UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

ESTUDIO DE UN NUEVO MÉTODO DE CARACTERIZACIÓN DE UN HAZ LÁSER DE POTENCIA BASADO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE FIBRA ÓPTICA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Industrial de Terrassa

Autor: Aguado Carlos

Director: Cojocaru Crina

Codirector: Trull Silvestre, Jose Francisco

ÍNDICE

1. OBJETIVO 1
2. ALCANCE 1
3. ESPECIFICACIONES BÁSICAS 1
4. JUSTIFICACIÓN 2
5. INTRODUCCIÓN 3
5.1 Equipos láseres 3
5.2 Haces láseres 7
5.3 Perfiles láseres 8
6. MÉTODOS Y CÁLCULOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PERFILES 10
6.1 Knife-Edge 10
6.2 Método mediante la cámara CCD 11
6.3 Método con fibra óptica acoplada a motores paso a paso 11
6.4 Cálculos paramétricos 12
6.5 Efectos de lentes en rayos Gaussianos 17
7. CÁLCULOS Y RESULTADOS DE UNA MEDIDA MEDIANTE KNIFE-EDGE 19
7.1 Fundamentos de la técnica Knife-Edge 19
7.2 Resultados experimentales mediante Knife-Edge 22
7.3 Conclusiones sobre el método 24
8. SET UP Y PROGRAMACIÓN 25
8.1 Montaje experimental 25
8.2 Obtención de medidas mediante ejecutable y Labview 26
8.3 Labview perfil serpiente 27
8.4 Labview perfil estadístico 31
8.5 Tiempos de ejecución 33
9. RESULTADOS 35
9.1 Resultados labview perfil estadístico 36
9.2 Resultados labview perfil serpiente 37
10. CONCLUSIONES 50
11. PRESUPUESTO 52
12. BIBLIOGRAFÍA 54

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: Esquema de los componentes de un equipo láser 3
Ilustración 2: Representación gráfica de los tres fenómenos fotónicos 5
Ilustración 3: Generación de luz coherente mediante emisión estimulada.....5
Ilustración 4: Inversión de población 6
Ilustración 5: Luces láser con diferentes longitudes de onda 7
Ilustración 6: Representación 3D de un perfil de luz láser 8
Ilustración 7: Representaciones gráficas de perfil gaussiano (fotos superiores) y perfil top hat (fotos inferiores) 9
Ilustración 8: Representación gráfica del método Knife-Edge 10
Ilustración 9: Imagen de los motores paso a paso con el cabezal de la fibra acoplado 12
Ilustración 10: Vista de una planta de un haz de luz gaussiano 14
Ilustración 11: Vista de un plano transversal de un haz de luz gaussiano 14
Ilustración 12: Parametrización de la longitud del camino óptico 17
Ilustración 13: Resultado obtenido al focalizar un haz láser a través de una lente 18
Ilustración 14: Representaciones de las intensidades obtenidas al 14-86% de la total del haz .20
Ilustración 15: Esquema gráfico del funcionamiento y metodología utilizados para la caracterización de un haz láser mediante Knife-Edge 20
Ilustración 16: Gráfica de los radios teóricos y experimentales para el láser de Helio-Neón.....22
Ilustración 17: Ampliación de la zona lineal del gráfico de radios.....23
Ilustración 18: Esquema gráfico del montaje experimental para la caracterización de un perfil láser mediante fibra óptica 25
Ilustración 19: Ejemplos de distintos casos para el arranque del recorrido de la fibra óptica ...26
Ilustración 20: Recorrido ejecutado por el Labiview serpiente 28
Ilustración 21: SCADA para el control del programa Labview serpiente 29
Ilustración 22: Resultado obtenido al utilizar un paso de la fibra muy grande en comparación al diámetro del haz 30
Ilustración 23: Imágenes desde diferentes ángulos del perfil obtenido empleando un paso más pequeño 31
Ilustración 24: Recorrido ejecutado por el Labview estadístico.....32
Ilustración 25: Representación del rango de Rayleigh y evolución del radio en los planos transversales.....35
Ilustración 26: Imagen del montaje experimental para la toma de medidas 36
Ilustración 27: Gráfico de energía lumínica para un eje horizontal mediante Labview estadístico 37
Ilustración 28: Detalle gráfico de los planos a capturar por el programa 38
Ilustración 29: Captura del plano 1, con un paso de 0,1mm y una cuadrícula de 75x75.....38
Ilustración 30: Plano 2D de la anterior captura 39
Ilustración 31: Gráfico 3D obtenido mediante la cámara CCD del plano 2 39
Ilustración 32: Representación 3D mediante Labview serpiente para el plano 2 40
Ilustración 33: Imagen 3D del plano 13 obtenido mediante Labview serpiente.....41
Ilustración 34: Gráfico de la evolución del diámetro x en función del eje longitudinal 43
Ilustración 35: Símil del gráfico anterior pero para el eje secundario 44
Ilustración 36: Superposición de ambos diámetros contra el eje longitudinal 44

Ilustración 37: Gráfico de la zona lineal del eje principal.....45
Ilustración 38: Gráfico de la zona lineal del eje secundario.....46
Ilustración 39: Evolución de los diámetros experimentales del eje principal según el método 4σ y el 10-90% 48
Ilustración 40: Evolución de los diámetros experimentales del eje secundario según método 4σ y el 10-90% 48

1. OBJETIVO

El presente estudio tiene como finalidad lograr la medida y caracterización de perfiles de haces láser, mediante un sistema que utiliza una fibra óptica que recoge la luz en un punto concreto del haz y la transmite a un medidor de energía para su cuantificación. La fibra óptica realiza un escaneo en 2D del perfil transversal del haz láser a través de dos motores paso a paso de alta precisión, correlacionados y automatizados. La principal ventaja de este es la posibilidad de empleo en la caracterización de láseres de alta potencia (decenas de W) donde otros existentes en el mercado quedan saturados o incluso dañados. Este sistema permitirá la obtención de datos proporcionales a la potencia del haz punto a punto (definidos previamente por el usuario), posterior procesado de estos datos a través de programas de cálculo permite calcular parámetros que definen la forma y la calidad del haz láser, como el diámetro, divergencia, el factor M^2 o el brillo.

2. ALCANCE

Para poder esclarecer ciertos los conceptos que aparecerán a lo largo de este documento, se presentarán previamente y de forma no muy extensiva, los conceptos necesarios para que sea posible para el lector comprender los elementos más ligados al campo de la fotónica. No quedarán detalladas más allá de las fichas técnicas, las características de los equipos empleados para la reconstrucción de los perfiles tales como, motores, controladores o el receptor de intensidad lumínica.

Con el fin de la brevedad, a pesar de detallar todos los pasos seguidos para los distintos cálculos, se presentarán solamente los resultados finales.

3. ESPECIFICACIONES BÁSICAS

Debido a la naturaleza de pequeño tamaño de los haces láseres sobre los cuales se va a trabajar, de modo genérico se van adoptar las siguientes pautas a nivel técnico:

- Cuando se refieran a distancias como radios de haces, tramos recorridos por los motores…etc se considerará como unidad base los mm
- Respecto a potencias del haz se tomarán las de referencia del receptor, cuya unidad será mW.
- El desarrollo de la parte de control automático se ha realizado con código de bloques mediante Labview, partiendo de un código ya existente.

- La parte de cálculo empleará Matlab para el tratado de datos y posterior obtención de gráficos.

4. JUSTIFICACIÓN

Existen diferentes aplicaciones de la fotónica que están dando soluciones en muchos ámbitos de la tecnología moderna, (industria, procesado de materiales, energía, medicina..etc) ya que las propiedades únicas de la luz láser son: monocromacidad, direccionalidad, precisión o potencia, y permiten ser la solución a muchas aplicaciones. Debido a que precisamente este sector se encuentra en un constante auge, la industria especializada en la creación de nuevos sistemas láser, y de forma indirecta, todos aquellos usuarios de estos nuevos sistemas, pueden llegar a encontrarse con la problemática de no conocer con exactitud las características espaciales o temporales del láser.

El haz de luz es la distribución de energía en el espacio tridimensional. Como se verá más adelante, es posible emplear distintas configuraciones y materiales para el diseño de equipos láser que terminan generando diferentes perfiles de luz.

Ya son conocidas ciertas técnicas, métodos experimentales, equipos y dispositivos comerciales que permiten describir con bastante precisión el perfil de un haz láser. Cuando la distribución espacial transversal es gaussiana, los métodos para caracterizar su perfil permiten obtener gran precisión. Los detectores que utilizan cámaras CCD, dispositivo similar a una cámara fotográfica, permiten crear mapas de puntos según su intensidad, donde a través de programas de cálculos numéricos, determinan la forma y radio que tiene un haz láser. No obstante, están en desarrollo láseres con potencias muy elevadas algo que pone en compromiso alguno de los aspectos de estas técnicas. El motivo yace en la potencia por pixel, donde a medida que esta aumenta, los pixeles de la cámara comienzan a saturarse y a perder precisión, y de aumentar todavía más la potencia se pierde información o incluso puede llegar a dañarse la cámara.

Por este motivo, se ha ideado un sistema automatizado basado en la reconstrucción del perfil transversal del haz utilizando una fibra óptica, que pueda caracterizar perfiles de haces de alta potencia, como por ejemplo láseres de semiconductor o de estado sólido con una potencia de decenas de W utilizados en diferentes aplicaciones tecnológicas.

5. INTRODUCCIÓN

5.1 Equipos láseres

El nombre LÁSER corresponde a un acrónimo: "Light Amplification by Stimuled Emission of Radation". El láser se define como un equipo de emisión de luz con unas características muy particulares, diferentes de otras fuentes de emisión de luz, la cual surge gracias a dos fenómenos que son la emisión estimulada y la amplificación de la radiación.[1]

La luz está formada por fotones, que son las partículas responsables del transporte de la energía electromagnética, cuya energía viene determinada por la frecuencia de la radiación de la luz que pueda llegar a emitirse con un sistema láser, no obstante esto no ocurre así sin más.

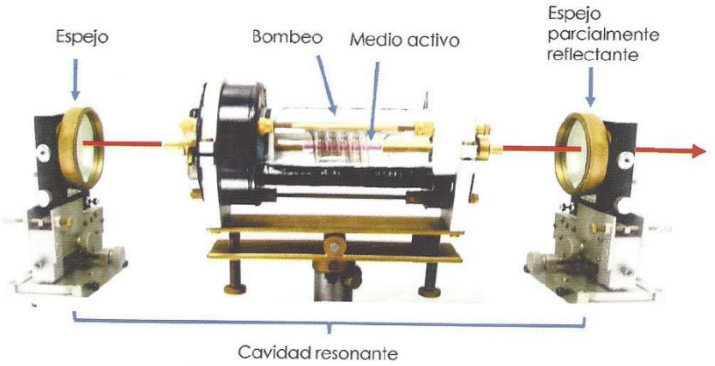


Ilustración 1: Esquema de los componentes de un equipo láser

En primer lugar, se hace necesario un material que actuará como la fuente donde se encuentran todos aquellos átomos que servirán posteriormente para lograr la emisión de fotones. "Este material" se conoce como medio activo, y podemos encontrar equipos láseres que funcionan con compuestos en los tres estados de la materia: sólido, líquido y gas.

- Láseres de estado sólido: El medio activo es un compuesto en estado sólido como por ejemplo el Nd:Yag o también el primer láser compuesto por $Cr:Al_2O_3$. Dentro de este grupo incluiríamos los láseres de semiconductor, cuyo medio activo está constituido por compuestos mayormente por semimetales, elementos más baratos, para la fabricación de equipos láseres.

- Láseres de estado líquido: Son láseres aún en fase experimental que emplean medios activos en una interfase sólido líquido o como se conoce como cristal líquido.
- Láseres de estado gas: Por último, el medio activo en este caso se trata de un gas, donde existen varios tipos de compuestos como son el He-Ne o el de N_2 pudiendo emitir con diferentes longitudes de onda.

Todos estos compuestos son medios activos, los cuales necesitan de una fuente externa de excitación para comenzar la reacción en cadena necesaria para lograr el haz de luz. Es aquí donde aparece el segundo elemento esencial, que es el sistema de bombeo, el encargado de proporcionar la energía.

Existen distintos métodos para realizar la aportación de energía al medio activo, el primero podría ser el bombeo eléctrico, a través de corriente se logra obtener la energía para excitar a los átomos, es un método común en láseres como los de semiconductor o de gas. Un bombeo óptico permite al medio activo obtener energía mediante absorción de fotones cuyas frecuencias son del orden de la luz visible. También existen sistemas de bombeo basados en energía química o nuclear, aunque su aplicación no es extensiva a los láseres que se van a emplear en este estudio. Ahora que conocemos como se aporta energía al medio activo, vamos a describir los fenómenos que ocurren en él para detallar cómo se logra la emisión de fotones de forma continuada.

Tres fenómenos son los que ocasionan que se pueda lograr un flujo constante de fotones en el medio activo estos son: la emisión espontanea, la emisión y absorción estimuladas. [4][5][6]

Un átomo del elemento que sea, dispone de electrones, los cuales se van desplazando en la nube electrónica, sin embargo, estos lo hacen en un estado de baja energía, como si se tratara de un estado base o estable. Consideremos un instante donde un átomo que dispone de un electrón, ha sido excitado mediante algún fenómeno, es entonces cuando este electrón se desplazará a una órbita diferente (más alejada del núcleo), ya que dispone de más energía que en la órbita inicial. En un momento dado, que no es posible especificar, este electrón descenderá a la órbita donde se encontraba inicialmente, liberando en el proceso un fotón. Este proceso es lo que se conoce como emisión espontánea. La diferencia de energía que existe entre una órbita donde el electrón se encuentra excitado y su órbita fundamental, es lo que explica que aparezca un fotón al descender el nivel de energía.

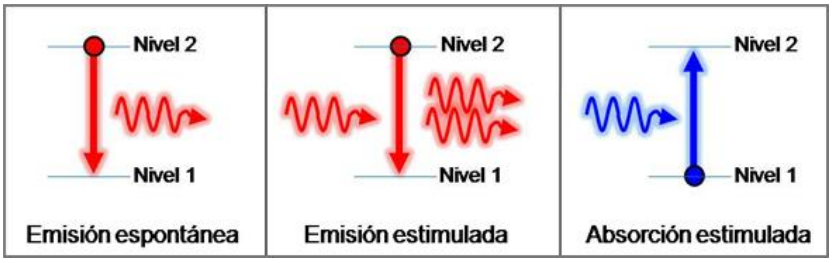


Ilustración 2: Representación gráfica de los tres fenómenos fotónicos

El segundo fenómeno a describir es la emisión estimulada. Como se puede deducir de su nombre, consiste en provocar la emisión de fotones. En este caso, partimos de nuevo con un electrón en un estado de energía no estable, con lo cual, si dejáramos transcurrir el tiempo, en un momento dado, el electrón descendería de órbita emitiendo un fotón en el proceso. Pero también es posible obligar al electrón a descender, y para hacer esto podemos lograrlo si se emplea un fotón. Al forzar este descenso de energía, se liberarán fotones en el proceso. Lo interesante de este fenómeno es que los fotones liberados, son idénticos en frecuencia, dirección, polarización y fase al fotón causante de la emisión pudiendo lograr así luz coherente.

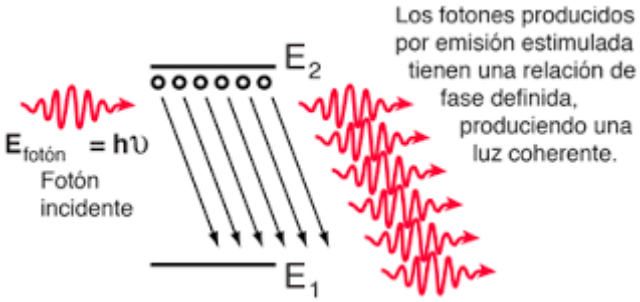


Ilustración 3: Generación de luz coherente mediante emisión estimulada

El último fenómeno también implican fotones pero en este caso para absorber energía. Cuando un electrón se encuentra en una órbita estable o de poca energía, se puede emplear un fotón para obligar a este electrón incrementar su nivel orbital y predisponerlo para poder liberar posteriores fotones mediante las emisiones espontaneas o estimuladas. Este último suceso se denomina absorción.

Hasta ahora, hemos descrito el funcionamiento del sistema que proporciona energía a un equipo láser. Ahora bien, en general en un medio activo, los átomos se encuentran en un estado de baja energía, podemos decir pues que existe un porcentaje de átomos no excitados mucho mayor que de átomos excitados, sin

embargo gracias a la absorción estimulada y la emisión estimulada, es posible lograr lo que se conoce como inversión de población.

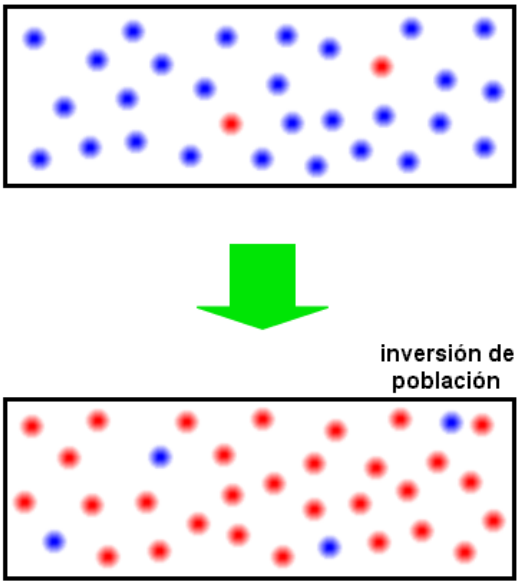


Ilustración 4: Inversión de población

Este concepto hace referencia a una inversión en la fracción entre los átomos no excitados y excitados, es decir, podemos lograr que exista en el medio activo una fracción excitada mucho mayor que la no excitada. Gracias a una continua alimentación con el sistema de bombeo, podemos lograr que en el medio activo se produzcan de forma constante emisiones estimuladas logrando así un flujo constante de fotones.

Aunque se haya logrado alimentar un medio activo de forma constante, los fotones resultantes no tendrán una dirección deseada, es por esto donde interviene el tercer elemento importante de un equipo láser, que es lo que se denomina cavidad resonante.

La cavidad resonante es un espacio confinado con dos tipos diferentes de espejos. En primer lugar tenemos un espejo cuya característica principal es que es totalmente reflejante, es decir, todos aquellos fotones liberados por el medio activo, llegarán a incidir en este espejo, rebotando y favoreciendo la inversión de población. El segundo tipo de espejo es la clave para lograr el haz de luz concentrado, ya que este, es parcialmente reflejante. Teniendo esto en cuenta, en general, los fotones incidentes serán reflejados, sin embargo, aquellos fotones que su longitud de onda se encuentre en un rango específico, no lo serán y pasarán a ser emitidos logrando así el haz de luz concentrado.

5.2 Haces láseres

Todos los láseres son capaces de emitir un haz de luz con características similares, sin embargo podemos recoger tres características extensivas a todos ellos, las cuales son las responsables de la importancia de esta tecnología en el mercado.

- Monocromacidad: La luz natural, a la que estamos expuestos habitualmente, surge de la composición de los distintos colores del espectro visible, sin embargo un equipo láser es capaz de emitir en un rango de longitud de onda lo suficientemente pequeño como para lograr un haz de luz monocromático, es decir de un solo color. Algunos equipos pueden regular su cavidad resonante para ajustarse a uno o varios rangos de longitud de onda.
- Colimación: Gracias a la cavidad resonante, se puede lograr refractar los fotones en una sola dirección, consiguiendo así concentrar la luz en una superficie muy pequeña.
- Luz coherente: Existe una relación de fase entre valores adyacentes instantáneos del campo electromagnético.

Ilustración 5: Luces láser con diferentes longitudes de onda

A pesar de que las características mencionadas anteriores son comunes a todos los equipos láseres no lo son sus perfiles. El perfil de un haz es la representación gráfica del campo electromagnético.

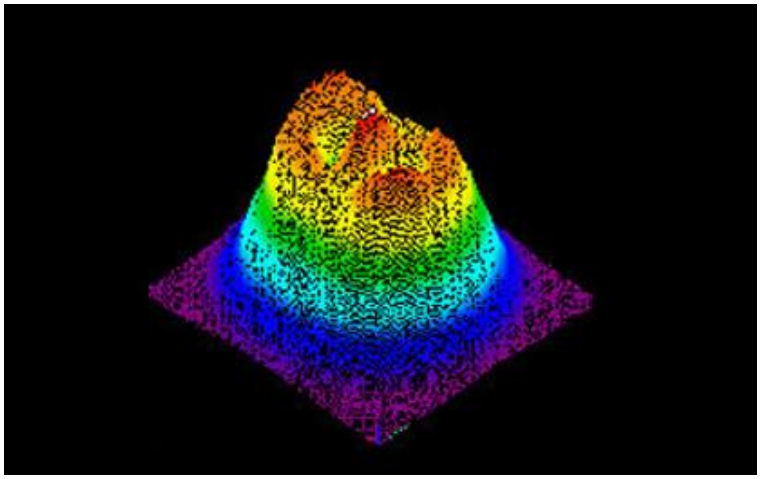


Ilustración 6: Representación 3D de un perfil de luz láser

Destacamos como eje principal el longitudinal (paralelo a la dirección de propagación de la luz), de ahora en adelante lo nombraremos como eje z. Es a lo largo de este eje donde el perfil sufre sus cambios más significativos. Por otro lado para cada valor de este eje, disponemos de un plano transversal xy, que es lo que vamos a tratar de medir con el primer ensayo. Consiguiendo representaciones gráficas para cada valor del eje longitudinal podremos lograr reconstruir un perfil de forma tridimensional.

La finalidad de estos ensayos es lograr la representación en tres dimensiones de un perfil láser, no obstante, la obtención de unos valores de intensidad lumínica punto a punto no garantiza que sean verídicos, y por este motivo recurriremos a la caracterización de perfiles ya conocidos, de esta manera, una vez empleada la técnica podremos corroborar su veracidad. Vamos por lo tanto a comentar brevemente algunos de los perfiles conocidos.

5.3 Perfiles láseres

A priori, es factible pensar que si todos los láseres están diseñados bajo unos mismos criterios, el perfil debería ser en todos ellos parecido, no obstante esto no ocurre así. La importancia de conocer el perfil reside en que se ha de asegurar la calidad del haz para aquella aplicación para la que ha sido diseñada.

Existen algunos perfiles ya conocidos como por ejemplo el haz gaussiano. Este haz, uno de los equipos del laboratorio (láser de He-Ne), es capaz de focalizar con bastante precisión su potencia en superficies realmente pequeñas, sin embargo debido a su calidad del haz, su potencia es bastante inferior a la de

otros equipos. Otro perfil bastante conocido es el "flat top" ya que puede proporcionar una distribución homogénea de la potencia en una superficie mayor que la del haz gaussiano.

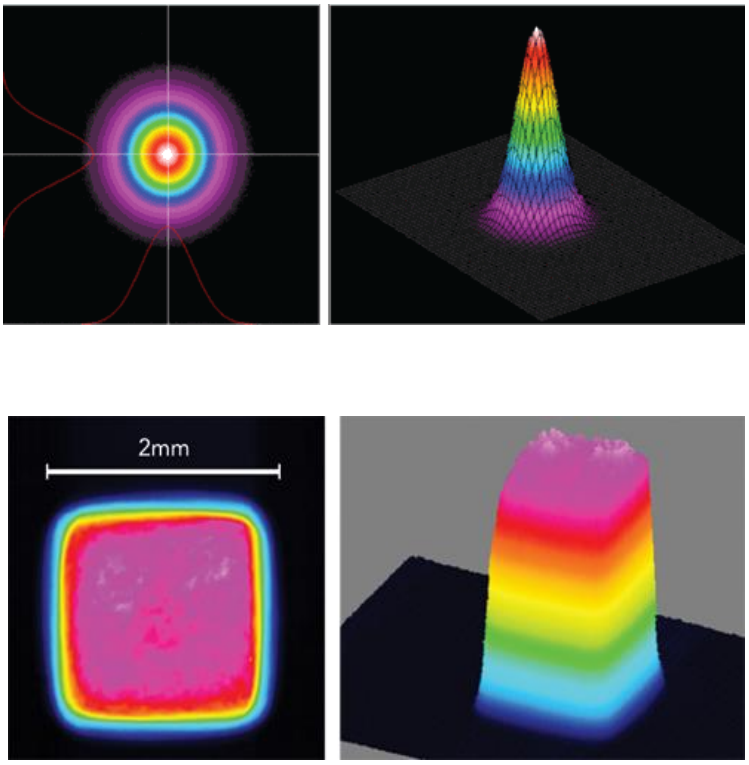


Ilustración 7: Representaciones gráficas de perfil gaussiano (fotos superiores) y perfil top hat (fotos inferiores)

Podemos ver pues, que sería posible crear una clasificación de los distintos equipos láseres basándonos en el perfil, láseres gaussianos, láseres "top flat"… aunque habríamos de crear un grupo aparte, que recogería todos aquellos sistemas fotónicos cuyo perfil resulta irregular y careciente de alguna figura clara.

Estos perfiles son típicos en los láseres de semiconductor, equipos láseres interesantes vistos desde el punto de vista de su fabricación, ya que presentan ratios potencia/coste más reducidos. Debido al hecho que se emplea un material distinto, el perfil obtenido no se puede agrupar en otros ya conocidos, todo esto porque presentan perfiles irregulares. Lograr la obtención de un perfil láser puede resultar muy interesante para comprender que aplicación se le puede dar al equipo y si es estable o no en determinadas condiciones. Ahora bien, para alcanzar estos resultados, como el objetivo de este estudio es lograr obtener un método fiable mediante fibra óptica, hay que saber de qué otras formas se pueden obtener perfiles y además, se plantea otra cuestión. ¿Aunque se conozcan distintos perfiles, como podemos compararlos entre ellos?

6. MÉTODOS Y CÁLCULOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE PERFILES

6.1 Knife-Edge

Uno de los métodos manuales más utilizado es el que se conoce como Knife-Edge. Es un método que no requiere de muchos equipos para la toma de medidas. Además del equipo láser y un fotodiodo, solamente harán falta una lente y un elemento opaco capaz de resistir sin degradarse debido a la potencia del haz, como por ejemplo una cuchilla de afeitado, para oponerse al paso de la luz.

Para que el lector comprenda el funcionamiento de este método, describimos a continuación el sistema Knife-Edge para la caracterización de un perfil láser, empleando otro equipo láser, también Gaussiano He-Ne

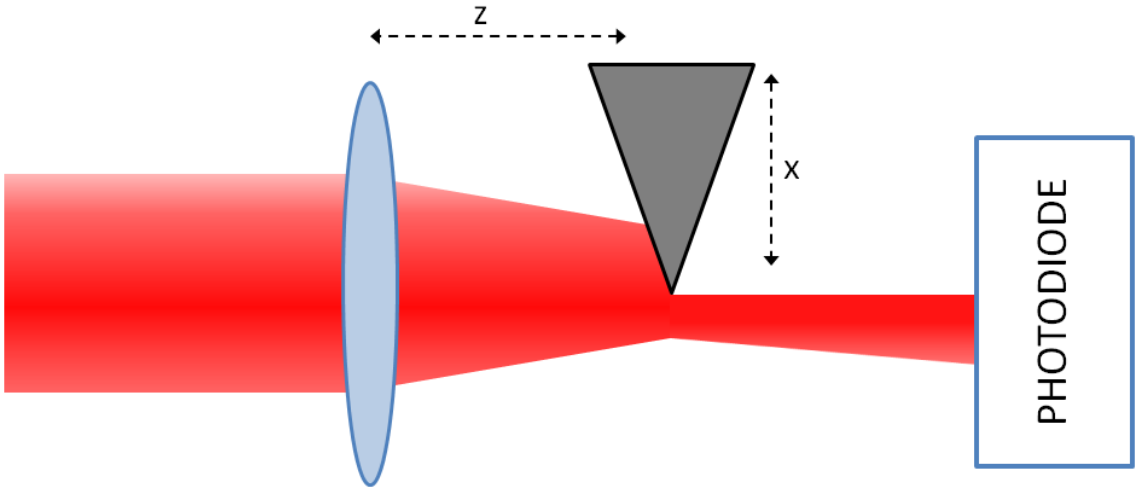


Ilustración 8: Representación gráfica del método Knife-Edge

Utilizando una lente buscaremos focalizar la luz, a unos metros posteriores siguiendo la dirección de propagación del haz de luz, colocaremos un fotodiodo, el cual tendrá el cometido de medir la potencia del campo electromagnético que le llega desde la lente en cada instante. Entre medio de estos dos elementos dispondremos un tercer elemento más, el cual será un objeto tal como puede ser una cuchilla de afeitar, la cual tendrá la finalidad de desplazarse de forma perpendicular a la dirección de propagación, buscando obstruir el paso de la luz y así la cantidad de energía que le llega al fotodiodo. [2] [3]

6.2 Método mediante la cámara CCD

El nombre CCD deriva de la expresión inglesa "charge coupled device" traducido como dispositivo de carga acoplada. Basados en los principios de las capacidades de un MOS, estos dispositivos presentan la particularidad de poder almacenar y desplazar en su interior cargas eléctricas en formas de paquetes, formando registros de desplazamiento analógicos. Recibe en su objetivo la señal lumínica proveniente del haz láser, obteniendo mayor o menor intensidad lumínica en sus diferentes captadores. Gracias a esto, un software es capaz de mapear los distintos niveles de intensidad lumínica en un plano y poder así lograr la representación de un perfil, todo ello en cuestión de segundos. [11]

A pesar de que la cámara CCD pueda parecer un sistema realmente efectivo, hemos de advertir que según el equipo láser a representar podemos encontrarnos en conflicto con la potencia de este. Como ha se ha expuesto anteriormente, existen láseres de potencias relativamente altas, esto implica que es necesario la atenuación del haz mediante filtros. A partir de ciertos niveles de intensidad lumínica los receptores de la cámara pueden quedar distorsionados si no se atenúa la señal, o en el peor de los casos se podría llegar a dañar el dispositivo. El hecho de atenuar la señal implica que la representación obtenida no se corresponde a la real y por lo tanto habría que realizar ciertas correcciones en el modelo obtenido. En los resultados presentaremos algunas capturas conseguidas mediante la cámara con la finalidad de comparar el resultado 3D de la cámara con el método del proyecto.

6.3 Método con fibra óptica acoplada a motores paso a paso

Vamos a disponer de dos motores paso a paso, los cuales se encuentran acoplados entre sí mediante un accesorio. El primero de ellos, será el que se desplace en el eje horizontal. El segundo motor, que se desplaza solidario con el primero, permite un movimiento en el eje vertical, pudiendo así mover el cabezal de la fibra óptica a cualquier coordenada en un plano perpendicular al eje longitudinal. El cabezal solidario con los motores irá desplazándose punto a punto por el haz recogiendo la intensidad lumínica, mientras que el otro extremo de la fibra, estará conectado a un sensor que permitirá conocer el valor de intensidad.

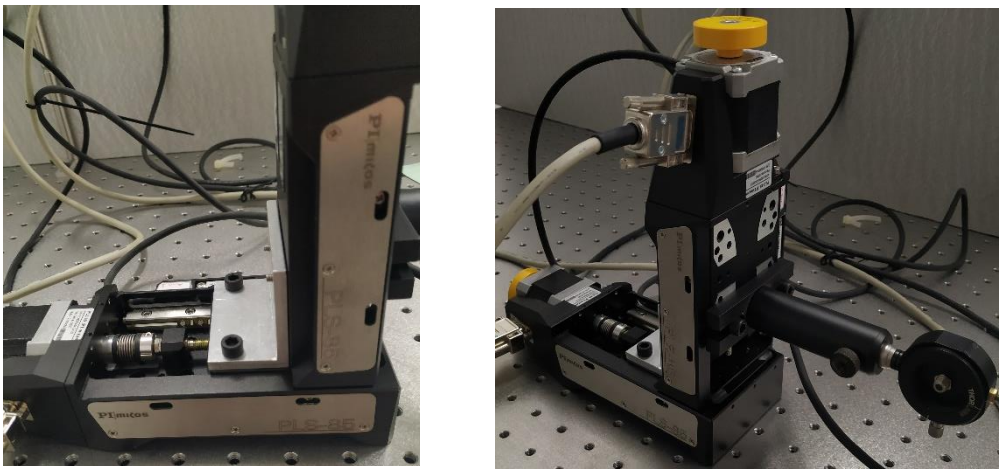


Ilustración 9: Imagen de los motores paso a paso con el cabezal de la fibra acoplado

Los dos motores y el potenciómetro estarán conectados a una unidad portátil que mediante Labview permitirá configurar el recorrido y capturar los datos.

Empleando esta metodología, podemos obviar el problema que teníamos con la cámara CCD, y es que a pesar de que la potencia del equipo láser sea muy elevada, la fibra óptica es un material casi transparente, el cual puede estar sometido a niveles de intensidad lumínica mucho mayores. La principal desventaja, quizás no tan obvia observando solamente los resultados, es el tiempo empleado. Mientras que el tiempo empleado con la cámara para obtener un perfil es del orden de segundos, con este método se precisa de mucho más tiempo, ya que primero es necesario recoger las medidas a lo largo del haz, y después procesarlas para obtener una imagen.

6.4 Cálculos paramétricos

Existen unos parámetros, que permiten describir diferentes perfiles de haces láser, haciendo posible así su comparación. Vamos a tratar de exponer su fórmula de cálculo y lo que sus valores representan.

Los haces de luz emitidos por un láser, en general, se pueden expresar como soluciones de la ecuación de onda parabólica. Para derivar esta ecuación hemos de hacer una serie de hipótesis. La primera hipótesis es que cualquier equipo láser empleado en este estudio será del tipo monocromático, lo cual quiere decir que su longitud de onda tendrá un valor fijo, o tomará unos valores dentro de un rango muy pequeño y limitado, de este modo, solamente la frecuencia es dependiente del tiempo, pero no así su amplitud del campo eléctrico.

Una segunda hipótesis, es que la zona de estudio corresponderá a las inmediaciones de la fuente de la luz en un eje de propagación (eje longitudinal z), zona conocida como región paraxial. De esta forma, podemos presentar la ecuación de Helmholtz, que permite describir el comportamiento de los haces ópticos monocromáticos en la zona paraxial.

$$\vec{\nabla} \wedge (\vec{\nabla} \wedge \vec{E}_0(\vec{r})) - k^2 \vec{E}_0(\vec{r}) = 0$$

Realizando algunos pasos y suponiendo que las variaciones de amplitud del haz sobre distancias del orden de la longitud de onda son mucho más pequeñas que la amplitud, se puede llegar a la ecuación de onda parabólica.

$$\frac{\partial E_0}{\partial z} - \frac{i}{2k} \nabla_\perp E_0 = 0$$

Donde:

- E_0 expresión del campo eléctrico en función de las coordenadas espaciales
- $\nabla_\perp = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2}$ Laplaciano transversal

La ecuación de onda parabólica, nos describe los frentes de onda como parábolas a lo largo del eje longitudinal, por lo tanto esta expresión solo es válida mientras nos encontremos en la región paraxial. Una de las diferentes soluciones a las que lleva la expresión anterior es la de un haz Gaussiano.

$$E_0(\rho, z) = \frac{U_0\ \omega_0}{\omega(z)} * e^{\frac{-\rho^2}{\omega^2(z)}} \cos\left(\frac{k\rho^2}{2R(z)} - \xi(z)\right)$$

- ω_0 = el radio de la sección transversal mínima
- $z_r = \frac{\pi\, {\omega_0}^2}{\lambda}$ = distancia de Rayleigh, la cual se define como la distancia desde la cintura del haz hasta otro punto donde dicha cintura multiplica por un factor $\sqrt{2}$
- Radio de la sección transversal: $\omega(z) = \omega\sqrt{1 + \frac{z^2}{{z_r}^2}}$ donde z es la distancia de propagación.
- Desfase: $\xi(z) = atg(\frac{z}{z_r})$
- Coordenadas: $r^2 = x^2 + y^2 + z^2 = \rho^2 + z^2$

Todas las expresiones anteriores se pueden resumir en la situación siguiente. Cuando tenemos un haz gaussiano a lo largo de un eje, su radio varia a lo largo

de toda la distancia recorrida, aumentando conforme se aleja de su fuente. Estas variaciones de forma, siempre producen que en un punto que denominaremos como z=0, el radio del haz tome el valor más pequeño posible, es decir, en un principio, el haz de luz tiende a converger, hasta un punto o z=0 donde comenzará a divergir. [9]

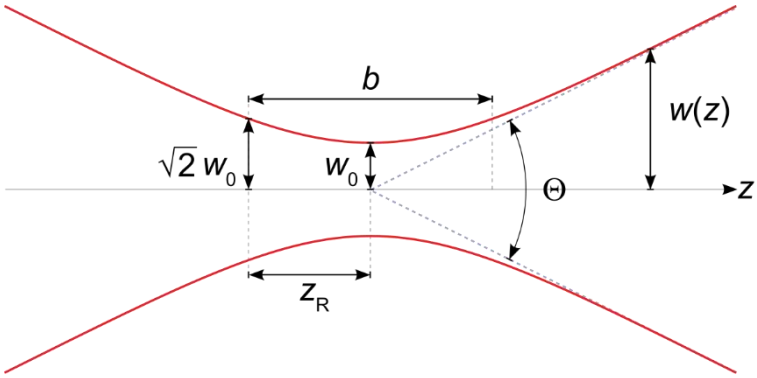


Ilustración 10: Vista de una planta de un haz de luz gaussiano

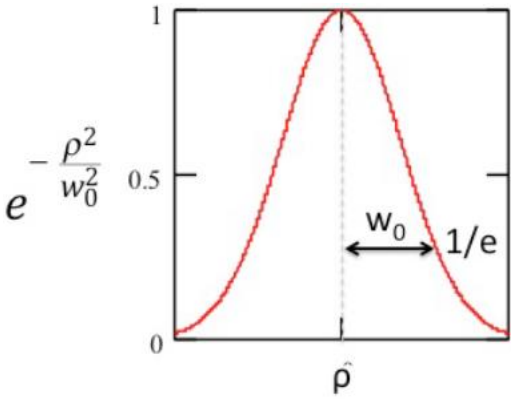


Ilustración 11: Vista de un plano transversal de un haz de luz gaussiano

El motivo del nombre "haz Gaussiano" es que para cualquier plano perpendicular al eje z, la distribución normalizada de la intensidad del campo electromagnético resultante es una campana Gaussiana. Dicha campana, para una amplitud de valor igual a $\frac{1}{e}$ permite obtener el valor de ω_0.

Un haz gaussiano queda perfectamente definido por las siguientes variables: su dirección de propagación (eje z), posición del "beam waist", (la posición z=0, donde el radio del haz es mínimo), el radio del haz en el beam waist que es el radio mínimo, la longitud de onda y la potencia total del haz. La distancia comprendida entre los puntos $+z_r$ y $-z_r$ se denomina el rango confocal y representa la región del espacio donde el haz queda bastante colimado. Para distancias mayores a la distancia de Rayleigh el haz presenta una divergencia que crece de forma lineal con la distancia.

Como ya ha sido de mención antes, estos haces de luz no son constantes a lo largo de todo el eje, sino que presentan divergencia, por lo tanto vamos a buscar cómo medir la divergencia que presenta cada un láser. Para distancias mayores que la distancia de Rayleigh, podemos aproximar el ángulo de divergencia con la siguiente sencilla expresión:

$$\varphi = \frac{\lambda}{\pi w_0}$$

Como se puede apreciar, dicha divergencia depende de la longitud de onda del haz, que puede medirse con un espectrómetro y del radio mínimo.

Para medir experimentalmente la divergencia de nuestro haz, debemos medir el diámetro del haz, el cual va cambiando a lo largo del eje z y por lo tanto para cada plano obtenido es necesario calcular su valor. Para un haz Gaussiano es posible calcularlo utilizando la ténica Knife-Edge. Basta buscar para cada plano los valores correspondientes al 86% y 14% de la potencia total. Cuando los haces no son gaussianos, hace falta un método distinto.

El método 4σ es un método estándar para obtener un cálculo del diámetro, que se logra a través del cálculo de la desviación estándar de la matriz de intensidades.

Para cada plano del haz, tomamos una imagen con la CCD que será una matriz de n filas y m columnas (correspondiente con el número de píxels), donde cada valor de la matriz, definido por su posición x £ n e y £ m. Por definición el cálculo del diámetro 4σ se puede obtener para los dos ejes, esto es:[10][12]

$$d_x = 4\sigma_x$$

$$d_y = 4\sigma_y$$

A partir de aquí es necesario calcular la desviación estándar del eje x o principal y el eje y o secundario. La expresión que define la desviación estándar de una matriz de n filas y m columnas es:

$$\sigma^2{}_x = \frac{\sum_x \sum_y (x - \bar{x})^2 I(x,y)}{\sum_x \sum_y I(x,y)}$$

$$\sigma^2{}_y = \frac{\sum_x \sum_y (y - \bar{y})^2 I(x,y)}{\sum_x \sum_y I(x,y)}$$

Donde:

- $\sum_x \sum_y I(x,y)$ = A la potencia total del haz láser en el plano de estudio
- $\bar{x} = \frac{\sum_x xI(x,y)}{\sum_x \sum_y I(x,y)}$ = Al centroide del eje x, equivalente al centro de masa de todos los puntos recogidos en el plano.
- $\bar{y} = \frac{\sum_x yI(x,y)}{\sum_x \sum_y I(x,y)}$ = Al centroide del eje y.

Por lo tanto, para el cálculo del diámetro de un haz cualquiera, la expresión resultante será:

$$d_x = 4 * \sqrt{\frac{\sum_x \sum_y (x-\bar{x})^2 I(x,y)}{\sum_x \sum_y I(x,y)}}$$

$$d_y = 4 * \sqrt{\frac{\sum_x \sum_y (y-\bar{y})^2 I(x,y)}{\sum_x \sum_y I(x,y)}}$$

Las unidades resultantes serán las mismas que las empleadas para medir las distancias tanto verticales como horizontales, para nuestros casos en mm.

Para cuantificar las propiedades de dos perfiles de láseres diferentes basándonos en medidas de parámetros como la divergencia y el radio mínimo definiendo un cociente que resulta muy interesante y práctico cuando se quiere comparar distintos perfiles. Este parámetro se conoce como M^2 y su expresión es:

$$M^2 = \frac{2\theta * 2w}{2\varphi * 2w_0} = \frac{\pi}{4\lambda}(2\theta * 2w)$$

Los términos del numerador, hacen referencia al producto del diámetro del haz por su ángulo de divergencia, mientras que el denominador corresponde al mismo producto para un haz Gaussiano. Resulta evidente, que estamos intentando realizar una comparación entre un láser cualquiera y un haz Gaussiano ideal. Si encontráramos un láser con un haz de luz Gaussiano, el coeficiente sería uno, mientras que para cualquier otro caso, sería superior a la unidad. [7][8]

6.5 Efectos de lentes en rayos Gaussianos

Es imprescindible el uso de materiales ópticos para los distintos casos que se pueden presentar, tales como focalizar el rayo, o dirigirlo hacia un punto o dirección específicos…etc. Como hemos comentado anteriormente, es necesario conocer una zona delimitada donde sepamos que el láser tiene su sección más pequeña.

Para poder realizar las mediciones oportunas, se utilizan lentes para poder redireccionar el haz y focalizarlo en una zona conocida. El paso de la luz a través de las distintas lentes modifica ligeramente el haz principal tanto a nivel espacial como a nivel energético, ya que reduce la intensidad. Para deducir los nuevos parámetros introducimos un factor de fase en función de la distancia del eje como:

$$\varphi(\rho) = \frac{2\pi}{\lambda} L(\rho)$$

Donde L(ρ) es la longitud del camino óptico en función del espacio. Para poder conocer esta nueva función tenemos que asumir que utilizaremos una lente plana-convexa de grosor D.

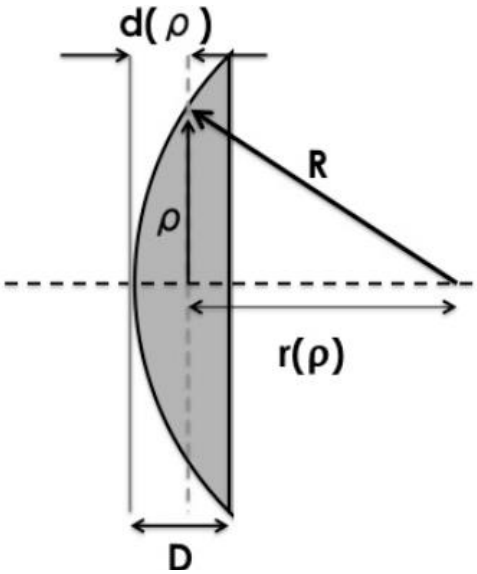


Ilustración 12: Parametrización de la longitud del camino óptico

Lo que vemos es un ejemplo de la lente descrita anteriormente. Para resolver el camino focal, nos valemos de la óptica geométrica para definir la longitud focal de una lente delgada como f. Por otro lado, la longitud del camino focal L(ρ) es:

$$L(\rho) = d(\rho) + [D - (\rho)] * n = nD - (\rho)[n - 1]$$

Gracias a las ecuaciones anteriores y a un proceso matemático complejo que no es alcance de este estudio, obtenemos lo que sería la relación entre los parámetros antes de entrar en contacto con una lente y después.

$$z'_r = \frac{f^2}{z_r}$$

$$\frac{\pi {w'_0}^2}{\lambda} = \frac{f^2 \lambda}{\pi {w'_0}^2}$$

$$w'_0 = \frac{f\lambda}{\pi w_0}$$

Donde los parámetros con comilla son aquellos que se obtienen después atravesar una lente, mientras que el resto son los valores originales del rayo láser.

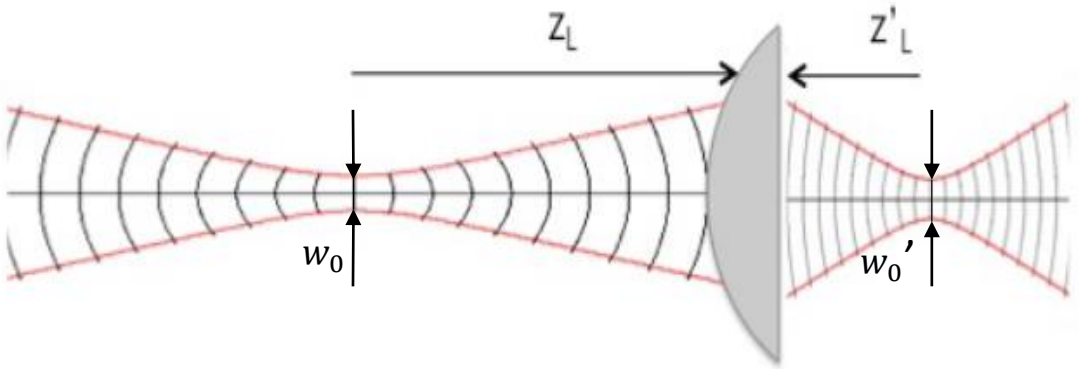


Ilustración 13: Resultado obtenido al focalizar un haz láser a través de una lente

Gracias a esta imagen, la ecuación del M^2 resulta como:

$$M^2 = \frac{2\theta * 2w}{2\varphi * 2w_0} = \frac{\pi}{4\lambda}[2\theta \cdot 2w]$$

Podemos realizar la afirmación siguiente, la cual es de suma importancia; y es que el valor de M^2 se mantendrá constante sin importar si este es obtenido directamente de la luz que surge del sistema, o bien si está medido después de focalizar dicha luz mediante lentes. Por esta razón los cálculos presentados no serán necesarios aplicarles factores de corrección siempre y cuando se busque el factor M^2.

7. CÁLCULOS Y RESULTADOS DE UNA MEDIDA MEDIANTE KNIFE-EDGE

7.1 Fundamentos de la técnica Knife-Edge

Como ya se había expuesto anteriormente, el método manual Knife-Edge permite caracterizar perfiles bajo unas determinadas condiciones. Al tratarse de un método manual, presenta algunas ventajas e inconvenientes respecto a otros métodos. En cualquier caso, pasamos a presentar la demostración de este método y unos resultados obtenidos del láser de helio-neón de laboratorio.

Partiendo del montaje experimental que se ha descrito anteriormente, vamos a buscar aquellos puntos del eje x donde el fotodiodo puede medir un 86% y 14% de la potencia total. La razón del porqué se procede así lo detallamos a continuación:

La fórmula que define la intensidad de un haz Gaussiano es:

$$I(z,x,y) = \frac{I_0 * {\omega_0}^2}{\omega(z)^2}\, e^{\frac{-2(x^2+y^2)}{\omega(z)^2}}$$

Partiendo de esta ecuación, es posible calcular la potencia del láser que se va a transmitir. Para ello aplicamos una integral doble, sobre los ejes x e y ya que el eje de desplazamiento z permanece constante para cada medición.

La obtención de la potencia se logra cuando:

$$P = \int_{x}^{+\infty} dx \int_{-\infty}^{+\infty} dy\, \frac{I_0 * {\omega_0}^2}{\omega(z)^2}\, e^{\frac{-2(x^2+y^2)}{\omega(z)^2}}$$

Vemos que para el eje y los límites son los supuestos para un haz Gaussiano ya que este se supone ideal y los límites que abarca se encuentran en el infinito. En el eje x sin embargo, al delimitar con la cuchilla, el origen es a partir de un punto x, siendo el punto final también infinito.

Es entonces cuando llegamos a una expresión donde podemos diferenciar dos términos, primero, una constante que define la potencia total del haz, y otro que debido a la naturaleza de la integral, nos lleva a la definición de una función error.

$$P = \frac{I_0 {\omega_0}^2 \pi}{2} * \frac{1}{2}\left(1 - \mathrm{erf}\left(\frac{x\sqrt{2}}{\omega(z)}\right)\right)$$

Si definimos una normalización del radio $R = \frac{x}{\omega(z)}$ donde definimos como x_1 = -0,5 $\omega(z)$ y por otro lado x_2 = +0,5 $\omega(z)$ obtenemos:

$$P\,(-0{,}5, z) = 0{,}86 P_{total}$$

$$P\,(+0{,}5, z) = 0{,}14 P_{total}$$

Para comprender mejor este procedimiento, mostramos una imagen a continuación:

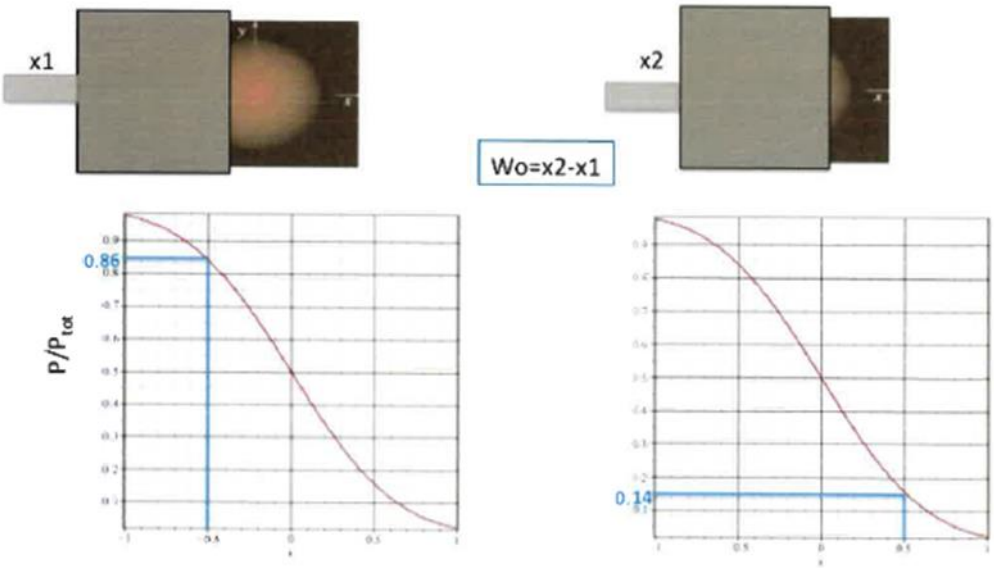


Ilustración 14: Representaciones de las intensidades obtenidas al 14-86% de la total del haz

De estos dos resultados podemos obtener que $\Delta x = \omega(z)$. Dicho de otro modo, la diferencia del desplazamiento de x entre el punto x_2, aquel donde se encuentra el 86% de la intensidad total, y el punto x_1 donde tenemos el 14% de la intensidad total, es equivalente al radio de la sección transversal.

Para comprender como se ha procedido a ejecutar la técnica del Knife-Edge y que resultados se han obtenido, primero veamos cómo ha sido el montaje experimental en el laboratorio.

Podemos resumir el montaje siguiente así:

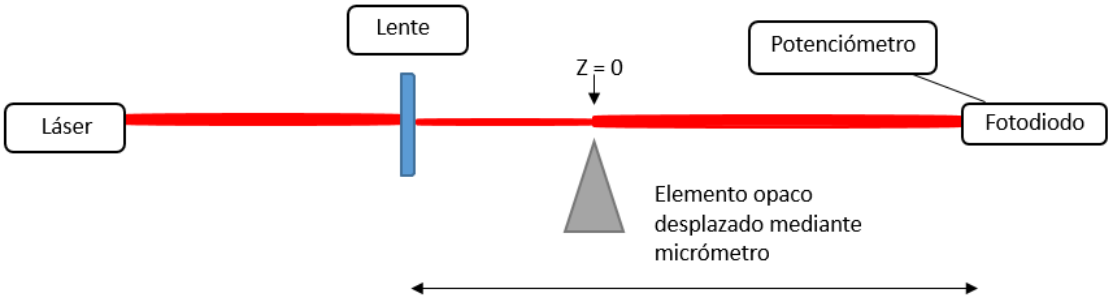


Ilustración 15: Esquema gráfico del funcionamiento y metodología utilizados para la caracterización de un haz láser mediante Knife-Edge

El proceso explicado anteriormente mide el radio del haz a una distancia z determinada. La medida se tiene que repetir para diferentes planos en el eje z de modo que podamos obtener distintos radios para cada plano z. Una vez hecho esto, es posible graficar el radio en función de z. El resultado de dicho gráfico debería asemejarse a una parábola, la cual debería tener un radio mayor en aquella zona donde los valores de la cintura del haz sean más pequeños.

La demostración anterior, es posible si consideramos un haz Gaussiano ya que conocemos sus expresiones matemáticas, sin embargo, cuando el perfil del haz no lo es, implica que puede o no ser Gaussiano, y por lo tanto son desconocidas las funciones que describen los perfiles.

El procedimiento después del montaje consiste en los siguientes pasos:

- Primero retiramos la cuchilla hasta asegurarnos que el fotodiodo mide toda la potencia.
- En este punto se determina la potencia que llega y se calcula, para este caso, el 86% y 14% de la potencia total
- Ahora con el micrómetro, empezamos a eclipsar el haz, de tal forma que podamos reducir la intensidad que recibe el fotodiodo.
- Cuando logremos tener las potencias calculadas, podremos ver los milímetros recorridos y determinar el valor del w(z) correspondiente.

Este procedimiento, se repite variando la distancia z con un paso determinado comenzando en alguna zona cercana a la lente convergente y terminando varios centímetros lejos de la zona de convergencia.

7.2 Resultados experimentales mediante Knife-Edge

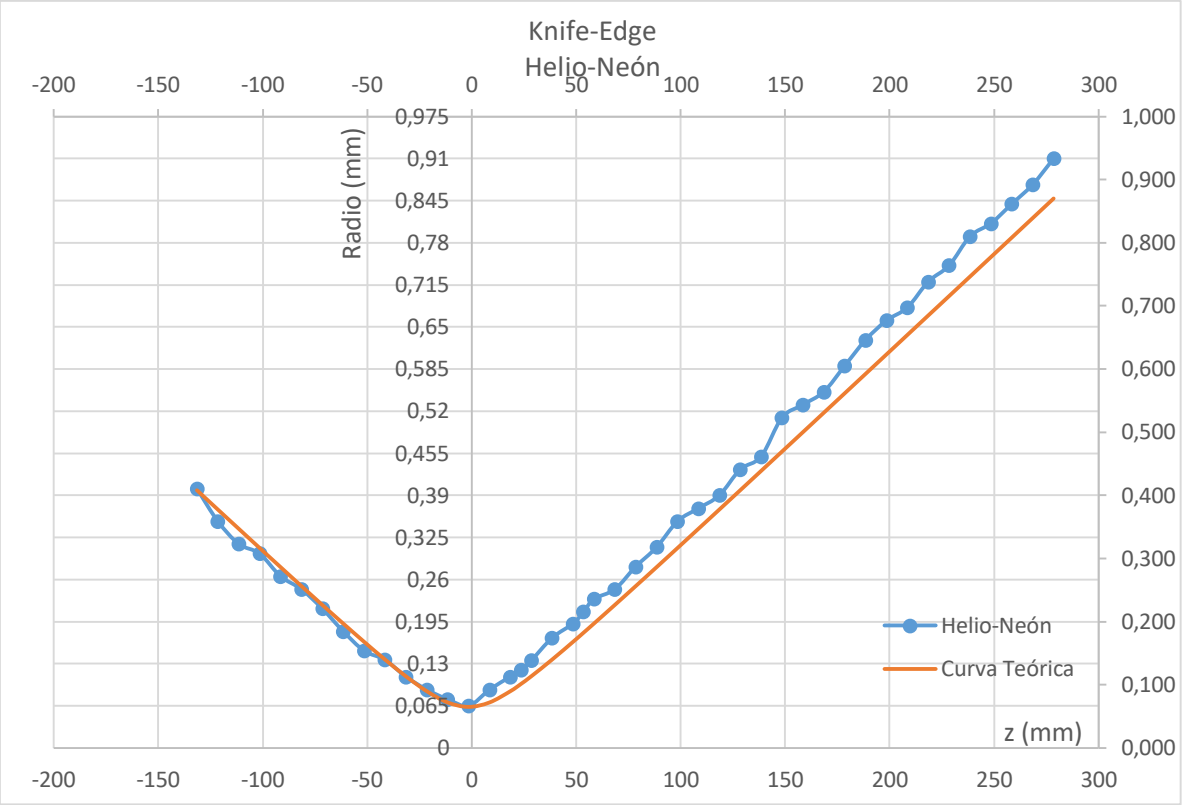


Ilustración 16: Gráfica de los radios teóricos y experimentales para el láser de Helio-Neón

Si dirigimos la atención sobre el gráfico, vemos que aparecen representadas dos curvas. Como bien se indica, la naranja es la parábola que surgiría tras aplicar la ecuación teórica, es decir, correspondería al radio mínimo teórico en cada punto si el láser fuera ideal.

La curva azul representa para cada punto, el Δx entre los puntos del 86% y 14% de la potencia total. Podemos hacer diferentes observaciones si comparamos ambas gráficas.

En primer lugar y quizás más significativo es el gran parecido entre ambas. Tanto la curva teórica como la experimental, tienen su mínimo en el valor de 0,065 mm. Quiere decir que hemos podido acercarnos muchísimo al valor que se esperaría. Dicho punto está ubicado como z = 0, pero no quiere decir que hayamos encontrado como primer punto el de radio mínimo, simplemente después de obtener todos los puntos se ha ajustado como el origen.

Como nos falta el ángulo, creamos un gráfico de solamente la parte lineal con la finalidad de obtener la ecuación de una recta.

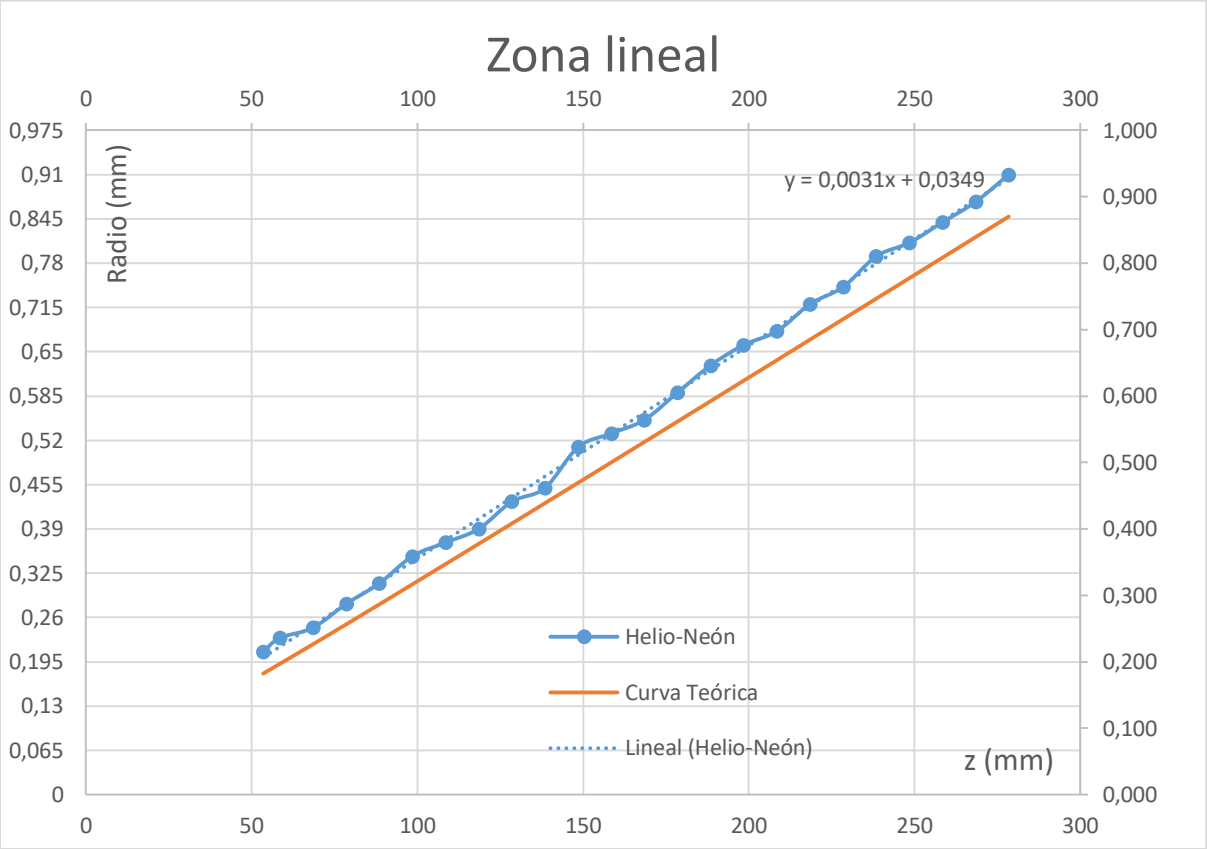


Ilustración 17: Ampliación de la zona lineal del gráfico de radios

En el gráfico podemos ver de nuevo la curva teórica y la experimental, además, se ha añadido una línea de tendencia para nuestros puntos experimentales, la cual es bastante coincidente.

La ecuación de la recta presentada es la siguiente:

$$y = 0{,}0031x + 0{,}0349$$

Para encontrar el ángulo de divergencia φ debemos encontrar el ángulo que forma nuestra recta con la horizontal. Por lo tanto:

$$\varphi = arctg(m) = arctg\ (0{,}0031) = 0{,}0031$$

Debido a que el ángulo es muy pequeño, al aplicar la función arco tangente el resultado no cambia. Esto nos permite ir ahora al cálculo del M2.

Utilizando la fórmula M^2 obtenemos:

$$M^2 = \frac{\pi * \omega_0 * \varphi}{\lambda} = \frac{\pi * 0{,}065(mm) * 0{,}0031(mrad)}{6.328 * 10^{-4}\ (mm)} = \ 1{,}015$$

7.3 Conclusiones sobre el método

El valor obtenido de M^2 vemos que es próximo a 1. De aquí podemos concluir varios aspectos: primero el hecho de tal como ya establecimos anteriormente, un láser de gas obtiene un valor muy cercano a la unidad como es nuestro caso. Otra conclusión que podemos sacar es que la técnica funciona realmente cuando el perfil es Gaussiano.

Si bien la técnica del Knife-Edge funciona, es cierto que solo es aplicable bajo algunas condiciones. Primero, la potencia del láser no puede ser excesivamente alta, ya que algunos láseres de semiconductor son capaces de desarrollar mucha más intensidad, esto implica que existan problemas tanto en la cuchilla como en el fotodiodo. Debido a la alta energía transmitida, la cuchilla que se utiliza para ir cortando el láser puede sufrir quemaduras, lo que puede traducirse en la creación de irregularidades debidas al calor, por lo tanto con cada medida iríamos perdiendo precisión.

Otro aspecto es el fotodiodo, el cual está bajo el mismo problema, ya que para bajas intensidades, el fotodiodo puede trabajar sin ningún problema, sin embargo cuando elevamos la potencia recibida, es posible que llegue tanta energía por unidad de superficie que sature el medidor haciendo que la lectura no se haga posible, o bien en casos peores, que el fotodiodo pueda llegar a quemarse.

En definitiva, como método manual es eficaz ya que es posible caracterizar un láser en óptimas condiciones siempre y cuando se cumplan los requisitos anteriores. Por otro lado, el tiempo empleado en este experimento ha sido de aproximadamente de cuatro o cinco horas. Al tratarse de un método manual, el usuario es quien debe hacer todo el trabajo y repetirlo de forma constante para cada punto que se quiera medir. Del mismo modo también se ve influida la precisión. Por estos motivos resultaría interesante disponer de un método que fuera lo más automatizado posible.

8. SET UP Y PROGRAMACIÓN

8.1 Montaje experimental

Previamente a la explicación de cómo se ha desarrollado los diferentes software, describiremos brevemente el montaje experimental que ha sido necesario incorporar al laboratorio para luego, utilizando el programa correspondiente tomar las medidas oportunas.

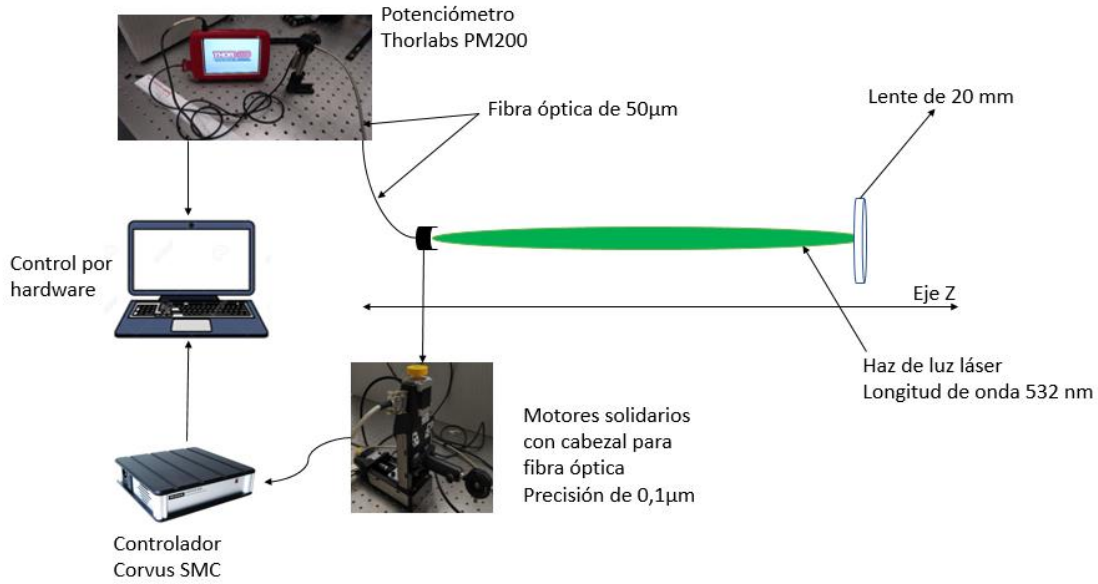


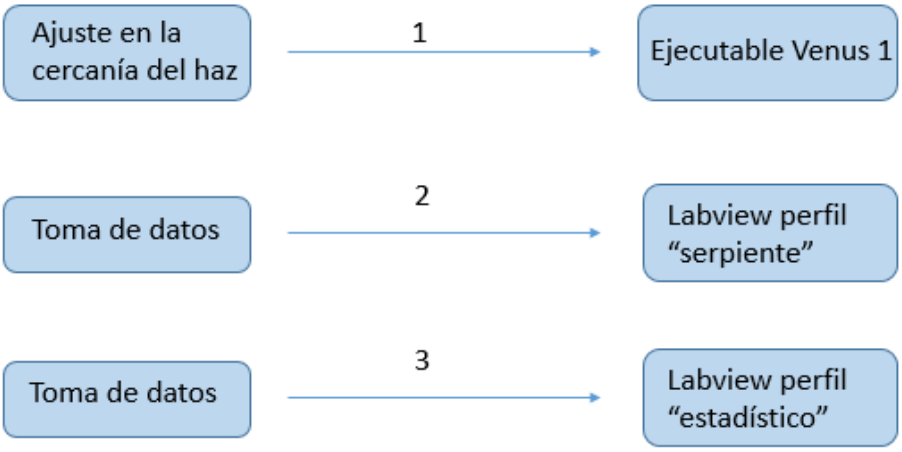
Ilustración 18: Esquema gráfico del montaje experimental para la caracterización de un perfil láser mediante fibra óptica

Situado en un lugar algo más alejado de la mesa de trabajo tenemos el equipo láser, el cual su luz se irá proyectando y reflejando a través de diferentes lentes y diafragmas hasta llegar a nuestra lente de 20 mm que aparece en el esquema. La luz láser, una vez atravesada la lente se encuentra en nuestra zona de trabajo. En este punto incorporamos en aquel plano que se quiera medir los motores con su cabezal para la fibra óptica. Esta fibra irá conectada a un potenciómetro que medirá en tiempo real la intensidad lumínica recibida en la fibra.

Por otro lado el control de los motores y del dispositivo de medida se hará mediante una unidad portátil a través el programa de Labview correspondiente. Posteriormente y solo con la unidad portátil se podrán proceder a los cálculos pertinentes con los datos recogidos para visualizar los resultados obtenidos.

8.2 Obtención de medidas mediante ejecutable y Labview

Para la captura de los datos se va a establecer una metodología como la que sigue:



Para cualquier plano que se dese obtener la potencia por puntos es necesario seguir los pasos descritos en el anterior esquema. En primer lugar, se ha de conseguir alinear el haz de luz para que este sea paralelo a dirección de trabajo donde están anclados los motores. A continuación decidir en qué puntos del eje z o longitudinal se van a realizar las medidas.

Una vez está todo listo, el paso 1 consiste en acercar la fibra óptica a las inmediaciones del haz de luz. El principal motivo de ajustar el puntero es que de no realizarse, los programas obtendrían muchos ceros antes de comenzar a detectar energía lumínica, además de eso, la obtención de puntos irrelevantes aumenta el tiempo de finalización de los programas en una cantidad muy grande.

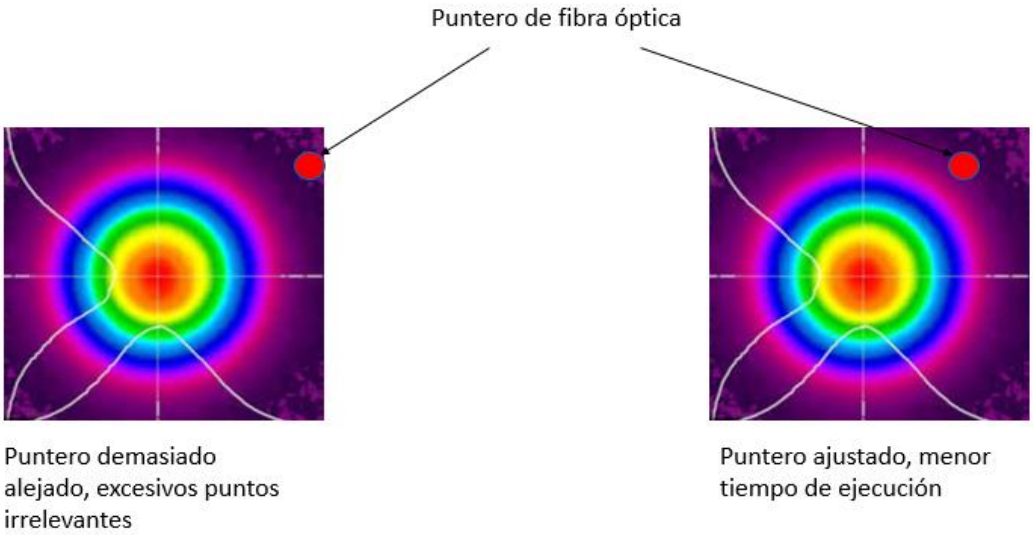
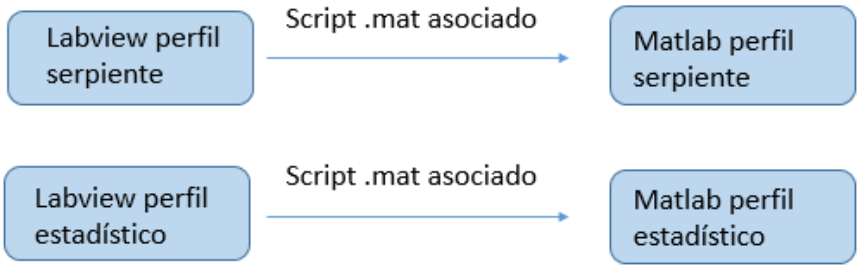


Ilustración 19: Ejemplos de distintos casos para el arranque del recorrido de la fibra óptica

Una vez se han ejecutado los pertinentes ajustes se puede proceder a la obtención de los valores de intensidad lumínica por punto. Para lograr esto se ha de emplear el programa desarrollado en Labview del Paso 2.



La intención del esquema anterior es esclarecer el hecho que para procesar los datos obtenidos con el Labview perfil "serpiente" es necesario aplicar el archivo Matlab con la misma denominación, al igual que con el caso del perfil estadístico. El motivo es que las combinaciones de filas resultantes no son las mismas y por ello hay que darles un tratamiento específico en cada una.

8.3 Labview perfil serpiente

Los dos programas de Labview tienen objetivos distintos y pueden ejecutarse en el orden que se desee. El software denominado serpiente es aquel que permite mostrar un dimensionado 3D de un plano cualquiera después de haber recogido los datos. El sobrenombre dado es debido al recorrido que realiza para tomar los datos.

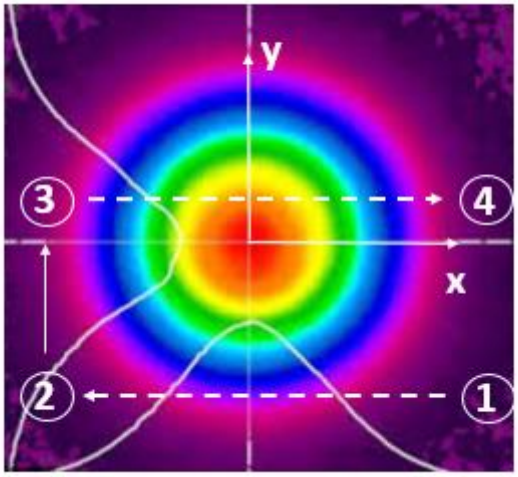


Ilustración 20: Recorrido ejecutado por el Labiview serpiente

Conociendo el punto donde se va a comenzar el recorrido, la fibra óptica realizará un desplazamiento como el que se muestra en la imagen. El objetivo es crear una matriz donde cada posición x-y se le ubique un valor de potencia, dicho de otro modo, buscamos transformar un plano del haz láser en una matriz de datos. Para poder lograr este recorrido es fundamental introducir los siguientes parámetros:

- Posición inicial x: Por defecto siempre será 0, ya que con la aplicación Venus 1, es posible fijar las coordenadas relativas del motor horizontal.
- Posición inicial y: Ídem para el motor vertical.
- Posición final x: Este valor determinará cual es la distancia que se recorrerá en cada "fila".
- Posición final y: Lo mismo pero para el motor vertical.
- Gap x: Con este parámetro vamos a definir cuál es la longitud del paso para el motor horizontal. Este es un parámetro muy importante por varias razones. El uso de un paso muy grande no permitirá tener una resolución real de cómo es el perfil porque la matriz resultante tendrá insuficientes datos. Por otro lado, emplear un paso muy pequeño permitirá obtener mayor resolución y un buen resultado en 3D, no obstante aparecerá una problemática que se detallará más adelante. El valor ideal para este parámetro es uno que se acerque al tamaño de la fibra empleada.
- Gap y: Ocurre lo mismo que con el parámetro anterior, a menor paso mayor resolución.
- Folder: Aquí se ha de introducir un nombre, que servirá para nombrar la carpeta que se crea para almacenar el txt resultante con todos los datos tomados. Cabe destacar que por simplicidad, este programa de Labview

recoge todos los valores y los almacena en una única columna, con lo cual ha de ser procesada posteriormente.

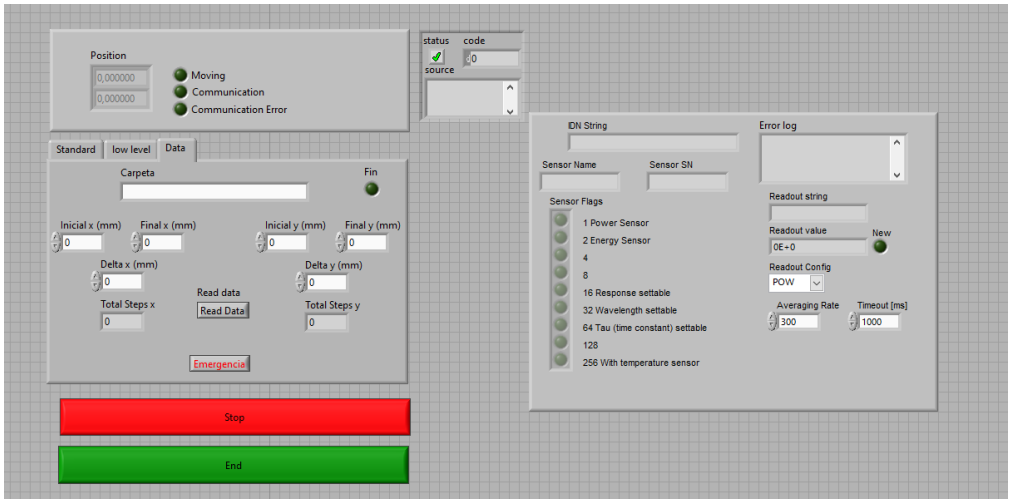


Ilustración 21: SCADA para el control del programa Labview serpiente

Una vez se ha logrado recoger la muestra de forma correcta, la carpeta nombrada con anterioridad debe contener este txt con todos los datos guardados. Por defecto cada carpeta tendrá un nombre diferente, sin embargo todos los txt tendrán el mismo nombre, este es “datos”. El motivo de ello es que para el procesado de datos se va a emplear código Matlab, y por mayor facilidad la primera acción de todos los scripts de Matlab tienen la instrucción “leer datos”, de esta forma no hay que tomarse la molesta de cambiar el nombre del fichero txt cada vez.

El scrpit de Matlab relaza los siguientes comandos con el fin de obtener una matriz de datos verosímil con el plano que está midiendo. Para ello realiza los siguientes pasos.

1. Lee todos los datos del archivo txt.
2. Crea una matriz de x columnas e y filas con todos los valores a cero.
3. Reemplaza estos valores cero con los correspondientes obtenidos previamente.
4. La matriz resultante está completa sin embargo, según donde se haya comenzado a leer el perfil, se ha de invertir el orden de las filas pares o impares, ya que estás estarán giradas respecto al orden lógico del perfil.
5. Una vez se ha logrado la matriz correcta, se produce un mapeado 3D del perfil resultante.

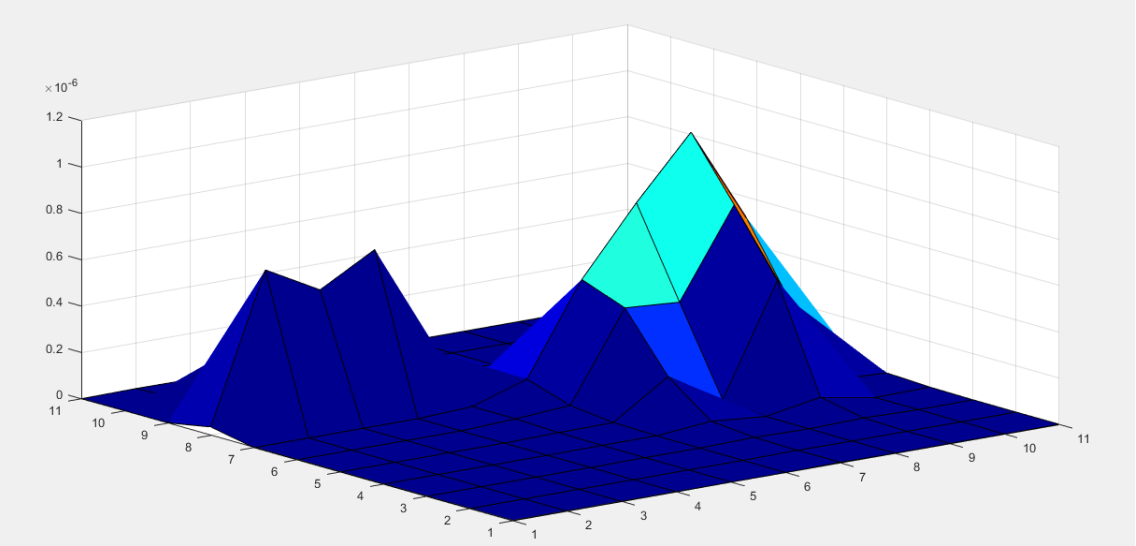
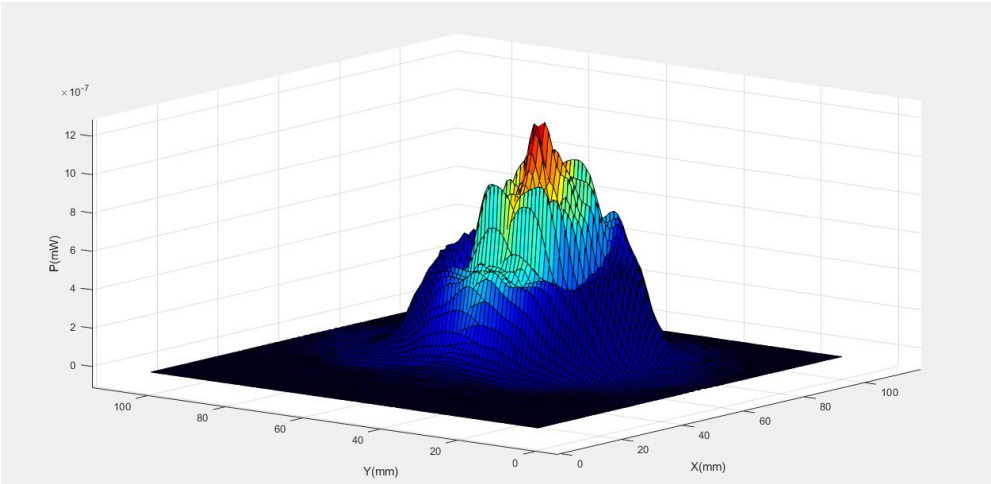
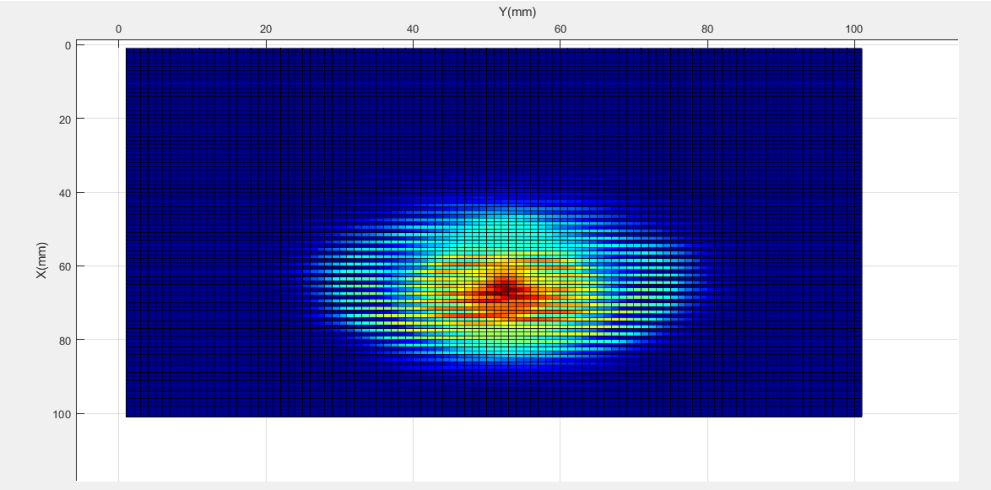


Ilustración 22: Resultado obtenido al utilizar un paso de la fibra muy grande en comparación al diámetro del haz

El grafico presentado es el resultado de emplear el programa para la recogida de datos aplicando pasos de motor relativamente grandes. Para este caso 1 mm para cada eje. Como se puede apreciar, la matriz resultante es de solamente de 121 puntos, número el cual es muy bajo para obtener precisión suficiente en un haz que ronda los 6 mm de diámetro.





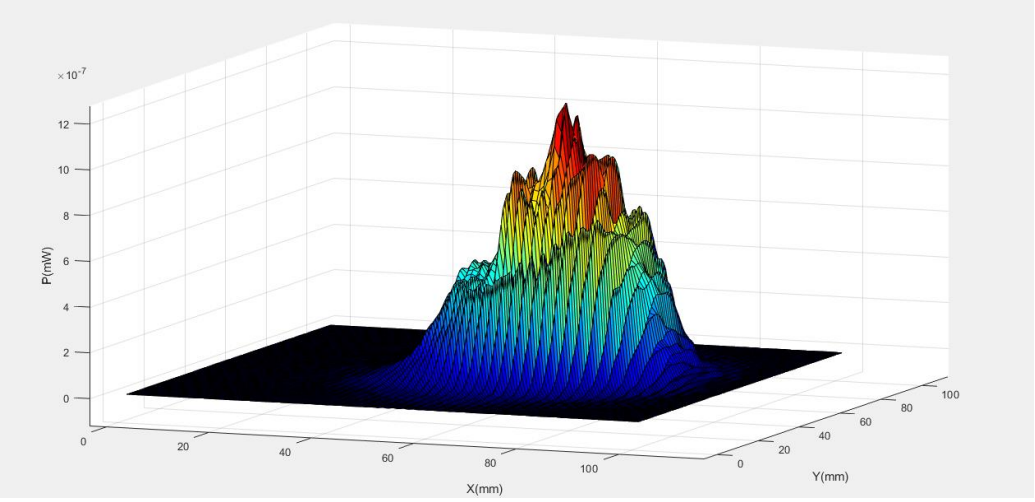


Ilustración 23: Imágenes desde diferentes ángulos del perfil obtenido empleando un paso más pequeño

Las tres imágenes anteriores corresponden a diferentes vistas de una nueva captura realizada. En esta ocasión, los pasos de ambos motores fueron los mismos, con un valor de 0,1 mm, con una distancia a recorrer de 0 a 10 mm por cada eje. Estos datos equivalen a un total de 10.201 puntos, muchos más que en el caso anterior, ya que ahora es posible denotar muchos detalles y cambios de relieve. A pesar de ser un láser gaussiano, los pequeños relieves que se denotan en algunos puntos son debido a que uno de los diafragmas que permitían redirigir el haz hacía la zona de trabajo, estaba algo más cerrado de lo necesario y alteraba el haz resultante.

8.4 Labview perfil estadístico

El conjunto de softwars anteriores estaban empleados para la búsqueda de una representación en dos o tres dimensiones del perfil de un haz de luz láser. Otra de las cuestiones que se planteó al inicio de este estudio es de si los equipos láser son capaces de mantener una potencia concreta por punto de forma continua en el tiempo o si bien estas fluctúan en un rango, y si este rango es grande o pequeño.

Para este ejercicio es imperioso aplicar el segundo programa desarrollado en Labview, que es el Perfil estadístico. En este caso el recorrido a realizar en un plano cualquiera es como el que se esquematiza a continuación.

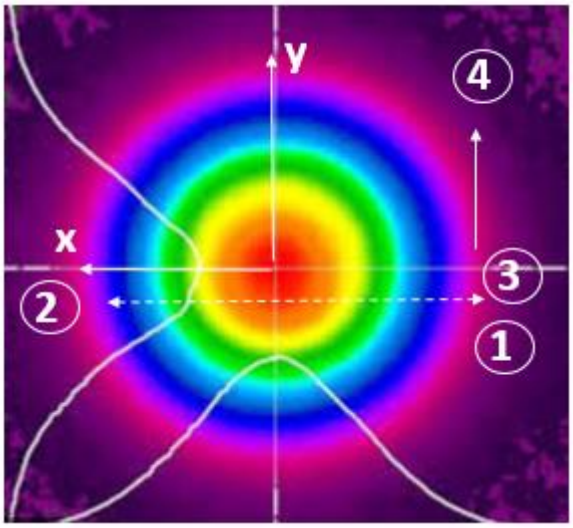


Ilustración 24: Recorrido ejecutado por el Labview estadístico

Suponiendo que el recorrido comienza en un punto cualquiera previamente definido, se capturan un número determinado de veces la misma fila tanto en un sentido como en otro. Tras finalizar el número de recorridos en una sola fila pasa a la siguiente para realizar el mismo número de filas en una superior. Por lo tanto, aquí los parámetros a introducir serán los mismos que en el anterior programa salvo por uno adicional.

- Número de repeticiones: Este valor hace referencia al número de la cantidad de pares de filas a reunir para un cada valor de y. Es decir una repetición, incluye medidas de izquierda a derecha y de derecha a izquierda.

La finalidad de este programa no es obtener un perfil 3D, ya que de emplear el mismo scrpit de Matlab para los datos recogidos aquí, estaríamos obteniendo una matriz de datos con filas repetidas, lo que se traduciría en una imagen distorsionada de la realidad. Lo que ejecuta el scrpit estadístico es:

1. Lee todos los datos del archivo txt.
2. Crea una matriz de x columnas e y filas con todos los valores a cero.
3. Reemplaza estos valores cero con los correspondientes obtenidos previamente.
4. La matriz resultante tiene filas que nuevamente deben ser giradas, ya que durante la toma de datos unas se hicieron en un sentido del perfil y las otras en el sentido contrario.
5. Una vez se han ordenado los valores, hemos de tener en cuenta que los grupos de pares de filas deberían tener valores muy similares entre sí, ya que estamos midiendo los mismos puntos n veces.

6. Estableciendo una fila concreta y el número de repeticiones realizadas durante la medida se puede obtener un gráfico en 2D que compara filas iguales en función de su potencia.

8.5 Tiempos de ejecución

A pesar de que este apartado no estaba contemplado durante el planteamiento de este estudio, merece una mención aquí por la relevancia que toma para el correcto desarrollo del trabajo.

Sea cual sea el programa controlador Labview que se emplee para tomar muestras en ambos casos el usuario sufrirá una demora que aumentará a medida que aumentemos el número de puntos. En cualquiera de ambos programas existe una iteración que se repite, esta es: desplazar motor, esperar (timer1), leer medida, recoger e imprimir valor, esperar (timer2)… esta secuencia a pesar de que transcurran en cuestión de milisegundos tienen una repercusión muy grande debido al gran número de puntos que se necesitan para completar una muestra.

Para esclarecer cuanto importante es este aspecto, vamos hacer un cálculo aproximado del tiempo necesario para completar una muestra de perfil para el paso del programa serpiente.

Para cualquier medida, aparecerán dos tipos de tiempos, los voluntarios (impuestos por los timers) y los involuntarios (causados por el tiempo que necesita el motor para desplazarse de un punto a otro). En primer lugar cabe destacar que el uso de los temporizadores en el programa son fundamentales para el correcto funcionamiento del programa. De no usarlos no sería posible la toma de lectura y su correcto traspaso a el archivo txt. Por lo tanto:

- Tiempos voluntarios = t_1 (ms)
- Tiempos involuntarios = t_2 (ms)

Por simplicidad del cálculo, consideramos que todos los temporizadores van a tomar el mismo valor, esto es que todos los tiempos voluntarios diferentes son iguales: $t_{11}= t_{12}= t_{13}$. El número de puntos viene determinado por la longitud a recorrer y el paso empleado, para este caso tomamos como:

- Nx = número de puntos en x = 101
- Ny = número de puntos en y = 101

Con estos valores, el cálculo del tiempo aproximado de ejecución será:

$$t = Ny(3 * \mathrm{t1} * \mathrm{Nx}) + \mathrm{t1} * \mathrm{Ny} + (\mathrm{Nx} * \mathrm{Ny} * \mathrm{t2})$$

Los tiempos t_1 son conocidos porque ya están estipulados como 100 ms en los puntos relevantes del programa, por lo tanto tenemos dos incógnitas en la ecuación anterior, el tiempo total y el tiempo de desplazamiento. Durante una de las medidas realizadas, el tiempo total de ejecución fue de aproximadamente 3 horas y 15 minutos, lo que se traduce en 11.700 segundos = 117.00.000 ms = t. Con la fórmula anterior podemos pues estimar cual es el tiempo de desplazamiento del motor.

$$\mathrm{t2} = 870\ \mathrm{ms}$$

Esto es el tiempo que tarda el motor en hacer cada desplazamiento. Valor que se acerca mucho al segundo. Por lo tanto, es lógico pensar que cuanto menor sea el paso de motores para poder obtener más resolución, mayor será el tiempo empleado para poder recopilar todas la información.

Ahora vamos hacer una observación a ver como contribuyen los distintos tiempos a los experimentos. Si volvemos a calcular el tiempo necesario para tomar las medidas bajo dos hipótesis:

- Cálculo del tiempo suponiendo t_1 = 100 ms y t_2 = 870 ms. Obtenemos un resultado de t = 11.700 s
- Cálculo del tiempo suponiendo que no existen timers en el programa y es posible ejecutarlo de forma correcta sin errores t_1 = 0 ms y t_2 = 870 ms. Obtenemos un resultado de t = 8.690 s

Aplicando algunas proporciones llegamos a la conclusión qué:

Contribución del tiempo empleado sin temporizadores = $\frac{8690}{11700} * 100 = 74.2\%$

Contribución del tiempo empleado temporizadores = $100 - 74.2 = 25.8\ \%$

El mayor tiempo de ejecución viene determinado por el tiempo que los motores empleen para cada desplazamiento y aunque se eliminaran los timers o se redujera su tiempo, su contribución total para hacer más rápido el programa sería pequeña. Es por este motivo que con anterioridad se mencionó que de hacer muy pequeño el paso del motor, repercutiría en unos tiempos de ejecución muy largos. Es conveniente emplear un paso de motor suficiente para tener buena resolución pero no exceder ese valor para no demorar mucho la toma de datos.

9. RESULTADOS

El objetivo de este estudio es el diseño e implementación de un sistema para caracterizar láseres de alta potencia. La obtención de estos datos permite así obtener cálculos paramétricos que definen un haz láser.

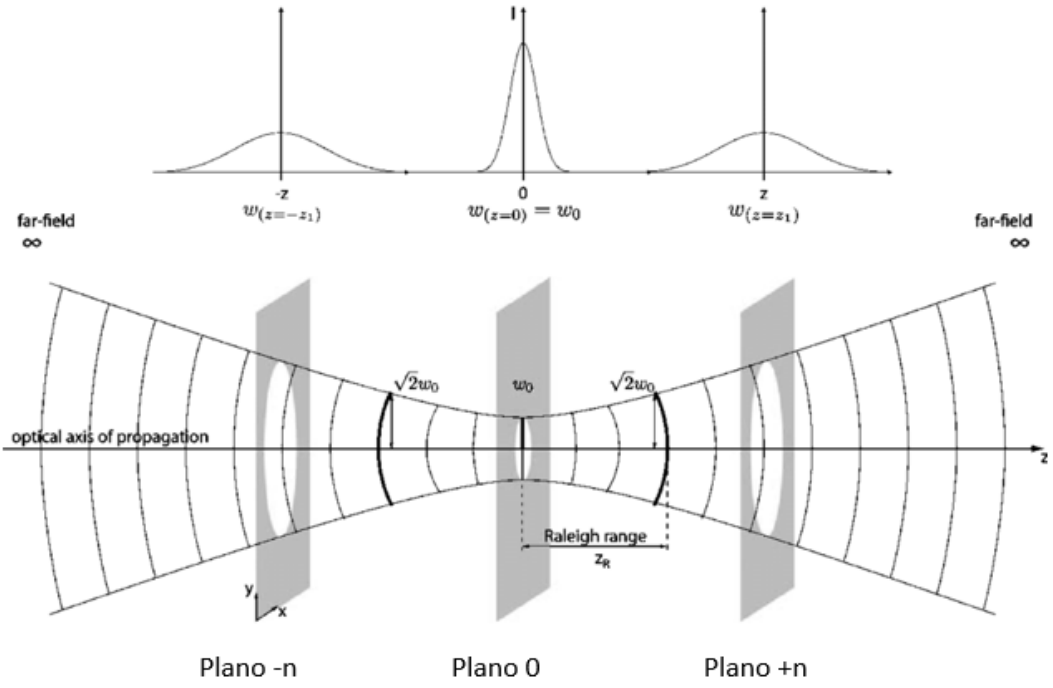


Ilustración 25: Representación del rango de Rayleigh y evolución del radio en los planos transversales

La imagen anterior refleja el objetivo del experimento. Dado un haz láser conducido a través de lentes y diafragmas, focalizamos el haz mediante una lente, en nuestro caso de 20 mm para obtener un haz como el de la figura. Gracias al efecto de la lente, podemos obtener una nueva zona paraxial, donde inicialmente el haz convergerá hasta un punto donde se obtiene un valor diametral mínimo, para luego divergir hasta un valor de z lejano.

El plano denominado como plano 0 es donde el diámetro toma el valor mínimo, no obstante a priori no es posible localizar su posición. Con el fin de encontrarlo vamos a obtener mediante nuestro sistema un número de planos suficientes antes y después de este punto.

En cada plano primero obtendremos una matriz de datos de intensidad I(x,y) equivalente a la que tomaríamos con la cámara CCD. Los datos se miden mediante una fibra óptica acoplada a unos motores y a un medidor de potencia. El desplazamiento de los motores, automatizado con el programa descrito anteriormente, permite obtener los datos de la matriz que, trasladados a Matlab, permiten una visualización de 2D o 3D del perfil del haz en dicho plano. A partir

de estas medidas, y mediante las expresiones descritas podremos calcular el valor del diámetro de cada plano. Con estos valores trazaremos una gráfica diámetro vs eje longitudinal z. Como se tratará de un haz Gaussiano obtendremos una gráfica muy próxima a una parábola, donde a través de todos los planos obtenidos, podremos obtener una interpolación del valor del eje longitudinal para el cual el diámetro es mínimo, esto es ω_0, y el ángulo de divergencia φ. Por último será posible calcular un valor de M^2.

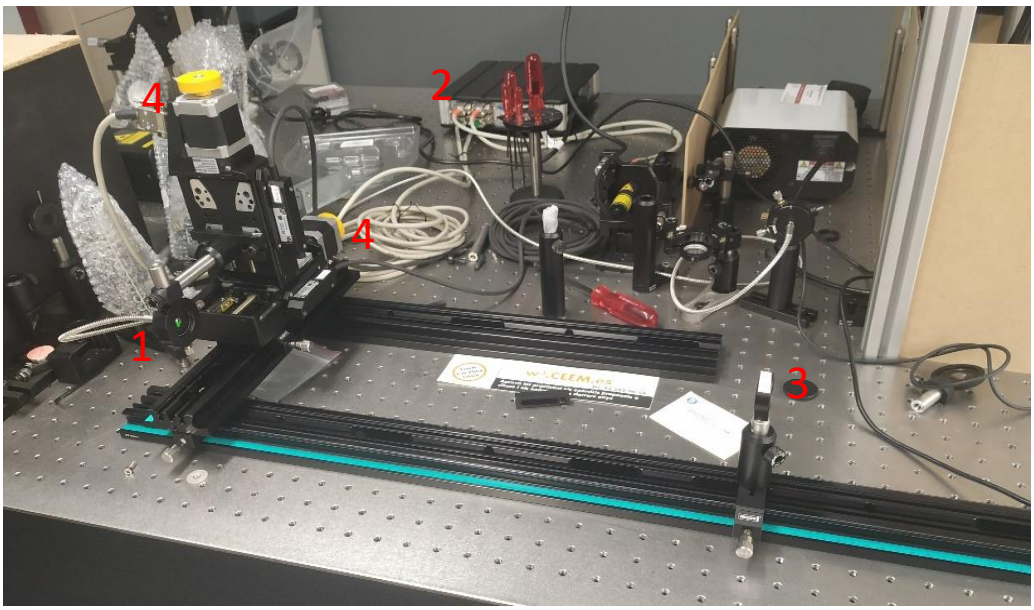


Ilustración 26: Imagen del montaje experimental para la toma de medidas

Este es el montaje real para la toma de medidas del haz de luz. Donde:

- 1: Unión entre los motores y la fibra óptica. Se puede apreciar el haz de luz en el centro del mismo. (Punto verde).
- 2: Controlador de los motores
- 3: Lente para la focalización del haz.
- 4: Motores paso a paso

9.1 Resultados labview perfil estadístico

Antes de ejecutar el programa Labview serpiente, vamos a comprobar mediante el ejecutable Labview estadístico que resultado tiene capturar medidas en una sola dimensión. Una vez hecho esto, si el resultado es un gráfico que de algún modo se asemeja a una campana de gaussiana, entonces podremos proceder con las capturas 2D.

Para esta prueba en un plano arbitrario se han medido 4 veces 2 líneas horizontales diferentes de un mismo perfil y cuyo resultado es el que mostramos a continuación:

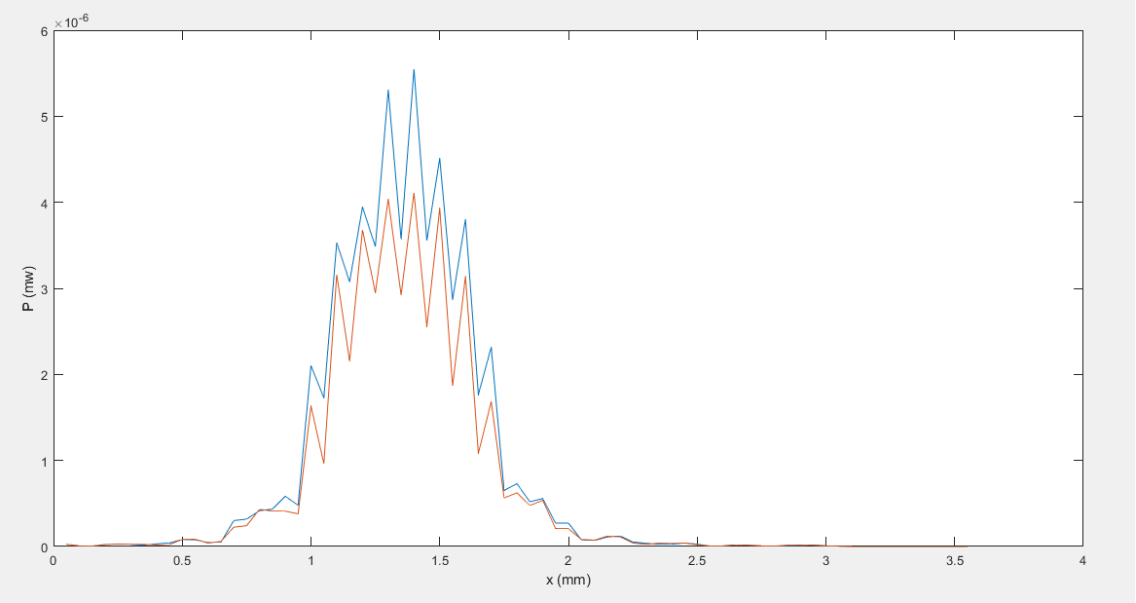


Ilustración 27: Gráfico de energía lumínica para un eje horizontal mediante Labview estadístico

Para un vector x cuya longitud comprende desde 0 hasta 4 mm, los resultados de potencia obtenidos mediante un paso de 0,1mm son los que aparecen en la figura. En la gráfica se pueden apreciar dos curvas distintas que lógicamente corresponden a dos niveles de intensidad diferentes, por otro lado, aunque en la imagen no sea visible en realidad existen dos curvas superpuestas detrás de las curvas roja y azul. Estas curvas que no son visibles son el resultado de haber medido la misma línea con el mismo paso en sentido contrario. Lo que quiere decir que este equipo láser presenta una estabilidad muy buena ya que es capaz de dar la misma potencia para cualquier punto a lo largo del tiempo.

La otra observación que pretendíamos hacer es si la curva resultante resultaba gaussiana o no. Como se puede apreciar, aunque existan curvas de potencias diferentes, estas siempre toman una forma similar, tendiendo a una forma gaussiana aunque se denoten varios picos, algo que podría corregirse aumentando notablemente el número de puntos.

Debido a que los resultados obtenidos con esta primera medida han resultado positivos, pasamos pues a la captura en dos dimensiones de los perfiles de este haz láser

9.2 Resultados labview perfil serpiente

A partir de aquí, se toma una medida de distintos planos, ubicando el conjunto de ambos motores manualmente, guiándonos con el carril de fijación donde se ubican lente y unión. Como se han tomado muchas medidas de varios planos, a continuación mostramos una pequeña parte, referente a dos o tres planos obtenidos mediante el programa Labview y también mediante la cámara CCD.

Considerando que el cero del carril está a la izquierda y que la lente se encuentra en la posición de 50 cm, algunas de las capturas en 3D obtenidas son las siguientes.

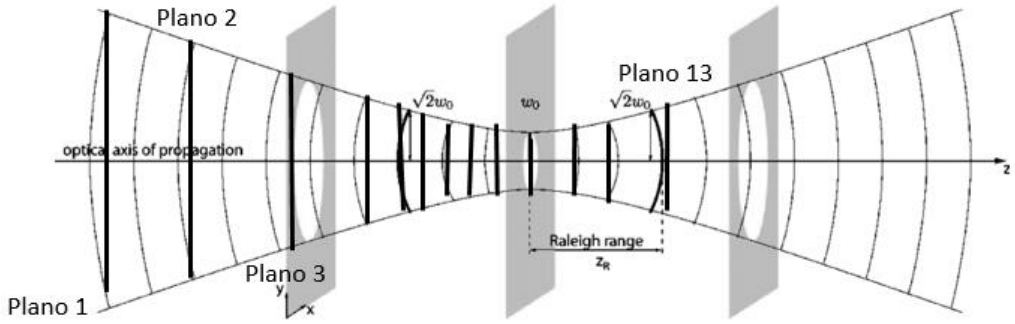


Ilustración 28: Detalle gráfico de los planos a capturar por el programa

Plano 1 que corresponde a 8 cm desde el inicio de carril

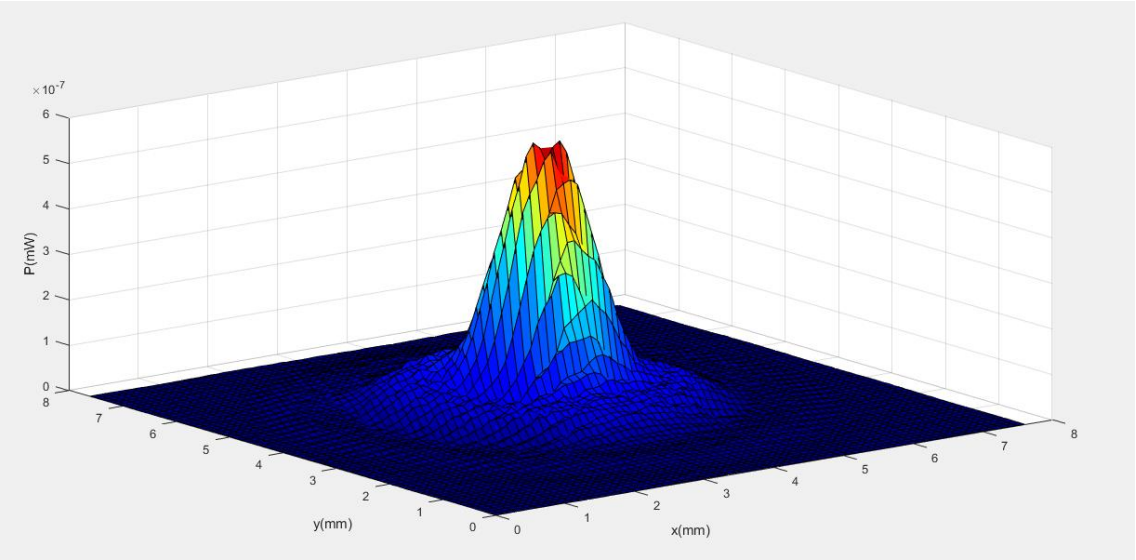


Ilustración 29: Captura del plano 1, con un paso de 0,1mm y una cuadrícula de 75x75

Para este caso se creó un mapa de 7,5 x 7,5 mm donde el paso empleado ha sido de 0,1 mm, por lo tanto los datos de partida ha sido:

- $x_0 = 0$ mm
- $x_f = 7{,}5$ mm
- $x_{gap} = 0{,}1$mm
- $y_o = 0$ mm
- $y_f = 7{,}5$ mm
- $y_{gap} = 0{,}1$ mm

Tras procesar la imagen, con la matriz de datos se ha procedido a calcular mediante las fórmulas expuestas anteriormente los posibles diámetros tanto en el eje x como en el eje y cuyos valores son:

- D4σx = 3,967 mm
- D4σy = 4,118 mm

Al tratarse de un haz Gaussiano, ambos diámetros deberían ser muy parecidos sin embargo al no disponer de otra medida válida para este plano no es posible calcular un error entre ellos ya que no se dispone de ninguna referencia.

También es posible ver en 2D el resultado:

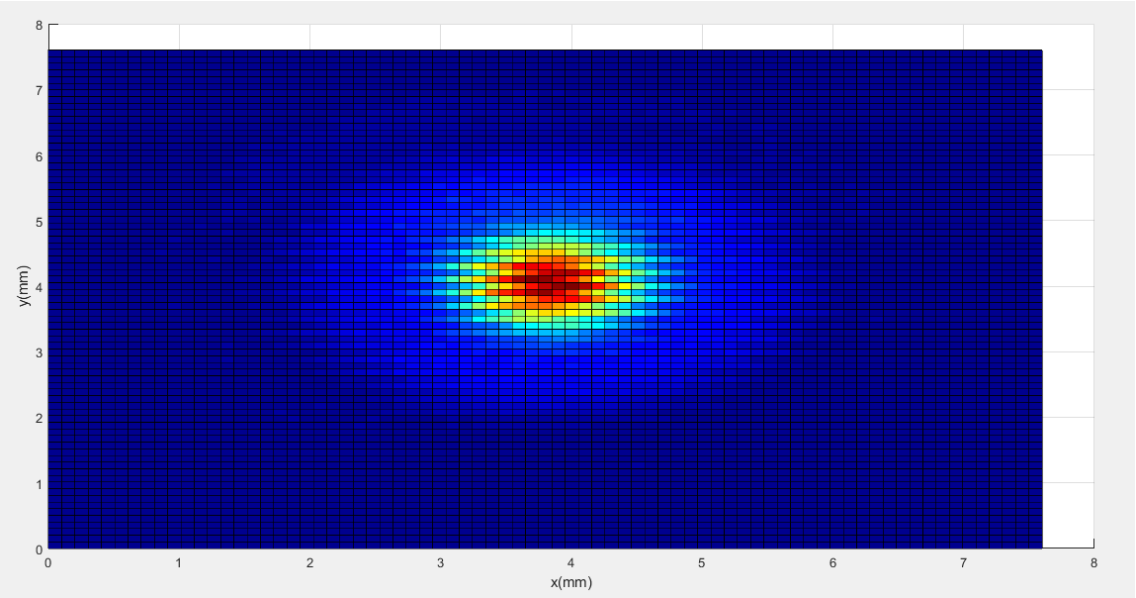


Ilustración 30: Plano 2D de la anterior captura

Plano 2 que corresponde a 14 cm desde el inicio del carril

Aquí ha sido posible presentar la captura obtenida mediante el programa Labview además de una captura mediante la cámara CCD, con la finalidad de ver si existen similitudes o diferencias entre los diferentes métodos

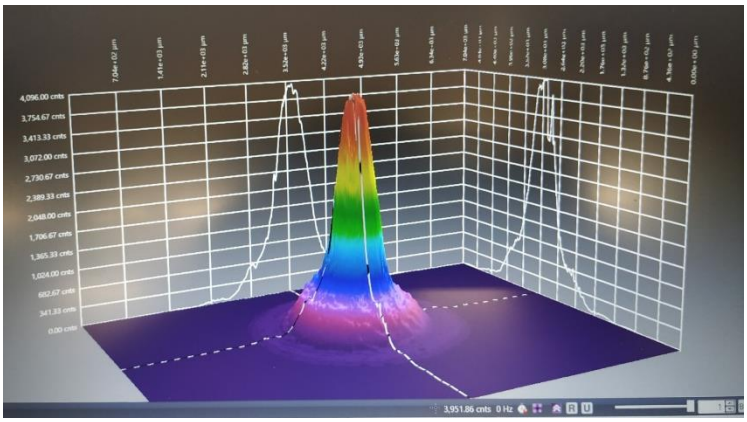


Ilustración 31: Gráfico 3D obtenido mediante la cámara CCD del plano 2

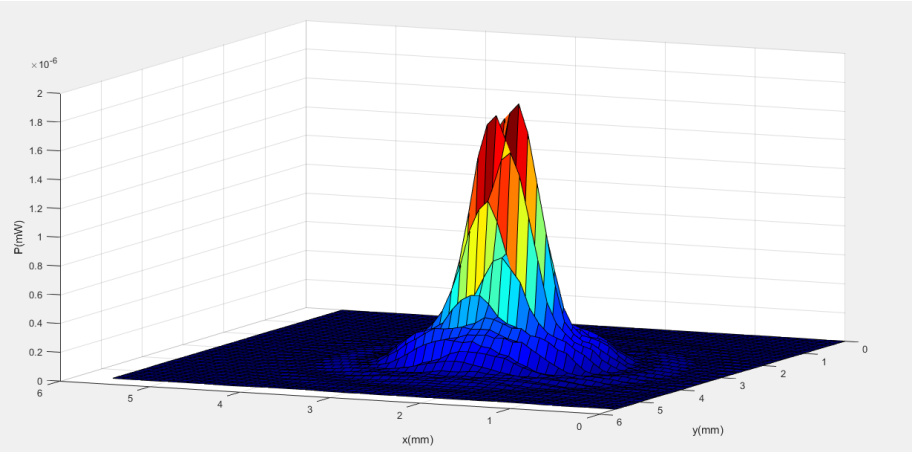


Ilustración 32: Representación 3D mediante Labview serpiente para el plano 2

Los parámetros introducidos para la captura de este plano han sido similares al plano anterior:

- x_0 = 0 mm
- x_f = 5,5 mm
- x_{gap} = 0,1mm
- y_o = 0 mm
- y_f = 5,5 mm
- y_{gap} = 0,1 mm

Por otro lado, aquí sí ha sido posible presentar unos valores tanto a nivel de programa Labview, como a nivel de cámara CCD, lo que hace posible que se puedan calcular sus valores

- D4σx = 3,305 mm
- D4σy = 3,291 mm
- D4σx (CCD) = 3,298 mm
- D4σy (CCD) = 3,213 mm

Con estos valores vamos a calcular el error absoluto de ambos ejes:

$$Eax = \frac{|3{,}305 - 3{,}298|}{3{,}298} * 100 = 0.21\%$$

$$Eay = \frac{|3{,}291 - 3{,}213|}{3{,}213} * 100 = 2{,}42\%$$

A nivel teórico, los diámetros de ambos ejes deberían rondar un valor muy similar entre ellos, a nivel práctico vemos que esto no es así ya que existen muchos factores que intervienen en el resultado final de la medida. Sin ir más lejos, durante las primeras medidas, uno de los diafragmas no estaba bien regulado,

lo que modificaba el haz respecto uno de los ejes. Otras explicaciones podrían deberse al acoplamiento de luz que se consigue dentro de la fibra, ya que nada asegura que en cada plano siempre se obtenga la misma orientación respecto al eje de propagación del láser.

Plano 13 que corresponde a 40 cm desde el inicio del carril

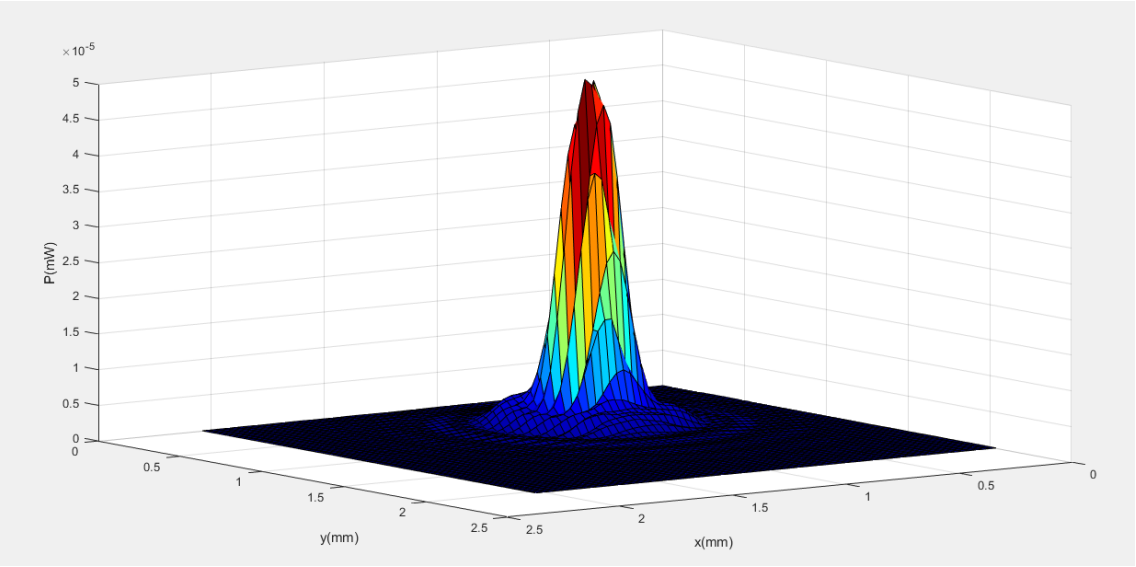


Ilustración 33: Imagen 3D del plano 13 obtenido mediante Labview serpiente

Este corresponde al último plano que ha sido posible recoger durante este estudio. Este presenta algunas diferencias, por ejemplo en el tamaño del mapa o en el paso empleado para recorrer el perfil. Los datos adjuntos son:

- x_0 = 0 mm
- x_f = 2 mm
- x_{gap} = 0,03mm
- y_o = 0 mm
- y_f = 2 mm
- y_{gap} = 0,03 mm

Al tratarse de un plano cercano al plano 0 o de radio mínimo, la zona de barrido es sensiblemente más baja, ya que no son necesarios recorrer tanto milímetros porque el haz láser aquí es mucho más pequeño en comparación a planos anteriores. Se puede apreciar que al haber utilizado una resolución mucho más pequeña se aprecian más detalles en la propia figura, ya que está resaltada con más relieves, concluyendo que para superficies de luz pequeñas, es necesario una resolución mucho más pequeña, aunque no hay que olvidar que se ha de disponer de bastante tiempo para las medidas.

Por último el cálculo diametral para este plano resulta:

- D4σx = 0,687 mm
- D4σy = 0,708 mm

Con estos valores podemos comprobar que cuanta mayor es la resolución utilizada, más se asemejan los valores de los diámetros, por lo tanto para una buena medida, una resolución de esta magnitud o inferior, ya que el motor es capaz de emplear un paso de hasta 0,001 mm, se pueden esperar buenos resultados mediante este nuevo método de caracterización de un perfil láser.

Para no extender de forma innecesaria la memoria con los datos de cada plano, mostramos a continuación una tabla donde se recogen los resultados obtenidos con cada plano medido tanto los logrados mediante Labview como los conseguidos mediante cámara CCD.

		Medidas		Cámara CCD	
Nº Plano	z(cm)	D4σx(mm)	D4σy(mm)	D4σx(mm)	D4σy(mm)
1	8	3.967	4.118		
2	14	3.305	3.291	3.298	3.213
3	21	2.430	2.494	2.633	2.572
4	25	1.915	1.927		
5	30	1.187	1.138	2.628	2.327
6	31	0.933	0.949		
7	32	0.758	0.777		
8	33	0.614	0.619		
9	34	0.465	0.457		
10	36	0.254	0.142		
11	37	0.199	0.172		
12	38	0.303	0.390		
13	40	0.687	0.708		

A partir de esta tabla se pueden extraer numerosas conclusiones. El plano 37 resulta de un punto de inflexión en los valores del diámetro, es lógico pensar que el radio mínimo se encontrará en algún punto muy cercano a este plano. Como no disponemos de más datos, se tomará en consideración que los valores calculados para este punto serán los mínimos. Podemos observar que para planos alejados del origen (z =37) existe una relación bastante próxima entre los resultados obtenidos mediante la cámara CCD y los obtenidos con Matlab, véase plano 14.

No obstante, a medida que nos acercamos al plano de referencia, los valores distan más entre un método y otro (véase plano 30). Esto puede ser debido a que la superficie del haz es tan pequeña que resulta difícil para la cámara medir

con exactitud el diámetro real si no se han hecho varios barridos para centrar con precisión el punto de medida.

Centrando nuestra atención ahora en solamente los cálculos mediante la fibra vamos a graficar los diámetros en relación a su posición en el eje longitudinal.

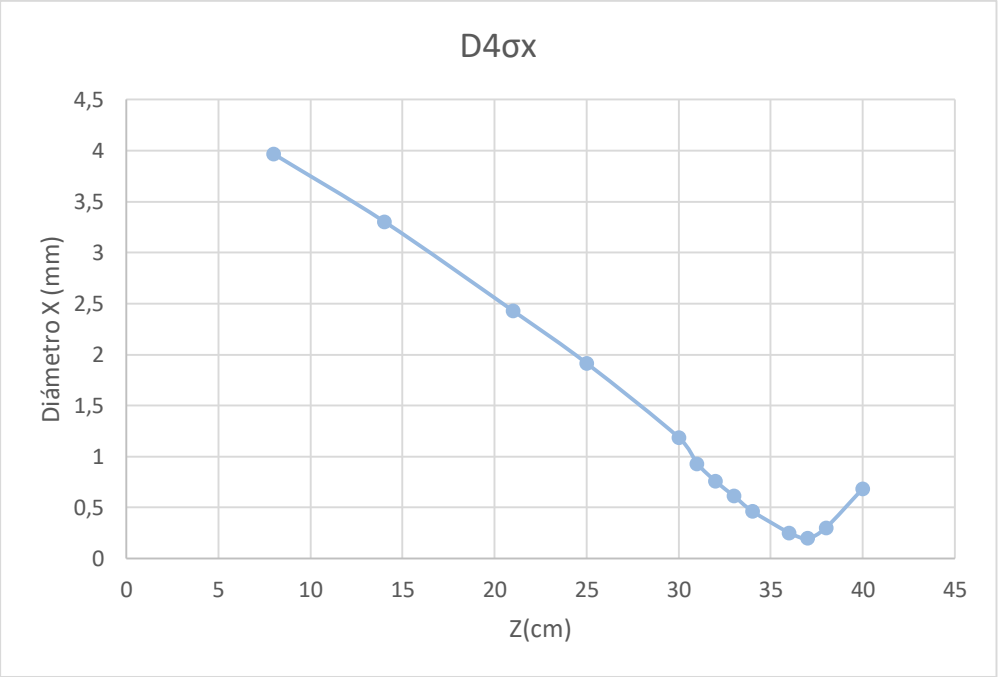


Ilustración 34: Gráfico de la evolución del diámetro x en función del eje longitudinal

Aquí apreciamos la evolución del Diámetro x a lo largo del eje longitudinal z. Como era de esperarse, todo y que no se adquiere una figura "limpia" se puede apreciar la aparición de una zona lineal, y una zona parabólica, cuyo vértice corresponde al plano z=37.

Al tratarse de un haz gaussiano, la evolución del diámetro del eje y es similar ya que en teoría a diferencia de otros tipos de perfiles, ambos son parecidos.

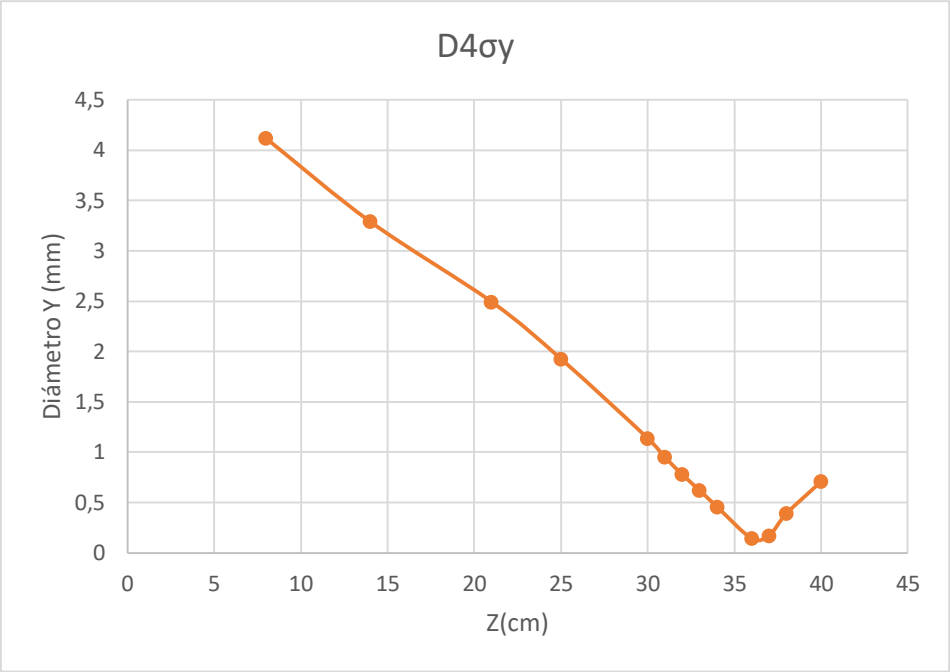


Ilustración 35: Símil del gráfico anterior pero para el eje secundario

También aquí se puede apreciar la zona lineal ubicada en los mismos puntos, junto con una zona parabólica. Graficando ambas curvas en una misma gráfica obtenemos:

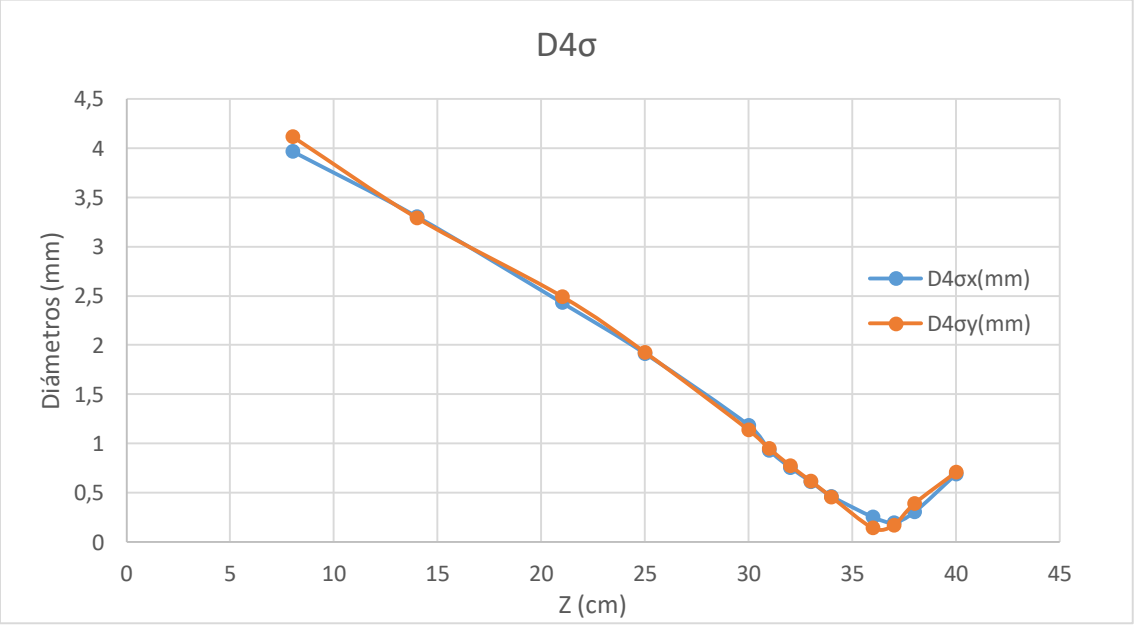


Ilustración 36: Superposición de ambos diámetros contra el eje longitudinal

Como se puede apreciar, ambas curvas son bastante coincidentes lo cual indica que el haz es simétrico como se esperaba, por ello, resulta un buen primer punto para afirmar que el método con la fibra proporciona resultados coherentes.

Veamos ahora la obtención de los valores de M^2. Primero vamos a considerar el diámetro x en los puntos alejados del beam waist, y para ello calculamos el valor de la divergencia con la zona lineal de la gráfica:

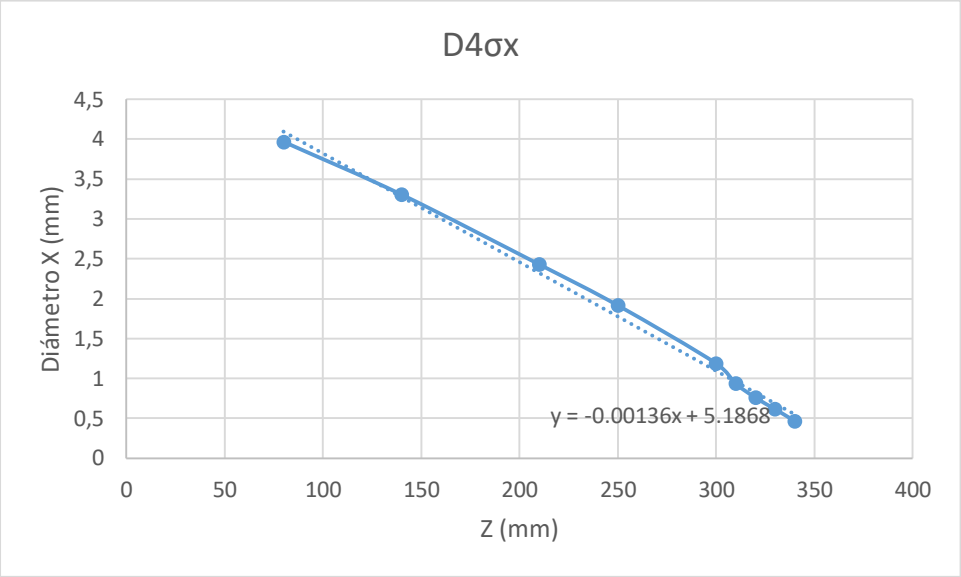


Ilustración 37: Gráfico de la zona lineal del eje principal

Con la ecuación de la recta aproximada obtenemos que $y = -0.00136x + 5.1868$ tomando el valor de la pendiente es posible medir el ángulo que esta tiene sobre la horizontal, aplicando simplemente la función arcotangente:

$$\varphi = arctg(m) = arctg\ (0{,}00136) = 0{,}00136\ mrad$$

Además de esto, el valor de diámetro mínimo hemos dicho que corresponde con el obtenido en el plano 37, esto es $\omega_0 = 0{,}1985\ mm$ mientras que la longitud de onda para este haz tomamos $\lambda = 532\ nm$

$$M^2{}_x = \frac{\pi * \omega_0 * \varphi}{\lambda} = \frac{\pi * 0{,}1985(mm) * 0{,}00136(mrad)}{532 * 10^{-6}\ (mm)} = \ 1{,}65$$

El valor que hemos obtenido se acerca al valor unitario que significaría un haz gaussiano, por lo tanto podemos afirmar que este haz efectivamente se trata de un haz bastante gaussiano, quizás no perfecto por el ligero pedestal que se puede apreciar en algunas capturas anteriores.

Repetimos pues el procedimiento para el factor en el eje vertical, esto es:

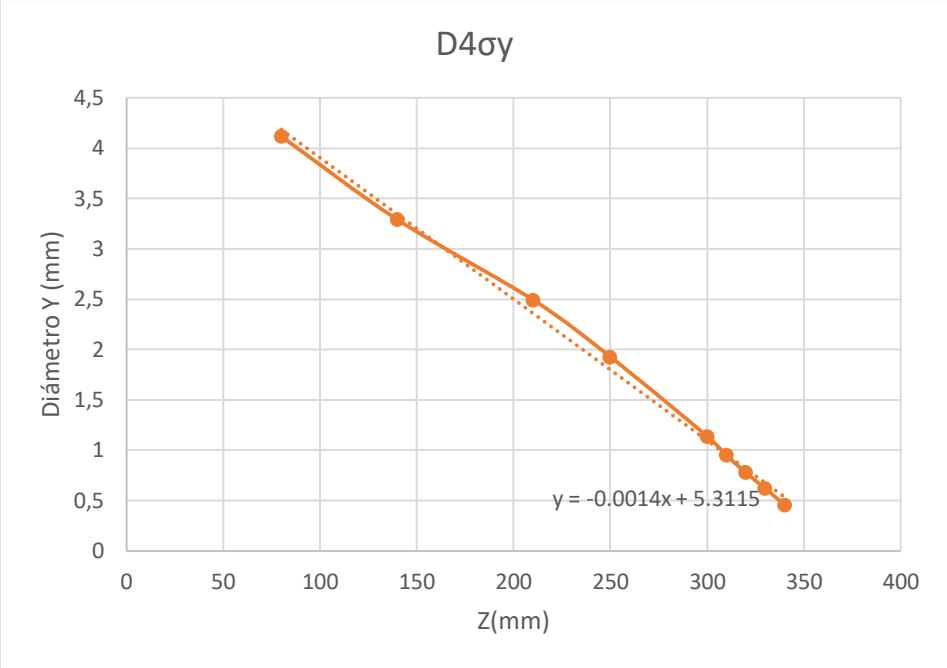


Ilustración 38: Gráfico de la zona lineal del eje secundario

Como resultado obtenemos la gráfica $y = -0{,}0014x + 5.3115$ con la cual podemos obtener el valor de la divergencia y posterior M^2_y. Considerando que $\omega_0 = 0{,}1422\ mm$ y que por otro lado la longitud de onda se mantiene constante:

$$\varphi = arctg(m) = arctg\ (0{,}0014) = 0{,}0014\ mrad$$

$$M^2{}_y = \frac{\pi * \omega_0 * \varphi}{\lambda} = \frac{\pi * 0{,}1422(mm) * 0{,}0014(mrad)}{532 * 10^{-6}\ (mm)} = \ 1{,}21$$

Además del método de cálculo diametral del método 4σ, debido a que se dispone de la matriz completa de un plano cualquiera presentamos la tabla de resultados de una aproximación de un cálculo diametral mediante el método 10-90%. Si se recuerda de páginas anteriores, para un haz gaussiano es posible encontrar su diámetro o más bien una aproximación si se calcula la potencia total del haz, y se buscan las posiciones que representan un 14-86% del área total. Esto es solo aplicable a nivel teórico, mientras que a nivel práctico se suelen emplear el 10-90% de la potencia total.

Presentamos pues los cálculos obtenidos mediante este método, mientras lo comparamos con el 4σ.

	Medidas		Medidas	
z(cm)	D4σx(mm)	D4σy(mm)	10% - 90% X	10% - 90% Y
8	3.967	4.117	4.8	4.6
14	3.305	3.29	3.6	3.1
21	2.429	2.493	2.8	2.6
25	1.915	1.92	1.95	1.95
30	1.187	1.138	1.3	1.3
31	0.932	0.948	1.12	1.05
32	0.757	0.776	0.88	0.92
33	0.614	0.619	0.68	0.68
34	0.464	0.457	0.48	0.48
36	0.253	0.142	0.3	0.18
37	0.198	0.171	0.2	0.1
38	0.303	0.389	0.28	0.32
40	0.686	0.707	0.72	0.78

Para hacer más visual los resultados obtenidos, presentamos dos gráficos para comparar ambos métodos:

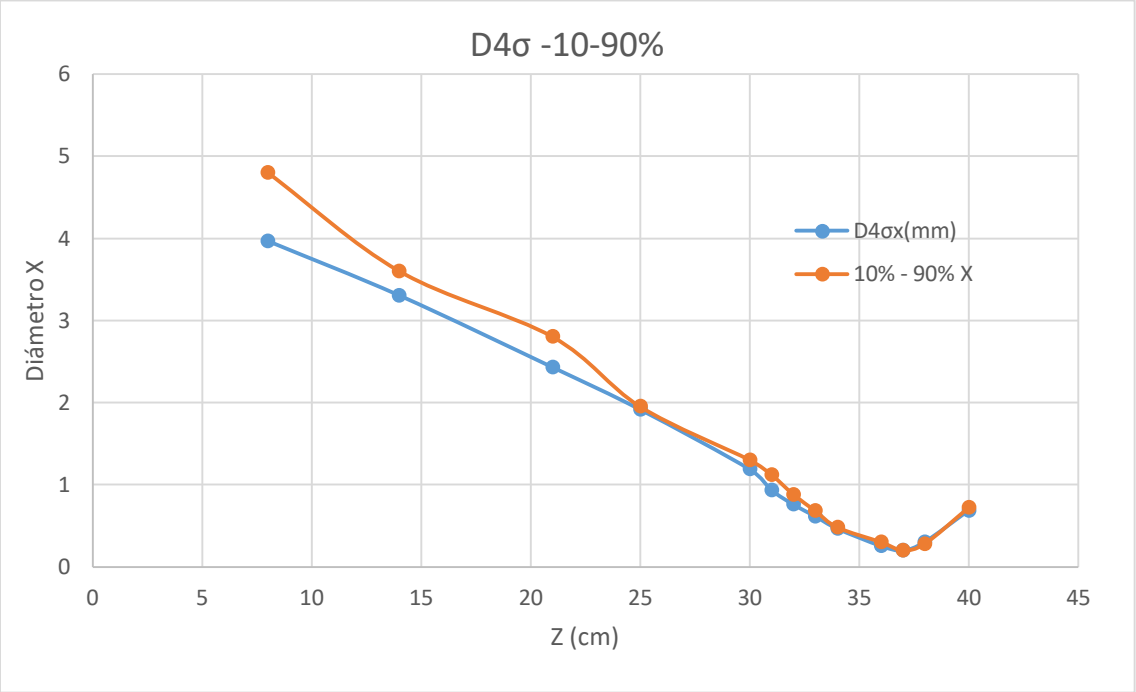


Ilustración 39: Evolución de los diámetros experimentales del eje principal según el método 4σ y el 10-90%

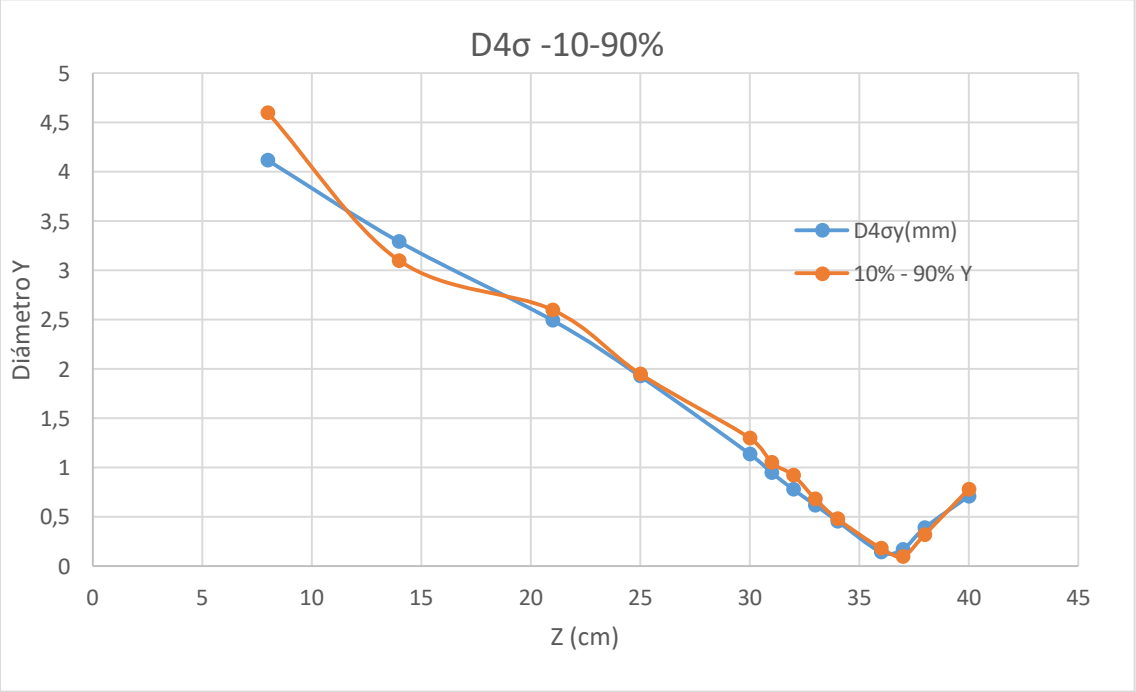


Ilustración 40: Evolución de los diámetros experimentales del eje secundario según método 4σ y el 10-90%

Lo primero que denota a simple vista, es que en la zona lineal, los resultados obtenidos presentan una desviación grande entre métodos. A diferencia de la zona parabólica o Rayleigh, donde aquí se puede apreciar que los resultados obtenidos resultan mucho más coincidentes. El motivo es bien simple, para los primeros planos, tratamos con diámetros mayores en comparación a aquellos planos que muestran un diámetro mínimo, la resolución utilizada es bastante diferente. La resolución empleada en aquellos puntos donde el cálculo del diámetro 10-90% es más dispar es en promedio 0,1 mm. Por el contrario, la resolución promedio utilizada para medir los planos en la zona de Rayleigh es de 0,02 mm.

A pesar de que con poca resolución, (alrededor de una décima de milímetro), ya se obtienen gráficos 3D concluyentes, se hace visible la necesidad de emplear mayor resolución para poder obtener una mayor precisión. Analizándolo de una forma lógica, y por dar un ejemplo, una matriz de 60 filas, no facilitará la misma precisión que una matriz de 120 filas, y por lo tanto, un método que se basa en porcentajes, es indispensable ofrecer cuanta mayor información mejor.

Por otro lado también hay que tener en cuenta que obtener matrices de datos con cientos de filas requiere un tiempo mucho más largo como bien quedó reflejado en un apartado anterior. Por este motivo, el usuario debería tener en cuenta que es lo que busca con cada análisis, si bien un gráfico aproximado para establecer una preforma del perfil, o bien un cálculo detallado de su diámetro.

El método de porcentajes de potencia tiene otro punto débil además de la resolución. Para cada matriz obtenida, estimamos que mínimamente habrá unos 70x70 puntos, es decir unos 4900 puntos, lo que significa que revisar los diferentes puntos capturados es impensable. Como no hay establecido un tipo de control de los datos obtenidos, hay que pensar que para una medida cualquiera existen regiones del haz donde la potencia incidente será mínima, y en este caso el valor leído o será cero o bien un valor muy pequeño. En el caso de que para valores muy pequeños de potencia se tomen en consideración, afectará al posterior cálculo de la intensidad total, haciendo variar sus correspondientes porcentajes.

En definitiva este método tiene dos aspectos donde su no correcta ejecución conlleva a obtener resultados erróneos. Por un lado es importante dar la mayor resolución posible a las distintas medidas, con el fin de disponer de todos los datos posibles para una mejor aproximación al valor real. En segundo lugar ser consciente de los valores recogidos en la lectura y filtrarlos para poder obtener un mejor valor final.

10. CONCLUSIONES

En conclusión, se ha propuesto, diseñado, automatizado y se ha implementado un dispositivo que utiliza un escaneo 2D del perfil transversal de un haz láser, donde la potencia se mide con una fibra óptica conectada a un medidor de energía. Los resultados obtenidos resultan prometedores por varias razones:

- El acoplamiento de la luz en la fibra óptica y la medida de la potencia correspondiente nos permiten obtener un perfil 2D de la intensidad del haz.
- Definiendo la resolución adecuada es posible obtener perfiles 3D (potencia/plano x,y) de todos los planos que el usuario desee, además de forma bastante automática.
- Con una base de datos obtenidos experimentalmente, hemos definido los correspondientes scrpits de Matlab para posteriores cálculos, que nos permiten calcular parámetros como diámetros, divergencias o M^2 del haz estudiado

Uno de los principales objetivos, el cual era poder caracterizar perfiles de luz láser cuyas potencias fueran elevadas a un nivel que no fueran posible proyectar sobre la cámara CCD se ha podido conseguir ya que al emplear la fibra óptica como captador este problema queda resuelto.

Como puntos a mejor podemos encontrar varios. El software para la captura de datos podría revestirse con subrutinas para la detección de fallos durante la lectura, ya que uno de los problemas más graves que han aparecido durante el desarrollo de este trabajo es que en ocasiones por alguna razón la toma de medidas era interrumpida a pesar de que el conjunto de los motores seguía su recorrido sin detenerse, algo que no era posible visualizar hasta el final de la medida.

Otro punto a mejor y que podría ser muy interesante sería el de implementar un tercer motor paso a paso más robusto que pudiera desplazarse a través del eje Z. Esto permitiría poder implementar un sistema completamente automático para poder caracterizar de forma exhaustiva el perfil a lo largo de todo el eje aunque también es cierto que habría que ampliar el software para controlar todo el conjunto e implementar algún sistema de control para evitar fallos en la toma de medidas.

El tiempo empleado es una variable a tener en cuenta si comparamos este método con el de la cámara CCD. Es cierto que a pesar de su gran precisión y no estar limitado por parámetros como la potencia lo hace un buen sistema, pero para medidas puntuales es bien cierto que este sistema es una gran desventaja

respecto a la cámara. Además, a pesar de intentar poder optimizar todo el código para evitar tiempos innecesarios a mayor número de puntos mayor será el tiempo empleado y esto será siempre irreversible. Al tratarse de equipos sensibles, se hace necesario la presencia del usuario siempre que se vaya a tomar una medida, por los posibles inconvenientes que el equipo láser pudiese presentar por un uso prolongado de varias horas consecutivas.

En definitiva, los primeros resultados obtenidos indican que si bien no es un sistema para poder sacarlo al mercado, es un buen indicio para algo de mayor envergadura y complejidad. Una mayor dedicación al conjunto permitiría la obtención de un resultado mucho más satisfactorio y quizás para una aplicación real.

11. PRESUPUESTO

Presupuesto
Estudio de un nuevo método de caracterización de un haz láser de potencia basado en la implementación de fibra óptica

Código	*NatC*	*Ud*	*Resumen*	*CanPres*	*Pre/u*	*ImpPres*
01	**Capítulo**		**LÁSERES**	**subtotal**		**12,000.00 €**
	Partida	u	Láser Unidad completa para la generación de un haz de luz láser mediante medio activo de estado sólido. Cedido por grupo de investigación DONLL UPC Terrassa	1.000	12,000.00	12,000.00 €
02	**Capítulo**		**APARATOS DE MEDIDA**	**subtotal**		**5,046.05 €**
	Partida	u	Potenciómetro Potenciómetro marca Thorlabs modelo PM200	1.000	1,507.59	1,507.59 €
	Partida	u	Fotodiodo Fotodiodo acoplado mediante clabe vga a potencíometro marca Thorlabs modelo S120V and Flip Mount	1.000	385.71	385.71 €
	Partida	u	Fotodiodo para acomplado con fibra Fotodiodo acoplado mediante clabe vga a potencíometro marca Thorlabs modelo S120V and Flip Mount	1.000	84.14	84.14 €
	Partida	u	Fibra 2m Conexión de fibra de longitud 2 metros monomodo de diámetro 100 micras	1.000	68.61	68.61 €
	Partida	u	Cámara CCD Conjunto formado por Cámara CCD y filtros para medición del láser de semiconductor	1.000	3,000.00	3,000.00 €
03	**Capítulo**		**AUTOMATIZACIÓN**	**subtotal**		**6,700.00 €**
	Partida	u	Motor VENUS Conjunto comprendido de bandeja XY stage, y controlador SMC pollux series	2.000	3,000.00	6,000.00 €
	Partida	u	Ordenador Ordenandor con programa creado a partir de Labview para control de proceso	1.000	300.00	300.00 €
	Partida	u	Licencia Labview Compra de licencia de software Labview para su uso oficial	1.000	400.00	400.00 €
04	**Capítulo**		**ACCESORIOS**	**subtotal**		**3,137.57 €**
	Partida	u	Lente convergente Lente para la concentración del haz de luz	3.000	66.22	198.66 €
	Partida	u	Soporte para fotodiodo Soporte vertical y/o horizintal para realizar montaje de medida	2.000	31.57	63.14 €
	Partida	u	Carril guía Carril guía para soportar y dirigir motor pollux	1.000	25.77	25.77 €
	Partida	u	Mesa Antivibratoria	1.000	2,850.00	2,850.00 €

			Mesa antivibratoria con cámara de aire y agujeros en parte superior para realiar montajes in situ			
05	**Capítulo**		**INGENERÍA**	**subtotal**		**4,810.00 €**
	Partida	h	Estudio preliminar Dedicación a estudio de las necesidades del proyecto y aprendizaje sobre el campo de estudio	45.000	12.00	540.00 €
	Partida	h	Ensayos manuales Ensayos manuales realizados in situ en el laboratorio mediante técnicas no automatizadas y posterior análisis	55.000	10.00	550.00 €
	Partida	h	Programación de Software Creación e implementación del softaware labview necesario para automatizar el proceso	120.000	22.00	2,640.00 €
	Partida	h	Estudio Final Estudio con datos recopilados tras analizar sistemas con el nuevo método	60.000	18.00	1,080.00 €
			TOTAL COSTE PROYECTO	€		**31,693.62**

12. BIBLIOGRAFÍA

[1] Pratik Shukla, JonathanLawrence and Yu Zhang. «Understanding laser beam brightness :Are view and new prospective in material processing».

[2] «Current Technology of Laser Beam Profile Measurements - ». [En línea]. Disponible en: https://www.ophiropt.com/user_files/laser/beam_profilers/tutorial-1.pdf

[3] «Laser – M. Martinez Morillo y F. Sendra Portero». [En línea]. Disponible en: https://www.google.com/search?q=laser+m+martinez+morillo&rlz=1C1AVFC_enES869ES870&oq=laser+m+martinez+morillo&aqs=chrome..69i57j0i22i30.3075j0j15&sourceid=chrome&ie=UTF-8

[4] G. Basilio Sánchez, «Del LASER I Principio de funcionamiento del láser».

[5] B. A. Fernández, I. A. Tobalina, R. B. Varillas, y A. C. Salazar, El láser, la luz de nuestro tiempo. 2010.

[6] J. F. Turull Silvestre, Capítulo 2: Basic Models for optical Beams

[7] T. F. Johnston, «Beam propagation (M^2) measurement made as easy as it gets: the four-cuts method», Appl. Opt., vol. 37, n.o 21, pp. 4840-4850, 1998.

[8] B. Diameter, «Litron News & Updates All the latest news & updates from one of the world's leading laser manufacturers», pp. 17-18, 2014.

[9] C. S. Money, «Screen shot of a flat-top beam image Image of dialog box for flat-top calculations», pp. 1-5.

[10] J. Trägårdh et al., «A simple but precise method for quantitative measurement of the quality of the laser focus in a scanning optical microscope.», J. Microsc., vol. 259, n.o 1, pp. 66-73, jul. 2015

[11]«Beamgage User Guide. Spiricon ophir photonics.

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola Superior d'Enginyeries Industrial, Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

ESTUDIO DE UN NUEVO MÉTODO DE CARACTERIZACIÓN DE UN HAZ LÁSER DE POTENCIA BASADO EN LA IMPLEMENTACIÓN DE FIBRA ÓPTICA

ANEJOS

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Industrial de Terrassa

Autor: Aguado Carlos

Director: Cojocaru Crina

Codirector: Trull, Jose Francisco

ÍNDICE

1. CÓDIGO MATLAB.....1
2. FICHAS TÉCNICAS 3

1. CÓDIGO MATLAB

Perfil estadístico

```
datos=load('datos.txt');                %Aquí se cargan todos los
datos en una matriz de 1 columna y n filas
x0=0;                                    %Introducir posición inicial
de x
xf=10;                                    %Introducir posición final
de x
gap_x=0.5;                                 %Introducir el delta x
y0=0;                                    %Introducir posición inicial
de y
yf=4;                                    %Introducir posición final de
y
gap_y=1;                                %Introducir el delta y;
npx=(((xf-x0)/(gap_x))+1);              %El n° de pasos en x coincide
con la cantidad de valores que hay que coger por vector
npy=((yf-y0)/(gap_y))+1;                %El n° de pasos en y coincide
con la cantidad de vectores que tenemos que crear

repeticiones=;
npy = 2*npy*repeticiones;

contador=1;                             %Sirve para desarrollar el
bucle
m=zeros(npy,npx);                   %Crear una matriz de npy filas y
npx
for fila=1:npy
    for elemento=1:npx
        m(elemento,fila)=datos(contador);
        contador=contador+1;
    end
end
m=transpose(m);

%invertir filas impares
m(1:2:end, :) = fliplr(m(1:2:end, :));
```

Perfil serpiente

```
datos=load('datos.txt');                %Aquí se cargan todos los
datos en una matriz de 1 columna y n filas
x0=0;                                    %Introducir posición inicial
de x
xf=10;                                    %Introducir posición final
de x
gap_x=0.1;                                 %Introducir el delta x
y0=0;                                    %Introducir posición inicial
de y
yf=10;                                    %Introducir posición final
de y
gap_y=0.1;                                %Introducir el delta y;
npx=(((xf-x0)/(gap_x))+1);              %El n° de pasos en x coincide
con la cantidad de valores que hay que coger por vector
```

```
npy=((yf-y0)/(gap_y))+1;                    %El nº de pasos en y coincide
con la cantidad de vectores que tenemos que crear
contador=1;                                 %Sirve para desarrollar el
bucle
m=zeros(npy,npx);                       %Crear una matriz de npy filas y
npx
for fila=1:npy
    for elemento=1:npx
        m(elemento,fila)=datos(contador);
        contador=contador+1;
    end
    %elemento=1;
end
m = transpose(m);

%invertir filas impares
m(1:2:end, :) = fliplr(m(1:2:end, :));
```

Impresión Estadístico

```
function printE(matriz, fila, repeticiones)
%Graficar las 2*repeticiones en 2D a la vez
for i=((2*repeticiones)*(fila-1))+1:1:(2*repeticiones)*fila
    plot(matriz(i,:));
    hold on;
end
ylabel('Potencia (mW)');
end
```

Impresión Serpiente

```
function printS(matriz)
%Graficar en 3d el perfil medido con serpiente
surf(matriz);
xlabel('x(mm)');
ylabel('y(mm)');
zlabel('P(mW)');
colormap(jet);
end
```

2. FICHAS TÉCNICAS

Item #	PM200
Detector Compatibility	Photodiode Sensors S100C Series Thermal Sensors S300C Series Pyroelectric Sensors ES100C/ES200C Series Photodiode Sensors: 5 mA (Max) Thermopile Sensors: 1 V (Max) Pyroelectric Sensors: 100 V (Max)
Display Type	5.7" TFT, 640 x 480 Pixels, 18 bit Color
Viewing Area	118 mm x 88 mm
Display Update Rate	Max 15 Hz
Display Format	Numerical, Bargraph, Trendgraph, Statistics, Simulated Analog Needle
Backlight Display	LED, Adjustable
Overall Dimensions (H x W x D)	170 mm x 125 mm x 38 mm
Features	Rotatable Two Position Kickstand, Removable Rubberboot, Touch-Pen, Fixture for Optional Fiber Inspection Camera
Weight	0.57 kg
Operating Temperature	0 °C to 40 °C
Storage Temperature	-40 °C to 70 °C
Current Input (Photodiode Sensors)	
Connector	DB9F, Left Side
Units	W, dBm, W/cm², A
Measurement Ranges	6 Decades; 50 nA - 5 mA Ranges Selectable in W, Sensor Dependent
Display Resolution	1 pA / Responsivity Value (A/W)
AD Converter	16 bit
Accuracy	±0.2% full scale (5 µA - 5 mA) ±0.5% full scale (50 nA)
Bandwidth	DC - 100 kHz, Dependent on Sensor and Settings
Beam Area Setting	Diameter 1/e² or Rectangular x,y
Voltage Input (Thermopile Sensors)	
Connector	DB9F, Left Side
Units	W, dBm, W/cm², V
Measurement Ranges	4 Decades; 1 mV - 1 V Ranges Selectable in W, Sensor Dependent
Display Resolution	1 µV / Responsivity Value (V/W)
AD Converter	16 bit
Accuracy	±0.5% f.s. (10 mV - 1 V) ±1% f.s. (1mV)
Bandwidth	DC - 10 Hz, Dependent on Sensor and Settings
Time Constant Correction Range	1 - 30 s
Wavelength Correction	Sensor Dependent
Beam Area Setting	Diameter 1/e² or Rectangular x,y
Voltage Input (Pyro Sensors)	

Item #	PM200
Connector	DB9F, Left Side
Units	J, J/cm², W, W/cm², V
Measurement Ranges	4 Decades; 200 mV - 2V - 20 V - 100 V Ranges Selectable in J, Sensor Dependent
Display Resolution	100 µV / Responsitivity Value (V/J)
AD Converter	16 bit
Accuracy	± 0.5% full scale
Trigger Theshold	0.1% - 99.9% full scale
Max Repetition Rate	3 kHz
Wavelength Correction	Sensor Dependent
Beam Area Setting	Diameter 1/e² or Rectangular x,y
Analog Output	
Connector	Audio 3.5 mm, Left Side
Signal	Amplified Input Signal - Not Corrected
Voltage Range	0 to 2 V
Accuracy	±3%
Bandwidth	Up to 100 kHz, Dependent on Sensor and Settings
Auxiliary In-/Output	
Connector	2 x 6 Pins, 0.1" Socket, Top Side
Function	External Trigger Input 4 x GPIO 2 x 10 bit ADC
Sensor Temperature Control	
Supported Temperature Sensor	Thermistor
Temperature Measurement Range	-10 °C to +80 °C
Sound	
Type	Speaker 300 Hz - 5 kHz
Function	Laser Tuning Support, Console Function Support
Memory	
Type	Nand Flash
Size	128 MB
Interfaces	
Type	USB2.0
Connector (Host)	Mini USB, Top Side
Connector (Device)	USB Type A, Left Side
Power Management	
Battery	LiPo 3.7 V 2600 mAh
Charger / DC Input	5 V / 2 A
Power Connector	Center Hole
Included Accessories	
Hardcase	For Console and Sensor(s)
External Power Supply	5 VDC / 2.4 A with Power Cord
USB Cable	USB Type A Connector to Mini USB Connector (2 m)
Cable for Analog Output	3.5 mm Audio Connector to Flying Leads (2 m)
External Memory	USB Flash Drive 2 GB
Instrument Drivers	on USB Flash Drive
Application Software	on USB Flash Drive
User Manual	Quick Reference as Hardcopy, Manual on USB Flash Drive

SMC- series

SMC corvus eco

- 2 or 3 Axes Microstep- Controller System
- High- Resolution- Microstep
- 24 V bus - voltage
- 133 MHz RISC Processor with Flash - Memory
- Velosity- range <0.1 µm/ s ... 15 rev/ s (standard) 25 rev/ s (with speed upgrade)
- Closed - loop for quadrature encoders (RS-422) and sin- cos encoders (1Vpp)
- Linear Interpolation of all axes
- Linear & sin2 acceleration
- Postion- Compare Output =< 2 kHz
- Position- Capture (up to 1000 3 axes coordinates)
- Joystick input or integrated
- Serial interface RS-232 115 kBaud
- Venus-1 compatible string- based command language

Our SMC family is based on modern 32 bit technology which enables performances of stepper motor driven systems which haven´t been possible before. A so called sin 2 acceleration offers very smooth acceleration and deceleration of the motors so that positioning in the nanometer range is possible with highest performance. One of the big advantages of our SMC- controllers is the possibility to drive the stages with extreme high resolution.

Specifications

SMC corvus eco	
Axes	2 or 3 Axes 2 phase stepper- motors
Computer Interface	RS-232 up to 115200 Baud & USB interface
Supply Voltage	90-250 VAC 50-60 Hz
Power Supply	Destop 24 VDC 40 W
Limit Switches	2 per axis software configurable
Trajectory mode	linear interpolation
Velocity range	<0.1 µm/ s ... 15 rev/ s (200 step motor) (standard)<0.1 µm/ s ... 25 rev/ s (200 step motor) (speed upgrade)
Program & Param.	Flash Memory
Diagnostics	LED at the front with 2 user LED's acoustic messages with integr. buzer
Amplifier	48 V bipolar 2 Phase with short- circuit & temperture protection
Phase- current	max. 1.5 A
Housing	Desktop HxWxD 65 mm x 225 mm x 216 mm
Software Interface	Windows Demoprogram WINPOS- light, DLL's, demo applications (C/ Delphi/ VB) LabVIEW™ VI's and Demoapplication

L-509

- Travel ranges from 26 to 102 mm (1" to 4")
- Repeatability to 0.1 µm
- Optional: Direct-measuring linear encoder
- ActiveDrive DC, BLDC, DC gear motor, stepper motor
- Direction-sensing reference switch
- Variants suitable for vacuum available

Specifications

General specifications	L-509	Unit	Tole-rance
Active axes	X		
Drive screw type	Ball screw		
Drive screw pitch	1	mm	
Guide type	Crossed roller guide with anti-creep system		
Load capacity	100	N	max.
Permissible lateral force	50	N	max.
Permissible torque M_X in θ_X	30	Nm	max.
Permissible torque M_Y in θ_Y	25	Nm	max.
Permissible torque M_Z in θ_Z	20	Nm	max.
Reference and limit switches	Optical		
Material	Aluminum, steel		
Operating temperature range	5 to 40	°C	

Travel range-dependent specifications	L-509.1 L-509.02	L-509.2 L-509.03	L-509.4 L-509.05	Unit	Tole-rance
Travel range	26	52	102	mm	
Pitch / yaw	±60	±90	±120	µrad	typ.
Straightness / flatness	2	4	8	µm	typ.
Mass					
DC gear motor	1.4	1.6	1.9	kg	±5%
BLDC motor	1.4	1.5	1.7	kg	±5%
Active Drive DC motor with rotary encoder	1.4	1.5	1.7	kg	±5%
Active Drive DC motor with linear encoder	1.4	1.6	1.8	kg	±5%
Stepper motor	1.4	1.5	1.7	kg	±5%
Stepper motor with linear encoder	1.5	1.6	1.8	kg	±5%

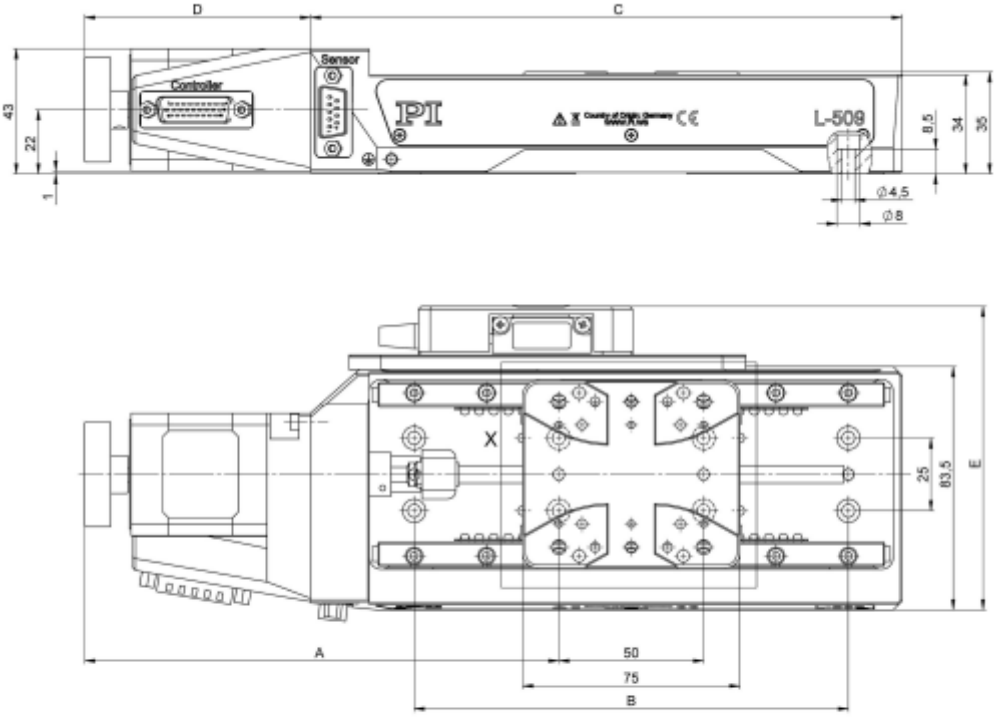
DC motor and encoder options	DC gear motor with rotary encoder L-509.x0DG10	BLDC motor with rotary encoder L-509.xx5132	ActiveDrive DC motor with rotary encoder L-509.x0AD10	ActiveDrive DC motor with linear encoder L-509.x4AD00	Unit	Tole-rance
System resolution	8.2	50	61	50	nm	
Unidirectional repeatability	0.1	0.2	0.2	0.1	µm	Typ.
Bidirectional repeatability	±2	±0.5	±0.5	±0.2	µm	Typ.
Minimum incremental motion	0.1	0.5	0.8	0.2	µm	Typ.
Maximum velocity	3	50	50	50	mm/s	
Drive force	60	60	60	60	N	Max.
Holding force (passive)	50	–	–	–	N	Typ.
Limit switch	Forked photoelectric sensor, N/C contact, 5V, NPN	Forked photoelectric sensor, N/C contact, 5V, NPN	Forked photoelectric sensor, N/C contact, 5V, TTL	Forked photoelectric sensor, N/C contact, 5V, TTL		
Gear ratio	2401/81	–	–	–		

DC motor and encoder options	DC gear motor with rotary encoder L-509.x0DG10	BLDC motor with rotary encoder L-509.xx5132	ActiveDrive DC motor with rotary encoder L-509.x0AD10	ActiveDrive DC motor with linear encoder L-509.x4AD00	Unit	Tole-rance
Motor encoder	**Incremental rotary encoder**	**Incremental rotary encoder**	**Incremental rotary encoder**	–		
Motor encoder: Sensor resolution	4096	5000	20000	–	Cts./rev.	
Motor encoder: Sensor signal	A/B quadrature, TTL	A/B quadrature, TTL	A/B quadrature, TTL	–		
Linear encoder	–	–	–	**Incremental linear encoder**		
Sensor resolution linear encoder	–	–	–	50	nm	
Sensor signal linear encoder	–	–	–	A/B quadrature, TTL		
Motor type	**DC gear motor**	**BLDC motor**	**ActiveDrive DC motor (PWM)**	**ActiveDrive DC motor (PWM)**		
Operating voltage, nominal	12	36	24	24	V	Nom.
Operating voltage, max.	24	48	48	48	V	Max.
Resistance	4.09**	0.807*	1.63**	1.63**	Ω	Typ.
Inductance	0.18**	0.644*	0.27**	0.27**	mH	Typ.
Back EMF	1.68**	3.3*	3.95**	3.95**	V/kRPM	Max.
Number of pole pairs	–	7	–	–		
Motor resolution	–	–	–	–	Full steps/rev.	
Connector	1 × HD D-sub 26 (m)	1 × HD D-sub 26 (m)	1 × D-sub 15 (m)	1 × D-sub 15 (m)		
Connector: Linear encoder	–	–	–	–		
Connector: Supply voltage	–	–	M8 4-pin (m)	M8 4-pin (m)		
Moved mass, unloaded	0.22	0.22	0.22	0.24	kg	±5%
Recommended controllers / drivers	C-863 (single axis) C-884 (up to 6 axes) C-885 with C-863.20C885 (to 40 axes) ACS modular controller	C-891 (single axis) C-885 with C-891.11C885 (up to 20 axes) ACS modular controller	C-863 (single axis) C-884 (up to 6 axes) C-885 with C-863.20C885 (to 40 axes)	C-863 (single axis) C-884 (up to 6 axes) C-885 with C-863.20C885 (to 40 axes)		

Stepper motor and encoder options	2-phase stepper motor L-509.x0SD00	2-phase stepper motor with linear encoder L-509.xASD00	Unit	Tole-rance
System resolution	5000	5	nm	
Unidirectional repeatability	0.3	0.1	µm	Typ.
Bidirectional repeatability	±1	±0.2	µm	Typ.
Minimum incremental motion	0.1	0.02	µm	Typ.
Maximum velocity	20	20	mm/s	
Drive force	60	60	N	Max.
Holding force (passive)	50	50	N	Typ.
Limit switch	Forked photoelectric sensor, N/C contact, 5V, NPN	Forked photoelectric sensor, N/C contact, 5V, NPN		
Gear ratio	–	–		

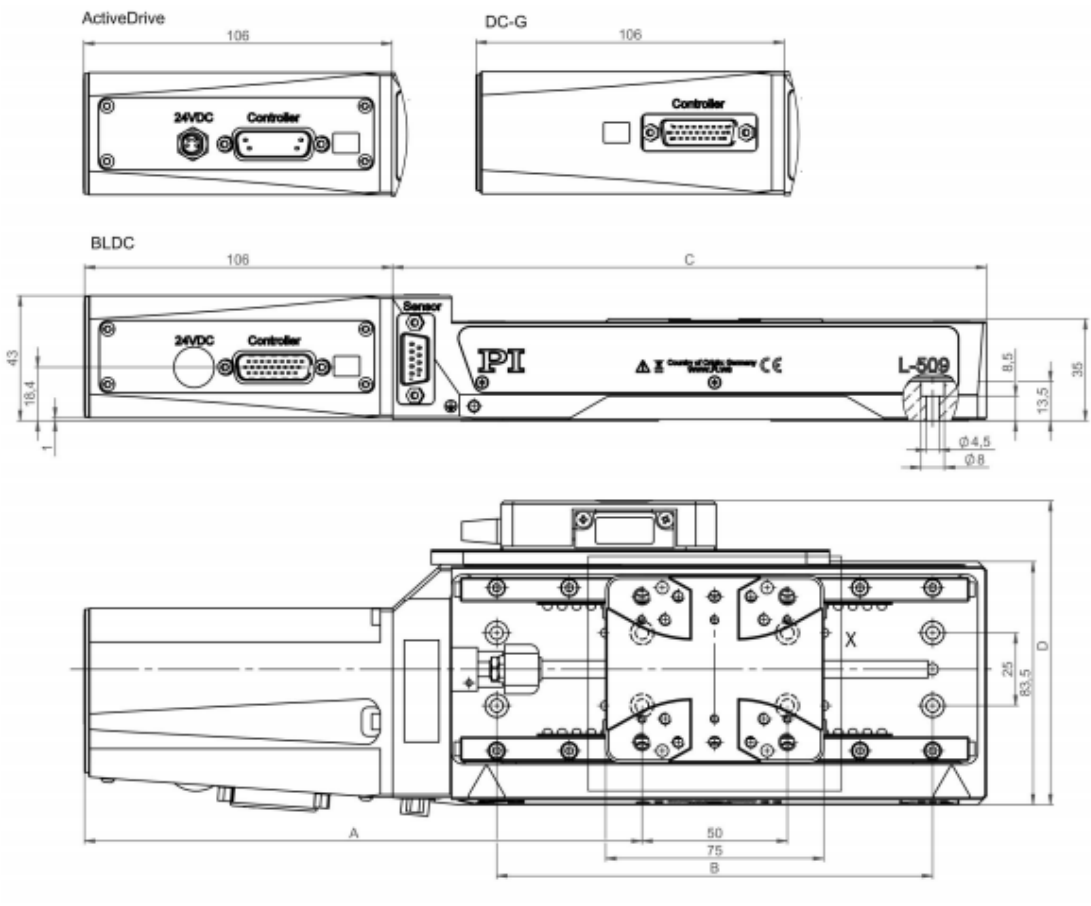
Stepper motor and encoder options	2-phase stepper motor L-509.x0SD00	2-phase stepper motor with linear encoder L-509.xASD00	Unit	Tole-rance
Motor encoder	–	–		
Motor encoder: Sensor resolution	–	–	Cts./rev.	
Motor encoder: Sensor signal	–	–		
Linear encoder	–	**Incremental linear encoder**		
Sensor resolution linear encoder	–	5	nm	
Sensor signal linear encoder	–	Sin/cos, 1 V peak-peak, 20 µm signal period		
Motor type	**2-phase stepper motor**	**2-phase stepper motor**		
Operating voltage, nominal	24	24	V	Nom.
Operating voltage, max.	48	48	V	Max.
Resistance*	3.3	3.3	Ω	Typ.
Inductance*	2.8	2.8	mH	Typ.
Back EMF	–	–	V/kRM	Max.
Number of pole pairs	–	–		
Motor resolution	200	200	Full steps/rev.	
Connector	1 × HD D-sub 26 (m)	1 × HD D-sub 26 (m)		
Connector: Linear encoder	–	1 × D-sub 9 (m)		
Connector: Supply voltage	–	–		
Moved mass, unloaded	0.22	0.24	kg	±5%
Recommended controllers/drivers	C-663.12 (single axis) SMC Hydra (double axis) C-885 with C-663.12C885 (up to 20 axes) ACS modular controller	C-663.12 (single axis) SMC Hydra (double axis) C-885 with C-663.12C885 (up to 20 axes) ACS modular controller		

Drawings / Images



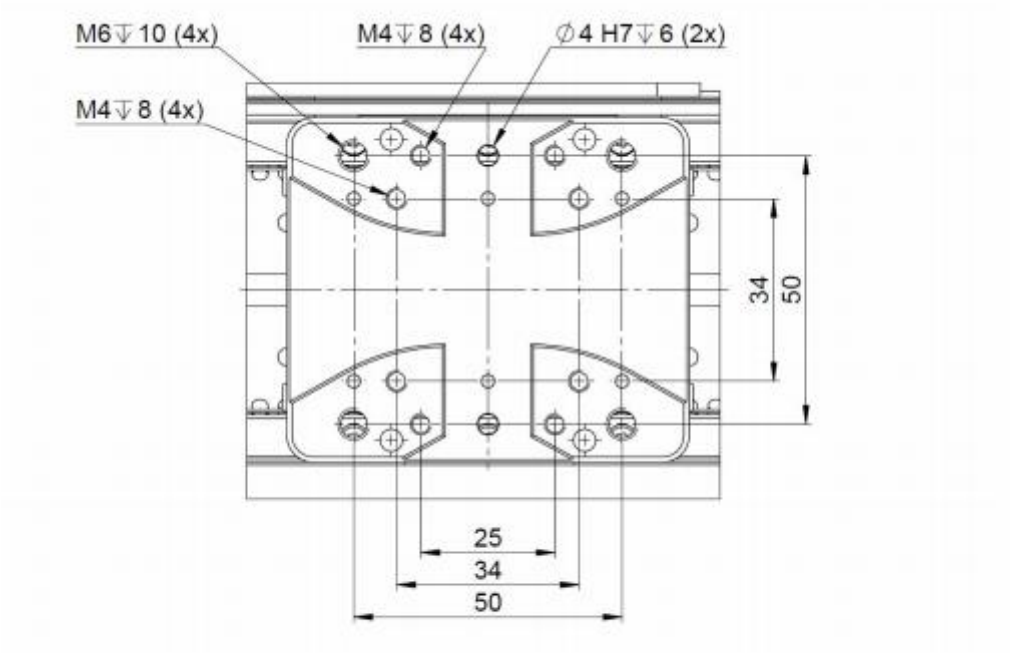
	A	B	C	D	E
L-509.10SD00	129,3	100	135,3	78	-
L-509.1ASD00	129,3	100	135,3	78	104,2
L-509.20SD00	138,8	100	154,3	78	-
L-509.2ASD00	138,8	100	154,3	78	104,2
L-509.40SD00	163,8	150	204,3	78	-
L-509.4ASD00	163,8	150	204,3	78	104,2

L-509 versions with stepper motor, dimensions in mm



	A	B	C	D
BLDC				
L-509.025132	157,3	100	135,3	-
L-509.035132	166,8	100	154,3	-
L-509.055132	191,8	150	204,3	-
ActiveDrive DC				
L-509.10AD10	157,3	100	135,3	-
L-509.14AD00	157,3	100	135,3	104,2
L-509.20AD10	166,8	100	154,3	-
L-509.24AD00	166,8	100	154,3	104,2
L-509.40AD10	191,8	150	204,3	-
L-509.44AD00	191,8	150	204,3	104,2
DC-G				
L-509.10DG10	157,3	100	135,3	-
L-509.20DG10	166,8	100	154,3	-
L-509.40DG10	191,8	150	204,3	-

L-509 versions with BLDC, DC gearhead, and ActiveDrive DC motors, dimensions in mm



Detail drawing of the L-509 motion platform