

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
ENERO/JULIO 2013 - VOLUMEN 23 Número (1)

ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRE EN LA MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE DIVERGENCIA DE UN HAZ LÁSER GAUSSIANO CON BASE EN LA NORMA ISO/TR 11146-3:2004

Luis Diego Marín Naranjo

Resumen

Para mejorar la metrología óptica con láser es requerida la estimación de incertidumbres. Se presenta el resultado de un proyecto de investigación desarrollado en la UCR, sobre la medición del ángulo de divergencia de un haz láser gaussiano, con base en la norma ISO/TR 11146-3:2004. Se describe el montaje y los resultados de tres métodos alternativos mencionados en la norma, y el cálculo de incertidumbre en estas mediciones, lo cual no se describe en la literatura técnica.

Palabras clave: Láser, medición óptica, metrología.

Abstract

To improve optical metrology with laser, the evaluation of uncertainty is required. We present the outcome of a research project developed at UCR, about measurements of divergence angle for a Gaussian laser beam, according to standard ISO/TR 11146-3:2004. We describe the setup and main results, following three methods mentioned in the standard, and the measurement uncertainty in these calculations, which is not found in technical literature.

Key words: Laser, optical measurement, metrology.

Recibido: 13 de junio del 2012 • **Aprobado:** 14 de Mayo del 2013

1. INTRODUCCIÓN

Para realizar metrología en parámetros ópticos, muchas veces se requiere conocer detalles de un haz láser. Las labores profesionales se desarrollan en LAFTLA (Laboratorio de Fotónica y Tecnología Láser), que es un laboratorio dedicado a la calibración y ensayo en Radiometría y Fotometría. Pertenece a la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica, de la cual el autor es profesor catedrático. Para el año 2007, se habían realizado varios proyectos sobre mediciones con láser, sin profundizar mucho en la estimación de incertidumbres, por lo que planteó

mejorar la exactitud de las mediciones, al incluir la estimación de incertidumbres, iniciando con la medición del ángulo de divergencia. Se presentó un proyecto de investigación en Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, al que se asignó el código 322-A8-185 y tuvo vigencia desde el año 2008 al 2010.

El objetivo general fue realizar ensayos con los métodos experimentales descritos en la norma ISO 11146, para la medición del ángulo de divergencia de un haz láser, con estimación de incertidumbres en las mediciones. Los resultados permitirían mejorar la investigación en metrología aplicada y la academia.

Se utilizó la norma ISO/TR 11146-3:2004 Láseres y equipo relacionado con láser - Métodos de ensayo para anchos de haz láser, ángulos de divergencia y razones de propagación de haz - Parte 3: clasificación de haz láser geométrica e intrínseca y detalles de métodos de ensayo.

Los objetivos específicos fueron:

- Desarrollar una práctica de ensayo con estimación de incertidumbres, para la medición del ángulo de divergencia de un haz láser gaussiano con base en la norma ISO/TR 11146-3:2004.
- Realizar un montaje para mediciones de divergencia de un haz láser y otros parámetros gaussianos.
- Analizar los datos obtenidos y calcular posibles incertidumbres de las mediciones.
- Comparar y analizar los resultados con los datos del fabricante.
- Divulgar la documentación final de los ensayos realizados.

Los indicadores del proyecto eran: analizar la norma mencionada y otras normas relacionadas, uniformar la teoría del haz gaussiano, realizar los montajes de ensayo en el laboratorio, medir la divergencia de un haz láser típico, documentar los resultados, comparar y analizar las diferencias, hacer un estudio de factores que dan origen a la incertidumbre en la medición y escribir el informe final.

2. CONCEPTOS BÁSICOS DE ÓPTICA GAUSSIANA

Un haz láser emitido desde una cavidad bien diseñada y ajustada tiene un perfil de haz que teóricamente es gaussiana e intuitivamente se puede entender como se describe en Bennett, (2008) y Photon Inc., (2007). La nomenclatura fue revisada y adaptada en este proyecto de investigación, de acuerdo a ISO8000-7, norma publicada la primera edición en el año 2008.

Los espejos curvados en una cavidad láser estable continuamente se imaginan el haz conforme pasa una y otra vez por esta. En una cavidad bien diseñada, que puede incluir una apertura para remover órdenes de difracción no deseados, sólo el orden de difracción central se

mantiene. Si la cavidad tiene simetría cilíndrica este orden de difracción central es muy cercano a un perfil gaussiano. Así, el haz en estado estable que emerge de una cavidad ideal es muy cercano a un haz gaussiano.

Para efectos de una práctica de ensayo de laboratorio, se puede medir el patrón del haz emitido desde un láser de Helio Neón (HeNe) real. Se analiza este patrón para determinar que tan cercano es el modo TEM₀₀ radiado al modo gaussiano de bajo orden teórico. Los haces láser son simétricos alrededor de su dirección de propagación. En la mayoría de los casos, la irradiancia máxima (flujo por unidad de área) E_0 está en el centro del patrón del haz. Todos los otros valores se refieren al valor máximo. Si la irradiancia del haz se grafica como función de la distancia radial desde el eje de propagación del haz, y es el mismo en todas las direcciones radiales, sólo se necesita determinar el patrón del haz.

Para un experimento de medición de divergencia de haz se prefiere un láser HeNe por su circularidad y simetría, para todos los ángulos en un plano perpendicular al eje del haz.

La mayoría de haces láser tiene el mismo patrón de irradiancia, sin importar a lo largo de cual dirección de haz se mida. Esto se debe a que el láser genera una serie de modos, que se propagan por el espacio, cambiando de tamaño, pero no de forma.

Algunos láseres operan en muchos modos a la vez, mientras que otros tienen salidas de pocos modos. Si un láser está diseñado especialmente puede hacerse que opere en un modo simple llamado TEM₀₀. Este modo tiene un patrón de radiación de simetría angular radial como se observa en la Figura 1.

La función gaussiana varía como e^{-2r^2} . Los haces con modo TEM₀₀ que presentan esta variación se llaman haces gaussianos. La irradiancia E_v de un haz gaussiano como función del radio es:

$$E_v = E_{v0} e^{-2r^2/w^2} \quad (1)$$

En donde E_{v0} es la irradiancia máxima y w es el radio del haz, usualmente definido como el radio al cual la irradiancia es o sea 13,5% de la

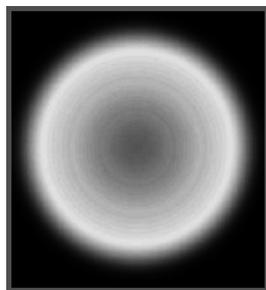


Figura 1. Patrón de haz TEM00 mostrando la variación de irradiancia.

Fuente: Photon Inc., 2007.

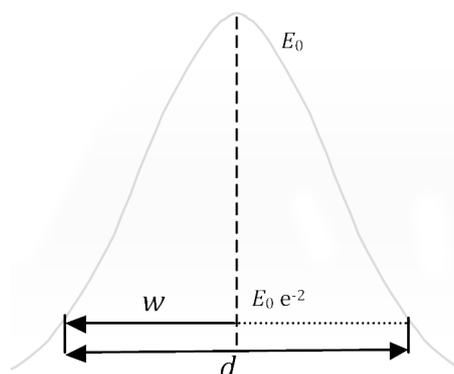


Figura 2. Variación de la irradiancia en un haz gaussiano.

Fuente: Elaboración propia, 2012.

irradiancia máxima E_v . Este valor de w se escoge para representar el área que encierra la mayoría de la potencia del haz gaussiano.

La función gaussiana puede escribirse también en términos del diámetro en vez del radio (en x):

$$E_v = E_{v0} e^{-2x^2/d^2} \quad (2)$$

En donde d es el diámetro del haz en el punto $1/e^2$ y d_x es igual a $2r$, como se observa en la Figura 2.

En la mayoría de aplicaciones con láser es necesario enfocar, modificar o reformar el haz por medio de lentes y otros elementos ópticos. En general, la propagación de un haz láser puede ser aproximada al asumir que el haz tiene un perfil de intensidad gaussiano, que corresponde al modo teórico TEM₀₀. Los haces gaussianos coherentes

tienen propiedades de transformación peculiares, que requieren consideración especial, por lo que es importante entender las propiedades básicas de un haz gaussiano.

Desafortunadamente la salida de láseres de la vida real no son realmente gaussianos, aunque los láseres de Helio Neón y de Ión Argón son muy aproximados. Para acomodar esta variabilidad se ha definido el factor de calidad M^2 , que describe la desviación de un haz láser de un gaussiano teórico. Para un haz gaussiano teórico, $M^2 = 1$; para un láser real $M^2 > 1$. El factor M^2 para un láser HeNe típicamente menor que 1,1; para un láser Ión Argón típicamente está entre 1,1 y 1,3. Un haz colimado de un diodo láser usualmente tiene un M^2 en un ámbito de 1,1 a 1,7. En todos los casos se asume un frente de onda circularmente

simétrico, como es el caso de un láser HeNe y un láser de Ión Argón. (Melles Griot, 2004).

Para comprender los principios y limitaciones de la óptica de haz gaussiano, es importante entender la naturaleza del haz láser en su salida (Siegman, 1986). El modo TEM₀₀ empieza como una onda plana perfecta con un perfil de irradiancia gaussiana como se observa en la Figura 2.

Se utiliza la definición del diámetro al cual la irradiancia del haz ha disminuido a 1/e² (13,5 %) del valor pico.

Las siguientes fórmulas describen exactamente el esparramiento del haz, lo que permite observar las capacidades y limitaciones de un haz láser. La notación se basa en literatura especializada.

Para establecer la Ecuación (2) de un haz gaussiano se parte que tiene un perfil de campo eléctrico descrito por una función gaussiana de radio $w(z)$ que cambia con la distancia z (Bennett, 2008):

$$E(r, z) = E_0 \left(\frac{w_0}{w(z)} \right) e^{-\frac{r^2}{w^2(z)}} \quad (3)$$

En donde $w(z)$ es la distancia radial medida desde el centro del perfil y corresponde al término w de la Ecuación (1), y E_0 es la amplitud del campo eléctrico en el centro del perfil.

El radio del haz gaussiano $w(z)$ es dado por:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R} \right)^2} \quad (4)$$

En donde w_0 representa el valor mínimo de $w(z)$ y se denomina la cintura del haz. Es importante no confundir el símbolo w con el símbolo de frecuencia angular ω ya que muchas referencias sobre análisis de haz gaussiano utilizan este símbolo. Los puntos $r = \pm w(z)$ localizan valores 1/e² de la amplitud del perfil.

La distancia z_R es denominada el ámbito de Rayleigh:

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (5)$$

Es útil considerar a $w(z)$ como el esparramiento del haz del perfil gaussiano. El ámbito de Rayleigh determina la razón de cambio de este esparramiento conforme el haz pasa por un foco. El valor de $w(z)$ en el punto de enfoque por una lente es dado por w_0 como se indica en la Figura 3.

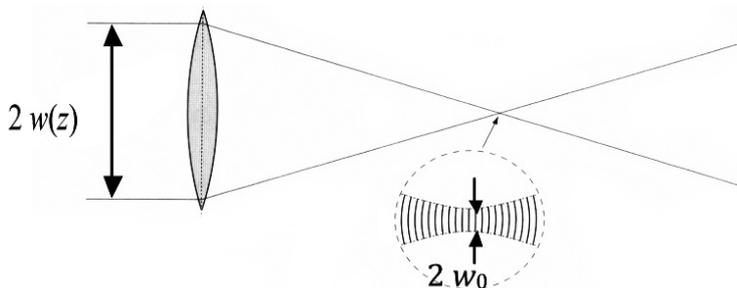


Figura 3. Enfoque de un haz gaussiano por una lente a una mancha.

Fuente: Bennett, 2008.

Los puntos $r = \pm w(z)$ localizan los valores $1/e^2$ del perfil de irradiancia y abarcan cerca del 90% de la potencia del haz. La mancha tiene un diámetro de cerca $2 w(z)$.

Conforme el haz gaussiano se propaga, el radio de curvatura del frente de onda del haz varía como:

$$R(z) = z + \frac{z_R^2}{z} \quad (6)$$

Los frentes de onda son planos en la cintura del haz ($z = 0$). En campo lejano, donde $z \gg z_R$, la curvatura del frente de onda se incrementa en proporción a z . La curvatura máxima del frente de onda ocurre en $z = z_R$, y la divergencia del haz de campo lejano, se aproxima al ángulo de divergencia θ , como se observa en la Figura 4.

$$\theta = \frac{w(z)}{z} \rightarrow \theta \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (7)$$

En donde θ se define como el medio ángulo de divergencia. Dentro del ámbito de Rayleigh ($|z| < z_R$), el haz permanece más o menos colimado. De acuerdo a la Ecuación (4) se obtiene $w(z_R) = \sqrt{2} w_0$. Cuando se calcula la irradiancia, el diámetro del tamaño de la mancha $d = 2 w(z)$ es el doble del ancho del haz medido en la cintura del haz. Un haz con una cintura más pequeña diverge más rápidamente, como en la Figura 5.

Aunque un haz láser gaussiano TEM₀₀ tuviera un frente de onda plano, con todos sus rayos en direcciones precisamente paralelas, adquiere una curvatura y empieza a esparcirse hasta un radio de haz, de acuerdo con:

$$w(z) = w_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

En donde z es la distancia propagada desde el plano donde el frente de onda es plano, λ es la longitud de onda, w_0 es el radio del contorno de irradiancia $1/e^2$ donde el frente de onda es plano,

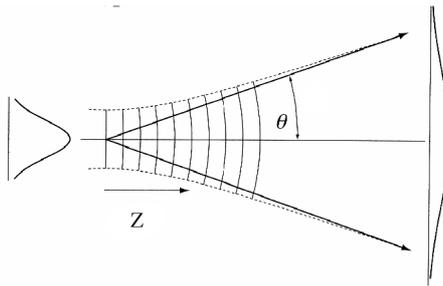


Figura 4. Divergencia del haz en el límite de campo lejano.

Fuente: Bennett, 2008.

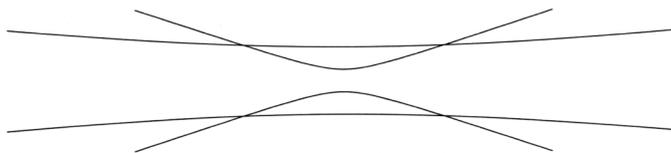


Figura 5. Divergencia de campo lejano de un haz gaussiano inversamente proporcional a la cintura del haz.

Fuente: Bennett, 2008.

$w(z)$ es el radio del contorno $1/e^2$ después de una distancia z .

Para valores grandes de z , $w(z)$ se aproxima a:

$$w(z) = \frac{\lambda z}{\pi w_0} \tag{9}$$

Se asume que z es mucho mayor que $\pi w_0^2/\lambda$, por lo que el contorno de la irradiancia $1/e^2$ se aproxima asintóticamente a un cono de

medio ángulo de divergencia, Ecuación (7), que representa la divergencia de campo lejano del haz gaussiano TEM₀₀. El vértice del cono reposa en el centro de la cintura, Figura 6. Para un valor de λ , las variaciones de diámetro del haz y de divergencia con la distancia z , son funciones de w_0 .

A diferencia de los haces de luz convencionales, los haces gaussianos no divergen linealmente, como se nota en la Figura 7. Cerca del dispositivo láser, la divergencia es muy pequeña; lejos del dispositivo láser el ángulo de divergencia se aproxima al límite asintótico según (9) (Melles Griot, 2004).

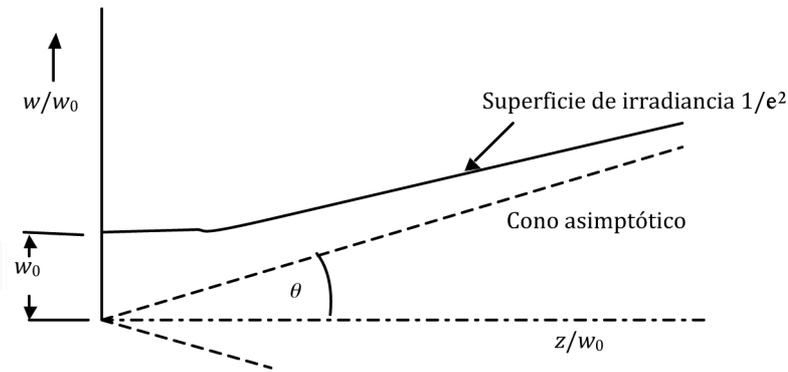


Figura 6. Crecimiento del diámetro del haz como función de la distancia desde la cintura del haz.

Fuente: Elaboración propia, 2012.

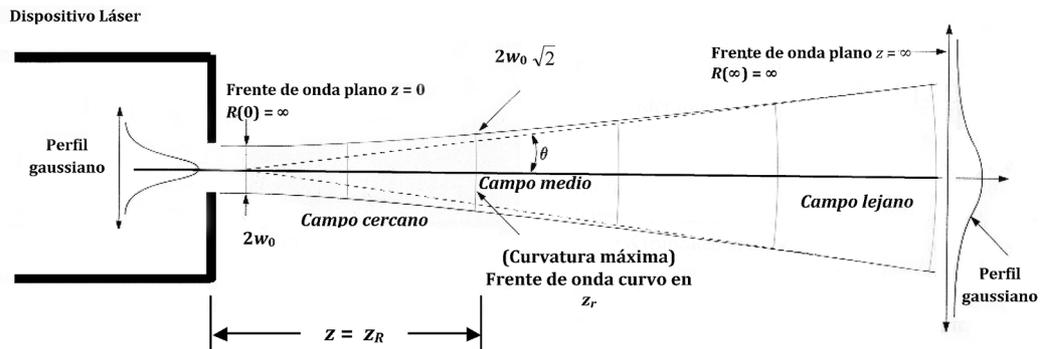


Figura 7. Crecimiento del diámetro del haz como función de la distancia desde la cintura del haz.

Fuente: Elaboración propia, 2012.

El ámbito de Rayleigh es la distancia donde el radio del haz se esparce por un factor $\sqrt{2}$, Ecuación (5).

En la cintura del haz ($z = 0$), el frente de onda es plano ($R(0) = \infty$). En $z = \infty$, el frente de onda se vuelve plano ($R(\infty) = \infty$). Conforme el haz se propaga desde la cintura, la curvatura del frente de onda se debe incrementar a un máximo y entonces empezar a decrecer, Figura 7.

El ámbito de Rayleigh es la división entre la divergencia de campo cercano y la divergencia de medio ámbito. La divergencia de campo lejano (que es el valor incluido en las especificaciones del láser) debe ser medida en un punto mayor a z_R (usualmente $z > 10 \times z_R$ es suficiente).

Esta es una distinción muy importante, ya que los cálculos del tamaño de la mancha y otros parámetros en un haz óptico serán muy inexactos si se usan los valores de divergencia de campo cercano o medio.

Para un haz muy bien enfocado, la distancia desde la cintura (el punto focal) al campo lejano, puede ser unos pocos milímetros o menos. Para haces que provienen directamente del dispositivo láser, la distancia de campo lejano puede ser medida en metros.

Típicamente se tiene un valor fijo y conocido de w_0 y se usa la Ecuación (8) para calcular $w(z)$ para un valor de entrada z . Se puede usar además esta ecuación para encontrar un radio final de haz dado un radio inicial de haz a una distancia fija z .

En el mundo real, un verdadero haz láser gaussiano de modo transversal simple (haz de modo fundamental o puro), es muy difícil de encontrar. Los haces de baja potencia desde láseres HeNe son los más aproximados, pero entre mayor es la potencia del dispositivo láser, más complejo es el mecanismo de excitación (como descarga transversal, bombeo por lámpara de destellos) o mayor es el orden de los modos, más se desvía el haz del ideal (Melles Griot, 2004).

Para considerar los haces no gaussianos (haces gaussianos de alto orden y haces de modos mezclados), se utiliza en forma general el factor de calidad de haz M^2 .

Un modo mezclado es aquel con muchos modos oscilando en el resonador a la vez. Un ejemplo común es la mezcla de un modo fundamental de bajo orden con un modo en forma de dona, justo antes de la apertura limitante de

modos dentro de la cavidad, críticamente ajustada para seleccionar solo el modo fundamental.

Debido a que todos los haces tienen algún defecto de frente de onda, o sea una pequeña mezcla de algunos modos de alto orden, un haz de modos mezclado es también llamado un haz láser real.

Para un haz gaussiano de modo transversal simple teórico, el valor del producto radio de la cintura por el medio ángulo de divergencia es (7):

$$w_0 \theta = \lambda/\pi \quad (10)$$

Este producto es invariante, para la transmisión de un haz a través de cualquier sistema óptico normal de alta calidad (el que no añade aberración al frente de onda del haz).

Para un haz láser real se tiene:

$$w_{OR} \theta_{OR} = M^2 \lambda/\pi \quad (11)$$

En donde w_{OR} y θ_{OR} son el radio de la cintura del haz a la irradiancia $1/e^2$ y el medio ángulo de divergencia de campo lejano, para un haz láser real. El radio del haz de modo mezclado es M veces más grande que el radio del modo fundamental, en todas las distancias de propagación. Así su radio de cintura es mayor y contribuye a la primera M de la Ecuación (11).

El segundo factor de M proviene del ángulo de divergencia, que es también M veces mayor. El producto del radio de la cintura por el ángulo de divergencia es también invariante, pero es M^2 mayor.

El haz de modo fundamental tiene la divergencia más pequeña permitida por la difracción para un haz de ese radio de cintura. El factor M^2 fue conocido anteriormente como el número de veces limitado por difracción y actualmente se conoce como el factor de calidad de haz. Un haz limitado por difracción tiene un valor $M^2 = 1$.

El modo fundamental TEM_{00} es solo uno de muchos modos transversales que satisfacen la condición de que se puede replicar cada viaje en redondo en la cavidad. Corresponde al patrón de la Figura 1.

La ecuación de propagación en forma cilíndrica se da en términos del radio (ρ) y el ángulo (ϕ). Los eigenmodos $E_{\rho\phi}$ son una serie de modos simétricamente axiales, los cuales para resonadores estables, son muy aproximados a las funciones Laguerre-

Gaussian, denotados por $TEM_{0\phi}$, como se observa en la Figura 8.

En los láseres reales, el modo TEM_{10} Laguerre-Gaussian denominado “ojo de buey”, es claramente observado en láseres de HeNe o Ión muy bien alineados, con las aperturas limitantes apropiadas.

El concepto del haz gaussiano incrustado se ilustra en la Figura 9, y ayuda tanto en el modelado teórico como en las mediciones de laboratorio. Un haz de modos mezclados que tiene una cintura M veces (no M^2 veces) mayor que el gaussiano incrustado, se propaga con una divergencia M veces mayor que el gaussiano incrustado. Consecuentemente, el diámetro del haz de modos mezclados será siempre M veces el diámetro del haz del gaussiano incrustado, pero tendrá el mismo radio de curvatura y el mismo ámbito de Rayleigh.

3. METODOLOGÍA

La norma **ISO 11146** se encuentra bajo el título “*Lasers and-related equipment – Test methods for laser beam widths, divergence angles and propagation ratios*”, la cual consiste de tres partes. La parte de interés es: **ISO/TR 11146-3** (Parte 3): clasificación intrínseca y geométrica de un haz Láser, propagación y detalles de métodos de pruebas de ensayo (Reporte Técnico).

En la norma ISO 11146-1 se usan los momentos de segundo orden de la distribución de densidad de flujo radiante para determinar el ancho de un haz.

Sin embargo, se describe que se presentan muchos problemas en la medición directa de estas cantidades en los haces de algunas fuentes láser. Por eso se usan métodos indirectos alternativos, siempre que se obtengan resultados comparables.

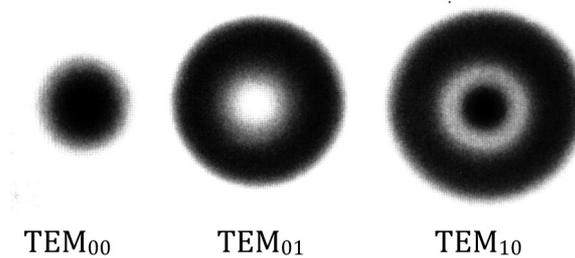


Figura 8. Modos de resonador de más bajo orden

Fuente: Melles Griot, 2004.

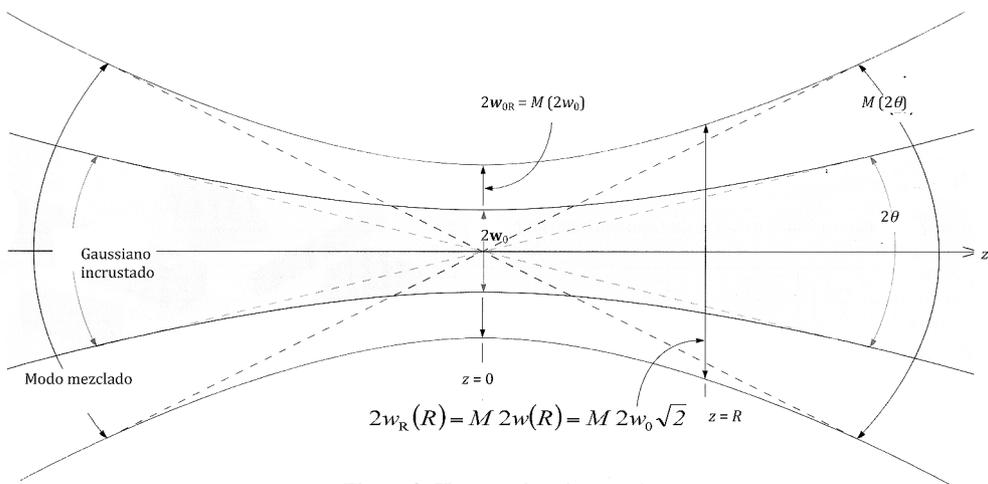


Figura 9. Haz gaussiano incrustado

Fuente: Melles Griot, 2004.

En la norma ISO/TR 11146-3 se describen tres métodos alternativos para medición del ancho del haz y sus correlaciones con la norma ISO 11146-1. Estos métodos son:

- Método de abertura variable
- Método de borde de navaja móvil
- Método de ranura móvil

Con las fórmulas principales de la óptica gaussiana para un haz real, se procede al ensayo. El dispositivo láser utilizado es marca Research Electro Optics modelo 30540 tipo HeNe TEM00.

Especificaciones:

$\lambda = 633 \text{ nm}$ (longitud de onda central)

$\Delta\nu = 316 \text{ MHz}$ (ancho de frecuencia)

$\Theta = 0,92 \text{ mrad} \pm 5 \%$ (ángulo total de divergencia)

$d_0 = 0,87 \text{ mm} \pm 5 \%$ (diámetro de salida)

Largo del tubo = $533,4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$

$n = 1,000296$ (índice de refracción del gas)

Los datos teóricos con estos datos producen:

- Espaciado entre espejos: $L = c_0 / (2 n \Delta\nu) = 0,474 \text{ m}$

- Cintura de haz: $\omega_0 = (\lambda L / 2\pi)^{1/2} = 0,218 \text{ mm}$
- Determinación del valor real del ángulo de divergencia: $\Theta = \lambda / (\pi\omega_0) = 0,922 \text{ mrad}$
- Ámbito de Rayleigh: $ZR = (\pi\omega_0)2/\lambda = 0,237 \text{ m}$

La medición de ángulo de divergencia debe hacerse más allá de $23,7 \text{ cm}$ desde la salida de haz en el tubo del láser. Se supone que la cintura se encuentra en el espejo de salida.

Los objetivos son realizar el montaje para mediciones de ángulos de divergencia de un haz láser, comparar y analizar los resultados con los datos del fabricante y estimar incertidumbres de las mediciones.

4. RESULTADOS DE LA PRÁCTICA EXPERIMENTAL

Se verifica primero la exactitud de las mediciones de flujo radiante, con el equipo y dispositivo láser instalado en la mesa óptica. La Figura 10 ilustra el montaje del láser y la cinta métrica ajustada para medición exacta de distancia. En el extremo se coloca el medidor de flujo radiante.

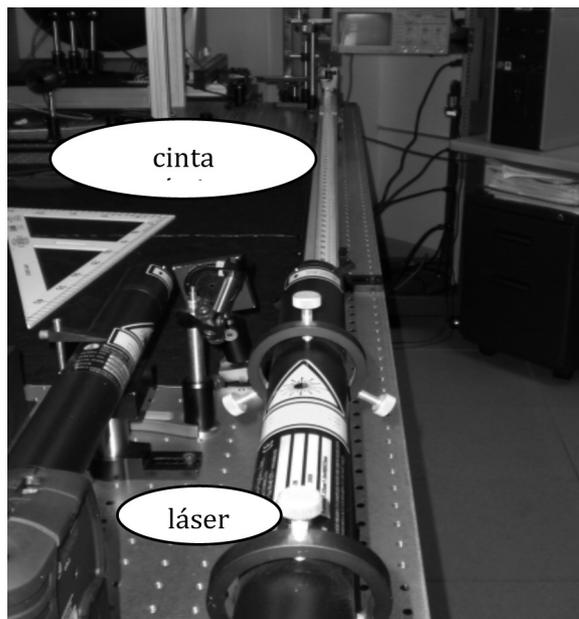


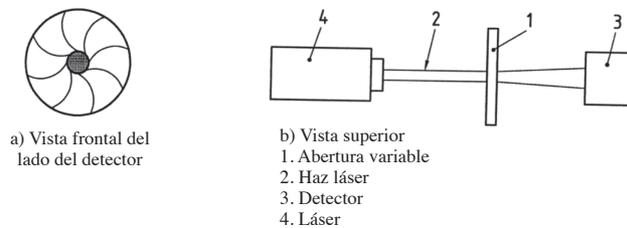
Figura 10. Montaje para medición de flujo radiante

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Cuadro 1. Estimación de incertidumbre de flujo radiante

Nº	Fuente de incertidumbre	$u_i(y)/mW$
1	Repetitividad	0,0072
2	Fluctuación sensor	0,0289
3	Resolución	0,0003
4	Fluctuación láser	0,1155
5	Fluctuación consola	0,0058
Incertidumbre estándar combinada /mW		0,1194
Incertidumbre estándar relativa (k=1)		1,380%

Fuente: Elaboración propia, 2012.

**Figura 11.** Configuración para medición de ancho de haz con abertura variable (ISO 11146-1:2005)

Fuente: ISO/TR 11146-3:2004.

Se estima la incertidumbre en la medición del flujo radiante que se aplica en los tres métodos descritos, ver Cuadro 1. El flujo radiante no es el valor final, sino una distancia medida en el sistema optomecánico. Los valores de flujo radiante permiten obtener transmitancias o porcentajes de flujo radiante del haz láser directo, por cada uno de los tres sistemas. (NIST, 2009)

La incertidumbre estándar es 1,380 % en las mediciones de flujo radiante, y considera muy exacto el método con los equipos utilizados. El medidor cumple con IEC 1990.

4.1. Método alternativo de abertura variable

Se coloca la abertura en un plano de medición para determinar la fracción de flujo radiante transmitido en función del diámetro de la abertura, ver Figura 11.

La Figura 12 muestra el montaje práctico y el medidor de flujo radiante utilizado.

El diámetro no corregido del haz $d_{0,865}$ se define por el diámetro mínimo de abertura que permite la transmisión de 86,5% de la potencia total del haz. Se realizaron 5 mediciones de los valores de

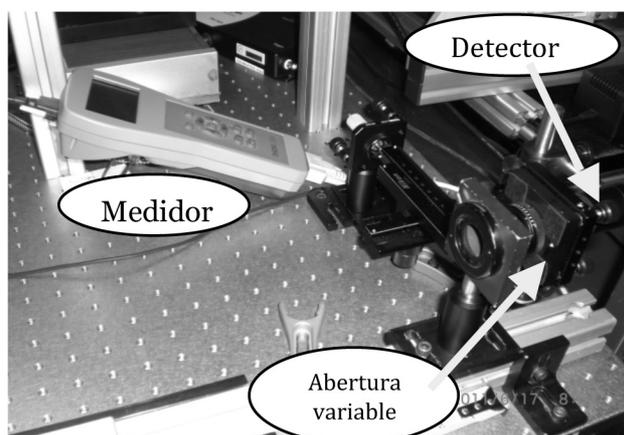


Figura 12. Medidor de potencia óptica frente a la abertura variable

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Cuadro 2. Estimación de incertidumbre de $d_{0,865}$

Nº	Tipo distribución	Fuente de incertidumbre	Contribución $u_i(y)/$ mm	$(u_i(y))^2/\text{mm}^2$
1	A	Repetitividad	0,018	0,0003
2	B, rect	Exactitud abertura	0,289	0,0833
3	B, rect	Resolución	0,144	0,0208
Incertidumbre estandar combinada / mm (k=1)				0,323

Fuente: Elaboración propia, 2012.

transmitancia cercanos al 86,5%, hacia arriba como hacia abajo, que corresponden a una abertura de 2,5 mm y 2 mm. La extrapolación entre estos límites, según se describe en la norma, permite obtener $d_{0,865}$ medio. Las mediciones se realizaron a una distancia nominal $z = 1890$ mm.

El valor promedio y desviación estándar del promedio es: $d_{0,865}$ promedio = 2,297 mm; $DE_{\text{prom}} = 0,0185$ mm.

La estimación de incertidumbre con la repetibilidad, DE del promedio, la exactitud de las

especificaciones de la abertura y la resolución de la practica de ensayo se presentan en el Cuadro 2.

El valor de diámetro de haz no corregido $d_{0,865} = 2,29$ mm \pm 0,32 mm. Con base en la norma, Ecuación (66), y el valor de $M^2 = 1,09$ obtenido del fabricante, se tiene $d_{\sigma} = 2,31$ mm \pm 0,32 mm. Los láseres reales tienen un valor de M^2 mayor que 1, y supone que el haz láser ideal esta incrustado en el haz láser real.

En el Cuadro 3, se presenta la estimación de la incertidumbre de la distancia z .

Cuadro 3. Estimación de incertidumbre distancia z

Nº	Fuente de incertidumbre	Contribución $u_i(y)/\text{mm}$	$(u_i(y))^2/\text{mm}^2$
1	Repetitividad	0,000	0,000
2	Resolución	1,443	2,083
Incertidumbre estandar combinada / mm (k=1)			1,443

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Resultado:

$$z = 1890,00 \text{ mm} \pm 1,44 \text{ mm.}$$

Se procede al cálculo del ángulo de divergencia, con los siguientes valores:

$$d_\sigma = 2,31 \text{ mm} \pm 0,32 \text{ mm}; z = 1890,00 \text{ mm} \pm 1,44 \text{ mm.}$$

Valor nominal del ángulo de divergencia:

$$\Theta = d_\sigma / z = 2,310 \text{ mm} / 1890 \text{ mm} = 1,222 \text{ mrad.}$$

Estimación de la incertidumbre:

u_{d_σ} (incertidumbre de diámetro) = 0,32 mm; u_z (incertidumbre de distancia) = 1,44 mm.

Factores de sensibilidad:

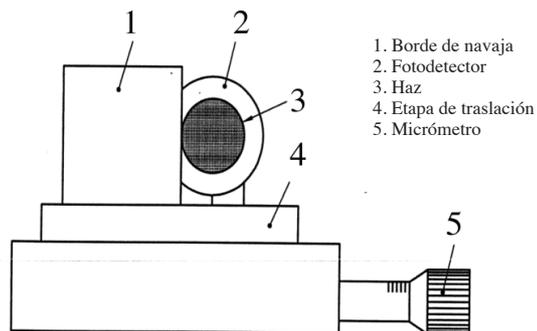
$$u^2_{\text{combinada}} = (\partial\Theta/\partial d_\sigma \cdot u_{d_\sigma})^2 + (\partial\Theta/\partial z \cdot u_z)^2$$

Incertidumbre:

$$u_{\text{combinada}} = 0,17 \text{ mrad.}$$

$$\Theta = 1,22 \text{ mrad} \pm 0,17 \text{ mrad.}$$

Este es el resultado del primer método.

**Figura 13.** Configuración para medición de ancho de haz con borde de navaja móvil (ISO 11146-1:2005)

Fuente: ISO/TR 11146-3:2004.

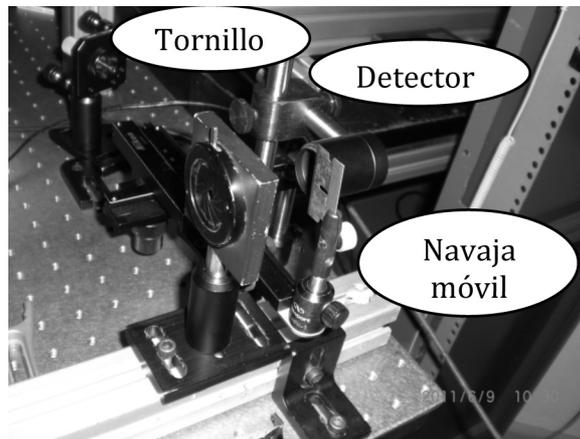


Figura 14. Medición de haz láser con método de borde de navajilla móvil.

Fuente: Elaboración propia, 2012.

4.2. Método alternativo de borde de navajilla móvil

Se mide la potencia radiante transmitida en función de la posición del borde de navaja a dos distancias que corresponden al 84 % y el 16 %, ver la Figura 13.

La Figura 14 muestra el montaje práctico.

La medición del brazo deslizante (móvil) se hace con un tornillo micrométrico y se determina tras varias mediciones, cada ranura marcada corresponde al desplazamiento establecido en el tornillo, o sea, cada división corresponde a 0,0254 mm de desplazamiento. El dispositivo láser y la distancia z fue la misma que el apartado anterior.

Se realizaron tres mediciones con el láser en el montaje descrito, moviendo la navaja, hasta el punto de obtener el 16 % del valor de flujo radiante directo, y se ajusta la marca x_1 . Se repite para 84 % para obtener la marca x_2 . Se anotan 3 valores representativos, debido a una gran repetibilidad. La diferencia $x_2 - x_1$ esta en divisiones, y cada división es 0,0254 mm.

El valor promedio y desviación estándar del promedio es: $d_k = 2,1844$ mm; $DE_{\text{prom}} = 0,289$ mm.

La estimación de incertidumbre con la repetibilidad, DE del promedio, la exactitud de las

especificaciones de la abertura y la resolución de la practica de ensayo, se presenta en el Cuadro 4.

Con base en la norma, Ecuación (68), se obtiene el valor corregido $d_{\sigma} = 2,184$ mm \pm 0,289 mm.

Se procede al cálculo del ángulo de divergencia, con los siguientes valores:

$$d_{\sigma} = 2,18 \text{ mm} \pm 0,28 \text{ mm}; z = 1890,00 \text{ mm} \pm 1,44 \text{ mm}.$$

Valor nominal del ángulo de divergencia:

$$\Theta = d_{\sigma} / z = 2,184 \text{ mm} / 1890 \text{ mm} = 1,155 \text{ mrad}.$$

Estimación de la incertidumbre:

$$u d_{\sigma} \text{ (incertidumbre de diámetro)} = 0,289 \text{ mm}; u z \text{ (incertidumbre de distancia)} = 1,44 \text{ mm}.$$

Factores de sensibilidad:

$$u^2_{\text{combinada}} = (\partial\Theta/\partial d_{\sigma} \cdot u d_{\sigma})^2 + (\partial\Theta/\partial z \cdot u z)^2$$

Incertidumbre:

$$u \text{ combinada} = 0,153 \text{ mrad}.$$

$$\Theta = 1,15 \text{ mrad} \pm 0,15 \text{ mrad}.$$

Este es el resultado del segundo método.

Cuadro 4. Estimación de incertidumbre de d_k

Nº	Tipo distribución	Fuente de incertidumbre	Contribución $u_i(y)/$ mm	$(u_i(y))^2/\text{mm}^2$
1	A	Repetitividad	0,289	0,0833
2	B, rect	Error del tornillo	0,015	0,0002
3	B, rect	Resolución	0,007	0,0001
Incertidumbre estandar combinada / mm (k=1)				0,289

Fuente: Elaboración propia, 2012.

4.3. Método alternativo de ranura móvil

Se mide el flujo radiante transmitido en función de la posición de una ranura móvil y se miden las dos distancias que corresponden al 13,5 % a ambos lados del centro del haz, ver Figura 15.

La Figura 16 muestra el montaje práctico.

Se mide el flujo radiante transmitido en función de la posición de una ranura móvil, y se miden las dos distancias que corresponden al 13,5 % a ambos lados del centro del haz del flujo directo. La medición del brazo deslizante (móvil), se hace con el tornillo micrométrico descrito. Se conoce la exactitud del tornillo, cada división corresponde a 0,0254 mm de desplazamiento. Sobre el brazo móvil, se coloca la ranura de precisión marca Thorlabs modelo VS100/M que presenta una exactitud de $\pm 51 \mu\text{m}$ entre el micrómetro y la abertura real. El dispositivo láser y la distancia z fue la misma que el apartado anterior.

Se anotan 3 valores representativos, dada una gran repetibilidad. La diferencia $x_2 - x_1$ esta en divisiones, y cada división es 0,0254 mm.

El valor promedio y desviación estándar del promedio es: $d_s = 2,1844 \text{ mm}$; $DE_{\text{prom}} = 0,267 \text{ mm}$.

La estimación de incertidumbre con la repetibilidad, DE del promedio, la exactitud de las especificaciones de la abertura y la resolución de la practica de ensayo se presentan en el Cuadro 5.

Con base en la norma, Ecuación (69), se obtiene el valor corregido $d_\sigma = 2,026 \text{ mm} \pm 0,268 \text{ mm}$.

Se procede con los siguientes valores:

$$d_\sigma = 2,03 \text{ mm} \pm 0,27 \text{ mm}.$$

$$z = 1890,00 \text{ mm} \pm 1,44 \text{ mm}$$

Valor nominal del ángulo de divergencia:

$$\Theta = d_\sigma / z = 2,026 \text{ mm} / 1890 \text{ mm} = 1,0725 \text{ mrad}$$

Estimación de la incertidumbre:

$$u_{d\sigma} \text{ (incertidumbre de diámetro)} = 0,268 \text{ mm}; u_z \text{ (incertidumbre de distancia)} = 1,443 \text{ mm}.$$

Factores de sensibilidad:

$$u^2_{\text{combinada}} = (\partial\Theta/\partial d\sigma \cdot u_{d\sigma})^2 + (\partial\Theta/\partial z \cdot u_z)^2$$

Incertidumbre:

$$u_{\text{combinada}} = 0,1418 \text{ mrad}.$$

$$\Theta = 1,15 \text{ mrad} \pm 0,14 \text{ mrad}.$$

Este es el resultado del tercer método.

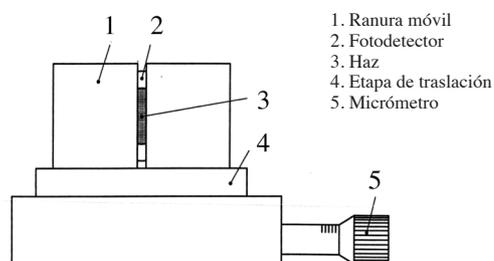


Figura 15. Configuración para medición de ancho de haz con ranura móvil (ISO 11146-1:2005)

Fuente: ISO/TR 11146-3:2004.

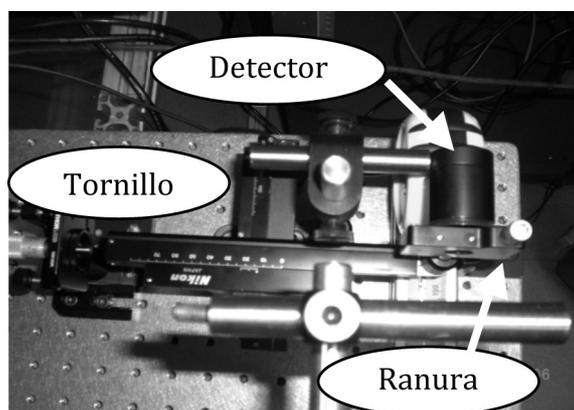


Figura 16. Medición de haz láser con método de ranura móvil.

Fuente: Elaboración propia, 2012.

Cuadro 5. Estimación de incertidumbre de d_s

Nº	Tipo distribución	Fuente de incertidumbre	Contribución $u_i(y)/$ mm	$(u_i(y))^2/\text{mm}^2$
1	A	Repetitividad	0,267	0,0711
2	B, rect	Exactitud tornillo	0,029	0,0009
3	B, rect	Resolución	0,007	0,0001
Incertidumbre estandar combinada / mm (k=1)				0,268

Fuente: Elaboración propia, 2012.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se siguió con rigurosidad los procedimientos de la norma ISO/TR 11146-3:2004, que se aplican sin problema en laboratorio, en la determinación del ángulo de divergencia, a través de mediciones del ancho de haz láser en campo lejano, a una distancia mayor al ámbito de Rayleigh. Se revisó detalles de mediciones y aplicación de la óptica gaussiana.

Los tres métodos alternativos de la norma ISO/TR 11146-3:2004, producen los siguientes resultados:

- Apartado 4.1 del método de abertura variable:

$$\Theta = 1,22 \text{ mrad} \pm 0,17 \text{ mrad}$$

- Apartado 4.2 del método de borde de navaja móvil:

$$\Theta = 1,15 \text{ mrad} \pm 0,15 \text{ mrad}$$

- Apartado 4.3 del método de ranura móvil:

$$\Theta = 1,07 \text{ mrad} \pm 0,14 \text{ mrad}$$

Se estimó la incertidumbre estándar de la medición de flujo radiante, que de manera indirecta permite obtener el ancho del haz láser en campo lejano. La exactitud es 1,38 %.

Las mediciones realizadas fueron ensayos, con varias muestras, pero se destaca que el método de ranura móvil tiene menor incertidumbre y un valor (nominal) del ángulo de divergencia, más cercano al valor teórico.

La medición de abertura variable tuvo mayor incertidumbre, y un valor de ángulo de divergencia, más lejano del valor teórico.

El valor teórico del ángulo de divergencia de 0,92 mrad permite considerar que es un valor lejano de la realidad. Los fabricantes no miden todos los equipos cada vez que son fabricados. Con los datos teóricos se obtuvo un valor “teórico

más real” del ángulo de divergencia: $\Theta = 0,922$ mrad. El fabricante tiene una incertidumbre de $\pm 5 \%$, lo cual permite considerar que el valor puede llegar a un valor de 0,9681 mrad.

No obstante, dado el origen dentro de la cavidad láser de la cintura del haz puede no ser la de los datos dados por el fabricante, la longitud de coherencia puede variar del valor teórico, lo cual es parte del resultado hallado en esta investigación. Un haz láser teórico está incrustado en un haz láser real a través de M^2 . Se utilizó el valor de M^2 para un láser de HeNe.

Si se aplica la incertidumbre al ángulo de divergencia en cada método, se obtiene:

- Apartado 4.1 del método de abertura variable:

$$\Theta = 1,39 \text{ mrad (Valor máximo)}$$

$$\Theta = 1,05 \text{ mrad (Valor mínimo)}$$

- Apartado 4.2 del método de borde de navajilla móvil:

$$\Theta = 1,30 \text{ mrad (Valor máximo)}$$

$$\Theta = 1,00 \text{ mrad (Valor mínimo)}$$

- Apartado 4.3 del método de ranura móvil:

$$\Theta = 1,21 \text{ mrad (Valor máximo)}$$

$$\Theta = 0,92 \text{ mrad (Valor mínimo)}$$

Si bien, es claro que esto se refiere a un registro limitado de datos, confirma que un valor teórico del ángulo de divergencia de 0,9681 máximo, podría ser obtenido por los métodos alternativos, considerando que el valor teórico es siempre menor que un valor real, obtenido en laboratorio.

Como conclusión final, se debe tener cuidado con las especificaciones de los fabricantes y el seguir normas ISO u otras permiten obtener resultados más confiables.

6. CONCLUSIONES

- Se consideran adecuados los tres métodos alternativos de la norma. La aplicación de cada uno, depende de la experiencia y capacidad instrumental del laboratorio.
- La consideración de la distancia z no fue problema.
- La teoría del haz gaussiano fue revisada y adaptada para este estudio encontrando variantes de conceptos y nomenclatura en la literatura. Se genera un documento técnico que revisa este tema, utilizado en mediciones de ensayo o calibración de sistemas láser.
- Se realizó todo un proceso de montajes mejorados, que se consideran muy exactos, de acuerdo a lo solicitado en la norma y respecto a las prácticas experimentales anteriormente realizadas en LAFTLA. Se considera que se mejora la forma de realizar ensayos de ángulos de divergencia u óptica gaussiana en el laboratorio.
- Se estudió y adaptó considerablemente el uso de estimaciones de incertidumbre, de acuerdo a la literatura especializada. Esto se utilizará de hecho en prácticas mejoradas en LAFTLA.
- Se encuentra mal uso de la nomenclatura descrita en ISO 80000-7 respecto a radiación óptica, en mucha de las referencias consultadas. Se presenta mucha variabilidad en la literatura.

AGRADECIMIENTOS

- Vicerrectoría de Investigación – Universidad de Costa Rica
- Escuela de Ingeniería Eléctrica – Universidad de Costa Rica

BIBLIOGRAFÍA

Bennett, C. A. (2008). *Principles of physical optics*. Boston: Wiley.

International Organization for Standardization. (2008). *ISO 8000-7 Quantities and units – Part 7: Light*. Geneva: ISO.

National Institute of Standards and Technology. (2009). *Laser Short Course*. Boulder: NIST (INM).

Photon Inc., (2007). *Guide to understanding gaussian optics*. Extraído el 16 de Diciembre del 2011 desde <http://www.photon-inc.com>.

Melles Griot. (2004). *Practical application of light*. Rochester: Barloworld Scientific.

Siegman, A. (1986). *Lasers*. Sausalito: University Science books.

International Organization for Standardization. (2004) ISO/TR 11146-3 Lasers and laser-related equipment – Test methods for laser beam widths, divergence angles and beam propagation ratios – Part 3: intrinsic and geometrical laser beam classification, propagation and details of test methods. Ginebra, Suiza.

International Electrotechnical Commission. (1990-12) IEC 61040 *Power and energy measuring detectors, instruments and equipment for laser radiation*. Ginebra, Suiza.

SOBRE EL AUTOR

Luis Diego Marín Naranjo

Ingeniero Eléctrico, investigador del Laboratorio de Fotónica y Tecnología, Láser (LAFTLA), Escuela de Ingeniería Eléctrica Universidad de Costa Rica.
Teléfono: 8314-1672
Correo: lmarin@eie.ucr.ac.cr

