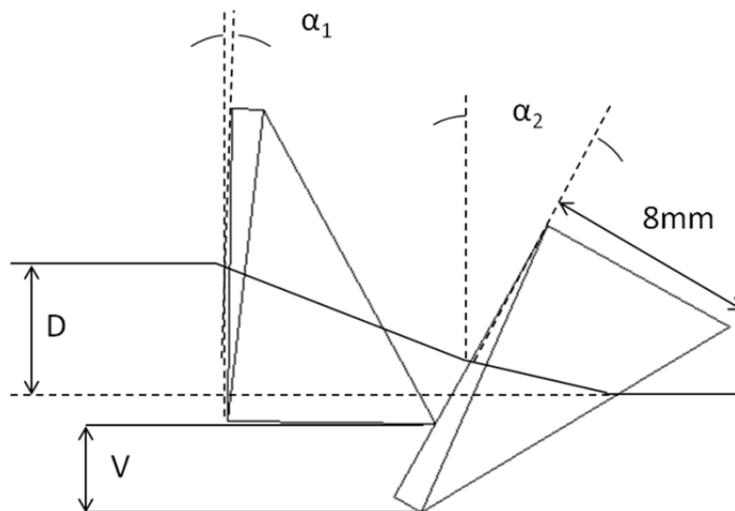


Figura 4. 10: Disposición de la pareja de prismas anamórficos utilizados para alcanzar una reducción teórica de 1/3 de la anchura del haz a lo largo del FA.

En la Figura 4. 11a) puede observarse cómo el haz procedente de las escala de espejos posee una anchura aproximada de 11mm a lo largo del FA. La anchura total de dicho perfil

de irradiancia es reducida en torno a 4.0mm en el FA cuando el haz se refracta a través de la pareja de prismas anamórficos (Figura 4. 11b)). La reducción de tamaño alcanzada no coincide con la proporcionada por el fabricante (1/3) como consecuencia de la divergencia residual que posee el haz en el FA. En dicha figura se observa cómo las 11 líneas de irradiancia han disminuido la separación entre sí. Con el objetivo de reducir la divergencia en el SA (eje que posee el mayor valor de ángulo de divergencia residual) se hace uso de una lente cilíndrica (LJ1402L1B). La selección de la focal de dicha lente se realiza en base a cálculos en óptica paraxial. Para ello, se considera el objeto virtual producido por el haz emergente tras la pareja de prismas. La distancia a la que se encuentra dicho objeto virtual (en el SA tras la escala de espejos) corresponde con el valor de la focal de la lente cilíndrica de colimación en el SA:  $f=40\text{mm}$ . La Figura 4. 11c) muestra la irradiancia recogida a 7mm tras dicha lente.

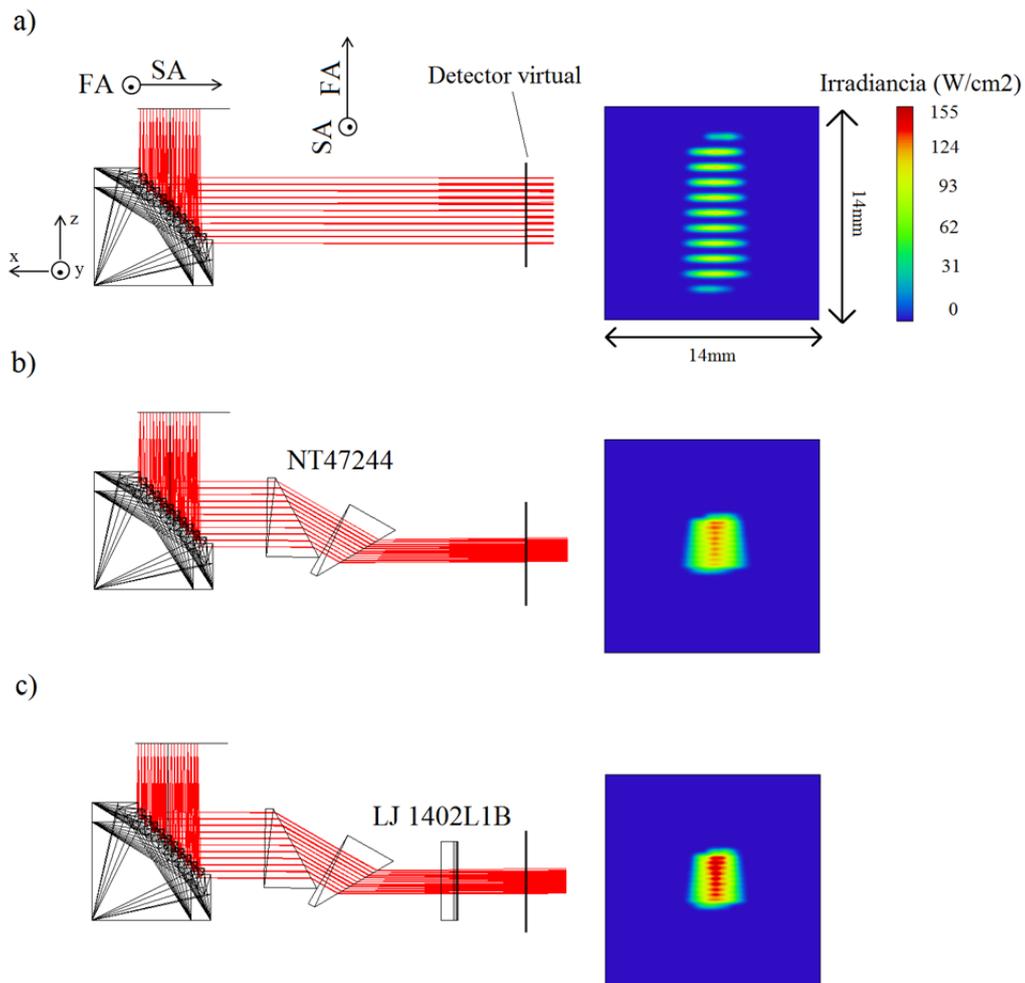


Figura 4. 11: Trazado de rayos del modelo óptico para la caracterización del perfil de irradiancia tras a) el sistema de escala de espejos; b) la pareja de prismas anamórficos; c) la lente cilíndrica de colimación del SA.

## Modelización Óptica del Prototipo Láser de Diodos

Procediendo de manera similar al caso de la caracterización de la radiación emergente de la escala de espejos, se mostrará un análisis detallado de la evolución del haz a través de los componentes ópticos introducidos en la fase II del conformado (Figura 4. 3): prismas anamórficos + lente colimación para el SA.

Con objeto de cuantificar la reducción de la anchura del perfil de irradiancia a lo largo del FA cuando el haz es refractado por los prismas anamórficos, se define el factor de compresión

$$\eta_{FA} = \frac{(W_{1/e^2})_{FA,II}}{(W_{1/e^2})_{FA,I}}. \quad (4.7)$$

Donde  $(W_{1/e^2})_{FA,I}$  representa el radio del haz emergente del bloque I (escala de espejos) y  $(W_{1/e^2})_{FA,II}$  el correspondiente al haz emergente del bloque II (prismas anamórficos + lente colimación para el SA).

Las Figura 4. 12 y Figura 4. 13 presentan respectivamente la irradiancia e intensidad radiante proporcionadas por ZEMAX® y recogidas sobre el detector virtual situado a 7 mm de la lente de colimación del SA LJ1402L1-B (Figura 4. 11c).

La caracterización realizada en términos de irradiancia (Figura 4. 12) muestra una simetrización en la anchura del haz a lo largo de los ejes SA y FA con respecto a la encontrada después de la escala de espejos (Figura 4. 7a). Además, es posible observar un aumento de la anchura del las líneas de irradiancia a lo largo del SA. Dicho aumento es consecuencia de la diferencia de camino óptico existente entre los rayos que impactan en los espejos situados en los extremos de la escala (conjunto I). Los rayos con mayor camino óptico dan lugar a líneas de irradiancia con mayor anchura debido a la divergencia presente en el SA hasta la lente de colimación LJ1402L1-B.

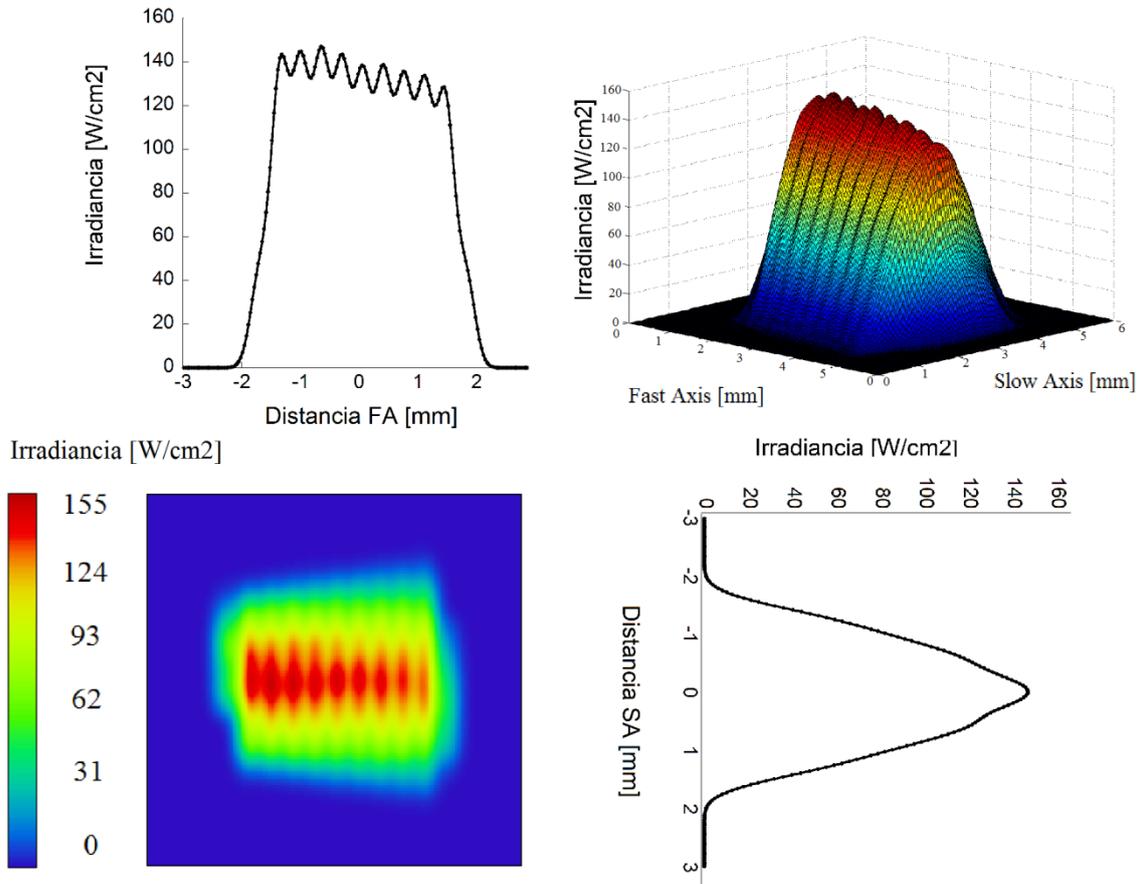


Figura 4. 12: Perfiles de irradiancia a lo largo de los FA y SA sobre el detector virtual ( $6 \times 6 \text{ mm}^2$ ,  $180 \times 180 \text{ pixels}$ ) localizado a  $7 \text{ mm}$  tras la lente de colimación del SA LJ1402L1B (Figura 4. 11).

Por otro lado, la Figura 4. 13 presenta la caracterización del haz emergente del conjunto II en términos de intensidad radiante sobre el detector virtual a lo largo de FA y SA. Dicho resultado pone de manifiesto:

- La reducción del ángulo de divergencia residual en el SA con respecto al obtenido tras el sistema I (escala de espejos) (Figura 4. 7 b)).
- Una notable desviación del haz en el FA dado que su perfil (número de rayos frente a ángulo de divergencia) no se encuentra centrado en  $0^\circ$ . Dicha desviación puede estar relacionada con el posicionamiento de la pareja de prismas anamórficos. Dicho factor es analizado a continuación.

## Modelización Óptica del Prototipo Láser de Diodos

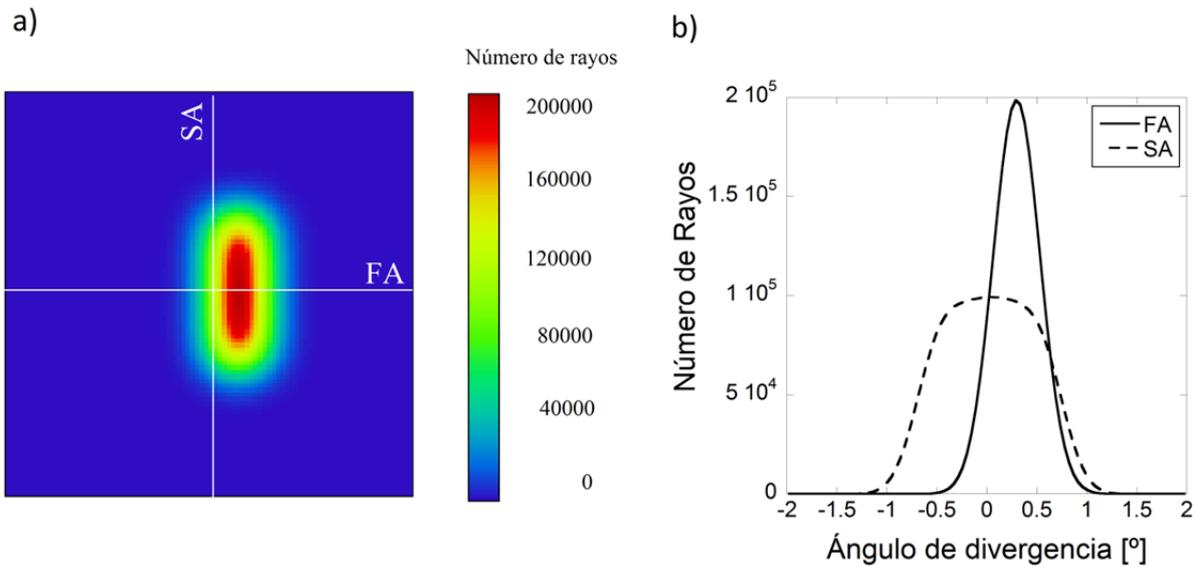


Figura 4. 13: a) Número de rayos en función de su ángulo de divergencia sobre el detector virtual 2D ( $2 \times 2^\circ$ ,  $250 \times 250$  pixels), b) Cortes transversales a lo largo de los SA y FA.

El posicionamiento de los prismas anamórficos ha sido realizado en base a las especificaciones proporcionadas por el fabricante para un haz colimado con un rango espectral situado entre 600 - 1000 nm. Con el fin de optimizar el posicionamiento de la pareja de prismas y explicar el comportamiento observado en la Figura 4. 13, se ha procedido a estudiar la refracción producida por dichos prismas considerando una fuente más sencilla. Para ello, la pareja de prismas ha sido iluminada por una fuente con simetría rectangular de 6mm de lado emitiendo en  $\lambda=808\text{nm}$  con un semi-ángulo de divergencia de  $0.26^\circ$ , es decir, haz cuasi-colimado. La Figura 4. 14 muestra dos vistas esquemáticas del trazado de donde puede observarse que el haz es comprimido espacialmente en la dirección en el eje y y manteniéndose inalterado a lo largo del eje x.

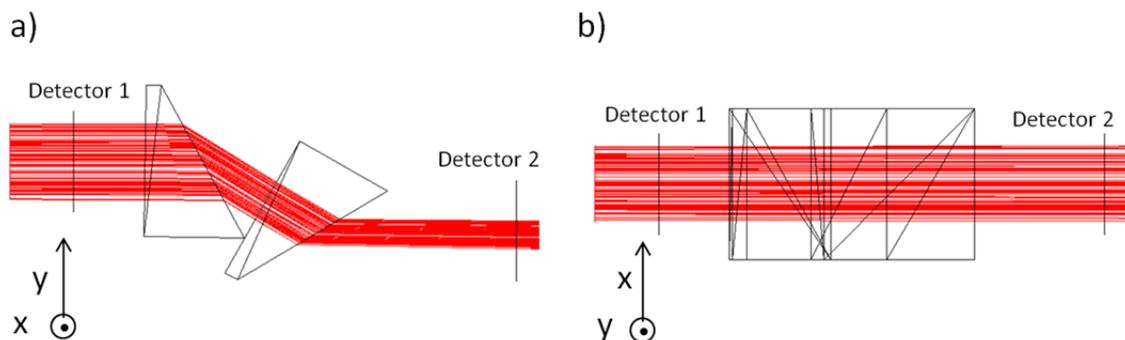


Figura 4. 14: Trazado de rayos en la dirección a) en la se realiza la compresión del haz; b) en la que las dimensiones del haz permanecen inalteradas.

La Figura 4. 15 presenta las correspondientes distribuciones de irradiancia e intensidad radiante a lo largo de los ejes x e y antes (detector 1) y después (detector 2) de la refracción

en los prismas. Analizando dichos perfiles de manera cualitativa, puede observarse como el perfil de irradiancia de la fuente (Figura 4. 15a)), similar en ambos ejes, es reducido en torno a una tercera parte de su valor a lo largo del eje y permaneciendo inalterado el perfil de irradiancia en el eje x (Figura 4. 15b)). Esta variación de tamaño implica un aumento de los valores de irradiancia recogidos en el detector con respecto a los registrados en la fuente. En cuanto a la intensidad radiante, el haz emergente de la fuente (Figura 4. 15c)), presenta perfiles similares en ambos ejes. Sin embargo, dicho perfil es modificado a lo largo del eje y tras atravesar la pareja de prismas (Figura 4. 15d). Dicha modificación es evidenciada por un ensanchamiento y un desplazamiento del perfil de intensidad radiante en el eje y. El ensanchamiento (aumento del ángulo de divergencia) se encuentra ligado a la reducción del tamaño del haz a lo largo de dicho eje (Figura 4. 14a) como consecuencia de la conservación del  $M^2/BPP$ . El desplazamiento del perfil hacia ángulos mayores, puede estar ligado al tipo de vidrio de los prismas: SF11. Según el catálogo de SCHOOT AG dicho material posee un índice de Abbe  $V_d = 25.76$ , lo que implica ser clasificado como *vidrio Flint* (o vidrio denso) y por lo tanto presenta una alta dispersión frente a la longitud de onda utilizada [4. 15].

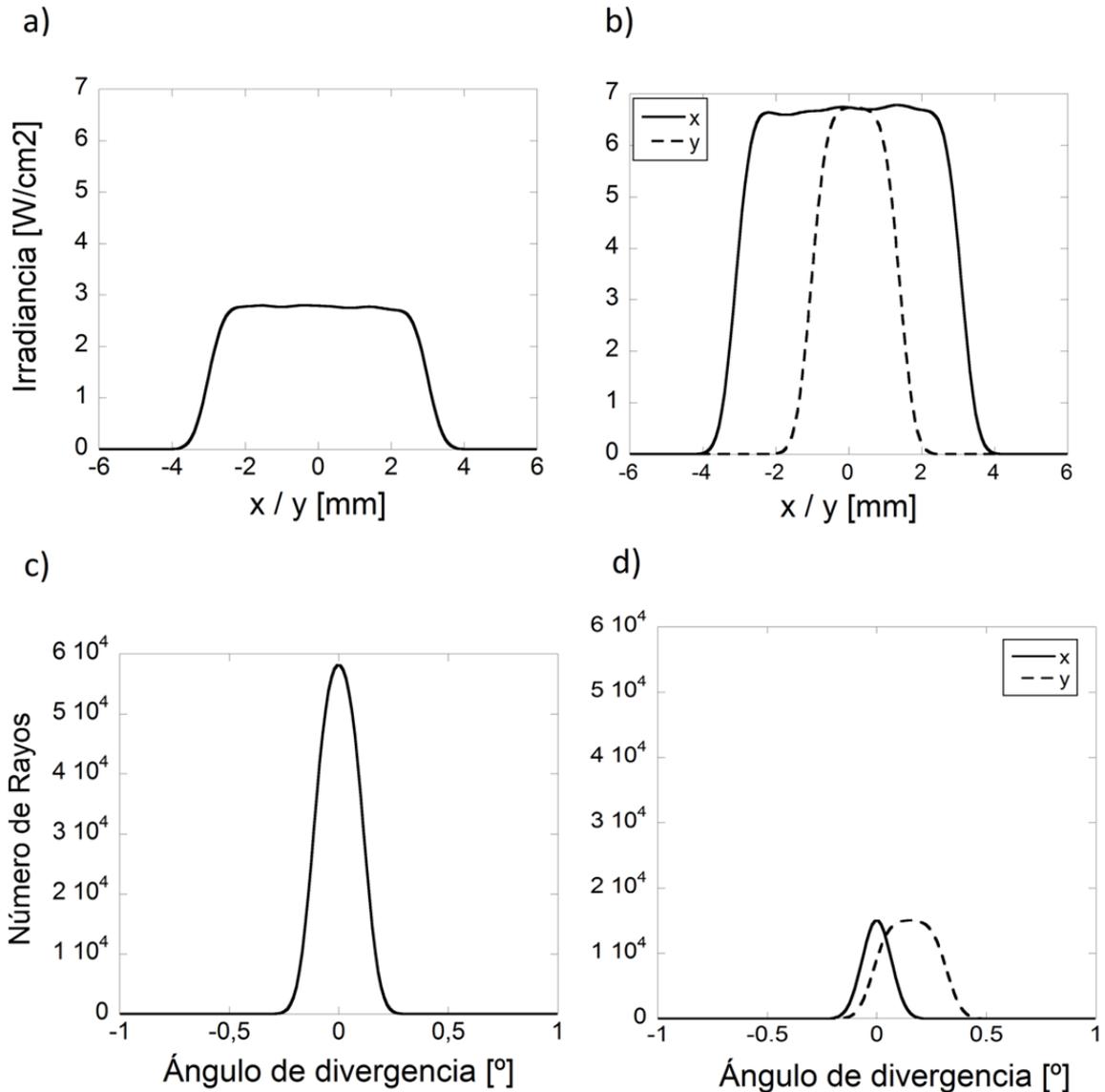


Figura 4. 15: Perfiles de a) irradiancia tras la fuente; b) irradiancia tras los prismas anamórficos; c) intensidad radiante tras la fuente; d) intensidad radiante tras los prismas anamórficos.

Para estudiar la dispersión que presenta el vidrio utilizado frente a la longitud de onda y de esta manera explicar el desplazamiento encontrado en la curva de intensidad radiante se ha analizado, en el ejemplo propuesto, la respuesta de la pareja de prismas anamórficos cuando el haz de entrada tiene las siguientes longitudes de onda: 535, 633, 808, 1.064nm. La Figura 4. 16 presenta la intensidad radiante tras la pareja de prismas (Figura 4. 14, detector 2) para cada una de las longitudes de onda consideradas. Es posible observar un desplazamiento de la curva de intensidad radiante como consecuencia del carácter dispersivo del vidrio SF11. Su anchura permanece prácticamente constante, sin embargo su perfil sufre un notable desplazamiento angular dependiendo de la longitud de onda. Por

tanto podemos concluir que el desplazamiento observado en el perfil de intensidad radiante en el FA (Figura 4. 13) está ligado al carácter dispersivo del vidrio del que están fabricados los prismas.

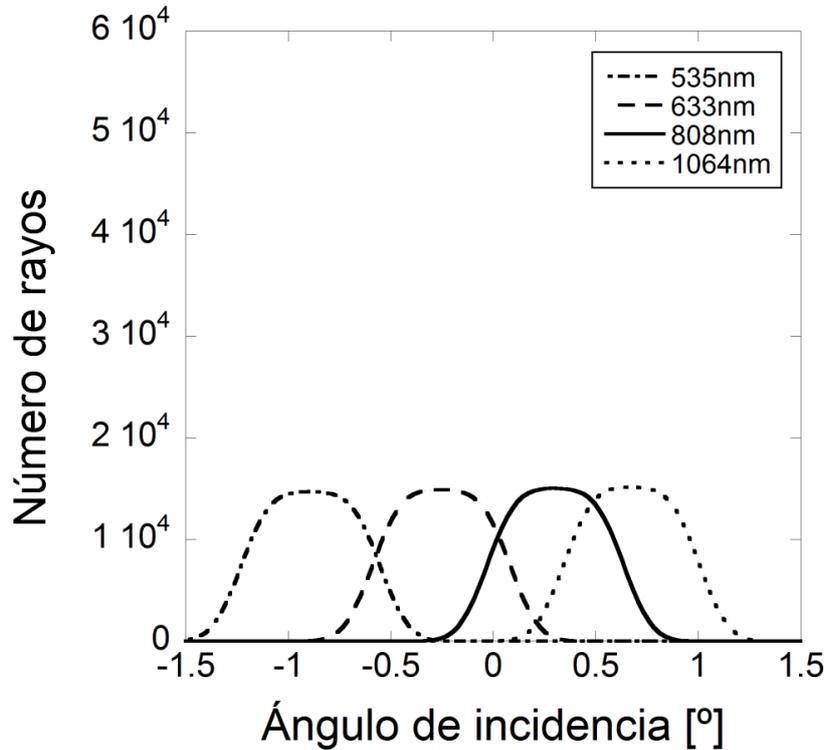


Figura 4. 16: Intensidad radiante tras los prismas anamórficos (Figura 4. 14) para haces incidentes con  $\lambda=535, 633, 808, 1064\text{nm}$ .

En base a este análisis, se ha llevado a cabo una optimización del posicionamiento de la pareja de prismas considerando el conjunto de características de nuestro haz láser y las propiedades del vidrio de los prismas. La Figura 4. 17 muestra los nuevos perfiles de intensidad radiante, donde es posible observar una clara simetría a lo largo de los dos ejes.

## Modelización Óptica del Prototipo Láser de Diodos

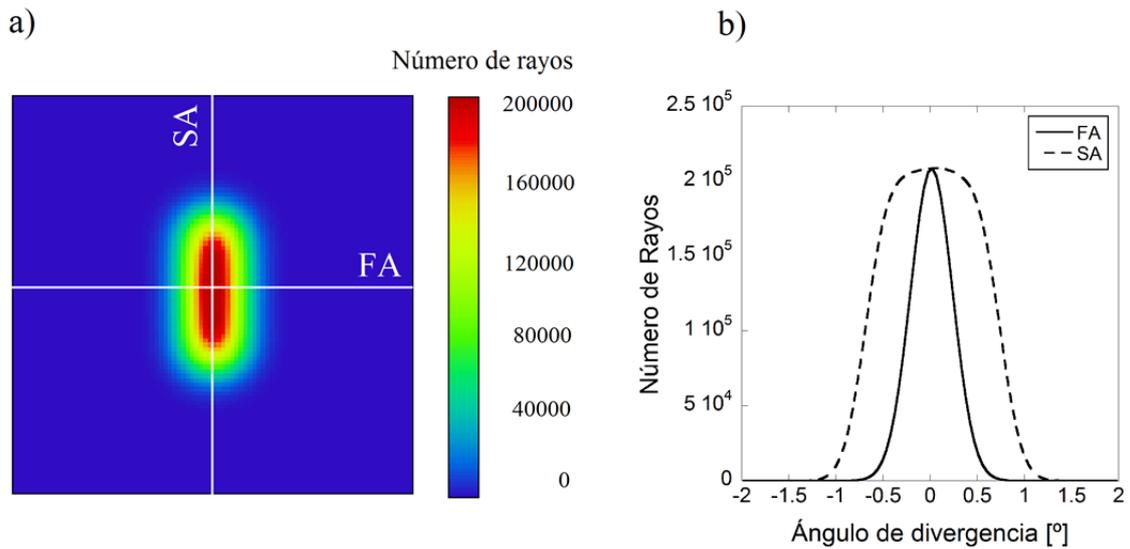


Figura 4. 17: a) Intensidad radiante sobre el detector virtual 2D (2x2°, 250x250pixels), b) Cortes transversales a lo largo de los SA y FA tras la optimización del posicionamiento de la pareja de prismas anamórficos.

A continuación se presentan los parámetros característicos del haz láser tras atravesar el conjunto óptico prismas anamórficos + lente colimación SA (Figura 4. 11 c)) teniendo en cuenta las correspondientes correcciones en el posicionamiento de los prismas. La Tabla 4. 6 presenta una comparativa de los parámetros característicos del haz láser (radio ( $W_{1/e^2}$ ) y semi-ángulo de divergencia ( $\theta_{1/e^2}$ )) tras los sistemas I (escala de espejos) y II (prismas anamórficos + colimación SA).

	Tras escala de espejos		Tras prismas anamórficos + Colimación SA	
	SA	FA	SA	FA
$W_{1/e^2}$ [mm]	0.8	5.3	1.55	1.93
$\theta_{1/e^2}$ [°]/[mrad]	1.5/26.2	0.20/3.5	0.72/12.56	0.29/5.06
BPP [mm.mrad]	21	18.6	19.47	9.76
$BPP_{total}$ [mm.mrad]	28.1		21.8	
$\eta_{FA}$	1/2.75			

Tabla 4. 6: Parámetros característicos de la calidad del haz en las dos etapas de conformado del haz: escala de espejos y prismas anamórficos + colimación.

El análisis de los datos permite realizar las siguientes consideraciones:

- El haz emergente del conjunto prismas anamórficos + colimación SA presenta una reducción espacial a lo largo del FA de  $1/2.75$ , ligeramente inferior al valor teórico proporcionado por el fabricante ( $1/3$ ). Dicha discrepancia puede ser consecuencia de la divergencia del haz en dicho eje. La anchura del haz a lo largo del SA presenta un incremento en torno al 36% como consecuencia de la divergencia que presenta dicho eje (Tabla 4. 1).
- En lo referente a las transformaciones de los ángulos de divergencia: el SA presenta una reducción de su divergencia cercana al 50%, efecto de la refracción en la lente cilíndrica de colimación en el SA. En cambio, la divergencia en el FA sufre un aumento en torno al 47% como consecuencia de la conservación del *BPP*: la reducción en anchura implica un aumento (del mismo orden que dicha reducción) en el ángulo de divergencia.
- En cuanto al *BPP*, es posible observar cómo tras la refracción en el sistema II (prismas anamórficos + colimación SA), la calidad del haz (*BPP*) mejora (disminuye *BPP*) con respecto a los valores obtenidos tras la escala de espejos (Tabla 4. 4):  $(BPP_{Total})_I = 28.1mm.mrad > (BPP_{Total})_{II} = 21.8mm.mrad$ . Dicha mejora en la calidad del haz es consecuencia de la mejora en la simetrización llevada a cabo entre los ejes SA y FA.

Siguiendo el mismo procedimiento que en el caso del sistema I (escala de espejos), a continuación se presenta una segunda caracterización del haz láser tras el sistema de prismas anamórficos + sistema colimación SA. Las condiciones de dicha caracterización han sido fijadas en base a los requerimientos de los equipos utilizados para llevar a cabo la caracterización. El detector virtual ha sido posicionado a una distancia  $D' = 90mm$  de la lente cilíndrica de colimación del SA (Figura 4. 18).

## Modelización Óptica del Prototipo Láser de Diodos

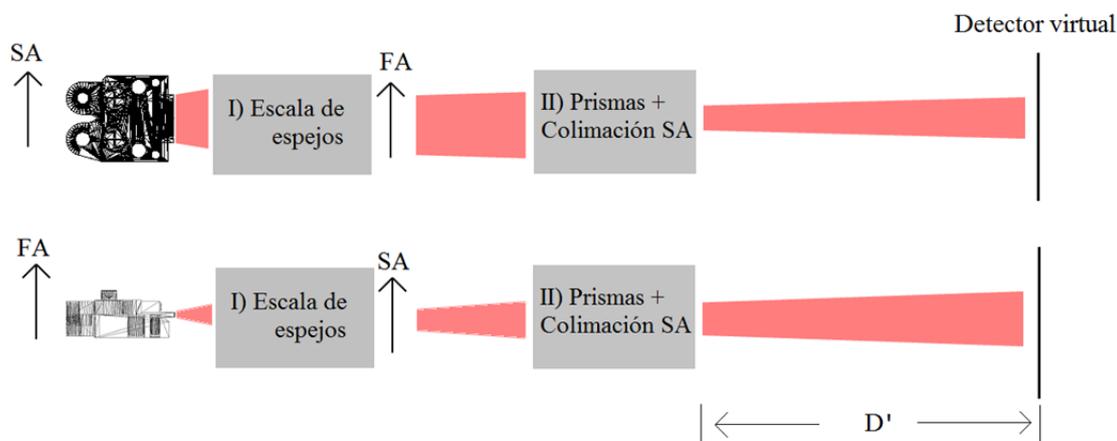


Figura 4. 18: Trazado de rayos del modelo óptico para la caracterización de la irradiancia emergente del sistema de escala de espejos+prismas anamórficos + colimación SA.

La Figura 4. 19 muestra la irradiancia recogida en el detector virtual tanto en 2D, 3D como los perfiles transversales a lo largo de los ejes SA y FA. Se observa que las anchuras del perfil de irradiancia en ambos ejes presentan valores similares a los registrados a una distancia de 7mm de la lente de colimación LJ1402L1-B (Figura 4. 12). Lo anterior implica una correcta colimación en el SA (Figura 4. 7b) mediante la lente cilíndrica LJ1402L1B. Por otro lado, a lo largo del SA se observa la presencia de dos líneas con valores de irradiancia significativamente superiores a los encontrados en las líneas más a lo largo del SA. Es posible observar que la distribución de irradiancia en el interior del haz cambia con respecto a la distribución encontrada a distancias menores a la lente de colimación del SA (Figura 4. 12). Lo anterior puede ser consecuencia de la divergencia residual del haz en el SA, así como del hecho de realizar la colimación sobre fuentes extensas e inhomogéneas (sub-haces emergentes de la escala de espejos).

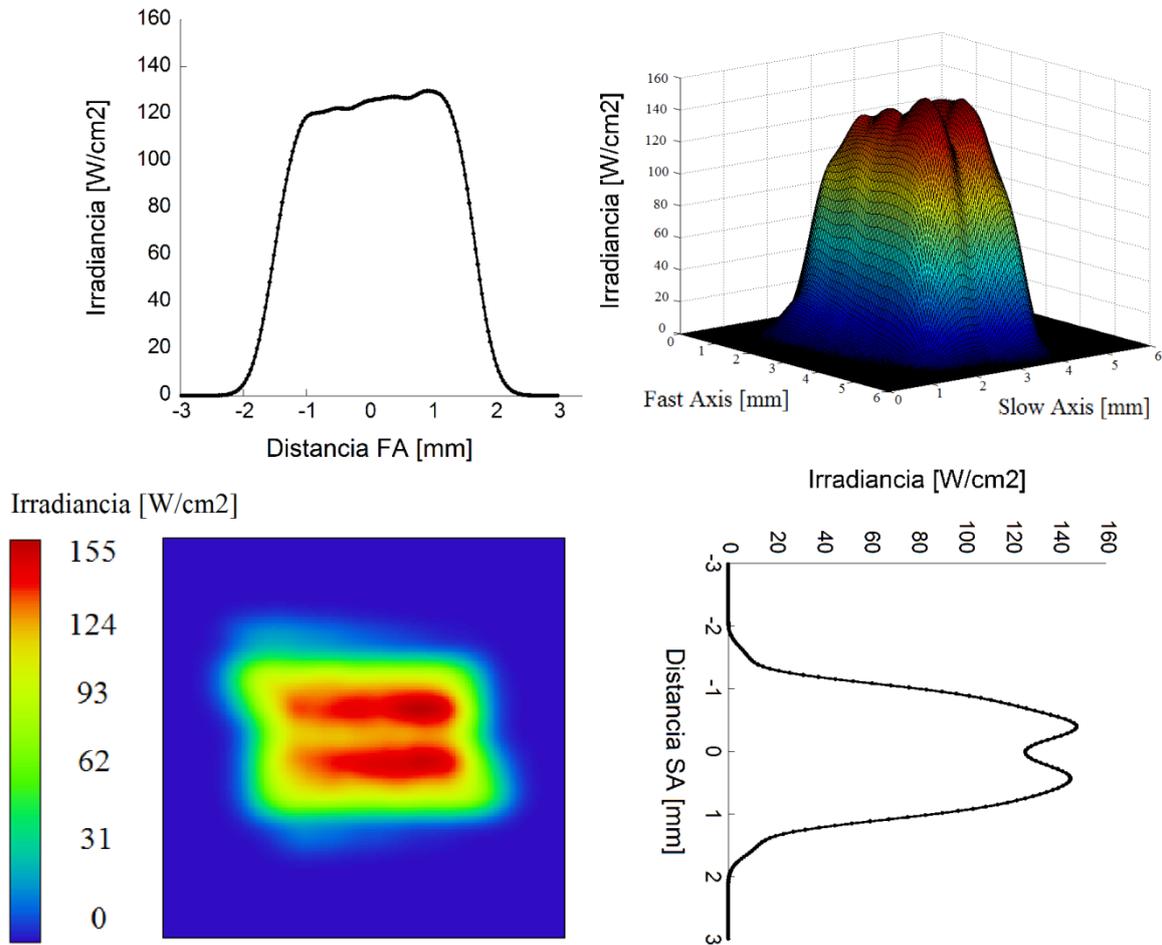


Figura 4. 19: Perfiles de irradiancia a lo largo de los SA y FA sobre el detector virtual ( $6 \times 6 \text{ mm}^2$ ,  $180 \times 180$  pixels) localizado a  $90 \text{ mm}$  tras la lente de colimación del SA LJ1402L1B (Figura 4. 11).

### III) Sistema de enfoque

Una vez realizados los dos procesos de conformado del haz necesarios simetrizar el producto del haz ( $BPP$ ) entre los ejes SA y FA, se plantea el sistema óptico de focalización a fibra óptica. Tal y como se detalló en la sección 3.5, la condición para que se produzca un eficiente acoplamiento a fibra óptica es que el  $BPP$  del haz láser sea menor al de las fibras ópticas consideradas:  $BPP_{f_{600\mu\text{m}}} = 66.5 \text{ mm.mrad}$  y  $BPP_{f_{400\mu\text{m}}} = 44.3 \text{ mm.mrad}$  para las fibras óptica de  $600$  y  $400 \mu\text{m}$  de diámetro (Tabla 4. 3). Como consecuencia de la simetría rotacional de las fibras ópticas el producto del haz ( $BPP_{total}$ ) debe ser alcanzado con dos importantes restricciones en ambos ejes:

- El diámetro del haz en el plano focal debe ser menor que el diámetro del núcleo de la fibra óptica.

## Modelización Óptica del Prototipo Láser de Diodos

- El ángulo de divergencia en la cáustica de focalización a fibra (ec.315) debe ser menor que el ángulo de aceptación o ángulo crítico ( $\theta_c$ ) de la fibra óptica

$$\theta_c = a \sin(n \cdot NA) = 12.7^\circ = 221.5 \text{ mrad} \quad (4.8)$$

Donde  $n$  es el índice de refracción del medio por el que viaja la luz antes de entrar en la fibra óptica y  $NA$  la apertura numérica de la fibra.

Los resultados mostrados tras los sistemas ópticos I y II han puesto de manifiesto una simetrización de la calidad del haz entre los ejes SA y FA. Sin embargo, no se ha logrado una simetrización total por lo que se dispone de un haz astigmático (tamaño de haz y divergencias diferentes en ambos ejes). En el proceso de diseño del sistema de focalización se inicialmente se consideró el caso más simple: una única lente esférica de longitud focal 40mm. La cáustica de focalización obtenida en ambos ejes (SA y FA) puso de manifiesto un notable astigmatismo y asimetrías tanto en la posición de la cintura del haz como en el ángulo de divergencia. Los principales resultados obtenidos de dicho pre-diseño fueron los siguientes:

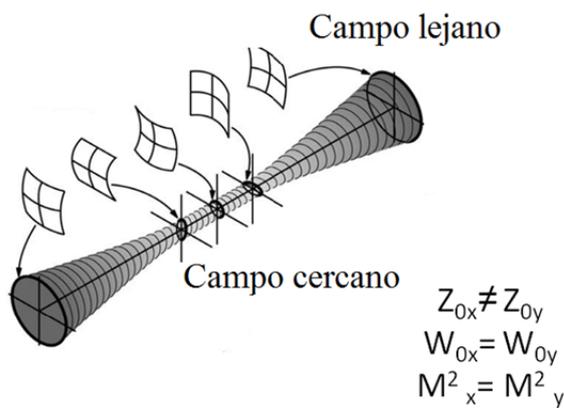
- La posición de la cintura del haz en ambos ejes diferió en  $(\Delta z_0)_{esf} = 0.83\text{mm}$ . Dicho desplazamiento es consecuencia de un tratamiento semejante de los ejes de un haz que presenta asimetrías tanto espaciales como angulares.
- El semi-ángulo de divergencia encontrado en el FA resultó aproximadamente dos veces el resultante en el SA. Lo anterior es consecuencia de la relación existente entre las correspondientes longitudes de Rayleigh en ambos ejes.

Como consecuencia de los dos puntos anteriores, el producto del haz ( $BPP$ ) en ambos ejes presenta una importante asimetría. Por lo tanto, la naturaleza astigmática del haz láser considerado hace necesario el empleo de lentes cilíndricas en el sistema de focalización a fibra óptica.

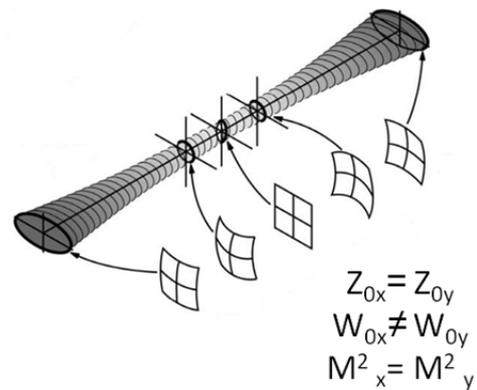
Los citados efectos de astigmatismo y asimetrías existentes son mostrados de manera independiente en las cáusticas 3D representadas en la Figura 4. 20. La Figura 4. 20a) presenta el efecto de **astigmatismo**, en el que las posiciones de las cinturas del haz para los dos ejes SA y FA no coinciden ( $z_{0x} \neq z_{0y}$ ) aunque tanto la cintura del haz como su factor de propagación posean valores semejantes ( $W_{0x} = W_{0y}$ ,  $M_x^2 = M_y^2$ ). Los dos planos correspondientes a las cinturas del haz poseen una sección transversal del haz elíptica. Entre dichos planos la sección es circular en el punto donde se encuentra el "círculo de mínima confusión". La Figura 4. 20b) presenta una **asimetría en la cintura del haz**, donde se dispone de tamaños diferentes de la cintura del haz. En campo lejano las secciones transversales son elípticas mientras que en campo cercano se obtienen secciones circulares. El tercer tipo es la

**asimetría en la divergencia**, donde el factor de propagación es diferente en los planos principales de propagación del haz dando lugar a ángulos de divergencia diferentes en ambos ejes. Por el contrario, la cintura del haz ( $W_{0x}=W_{0y}$ ) y su posición a lo largo del eje de propagación ( $z_{0x}=z_{0y}$ ) toman el mismo valor. En campo lejano las secciones transversales son elípticas siendo la sección del haz circular sólo circular en la posición  $z_{0x}=z_{0y}$  [4. 16].

a) Astigmatismo



b) Asimetría en la cintura



c) Asimetría en la divergencia

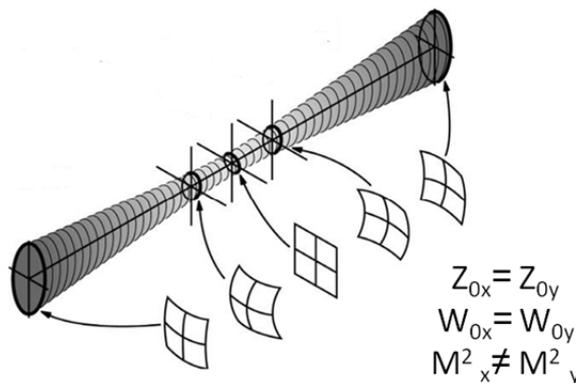


Figura 4. 20: Descripción de la apariencia tridimensional de tres tipos básicos de asimetría para un haz láser: a) astigmatismo b) asimetría en el radio del haz c) asimetría en la divergencia. Los planos situados junto con las cáusticas representan la curvatura del frente de onda a lo largo de camino óptico [4. 1].

De acuerdo con la norma ISO-11146-2:2006 el *BPP* debe ser determinado a través del ajuste de la cáustica de focalización a una la curva hiperbólica mostrada en la ec. 3.10 bajo las siguientes recomendaciones:

- Son necesarias al menos diez medidas del diámetro del haz láser en diferentes posiciones a lo largo del eje de propagación ( $W(z)$ ).

## Modelización Óptica del Prototipo Láser de Diodos

- Cinco de las diez medidas deben tomarse dentro de la distancia de Rayleigh ( $z_R$ ) y las otras cinco deben ser tomadas a una distancia de propagación  $> 2z_R$  (campo lejano).
- Para haces estigmáticos, las medidas deben ser realizadas de manera independiente en los dos ejes de propagación definidos en el sistema.

Como consecuencia del citado astigmatismo del haz, la focalización ha sido llevada a cabo mediante dos lentes cilíndricas, cada una de ellas actuando sobre un eje de propagación (SA y FA). La longitud focal para la focalización en el SA ha sido elegida como la siguiente longitud focal comercial por debajo de los 20mm con la que es posible hacer coincidir los planos focales de los ejes SA y FA. La Figura 4. 21 muestra el pre-diseño del sistema de focalización a fibra óptica. Durante su propagación, el haz láser se encuentra en primeramente con la lente cilíndrica F20mm LJ1960L1 encargada de realizar la concentración del haz en el FA. Posteriormente el haz incide sobre una segunda lente cilíndrica F15mm LJ1636L1 que actúa sobre el SA. El posicionamiento relativo de ambas lentes ha sido modelado para lograr la coincidencia de los planos focales de dichas lentes (Figura 4. 21).

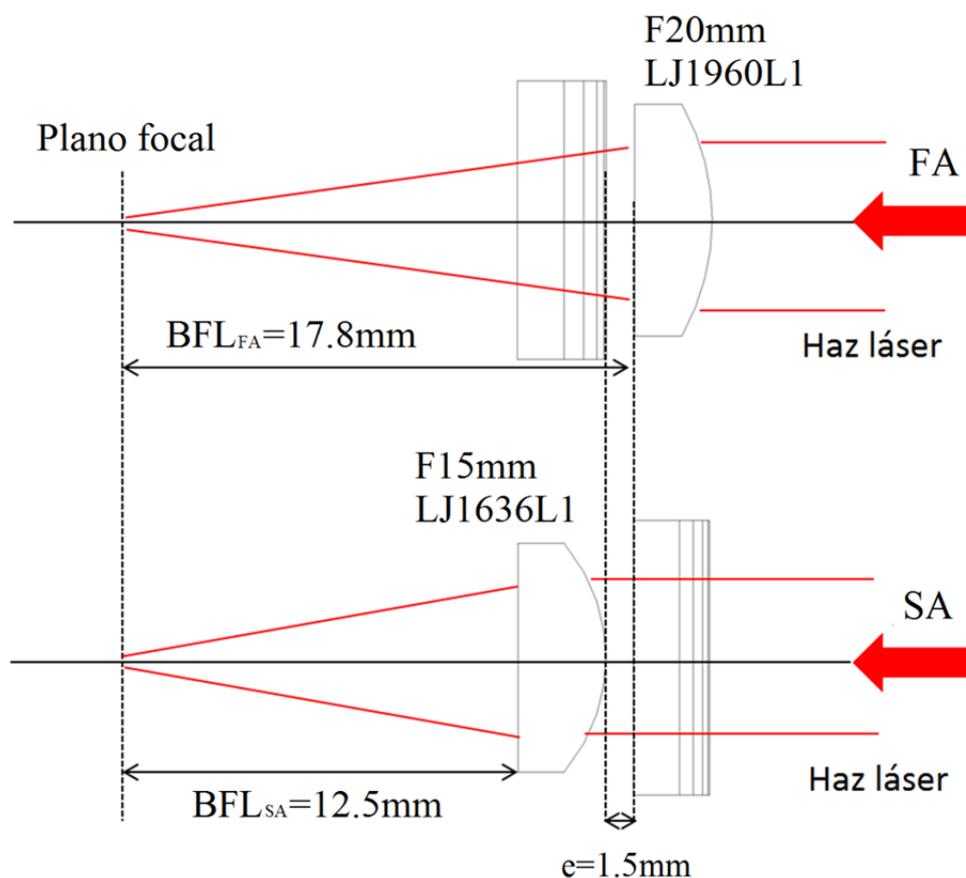


Figura 4. 21: Pre-diseño del sistema óptico de focalización mediante lentes cilíndricas.

La Figura 4. 22 presenta una imagen de la modelización del sistema considerado. Adicionalmente se muestra una vista en detalle del sistema de focalización y de la secuencia de detectores virtuales que permiten realizar la caracterización de la cáustica con el fin de establecer si la calidad del haz es la adecuada para lograr un eficiente acoplamiento a fibra.

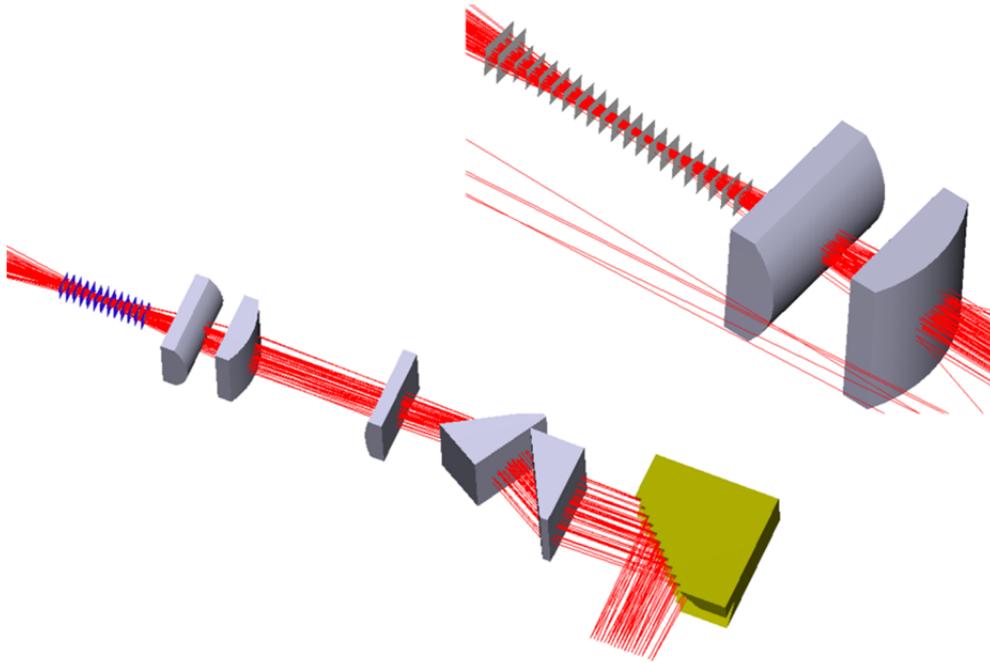
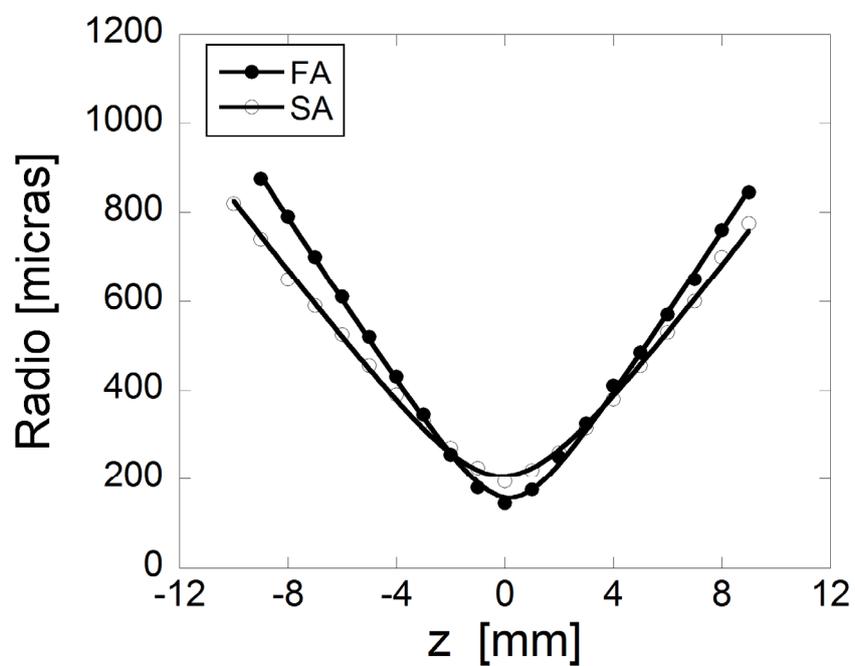


Figura 4. 22: Trazado de rayos del modelo óptico de acoplamiento a fibra de una barra de diodos láser para la obtención de la cáustica y calidad del haz a la entrada a fibra óptica.

La Figura 4. 23a) muestra las cáusticas obtenidas del modelo óptico mostrado en la Figura 4. 22. En dicha cáustica se observa la coincidencia de las cinturas del haz a lo largo de los ejes SA y FA. Además, es posible identificar un asimétrica tanto en la cintura de la como en la divergencia del haz en ambos ejes. La Figura 4. 23b) presenta los perfiles 2D de irradiancia registrados sobre algunos de los detectores virtuales localizados a lo largo del eje de propagación. Puede observarse la tendencia a un perfil cuasi-circular en posiciones cercanas a la de la cintura del haz ( $z_0$ ). En cambio, los perfiles 2D de irradiancia presentados para planos alejados de  $z_0$  ( $z = \pm 2, \pm 6$ ) presentan distribuciones de irradiancia no circulares. Por tanto, la naturaleza astigmática del haz láser es puesta de manifiesto en las asimetrías encontradas tanto en la cintura del haz en campo cercano como en la divergencia caracterizada en campo lejano.

a)



b)

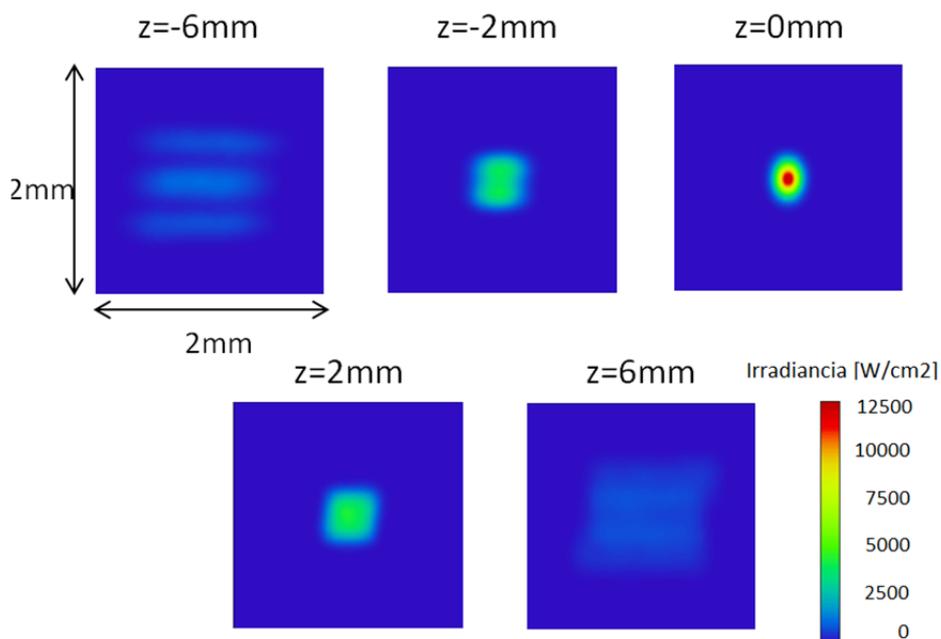


Figura 4. 23: a) Cáustica de focalización de los ejes SA y FA; b) Perfiles de irradiancia 2D del haz procedente de una barra de diodos.

La Tabla 4. 7 recoge los correspondientes parámetros de calidad del haz: cintura ( $W_0$ ), posición de la cintura ( $z_0$ ), semi-ángulo de divergencia ( $\theta$ ), longitud de Rayleigh ( $z_R$ ) y calidad del haz ( $BPP/M^2$ ). Además, es necesario disponer de la calidad del haz total (ec.3.18) de tal forma que pueda establecerse una comparativa con la calidad de la fibra óptica donde el haz debe ser acoplado (ec.3.19).

	SA	FA
$W_0$ [ $\mu\text{m}$ ]	$206.2 \pm 5.2$	$157.9 \pm 6.0$
$z_0$ [mm]	$0.14 \pm 0.04$	$0.31 \pm 0.03$
$\theta$ [mrad]	$79.0 \pm 0.4$	$94.5 \pm 0.4$
$z_R$ [mm]	$2.61 \pm 0.08$	$1.67 \pm 0.07$
$BPP$ [mm.mrad]	$16.3 \pm 0.5$	$14.9 \pm 0.6$
$BPP_{total}$ [mm.mrad]	$22.1 \pm 0.8$	
$M^2$	$63.3 \pm 1.2$	$58.1 \pm 1.9$

Tabla 4. 7: Parámetros característicos de la calidad del haz cuyas cáusticas han sido representadas en la Figura 4. 23a).

El análisis de los datos permite extraer las siguientes consideraciones:

- En lo que respecta a la cintura del haz ( $W_0$ ), es posible observar una asimetría en ambos ejes (Figura 4. 23a). La cintura del haz en el SA presenta un valor ligeramente superior al de la fibra óptica más restrictiva:  $d_{fibra} = 400\mu\text{m}$ . Sin embargo, como consecuencia de la citada asimetría, este efecto no es observado en el FA. Por otro lado, la separación en el valor posición de la cintura del haz ( $z_0$ ) para ambos ejes es de  $\Delta z_0 = 0.17 \pm 0.07\text{mm}$ . Lo anterior supone una reducción cercana al 80% con respecto al  $(\Delta z_0)_{esf} = 0.84 \pm 0.08\text{mm}$  encontrado en el caso de focalización con lentes esféricas. Por tanto podemos aproximar la posición de la cintura del haz por la posición del punto medio entre ambos ejes:  $z_{0(SA+FA)} = 0.225 \pm 0.035\text{mm}$ . De esta manera se obtiene un valor medio de  $W_{0(SA+FA)}$  para el haz total, como el valor medio de los valores que toma la hipérbola (ec.3.10) en los SA y FA en la posición  $z_{0(SA+FA)}$ . El valor medio de la

cintura del haz para ambos ejes ( $W_{0(SA+FA)} = 183.5\mu m$ ) se encuentra por debajo del radio crítico de la fibra.

- Los ángulos de divergencia encontrados en ambos ejes ( $\theta_{FA} = 79.0 \pm 0.4 mrad$ ,  $\theta_{SA} = 94.5 \pm 0.5 mrad$ ) son inferiores al ángulo crítico de la fibra óptica ( $\theta_c = 221.5 mrad$ ).
- La calidad del haz ( $BPP_{total}$ ) es inferior a la de la fibra más restrictiva:  $BPP_{total} = 22.1 \pm 0.8 mm.mrad < BPP_{f400\mu m} = 44.3 mm.mrad$ . Por lo tanto, los resultados de calidad del haz que proporciona el modelo óptico garantizan un eficiente acoplamiento de la barra de diodos láser a las fibras ópticas consideradas.

### 4.2 Modelización del sistema óptico de acoplamiento a fibra de dos barras de diodos láser mediante ZEMAX®.

Con el objeto de aumentar los niveles de potencia necesarios para la aplicación final (microsoldadura de termoplásticos) se lleva a cabo un **biplexado por polarización** de la radiación emitida por las dos barras de diodos láser.

#### 4.2.1 Biplexado por polarización

A continuación se presenta el análisis de la evolución del estado de polarización a través de los componentes ópticos responsables del conformado del haz. Dicho estudio será también realizado con ZEMAX®, ya que permite estudiar la dirección de vibración del campo eléctrico a lo largo de un determinado sistema óptico. En dicho estudio se analizará el estado de polarización con respecto al **plano de incidencia** de cada componente. En términos generales, el plano de incidencia de una superficie/componente es definido como el plano perpendicular a la superficie de incidencia que contienen el haz incidente y el reflejado. Se denominan polarizaciones S y P a los estados de polarización en los que el campo eléctrico vibra, respectivamente, perpendicular y paralelo al plano de incidencia [4.11, 4.18].

La información relativa a la polarización de la radiación emitida por las barra de diodos es proporcionada por el grado de polarización en transmisión *DoP* (del inglés *Degree of Polarization*). Dicho parámetro proporciona una medida de la dirección de vibración del campo eléctrico y puede ser descrito por la siguiente ecuación [4. 17, 4. 18]

$$DoP = \frac{\bar{I}_x - \bar{I}_z}{\bar{I}_x + \bar{I}_z}. \quad (4.9)$$

Donde  $\bar{I}_x$  representa la intensidad del haz láser correspondiente a la vibración del campo eléctrico  $\vec{E}$  en el plano xz (TE) (Figura 4. 24). Por otro lado,  $\bar{I}_z$  representa la intensidad del haz láser correspondiente a la vibración del campo eléctrico  $\vec{E}$  en el plano yz. Por lo tanto, un valor de  $DoP=-1$  implica que el 100% del campo eléctrico se encuentra vibrando el plano yz, mientras con  $DoP=+1$  el 100% del campo eléctrico vibra en el plano xz. Un  $DoP=0$  indica que, o bien están presentes el mismo número de componentes de cada estado de polarización o el estado de polarización es completamente aleatorio [4.18, 4. 19].

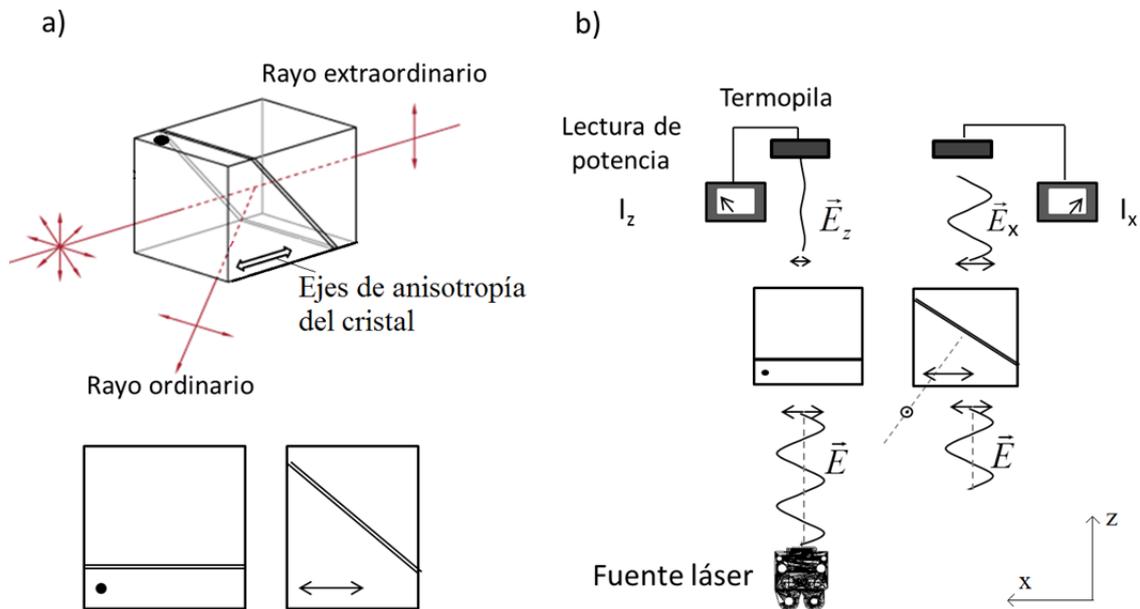


Figura 4. 24: a) Cubo polarizador; b) Esquema del dispositivo para la determinación de las componentes  $I_x$  e  $I_z$ .

Como paso previo a su medida experimental, y en base a las especificaciones proporcionadas por el fabricante (Polarización- TE del inglés *Transverse Electric*: campo eléctrico vibrando en dirección perpendicular a la de propagación), disponemos de dos fuentes láser con un  $DoP=+1$  (Tabla 4. 1). Las especificaciones relativas al estado de polarización han sido introducidas en el modelo de ZEMAX® en base a los vectores de Jones descritos en la sección 3.5.1.

La Figura 4. 25 muestra de manera esquemática los diferentes componentes del empleados en la unión de dos barras de diodos láser mediante *biplexado por polarización*. Es

posible observar que el nuevo sistema introducido para llevar a cabo el proceso de unión es V) *Biplexado por polarización*.

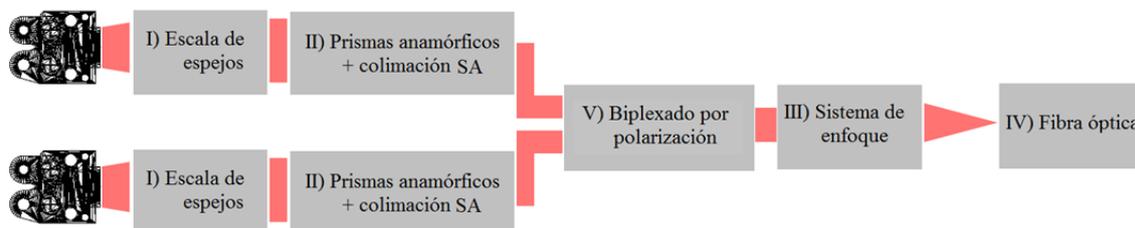


Figura 4. 25: Esquema del sistema óptico de acoplamiento a fibra de dos barras de diodos láser.

### V) Biplexado por polarización

En base a las especificaciones de las barras de diodos láser mostradas en la Tabla 4. 1, el campo eléctrico puede ser descrito, según el formalismo de Jones, de acuerdo a los formalismo de la Tabla 4. 8.

$ \tilde{E}_x $	1.0	$ \tilde{E}_y $	0.0
X-Phase	0.0	Y-Phase	0.0

Tabla 4. 8: Definición del estado de polarización para las dos barras de diodos láser consideradas.

La Figura 4. 26a) muestra el mapa de polarización del haz emergente de una de las barras de diodos láser. Dado que el vector de Jones de la fuente láser posee únicamente componente en el eje x (campo eléctrico vibrando en el plano xz), el haz se encuentra linealmente polarizado en dicho plano. La Figura 4. 26b) presenta la evolución del mapa de polarización tras el sistema de escala de espejos con respecto a la entrada en dicho sistema (Input: Figura 4. 26a, campo eléctrico vibrando en el plano xz). Tras las dos reflexiones producidas sobre el sistema de escala de espejos, el estado de polarización continúa siendo linealmente polarizado pero su dirección de vibración ha girado 90º respecto a la de la entrada (Input). Tras producirse la refracción sobre el conjunto óptico prismas anamórficos + colimación, la dirección de vibración del campo eléctrico permanece inalterada con respecto a la entrada en dicho sistema (Figura 4. 26 c).

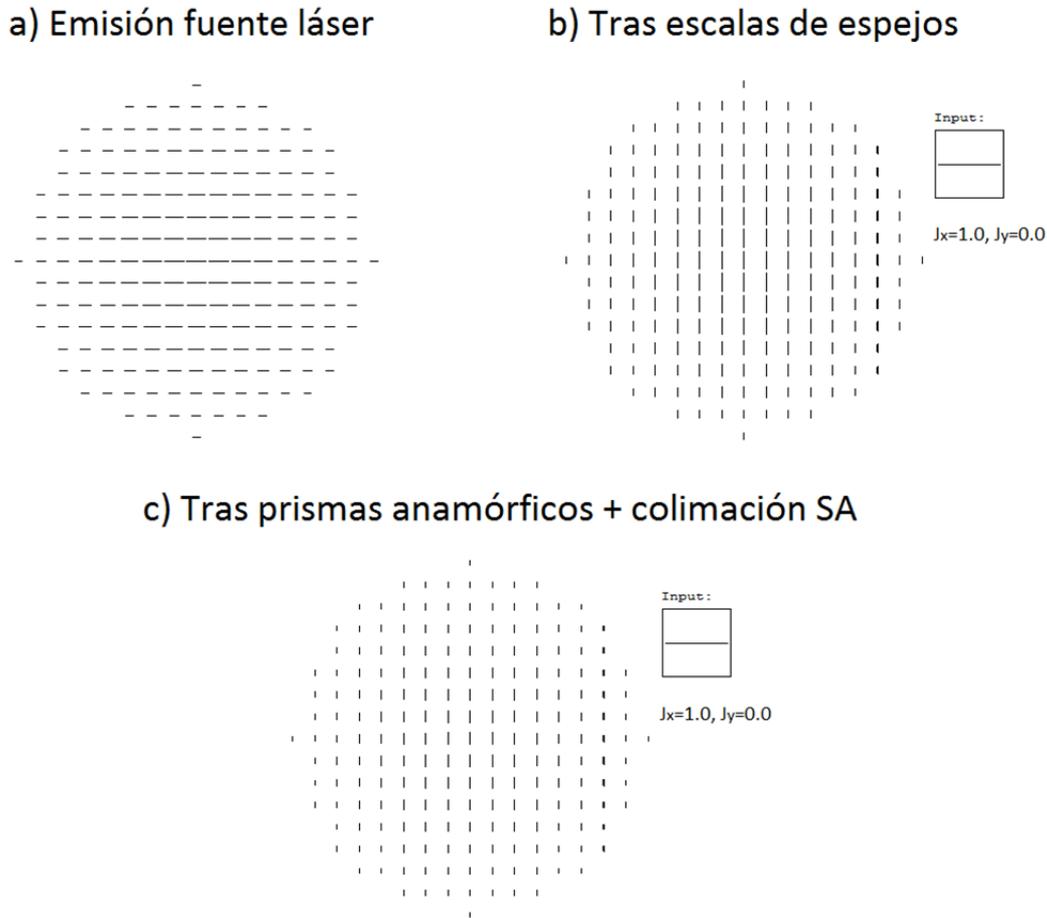


Figura 4. 26: Evolución del estado de polarización a través del sistema óptico de conformado del haz mostrado en la Figura 4. 3.

Los haces procedentes de las dos fuentes láser y sistemas ópticos de conformado del haz ( I) escala de espejos y II) prismas anamórficos + colimación SA) poseen el mismo estado de polarización (Figura 4. 26c). Por tanto, para llevar a cabo la superposición de haces es necesario rotar  $90^\circ$  la dirección de vibración del campo eléctrico de uno de ellos: esta función la realiza una **lámina de media onda** (Figura 4. 27). El segundo componente óptico necesario es **un divisor de haz por polarización**, el cual posee un recubrimiento de finas multicapas de material dieléctrico que inducen el comportamiento selectivo al estado de polarización. Dicho recubrimiento proporciona una función reflejante cuando el campo eléctrico está vibrando en una determinada dirección y anti-reflejante cuando dicha vibración se produce en la dirección perpendicular (Figura 4.27) [4.10]. Aunque dicho componente sea denominado divisor de haz en realidad su función en el sistema óptico presentado es unir dos haces láser tal y como se ha explicado previamente.

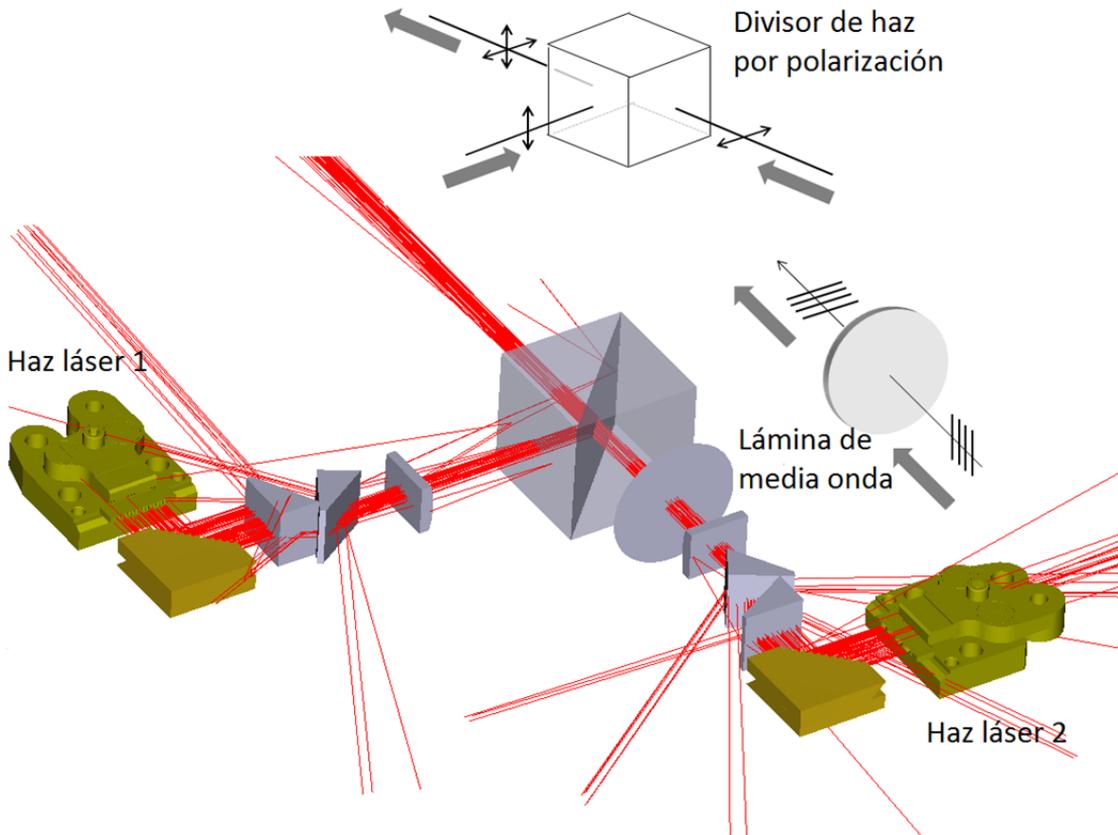


Figura 4. 27: Representación esquemática del efecto de la lámina de media onda y el divisor de haz sobre el estado de polarización.

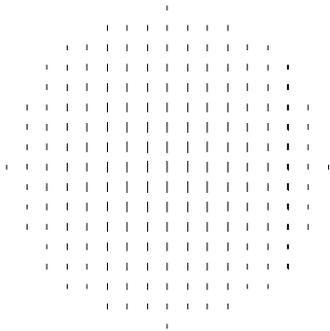
La lámina de media onda es modelizada a partir de la matriz de Jones (sección 3.5.1) que modifica el vector de Jones de un campo eléctrico incidente  $(\tilde{E}_{ix}, \tilde{E}_{iy})$  de acuerdo con

$$\begin{pmatrix} \tilde{E}_{tx} \\ \tilde{E}_{ty} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \tilde{E}_{ix} \\ \tilde{E}_{iy} \end{pmatrix} \quad (4. 10)$$

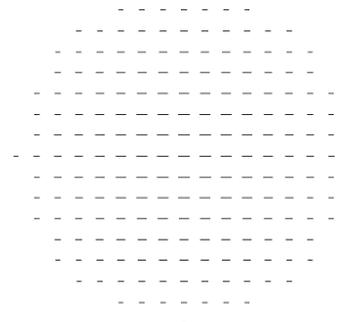
Donde  $a_{11}$ ,  $a_{12}$ ,  $a_{21}$  y  $a_{22}$  son números complejos mediante los cuales se define la transformación que inducirá el componente óptico sobre el campo eléctrico incidente. En concreto, una lámina de media onda ( $\lambda/2$ ) rota  $90^\circ$  la vibración del campo eléctrico, pasando de una polarización lineal en el eje x a polarización lineal en el eje y su matriz de Jones viene dada por:  $a_{11}=(0,0)$ ,  $a_{12}=(1,0)$ ,  $a_{21}=(-1,0)$ ,  $a_{22}=(0,0)$ . El efecto de dicha lámina sobre el mapa de polarización que incide sobre ella (Input) puede ser observado en la Figura 4. 28b). Por tanto, si una lámina de media onda se interpone en el camino óptico de la fuente láser 2 (Figura 4.27), disponemos de dos haces que poseen, a priori, idéntica calidad del haz y cuyos

campos eléctricos vibran en planos perpendiculares (Figura 4. 28a) y Figura 4. 28b)). Dichos haces (Input 1 e Input2 en Figura 4. 28c) inciden sobre el divisor de haz dando lugar a un haz con el mapa de polarización mostrado en la Figura 4. 28c).

a) Haz láser 1 tras prismas anamórficos + colimación SA

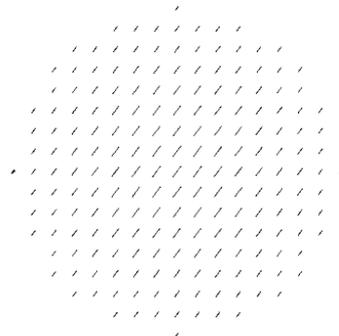


b) Haz láser 2 tras lámina de media onda



Input  
  
 $J_x=1.0, J_y=0.0$

c) Haz láser resultante (haz 1 + haz 2) tras *beam combiner*



Input 1      Input 2  
  
 $J_x=0.707, J_y=0.707$

Figura 4. 28: Evolución del estado de polarización a través de los elementos polarizadores descritos en la Figura 4. 27.

Como se comentó previamente, el estado de polarización se define en base a la vibración del campo eléctrico con respecto al plano de incidencia. En nuestro sistema, fijaremos como superficie/componente de incidencia el divisor de haz y definiremos las componentes S y P en función de dicho componente. Así, el haz procedente del láser 1 posee polarización P (campo eléctrico vibrando en el plano yz) mientras que el haz procedentes del láser 2 posee polarización S (campo eléctrico vibrando en el plano xz) (Figura 4. 29).

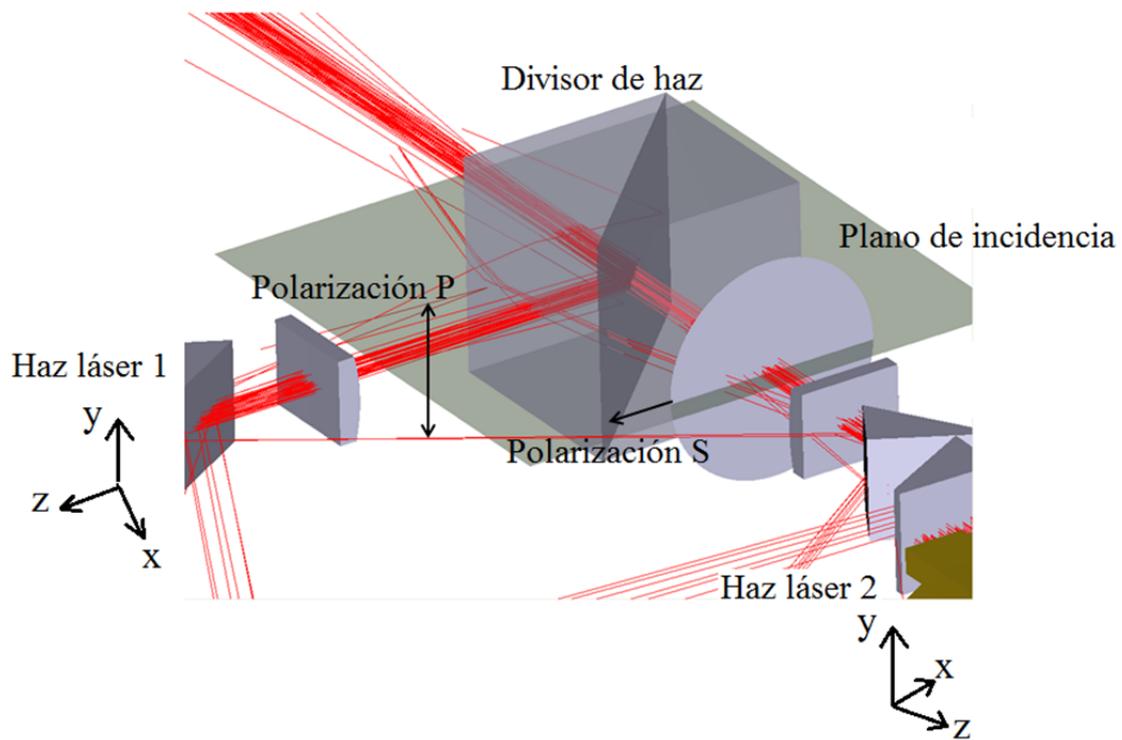


Figura 4. 29: Definición del plano de incidencia y estados de polarización.

Con el fin de modelizar el divisor de haz, se ha modelizado en primer lugar el recubrimiento selectivo al estado de polarización en base a las características del divisor de haz comercial seleccionado [PBSO-800-100 de CVI MellesGriot]. Uno de los parámetros característicos de estos componentes ópticos es el *coeficiente de extinción*,  $\rho_p$ , definido como

$$\rho_p = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} \quad (4. 11)$$

Donde  $T_1$  y  $T_2$  son las transmitancias máxima y mínima respectivamente tras atravesar el componente polarizador. Por lo tanto,  $\rho_p$  da cuenta de cómo de puro es el estado de polarización del haz tras atravesar dicho componente [4. 18].

El divisor de haz ha sido elegido en base a las especificaciones del componente comercial que más se adecúa a los requerimientos de nuestro sistema en cuanto a longitud de onda, densidad de potencia umbral y características de polarización. Sus parámetros característicos se muestran en la Tabla 4. 9, donde  $R_s$ ,  $R_p$ ,  $T_s$  y  $T_p$  representan las fracciones de intensidad reflejada ( $R$ ) y transmitida ( $T$ ) para los estados de polarización S y P.

Ángulo [°]	$\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$	$R_p$	$T_s$	$T_p$
45	0.808	0.995	0.0	0.0	0.98

Tabla 4. 9: Parámetros característicos del divisor de haz por polarización PBSO-800-100.

De acuerdo con el trazado de rayos mostrado en la Figura 4. 29 y en base a las especificaciones del divisor de haz (Tabla 4. 9), la función de dicho componente es maximizar la reflexión del haz láser 1 (polarización S) y la transmisión del haz láser 2 (polarización P). De esta manera, ambos haces se superponen tras el divisor de haz finalizando así este proceso de **biplexado**.

#### 4.2.2 Sistema de enfoque

Siguiendo el mismo procedimiento que en la sección 4.1.2, a continuación se presenta el estudio de la calidad del haz resultante de la unión por polarización. La Figura 4. 30 muestra el trazado de rayos del modelo de superposición de dos haces láser mediante **biplexado por polarización**.

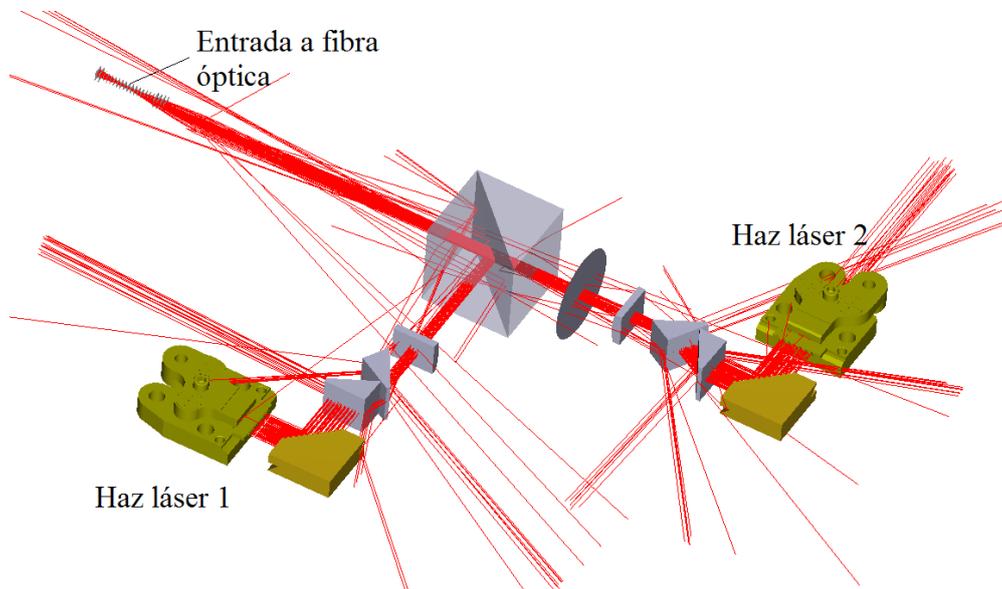


Figura 4. 30: Trazado de rayos del modelado óptico para el acoplamiento a fibra de dos barras de diodos láser unidas mediante biplexado por polarización.

La Figura 4. 31a) muestra la cáustica de focalización a lo largo de los SA y FA junto con algunos de los perfiles 2D de irradiancia (Figura 4. 31b) encontrados a lo largo del eje de propagación.

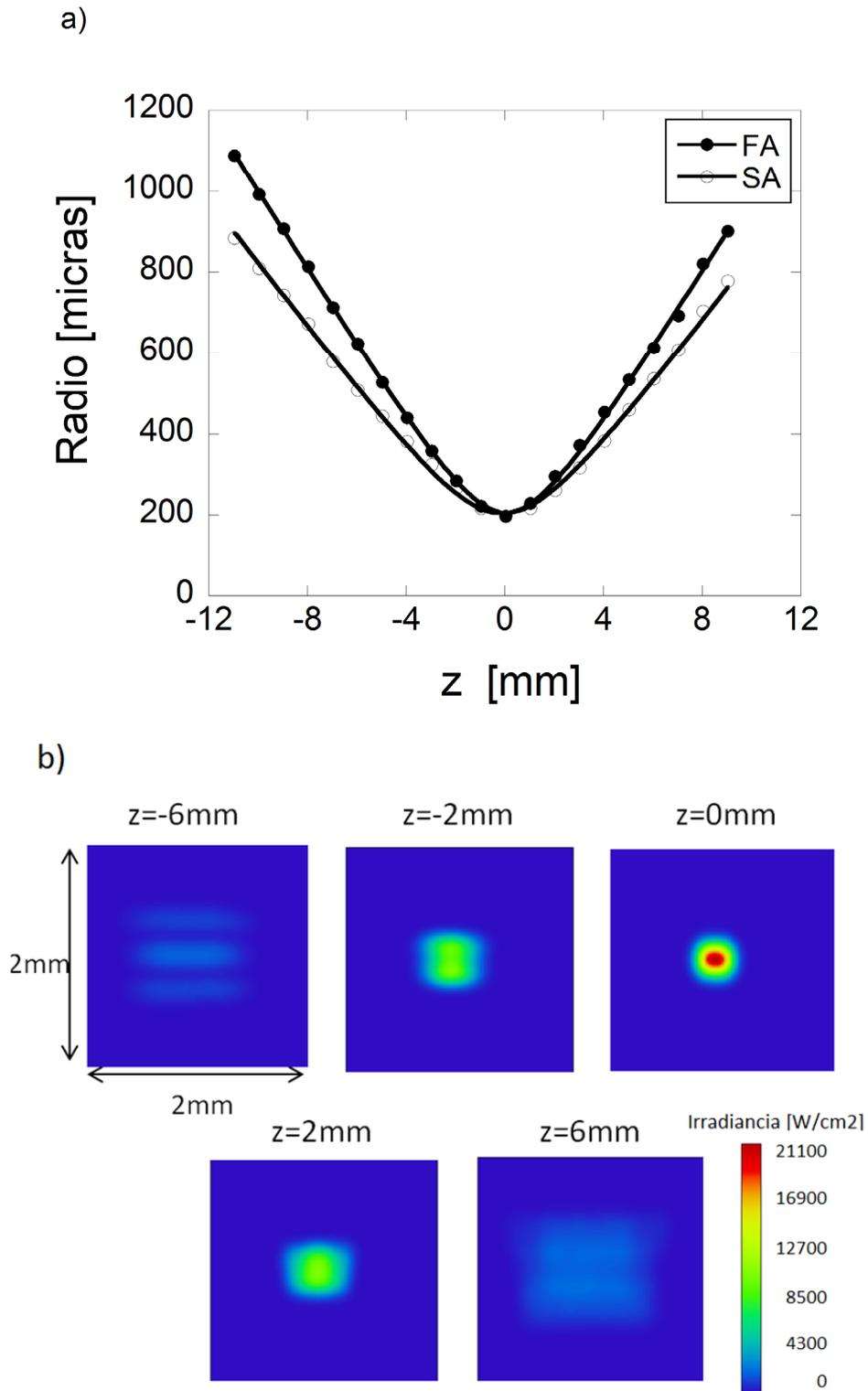


Figura 4. 31: a) Cástica de focalización de los ejes SA y FA; b) Perfiles de irradiancia 2D del haz procedente de dos barra de diodos.

La Tabla 4. 10 muestra los parámetros característicos de calidad del haz, obtenidos mediante el ajuste de la cáustica de focalización a la ec.(3.10).

	SA	FA
$W_0$ [ $\mu\text{m}$ ]	204.0 $\pm$ 4.6	207.2 $\pm$ 4.1
$z_0$ [mm]	-0.09 $\pm$ 0.03	0.04 $\pm$ 0.02
$\theta$ [mrad]	80.3 $\pm$ 0.4	97.3 $\pm$ 0.4
$z_R$ [mm]	2.54 $\pm$ 0.07	2.13 $\pm$ 0.05
$BPP$ [mm.mrad]	16.4 $\pm$ 0.5	20.2 $\pm$ 0.5
$BPP_{total}$ [mm.mrad]	26.0 $\pm$ 0.7	
$M^2$	63.7 $\pm$ 1.1	78.3 $\pm$ 0.8

Tabla 4. 10: Parámetros característicos de la calidad del haz cuyas cáusticas han sido presentadas en la Figura 4. 31.

El análisis de los resultados permite realizar las siguientes consideraciones:

- La cintura del haz ( $W_0$ ) presenta en ambos ejes valores ligeramente superiores al radio de la fibra más restrictiva ( $d_{fibra}/2=200\mu\text{m}$ ). Sus posiciones a lo largo del eje de propagación ( $z_0$ ) presentan una separación de  $\Delta z_0=0.13\pm 0.05\text{mm}$ . Dado que este valor es inferior al encontrado en el caso de acoplamiento a fibra de una única barra de diodos, podemos aproximar la posición de la cintura del haz como el punto medio de su posición para ambos ejes  $z_{0(SA+FA)} = -0.025\pm 0.025\text{mm}$ .
- Los ángulos de divergencia encontrados en ambos ejes ( $\theta_{SA} = 80.3\pm 0.4\text{mrad}$ ,  $\theta_{FA} = 97.3\pm 0.4\text{mrad}$ ) son inferiores al ángulo crítico de las fibras ópticas ( $\theta_c = 221.5\text{mrad}$ ).
- La calidad del haz ( $BPP$ ) en ambos ejes toma valores inferiores a los correspondientes a la fibra más restrictiva:  
 $BPP_{total} = 26.0\pm 0.7\text{mm.mrad} < BPP_{f400\mu\text{m}} = 44.3\text{mm.mrad}$

Lo anterior garantiza, a priori, un eficiente acoplamiento a fibra del haz resultante de la unión por bplexado de las dos fuentes de diodos láser seleccionadas.

## Modelización Óptica del Prototipo Láser de Diodos

La Tabla 4. 11 presenta una comparativa de la calidad de los haces resultantes de los sistemas ópticos modelados en las secciones 4.1 (sistema óptico de acoplamiento de una barra de diodos a fibra) y 4.2 (sistema de acoplamiento a fibra de dos barras de diodos). De su análisis puede observarse que:

- El valor de la cintura del haz ( $\bar{W}_{0(SA+FA)}$ ) en el punto medio ( $\bar{z}_{0(SA+FA)}$ ) ha aumentado sensiblemente con respecto al obtenido en el caso del acoplamiento de una única barra de diodos. En el caso del acoplamiento de dos barras de diodos, su valor se encuentra un 3% por encima de valor del radio crítico de la fibra con parámetros más restrictivos. Este hecho puede ser consecuencia de las estrechas tolerancias en el posicionamiento de la pareja de prismas anamórficos.
- La separación de las cinturas del haz en ambos ejes es  $\bar{z}_{0(SA+FA)} = 0.13 \pm 0.05 \text{ mm}$ , un 23% menor que la obtenida en el caso del acoplamiento de una barra.

Por tanto, teniendo en cuenta las desviaciones asociadas a la calidad del haz (*BPP*), no se evidencia una pérdida de calidad del haz en el modelo de superposición de los haces procedentes de dos barras de diodos. En el Capítulo 5 se realizará un breve estudio de la influencia de las tolerancias asociadas al posicionamiento de la pareja de prismas en la calidad del haz resultante.

SA+FA		Una barra		Dos barras	
$\bar{W}_{0(SA+FA)} [\mu\text{m}]$		182.2±5.6		205.7±4.4	
$\bar{z}_{0(SA+FA)} [\text{mm}]$		0.225±0.035		-0.025±0.025	
$(z_R)_{SA} [\text{mm}]$	$(z_R)_{FA} [\text{mm}]$	2.64±0.08	1.67±0.07	2.54±0.07	2.13±0.05
$\theta_{SA} [\text{mrad}]$	$\theta_{FA} [\text{mrad}]$	82.3±0.3	94.3±0.3	80.3±0.4	97.3±0.4
$BPP_{total} [\text{mm.mrad}]$		25.5±0.7		26.0±0.7	

Tabla 4. 11: Comparativa de los parámetros característicos del haz cuyas cáusticas han sido presentadas en la Figura 4. 23 (una barra) y Figura 4. 31 (dos barras).

## Referencias

4. 1 *High-Power Diode Lasers Fundamentals, Technology, Applications (Topics in Applied Physics)*. R.Diehl. Hardcover, 2000.
4. 2 A.Naqwi, F.Durst. *Focusing of diode laser beams: a simple mathematical model*. Applied Optics 29 (12) (1990), 1780-1785.
4. 3 N.Coluccell. *Non-sequential modeling of laser diode stacks using Zemax: simulation, optimization and experimental validation*. Applied Optics 49(22) (2010), 4237-45.
4. 4 B.Ehlers, K.Du, M.Baumann, H.G. Treusch, P.Loosen, R. Poprawe. *Beam shaping and fiber coupling of high-power diode laser arrays*. Proc. SPIE 3097, Lasers in Material Processing 639 (1997).
4. 5 P.Schreiber, B.Hoefer, P. Dannberg, U.D.Zeitner. *High-brightness fiber-coupling schemes for diode laser bars*. Proc. SPIE 5876, Laser Beam Shaping VI 587602 (2005).
4. 6 W. Sokolowski, D. Wolff, P. Henning. *Beam shaping and fiber coupling of high power diode lasers*. Of the Symposium on Photonics Technologies for 7th Framework Program 129-132 (2006).
4. 7 H.G. Treusch, K.Du, M.Baumann, V. Sturm, B.Ehlers, P.Loosen. *Fiber-coupling technique for high-power diode laser arrays*. Proc. SPIE 3267, Laser Resonators 98 (1998).
4. 8 K.Du, M.Baumann, B.Ehlers, H.G. Treusch, P.Loosen. *Fiber-coupling technique with micro step-mirrors for high-power diode laser bars*. Conference Paper, Advanced Solid State Lasers, (1997), Orlando.
4. 9 F.Dorsch, P.Henning, M.Nickel. *High-brightness fibre-coupled diode laser module*. Proc. SPIE 3285. Fabrication, Reliability and Applications of Semiconductor Lasers III, 192 (1998).
4. 10 <http://www.ingeneric.com/en/home/>
4. 11 *Optics* (4<sup>th</sup> Edition). E. Hecht. Hardcover, 2001.
4. 12 A.E. Siegman. *How to (Maybe) measure laser beam quality*. Conference Paper. Diode Pumped Solid State Lasers: Applications and Issues. Washington D.C. (1998)
4. 13 S. Heinemann, L. Leininger. *Fiber-coupled diode lasers and beam-shaped high-power stacks,*" Proc. SPIE 3267. Laser Resonators 116 (1998).
4. 14 S.H. Ghasemi, M.R. Hantehzadeh, J.Sabbaqhzadeh, D. Dorrnian, M.Lafooti, V.Vatani, R.Rezaei-Nasirabad, A. Hemmati, A.A. Amidian, S.A. Alavian. *Beam Shaping design for coupling high power diode laser stack to fiber*. Applied Optics 50 (18) (2011), 2927-30.

4. 15 *Optical System Design* (Second Edition). R. Fischer. Hardcover, 2008.
4. 16 *Handbook of Optical and Laser Scanning* (Second Edition). Gerald F. Marshall, Glenn E. Stutz. CRC Press, 2011.
4. 17 C. Wessling, St. Hengesbach, J. Geiger, J. Dolkemeyer, M. Traub, D. Hoffmann. *50W passively cooled, fiber coupled diode laser at 976nm for pumping fiber lasers using 100 $\mu$ m fiber bundles*. Proc. SPIE 6876, High-Power Diode Laser Technology and Applications VI, 687614 (2008).
4. 18 *Handbook of Optics* (Vol.I—Geometrical and Physical Optics, Polarized Light, Components and Instruments), Third Edition, Mc Graw Hill. (2010). Chapter 12 pp. 484–488
4. 19 J. L. Hostetler, C-L. Jiang, V. Negoita, T. Vethake, R. Roff, A. Shroff, T. Li, C. Miester, U. Bonna, G. Charache, H. Schlüter, F. Dorsch. *Thermal and strain characteristics of high-power 940 nm laser arrays mounted with AuSn and In solders*. Proc. SPIE 6456. High-Power Diode Laser TEchnology and Applications V, 645602 (2007).

# CAPÍTULO 5

## 5. DESARROLLO EXPERIMENTAL DEL PROTOTIPO LÁSER DE DIODOS

En este capítulo se presentan los resultados relativos al desarrollo del prototipo láser de diodos cuyo modelado ha sido descrito en el Capítulo 4. En primer lugar se explica el desarrollo experimental del sistema óptico de acoplamiento de una única barra de diodos láser a fibra (sección 5.1). Dicho desarrollo posee un doble objetivo: por un lado validar los resultados predichos por el modelo óptico desarrollado en ZEMAX® (sección 4.2) y por otro, establecer una referencia para evaluar los resultados experimentales obtenidos del desarrollo final del prototipo que se obtiene a partir de dos haces láser superpuestos mediante un biplexado por polarización. El desarrollo del prototipo se presenta en la sección 5.2 donde, además de la descripción del desarrollo óptico, se detallan otros aspectos relevantes relativos a aspectos al diseño mecánico, eléctrico y termoeléctricos. Por último, en la sección 5.3 se realiza una breve descripción del proceso de integración del prototipo láser en máquina para su posterior aplicación a la microsoldadura de termoplásticos.

### 5.1 Acoplamiento a fibra de una barra de diodos láser

Con el fin de clarificar los efectos introducidos por cada uno de los elementos ópticos en el dispositivo experimental, se ha empleado una metodología similar a la utilizada en el Capítulo 4. De este modo, será posible comparar los resultados predichos por ZEMAX® con

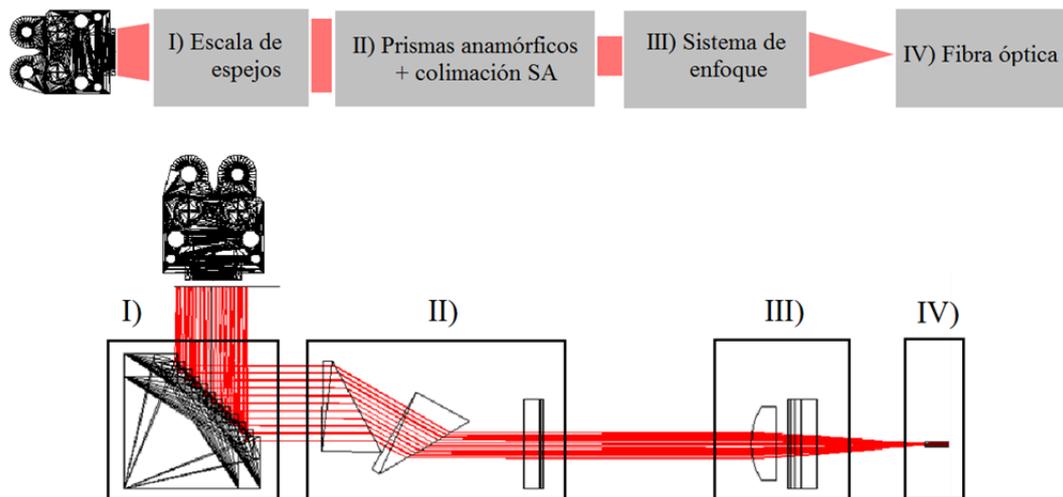
los obtenidos experimentalmente (sección 5.1.1). Además, se presenta el estudio experimental de la eficiencia del prototipo en términos de potencias a lo largo de todo el sistema (sección 5.1.2).

### 5.1.1 Caracterización de haz

La Figura 5. 1a) muestra un esquema del diseño óptico de acople de una barra de diodos a fibra junto con el correspondiente trazado de rayos desarrollado en ZEMAX®. La Figura 5. 1b) presenta el correspondiente montaje experimental.

a)

Fuente diodos láser



b)

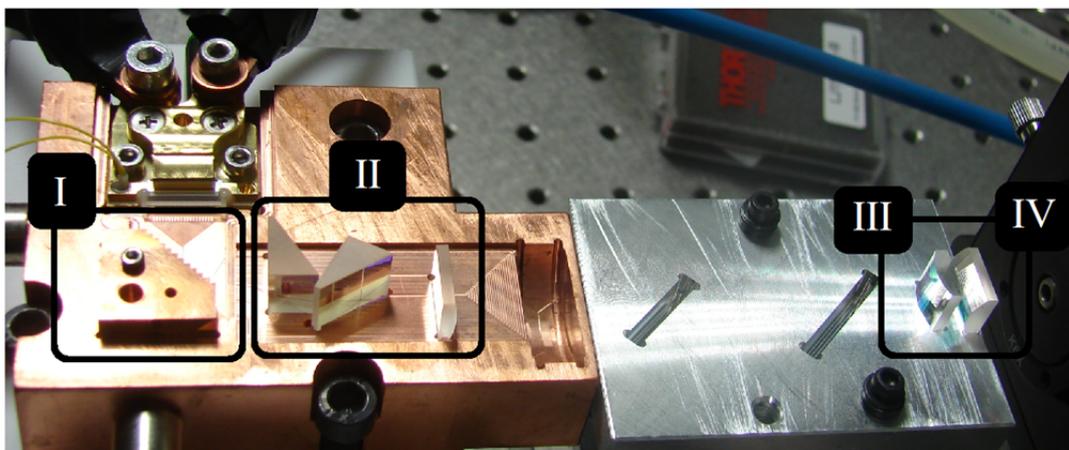


Figura 5. 1: a) Esquema y vista del modelo de ZEMAX®; b) Montaje experimental del sistema óptico de acoplamiento de una barra de diodos a fibra óptica

A continuación se presenta la caracterización experimental del haz láser en las diferentes etapas del conformado del haz (Figura 5. 1a). Para ello se han empleado diferentes equipos de caracterización descritos en el Anexo I. Los resultados en cada una de las etapas son comparados con los obtenidos a través del modelo óptico presentando en el Capítulo 4.

### **I) Escala de espejos**

La Figura 5. 2 muestra las distribuciones de irradiancia experimentales obtenidas a una distancia  $D=176.5\text{mm}$  del sistema de escala de espejos. Dichas distribuciones han sido obtenidas para corrientes de inyección en los diodos de 11A (Figura 5. 2a), 13A (Figura 5. 2b), 16A (Figura 5. 2c) y 18A (Figura 5. 2d), correspondientes a potencias de emisión de 1.3W, 3.5W, 7W y 10W respectivamente. Para cada una de dichas potencias se representa la irradiancia en 2D, 3D y su perfil de irradiancia a lo largo de los ejes SA y FA. Del análisis de dichos perfiles se puede observar:

- La presencia de 11 líneas de irradiancia a lo largo del FA procedentes de cada una de las escalas de espejos para corrientes de inyección  $I \geq 13\text{A}$ . Para  $I = 11\text{A}$  no están presentes la totalidad de las líneas, lo cual puede ser consecuencia de una emisión inhomogénea de los diodos emisores dada la proximidad a la corriente umbral de emisión láser ( $\approx 10\text{A}$ ).
- Las líneas de irradiancia más externas en el FA presentan un corte, posiblemente originado por el hecho de que los espejos más externos no son totalmente iluminados por todo el cono de luz del SA [5. 1].
- La anchura de las líneas de irradiancia a lo largo del FA se uniformiza con el aumento de la corriente inyectada en los diodos. Además, los perfiles de irradiancia 2D muestran, al menos de manera cualitativa, un aumento significativo de la densidad de potencia en las líneas de irradiancia a medida que aumenta la corriente inyectada en los diodos.

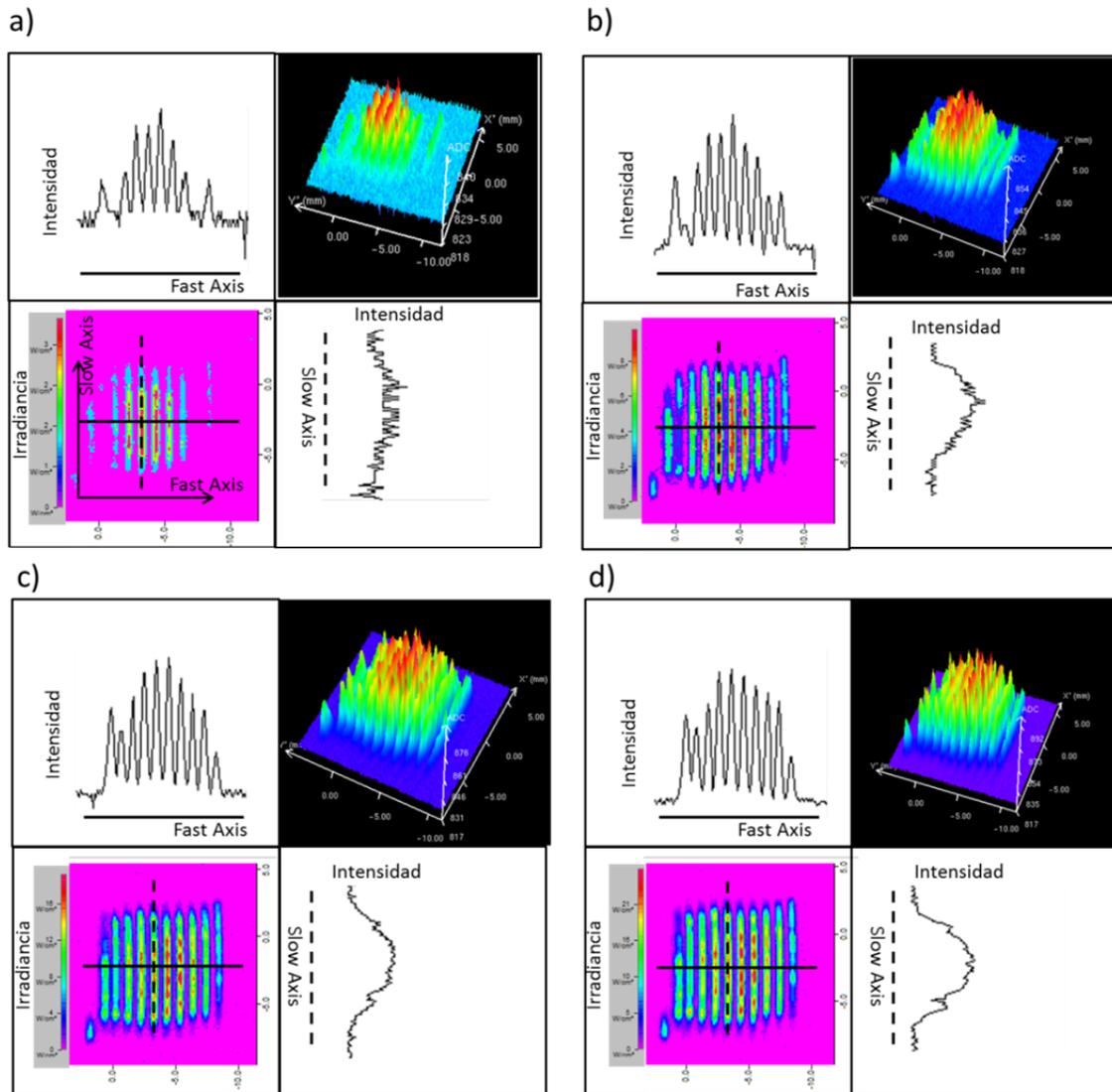


Figura 5. 2: Distribuciones de irradiancia medidas a  $D=176.5\text{mm}$  tras el sistema de escala de espejos para intensidades de corriente a) 11A; b) 13A; c) 16A; d) 18A.

Las Figura 5. 3a) y Figura 5. 3b) muestran con mayor grado de detalle la evolución del perfil de irradiancia con la corriente de inyección de los diodos a lo largo de los ejes FA y SA respectivamente para las diferentes corrientes utilizadas.

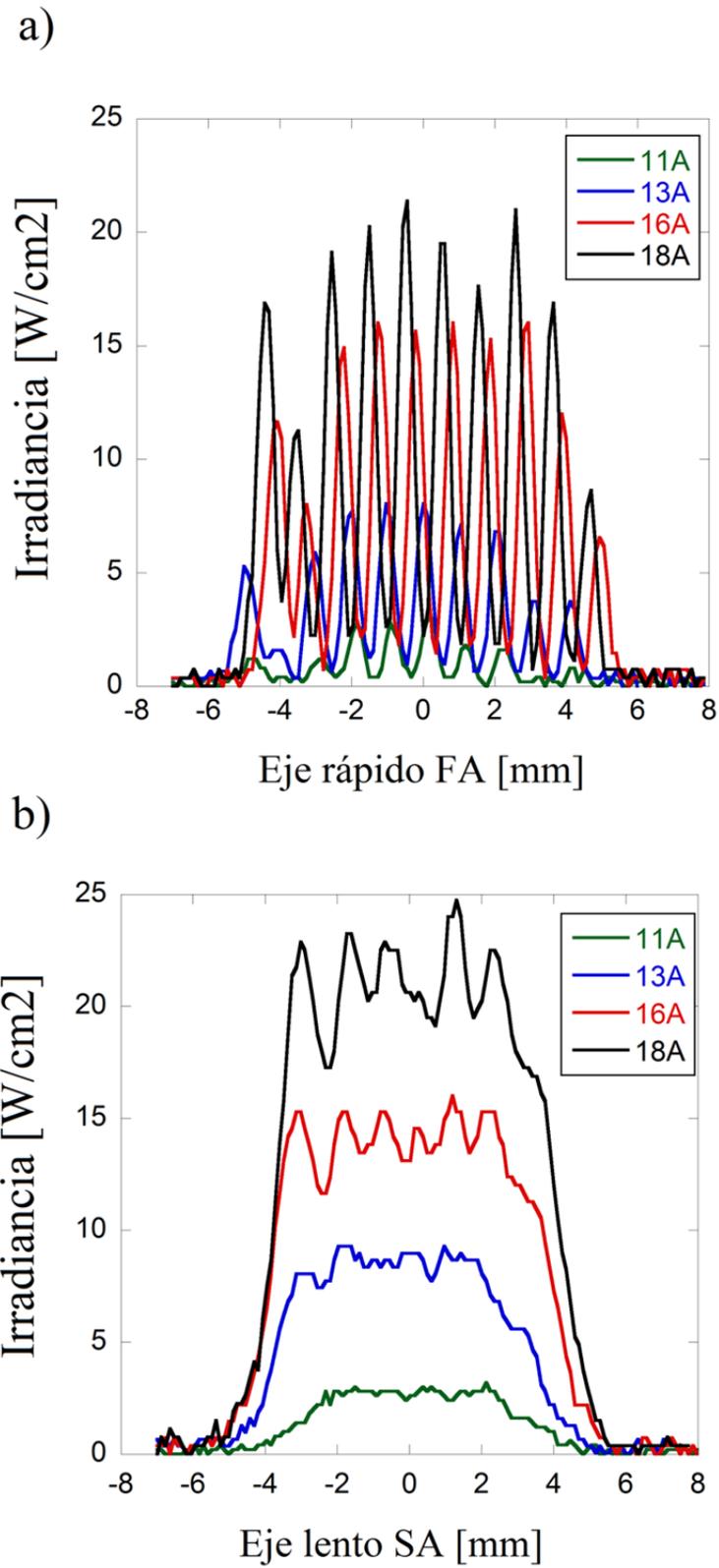


Figura 5. 3: Comparación de los perfiles de irradiancia obtenidos de manera experimental tras el sistema de escalas de espejos a lo largo de los ejes a) FA; b) SA.

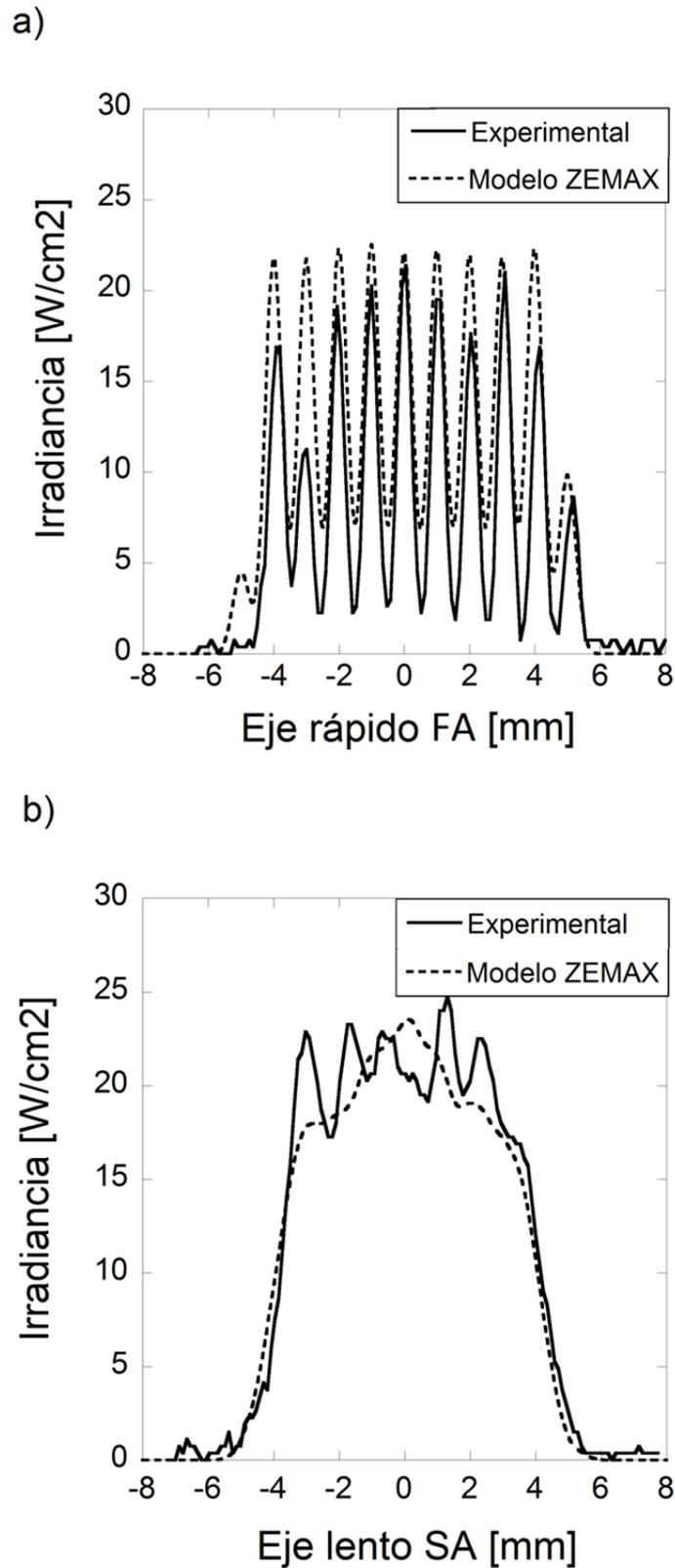
## *Desarrollo Experimental del Prototipo Láser*

A partir de dicha figura es posible extraer las siguientes consideraciones:

- Existe un aumento de la irradiancia pico proporcional al aumento en la potencia de emisión para cada una de las curvas (SA y FA).
- Las anchuras de las curvas de irradiancia a lo largo del FA apenas sufren variación significativa con el aumento de la intensidad de corriente. Sin embargo, dicha dependencia sí es observada en las distribuciones de irradiancia a lo largo del SA. En este último caso se observa que la anchura espacial del perfil de irradiancia para intensidad de corriente de 18A (10W) presenta un incremento en torno al 11% con respecto al radio encontrado para una corriente de inyección de emisión 11A (1.3W). Este resultado está en acuerdo con resultados de estudios previos [5. 2, 5. 3, 5. 4] en los que se pone de manifiesto el aumento de la divergencia en el SA a medida que aumenta la corriente de inyección en los diodos.
- En la distribución a lo largo del FA pueden observarse 10 picos de irradiancia correspondientes a cada una de las líneas identificadas en las representaciones 2D y 3D (Figura 5. 2). En este caso aparecen 10 picos y no 11 puesto que el perfil de irradiancia representado corresponde a la parte central de la distribución.
- En la Figura 5. 2a) puede apreciarse, para las distintas potencias de emisión, la presencia de dos picos con un valor de irradiancia significativamente menor al resto. El correspondiente a la posición  $FA \approx -3.5\text{mm}$  puede ser consecuencia de una emisión no homogénea de todos los diodos que componen la barra. Por otro lado, el pico de irradiancia situado en  $FA \approx \pm 5\text{mm}$  procede de uno de los espejos externos por lo que, es posible que la totalidad de la radiación que emerge de la barra de diodos en la dirección del SA no llegue a ser colectada por dichos espejos. El ajuste de la distancia entre la fuente láser y la escala de espejos fue obtenido en el modelo (Capítulo 4) bajo la restricción de que la totalidad de los espejos (en la dirección del SA) fuesen iluminados por la radiación láser y así alcanzar el máximo grado de simetrización (ec.4.6).

Respecto al acuerdo modelo óptico/numérico - experimento, la Figura 5. 4 presenta una comparativa de la distribución de irradiancia obtenida experimentalmente (Figura 5. 3) y mediante el modelo óptico a lo largo de los ejes SA y FA (Figura 4. 9). Es importante tener en cuenta que en el modelo óptico presentado en el Capítulo 4 no se ha estudiado la variación del ángulo de emisión en el SA con la potencia de emisión. En dicho modelo, el ángulo de emisión en el SA ha sido ajustado para la máxima potencia de emisión a la que se ha caracterizado el haz,  $P=10W$ , correspondiente a una corriente de inyección de 18A (Figura 5. 3). Por lo tanto, los perfiles de irradiancia presentados en la Figura 5. 4 corresponden a una potencia de emisión de la barra de diodos de 10W. Del análisis de dicha comparativa se desprende que:

- Las anchuras de los perfiles de irradiancia a lo largo de ambos ejes presentan una alta concordancia.
- Se observan discrepancias en los valores pico de la irradiancia a lo largo del FA proporcionados por el modelo y los obtenidos experimentalmente. El perfil experimental presenta variaciones como consecuencia de la posible emisión no homogénea de los diodos que componen la barra. En cambio, en el modelo óptico/numérico todos los diodos han sido diseñados con las mismas características de emisión.
- La anchura del perfil de irradiancia encontrada experimentalmente a lo largo del SA (Figura 5. 4b) presenta una alta concordancia con el resultado obtenido del modelo. Sin embargo, se observan ligeras discrepancias en la zona central del perfil. Dichas desviaciones pueden ser consecuencia de la no consideración en el modelo óptico de las inhomogeneidades en la emisión de los diodos (*sonrisa o smile*) que sí están presentes experimentalmente [5. 3].



## II) Prismas anamórficos + colimación SA

La caracterización de la irradiancia del haz tras el conjunto prismas anamórficos + colimación SA se presenta en la Figura 5. 5. Dicha medida ha sido realizada a una distancia  $D'=90\text{mm}$  de la lente de colimación SA LJ1402L1B para una corriente de inyección en los diodos de 13A, correspondiente a una potencia de emisión de 3.5W. El equipo de caracterización utilizado fue el analizador de haz *BeamMonitor60 Primes* [Anexo I]. Dicha figura muestra la irradiancia 2D, 3D y el perfil de intensidad a lo largo de los ejes SA y FA. En dichos perfiles se observa la aparición de cinco líneas de irradiancia a lo largo del SA, dos de las cuales poseen niveles de intensidad más altos.

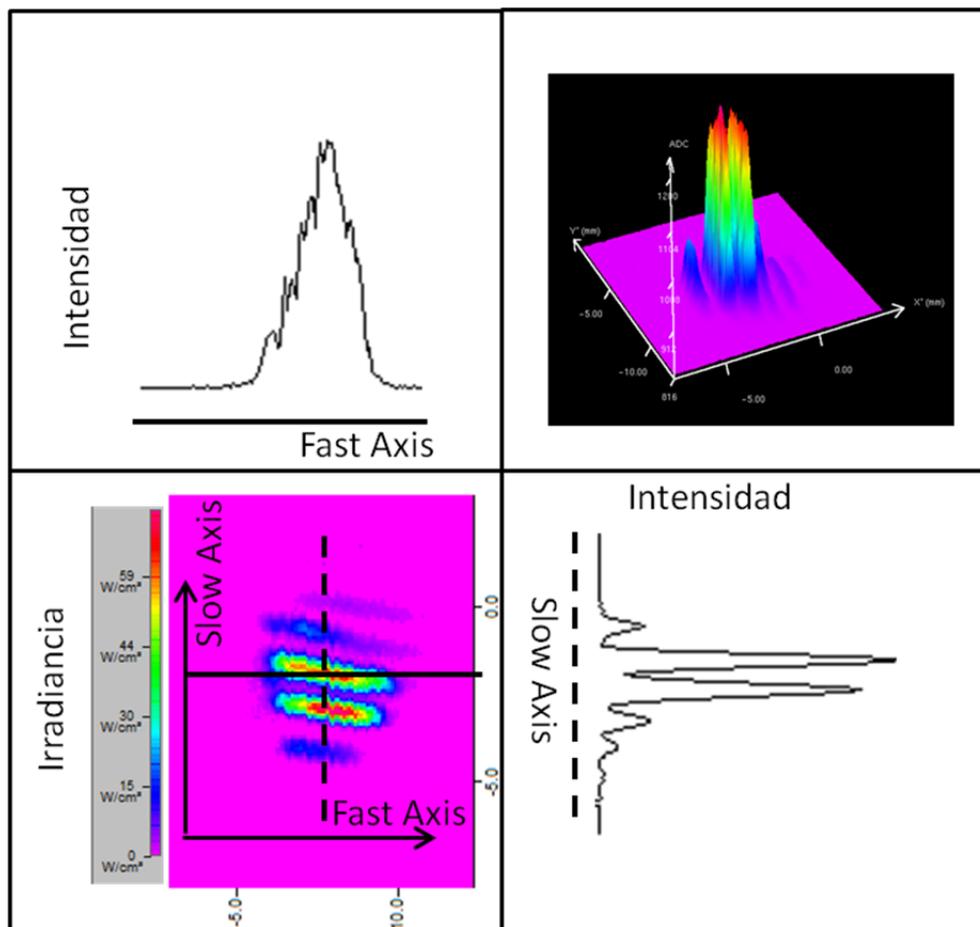
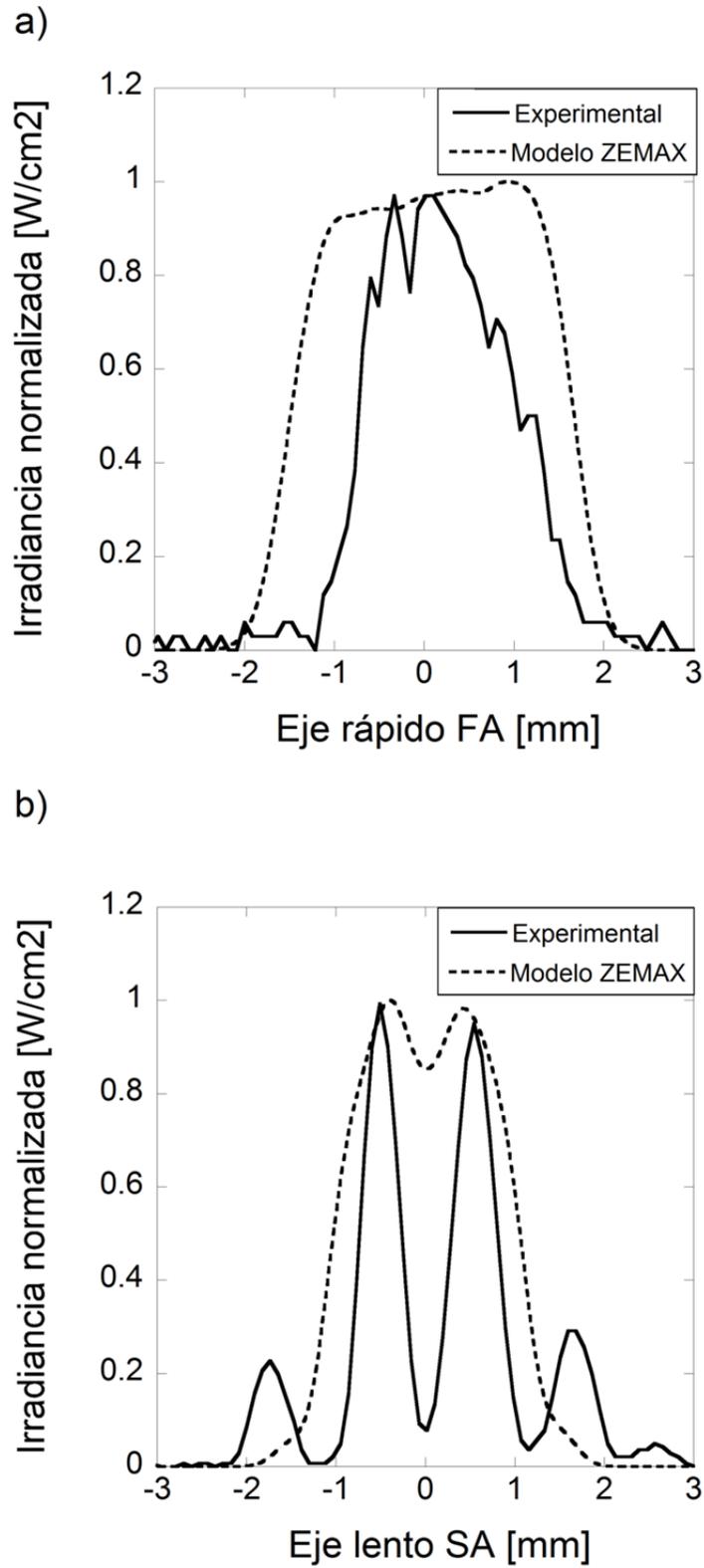


Figura 5. 5: Distribución de irradiancia medida a  $D'=90\text{mm}$  tras el sistema prismas anamórficos + colimación SA a una intensidad de corriente  $I=13\text{A}$ .

Las Figura 5. 6 a) y b) presentan la comparativa de los perfiles de intensidad obtenidos experimentalmente y mediante el modelo óptico/numérica (ZEMAX®) a lo largo de los ejes FA y SA respectivamente. En términos generales se observa un acuerdo razonable en cuanto a la forma de la distribución de irradiancia. En la Figura 5. 6 a) es posible observar que la

## *Desarrollo Experimental del Prototipo Láser*

anchura del perfil de irradiancia proporcionada por el modelo es ligeramente superior a la medida experimentalmente. La anterior discrepancia puede ser explicada en base al desalineamiento de las líneas de irradiancia obtenido experimentalmente (Figura 5. 5). Dicho desalineamiento conlleva una medida de la anchura experimental inferior a la real. En el caso del SA (Figura 5. 6b) las discrepancias en la anchura de las líneas de irradiancia puede aparecer como consecuencia de no considerar en el modelo la dependencia de la divergencia de emisión con la corriente de inyección en los diodos.



### III) Sistema de enfoque

El siguiente paso en el proceso de caracterización es la obtención de la cáustica de focalización proporcionada por el sistema de enfoque. Dicho sistema está constituido por dos lentes cilíndricas que llevan a cabo el proceso de enfoque en el SA y FA de manera independiente. La cáustica proporciona una estimación de la calidad del haz láser y por lo tanto de la viabilidad de acoplar dicha radiación a las fibras ópticas consideradas.

Teniendo en cuenta que la calidad del haz láser presenta una dependencia con la potencia de emisión de los diodos [5. 2, 5. 4, 5. 5], la caracterización ha sido llevada a cabo en un intervalo de potencias cuyo valor máximo depende del umbral de daño del equipo de caracterización utilizado: analizador de haz *BeamMaster7 Coherent* [Anexo I] y de las características de atenuación de los filtros ópticos empleados. Por ello, tras el sistema de colimación se han posicionado una serie de filtros ópticos. En base a las densidades de potencia máximas de trabajo, longitud de onda y propiedades de reflexión y transmisión de los filtros disponibles en el mercado, se han escogido los siguientes elementos ópticos:

- Ventana de zafiro: coeficientes de reflexión y transmisión  $R=25\%$  y  $T=75\%$  respectivamente.
- Filtro metálico de densidad neutra ND-200-25M. Posee una densidad óptica  $OD=2$  ( $OD$ , del inglés *Optical Density*). La transmisión ( $T$ ) del filtro es calculada a partir de

$$T(\%) = 10^{-OD} \quad (5.1)$$

En base a la atenuación proporcionada por ambos filtros, para un haz láser de potencia  $P_0$  el haz resultante de la reflexión en la ventana de zafiro posee una potencia  $P=0.25P_0$  (Figura 5. 7a). Cuando dicho haz atraviesa el filtro ND-200-25M la potencia del haz incidente ( $0.25P_0$ ) es atenuada hasta  $0.0025P_0$ . Teniendo en cuenta esta atenuación, el rango de valores de la cintura del haz ( $\approx 400\mu\text{m}$ ) y el daño umbral del equipo de caracterización, el rango de potencias de emisión considerado para la caracterización de la cáustica ha sido  $P \in [0-10] \text{ W}$ .

Estos dos elementos, que han sido utilizados para realizar la caracterización del haz, han sido eliminados en el diseño del prototipo final.

Las Figura 5. 7 a) y b) presentan, respectivamente, el esquema de funcionamiento y el montaje experimental del sistema utilizado para llevar a cabo la caracterización de la cáustica a las potencias ópticas máximas admisibles por el equipo.

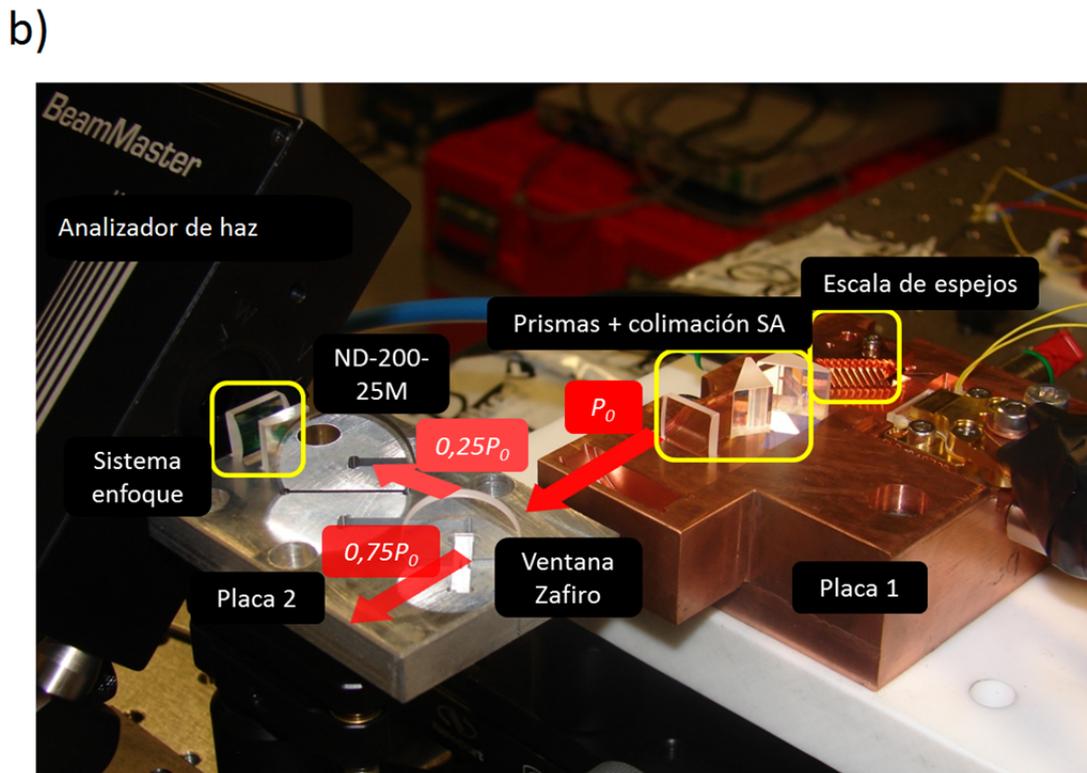
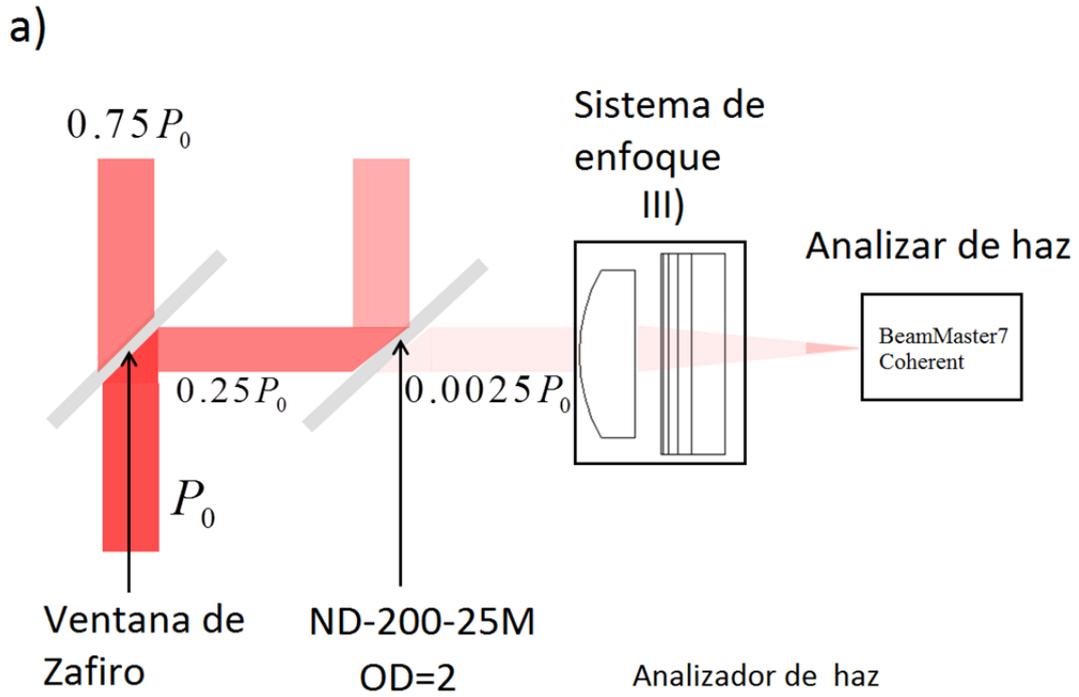


Figura 5. 7: a) Esquema de funcionamiento; b) Montaje experimental del sistema óptico para la caracterización de la cáustica de focalización a diferentes potencias.

## *Desarrollo Experimental del Prototipo Láser*

En la Figura 5. 7b) es posible identificar el empleo de dos plataformas independientes donde se localizan los diferentes componentes ópticos. Por un lado, la barra de diodos láser junto con los componentes ópticos de conformado del haz (sistemas I y II) se encuentran posicionados en una placa de cobre dentro de la cual se integra el circuito de refrigeración termoeléctrico (Placa 1). Por otro lado, los filtros ópticos junto con el sistema de focalización se encuentran posicionados sobre una placa de Aluminio (Placa 2). Esta configuración requiere una regulación en el posicionamiento entre ambos sistemas tanto en altura como en desplazamiento lateral. Dicho sistema de regulación se ha logrado mediante la combinación de una plataforma con desplazamiento horizontal [NT55-022 Edmund] acoplado a una plataforma con regulación vertical [NT66-497]. Adicionalmente, el analizador de haces es situado sobre una plataforma con desplazamiento micrométrico mediante la que se lleva a cabo el posicionamiento preciso a lo largo del eje de propagación del haz y así obtener el radio del haz en los diferentes puntos de la cáustica. Dicho montaje será detallado en la sección 5.2.1.1 donde se describirá la parte mecánica del desarrollo experimental del prototipo láser.

La Figura 5. 8a) presenta la cáustica experimental de focalización para una potencia de emisión de la barra de diodos de 10W. El radio corresponde al valor en el que la curva de irradiancia cae un factor  $e^{-2}$  de su máximo. El posicionamiento de las lentes cilíndricas corresponde al proporcionado por el modelo óptico de conformado del haz para el acoplamiento a fibra de una barra de diodos presentado en la sección 4.1.2 (Figura 4. 22).

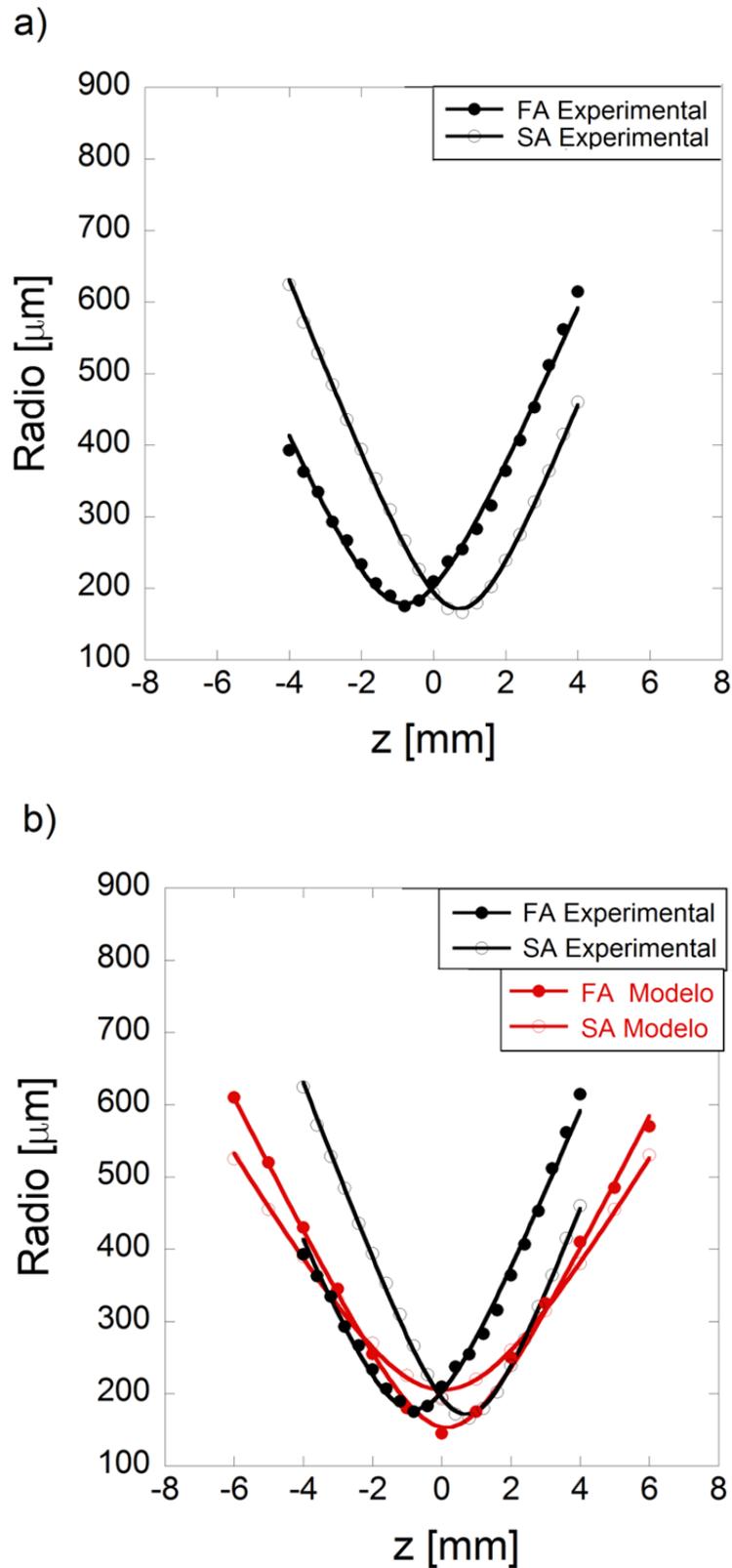


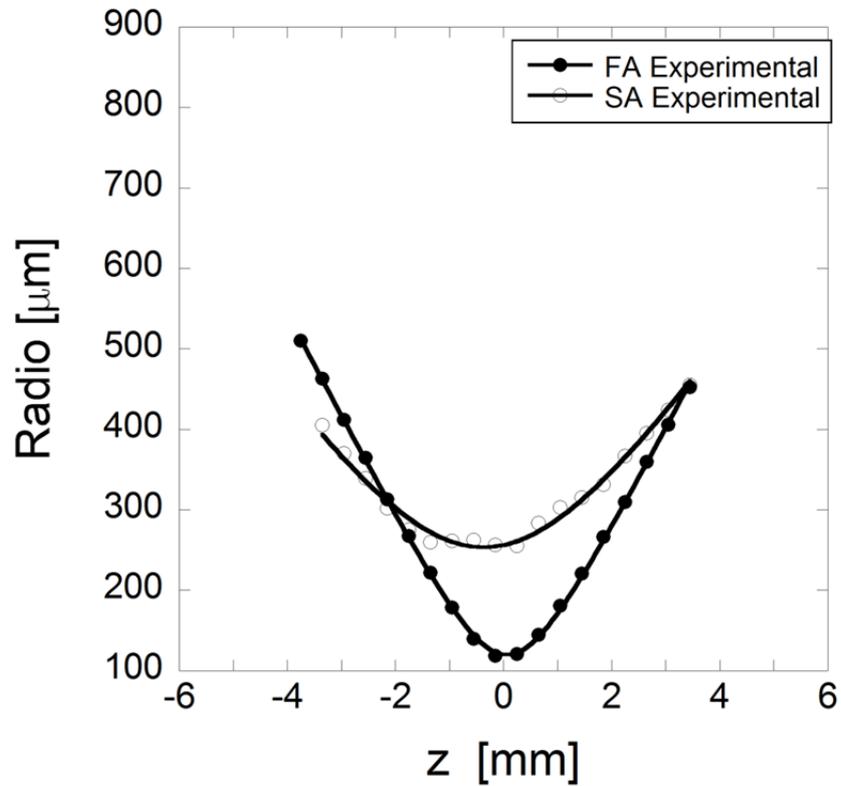
Figura 5. 8: a) Cústica de focalización de una barra de diodos para una potencia emisión de 10W; b) Comparativa modelo-experimento de la cústica de focalización.

## Desarrollo Experimental del Prototipo Láser

El primer resultado significativo es el notable astigmatismo existente entre los dos ejes de propagación:  $|\Delta z_0| = |(z_0)_{FA} - (z_0)_{SA}| = 1.53 \pm 0.02 \text{ mm}$ . La Figura 5. 8b) presenta la comparativa de las cáusticas de focalización a lo largo de los ejes SA y FA obtenidas a partir del modelo y de manera experimental. Como puede observarse, las cáusticas obtenidas experimentalmente presentan una cierta desviación con respecto a las obtenidas mediante el modelo óptico. El origen de dicha desviación puede ser consecuencia de una discrepancia en los valores reales y modelados de algunos de los parámetros que definen la emisión de los diodos láser. Los parámetros angular ( $G_x$ ) y espacial ( $H_x$ ) supergaussianos han sido introducidos en el modelo en base a referencias bibliográficas [5. 6] de fuentes similares y no ajustados experimentalmente. Dichos parámetros rigen el comportamiento del perfil del haz en campo lejano, hecho que podría explicar la discrepancia encontrada entre los resultados experimentales y numéricos. Con el fin de reducir el astigmatismo encontrado experimentalmente se ha procedido al ajuste experimental de la distancia entre las lentes cilíndricas que componen el sistema de focalización en base al valor de  $|\Delta z_0|$  encontrado.

La Figura 5. 9a) muestra las cáusticas de focalización a lo largo de los ejes SA y FA encontradas tras el ajuste de  $|\Delta z_0|$  para un potencia de emisión de 10W. Como puede observarse, el astigmatismo ha sido reducido hasta  $|\Delta z_0| = 0.42 \pm 0.04 \text{ mm}$ , algo más de la tercera parte con respecto a los resultados encontrados antes del ajuste experimental. Sin embargo, se ha aumentado la asimetría en la cintura del haz. La Figura 5. 9b) presenta los perfiles 2D de irradiancia obtenidos para cinco posiciones diferentes del equipo de caracterización a lo largo del eje de propagación. Es importante resaltar que los diferentes perfiles 2D no poseen las mismas dimensiones ni se encuentran escalados a la misma densidad de potencia máxima. Por otra parte, se observa que la representación 2D de la irradiancia es cuasi-circular en torno al plano focal ( $z=0$ ) pero pierde dicha simetría a lo largo del eje de propagación. Lo anterior es consecuencia de las características de propagación de haces Gaussianos con asimetría tanto en divergencia como en diámetro de haz, tal y como se explicó en el Capítulo 4 (Figura 4. 20).

a)



b)

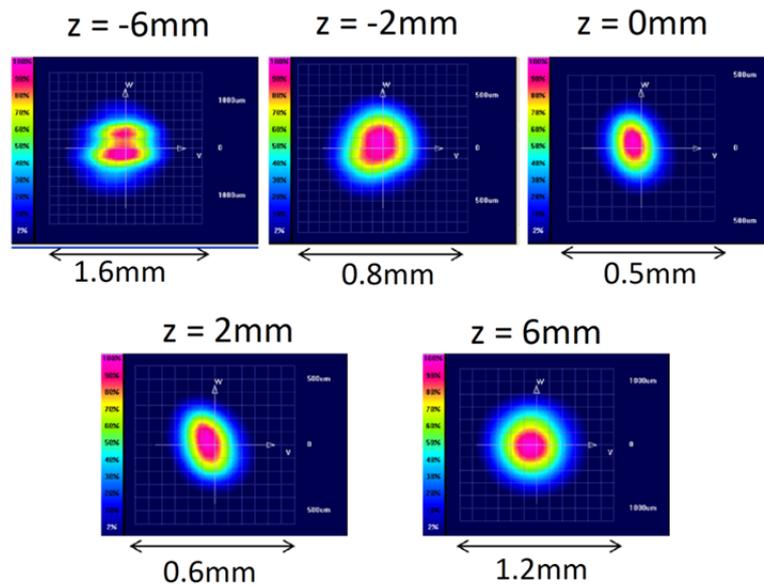


Figura 5. 9: a) Cáustica de focalización a lo largo de FA y SA cuando el haz se propaga en torno a la posición de la cintura del haz; b) Perfiles de irradiancia 2D a lo largo del eje de propagación.

## Desarrollo Experimental del Prototipo Láser

La Tabla 5. 1 muestra los parámetros característicos del haz obtenidos mediante su ajustes a la ec.3.10.

	SA	FA
$W_0$ [ $\mu\text{m}$ ]	$253.6 \pm 3.3$	$120 \pm 1.43$
$z_0$ [mm]	$-0.36 \pm 0.04$	$0.06 \pm 0.01$
$\theta$ [mrad]	$100.6 \pm 1.1$	$130.4 \pm 0.2$
$z_R$ [mm]	$2.52 \pm 0.07$	$0.92 \pm 0.012$
$BPP$ [mm.mrad]	$25.5 \pm 0.7$	$15.7 \pm 0.2$
$BPP_{total}$ [mm.mrad]	$29.9 \pm 0.7$	

Tabla 5. 1: Parámetros característicos de la calidad del haz cuyas cáusticas a los largo de los ejes SA y FA se presentan en la Figura 5. 9a).

Del análisis de los resultados mostrados en la Tabla 5. 1 pueden realizarse las siguientes consideraciones:

- En lo que respecta a la cintura del haz ( $W_0$ ), se aprecia una asimetría entre ambos ejes. La cintura del haz a lo largo del SA es aproximadamente el doble que la encontrada en el FA. Por otro lado, la separación en la posición de la cintura del haz para ambos ejes encontrada es de  $\Delta z_0 = 0.42 \pm 0.03 \text{mm}$ .
- Los ángulos de divergencia en ambos ejes se encuentran por debajo del ángulo crítico ( $\theta_c = 221.54 \text{mrad}$ ) requerido para llevar a cabo un acoplamiento a fibra óptica. Se observa que el ángulo de divergencia encontrado en el FA posee un valor superior al encontrado en el SA.
- El parámetro de calidad del haz ( $BPP$ ) es, en ambos ejes, inferior al de la fibra óptica de parámetros más restrictivos :  

$$BPP_{total} = 29.9 \pm 0.7 \text{mm.mrad} < BPP_{f400\mu\text{m}} = 44.3 \text{mm.mrad} .$$

La Tabla 5. 2 muestra una comparativa de los parámetros de calidad óptica proporcionados por el modelo (Tabla 4. 7) y los obtenidos del prototipo (Tabla 5. 1).

	Modelo		Experimento	
	SA	FA	SA	FA
$W_0$ [ $\mu\text{m}$ ]	$206.2 \pm 5.2$	$157,9 \pm 6$	$253.6 \pm 3.3$	$120 \pm 1.43$
$z_0$ [mm]	$0.14 \pm 0.04$	$0.31 \pm 0.03$	$-0.36 \pm 0.04$	$0.06 \pm 0.01$
$\theta$ [mrad]	$79.0 \pm 0.4$	$94.5 \pm 0.4$	$100.6 \pm 1.1$	$130.4 \pm 0.2$
$z_R$ [mm]	$2.61 \pm 0.08$	$1.67 \pm 0.07$	$2.52 \pm 0.07$	$0.92 \pm 0.012$
$BPP$ [mm.mrad]	$16.3 \pm 0.5$	$14.9 \pm 0.6$	$25.5 \pm 0.7$	$15.7 \pm 0.2$
$BPP_{total}$ [mm.mrad]	$22.1 \pm 0.8$		$29.9 \pm 0.7$	

Tabla 5. 2: Comparativa de los parámetros característicos de las cáusticas obtenidas del modelo de ZEMAX® (Figura 4. 23) y a través de la medida experimental a una potencia de emisión de 10W (Figura 5. 9).

De esta comparativa se desprende que:

- Tanto en los resultados proporcionados por el modelo como los obtenidos experimentalmente, la cintura del haz en el FA presenta radios inferiores a los encontrados en el SA. El haz obtenido experimentalmente posee una mayor asimetría en la cintura del haz con respecto a la asimetría resultante del modelo.
- El desplazamiento en la posición de la cintura del haz entre ambos ejes  $|\Delta z_0|$  es notablemente inferior en el caso experimental. Esta discrepancia entre modelo y experimento puede ser explicada en base al hecho de obtener el ajuste de la posición relativa entre las lentes cilíndricas de focalización de manera experimental.
- En ambos análisis, el ángulo de divergencia toma valores superiores en el FA con respecto al encontrado en el SA. Lo anterior es consecuencia del empleo de una lente cilíndrica de menor focal en el FA ( $f=15\text{mm}$ ) con respecto a la utilizada en el SA (20mm) (Figura 4. 21).
- Finalmente, los resultados experimentales presentan una pérdida de la calidad del haz (valores mayores de  $BPP$ ) con respecto a la predicción proporcionada por el modelo. Esta desviación puede ser consecuencia de la limitación experimental en relación a las precisiones del posicionamiento y alineamiento de los componentes ópticos.

## Desarrollo Experimental del Prototipo Láser

Del análisis previamente realizado podemos concluir que el modelo óptico desarrollado es de gran validez ya que predice el comportamiento y las tendencias de los parámetros de calidad óptica del haz láser tras cada una de las etapas del conformado del haz. Las discrepancias encontradas entre los parámetros de calidad óptica proporcionados por modelo y experimento ponen de manifiesto la importancia de modelar la emisión de la radiación láser en función de la potencia de emisión de la fuente láser. Además, la importancia de aspectos relativos al alineamiento y las distancias entre determinados componentes ópticos han sido puestos de manifiesto.

Una vez realizada la comparativa teórico-experimental de la cáustica de focalización de una barra de diodos se procede a estudiar experimentalmente la dependencia de la calidad del haz con la potencia. El estudio se ha llevado a cabo en el rango de potencias definidos anteriormente:  $P \in [0-10]$  W. La Figura 5. 10 presenta las cáusticas de focalización de una barra de diodos a lo largo del SA (Figura 5. 10a) y FA (Figura 5. 10b) con los parámetros ópticos experimentales fijados de acuerdo a la discusión anterior.

Del análisis de la Figura 5. 10 se desprenden las siguientes consideraciones:

- La cáustica obtenida para potencias de emisión  $P \leq 0.1$ W (de emisión láser) presentan propiedades alejadas de las obtenidas para potencias de emisión dentro  $P \geq 1$ W. Lo anterior puede ser explicado en base al valor de corriente umbral ( $\approx 10$ A) a partir de la cual comienza la emisión estimulada y por lo tanto la emisión de radiación láser.
- Es posible apreciar, tanto en el FA como de manera más acusada en el SA, el cambio en calidad del haz (cintura de haz y ángulo de divergencia) cuando la potencia de emisión es  $P < 1$ W. Para  $P > 1$ W la cintura del haz ( $W_0$ ) y su posición ( $z_0$ ) no presentan variaciones significativas en SA y FA.
- En el caso de la propagación en SA, es posible apreciar un ligero aumento de la pendiente de las cáusticas (ángulo de divergencia) a medida que aumenta la potencia de emisión de la barra de diodos. Lo anterior puede ser explicado en base al aumento del ángulo de divergencia de emisión en el SA (Figura 5. 3b) a medida que aumenta la potencia óptica de emisión [5. 2, 5. 3, 5. 4].

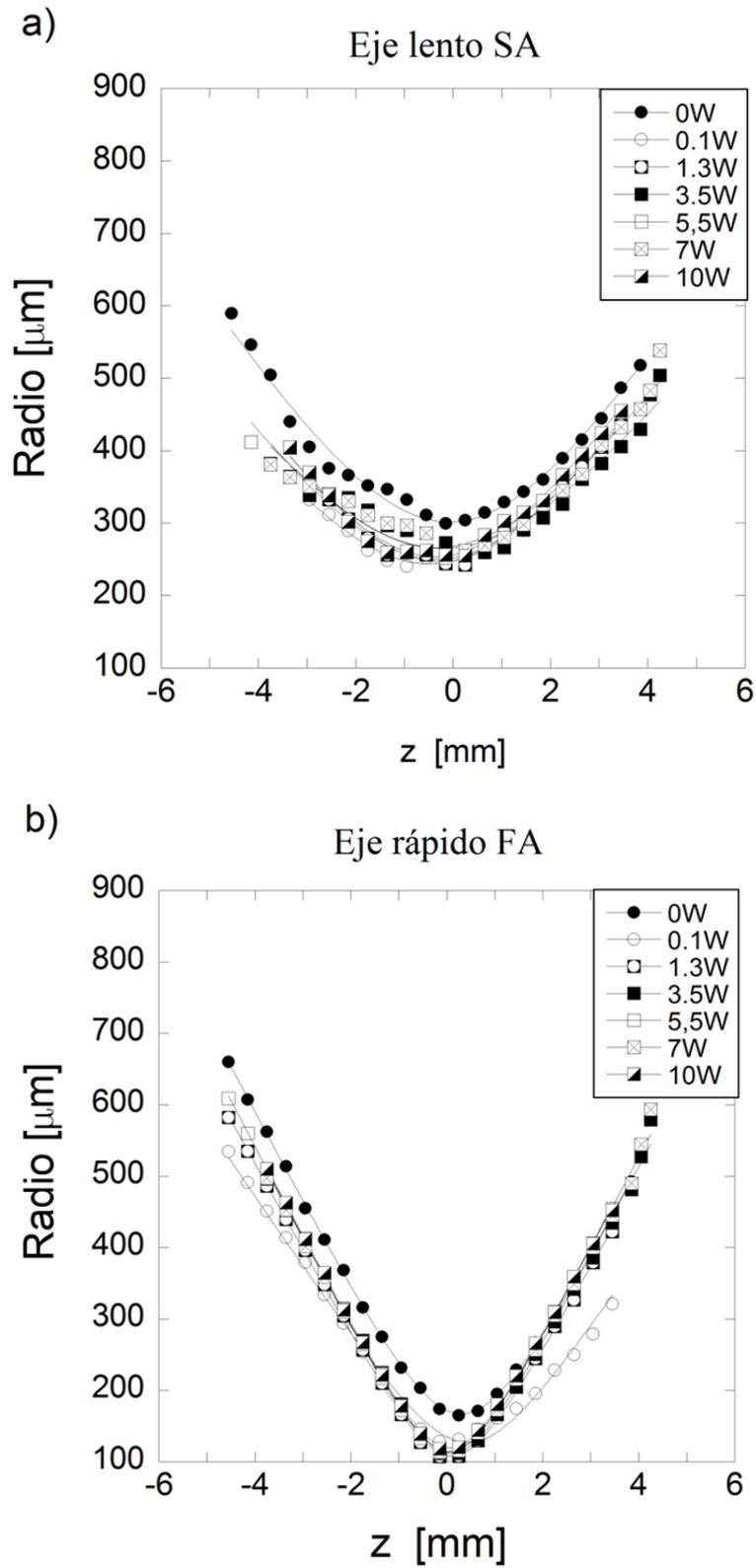


Figura 5. 10: Cáusticas de focalización de una barra de diodos emitiendo a diferentes potencias medidas a lo largo del eje a) lento (SA); b) rápido (FA).

## Desarrollo Experimental del Prototipo Láser

La Figura 5. 11 muestra un análisis detallado de la evolución de la calidad del haz con el aumento de potencia. En el inicio de la emisión láser el haz muestra un BPP en torno a 40mm.mrad (baja calidad del haz) como consecuencia de la transición a la emisión umbral láser ( $\approx 11A$ , emisión LED). Posteriormente el BPP se estabiliza en torno a 27mm.mrad comenzando a sufrir un ligero incremento para una potencia de emisión de 10W. Dicho resultado está en acuerdo con los resultados encontrados para fuentes de diodos láser similares [5. 2, 5. 3, 5. 4]. Dichos trabajos prueban un aumento de la divergencia de emisión en el SA y por tanto, un aumento en el BPP para intensidades de corriente un 25% superiores a la corriente umbral de la fuente. En nuestro caso el aumento en el valor del BPP debe ocurrir en torno a 14A. Por tanto, la Figura 5. 11 no muestra el rango de potencias de emisión a partir del cual se produce un aumento en el valor del BPP y por tanto, un empeoramiento de la calidad del haz.

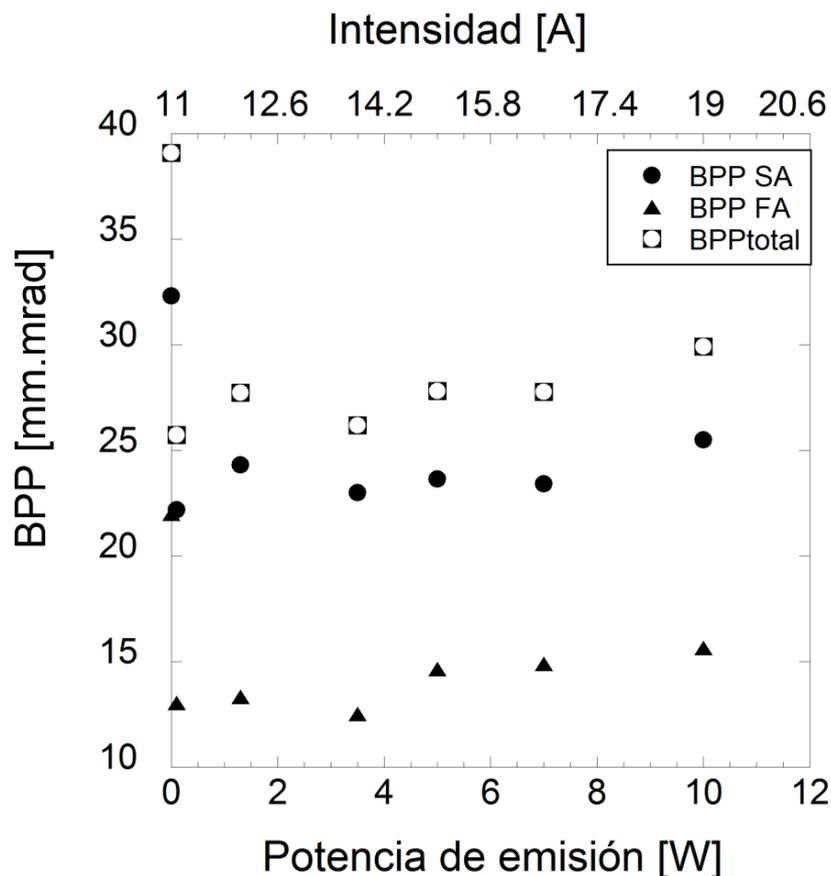


Figura 5. 11: Comportamiento de la calidad del haz (BPP) para diferentes valores de la potencia de emisión.

### 5.1.2 Eficiencia del sistema óptico y del acoplamiento a fibra óptica

Junto con el estudio de la calidad del haz es especialmente relevante estudiar las pérdidas de potencia presentes a lo largo de cada uno de los componentes ópticos así como las que tienen lugar en el acoplamiento a la fibra óptica. Dichas pérdidas determinarán la potencia máxima disponible en nuestro prototipo láser. La Figura 5. 12 presenta las potencias encontradas desde la emisión de la fuente láser hasta la entrada en fibra óptica en función de la intensidad de corriente inyectada en la barra de diodos. Se observa que las mayores pérdidas tienen lugar tras la fuente láser y su reflexión en la escala de espejos.

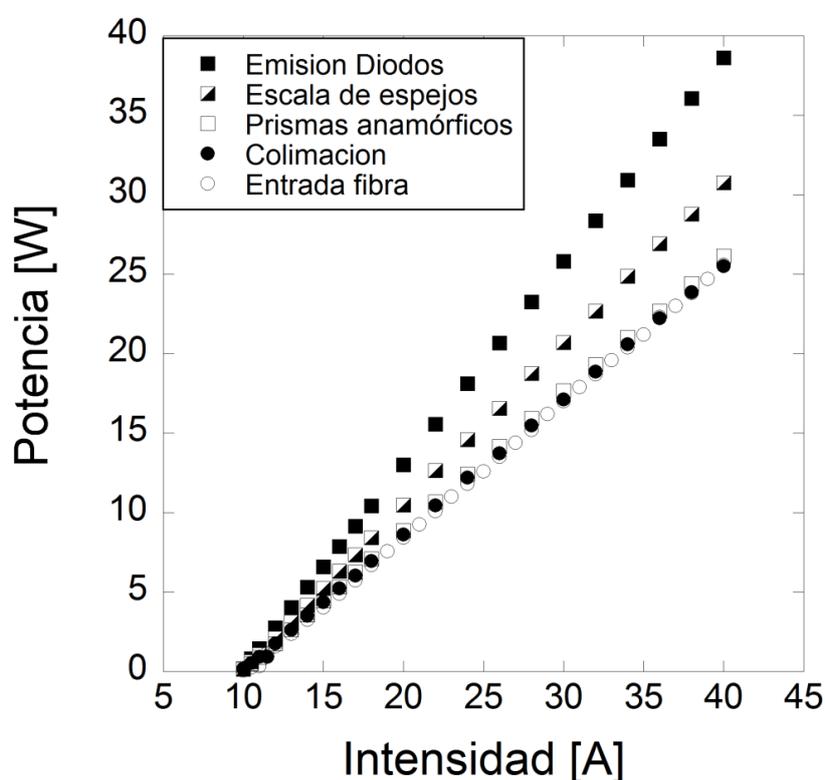


Figura 5. 12: Potencias ópticas registradas después de cada uno de los componentes ópticos que constituyen el prototipo láser.

La Tabla 5. 3 detalla las pérdidas de potencia registradas en cada uno de los componentes ópticos. Dichas pérdidas son calculadas a través del cociente de pendientes de las rectas de ajuste presentadas en la Figura 5. 12. Asimismo se muestra la eficiencia acumulativa a lo largo del sistema, definida como el porcentaje de potencia tras cada uno de los componentes ópticos con respecto a la potencia de emisión de la barra de diodos.

	Pérdidas por elemento [%]	Eficiencia acumulativa [%]
Barra diodos		100
Escala de espejos	19.8	80.2
Prismas anamórficos	15	68.0
Colimación	2	66.5
Sistema de enfoque	0.8	66.4
Fibra óptica 600 $\mu$ m /400 $\mu$ m	16 / 26	56.2/49.8

Tabla 5. 3: Resumen de las pérdidas de potencia óptica en cada elemento óptico y eficiencia acumulativa resultante.

Los resultados presentados en la Tabla 5. 3 permiten realizar el siguiente análisis:

- La mayor pérdida de potencia se produce en el sistema de escala de espejos. Una de las razones que limita la eficiencia de este sistema es el uso de espejos de cobre para los que la reflectancia se encuentra limitada en torno al 95%. Adicionalmente, la presencia de efectos de difracción en los bordes de cada uno de los espejos implica un aumento de las pérdidas de potencia en dicho componente óptico [5.7]. Por otro lado, tal y como se discutió con anterioridad, es posible asociar un porcentaje de pérdidas de potencia al hecho de que parte de la radiación incidente es la escala de espejos no llegue a ser reflectada por los espejos más externos. Lo anterior es consecuencia de un valor ligeramente elevado de la distancia fuente-escala de espejos y el aumento que sufre la divergencia en la emisión del SA con el aumento de potencia.
- La pareja de prismas anamórficos produce unas pérdidas en torno al 15%, en su mayor parte debidas a reflexiones múltiples producidas en las diferentes superficies de los prismas.
- Las mínimas pérdidas son registradas en las lentes plano-convexas, tanto de colimación como las pertenecientes al sistema de enfoque. De acuerdo con las especificaciones del fabricante [Thorlabs] la reflectividad en cada una de las lentes es  $R < 0.5\%$  para la longitud de onda de trabajo ( $\lambda=808\text{nm}$ ). Por tanto, las pérdidas encontradas en las lentes de focalización guardan acuerdo con sus especificaciones. Sin embargo, las pérdidas en la lente de colimación son mayores que las esperadas. Este hecho puede ser explicado en base a las

dimensiones del haz colimado, ya que son cercanas a la máxima superficie efectiva de la lente utilizada. Lo anterior puede dar lugar a que los rayos marginales se encuentren fuera del tratamiento de óptica paraxial y por tanto, se vean afectados por aberración esférica.

La Figura 5. 13 presenta las potencias ópticas ( $P_1$ ) registradas tras el sistema de enfoque (sin fibra óptica) así como las potencias encontradas tras el guiado por fibra óptica ( $P_2$ ) en función de la intensidad de corriente de inyección de la barra de diodos láser. A partir de dichos valores la eficiencia de acoplamiento a fibra ha sido calculada mediante

$$\varepsilon(\%) = \left( 1 - \frac{P_1 - P_2}{P_1} \right) \times 100. \quad (5.3)$$

Como puede observarse, esta representación se realiza en función de la intensidad de corriente (y no de la potencia de emisión de la fuente) puesto que es el parámetro cuyo valor es posible ajustar en el dispositivo experimental. La relación entre la intensidad de corriente inyectada en las barras de diodos y la potencia óptica de emisión fue mostrada en la Figura 4. 1.

Los acoplamientos a las fibras de 600 $\mu\text{m}$  y 400 $\mu\text{m}$  presentan unas eficiencias en torno a 84% y 74% respectivamente para una intensidad de corriente  $I > 20\text{A}$ .

La eficiencia en el acoplamiento, en el caso de la fibra óptica de  $d_{fibra}=600\mu\text{m}$ , permanece prácticamente constante con la intensidad de corriente mientras que, en el caso de la fibra de  $d_{fibra}=400\mu\text{m}$ , la eficiencia experimenta una leve caída para corrientes de inyección con intensidad  $I > 15\text{A}$ . Lo anterior puede explicarse en base a que, aunque en ambos casos el valor del parámetro de calidad del haz láser es inferior al impuesto por la fibra más restrictiva ( $BPP_{f400\mu\text{m}} = 44.3\text{mm.mrad}$ , Tabla 4. 3), la cintura del haz en el SA para  $10\text{W}/I=18\text{A}$  (Tabla 5. 1) presenta valores ligeramente superiores al diámetro de dicha fibra. Por tanto, si para  $I=18\text{A}$  nos encontramos en torno a los valores críticos para el acoplamiento a la fibra de 400 $\mu\text{m}$  de diámetro, tiene sentido encontrar una ligera caída en la eficiencia para mayores corrientes de inyección.

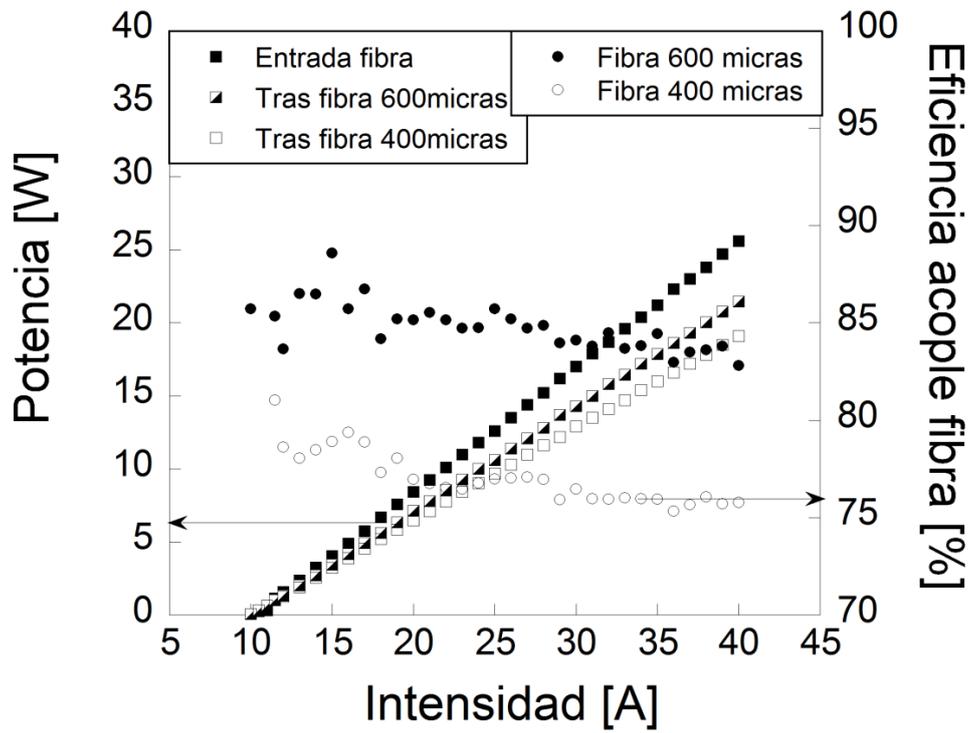


Figura 5. 13: Potencias ópticas de salida y eficiencias de acoplamiento de una barra de diodos a fibras de 600 y 400 $\mu$ m de diámetro, ambas con NA=0.22.

## **5.2 Acoplamiento a fibra de dos barras de diodos láser**

Dado que los valores de potencia proporcionados por una única barra de diodos no proporcionan potencia suficiente para la soldadura de una amplia gama de termoplásticos, el siguiente paso es aumentar la potencia de salida del prototipo láser. Para ello se ha llevado a cabo el montaje del sistema óptico de acoplamiento a fibra de dos barras de diodos láser JOLD-50-CPBN-1L mediante un bplexado por polarización. Dicho desarrollo experimental se ha realizado de acuerdo con el modelo presentado en la sección 4.2.1 del Capítulo 4.

Dado que esta sección tiene por objeto mostrar el desarrollo experimental del prototipo final, en primer lugar se describen los aspectos más relevantes en cuanto su desarrollo mecánico, eléctrico y termoeléctrico (sección 5.2.1). Posteriormente se describe en detalle el desarrollo del prototipo láser desde el punto de vista óptico: caracterización del grado de polarización de las fuentes láser, caracterización de la cáustica de focalización en fibra y eficiencia del sistema (sección 5.2.2).

### **5.2.1 Desarrollo mecánico, eléctrico y termoeléctrico del prototipo láser**

Desde un punto de vista general, las tareas del desarrollo experimental del prototipo se enmarcan en diferentes disciplinas: mecánica, eléctrica, termoeléctrica y óptica. En primer lugar se presenta una breve descripción de los aspectos mecánicos, eléctricos y termoeléctricos más relevantes encontrados durante el desarrollo del prototipo láser. Posteriormente se describen más en detalle los aspectos relativos al diseño óptico y calidad del haz.

#### **5.2.1.1 Desarrollos eléctrico y mecánico**

En lo relativo al **desarrollo eléctrico** algunos de los aspectos que han requerido especial atención han sido los siguientes:

- Las fuentes láser deben ser aisladas eléctricamente para garantizar la correcta circulación de la corriente entre su ánodo y su cátodo. Para lograrlo, se ha utilizado un aislante eléctrico para aislar el bloque de cobre sobre el que sitúa cada una de las fuentes láser (Figura 5. 14).
- Para dimensionar correctamente los cables eléctricos y los conectores de cobre por los que circula la corriente ha sido necesario tener en cuenta la carga térmica

## Desarrollo Experimental del Prototipo Láser

generada por las intensidades de corriente que alimentan las fuentes láser (Figura 5. 14). Dicha carga térmica repercute directamente en la refrigeración del sistema, ya que un calentamiento excesivo de los conectores de cobre hace inviable la utilización de todo el rango de potencias de emisión de las fuentes láser.

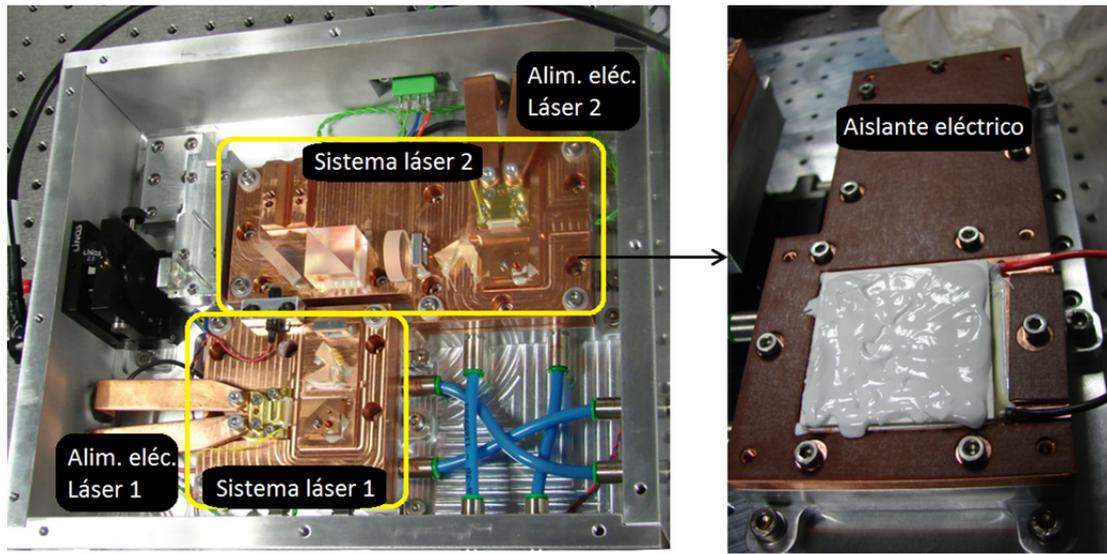


Figura 5. 14: Vista del prototipo láser a nivel laboratorio junto con algunos detalles eléctricos.

En lo que respecta al **desarrollo mecánico** del prototipo, se han fabricado 4 módulos independientes con las correspondientes plataformas de posicionamiento (Figura 5. 15). Dado que uno de los objetivos perseguidos en el bplexado es mantener constante la calidad del haz, un aspecto de especial relevancia es el posicionamiento preciso de los diferentes subsistemas que constituyen el prototipo para conseguir un alineamiento lo más perfecto posible. Para garantizar lo anterior se han empleado cuatro módulos independientes con sistemas de regulación micrométrica (Figura 5. 15): sistema láser 1 y 2, sistema de enfoque y posicionador de fibra óptica.

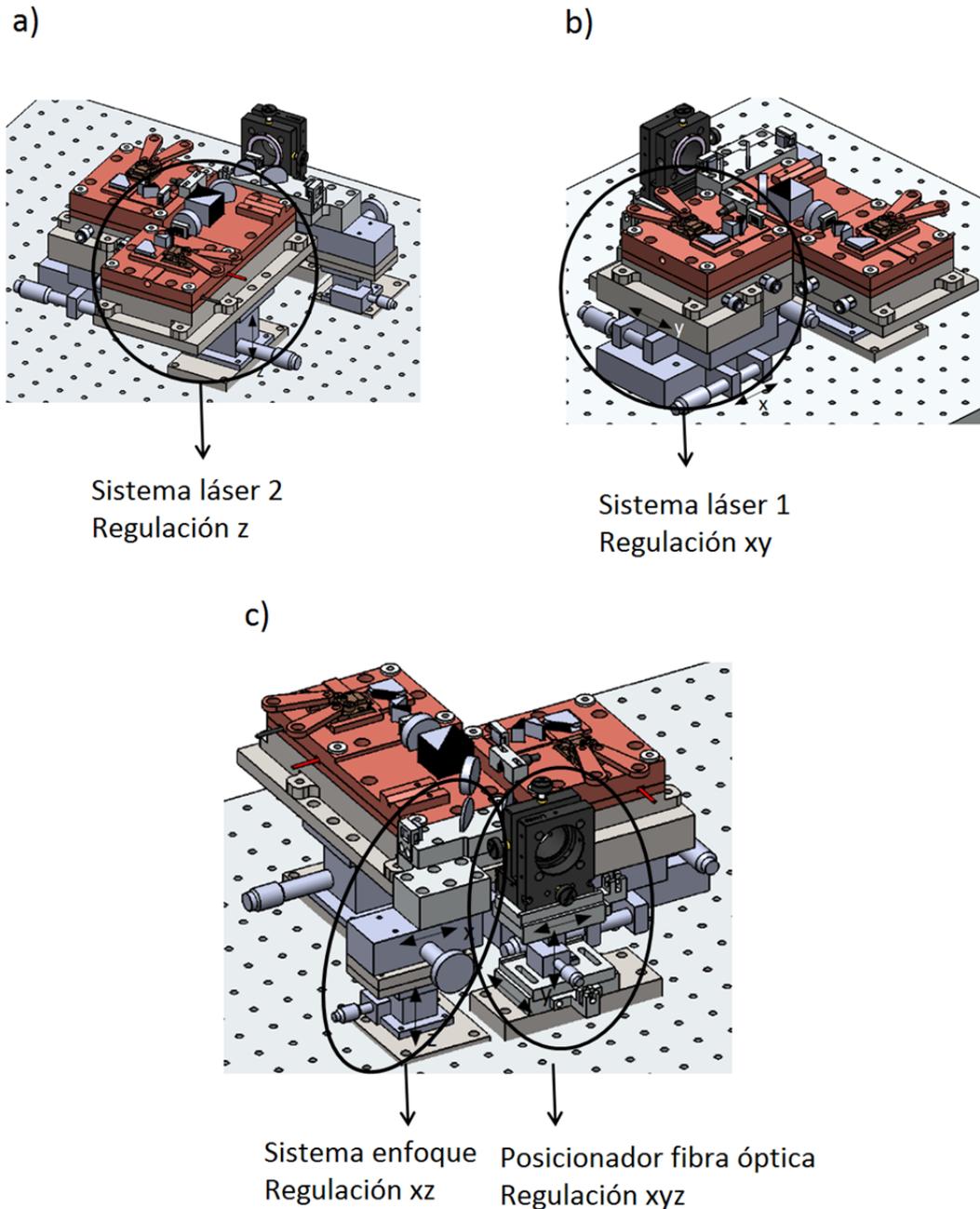


Figura 5. 15: Vista del diseño mecánico del prototipo con los sistemas de posicionamiento considerados para: a) Sistema láser 2; b) Sistema láser 1; c) Sistema de enfoque y posicionador fibra óptica.

### 5.2.1.2 Desarrollo termoeléctrico: sistema de refrigeración

Las fuentes láser consideradas alcanzan eficiencias electro-ópticas cercanas al 50% (Figura 4. 2), lo que supone valores superiores a los proporcionados por las fuentes láser clásicas (láseres de estado sólido). En consecuencia, estas fuentes generan una menor

cantidad de energía en forma de calor. Sin embargo, dicha energía residual es generada en un área muy pequeña ( $\approx \mu\text{m}$ ) donde se establece la unión p-n del material semiconductor. Esto conlleva una importante problemática relativa a la evacuación de altas densidades de flujo calorífico. En el caso de una barra de diodos láser de 50W con una eficiencia electro-óptica del 45% es necesario evacuar una densidad de calor en torno a  $288\text{W}/\text{cm}^2$ . Lo anterior, unido a la variación que presentan los parámetros característicos de emisión de los diodos láser (intensidad de corriente umbral, eficiencia electro-óptica, longitud de onda e incluso propiedades relativas a la polarización) con la temperatura del material semiconductor, confieren al sistema de refrigeración de una alta relevancia dentro del desarrollo del prototipo. Por esta razón, en los últimos años se han llevado a cabo importantes desarrollos de sistemas de refrigeración efectivos y compactos para sistemas de diodos láser de alta potencia [5. 9 - 5. 14].

Dependiendo de la potencia máxima del sistema de diodos láser considerado, existen dos tipos de intercambiadores de calor: activos (*MCCP* del inglés *Micro-Channel Cooled Packages*) o pasivos (*CCP* del inglés *Conduction Cooled Packages*), cuyo principio de funcionamiento es ilustrado esquemáticamente en las Figura 5. 16 a) y b) respectivamente.

Dentro de los intercambiadores de calor activos o *MCCP* es posible encontrar los diseñados en base a micro- o macro-canales, siendo ambos tipos empleados en sistemas de fuentes láser con potencias de emisión por encima de 100W. En este tipo de sistemas de refrigeración el líquido refrigerante fluye inmediatamente debajo del foco generador de calor (Figura 5. 16a). Los últimos desarrollos de intercambiadores de calor activos presentan importantes avances para solventar la problemática que presenta el uso de cobre como material intercambiador de calor [5. 9, 5. 10].

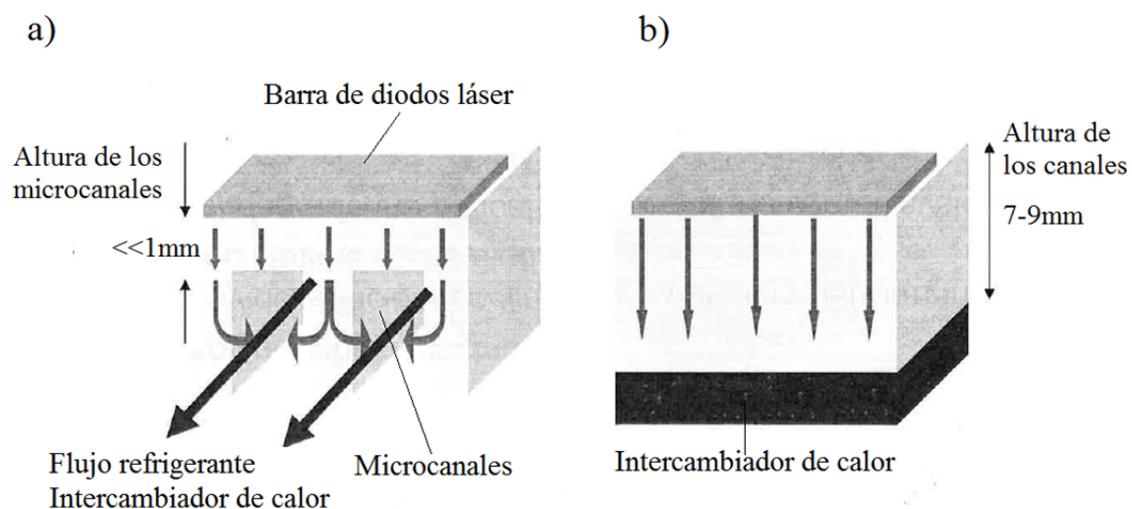


Figura 5. 16: Esquema del funcionamiento del sistema de refrigeración a) activo o MCCP; b) pasivo CCP.

Por otro lado, las barras de diodos con potencias máximas de emisión en torno a 100W son refrigeradas mediante intercambiadores de *calor pasivos* o *CCP*, en los que la evacuación de calor se produce principalmente por conducción (Figura 5. 16b). En estos casos, se utilizan mayores áreas de contacto para realizar el intercambio de calor frente a las utilizadas el caso de la refrigeración activa [5. 11, 5. 12, 5. 9]. Una de las técnicas ampliamente utilizada dentro de este tipo de intercambiadores de calor son los sistemas de refrigeración termoeléctricos (*TEC* del inglés *ThermoElectric Cooling*), que permiten el control de la temperatura de la unión p-n con tiempos de respuesta del orden de milisegundos.

En el caso de las barras de diodos consideradas en este trabajo se ha seleccionado un sistema de refrigeración pasivo termoeléctrico (*TEC*) en base a las siguientes razones:

- El tiempo de respuesta del sistema es del orden de milisegundos lo cual garantiza disponer de la potencia requerida en cada instante del proceso de soldadura.
- Supone un sistema compacto y con un coste de mantenimiento bajo.
- Las fuentes de alimentación de los diodos láser [*Laser Power Supply DPPS 375-50-24, Messtec Power Converter GmbH*] disponen de un sistema de control en lazo cerrado entre la temperatura de la fuente láser y la intensidad de corriente que es necesario aplicar en la *TEC* para mantener la temperatura de la fuente láser en su valor óptimo.

Un intercambiador de calor termoeléctrico (*TEC*) (Figura 5. 17a) consiste en un número  $N$  y  $P$  de elementos conectados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo presentando una estructura tipo “*sandwich*” entre dos placas cerámicas. La refrigeración termoeléctrica está basada en el efecto Peltier [5. 13], mediante el cual se crea una diferencia de temperatura  $\Delta T_{max}$  entre las caras de los dos materiales que forman el elemento Peltier cuando una corriente  $I_{max}$  pasa a través de ellos. Cuando esto ocurre, el calor será absorbido en una de las caras y expulsado por la otra. La unión donde el calor es absorbido se define como “*cara fría*” con temperatura  $T_F$ , mientras que la unión donde el calor es expulsado es definida como “*cara caliente*” con temperatura  $T_C$ . Mediante la agrupación de un número “ $n$ ” de elementos es posible obtener un módulo Peltier capaz de evacuar “ $n$ ” veces más potencia en forma de calor que un único elemento Peltier. Por lo tanto, uno de los puntos más críticos es el correcto dimensionamiento de la célula Peltier en función del flujo calorífico que se precise evacuar. La Figura 5. 17b) presenta esquemáticamente la disposición de un intercambiador *TEC* junto con una fuente generadora de calor donde  $Q_{max}$  (W) representa la máxima potencia que es capaz de disipar el módulo Peltier.

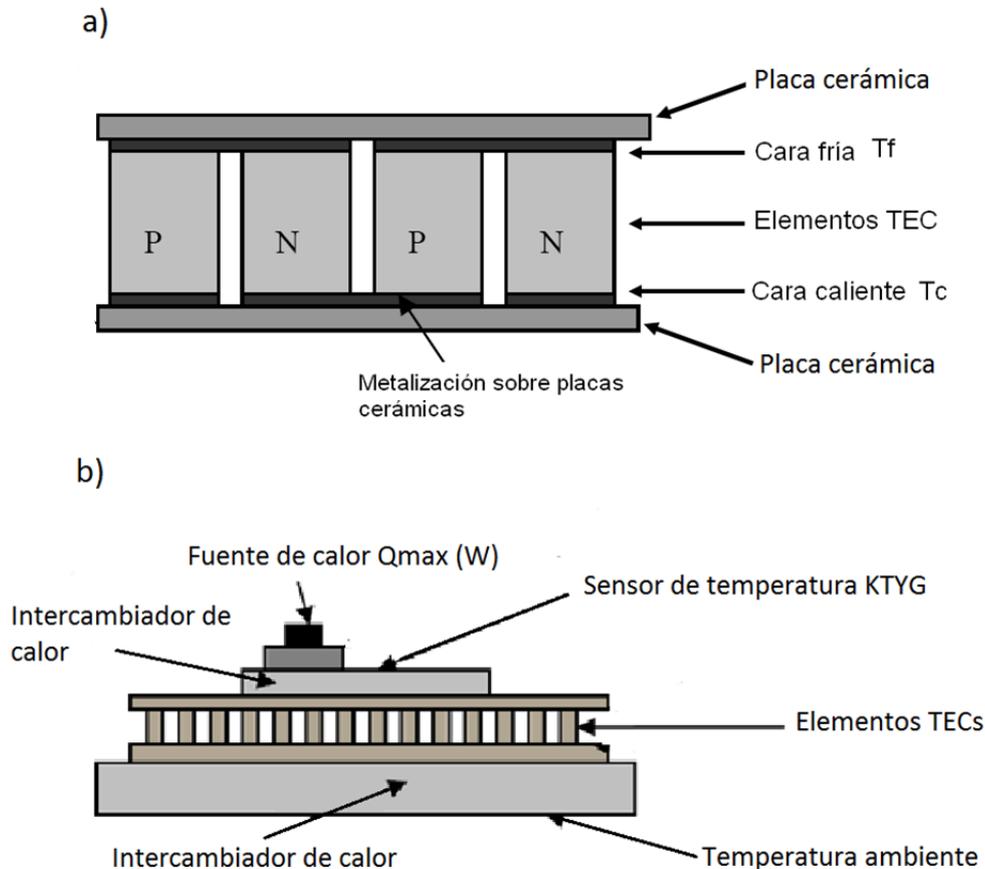


Figura 5. 17: Vista lateral de la estructura típica de a) un intercambiador de calor termoeléctrico TE; b) un intercambiador TEC integrado en un sistema con una fuente generada de calor [5. 15].

Para un valor de intensidad de corriente entre las caras de la célula Peltier la cantidad de calor que es posible evacuar crece a medida que la diferencia de temperaturas entre las caras fría y caliente  $\Delta T \rightarrow 0$ . Por otro lado, cuanto mayor es la intensidad de corriente mayor es la diferencia de temperatura entre las caras del módulo para lograr evacuar la misma cantidad de potencia en forma de calor. En base a lo anterior, se han tenido en cuenta los siguientes aspectos para la elección del módulo Peltier comercial más adecuado a las características del sistema a refrigerar.

- La máxima potencia en forma de calor que genera cada una de las barras de diodos láser es 48W.
- La corriente máxima que suministra la fuente de alimentación para el control del módulo Peltier es de 10A. Dicha corriente es ajustada de manera controlada en función de una señal de temperatura procedente de un punto cercano a la fuente de calor externa (la barra de diodos en nuestro caso).

## Desarrollo Experimental del Prototipo Láser de Diodos

- La cara caliente del módulo Peltier será refrigerada por una enfriadora (Termotek Ag) mediante la cual puede fijarse la temperatura del flujo refrigerante (agua desionizada en nuestro caso) en un rango de 15-30° con caudales de 5l/min.
- Para los ensayos iniciales del sistema de refrigeración se adquirieron dos células Peltier con capacidad para evacuar 58W [ETH-127-14-15-RS, RS-online] y 128W [ET-199-14-11-E, RS-online]. Las pruebas se realizaron en el banco de ensayos presentado de manera esquemática en la Figura 5. 18a) y el correspondiente montaje experimental en la Figura 5. 18b). La fuente láser se encuentra localizada sobre una placa de Cu (cara fría), introduciendo entre ambos elementos una lámina de Indio para garantizar un contacto térmico entre ellos. La cara fría del módulo Peltier es otra placa de cobre en la que se ha realizado un circuito de refrigeración tipo serpentín (Figura 5. 18a) y por donde se hace circular el agua procedente de la enfriadora.

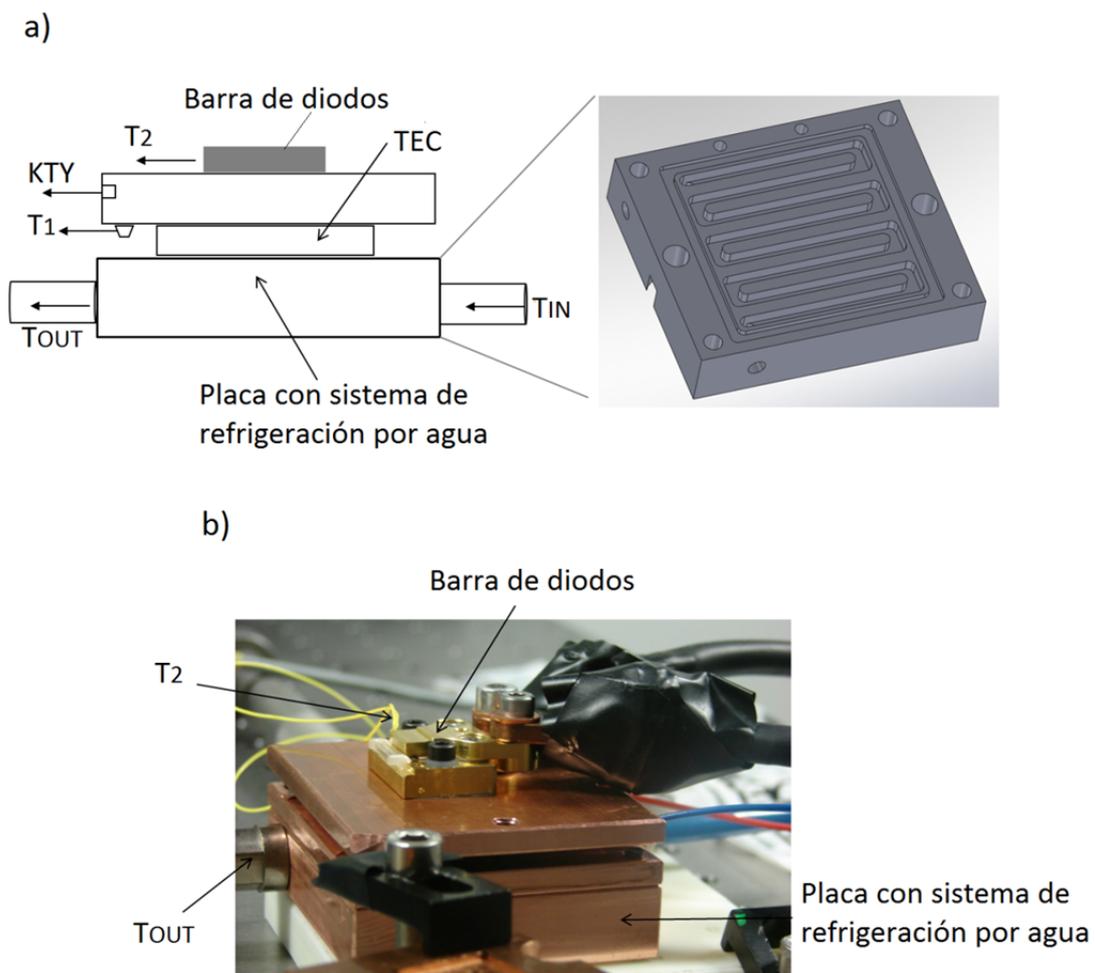


Figura 5. 18: a) Representación esquemática; b) Montaje experimental del banco de ensayos del sistema de refrigeración de las barras de diodos láser mediante células Peltier.

## Desarrollo Experimental del Prototipo Láser

Con el objetivo de analizar el comportamiento del sistema de refrigeración, se instalaron los siguientes sensores de temperatura (Figura 5. 18):

- Sensor de temperatura  $T_1$ : sensor PT100 localizado en la parte más cercana a la cara fría del elemento Peltier.
- Sensor de temperatura  $T_2$ : sensor PT100 que se encuentra localizado en uno de los extremos del alojamiento de la barra de diodos láser. Proporciona la temperatura de funcionamiento del láser y deber encontrarse en el rango de temperaturas 15-30°C para garantizar su óptimo funcionamiento. Esta temperatura es monitorizada en los indicadores digitales de las fuentes de la alimentación de los láseres. Dado que la calibración de las fuentes láser ha sido realizada por el fabricante a  $T_2=22^\circ\text{C}$ , se establecerá dicho valor como su temperatura óptima de funcionamiento.
- Sensor de temperatura KTY: sensor cuyo valor de salida permite controlar la intensidad de corriente de entrada en el módulo Peltier para garantizar una temperatura de funcionamiento del láser de  $T_2=22^\circ\text{C}$ .
- Temperatura del refrigerante  $T_{IN}/T_{OUT}$ : temperaturas del agua desionizada en la entrada y salida del circuito de refrigeración respectivamente.

Los primeros ensayos realizados con los módulos Peltier citados permitieron realizar las siguientes consideraciones:

- La existencia de un buen contacto de toda la superficie cerámica del módulo Peltier con la superficie de cobre es crítica. Por tanto es imprescindible el uso de silicona o pegamentos con una alta conductividad térmica que aislen eléctricamente.
- Los módulos Peltier adquiridos no garantizan la evacuación completa del calor generado por la fuente en todo su rango de operación. Por lo tanto, dichos módulos están infra-dimensionados. Este hecho puede ser explicado en base a la eficiencia de las células Peltier, que se encuentra en torno al 50%. Esto implica que por cada Watio que transfiere genera en torno a 2W. Por lo tanto, la potencia nominal que logra evacuar debería ser tres veces el calor máximo a evacuar. En base a lo anterior, debe seleccionarse una célula Peltier capaz de evacuar un mínimo de 200W.
- Los tiempos de respuesta en el control de temperatura de la sonda KTY son del orden de milisegundos, proporcionando una estabilidad en la temperatura de la fuentes láser en torno a  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ .

- La circulación de corriente a través de los módulos Peltier es necesaria aún sin proporcionar intensidad de corriente a las fuentes láser. Por tanto, debe circular corriente siempre que el sistema eléctrico esté encendido y así mantener el valor consigna de la sonda de temperatura KTY.
- Cuando la intensidad que circula por el módulo Peltier se encuentra por encima del 70% de su valor máximo, el funcionamiento deja de ser óptimo, dando lugar a una deficiente estabilización de la temperatura.

De acuerdo a las conclusiones anteriores, se seleccionó un nuevo módulo Peltier capaz de evacuar una potencia máxima de 340.5W [ETC-288-14-06-E, RS-online]. Con dicho módulo y un montaje similar al mostrado en la Figura 5. 18 se llevaron a cabo los ensayos de control de temperatura de las barras de diodos para una  $T_2=22^\circ\text{C}$  y  $T_{IN}=20^\circ\text{C}$ .

La Figura 5. 19 muestra la temperatura de la barra de diodos láser ( $T_2$ ) y la intensidad de corriente proporcionada al módulo Peltier para todo el rango de intensidades de corriente de funcionamiento de la fuente láser. Puede observarse que la temperatura de la fuentes láser presenta una variación de  $\Delta T_2 \approx 5^\circ\text{C}$  en todo el rango de operación. Esto puede ser consecuencia de la existencia de una diferencia de temperatura no constante entre el valor registrado por la sonda PT100 de la barra de diodos ( $T_2$ ) y el valor de la KTY que realiza el control de temperatura. Dicha diferencia de temperatura aumenta con la intensidad de corriente que es inyectada a la fuente láser.

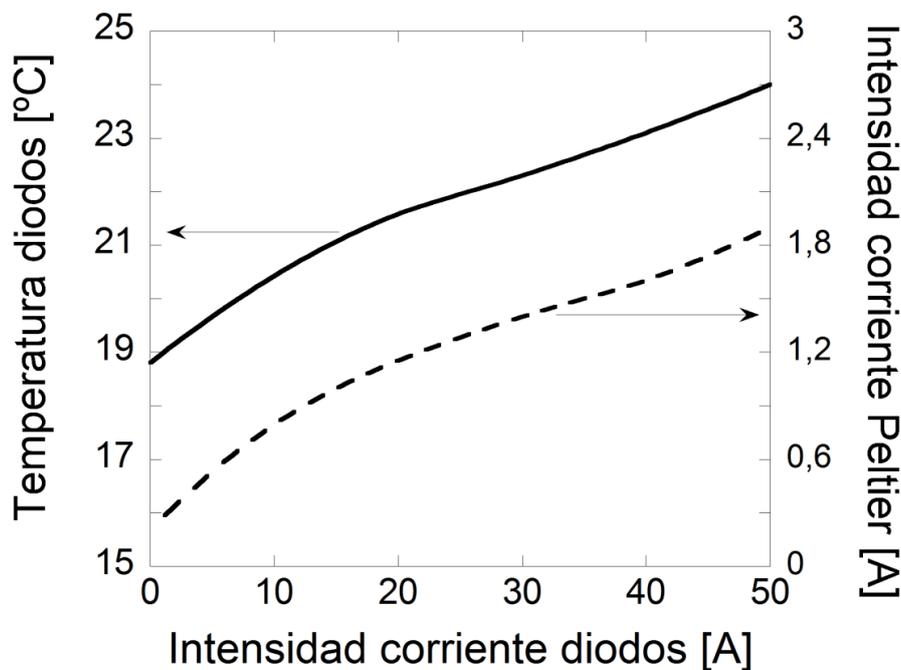


Figura 5. 19: Temperatura de la fuente de diodos láser (línea continua) e intensidad a través del módulo Peltier (línea discontinua) para todo el rango de intensidades de corrientes de la fuente láser.

## Desarrollo Experimental del Prototipo Láser

Una vez confirmada la viabilidad del sistema de refrigeración termoeléctrico, se ha extrapolado dicha configuración al montaje final del prototipo. Para ello se han realizado las siguientes consideraciones:

- El circuito de refrigeración de la cara caliente posee el mismo diseño que el utilizado en el banco de ensayos (Figura 5. 18a), ya que previamente se ha comprobado su correcta capacidad para evacuar el calor disipado en todo el rango de funcionamiento de las fuentes láser.
- Se ha optimizado la posición de los sensores KTY con respecto al área activa de emisión de las barras de diodos láser (Figura 5. 20a) para garantizar una diferencia mínima entre las temperaturas registradas por la KTY y  $T_2$  (Figura 5. 18a).
- Se ha empleado un aislante eléctrico (Figura 5. 20b) para garantizar el aislamiento eléctrico entre las dos caras del módulo Peltier.
- Se ha empleado un elemento conductor térmico para garantizar un eficiente contacto térmico entre las caras del módulo Peltier y las placas de cobre (Figura 5. 20b).

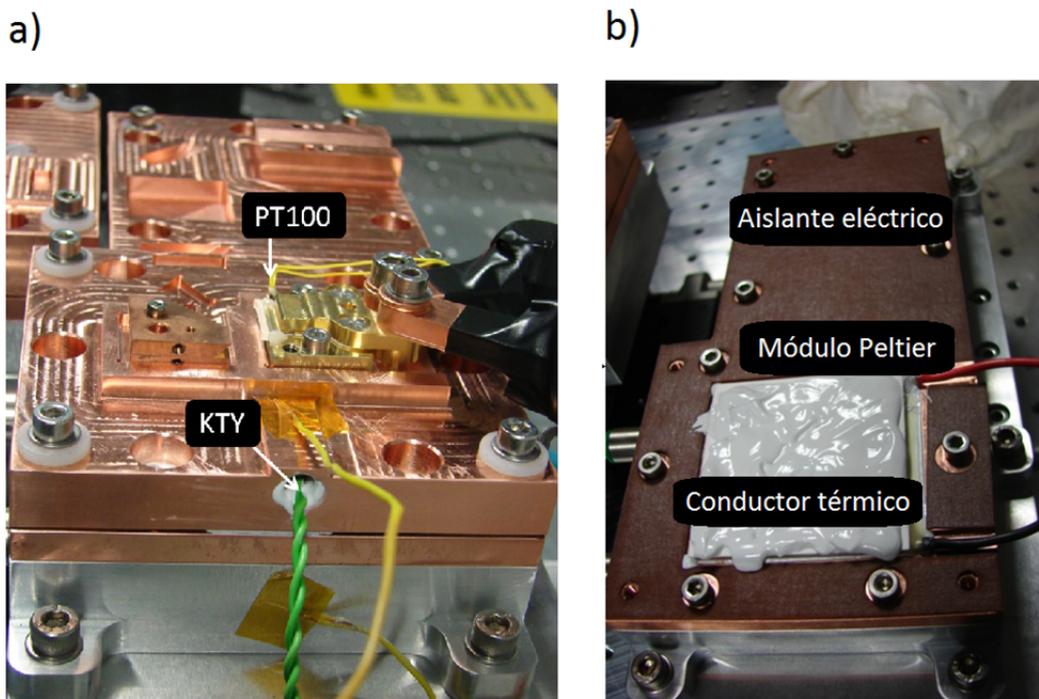


Figura 5. 20: a) Montaje completo del sistema de refrigeración de una de las fuentes del prototipo láser; b) Vista de la parte interior del montaje.

Una vez realizado el montaje de las fuentes láser sobre el sistema de refrigeración desarrollado se ha llevado a cabo su caracterización en términos de temperatura. La Figura 5. 21 muestra la eficiencia electro-óptica de las dos fuentes láser así como la evolución de su temperatura en función de la intensidad de corriente que circula a través de ellas. Su análisis permite extraer las siguientes conclusiones:

- Las temperaturas de las dos fuentes láser se encuentran dentro del rango de funcionamiento óptimo proporcionado por el fabricante 15 - 30°C.
- Las fuentes láser CO\_51778 y CO\_51974 presentan una variación máxima de  $\Delta T \approx 8$  y 6 °C respectivamente en un rango de variación de la intensidad de corriente  $\Delta I = 30A$ . El valor consigna de las sondas KTY ha sido ajustado para que, en ambos casos, la temperatura de la fuente láser para una intensidad de corriente de  $I = 20A$  se encuentre en torno a 22 - 23 °C.

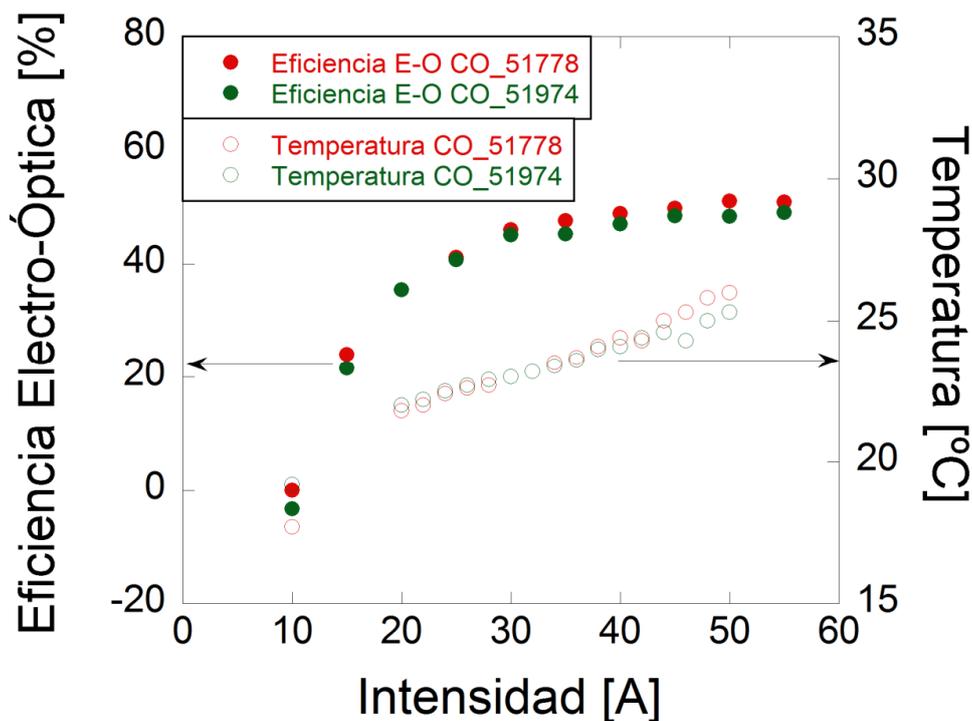


Figura 5. 21: Evolución de la eficiencia electro-óptica y la temperatura de las fuentes láser en función de la intensidad de corriente que circula por ellas.

Adicionalmente, con el fin de disponer de una visión global del comportamiento térmico del sistema desarrollado, se ha analizado el mapa termográfico del sistema en todo el rango de potencias de funcionamiento de las fuentes láser. La Figura 5. 22a) muestra una vista del montaje del prototipo láser junto con cuatro mapas topográficos correspondientes a intensidades de funcionamiento de las fuentes láser de  $I=10, 20, 30$  y  $40A$ . Es importante

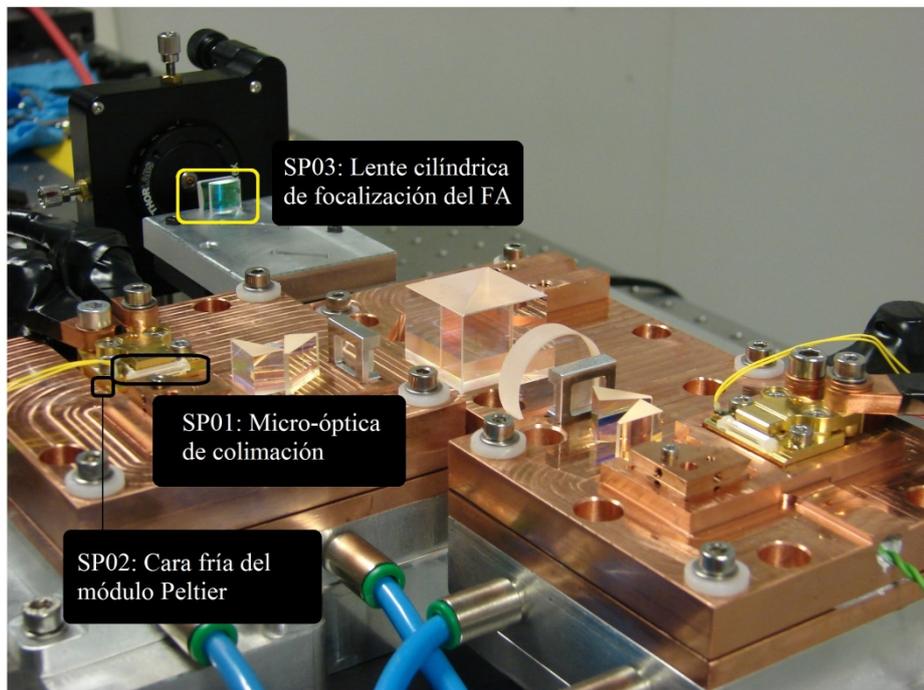
## Desarrollo Experimental del Prototipo Láser

tener en cuenta que, a partir de este análisis, tomaremos como valores representativos los incrementos de temperatura entre diferentes puntos del mapa termográfico y sus tendencias. Los valores absolutos no serán tenidos en cuenta en el análisis termográfico dado que se ha considerado la emisividad del cobre para todo el sistema, quedando sin ajustar las emisividades del resto de componentes.

Con el objetivo de estudiar la tendencia del incremento de la temperatura en función de la intensidad de corriente se han escogido tres puntos diferentes del sistema: micro-óptica de colimación (SP01), parte superior de la “cara fría” del módulo Peltier (SP02) y parte central de la lente cilíndrica para la focalización del FA (SP03).

En las Figura 5. 22 b) c) d) y e) puede observarse como, a medida que aumenta la intensidad de corriente inyectada en los diodos, los componentes ópticos que presentan un mayor incremento de temperatura son la micro-óptica de colimación de ambas fuentes y la entrada a fibra óptica. Lo anterior es consecuencia de las altas densidades de potencia presentes en las dos fases del prototipo láser citadas.

a)



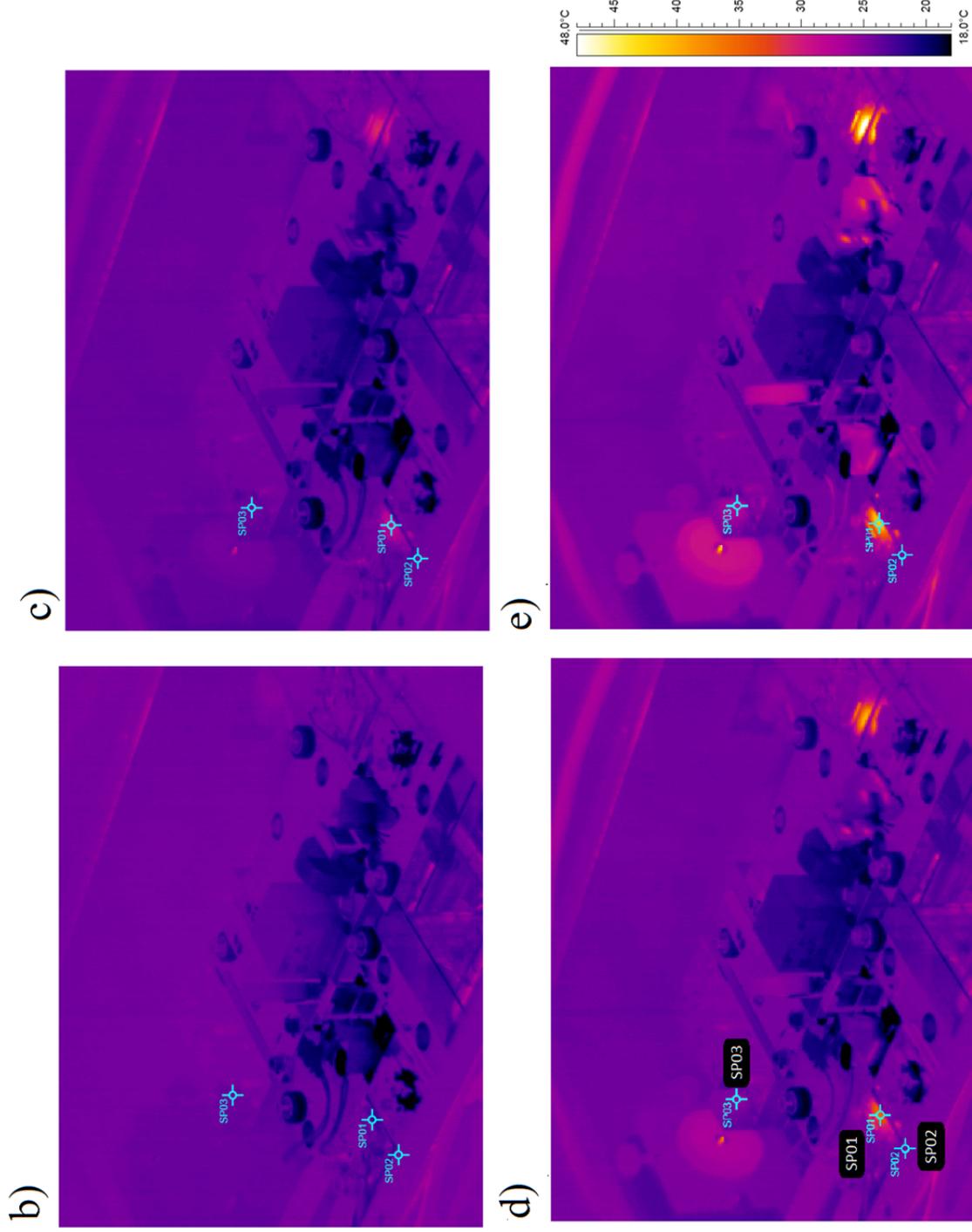


Figura 5. 22: Mapas termográficos del prototipo láser para intensidades de operación de a) 10A; b) 20A; c) 30A; d) 40A.

## Desarrollo Experimental del Prototipo Láser

Las temperaturas en los puntos descritos han sido registradas en todo el rango de intensidades de funcionamiento de las fuentes láser. La Figura 5. 23 muestra la evolución de la diferencia de temperatura ( $\delta T = T_I - T_{I=0}$ ) de los puntos de estudio con la intensidad de corriente inyectada en las fuentes láser. En primer lugar se observa una notable estabilidad en la temperatura de la “cara fría” del módulo Peltier ( $T_{SP02}$ ), lo que confirma el óptimo funcionamiento del sistema de refrigeración desarrollado. Por otro lado, tanto la micro-óptica de colimación ( $T_{SP01}$ ) como el sistema óptico de focalización ( $T_{SP03}$ ) presentan una variación más abrupta de la temperatura con la intensidad de corriente inyectada en las fuentes láser. En particular, dicho efecto es más acusado en el caso de la micro-óptica de colimación de las fuentes láser ( $T_{SP01}$ ). Lo anterior puede dar lugar a variaciones en la posición del plano focal como consecuencia del efecto térmico en los componentes ópticos (*thermal lensing*). Dicho efecto será evaluado en la sección 5.2.2 donde se presentará el análisis de la cáustica y calidad del haz en la focalización a fibra para las diferentes intensidades de corriente de funcionamiento de las barras de diodos láser.

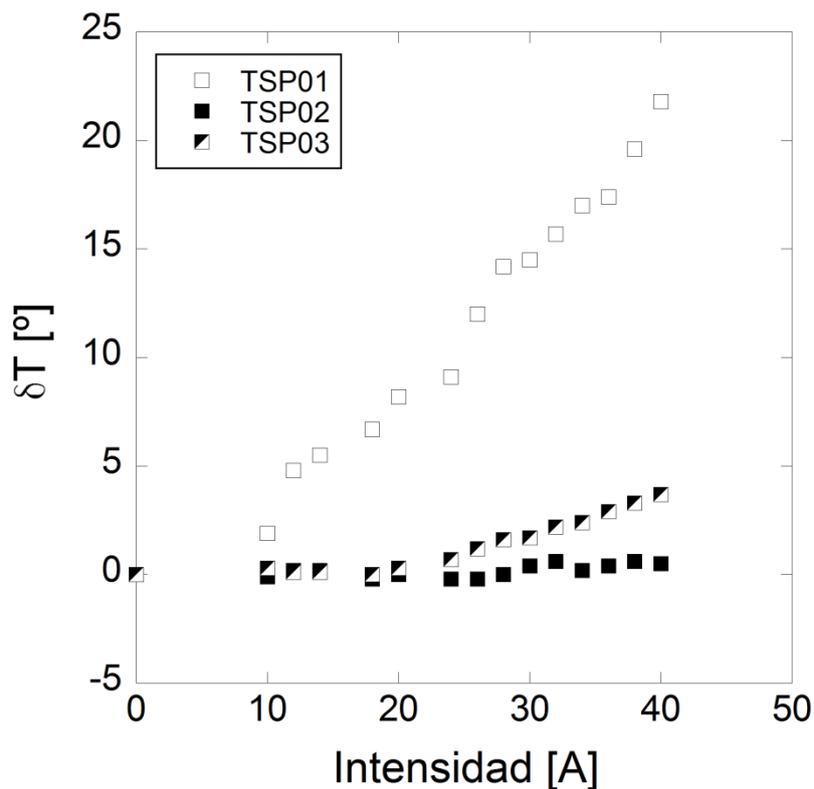


Figura 5. 23: Variación de la temperatura en los puntos señalados en el mapa termográfico (Figura 5. 22) para las diferentes intensidades de funcionamiento de las fuentes láser.

## 5.2.2 Desarrollo óptico

En este apartado se describen los diferentes aspectos relativos al desarrollo óptico del prototipo láser. En primer lugar, y dado que el biplejado de las dos haces se ha llevado a cabo por polarización, se presenta la caracterización del grado de polarización de las mismas (sección 5.2.2.1). En la sección 5.2.2.2 se detalla la caracterización de la cáustica de focalización del haz en fibra y la comparativa con la cáustica de focalización de una única barra de diodos. Dicha comparativa se ha utilizado como referencia para evaluar la calidad del biplejado en términos de conformado del haz. Por último se presenta el análisis de las pérdidas de potencia a lo largo de todo el sistema así como su eficiencia y la comparativa con la eficiencia obtenida en el acoplamiento de una única barra de diodos (sección 5.2.2.3).

### 5.2.2.1 Caracterización del grado de polarización del haz láser

Dado que el biplejado llevado a cabo en el prototipo láser ha sido realizado por polarización, es necesario estudiar el grado de polarización de las fuentes láser. Las barras de diodos láser JOLD-50-CPBN-1L poseen una emisión tal que no existe componente del campo eléctrico en la dirección de propagación, es decir, el modo del campo electromagnético es Transversal Eléctrico (TE). Por tanto, la componente principal del vector campo eléctrico vibra en la dirección del SA de la emisión de la fuente láser. Tal y como se definió en la sección 4.2.1, el grado de polarización (*DoP*) en transmisión es una medida de la aleatoriedad de la polarización en un onda electromagnética [5. 14] y es descrito por

$$DoP = \frac{\bar{I}_x - \bar{I}_z}{\bar{I}_x + \bar{I}_z}. \quad (5.5)$$

Donde  $\bar{I}_x$  representa la intensidad del haz láser correspondiente a la vibración del campo eléctrico  $\vec{E}$  en el plano xz (TE) (Figura 5. 24). Por otro lado,  $\bar{I}_z$  representa la intensidad del haz láser correspondiente a la vibración del campo eléctrico  $\vec{E}$  en el plano yz (Figura 3.14). Por lo tanto, un valor de  $DoP = -1$  implica que el 100% del campo eléctrico se encuentra vibrando el plano yz, mientras con  $DoP = +1$  el 100% del campo eléctrico vibra en el plano xz. Un  $DoP = 0$  indica que, o bien están presentes el mismo número de componentes de cada estado de polarización o el estado de polarización es completamente aleatorio [5. 16, 5. 17].

La Figura 5. 24a muestra el esquema de funcionamiento de un polarizador basado en prismas (de calcita) Glan-Thompson GL10-B (Thorlabs) [5. 18]. Dicho polarizador ha sido utilizado para caracterizar el *DoP* de las barras de diodos láser. En base a lo anterior, la

## Desarrollo Experimental del Prototipo Láser

rotación de 0-360° del polarizador GL10-B junto con la medida de la potencia tras el polarizador (Figura 5. 24b) proporciona los valores de intensidad requeridos para obtener el *DoP* de las fuentes láser.

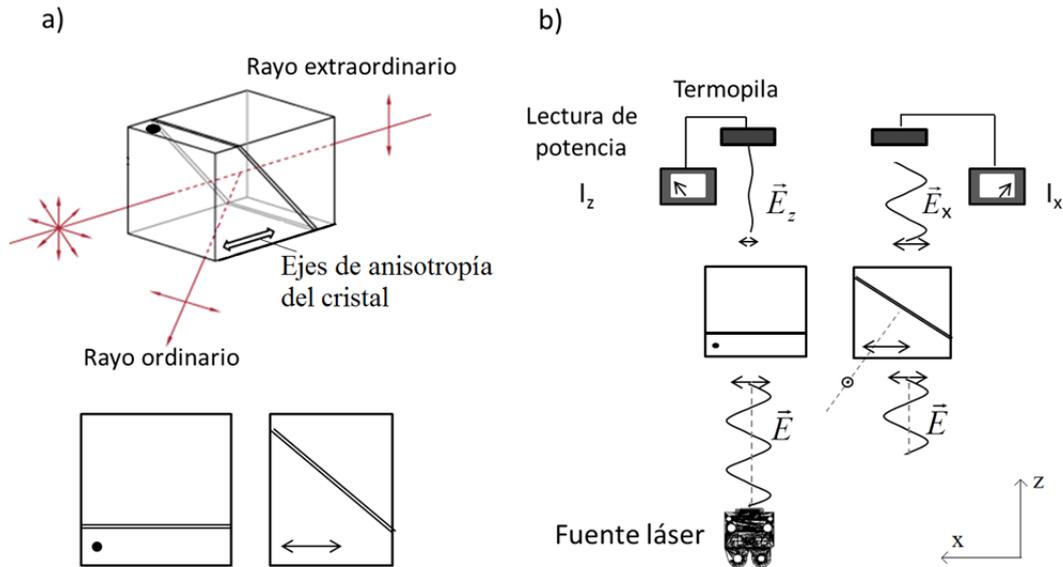


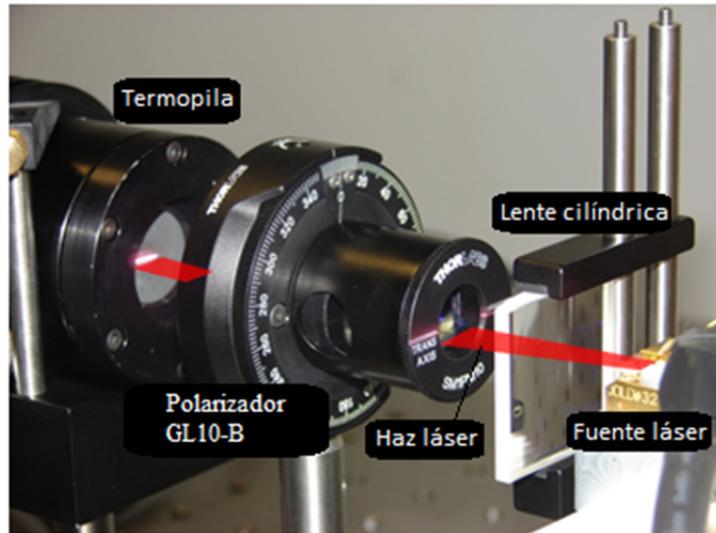
Figura 5. 24: a) Cubo polarizador con la orientación de los ejes del cristal anisótropo; b) Esquema del dispositivo para la determinación de las componentes  $I_x$  e  $I_z$ .

La Figura 5. 25a) muestra el montaje experimental correspondiente al esquema de la Figura 5. 24b) para llevar a cabo la caracterización experimental del *DoP*. En el montaje experimental se ha empleado una lente cilíndrica entre la fuente láser y el polarizador con el fin de reducir las pérdidas de potencia a la entrada de este último. Lo anterior ha sido necesario dada la similitud en las dimensiones del haz a lo largo del SA y la apertura del polarizador.

La Figura 5. 25b muestra la curva característica del estado de polarización de la radiación emitida por una de las dos barras de diodos (CO\_51778). La intensidad normalizada registrada en la termopila para cada una de las posiciones angulares del polarizador se representa en coordenadas polares. La curva característica del estado de polarización muestra una notable simetría para las diferentes posiciones del polarizador. Se observa una leve asimetría en 0° y 180°, fundamentalmente debida a falta de precisión en el alineamiento entre del haz láser con el eje óptico del polarizador. En base a estos resultados y haciendo uso de la ec.(5.5) se obtiene un  $DoP = 0.97$ . Este resultado implica que el 97% de la radiación emitida por la barra de diodos lo hace con el vector campo eléctrico vibrando en el plano xz (Figura 3.14). Por lo tanto, aún cuando se lleve a cabo el bplexado por polarización bajo un perfecto alineamiento de los componentes ópticos, estarán presentes

en torno a un 3% de pérdidas de potencia consecuencia de las características intrínsecas a la polarización de las fuentes láser.

a)



b)

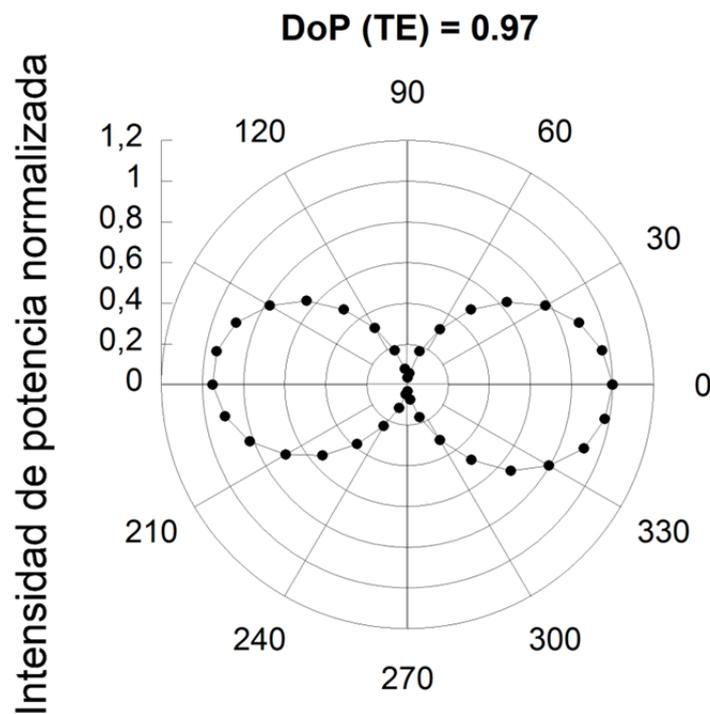


Figura 5. 25: a) Montaje experimental para la caracterización del grado de polarización (DoP); b) Curva característica del estado de polarización de la fuente láser CO\_51778.

La caracterización de la segunda barra de diodos empleada en el prototipo (CO\_51974) presenta similares resultados en términos del grado de polarización.

### 5.2.2.2 Caracterización espacial del haz láser

En esta sección se presenta el desarrollo del sistema óptico del prototipo láser. Se describe el estudio de la propagación del haz y la correspondiente comparativa con los resultados obtenidos del modelo óptico/numérico descrito en detalle en la sección 4.2.2. Además, se presenta el análisis de las pérdidas de potencia a lo largo de todo el sistema sistema así como la evaluación de la eficiencia en el acoplamiento a fibra óptica.

Las Figura 5. 26a) y b) presentan, respectivamente, el esquema del diseño óptico resultante del modelo junto con el correspondiente montaje experimental. Teniendo en cuenta el grado de polarización encontrado experimentalmente para las barras de diodos JOLD-50-CPBN-1L (Figura 5. 25), se ha llevado a cabo el biplejado por polarización en base al modelo presentado en el Capítulo 4. Tal y como se describió en el modelo, los componentes ópticos comerciales necesarios para realizar el biplejado fueron una lámina de media onda (RT-100-800-9, CVI Melles Griot) y un divisor de haz (PBS0-800-100 CVI, Melles Griot). Teniendo en cuenta que la aplicación final del prototipo es la soldadura de termoplásticos, es necesario introducir un puntero láser en el camino óptico con objeto de disponer de una referencia visual para el correcto posicionamiento de las probetas. El puntero láser ( $\lambda=633\text{nm}$ ) es introducido en el camino óptico del haz láser mediante un divisor de haz LWP (del inglés *Long Wave Pass Dichroic Beamsplitter*). Dicho componente [LWP-45-RU633-TU800-PW, CVI MellesGriot], localizado a  $45^\circ$ , presenta un porcentaje de transmisión en torno al 90% para un alto ancho de banda espectral ( $\lambda > 800\text{nm}$ ) y reflectividades superiores al 99% para un estrecho ancho de banda espectral en torno a 633nm.

## Desarrollo Experimental del Prototipo Láser de Diodos

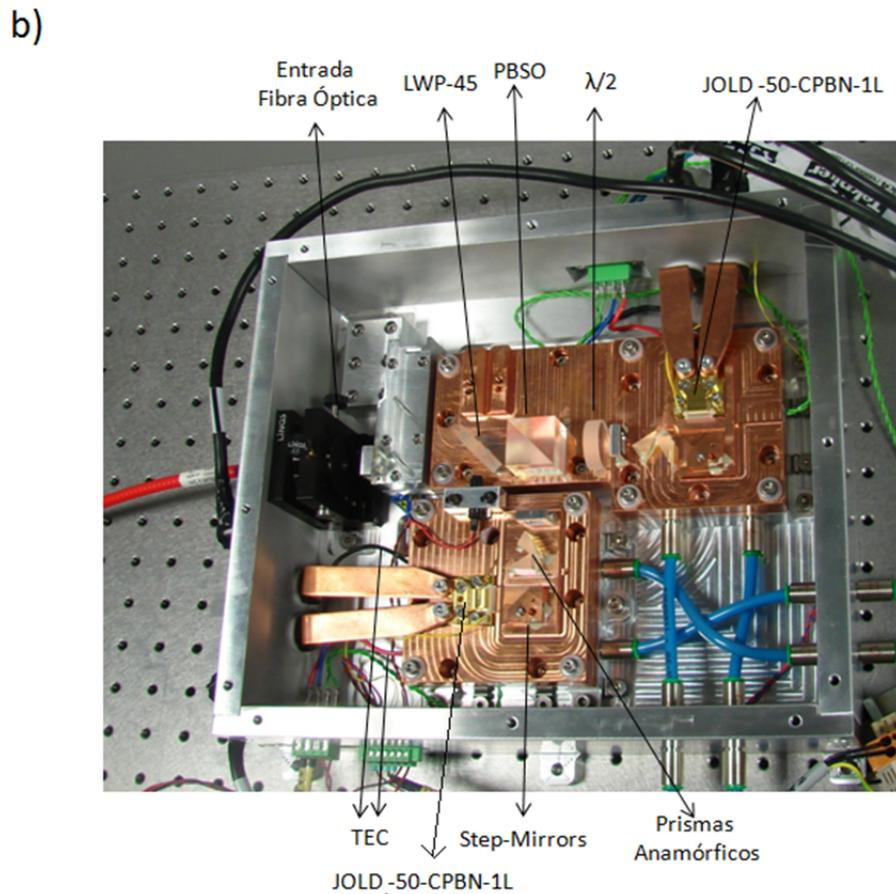
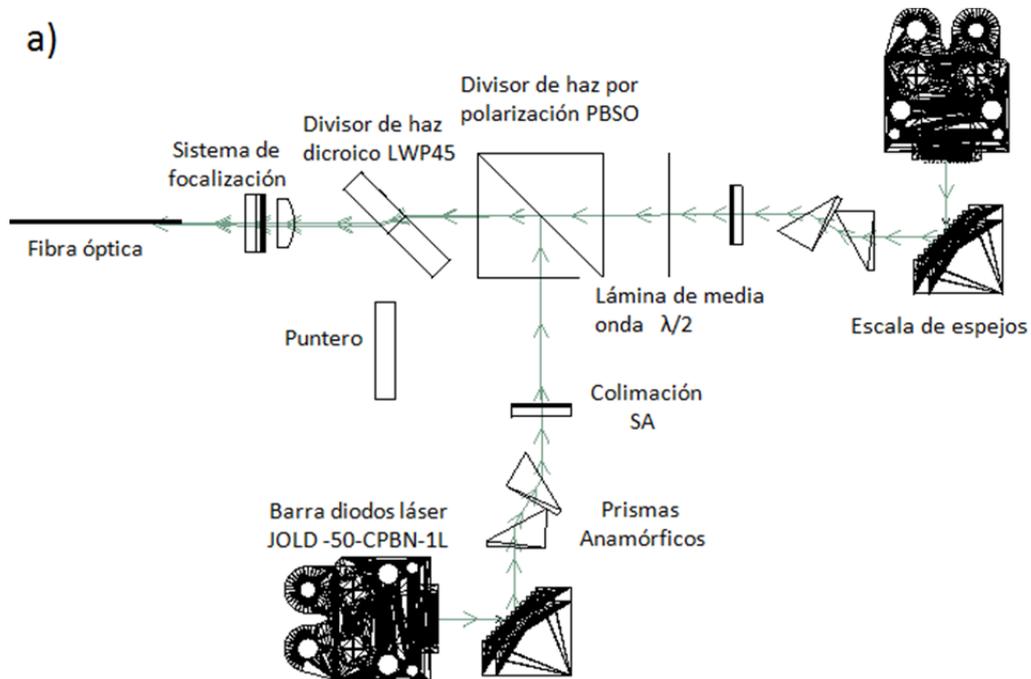


Figura 5. 26: a) Esquema del sistema óptico; b) Prototipo del sistema de diodos láser acoplado a fibra.

## *Desarrollo Experimental del Prototipo Láser*

La caracterización del haz procedente de la superposición de ambas barras de diodos se ha llevado a cabo mediante un montaje optomecánico similar al subsistema de focalización realizado en el caso de una barra de diodos (Figura 5. 7). El nuevo montaje experimental se muestra en la Figura 5. 27a). En el detalle presentando en la Figura 5. 27b) es posible observar que el módulo mecánico en el que se posicionan las lentes de focalización se ha diseñado con el fin de caracterizar la cáustica (lentes en posición A) y guiar el haz hasta la entrada a fibra óptica (lentes en posición B). En el primero de los casos es necesario utilizar una ventana de zafiro y un filtro metálico para atenuar el haz y llevar a cabo la caracterización de la cáustica. En el segundo caso el guiado se realiza hasta la fibra sin la interposición de componentes atenuadores.

El ajuste inicial de los subsistemas "*sistema láser 1*", "*sistema láser 2*" y "*sistema de enfoque + sistema posicionador de fibra óptica*" (Figura 5. 15) se ha realizado mediante la monitorización del haz resultante del biplejado, tras el sistema de conformado del haz y el de enfoque (posición A). La Figura 5. 28 muestra las cáusticas de focalización de los ejes SA y FA obtenidas tras la caracterización. Posteriormente se ha realizado un ajuste más preciso de la posición de los subsistemas "*sistema de enfoque*" y "*sistema posicionador de fibra óptica*" mediante la localización de las lentes de focalización en la posición B. De este modo, se ha conseguido una optimización de dichos posicionamientos minimizando las pérdidas de potencia encontradas a la salida del guiado por la fibra óptica. La caracterización de la cáustica ha sido realizada a la máxima potencia admisible por el equipo de caracterización con los filtros ópticos considerados [Anexo I: *Analizador de haz: BeamMaster7 Coherent*]. En base a lo anterior, la corriente de inyección en ambas fuentes fue fijada para obtener una potencia de emisión por barra de 5.3W.

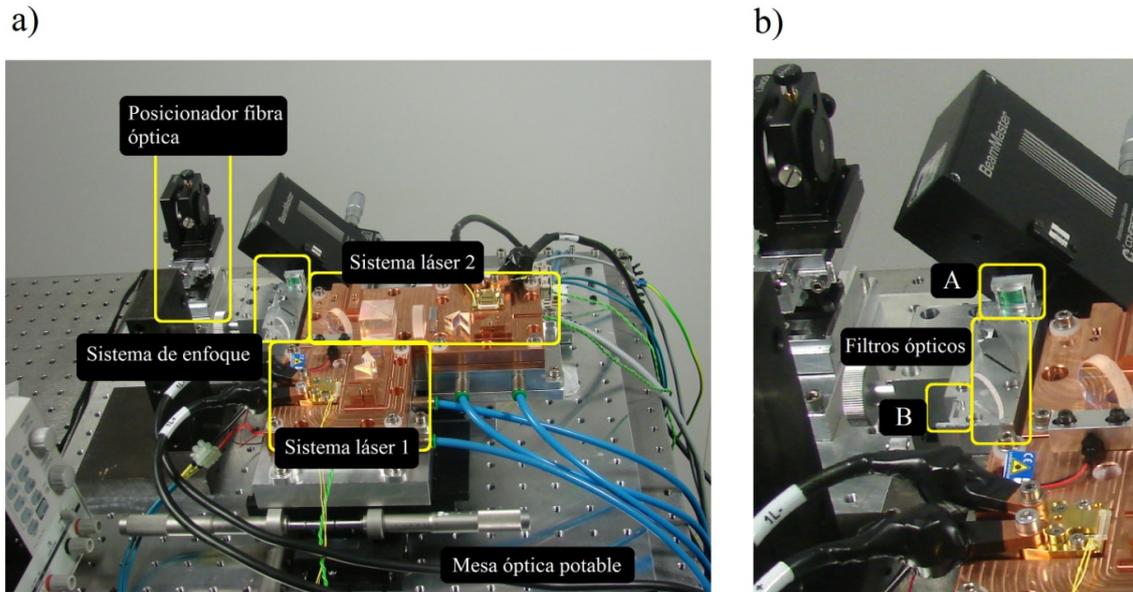


Figura 5. 27: a) Montaje experimental para la caracterización del haz láser procedente del bplexado por polarización; b) Detalle del sistema desarrollado para la caracterización de la cáustica.

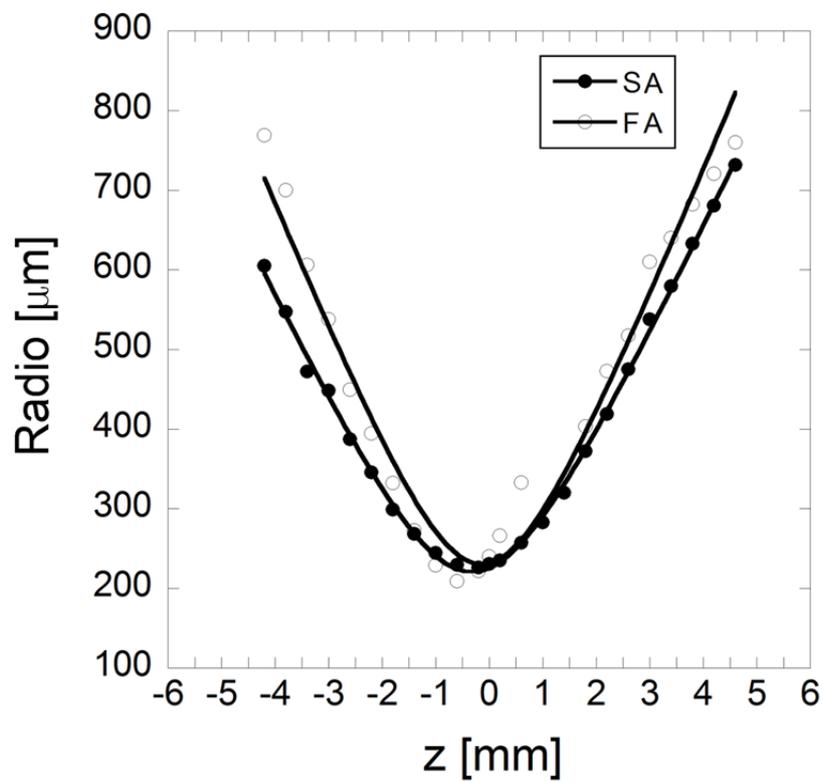


Figura 5. 28: Cáusticas de focalización a fibra del haz procedente del bplexados por polarización para una potencia de emisión de 5.3W por cada fuente láser.

La Tabla 5. 4 recoge los parámetros característicos de dichas cáusticas.

	SA	FA
$W_0$ [ $\mu\text{m}$ ]	$218.0 \pm 2.8$	$217.5 \pm 13.8$
$z_0$ [mm]	$0.02 \pm 0.05$	$-0.11 \pm 0.01$
$\theta$ [mrad]	$143.4 \pm 0.1$	$169.9 \pm 1.2$
$z_R$ [mm]	$1.52 \pm 0.02$	$1.28 \pm 0.09$
$BPP$ [mm.mrad]	$31.3 \pm 0.4$	$37.0 \pm 2.6$
$BPP_{total}$ [mm.mrad]	$48.5 \pm 2.2$	
$M^2$	$122.1 \pm 1.5$	$143.6 \pm 8.1$

Tabla 5. 4: Parámetros característicos de la calidad del haz cuyas cáusticas a los largo de los ejes SA y FA se presentan en la Figura 5. 28.

Del análisis de los resultados mostrados en la Tabla 5. 4 puede es posible realizar el siguiente análisis:

- Existe una alta simetría en la cintura del haz ( $W_0$ ). Con respecto a los resultados encontrados en el caso del acoplamiento a fibra de la radiación procedente de una barra de diodos (Tabla 5. 1), se ha producido un aumento de la cintura de haz en el FA. Dicho aumento puede ser explicado en base a las estrechas tolerancias del posicionamiento de la pareja de prismas anamórficos. Lo anterior implica que pequeñas desviaciones en el ángulo  $\alpha_1$  ( $\Delta\alpha_1 < 1^\circ$ ) conllevan cambios significativos en la dirección del haz emergente del segundo prisma con respecto al eje óptico (Figura 5. 29). Dichas desviaciones dan lugar a deformaciones de la cáustica de focalización cuyos efectos se evidencian en las dimensiones y posición del spot a lo largo del FA. Dicho efecto es más acusado en el caso de la cáustica resultante del biplejado. En este caso es necesario mantener la posición de los dos sistemas de prismas dentro de unas tolerancias tales que garanticen, para un sistema de enfoque alineado con el eje óptico, la deformación mínima de la cáustica.

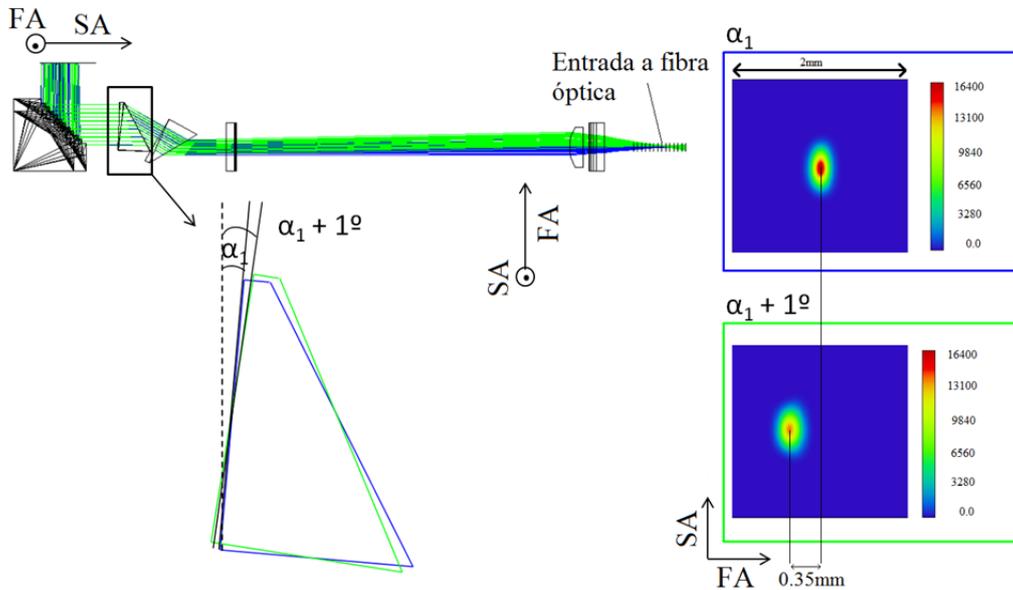


Figura 5. 29: Influencia de las tolerancias en el posicionamiento del primer prisma sobre el spot de entrada a fibra.

- Por otro lado, se aprecia la reducción del astigmatismo ( $\Delta z_0 = 0.13 \pm 0.03mm$ ) con respecto al encontrado en el caso del acoplamiento a fibra de una única barra.
- Los ángulos de divergencia en ambos ejes (SA y FA) se encuentran por debajo del ángulo crítico de las fibras ópticas en las que se realizará el acoplamiento ( $\theta_c = 221.54mrad$ ). Además, es posible observar que el ángulo de divergencia encontrado en el FA es superior al encontrado en el SA. Esta tendencia fue encontrada también en el análisis de las cáustica de focalización de la radiación procedente de una barra de diodos (Tabla 5. 1).
- El producto del haz total ( $BPP_{total}$ ) es inferior al de la fibra  $d_{f600\mu m}=600\mu m$ :  $BPP_{total} = 48.5mm.mrad < BPP_{f600\mu m} = 66.5mm.mrad$ . Sin embargo, dicho  $BPP_{total}$  es ligeramente superior al impuesto por la fibra de  $d_{f400\mu m}=400\mu m$ :  $BPP_{total} = 48.5mm.mrad > BPP_{f400\mu m} = 44.3mm.mrad$ . Lo anterior implica que las eficiencias en el acoplamiento a la fibra de  $d_{f400\mu m}$  disminuirán con respecto a las encontradas en el caso de acoplamiento de una única barra. La disminución de la calidad del haz resultante del bplexado parece estar relacionada con la desviación angular que presenta cada uno de los dos haces como consecuencia de las estrechas tolerancias de posicionamiento de uno de los primas.

## Desarrollo Experimental del Prototipo Láser

La Tabla 5. 5 presenta una comparativa de los resultados relativos a la cáustica de focalización de dos barras de diodos obtenidos a partir del modelo realizado en ZEMAX® y de las medidas experimentales.

SA+FA		Modelo		Experimento	
$(W_0)_{SA}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$(W_0)_{FA}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$207.2 \pm 4.1$	$204.0 \pm 4.6$	$217.5 \pm 13.8$	$218.0 \pm 2.8$
$(z_0)_{SA}$ [mm]	$(z_0)_{FA}$ [mm]	$-0.09 \pm 0.03$	$0.04 \pm 0.02$	$0.02 \pm 0.05$	$-0.11 \pm 0.01$
$\Delta\bar{z}_0$ [mm]		$0.13 \pm 0.05$		$0.13 \pm 0.06$	
$\theta_{SA}$ [mrad]	$\theta_{FA}$ [mrad]	$80.3 \pm 0.4$	$97.3 \pm 0.4$	$143.4 \pm 0.1$	$169.9 \pm 1.2$
$(z_R)_{SA}$ [mm]	$(z_R)_{FA}$ [mm]	$2.54 \pm 0.07$	$2.13 \pm 0.05$	$1.52 \pm 0.02$	$1.28 \pm 0.09$
$BPP_{SA}$ [mm.mrad]	$BPP_{FA}$ [mm.mrad]	$16.6 \pm 0.4$	$19.84 \pm 0.5$	$31.19 \pm 2$	$37.0 \pm 0.7$
$BPP_{total}$ [mm.mrad]		$26.0 \pm 0.7$		$48.5 \pm 2.2$	

Tabla 5. 5: Comparativa de los parámetros característicos de la calidad del haz de las cáusticas obtenidas del modelo de ZEMAX® (Figura 4. 31) y a través de la medida experimental (Figura 5. 28).

En la comparativa presentada se observa que:

- Los valores de la cintura del haz en ambos ejes encontrados experimentalmente y a través del modelo presentan una alta concordancia.
- El astigmatismo ( $\Delta\bar{z}_0$ ) encontrado experimentalmente presentan un alto nivel de concordancia con el obtenido a través del modelo.
- Los ángulos de divergencia obtenidos experimentalmente alcanzan, en ambos ejes, valores superiores a los proporcionados por el modelo. Una tendencia similar quedó reflejada en el caso de una barra (Tabla 5. 2), presentándose en este caso una desviación más notable en los resultados correspondientes al SA.
- El producto del haz ( $BPP_{total}$ ) encontrado experimentalmente es aproximadamente el doble que el proporcionado por el modelo. Esta desviación es superior a la obtenida en el caso de una barra (Tabla 5. 2).

Del anterior análisis se desprende que, durante el proceso experimental de biplejado se produce una pérdida de calidad del haz con respecto a los resultados obtenidos mediante

el modelo óptico. Aunque el modelo resulta de gran utilidad para el desarrollo experimental del prototipo, no podemos olvidarnos que aspectos como el alineamiento, el mecanizado de las plataformas de posicionamientos, las posiciones relativas de los componentes ópticos, etc... introducen desviaciones en los parámetros de calidad del haz. Dichas desviaciones se ponen de manifiesto en los valores mostrados en la Tabla 5. 5.

### 5.2.2.3 Eficiencia del sistema óptico y del acoplamiento a fibra

La Figura 5. 30 presenta las potencias registradas en cada uno de los componentes ópticos involucrados en el sistema óptico del prototipo láser. Dicha gráfica pone de manifiesto que las mayores pérdidas de potencia se producen antes del divisor de haz PBSO.

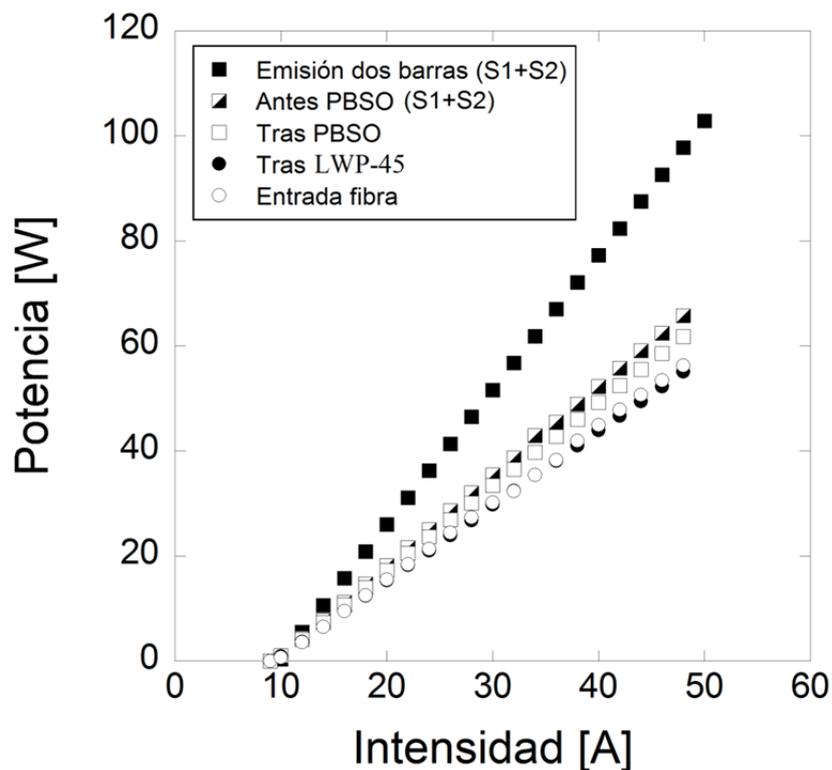


Figura 5. 30: Potencias ópticas registradas a lo a lo largo del camino óptico del prototipo láser.

La Figura 5. 31 presenta las pérdidas de potencia registradas en el acoplamiento a fibra así como las eficiencias de dichos acoplamientos.

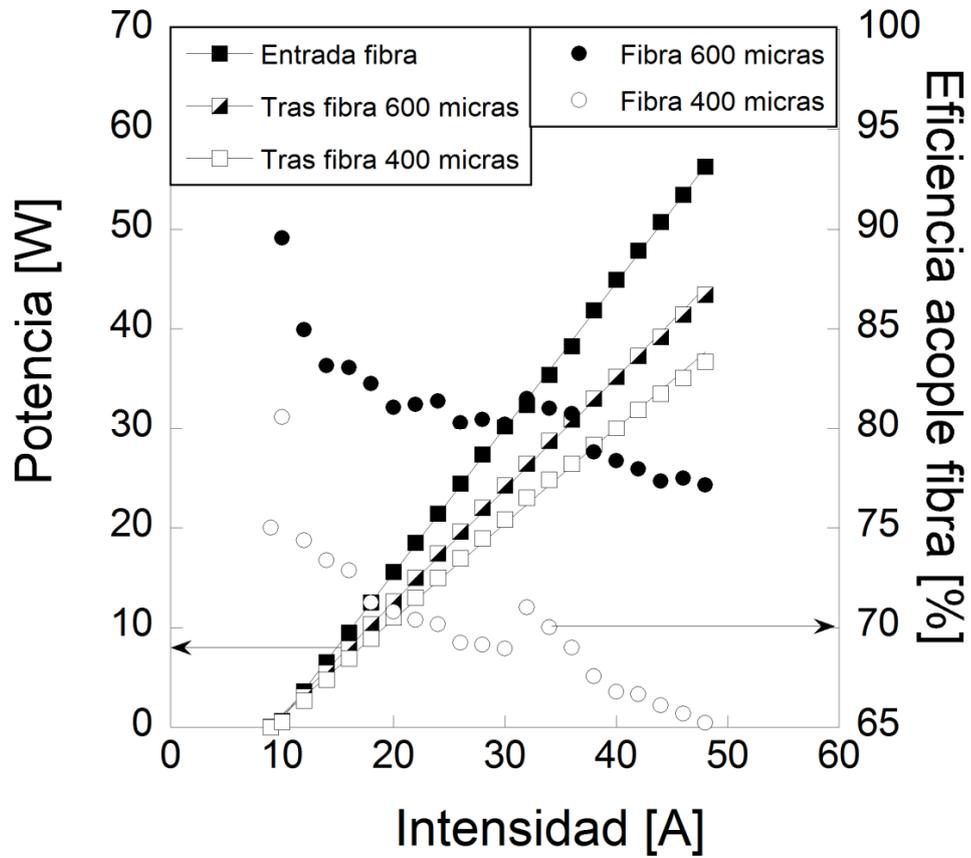


Figura 5. 31: Potencia óptica de salida y eficiencias de acoplamiento de dos barras de diodos a fibras de  $d_{fibra}=600$  y  $400\mu m$ , ambas con  $NA=0.22$ .

La Tabla 5. 6 muestra un resumen de los resultados obtenidos a partir de de las curvas presentadas en las Figura 5. 30 y Figura 5. 31.

	Pérdidas por elemento [%]	Eficiencia acumulativa [%]
Diodos láser		100
Escala de espejos +prismas anamórficos + colimación	33	67
Divisor de haz PBSO	6	62
Divisor de haz Dicroico LWP-45	11	56
Sistema de enfoque	0.9	55.4
Fibra óptica 600 $\mu$ m /400 $\mu$ m	23/34	44/37

*Tabla 5. 6: Pérdidas de potencia en cada elemento óptico y eficiencia acumulativa resultante.*

Del análisis de la Figura 5. 31 y los detalles relativos a las pérdidas de potencia mostrados en la Tabla 5. 6 pueden realizarse las siguientes consideraciones:

- La suma de potencias de ambos haces láser antes de ser superpuestos por el divisor de haz PBSO, indica una pérdida aproximada del 33% con respecto a la potencia total emitida por ambas fuentes láser. Estas pérdidas son ligeramente inferiores a las encontradas a lo largo del camino óptico del haz procedente de una única barra (Tabla 5. 3) donde puede observarse que la suma de pérdidas desde la fuente de diodos láser hasta después de la lente de colimación se encuentra en torno al 38%. Esta reducción de pérdidas con respecto al sistema de acoplamiento de una barra de diodos puede ser consecuencia de las mejoras en el alineamiento que se han llevado a cabo para realizar el bplexado por polarización.
- En el divisor de haz PBSO se encuentran una pérdidas en torno al 6%, relacionadas con el grado de polarización de los dos haces láser. En base al estudio del grado de polarización de las fuentes láser utilizadas, las pérdidas esperadas se encuentran en torno al 3%.
- El divisor de haz dicroico LWP-45 (Figura 5. 26) utilizado para introducir el haz del puntero ( $\lambda=633\text{nm}$ ) en el camino óptico del haz láser produce unas pérdidas en torno al 10%. Estas pérdidas guardan acuerdo con las propiedades de transmisión de dicho componente óptico (Figura 5. 32). En ellas puede

observarse que la transmisión de dicho componente a  $\lambda \approx 800\text{nm}$  se encuentra en torno al 90%.

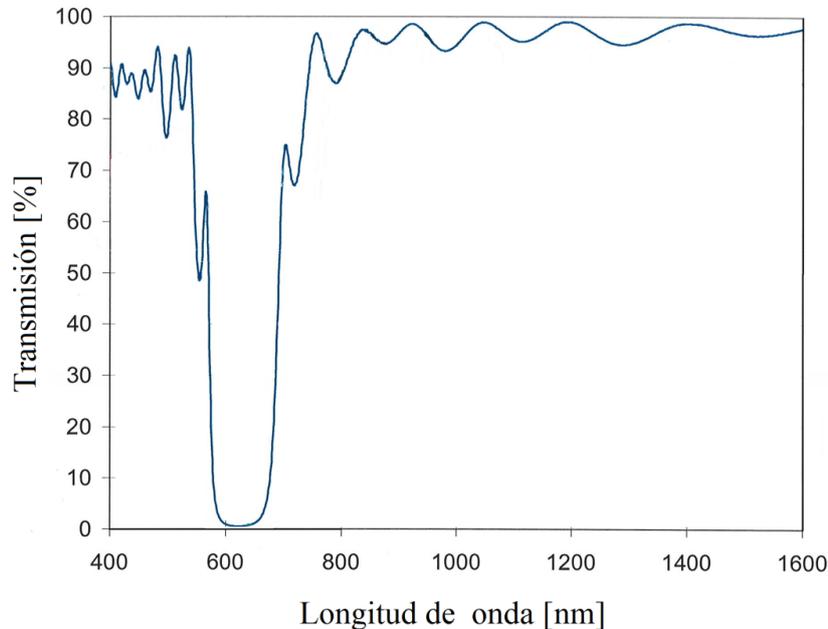


Figura 5. 32: a) Curva de transmisión espectral del divisor de haz LWP-45

- Las pérdidas de potencia registradas en el acoplamiento a ambas fibras son superiores a las encontradas en el caso del acoplamiento a fibra de una única barra de diodos (Tabla 5. 3). Lo anterior es consecuencia de la pérdida de calidad del haz (aumento del  $BPP_{total}$ ) tras realizar el bplexado por polarización:  $(BPP_{total})_{1barra} = 37.4\text{mm.mrad} < (BPP_{total})_{2barras} = 48.5\text{mm.mrad}$  medidos a potencias de emisión de 10W y 5.3W respectivamente. Dicha pérdida de calidad del haz es consecuencia de una imprecisa superposición de los haces láser en el divisor de haz PBSO debido a aspectos de alineamiento descritos anteriormente (Figura 5. 29). Por lo tanto:  $BPP_{total} = 48.5\text{mm.mrad} > BPP_{f400\mu\text{m}} = 44.3\text{mm.mrad}$ , lo que no garantiza un acoplamiento eficiente del haz procedente del bplexado a la fibra de  $d_{fibra}=400\mu\text{m}$ . En consecuencia, dicha fibra queda descartada para la utilización de este tipo de sistemas en los que se desea guiar el haz procedente de dos barras de diodos mediante fibra óptica.

La Figura 5. 33 muestra la comparativa de las curvas de eficiencia del acoplamiento de la radiación procedente de 1 y 2 barras de diodos a las fibras ópticas consideradas. Es posible observar que, una consecuencia de la pérdida de calidad del haz en el bplexado es la significativa disminución de la eficiencia de acoplamiento con la intensidad de corriente

inyectada en los diodos láser con respecto al comportamiento observado en el caso de acoplamiento de una única barra de diodos. Por tanto, la disminución de la calidad del haz con la potencia de emisión es más acusada en el haz resultante del bplexado frente al comportamiento encontrado en el acoplamiento de una barra de diodos. Por otro lado, en el caso del acoplamiento de dos barras de diodos, la pérdida de potencia es más acusada cuando se considera el acoplamiento a una fibra de diámetro 400 $\mu$ m. Lo anterior es consecuencia de unos valores de calidad del haz ( $BPP_{total}$ ) cercanos a los de la fibra de 400  $\mu$ m de diámetro cuando consideramos una corriente de inyección de 15A (potencia de emisión de 5.3W) en cada uno de los diodos (Tabla 5. 4).

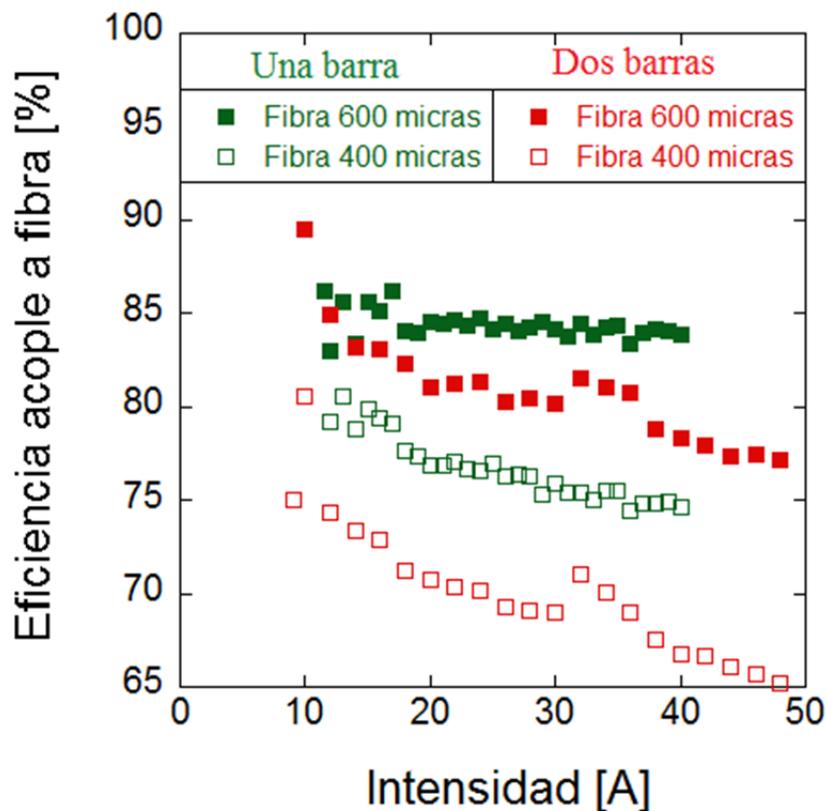


Figura 5. 33: Comparativa de las curvas de eficiencia del acoplamiento a fibras de diámetro 400 $\mu$ m y 600  $\mu$ m cuando el haz procede de una y dos barras de diodos.

Del análisis anterior puede concluirse que, en el caso del acoplamiento a fibra de dos barras de diodos láser, la eficiencia de acoplamiento disminuye en torno al 25% con respecto a las eficiencias obtenidas en el caso del acoplamiento de una única barra de diodos. Las dos principales razones de pérdida de eficiencia son:

- La pérdida de calidad del haz en el proceso de multiplexado.

## *Desarrollo Experimental del Prototipo Láser*

- Las pérdidas en el divisor de haz LWP-45. Dicho elemento fue introducido en el prototipo final ya que su única función es superponer el haz del puntero láser con el haz láser.

### **5.3 Integración del prototipo láser en máquina**

Una vez validado el prototipo láser a nivel de laboratorio, la siguiente fase se centra en la integración en máquina de dicho prototipo con el fin de utilizarlo para la soldadura de termoplásticos en un entorno industrial. La fase de integración en máquina se ha llevado a cabo en tres fases bien diferenciadas: montaje del prototipo láser en máquina (sección 5.3.1), integración del prototipo láser en máquina (sección 5.3.2) y diseño y desarrollo del cabezal óptico para soldadura de termoplásticos (sección 5.3.3). En este capítulo se realizará una breve descripción de dichas fases sin entrar en un alto grado de detalle ya que dicha temática queda fuera del alcance de la presente Tesis.

#### **5.3.1 Montaje del prototipo láser en máquina**

Los resultados mostrados en sección 5.2 relativos a la caracterización de la cáustica de focalización, pérdidas de potencia y eficiencia del prototipo láser corresponden al montaje experimental mostrado en la Figura 5. 34. Dicha figura muestra los diferentes sistemas de posicionamiento utilizados para el alineamiento de cada uno de los cuatro sub-sistemas de los que consta el prototipo: *sistema láser 1*, *sistema láser 2*, *sistema de enfoque y posicionador de fibra óptica*. Cabe destacar que la localización del posicionador de fibra en la Figura 5. 34 no se corresponde con su posición de funcionamiento, sino que dicha configuración es la utilizada para la caracterización del haz láser tras el sistema de enfoque. Una vez realizado el proceso de alineamiento que proporciona los resultados y gracias a que dicho ajuste ha sido llevado a cabo sobre una mesa óptica portable (fabricada en IK4-TEKNIKER, Figura 5. 34), el prototipo láser fue trasladado a la Unidad de Metrología de IK4-TEKNIKER donde se llevó a cabo una medida precisa de las posiciones relativas de los cuatro sub-sistemas con respecto a una referencia dada. De esta forma, se fabricó una placa base con el fin de dotar al prototipo de un encapsulamiento con la robustez requerida para su posterior integración en máquina (Figura 5. 35). Además, dicho encapsulado cuenta con los elementos adaptados para las conexiones eléctricas y la instalación del sistema de refrigeración.

La Figura 5. 36 muestra dos imágenes del prototipo instalado en la máquina diseñada y desarrollada en IK4-TEKNIKER para la microsoldadura de termoplásticos.

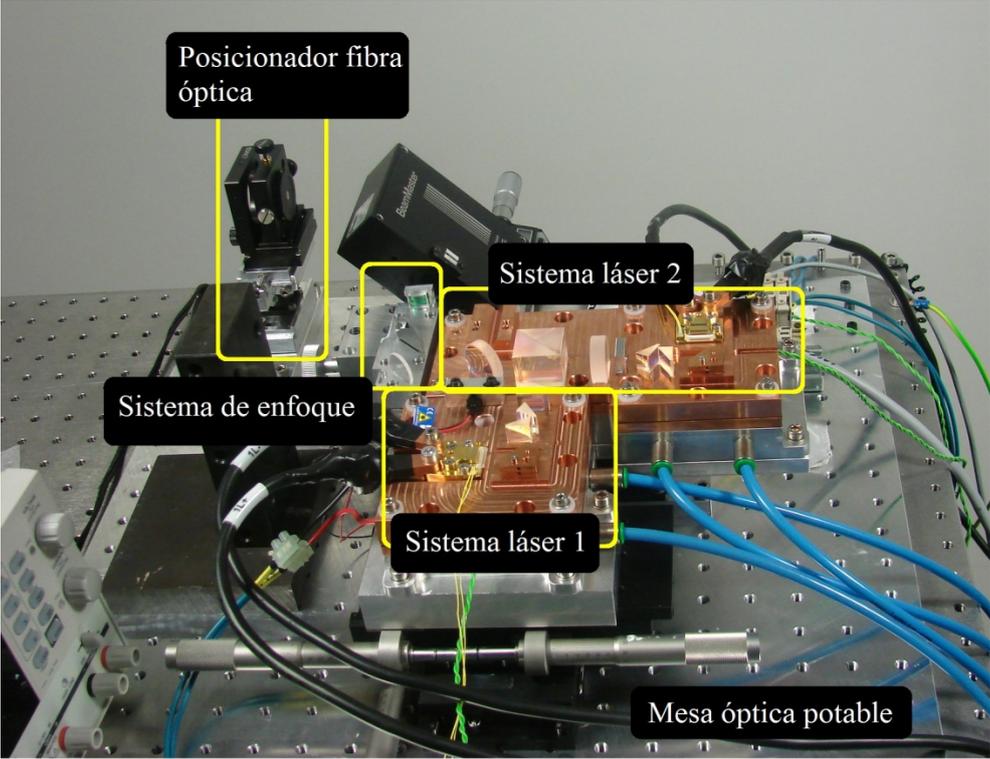


Figura 5. 34: Montaje óptico del prototipo láser a nivel laboratorio.

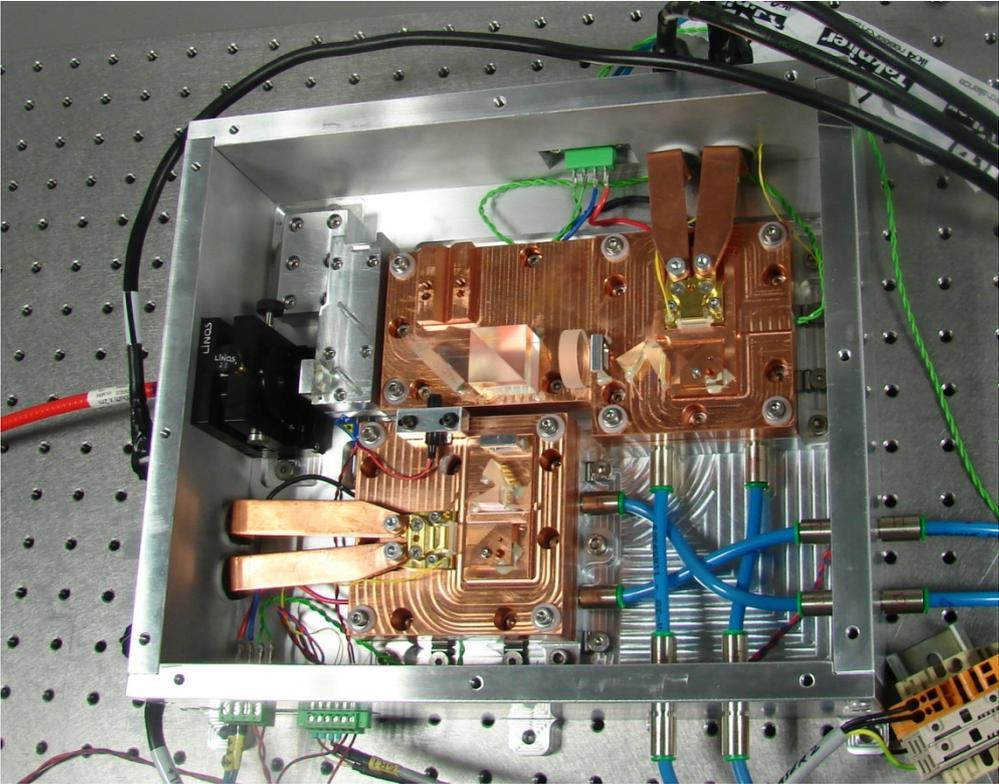
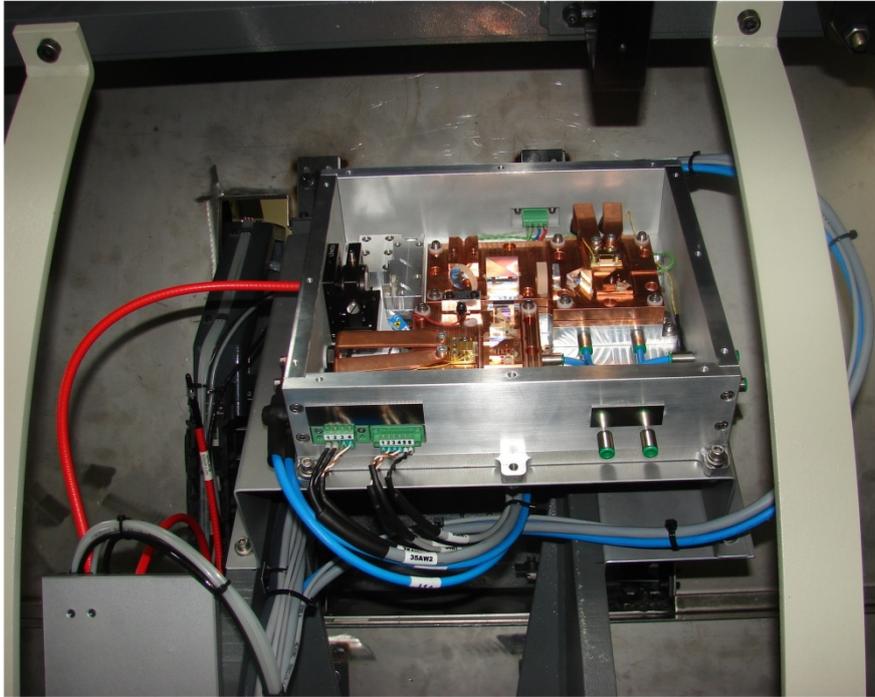


Figura 5. 35: Montaje óptico encapsulado para su posterior integración en máquina.

a)



b)

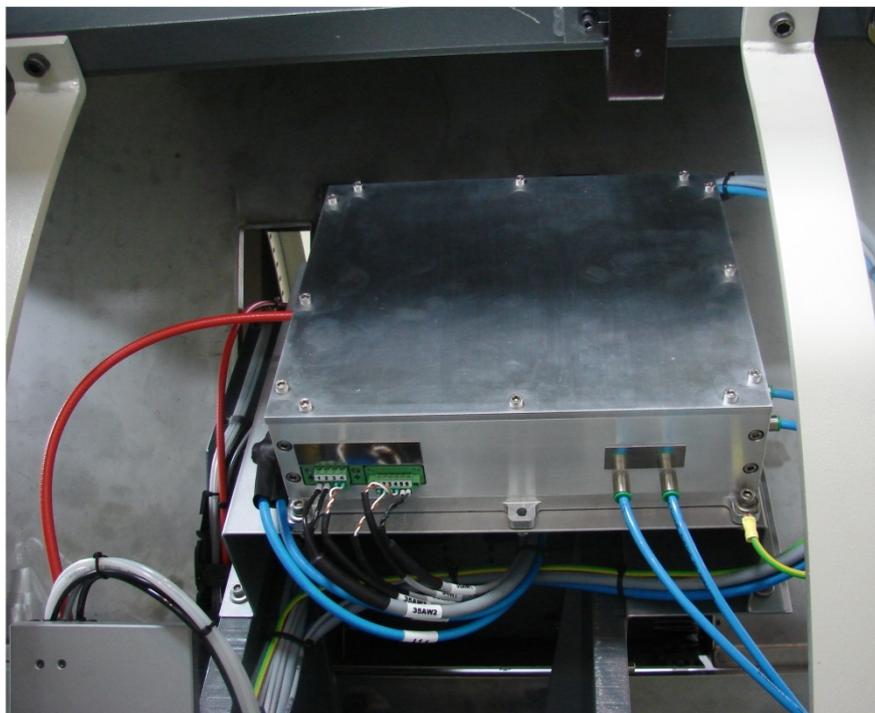


Figura 5. 36: Prototipo láser instalado en la parte trasera de la máquina a) con tapa de metacrilato; b) totalmente encapsulado.

### **5.3.2 Integración del prototipo láser en máquina (integración de elementos mecánicos y de control)**

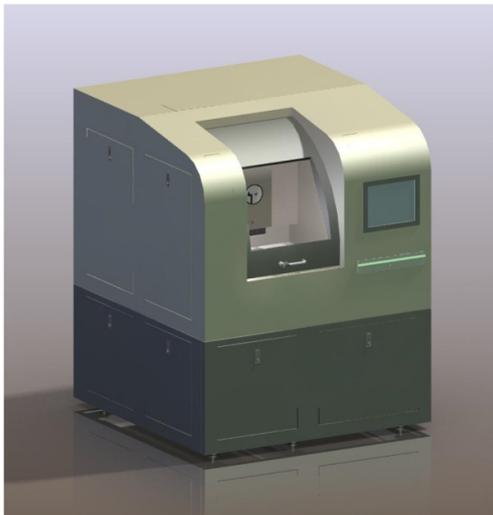
La integración en máquina del prototipo láser se ha realizado tanto desde un punto de vista mecánico como de control.

Desde el punto de vista **mecánico** la máquina de soldadura consiste en una mesa horizontal con movimientos precisos controlados en los ejes x-y y un carro con desplazamiento vertical. La mesa horizontal es utilizada para fijar los componentes plásticos que van a ser soldados y en el carro vertical se encuentra alojado el cabezal de enfoque.

Gracias al movimiento vertical del carro, el cabezal de enfoque es posicionado en el plano focal para llevar a cabo el proceso de soldadura. Mediante el control de movimiento en los ejes x-y es posible generar soldadura con la geometría deseada.

Las Figura 5. 37a) y b) muestran, respectivamente, la parte frontal del diseño de la máquina de soldadura, realizado en SoliWorks®, y la parte trasera de la máquina donde se ubica el prototipo.

a)



b)

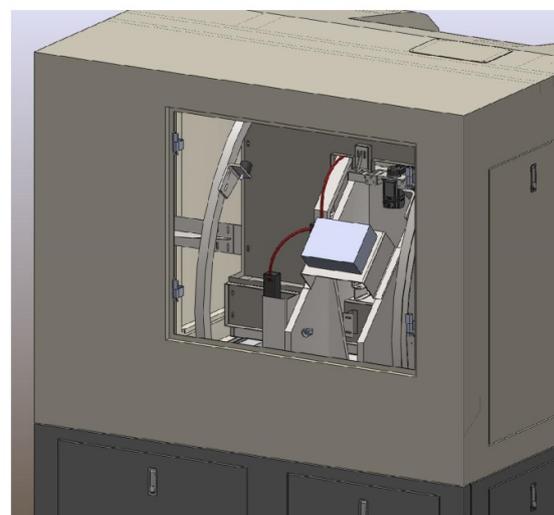


Figura 5. 37: Vista a) delantera; b) trasera del diseño de la máquina de soldadura.

a)



b)



Figura 5. 38: Vista a) delantera; b) trasera de la máquina de soldadura.

La arquitectura de **control** está basada en una plataforma PC donde se ha desarrollado un software en el entorno LabView que permite abordar las diferentes situaciones a resolver. Dicho control permite el movimiento en los ejes mediante una tarjeta PCI-7354 y, ayudado por el software *NI Motion Assistant*, posibilita importar trayectorias desde AutoCad y realizar las funciones de control oportunas sobre la velocidad de desplazamiento del cabezal. Una tarjeta adicional (PCI-8432/4) permite integrar en la misma aplicación la comunicación RS-232 con las dos fuentes láser y el sistema de refrigeración. De esta manera se realizan las operaciones de configuración e intercambio de información durante el proceso. Adicionalmente se integra una cámara de visión USB que permite realizar el correcto posicionamiento de las probetas de termoplástico para llevar a cabo el proceso de soldadura.

Entre los parámetros que influyen de manera más notable en el proceso de soldadura se encuentran la distribución de energía del spot láser a la salida del cabezal, la presión ejercida sobre los termoplásticos, la velocidad de proceso y la potencia óptica. El primero de ellos queda resuelto mediante el diseño óptico del cabezal de enfoque y el segundo mediante el diseño de un utillaje adecuado en función de la geometría de la pieza. Los dos últimos (velocidad y potencia) son gestionados mediante el sistema de control desarrollado.

Bajo ciertas condiciones, la velocidad de soldadura no es constante como consecuencia de las aceleraciones y deceleraciones producidas es las esquinas de las trayectorias. Por

## Desarrollo Experimental del Prototipo Láser

consiguiente, la potencia óptica debe ser ajustada en función de la velocidad del proceso según la ventana de parámetros de proceso óptima para los termoplásticos considerados.

En cuanto a la potencia óptica, el control desarrollado establece mecanismos para gobernar la potencia óptica de salida del láser mediante la gestión de la intensidad de corriente inyectada en las dos barras de diodos que integran el prototipo láser. Además, el sistema controla la temperatura de cada una de las fuentes láser adecuando la corriente en cada una de las celdas Peltier y la temperatura del agua del circuito de refrigeración.

La Figura 5. 39 muestra la interfaz de usuario para el control de los parámetros descritos anteriormente. Además, la interfaz dispone de una ventana para la visualización del cordón de soldadura y posterior posicionamiento del cabezal.

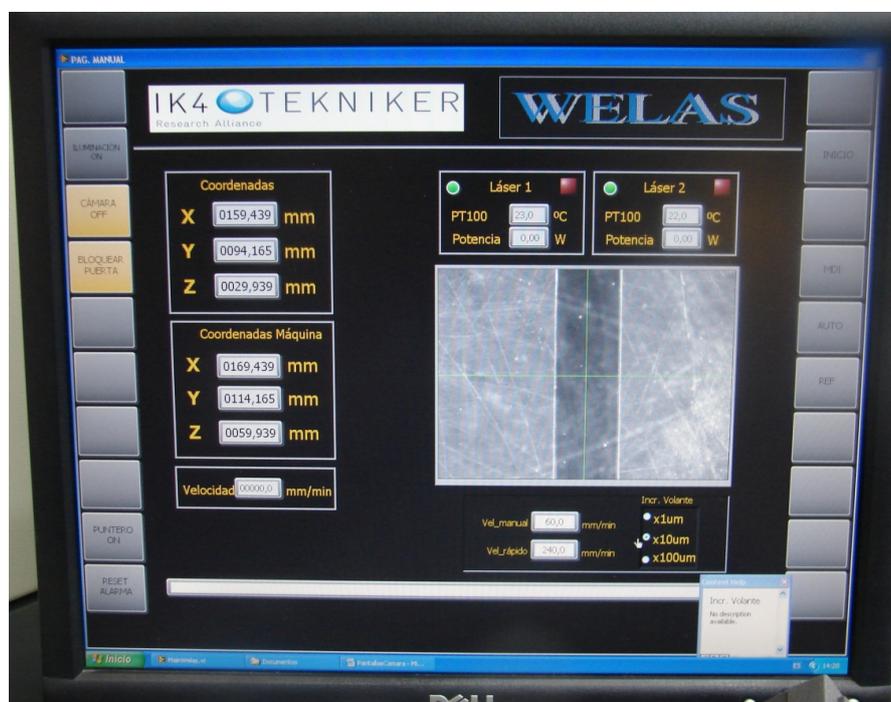


Figura 5. 39: Interfaz de usuario para el control de los parámetros de proceso así como la visualización del cordón de soldadura.

### 5.3.3 Cabezal óptico para soldadura de termoplásticos

Una vez desarrollado el prototipo láser y la máquina en la que integrarlo para llevar a cabo el proceso de microsoldadura de termoplásticos, se ha desarrollado un cabezal óptico para el guiado del haz láser desde la salida de la fibra óptica hasta los termoplásticos a ser soldados. El cabezal óptico de enfoque ha sido desarrollado íntegramente en IK4-TEKNIKER: el diseño óptico ha sido llevado a cabo mediante el software ZEMAX® y el diseño mecánico mediante SolidWorks®. El cabezal consta de una unidad de colimación y una unidad de

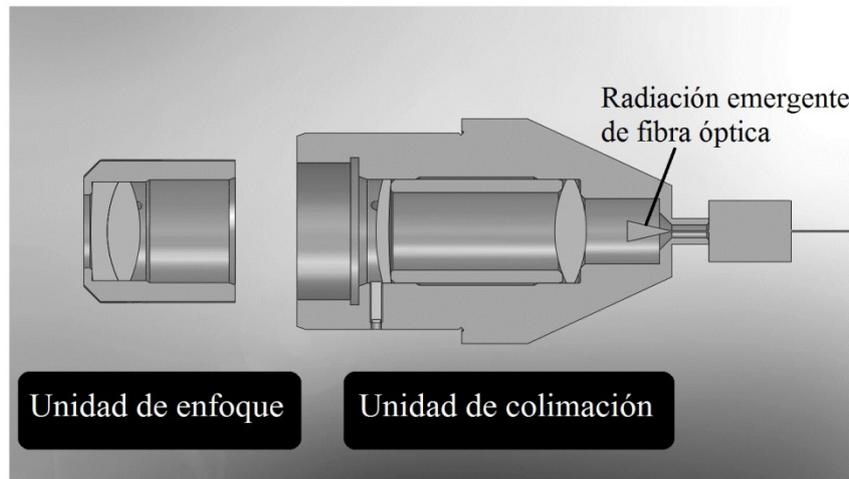
enfoque. El sistema óptico del cabezal de enfoque ha sido diseñado para colimar el haz emergente de la fibra óptica y así conseguir minimizar la divergencia residual del haz. Posteriormente, se ha llevado a cabo el diseño de la unidad de enfoque. El criterio utilizado para la elección de la óptica de enfoque ha sido la búsqueda de un compromiso entre el establecimiento de una distancia de trabajo adecuada y el tamaño del spot en el plano focal del cabezal óptico. El tamaño del spot en el plano focal ( $d_c$ ) puede ser fijada a partir del diámetro de la fibra óptica ( $d_{fibra}$ ), la longitud focal efectiva de la unidad de colimación ( $f_c$ ) y la longitud focal efectiva de la unidad de enfoque ( $f_f$ ) de acuerdo a la expresión [5. 1 ]

$$d_{fibra} = d_c \times \frac{f_f}{f_c} . \quad (5.4)$$

En base a los resultados de eficiencia presentados para cada una de las fibras ópticas (Figura 5. 31) se ha empleado la fibra de diámetro  $d_{fibra}=600\mu\text{m}$  y una distancia de trabajo ( $WD$ ) de aproximadamente 45mm.

La Figura 5. 40a) muestra un corte transversal del diseño optomecánico del cabezal de enfoque donde puede observarse una estructura modular: los sistemas de colimación y enfoque están alojados en unidades mecánicas diferentes. Lo anterior permite el uso de sistemas de enfoque con diferente longitud focal y así disponer de un amplio rango de tamaños de spots y distancia de trabajo. La Figura 5. 40b) muestra el montaje del cabezal óptico a nivel laboratorio, donde se realiza la caracterización de la cáustica de focalización con el fin de definir el plano de trabajo y el perfil de intensidad del spot en dicho plano.

a)



b)

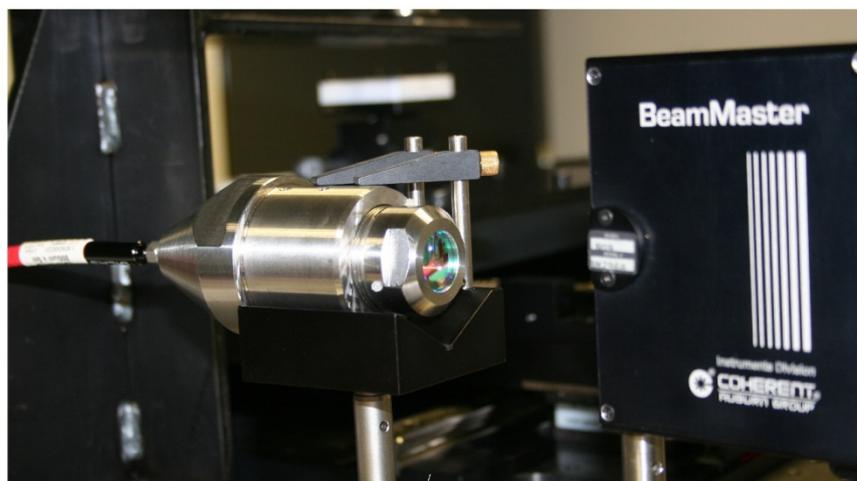


Figura 5. 40: a) Corte transversal del diseño óptomecánico del cabezal de enfoque; b) Montaje del cabezal óptico a nivel laboratorio.

La Figura 5. 41 muestra el resultado de la caracterización experimental del spot en el plano focal considerando la fibra  $d_{\text{fibra}}=600\mu\text{m}$ . Dicha caracterización muestra un spot con simetría circular y una distribución de intensidad cercana a la gaussiana. Es posible observar que el diámetro del spot medido al 13.5% de intensidad presenta un valor en torno a  $978\mu\text{m}$ . Esta medida proporciona una estimación de la anchura que presentarán los cordones de soldadura entre termoplásticos. En este sentido, es importante resaltar que el resultado de la caracterización presentado en la Figura 5. 41 depende del valor de la potencia de emisión de las barras de diodos. Dicha caracterización corresponde a una potencia de emisión de las barras de diodos láser en torno a 8W y por tanto, teniendo en

cuenta los valores de eficiencia del prototipo láser (Figura 5. 31), el valor absoluto de potencia en el spot tras el cabezal de enfoque, se encuentra en torno a 6W. Como en los casos descritos con anterioridad, la caracterización se ha llevado a cabo a la máxima potencia admisible por el equipo de caracterización (Anexo I: *Analizador de haz BeamMaster7 Coherent*).

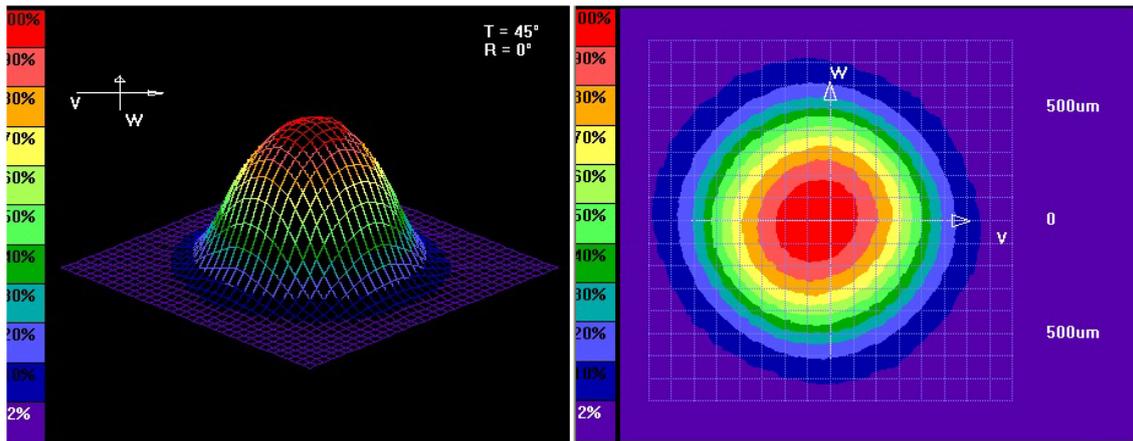


Figura 5. 41: Caracterización experimental del perfil de intensidad de del spot láser en el plano focal del cabezal de enfoque mostrado en la Figura 5. 40.

Dado que los valores de potencia que serán utilizados en el proceso de soldadura de los termoplásticos seleccionados se encuentran en un rango de [1-16] W, se analiza a continuación la dependencia del tamaño del spot (en el plano focal del cabezal de enfoque) con la potencia.

La Figura 5. 42 muestra la dependencia del tamaño del spot tras el cabezal de enfoque con la potencia óptica registrada tras dicho componente. Se observa un incremento lineal del diámetro entorno a  $10\mu\text{m}$  para un aumento de potencia de 6W. Sin embargo, dicha dependencia no ha podido ser obtenida experimentalmente para todo el rango de potencias utilizado en el proceso de soldadura. Como aproximación, se extrapola la dependencia lineal obtenida en el rango [1-6]W hasta el rango [1-16]W:  $\phi = 967.9 + 1.7 \times P$ . Por tanto, la anchura de los cordones de soldadura presentará una dependencia con la potencia óptica además de factores como la velocidad de soldadura y las características de los termoplásticos. La contribución de cada uno de los factores a la anchura del cordón de soldadura será analizada en el Capítulo 6.

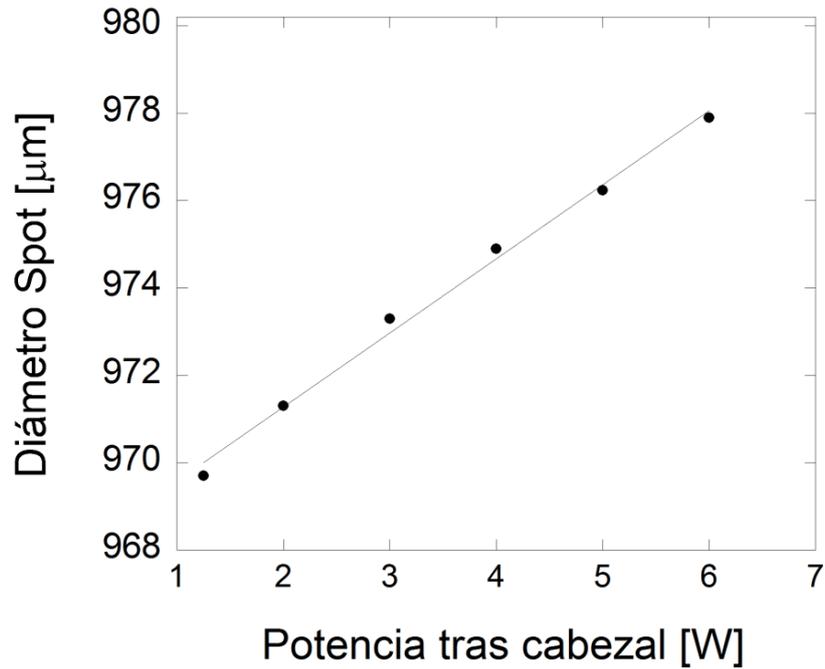


Figura 5. 42: Dependencia del diámetro del spot en el plano focal del cabezal de enfoque con la potencia óptica registrada en dicha posición.

Tras la validación y caracterización del cabezal óptico de enfoque a nivel laboratorio (Figura 5. 40), se procede a integrar dicho cabezal en el carro vertical de la máquina de soldadura. La Figura 5. 43 muestra una vista de la parte delantera de la máquina donde se encuentra la etapa final del guiado del haz láser (extremo de la fibra óptica) y el cabezal de enfoque que guía el haz láser hasta la zona de trabajo. Además, el montaje final cuenta con una cámara de visión para realizar el seguimiento del cordón de soldadura generado durante el proceso. Dicha visualización se realiza a través de la interface de usuario (Figura 5. 39).

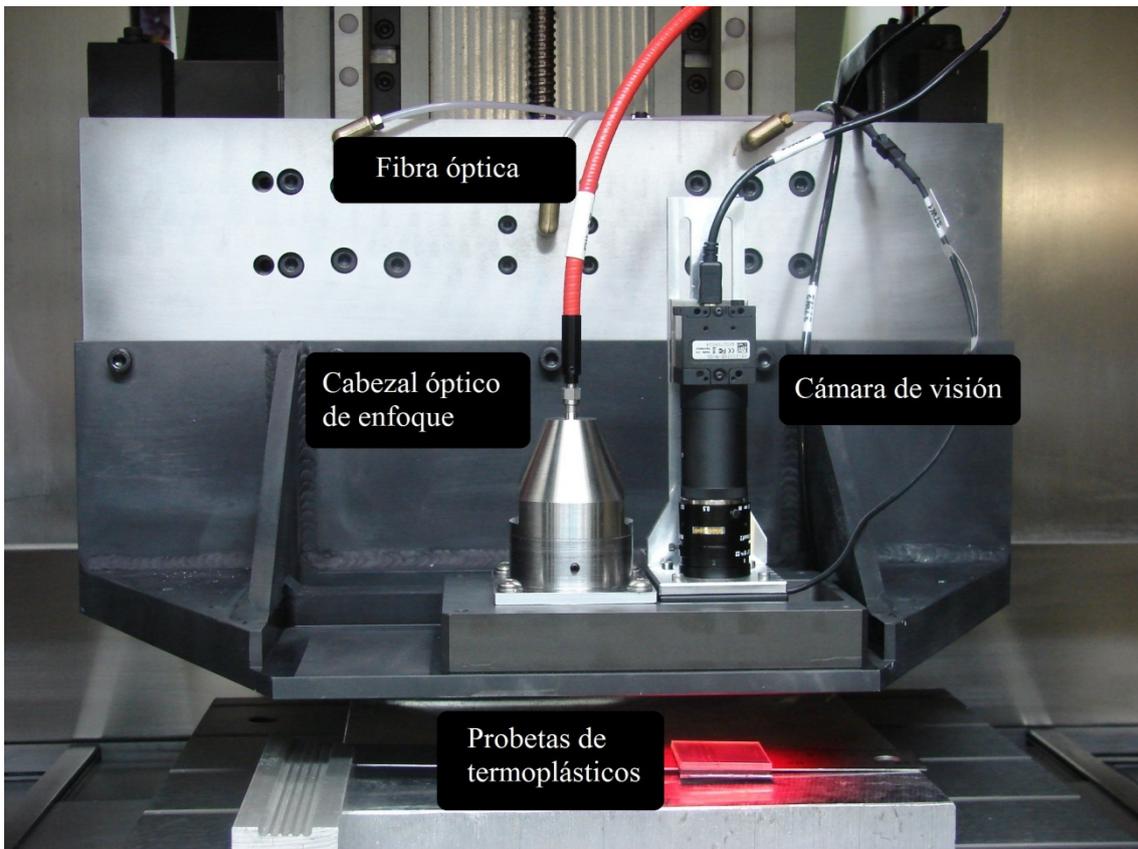


Figura 5. 43: *Vista del carro vertical de la máquina de soldadura.*

## Referencias

5. 1 B. Ehler, K. Du, M. Baumann, H-G. Treusch, P. Loosen, R. Poprawe, "Beam shaping and fiber coupling of high-power diode laser arrays". Proc- SPIE 3097, Laser in Material Processing (1997), 639-644.
5. 2 H.G. Treush, K. Du, M.Baumann, V.Sturm, B.Ehlers, P.Loosen, *Fiber-coupling techniques for high-power diode laser arrays*. Proc. SPIE 3267, Laser Resonator 98 (1998).
5. 3 J.T. Gopinath, B. Chann, T.Y. Fan, A. Sanchez-Rubio. *1450-nm high-brightness wavelength-beam combined diode laser array*. Optics Express 16 (13) (2008), 9405-9410.
5. 4 B.Faircloth, *High-brightness high-power fiber coupled diode laser system for material processing and laser pumping*. Proc. SPIE 4973, High-power Diode Laser Technology and Applications (2003), 34-41.
5. 5 A. Knitsch, M. Traub, K. Rotter, D. Hoffmann, P.Loosen, R. Poprawe, *Characterizacion of tapered diode laser bars for the use in high power diode laser systems*. Proc. SPIE 5336, High-Power Diode Laser Technology and Applications II (2004), 56-64.
5. 6 N. Coluccelli, *Nonsequential modeling of laser diode stacks using Zemax: simulation, optimization and experimental validation*. Applied Optics 49 (22) (2010), 4237-4245.
5. 7 [http://www.jenoptik.com/en\\_home](http://www.jenoptik.com/en_home)
5. 8 F. Dorsch, P. Henning, M. Nickel, *High-brightness fiber-coupled diode laser module*. Proc. SPIE 3285, Fabrication, Testing, Reliability and Application (1998), 192.
5. 9 M.Leers, K. Boucke, C.Scholz, T.Westphalen, *Next generation of cooling approaches for diode laser bars*. Proc. SPIE 6456, High-Power Diode Laser Technology and Applications V (2007), 64561A.
5. 10 D. Lorenzen, M. Schröder, J. Meusel; P. Hennig; H. König; M. Philippens; J. Sebastian; R. Hülsewede, *Comparative performance studies of indium and gold-tin packaged diode laser bars*. Proc. SPIE 6104, High-power Diode Laser Technology and Applications IV (2006).
5. 11 G.Bonati, P- Hening, K. Schmidt, *Passively cooled diode laser for high power applications*. Prod SPIE 5336, High-power Diode Laser Technology and Applications II (2004).
5. 12 M.Leers et al., 2008] M. Leers, K. Boucke, *Cooling Approach for High Power Diode Laser Bars*. IEEE J.Quantum Electronic and Technology Conference (2008), 1011-1016
5. 13 P.Y. Hou, , R. Baskaran, K.F. Böhringer, *Optimization of Microscale Thermoelectric Cooling (TEC) Element Dimensions for Hotspot Cooling Applications*. Journal of Electronic Materials 38(7) (2009), 950-953.

5. 14 C. Wessling, St. Hengesbach, J. Geiger, J. Dolkemeyer, M. Traub, D. Hoffmann. *50 W passively cooled, fiber coupled diode laser at 976 nm for pumping fiber lasers using 100  $\mu\text{m}$  fiber bundles.* Proc. SPIE 6876, High-Power Diode Laser Technology and Applications VI (2008), 687614.
5. 15 J. Du, M. Au, L. Zavala, P. Yalamanchili, J. Skidmore, E. Zucker. *Simple Method for Modeling Thermoelectric Cooler (TEC) Performance of Single-Emitter Semiconductor-Laser Packages with Concentrated Head Sources.* Proc. SPIE 7583, High-Power Diode Laser Technology and Applications VIII (2010), 758301.
5. 16 Handbook of Optics (Vol. I—Geometrical and Physical Optics, Polarized Light, Components and Instruments), Third Edition., Mc Graw Hill. (2010). Chapter 12 pp. 484–488
5. 17 J. L. Hostetler, C-L. Jiang, V. Negoita, T. Vethake, R. Roff, A. Shroff, T. Li, C. Miester, U. Bonna, G. Charache, H. Schlüter, F. Dorsch, *“Thermal and strain characteristics of high-power 940 nm laser arrays mounted with AuSn and In solders,”* Proc. SPIE 6456. High-Power Diode Laser Technology and Applications V, 645602 (2007).
5. 18 *Optics* (4<sup>th</sup> Edition). E. Hecht. Hardcover, 2001.



# **CAPÍTULO 6**

## **6. APLICACIÓN DEL PROTOTIPO LÁSER A LA MICROSOLDADURA DE TERMOPLÁSTICOS**

Este capítulo presenta la aplicación del prototipo láser desarrollado en el presente trabajo a la microsoldadura termoplásticos frecuentemente empleados en el sector de la automoción. Concretamente, el material seleccionado es ABS (acrylonitrile/butadiene/styrene), por sus buenas propiedades mecánicas y su uso generalizado en el ámbito industrial. El objetivo de este capítulo se centra en analizar la influencia de los parámetros ligados al proceso tales como velocidad de formación de un cordón de soldadura, potencia del láser y propiedades físico-químicas de los materiales sobre la calidad e integridad del cordón de soldadura.

En primer lugar se presenta una breve revisión bibliográfica de los estudios existentes relativos a la soldadura láser por transmisión de termoplásticos (sección 6.1). La sección 6.2 se centra en la caracterización físico-química de los materiales considerados en el proceso. Esta caracterización térmica y óptica es fundamental a la hora de determinar la correlación entre la calidad e integridad del cordón de soldadura y los parámetros de proceso empleados. Finalmente, tras los ensayos de soldadura, y con el fin de determinar dicha correlación, la sección 6.4 se centra en la inspección microscópica del cordón y su integridad

## *Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura de Termoplásticos*

mecánica como factores identificativos de la calidad del mismo y, por tanto, de la idoneidad del prototipo láser desarrollado en el proceso industrial presentado. En dicha sección se discutirán los resultados en términos de morfología del cordón de soldadura y sus propiedades mecánicas.

### **6.1 Introducción**

La soldadura láser por transmisión de termoplásticos es una tecnología emergente en aplicaciones donde se precisan requerimientos críticos tales como adhesión hermética y minimización de área afectada en las zonas cercanas a la soldadura. Dichos requerimientos son exigidos en aplicaciones como dispositivos médicos, ensamblaje de dispositivos micro-electro-mecánicos (*MEMS* del inglés *MicroElectroMechanical Systems*) [6. 1 - 6. 5] y automoción [6. 6]. En este sentido, los láseres de CO<sub>2</sub> han sido tradicionalmente utilizados para la soldadura de láminas de plástico de espesor reducido (indicar tamaños) de acuerdo al elevado coeficiente de absorción de estos materiales a la radiación infrarroja [6. 1]. Por otro lado, los láseres de Nd:YAG y de diodo se emiten en un rango espectral muy cercano: 1064nm y 800-1000nm respectivamente. La mayor parte de termoplásticos no absorbe directamente la radiación producida por ambos tipos de láseres. Por lo tanto, es necesario el uso de pigmentos adecuados en los termoplásticos para incrementar la capacidad de absorción del polímero y permitir así su calentamiento.

La soldadura láser por transmisión se lleva a cabo mediante el calentamiento localizado en la inter-cara de los dos termoplásticos a unir. Uno de los termoplásticos necesita ser ópticamente transparente a la radiación del láser mientras que el otro debe absorber dicha radiación. La Figura 1 muestra de manera esquemática los diferentes elementos involucrados en la soldadura láser por transmisión: 1) termoplástico transparente a la radiación láser considerada, 2) termoplástico absorbente a la radiación láser considerada, 3) haz láser; 4) zona de termoplásticos fundida; 5) cordón de soldadura; 6) utillaje para garantizar un correcto contacto entre ambos termoplásticos.

## Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura de Termoplásticos

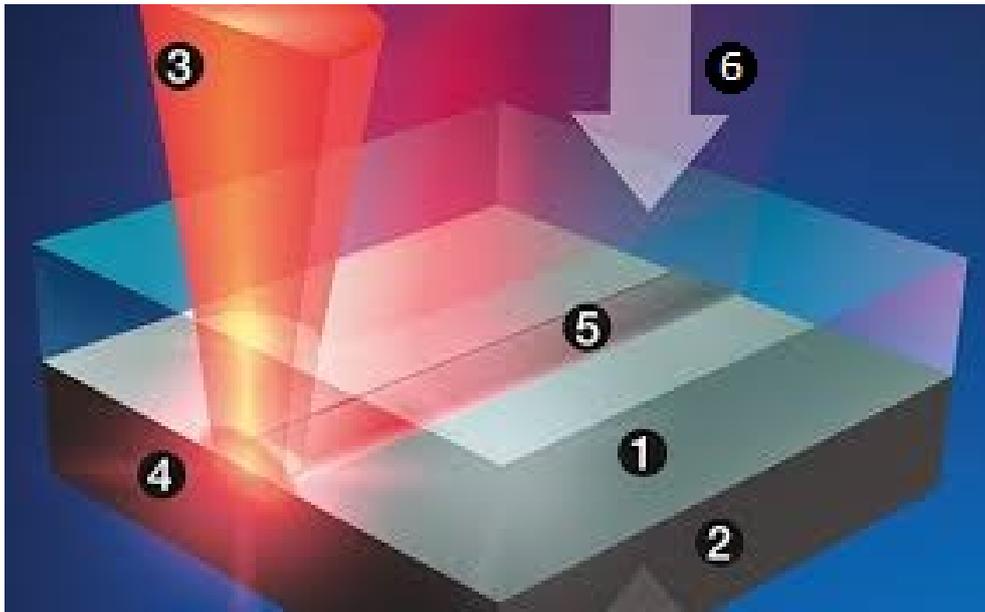


Figura 6. 1: Configuración de la soldadura láser por transmisión de termoplásticos [6. 7].

Durante el proceso de soldadura la energía que es absorbida en 2) conlleva un calentamiento del termoplástico. Cuando dicha temperatura supera la temperatura de fusión del termoplástico, éste comienza a fundir y, gracias al contacto garantizado por 6), el termoplástico transparente 1) alcanza su punto de fusión como consecuencia del calor transmitido por conducción. Una vez fundidos ambos termoplásticos se forma el cordón de soldadura.

El proceso de soldadura láser por transmisión de termoplásticos puede ser llevado a cabo mediante tres métodos. Una de ellos considera una capa absorbente en la intercara entre ambos componente poliméricos [6. 8-6. 10]. La segunda implica la utilización de aditivos absorbentes a la radiación láser considerada. En este caso las propiedades ópticas y térmicas del termoplástico absorbente son parámetros de proceso clave para determinar la absorción de la radiación incidente [6. 11, 6. 12]. El último método en la soldadura de termoplásticos está centrada en la soldadura de dos o más termoplásticos transparentes a la radiación láser utilizada. Este proceso está basado en la absorción natural que algunos termoplásticos presentan en el rango espectral del infrarrojo cercano (1500-2000nm). Así, absorbentes o aditivos especiales pueden ser eliminados del proceso lo cual permite reducir costes adicionales mediante el empleo termoplásticos en los que pueda llevar a cabo la soldadura por láser [6. 13, 6. 14].

El proceso de soldadura láser por transmisión que hace uso de aditivos absorbentes ha sido aplicado a un amplio rango de termoplásticos en la última década, tales como

## *Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura de Termoplásticos*

polietileno (PE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), polimetilmetacrilato (PMMA), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), policarbonato (PC) y polieteretercetona (PEEK). Diferentes estudios analizan el efecto de los parámetros ligados al proceso (densidad de potencia y tiempo de interacción con la materia) y el dispositivo experimental (sistema láser y dispositivo de anclaje) en la calidad de los cordones de soldadura [6. 15 - 6. 23]. Sin embargo, son pocos los estudios que hayan investigado la influencia de la concentración de pigmentos/aditivos del termoplástico absorbente en la calidad del cordón de soldadura. Entre otros estudios, Visco et al. confirmaron que se requiere una concentración de nanotubos de carbono (CNT) inferior al 0.5% en peso es requerida para garantizar una buena calidad de la soldadura, soportando altas cargas de rotura [6. 2, 6. 16]. Abed et al., por su parte, investigaron la soldadura láser por transmisión de polipropileno utilizando cuatro porcentajes diferentes de negro de humo: (0.05%, 1%, 2% y 5 % en peso). El estudio se centró en el análisis de la influencia del contenido de pigmentos y de las propiedades ópticas del termoplástico absorbente en las propiedades del cordón de soldadura [6. 12]. Los autores identificaron los la velocidad de soldadura, potencia y las propiedades ópticas del termoplástico absorbente como parámetros clave para obtener cordones de soldadura con buenas propiedades mecánicas. Además, observaron diferentes zonas afectadas térmicamente en el cordón de soldadura con modificaciones en la microestructura del termoplástico. Potente et al. estudiaron la unión de PEEK-PEEK mediante soldadura láser por transmisión cuasi-simultánea, donde la parte inferior fue pigmentada con varios contenido de negro de humo [6. 4]. Además, Aden et al., analizaron el efecto del *scattering* producido por los aditivos sobre la calidad de los cordones de soldadura [6. 17]. Estudios similares se han llevados a cabo sobre diferentes materiales. Sin embargo, ninguno de los estudios citados ha considerado el efecto de diferentes contenidos de CNTs sobre la calidad de la soldadura.

Otro de los parámetros determinantes en el proceso de soldadura descrito es la potencia láser aplicada sobre el termoplásticos absorbente. Un nivel bajo de potencia láser conlleva baja penetración, deficiente transmisión de calor y una carencia de material unido en la interfaz entre ambos materiales. Las anteriores características dan lugar a una soldadura de baja calidad. Por otro lado, altas potencias láser pueden producir sobrecalentamiento del termoplástico provocando su degradación. La fuerza de cizalladura máxima que puede soportar la soldadura aumenta cuando la potencia láser se incrementa hasta que el termoplástico absorbente alcanza su temperatura de degradación. A partir de este punto, si la potencia láser se incrementa, las soldaduras presentarán material descompuesto y la máxima fuerza de cizalladura que puede soportar la soldadura disminuirá [6. 25, 6. 26].

## *Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura de Termoplásticos*

En el mayor número de casos que involucran procesamiento de materiales por láser en aplicaciones industriales, la velocidad del proceso es un parámetro relacionado con el sistema láser utilizado. El material a soldar necesitará cantidades similares de energía por unidad de área independientemente de que se utilicen bajas o altas velocidades. Por otro lado, la relación potencia-velocidad es determinante tanto en las características morfológicas (perfil transversal) como mecánicas (máxima carga de cizalladura) de la soldadura. Por ello, es común el empleo del parámetro denominado *energía lineal* o *line energy (LE)*, el cual se define como el cociente entre la potencia láser aplicada y la velocidad de soldadura (Figura 6. 2). Por lo tanto, *LE* proporciona información relativa a la energía aplicada en el material por unidad de longitud. Bajos valores de energía lineal pueden dar lugar a adherencias o soldaduras débiles mientras que valores demasiado altos implican una descomposición del material. Dicho comportamiento es ilustrado en la Figura 6. 2a) donde es posible observar la tendencia de la carga de rotura de la soldadura en función de la energía lineal (*LE*). Así, máximos valores de carga de rotura se obtienen para valores intermedios de *LE* (2), donde el polímero absorbente ha alcanzado temperaturas superiores a su temperatura de transición vítrea pero inferiores a la temperatura de degradación (4). La Figura 6. 2b) [6. 27] muestra cortes transversales realizados en soldadura de PP para diferentes valores de *LE* en los que es posible apreciar una clara dependencia del resultado de la soldadura con *LE*.

## Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura de Termoplásticos

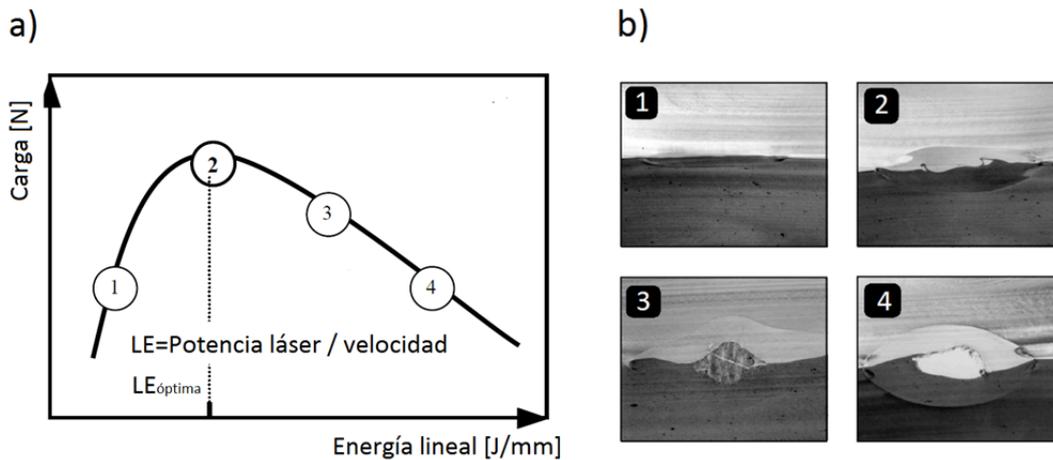


Figura 6. 2: a) Correlación entre energía lineal y máxima fuerza de cizalladura; b) Resultados de soldadura correspondientes a 1. - Soldadura sin adhesión, 2. Soldadura óptima, 3. Soldadura con principios de descomposición, 4. Descomposición, soldadura deficiente [6. 27].

Sin embargo, la energía lineal no proporciona toda la información sobre los parámetros que influyen en el proceso de soldadura, adicionalmente, deben tenerse en cuenta parámetros como la geometría y distribución de irradiancia del spot aplicado sobre el termoplástico absorbente.

Finalmente, otro aspecto que debe tenerse en cuenta es la presión resultante durante el proceso de soldadura. Dicha presión es una combinación de la presión externa ejercida por el utillaje y por la expansión térmica de los materiales durante la transformación de energía incidente en calor. Por consiguiente un aspecto de gran relevancia en el proceso de soldadura de termoplásticos por láser es el utillaje mediante el cual se debe garantizar un contacto adecuado entre los dos termoplásticos. Con él es posible gobernar y regular el espaciado entre los termoplásticos. Por otro parte, algunos estudios previos [6. 28] analizan la influencia de la presión ejercida por la expansión térmica del material tras haber alcanzado el estado líquido.

El objetivo del presente capítulo es analizar las propiedades de soldadura de ABS, empleando el prototipo láser desarrollado, en función de los parámetros del proceso de soldadura y de la concentración de aditivos. Como aditivo se han considerado diferentes concentraciones de CNTs.

## **6.2 Materiales y método**

El termoplástico empleado en este trabajo ha sido BASF Terluran® GP-35 ABS (ABS) [6. 29]. Los ensayos de soldadura se han llevado a cabo utilizando dos láminas de ABS: sin aditivos, transparente a la radiación láser infrarroja, y la segunda con aditivos (CNTs: nanotubos de carbono Nanocyl 700) que absorben dicha radiación. Se han estudiado dos concentraciones diferentes de CNTs: 0.01% y 0.05% en peso. La longitud media de los CNTs se encuentra en torno a 1.6 $\mu$ m y el diámetro es de 9.5nm. Se fabricaron probetas de dimensiones 80x90x3mm mediante una inyectora [ARBURG 420C 350-1000] trabajando en un rango de temperatura de 60°C-250°C a lo largo del cilindro, siendo la temperatura de inyección de 55°C durante 4min a una presión de 39.4bar.

El aditivo (CNTs) del termoplástico ABS fue elegido en base a dos criterios: sus propiedades de absorción a la longitud de onda elegida ( $\lambda=808$ nm) y las propiedades mecánicas que le confiere al termoplástico. A continuación se presenta la caracterización de los materiales desde un punto de vista mecánico, óptico y térmico.

### **6.2.1 Caracterización mecánica de los materiales**

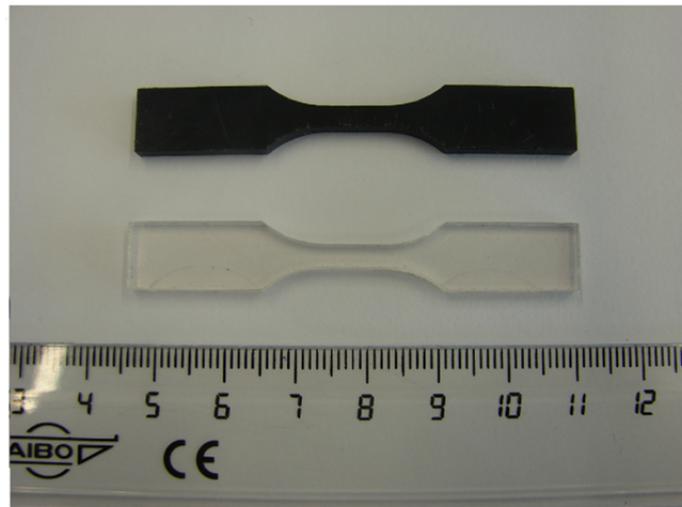
Las propiedades mecánicas han sido analizadas mediante ensayos de tracción sobre probetas de ABS con y sin aditivos. Las probetas utilizadas fueron mecanizadas según la geometría mostrada en la Figura 6. 3a), cuyas dimensiones se establecen en la norma ASTM D638-82a [6. 30]. Los ensayos fueron llevados a cabo en una máquina INStron 3369 Static Universal Testing con una máxima capacidad de carga de 50kN y una velocidad de desplazamiento de los amarres de 5mm/min, de acuerdo con lo establecido en la misma norma, que rige las condiciones de los ensayos para determinar las propiedades de tracción de los plásticos reforzado y sin reforzar. Para cada uno de los tres tipos de termoplástico (ABS, ABS-0.01%CNTs y 0.05%CNTs) se mecanizaron y ensayaron tres probetas.

La Figura 6. 3b) muestra las curvas de deformación experimentadas por el ABS (con y sin aditivos) hasta producirse la rotura. La caracterización mecánica de los materiales fue

## Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura de Termoplásticos

llevada a cabo mediante los siguientes parámetros: carga máxima alcanzada por el termoplástico, carga de rotura y extensión sufrida por el polímero.

a)



b)

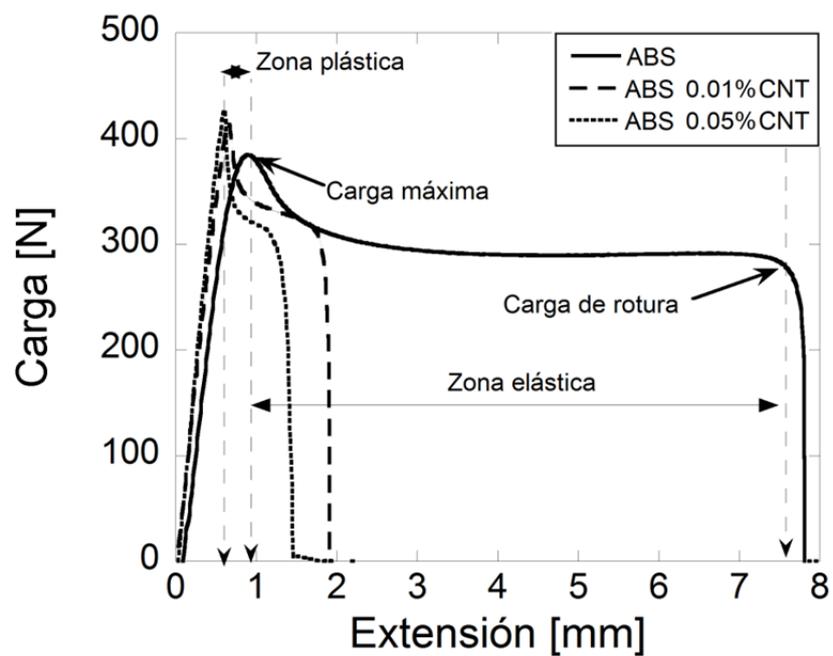


Figura 6. 3: a) Dimensiones de las probetas de soldadura; b) Evolución de la carga aplicada sobre probetas de tracción de ABS sin aditivos (línea sólida), ABS-0.01%CNTs (línea punteada) y ABS-0.05%CNTs (línea discontinua).

## Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura de Termoplásticos

En la Figura 6. 3b) puede observarse en primer lugar la diferencia entre los valores de extensión sufridos por cada uno de los materiales, apreciando en el caso de ABS sin aditivos (línea sólida) una elongación significativamente mayor que en presencia de CNTs en el polímero. Por tanto, los dos termoplásticos con aditivos presentan una mayor fragilidad que en ausencia de aditivos, dado que la rotura se produce con una deformación significativamente más pequeña.

La Tabla 6. 1 informa sobre los parámetros mecánicos obtenidos para los tres materiales empleados. Dichos parámetros se presentan en términos de tensión y no de carga de modo que su valor no depende del espesor de la probeta ensayada. Es posible observar un aumento tanto de la tensión máxima como de la tensión a la cual se produce la rotura cuando añadimos una cierta concentración de CNTs en el ABS. Por tanto, mediante la aditivación conseguimos aumentar en torno a un 13% la tensión de rotura del termoplástico que actuará como absorbente, así como su fragilidad. En este sentido, cuando se consideren áreas de soldadura lo suficientemente grandes para que su tensión de rotura sea comparable a la de los termoplásticos, es importante tener en cuenta las modificaciones en las propiedades mecánicas que introducen los aditivos.

	ABS	ABS-0.01%CNT	ABS-0.05%CNT
Tensión máxima [MPa]	37.9 ± 0.1	40.6 ± 0.3	42.1 ± 0.2
Tensión de rotura [MPa]	27.9 ± 0.2	31.5 ± 0.4	31.9 ± 0.2
Extensión [mm]	7.6 ± 0.2	1.7 ± 0.1	1.3 ± 0.3

Tabla 6. 1: Parámetros característicos de los ensayos de tracción mostrados en la Figura 6. 3b).

### 6.2.2 Caracterización óptica de los materiales

Mediante el empleo de aditivos en el material que actuará de absorbente, las propiedades ópticas del mismo cambian, lo que influirá en el proceso de soldadura. En este sentido, el coeficiente de absorción del material cambiará con la introducción de CNTs en el material.

En cualquier proceso en el que se irradia un material con radiación láser, la intensidad a una cierta profundidad ( $x$ ) del material viene dada por la ley de Lambert-Beer

## Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura de Termoplásticos

$$I(x) = I_0 (1 - r) \cdot \exp(-\alpha \cdot x) \quad (6.1)$$

$$\alpha = (4\pi / \lambda_0) \cdot k \quad (6.2)$$

Donde  $I(x)$  es la intensidad del láser a una profundidad  $x$ ,  $I_0$  la intensidad del haz incidente,  $\alpha$  el coeficiente de absorción del material,  $r$  el coeficiente de reflexión,  $\lambda_0$  la longitud de onda en el vacío y  $k$  el coeficiente de extinción. De acuerdo con esta ecuación, el efecto de la radiación láser sobre la superficie del material y, en último término, la calidad del cordón de soldadura dependen en gran medida de las propiedades del material, tales como los coeficientes de reflexión y absorción.

El coeficiente de absorción ( $\alpha$ ) representa de las pérdidas de radiación a lo largo del material debido a efectos de absorción y dispersión. En termoplásticos con estructura amorfa, los efectos de dispersión pueden ser despreciados [6. 27] y por tanto, la intensidad del haz láser en el medio es una combinación de intensidad: a) reflejada de forma directa o difusa ( $R$ ), b) transmitida a través del medio ( $T$ ) y c) absorbida en el medio ( $A$ ). La suma de estas tres contribuciones compone el 100% de la intensidad incidente:

$$R + T + A = 100\% \quad (6.3)$$

En el presente trabajo, se ha llevado a cabo la medida experimental del porcentaje de radiación reflejada y transmitida con el fin de disponer de una medida indirecta del cambio en el coeficiente de absorción del termoplástico aditivado con CNTs. Estos porcentajes fueron medidos mediante un espectrofotómetro comercial con esfera integradora de Jasco (V500 UV/VIS/NIR) [6. 31]. De este modo, variaciones en la absorción de la radiación láser por parte del material en la longitud de onda de trabajo puede ser analizadas en función del contenido de CNTs.

La Figura 6. 4a) muestra el espectro de absorción correspondiente a probetas de ABS con y sin aditivos. Los resultados muestran que el ABS sin aditivar es altamente transparente a la radiación infrarroja. Concretamente, en el caso de considerar una longitud de onda similar a la del láser desarrollado, el coeficiente de absorción se encuentra en torno a  $A_{\text{ABS}}=0.13\%$ , incrementándose hasta 90.5% y 94% cuando el ABS se aditiva con una concentración de 0.01% y 0.05% CNTs respectivamente. Por otro lado, la absorción se incrementa en un 3.5% cuando pasamos de considerar un porcentaje de CNTs de 0.01% a 0.05%.

## *Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura de Termoplásticos*

En el caso de considerar únicamente las muestras aditivadas, la Figura 6. 4b muestra los cocientes entre los coeficientes de absorción ( $\alpha_{(0.05\%CNT)}/\alpha_{(0.01\%CNT)}$ ) y reflexión ( $R_{0.05\%CNT}/R_{0.01\%CNT}$ ) respectivamente, en función de la longitud de onda incidente. Estos resultados han sido obtenidos a partir de los espectros de absorción (Figura 6. 4a), teniendo en cuenta la ley de Lamber-Beer (ec.6.1). El análisis de los resultados indica que, a la longitud de onda incidente de la radiación láser, los coeficientes de absorción y reflexión correspondientes al ABS con alta concentración de CNTs son respectivamente 1.6 y 0.7 veces los valores obtenidos para el caso del ABS con baja concentración de CNTs. Esto implica que la intensidad requerida para alcanzar cordones de soldadura óptimos debería cambiar en función de la concentración de CNTs utilizada. Otra implicación del anterior resultado es el efecto sobre la penetración de la radiación en el material, de acuerdo a la ec. (6.1), esta disminuirá cuando el contenido de CNTs aumente. Por lo tanto, para un mismo valor de la intensidad incidente, la intensidad en capas superficiales del material será mayor en el caso de considerar el material con altas concentraciones de aditivos como sustrato absorbente.

Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura de Termoplásticos

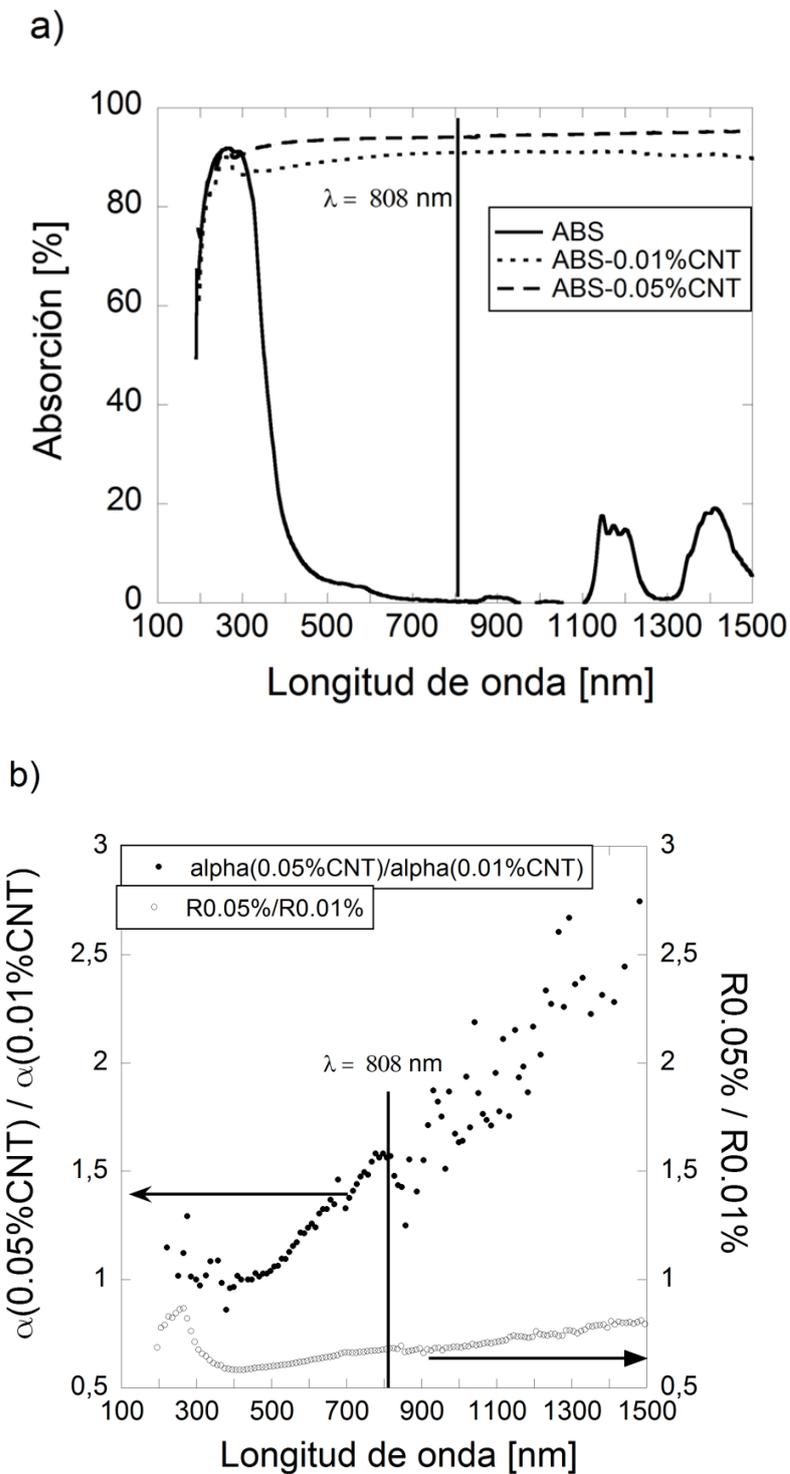


Figura 6. 4: a) Espectros de absorción para el ABS (línea continua), ABS-0.01%CNT (línea punteada) y ABS-0.05%CNT (línea discontinua); b) Cocientes entre los coeficientes de absorción ( $\alpha_{(0.05\%CNT)}/\alpha_{(0.01\%CNT)}$ ) y reflexión ( $R_{0.05\%CNT}/R_{0.01\%CNT}$ ) del ABS con los diferentes porcentajes en peso de CNTs frente a la longitud de onda.

### **6.2.3 Caracterización térmica de los materiales**

Como se ha citado anteriormente, en el proceso de soldadura láser por transmisión, la parte de la radiación incidente absorbida por el material absorbente se transforma en calor, aumentando la temperatura de la zona afectada por dicha radiación. Para llevar a cabo la soldadura es necesario mantener el área de unión entre ambas partes (materiales transparente y absorbente) por encima de la *temperatura de transición vítrea* ( $T_g$ ) y por debajo de la temperatura de descomposición del termoplástico absorbente. El rango de temperaturas, entre la  $T_g$  y la temperatura de descomposición, que garantizan una soldadura de calidad es típicamente de  $\Delta T \approx 150^\circ\text{C}$  para termoplásticos no reforzados [6. 27]. La temperatura de transición vítrea es la temperatura a la cual el movimiento térmico de las moléculas permite que estas superen los enlaces secundarios entre ellas. En consecuencia, el termoplástico puede cambiar su estado de dureza, rigidez o cristalinidad a un estado más "gomoso" adquiriendo cierta elasticidad y capacidad de deformación física sin fractura.

La caracterización térmica de los tres tipos de probetas de ABS empleados ha sido llevada a cabo mediante Calorimetría Diferencial de Barrido DSC (del inglés *Differential Scanning Calorimetry*) (DSC 1 Stare System from Mettler Toledo) [6. 32]. La Figura 6. 5 muestra dicha caracterización en el caso de considerar ABS aditivado y sin aditivar. Esta tecnología permite medir cuantitativamente el calor específico de los diferentes termoplásticos mediante el análisis de su respuesta dinámica. En el caso del ABS sin aditivos, estos resultados revelan una temperatura de transición en torno a  $100^\circ\text{C}$ , correspondiente a su temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ). En el caso del ABS con distintos porcentajes de CNTs, el inicio de esta curva de transición ocurre a temperaturas más bajas. Por lo tanto, la temperatura de transición vítrea disminuye levemente cuando la concentración de CNTs aumenta. Sin embargo, para ambas probetas de ABS aditivado, el calor específico muestra la misma tendencia en función de la temperatura.

Además, no se observa ningún inicio de las relajaciones secundarias (asociadas a cambios en el grado de cristalinidad) por el cambio en el contenido de CNTs. Estos resultados sugieren que la respuesta térmica del ABS aditivado a la radiación láser no debería presentar cambios significativos con la concentración de CNTs.

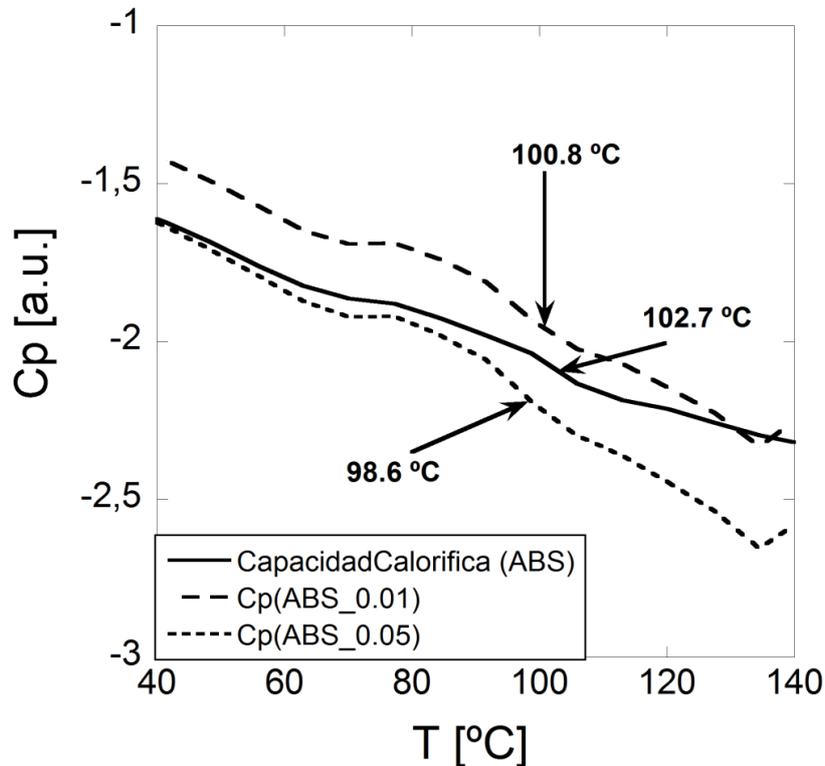


Figura 6. 5: Curvas resultantes del análisis por DSC de ABS, ABS-0.01%CNT y ABS-0.05%CNT.

## 6.3 Soldadura láser por transmisión

### 6.3.1 Metodología

El estudio experimental ha sido llevado a cabo utilizando el prototipo láser descrito en los Capítulos 4 y 5 [6. 33] con una potencia máxima de salida de 57W emitiendo una radiación de longitud de onda  $808 \pm 4\text{nm}$ . Las barras de diodos láser fueron acopladas a una fibra de  $600\mu\text{m}$  de diámetro y 0.22 de apertura numérica. La radiación láser procedente de la fibra óptica se focaliza mediante un sistema óptico con una longitud focal 50mm. Se ha caracterizado la correspondiente cáustica (Anexo I: *Analizador de haz BeamMaster7 Coherent*) a una potencia de emisión de 8W, obteniendo un valor de cintura de haz  $2w_0 = 976.2 \pm 0.4\mu\text{m}$ .

Los principales parámetros de proceso influyentes en la calidad de la soldadura son: la potencia del láser, la velocidad de la formación del cordón de soldadura, dimensiones y distribución de irradiancia del spot y la presión ejercida a lo largo de las probetas. Asimismo,

propiedades térmicas y ópticas del material polimérico también juegan un papel importante en el proceso de soldadura. En consecuencia, en el presente trabajo se realizan los ensayos de soldadura láser por transmisión, siguiendo la estrategia de soldadura por contorno [6. 27], posicionando las dos probetas de ABS de acuerdo con el esquema presentado en la Figura 6. 6. De este modo, para cada concentración de nanotubos de carbono, se han considerado tres velocidades diferentes de proceso ( $v = 10\text{mm/s}$ ,  $v = 15\text{mm/s}$  y  $v = 20\text{mm/s}$ ) variando la potencia del haz incidente. Durante todos los ensayos se ha mantenido constante la presión externa ejercida sobre las probetas. Como se citó en la sección 6.1, la selección del utillaje que garantiza una presión uniforme durante el proceso es fundamental a la hora de evitar posibles irregularidades en el mismo. La Figura 6. 6 muestra el esquema del utillaje desarrollado para los ensayos de soldadura.

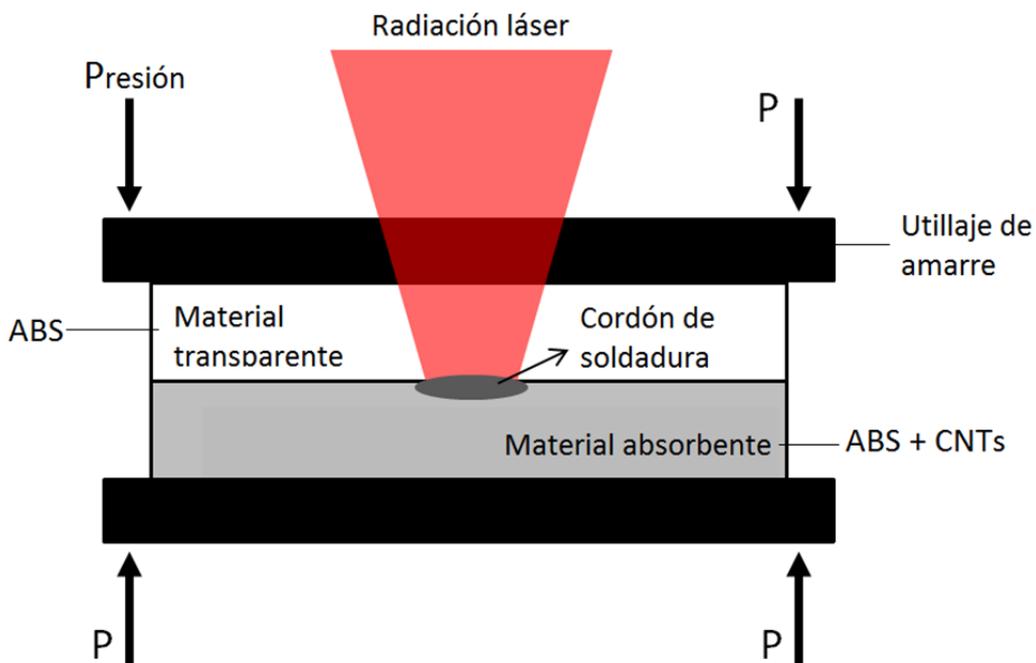


Figura 6. 6: Vista esquemática del montaje experimental para soldadura de láminas de ABS: material inferior ABS con CNTs (material inferior) y ABS sin aditivos (material superior).

La configuración experimental del proceso se muestra en la Figura 6. 7a). El solapamiento entre las dos placas rectangulares es de 35mm, dando lugar a un área de solape de  $35 \times 23\text{mm}^2$ . El cordón de soldadura ha sido localizado en el punto medio de la longitud solapada.

## Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura de Termoplásticos

Las probetas de ABS fueron posicionadas en la mesa con movimiento x-y mostrada en la Figura 5. 43. El cabezal óptico (Figura 5. 40 y Figura 5. 43) permaneció fijo durante el proceso de soldadura mientras la mesa x-y realizaba el movimiento a las velocidades citadas.

Finalmente, las propiedades mecánicas del cordón de soldadura (integridad de la soldadura) se analizaron utilizando el mismo equipamiento descrito en la sección 6.2.1. Sin embargo, la geometría de las probetas empleadas en los ensayos de soldadura y la caracterización del cordón fueron ligeramente distintas a las empleadas en la Figura 6. 3a), con objeto de maximizar el área disponible para producir la soldadura. Por esta razón, probetas con geometría rectangular ( $23 \times 80 \text{mm}^2$ ) fueron consideradas. Para cada condición experimental, se realizaron tres medidas de la fuerza de tracción/cizalla de la soldadura con el objetivo de obtener una buena estadística (Figura 6. 7b).

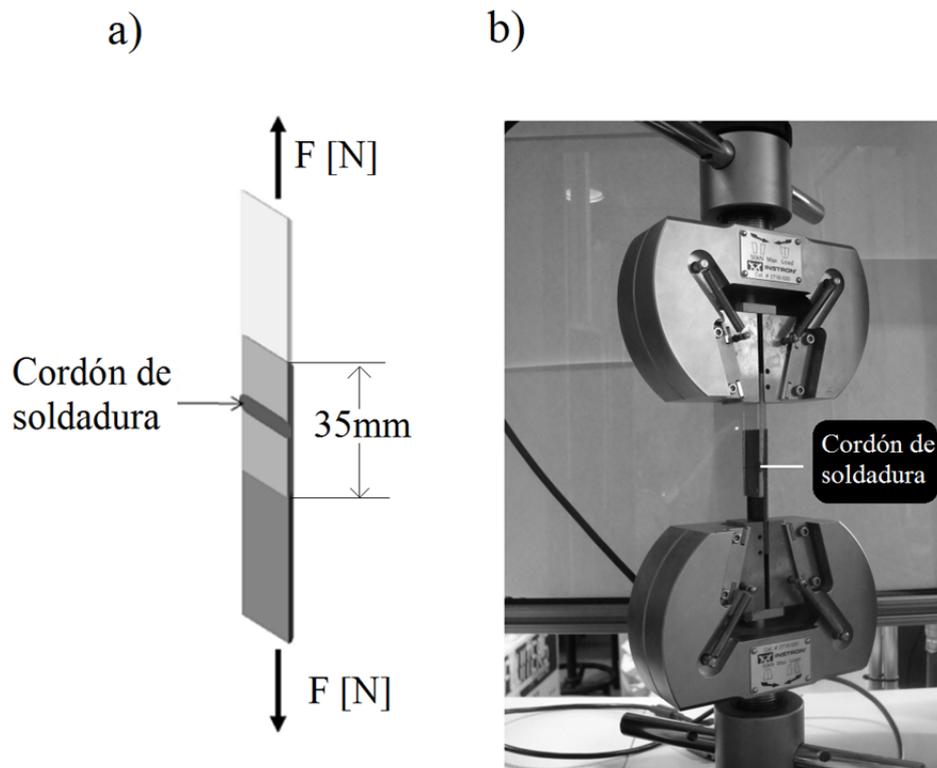


Figura 6. 7: a) Vista esquemática del método de medida de la carga de rotura de la soldadura; b) Montaje experimental.

El análisis morfológico del cordón de soldadura se llevó a cabo mediante una inspección, tanto de la superficie como de su sección transversal. Para realizar esta última, se realizó un corte transversal a las probetas soldadas y posteriormente se pulió la zona a

analizar. Los cordones de soldadura fueron medidos mediante un microscopio óptico (Olympus SZX16 U-TV0.5xC-3). Mediante dicha inspección se analizaron efectos de descomposición del material, degradación, áreas fundidas así como la aparición de poros.

### **6.3.2 Resultados y discusión**

De acuerdo con la configuración experimental presentada en la sección 6.3.1, se realizaron ensayos de soldadura láser por transmisión con el fin de estudiar el efecto de los parámetros de proceso (velocidad de soldadura y potencia láser) y propiedades físico-químicas de los materiales en la calidad y morfología de los cordones de soldadura. La caracterización de estas propiedades se realizó mediante un microscopio óptico y ensayos mecánicos de tracción.

La Figura 6. 8 muestra una vista superficial de la morfología de los cordones de soldadura considerando ABS con baja concentración de aditivos (0.01%CNT) como sustrato absorbente, bajo diferentes condiciones de proceso. Dichas condiciones de proceso dan lugar a soldaduras óptimas, ya que los cordones de soldadura presentan una clara homogeneidad en toda su longitud. Por lo que se puede decir que constituyen un ejemplo representativo de cordones de soldadura considerados óptimos mediante inspección visual.

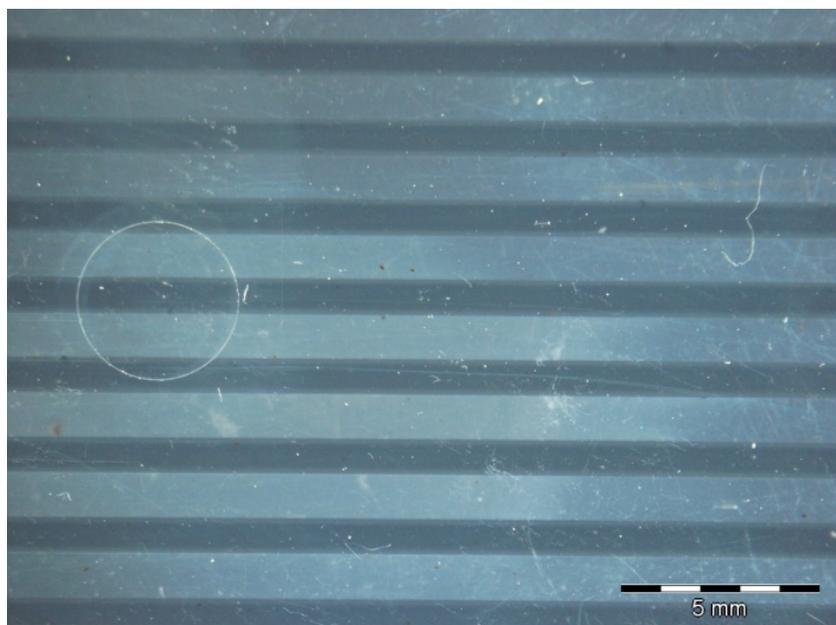


Figura 6. 8: Vista superficial de cordones de soldadura óptimos.

## Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura de Termoplásticos

La Figura 6. 9 muestra el efecto de la potencia láser en la morfología del cordón de soldadura, tanto en su sección transversal (Figura 6. 9b, d) y f)) como superficial (Figura 6. 9 a), c) y e). Los ejemplos mostrados corresponden a soldaduras sobre ABS/ABS-0.01 wt% a una velocidad de  $v = 15\text{mm/s}$  y diferentes potencias. En dichos ejemplo es posible observar que, cuando la potencia láser es demasiado baja ( $P \approx 6\text{W}$ ), el cordón de soldadura presenta una carencia de calidad con presencia de poros confinados en la parte central del cordón (Figura 6. 9a). Por otro lado, cuando la intensidad del haz láser es demasiado alta ( $P \approx 17\text{W}$ ), un exceso de temperatura en la unión conlleva la degradación del material (Figura 6. 9e). Para una potencia aplicada intermedia ( $P \approx 8.5\text{W}$ ), puede observarse que la morfología de la soldadura puede ser considerada aceptable, similar a la mostrada en la Figura 6. 8. Por lo tanto, mediante inspección visual, cordones de soldadura con buena calidad se caracterizan por la uniformidad de la zona fundida de polímero, en ausencia de poros, grietas o defectos (Figura 6. 9c) y d). De este modo, mediante inspección visual se seleccionan los cordones de soldadura que presentan unas propiedades morfológicas aceptables.

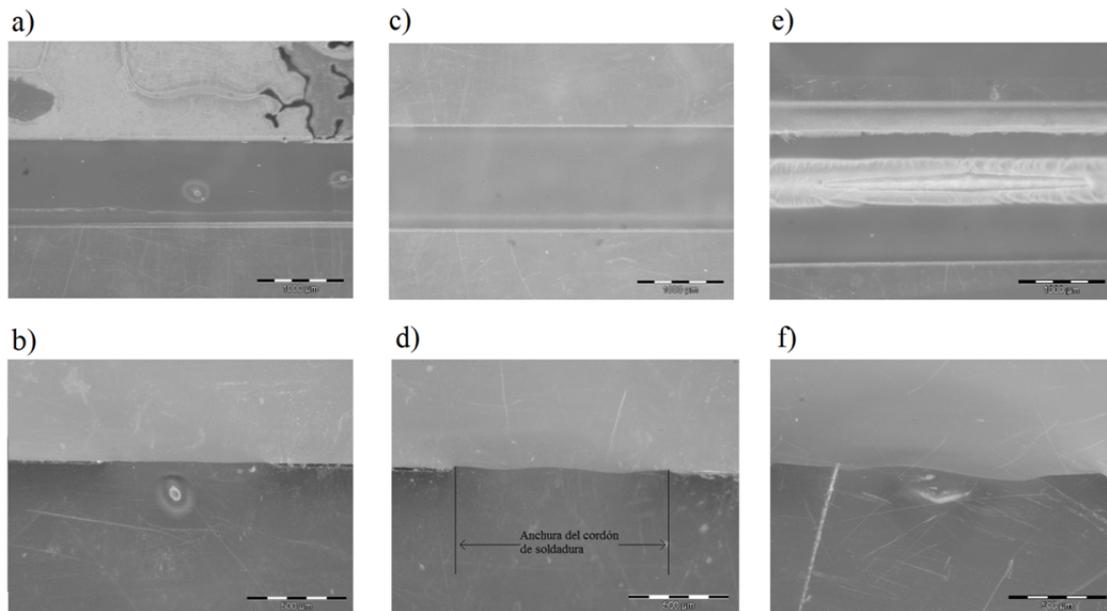


Figura 6. 9: Vista superficial y su correspondiente sección transversal de cordones de soldadura representativos de; a) b) baja calidad  $P=6\text{W}$ ; c) d) unión óptima  $P=8.5\text{W}$ ; e) f) unión degradada con  $P=16.5\text{W}$  sobre probetas de ABS/ABS-0.01 wt% a una velocidad de  $v=15\text{mm/s}$ .

La Figura 6. 10 muestra la anchura de los cordones de soldadura óptimos en función de la  $LE$  para probetas de ABS con las dos concentraciones de CNTs y las tres velocidades de proceso seleccionadas  $v = 10\text{mm/s}$ ,  $v = 15\text{mm/s}$ ,  $v = 20\text{mm/s}$ . Es posible observar dos regímenes diferentes dependiendo del material considerado. En el caso de baja

## *Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura de Termoplásticos*

concentración de CNT, el rango de valores de  $LE$  donde se consiguen cordones de soldadura con buena calidad es significativamente superior al rango encontrado en el caso de una concentración más alta de CNTs. Es importante apreciar que, el solapamiento entre los rangos de operación de ambos procesos es casi inexistente (barra sombreado en la Figura 6. 10). Para las dos concentraciones de CNTs consideradas, las anchuras de los cordones de soldadura han sido ajustadas a dos rectas obteniendo valores de las pendientes de  $1,284J^{-1}$  y  $0.943J^{-1}$  y ordenadas en el origen de  $312\mu m$  y  $717\mu m$  para los ensayos realizados sobre ABS/ABS-0.01 wt% y ABS/ABS-0.05 wt% respectivamente. En el caso del ABS con alta concentración de CNTs, es posible observar mayores desviaciones, con respecto a la recta de ajuste, para las más bajas velocidades de soldadura ensayadas. Además, se aprecia que la desviación estándar asociada a la anchura del cordón de soldadura es mayor en el caso de considerar estas condiciones de proceso.

Por el contrario, en el caso del ABS con bajas concentraciones de CNTs como sustrato absorbente, las mayores desviaciones con respecto a la recta de ajuste fueron encontradas a altas velocidades ( $v = 20mm/s$ ) y altos valores de  $LE$  ( $>0.6 J/mm$ ). Para valores de potencia  $P > 9W$  se observa un mayor efecto sobre la variabilidad de la anchura del cordón de soldadura para las diferentes velocidades. Además, la desviación estándar de los datos experimentales fue mayor que la observada para bajas velocidades.

Teniendo en cuenta estos resultados, la ventana de proceso donde la calidad del cordón es considerada óptima y el proceso estable depende fuertemente de las propiedades físico-químicas de los materiales considerados.

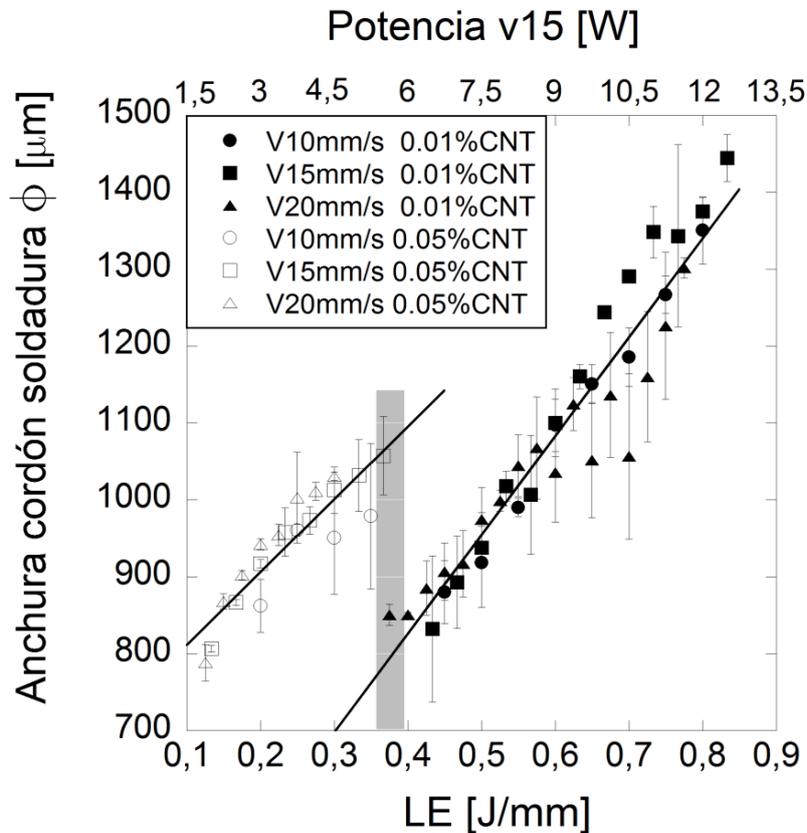


Figura 6. 10: Valores medios de la anchura del cordón de soldadura en función de LE para los dos porcentajes de CNTs y las tres velocidades de proceso consideradas.

Los resultados presentados en la Figura 6. 10 indican que, en el caso de ABS con altas concentraciones de CNTs y para un cierto valor de  $LE$ , la anchura del cordón de soldadura aumenta cuando se incrementa la velocidad de soldadura. Este resultado está directamente relacionado con la dependencia del diámetro del spot con la potencia del láser. Una mayor velocidad de la formación del cordón requiere un incremento de potencia y, por tanto un aumento del tamaño del spot. Los resultados mostrados en la Figura 5. 42 ponen de manifiesto un incremento del diámetro en torno a  $8\mu\text{m}$  cuando consideramos incrementos de  $6\text{W}$  de potencia en un rango de  $1\text{-}6\text{W}$ . Si extrapolamos dichos resultados hasta potencias de  $14\text{W}$  es posible estimar un incremento en el diámetro del spot de  $18\mu\text{m}$ . Teniendo en cuenta que las variaciones de la anchura del cordón de soldadura se encuentran en el intervalo  $0,8\text{-}1,4\text{mm}$  (Figura 6. 10), dichas variaciones son consecuencia principalmente de la respuesta del material al aumento de potencia y, en menor medida, al aumento del tamaño del spot láser. Como muestra la Figura 6. 10, para un valor de  $LE < 0,6\text{J/mm}$  la anchura del cordón para las tres velocidades de proceso consideradas se ajusta a

## *Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura de Termoplásticos*

la regresión lineal representada. Sin embargo para  $LE \geq 0.6\text{J/mm}$  aparecen desviaciones más pronunciadas de los datos experimentales frente al ajuste lineal. En este intervalo, para un cierto valor de  $LE$ , la anchura del cordón de soldadura disminuye cuando la velocidad de proceso alcanza valores de  $v = 20\text{mm/s}$ , frente a los resultados obtenidos a velocidades inferiores.

Los resultados anteriores revelan que la morfología (anchura) de los cordones de soldadura sobre ABS con altas concentraciones de CNTs, depende en mayor medida de los cambios de potencia de la radiación incidente. Para bajas concentraciones de CNTs, sin embargo, el efecto de la velocidad de proceso durante la formación del cordón de soldadura parece ser más relevante. Resultados similares fueron obtenidos en termoplásticos sin presencia de aditivos absorbente de radiación IR: en soldaduras realizadas con un láser de  $\text{CO}_2$  [6. 34], de fibra [6. 35, 6. 36] y de diodos [6. 27].

Es posible observar que, para valores de  $LE < 0.6\text{J/mm}$  la energía necesaria para obtener la misma morfología de cordón es aproximadamente el doble en el caso de altas concentraciones de CNTs (0.05%) frente a la necesaria en el caso de bajas concentraciones (0.01%). Lo anterior está directamente relacionado con las propiedades ópticas de dichos termoplásticos dado que, a partir de los resultados presentados en la Figura 6. 4b, es posible establecer la siguiente relación entre los coeficientes de absorción y reflexión de ambos termoplásticos para  $\lambda = 808\text{nm}$

$$\frac{\alpha_{0.05}}{\alpha_{0.01}} \approx 2.3 \cdot \frac{R_{0.05}}{R_{0.01}} \quad (6.4)$$

Lo anterior demuestra la relevancia de las propiedades ópticas del material en el proceso de soldadura.

Con el propósito de caracterizar la integridad de la soldadura realizada mediante el prototipo láser desarrollado, los cordones de soldadura representados en la Figura 6. 10 fueron sometidos a ensayos de tracción. Las dimensiones de las probetas, equipo utilizado y condiciones del ensayo fueron los descritos en sección 6.3.1. Se realizaron tres medidas para cada una de las condiciones de soldadura representadas en la Figura 6. 10

La Figura 6. 11 muestra la información obtenida en cada ensayo de tracción/cizalladura. Para cada una de las probetas, se obtiene una curva de la carga aplicada sobre la probeta en función de su desplazamiento o extensión. De cada una de las curvas se registra el máximo valor de carga obtenido antes de la rotura de la soldadura, momento a partir del cual las dos piezas pierden contacto y la carga necesaria para su desplazamiento

## Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura de Termoplásticos

disminuye bruscamente. Concretamente la Figura 6. 11 presenta las curvas de extensión correspondientes a las soldaduras realizadas para ABS + ABS-0.01%CNTs a una velocidad de proceso de  $v = 20\text{mm/s}$  para tres valores diferentes de  $LE$ , cada uno de los cuales lleva asociado un de anchura del cordón de soldadura  $\phi$  (Figura 6. 10).

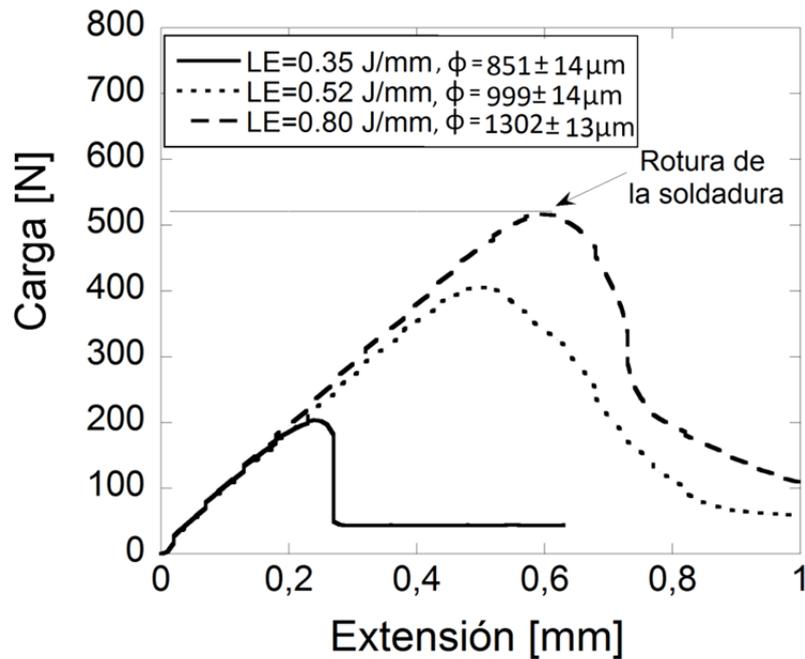


Figura 6. 11: Evolución de la carga aplicada sobre tres probetas de tracción ABS + ABS-0.01%CNTs soldadas a  $v=20\text{mm/s}$  y diferentes potencias (diferentes  $LE$ ).

La Figura 6. 12 muestra los valores medios de la fuerza de rotura previa a la fractura de la soldadura en función de la  $LE$  para cada una de las condiciones representadas en la Figura 6. 10. Los resultados experimentales muestran una evolución con  $LE$  diferente a la observada en la evolución del tamaño del cordón de soldadura (Figura 6. 10). Esta diferencia es más pronunciada en el caso de considerar ABS con mayor concentración de aditivos y valores elevados de  $LE$ .

En el caso de considerar ABS con bajas concentraciones de CNTs como sustrato absorbente, la máxima fuerza de cizalladura se obtiene en torno a  $LE = 0.8\text{J/mm}$ , donde, de acuerdo a los resultados mostrados en la Figura 6. 10, el cordón de soldadura alcanza el máximo valor:  $\phi \approx 1400\mu\text{m}$ . Como se ha citado anteriormente, esta relación directa entre anchura del cordón y fuerza de cizalladura no es observada en el caso de ABS con alto contenido de CNTs. En este último caso aparece un valor máximo de  $LE$  ( $\approx 0.27\text{J/mm}$ ) a

## *Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura de Termoplásticos*

partir del cual la fuerza de cizalladura disminuye sistemáticamente con el aumento de  $LE$ . Este resultado sugiere que, para altas concentraciones de CNTs, no existe una correlación directa entre la anchura del cordón de soldadura y la fuerza de cizalladura. Asimismo, se observa una pequeña disminución en la fuerza de cizalladura máxima con el aumento de la velocidad de soldadura. Este comportamiento no es observado en el caso del ABS con baja concentración de CNTs donde, para un cierto valor de  $LE$ , los cordones de soldadura realizados a velocidades más altas presentaban mayores fuerzas de cizalladura. Estos resultados vuelven a poner de manifiesto que el ABS con altas concentraciones de CNTs presenta una mayor sensibilidad frente a incrementos en la potencia de la radiación láser aplicada en comparación con el ABS con un contenido menor de aditivos.

En el caso de considerar bajas concentraciones de CNTs, la Figura 6. 12 no muestra evidencia de la presencia de una  $LE$  máxima a partir de la cual la fuerza de cizalladura disminuya. De nuevo, este resultado es reflejo de la menor sensibilidad del material (en términos de integridad) al incremento de la potencia de la radiación láser incidente. Esta menor sensibilidad también se pone de manifiesto en los valores de cizalladura obtenidos para un valor de  $LE$  constante y diferentes valores de velocidad de proceso. De acuerdo a los resultados presentados en la Figura 6. 12, la fuerza de cizalladura aumenta con el aumento de la velocidad (correspondiente a un aumento de la potencia, para una  $LE$  constante). Tal y como se discutió en el caso de considerar alta concentración de CNTs, los resultados no muestran evidencias de correlación entre la anchura del cordón de soldadura y la fuerza de cizalladura que soporta dicho cordón.

Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura de Termoplásticos

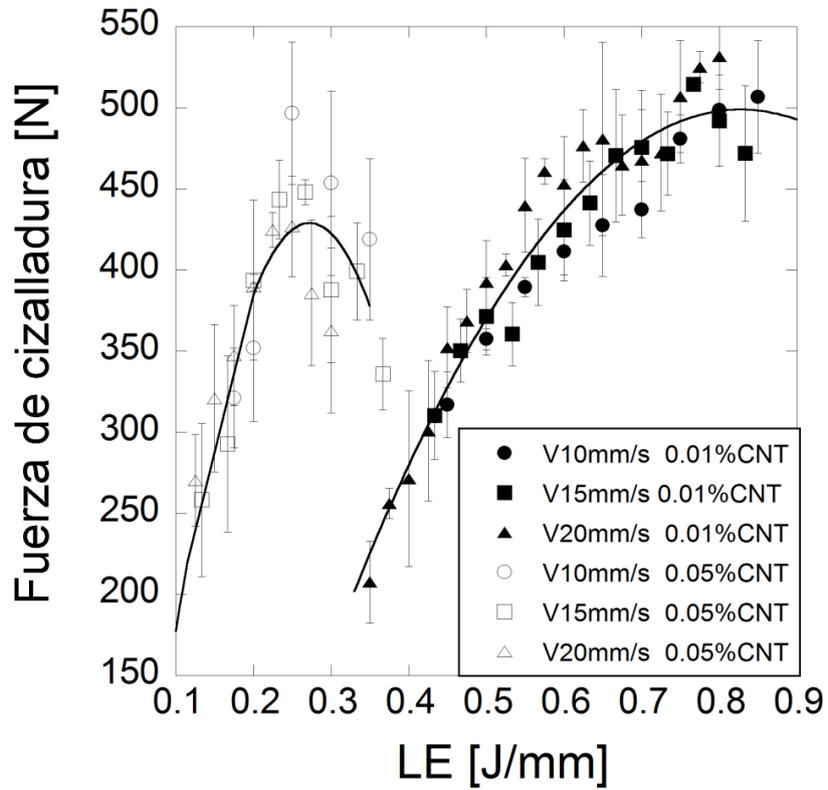


Figura 6. 12: Valores medios de la fuerza de cizalladura en función de la LE para los dos porcentajes de CNTs y las tres velocidades de proceso consideradas.

## Referencias

6. 1 A. Boglea, A. Olowinsky, A. Gillner. *Fibre laser welding for packaging of disposable polymeric microfluidic-biochips*. Applied Surface Science 254 (2007), 1174–8.
6. 2 A.M. Visco, N. Campo, L. Torrisi, F. Caridi. *Effect of carbon nanotube amount on polyethylene welding process induced by laser source*. Applied Physics A: Materials Science & Processing 103(2) (2011), 439–45.
6. 3 T. Velten T, HH. Ruf, D. Barrow, N. Aspragathos, P. Lazarou, E. Jung. *Packaging of bio-MEMS: strategies, technologies, and applications*. Advanced Packaging, IEEE Transactions 28 (2005), 533–46.
6. 4 H. Potente, O. Karger, G. Fiegler. *Laser and microwave welding—the applicability of new process principles*. Macromolecular Materials and Engineering 287 (11) (2002), 734–44.
6. 5 JP. Coelho, MA. Abreu, MC. Pires. *High-speed laser welding of plastic films*. Optics and Lasers in Engineering 34 (4-6) (2000), 385–95.
6. 6 S.E.Nielsen, J. K. Kristense, M. Strange, *Laser Welding of Plastics-Weld Compatibility investigations*. 13<sup>th</sup> NOLAMP Conference, 13<sup>th</sup> Conference on Laser Materials Processing in the Nordic Countries (2011).
6. 7 <http://www.lpkf.es/>
6. 8 N. Amanat, N. L. James, D. R. McKenzie. *Welding methods for joining thermoplastic polymers for the hermetic enclosure of medical devices*. Medical Engineering & Physics, Vol. 32 (2010), 690-699.
6. 9 P. A. Hilton, I. A. Jones, Y. Kennish. *Transmission Laser Welding of Plastics*. Proc. SPIE 4831, (2003) 44-52.
6. 10 E. Haberstroh, W. M. Hoffman. *Laser transmission welding of transparent plastics part in micro technology*. 4M Network of Excellence (2007).
6. 11 E. Rodríguez-Vidal, I. Quintana, C. Gadea. *Laser transmission welding of ABS: Effect of CNTs concentration and process parameters on material integrity and weld formation*. Opt Lasers Eng. 57 (2014), 194–201.
6. 12 S. Abed, P. Laurens, C. Carretero, J.R. Deschamps, C. Duval. *Diode laser Welding of Polymers: Microstructures of the Welded Zones for Polipropylene*. 20<sup>th</sup> International Congress on ICALEO 2001: Applications of Lasers & Electro-Optics; Jacksonville, FL; USA; 15-18 (2001) 1499-1507.

## *Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura de Termoplásticos*

6. 13 A. Olowinsky, A. Boglea. *Extended the process limits of laser polymer welding with brilliance beam sources (recent status and prospects of POLYBRIGHT)*. Proc SPIE 7921 Laser-based Micro and Nanopackaging and Assembly V, 792107 (2011).
6. 14 I. Mingareev, F. Weirauch, A. Olowinsky. *A welding of polymers using a 2 mm thulium fiber laser*. Optics & Laser Technology 44(7) (2012), 2095–9.
6. 15 N. Amanat, C. Chaminade, J. Grace, DR. McKenzie, NL. James. *Transmission laser welding of amorphous and semi-crystalline poly-ether-ether-ketone for applications in the medical device industry*. Materials & Design 31 (2010), 4823–30.
6. 16 L. Torrisi, F. Caridi, A.M. Visco, N. Campo. *Polyethylene welding by pulsed visible laser irradiation*. Applied Surface Science 27 (2011), 2567-2575.
6. 17 M. Aden, A. Roesner, A. Olowinsky, *Optical characterization of polycarbonate: influence of additives on optical properties*. Journal of Polymer Science, Part B 48 (4) (2010), 451–5.
6. 18 JD. Van de Ven, AG. Erdman, *Laser transmission welding of thermoplastics – Part I: temperature modeling and pressure*. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME 129 (2007), 849–58.
6. 19 B. Acherjee B, D. Misra, D. Bose, K. Venkadeshwaran . *Prediction of weld strength and seam width for laser transmission welding of thermoplastic using response surface methodology*. Optics & Laser Technology 41 (2009), 956–67.
6. 20 M. Ilie M, JC. Kneip, S. Matter, A. Nichici, C. Roze, T. Girasole. *Through-transmission laser welding of polymers – temperature field modeling and infrared investigation*. Infrared Physics & Technology 51 (1) (2007), 73–9.
6. 21 J.F. Von Bulow, K. Bager, C. Thirstrup, *Utilization of light scattering in transmission laser welding of medical devices*. Applied Surface Science 256 (2009), 900-908.
6. 22 A. Russek Ulrich, A. Palmen, H. Staub, J. Poehler, C. Wenzlau, G. Otto, M. Poggel, A. Koeppe, H. Kind. *Laser beam welding of thermoplastics*, Proc. SPIE 4977, Photon Processing in Microelectronics and Photonics II (2003), 458-472.
6. 23 I.Hadriche, E.Ghorbel, N.Masmoudi, G.Casalino. *Investigations on the effects of laser power and scanning speed on polypropylene diode transmission welds*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 50 (2010), 217-226.

## Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura de Termoplásticos

6. 24 H. Potente, O. Karger, G. Fiegler. *Laser and microwave welding—the applicability of new process principles*. Macromolecular Materials and Engineering 287 (11) (2002), 734–44.
6. 25 A. Boglea, A. Olowinsky, A. Gillner, *Fibre laser welding for packaging of disposable polymeric microfluidic-biochips*. Applied Surface Science 254 (2007), 1174–8.
6. 26 A. Jansson, K. Saara, S. Antti, K. Veli. *The effect of parameters on laser Transmission welding of polymers*. 22nd International conference on lasers and electro-optics ICALEO (2003).
6. 27 A. Russek Ulrich, A. Palmen, H. Staub, J. Poehler, C. Wenzlau, G. Otto, M. Poggel, A. Koeppe, H. Kind, *Laser beam welding of thermoplastics*. Proc. SPIE 4977, Photon Processing in Microelectronics and Photonics II (2003), 458.
6. 28 J.D. Van de Ven, A.G. Erdman, *LaserTransmission welding of Thermoplastics - PartII: Experimental Model Validation*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 129 (5) (2007), 859-867.
6. 29 M. Ilie, E. Cigala, D. Grevey, S. Mattei, V. Stoica. *Diode laser welding of ABS: experiments and process modeling*. Optics & Laser Technology 41 (2009), 41:608–14.
6. 30 [ASTM Standard] Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, D 638-01, Annual Book of ASTM Standards.
6. 31 <http://www.jascoinc.com/>
6. 32 <http://es.mt.com/es/es/home.html>
6. 33 E. Rodríguez-Vidal, I. Quintana, J. Etxarri, U. Azkorbebeitia, D. Otaduy, F. González, F. Moreno. *Optical design and development of a fiber coupled high-power diode laser system for laser transmission welding of plastics*. Optical Engineering 51 (12) (2012), 124301.
6. 34 F.A. Sabah, S.N. Mohammed. *Welding of Thermoplastic material using CO<sub>2</sub> laser*. Diyala Journal of Engineering Sciences 05 (1) (2012), 40-51
6. 35 N. Amanat, C. Chaminade, J. Grace, D.R. McKenzie, N.L. James. *Transmission laser welding of amorphous and semi-cristalline poly-ether-ether-ketone for applications in the medical device industry*. Materials and Design 31 (2010), 4823-4830.
6. 36 E. Ghorbel, G. Casalino, S. Abed. *Laser Diode transmission welding of polypropylene: Geometrical and microstructure characterization of weld*. Materials and Design 30 (2009), 2745-751.

*Aplicación del Prototipo Láser a la Microsoldadura  
de Termoplásticos*

## 7. CONCLUSIONES

1. Con el fin de poner en marcha las herramientas computacionales de diseño óptico, se ha modelado un sistema de iluminación LED como ejemplo de operatividad, con el fin de alcanzar un grado satisfactorio de familiarización con dicha herramienta, que en nuestro caso es ZEMAX®. El diseño de dicho sistema fue solicitado por una empresa española a IK4-TEKNIKER para ser aplicado en el campo de la metrología. El sistema óptico diseñado colecta la luz procedente de una fuente LED de alta divergencia de emisión con una eficiencia del 85%. Este sistema de iluminación ha sido optimizado para obtener a una distancia de trabajo de 125mm, un spot circular con perfil de intensidad uniforme (*top-hat* en terminología anglosajona). Una de las más importantes ventajas de sistema diseñado es su carácter modular. Los dos subsistemas encargados de colimar la luz emergente del LED se encuentran unidos a través de un cilindro de PMMA dando lugar a un sistema robusto capaz de reducir la divergencia hasta un valor de  $\theta_c = 1.46^\circ$ . Adicionalmente, se han alcanzado distintos perfiles de intensidad para una distancia de trabajo dada, mediante la introducción en el sistema de un espejo elíptico. De esta manera, se ha conseguido además incrementar la versatilidad del sistema.
2. La aplicación del prototipo láser, objeto de desarrollo de la presente Tesis, es la microsoldadura de termoplásticos. La revisión del estado de la técnica ha permitido definir las características más relevantes del haz láser necesario para alcanzar soldaduras con una calidad satisfactoria tanto desde el punto de vista morfológico como mecánico. Así, el prototipo láser definido es un sistema de diodos guiado por fibra óptica emitiendo en el infrarrojo cercano ( $\lambda = 808\text{nm}$ ) con potencias máximas de emisión en torno a los 100W.
3. Como punto de partida en el desarrollo del prototipo propuesto, se ha llevado a cabo la correspondiente modelización óptica mediante el software de diseño óptico, ZEMAX®. En nuestro caso, dicho software ha demostrado ser una herramienta útil y versátil para predecir el comportamiento de un haz láser sometido a diferentes técnicas de conformado del haz. La metodología utilizada para el modelizado del sistema óptico ha permitido:
  - Predecir la calidad del haz láser en las diferentes etapas del proceso de conformado.
  - Obtener las cáusticas de focalización del haz a la entrada de la fibra óptica y por tanto, predecir el valor de la eficiencia de acoplamiento de la radiación a la fibra.

## Conclusiones

- Estudiar la evolución del estado de polarización a través de los diferentes componentes.
- Detectar los parámetros que presentan tolerancias más estrechas para ajustar el proceso experimental.

En primer lugar se ha diseñado el sistema óptico de acoplamiento a fibra de la radiación procedente de una única barra de diodos. El objetivo perseguido por este sistema ha sido la simetrización de la calidad del haz (*BPP*) en los dos ejes de emisión de la barra. La transformación del haz ha sido llevada a cabo por tres subsistemas ópticos diferentes: una escala de espejos, dos prismas anamórficos junto con una lente de colimación, y en último lugar el sistema de focalización a la fibra óptica. Las cáustica de focalización en fibra, y por tanto los correspondientes valores obtenidos de calidad del haz, han garantizado un eficiente acoplamiento óptico. Además, se ha identificado el posicionamiento de uno de los prismas anamórficos como uno de los parámetros con tolerancias más estrechas.

A continuación se ha modelado la polarización de la emisión de las barras de diodos. Posteriormente, y en base al diseño anterior, se ha abordado el modelado del biplejado por polarización de la radiación procedente de dos barras idénticas. El haz procedente de dicho biplejado ha presentado una pérdida de calidad del haz, en torno al 2%, con respecto a la alcanzada en el acoplamiento a fibra de una única barra de diodos. No obstante, la calidad del haz resultante del multiplexado continúa garantizando un eficiente acoplamiento a las fibras ópticas seleccionadas.

4. Paralelamente al modelado óptico del prototipo se ha llevado a cabo el correspondiente desarrollo experimental. Se ha realizado una caracterización completa del haz siguiendo la misma metodología llevada a cabo en el proceso de simulación: grado de polarización, perfil de intensidad y potencia óptica tras cada una de las etapas de conformado y cáustica de focalización de entrada a fibra. El desarrollo óptico del prototipo se ha llevado a cabo en las siguientes etapas:
  - Inicialmente se ha descrito el desarrollo experimental del sistema óptico de acoplamiento a fibra de una única barra de diodos cuyo modelado ha sido descrito anteriormente. Este desarrollo persigue un doble objetivo: por un lado validar los resultados predichos por el modelo óptico y por otro, establecer una referencia para evaluar los resultados experimentales obtenidos en el desarrollo final del prototipo . A partir del análisis del sistema experimental y el correspondiente modelo ha sido posible concluir que el modelo óptico desarrollado predice el comportamiento y las tendencias de los parámetros de calidad óptica del haz tras cada una de las etapas de conformado. Así, el

acoplamiento a fibra de una barra de diodos se ha llevado a cabo con una eficiencia media de 84% y 74% para las fibras ópticas de diámetros 600 $\mu\text{m}$  y 400 $\mu\text{m}$  respectivamente. Las discrepancias encontradas entre los parámetros de calidad óptica proporcionados por modelo y experimento han puesto de manifiesto la importancia de realizar la modelización de la emisión de la radiación láser en función de la potencia de emisión de la fuente seleccionada.

- La caracterización de las barras de diodos en términos de polarización ha proporcionado un grado de polarización lineal del 97%. Esto confirma la viabilidad de llevar a cabo la unión de la radiación de las dos barras de diodos mediante un biplejado por polarización.
  - En base a los dos puntos anteriores, el desarrollo del prototipo láser se ha llevado a cabo uniendo los haces procedentes de dos sistemas de conformado del haz idénticos a través de un biplejado por polarización. Los resultados obtenidos de las cáusticas de focalización muestran que durante el proceso de biplejado, se produce una pérdida de calidad del haz con respecto a los resultados experimentales obtenidos del acoplamiento a fibra de una única barra de diodos. Las eficiencias medias en el caso del acoplamiento de dos de ellas son de 80% y 70% para las fibras ópticas de diámetros 600 $\mu\text{m}$  y 400 $\mu\text{m}$  respectivamente. Dicha pérdida de calidad del haz, con respecto al caso de una sola barra, está ligada a una superposición no ideal de los haces como consecuencia de los efectos de desalineamiento que tienen lugar en la pareja de prismas anamórficos.
  - En paralelo al desarrollo óptico del prototipo láser, se han llevado a cabo los desarrollos mecánico, eléctrico y termoeléctrico del mismo. De ellos, el termoeléctrico (sistema de refrigeración) es el más relevante dado que es necesario evacuar altas densidades de flujo calorífico ( $\approx 288\text{W}/\text{cm}^2$ ) en cortos instantes de tiempo ( $\approx \text{ms}$ ) para garantizar el correcto funcionamiento de la fuente láser en todo su rango de potencias. El sistema de refrigeración ha sido desarrollado mediante dos células Peltier con una capacidad máxima de evacuación de 200W. El sistema desarrollado permite trabajar en todo el rango de potencia de emisión con tiempos de respuesta del orden de milisegundos cuando se varía dicha potencia. Además, dicho sistema es compacto y con un mantenimiento de bajo coste.
5. Una vez validado el prototipo a nivel de laboratorio, éste ha sido integrado en una máquina desarrollada íntegramente en IK4-TEKNIKER, para su posterior empleo en la soldadura de termoplásticos. Esto ha sido llevado a cabo en las siguientes fases:

## Conclusiones

- Preparación del prototipo láser a escala de laboratorio para su posterior integración en máquina.
  - Integración del prototipo en máquina (elementos mecánicos y de control).
  - Desarrollo del cabezal óptico de focalización (tras fibra óptica) para la microsoldadura de termoplásticos.
6. El termoplástico utilizado en el proceso de soldadura ha sido ABS (acrylonitrile/butadiene/styrene. El estudio experimental se ha centrado en el efecto que tienen en la integridad y la geometría de las soldaduras, la concentración de aditivos en ABS (en nuestro caso nanotubos de carbono CNTs) y los parámetros de proceso (densidad de potencia óptica y velocidad de soldadura). Los resultados experimentales han permitido alcanzar las siguientes conclusiones:
- La temperatura de transición vítrea en el caso del ABS no cambia de manera significativa con la concentración del aditivo de CNTs. Por el contrario, los coeficientes de absorción y reflexión muestran una fuerte dependencia con el contenido de CNTs. Por tanto, la energía requerida para generar un determinado cordón de soldadura disminuye cuando aumenta la concentración de CNTs en la probeta aditivada.
  - Los resultados relativos al efecto de la energía lineal (razón entre potencia óptica y velocidad de proceso) en la anchura del cordón y la resistencia mecánica de la soldadura ponen de manifiesto dos regímenes de comportamiento dependiendo de la concentración de CNTs considerada. Para bajas concentraciones de CNTs, el rango de parámetros de proceso en el que se obtienen cordones de soldadura óptimos (en términos de resistencia mecánica y aspecto visual) se incrementa significativamente con respecto a considerar altas concentraciones de CNTs. Por otro lado, el rango común de parámetros de proceso mediante el que se alcanzan cordones de soldadura óptimos para ambas concentraciones de CNTs es relativamente pequeña. Este resultado muestra la relación entre las propiedades ópticas y el rango de parámetros de proceso requerido para alcanzar soldaduras satisfactorias en términos de resistencia mecánica y aspecto visual.
  - El análisis del efecto de los parámetros de proceso (densidad de potencia óptica y velocidad de soldadura) en la anchura de los cordones de soldadura pone de manifiesto que el ABS aditivado con altas concentraciones de CNTs es más sensible a variaciones en la potencia óptica empleada.

- Para ninguna de las dos concentraciones de CNTs se ha evidenciado una clara correlación entre la anchura de los cordones de soldadura y sus propiedades mecánicas.

Por lo tanto, en la presente Tesis se ha diseñado y desarrollado un prototipo láser para la soldadura de termoplásticos. La funcionalidad de dicho prototipo ha sido demostrada a través de la generación de cordones de soldadura con una alta calidad, tanto desde el punto de vista morfológico como mecánico.



## 8. PUBLICACIONES

- E.Vidal, D.Otaduy, F.González, JM.Saiz, F.Moreno “*Design and optimization of a collimating optical system for high divergencia LED light sources*”. Proc. SPIE 7428. Current Developments in Lens Design and Optical Engineering X (2009).
- E. Vidal, I.Quintana, U.Azkorbebeitia, E.Mendez, G. Viera, M.Galán, D.Otaduy. “*Fiber coupling of high-power diode laser stack for direct polycarbonate processing*”. Proc. SPIE 7583. High-Power Diode Laser Technology and Applications VIII (2010).
- E.Rodríguez-Vidal, I.Quintana, J.Etxarri, D.Otaduy, F.González, F.Moreno, J.M Saiz. “*Laser transmission welding of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) using a tailored high power diode-laser optical fiber coupled system*”. Proc. SPIE 8433. Laser Sources and Applications (2012).
- E.Rodríguez-Vidal, I.Quintana. J.Etxarri, U.Azkorbebeitia, D.Otaduy, F.González, F.Moreno. “*Optical design and development of a fiber coupled high-power diode laser system for laser transmission welding of plastics*”. Optical Engineering Vol 51 (2012).
- E.Rodríguez-Vidal, D.Otaduy, D.Ortiz, F.González, F.Moreno, J.M Saiz. “*Optical Performance of a versatile illumination system for high divergence LED sources*”. Optik Vol 125 (2014) 1657-1662.
- E.Rodríguez-Vidal, I.Quintana. C.Gadea. “*Laser transmission welding of ABS: Effect of CNTs concentration and process parameters on material integrity and weld formation*”. Optics and Laser Technology Vol. 57 (2014) 194-201.
- E.Rodríguez-Vidal, J.Lambarri, C.Soriano, C.Sanz, G.Verhaeghe. “*A Combined Experimental and Numerical Approach to the Laser Joining of Hybrid Polymer – Metal Parts*”. Physics Procedia . Vol. 56 (2014), 835-844.

## 9. ANEXO I

En el presente anexo se detallan las especificaciones de los equipos utilizados para llevar a cabo las correspondientes caracterizaciones del prototipo láser. En particular: analizador de haz BeamMaster7 Coherent, analizador de haz BeamMonitor60 Primes, termopilas refrigeradas por aire LM-45HTD, LM-100HTD Coherent y la cámara termográfica A325FLIR.

### 1. Analizar de haz: BeamMaster7 Coherent

Característica	Especificación
Rango espectral [nm]	190-1100
Apertura del sensor [mm]	9
Dimensiones [mm]	35.2(W) x 105(H) X 87 (L)
Mínima potencia detectable [ $\mu$ W]	10
Resolución en medida de potencia [ $\mu$ W]	0.1
Máxima potencia [mW] @ 633nm	Sin filtro: 5 Con filtro NG4: 50nW Con filtro NG9: 1W
Daño Umbral [ $W/mm^2$ ]	200
Tamaño de spot (a $1/e^2$ ) [mm]	0.015-9
Resolución en posición [ $\mu$ m]	1



## 2. Analizar de haz: BeamMonitor60 Primes

Característica	Especificación
Rango espectral [nm]	400-1100
Apertura del sensor [mm]	5 - 40
Tipo de sensor	Fotodiodo - DFY - 5
Dimensiones [mm]	202(W) x 76(H) X 308(L)
Mínima potencia detectable [ $\mu$ W]	
Máxima densidad de potencia [ $\text{kW}/\text{cm}^2$ ]	10
Daño Umbral [ $\text{W}/\text{mm}^2$ ]	



3.

**4. Termopilas refrigeradas por aire: LM-45HTD, LM-100HTD Coherent**

Característica	Especificación LM-45HTD	Especificación LM-100HTD
Rango espectral [ $\mu\text{m}$ ]	0.25-10.6	
Diámetro activo del sensor[mm]	19	
Dimensiones [mm]	$\phi$ 64x86	$\phi$ 152 x 142
Máxima potencia [W]	45	100
Resolución [W]	0.01	
Daño Umbral [ $\text{kW}/\text{cm}^2$ ]	6	
		

### 5. Cámara termográfica: A325 FLIR

Característica	Especificación
Campo de visión	25° x 18.8° / 0.4m
Rango espectral [μm]	7.5 - 13
Rango de temperaturas [°C]	0 - 350
Sensibilidad térmica [°C]	<0.07 @ +30°C
Resolución [°C]	±2
Dimensiones [mm]	170(W) x 70(H) X 70(L)
Rango de temperatura de operación [°C]	-15 - +50

