

**ADECUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL LÁSER DE IÓN ARGÓN  
PARA APLICACIONES EN PRUEBAS DE DISPERSIÓN DE LUZ POR  
PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS**

**ELENA MONTILLA ROSERO**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA  
EDUCACIÓN  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
POPAYÁN  
CAUCA  
2003**

**ADECUACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL LÁSER DE IÓN ARGÓN  
PARA APLICACIONES EN PRUEBAS DE DISPERSIÓN DE LUZ POR  
PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS**

**ELENA MONTILLA ROSERO**

**Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Físico**

**Director  
ALVARO EFRAIN BASTIDAS GUSTIN, MSc.**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES, EXACTAS Y DE LA  
EDUCACIÓN  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA  
POPAYÁN  
CAUCA  
2003**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

Director del Trabajo de Grado \_\_\_\_\_

Alvaro Efraín Bastidas Gustín, MSc.  
Grupo de Óptica y Láser  
Universidad del Cauca

Jurado \_\_\_\_\_

Efraín Solarte Rodríguez, Dr.rer.nat  
Grupo de Óptica Cuántica  
Universidad del Valle

Jurado \_\_\_\_\_

Germán Bacca Bastidas, Mg.  
Grupo I + D en Ingeniería Física  
Universidad del Cauca

Fecha de sustentación: 28 de marzo de 2003

## **DEDICATORIA**

*A Dios y a mi madre, que son mi guía y mi fuerza,  
a mi familia y amigos,  
y a Doña Martha, que me acompaña desde el cielo*

## **AGRADECIMIENTOS**

Mis agradecimientos sinceros a:

La Universidad del Cauca y al Grupo de Óptica y Láser (G. O. L), por permitirme utilizar las instalaciones y los equipos, para realizar este trabajo.

MSc. Alvaro Efraín Bastidas Gustín, director del trabajo de grado, por sus enseñanzas, su tiempo, sus consejos y su invaluable apoyo.

Mg. Jaury León Téllez, coordinador del G. O. L. y a la Lic. Edith Lucero Rodríguez, por su valiosa colaboración y apoyo.

Dr. Efraín Solarte Rodríguez, del Grupo de Óptica Cuántica de la Universidad del Valle, por su tiempo y su valiosa colaboración con el préstamo de los equipos.

Finalmente, agradezco muy especialmente a mis padres, a mi tía, a Laura y a Johnier, por su infaltable y decidido apoyo en todo momento, como también a mis amigos y compañeros.

# TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	
1. DESCRIPCIÓN DEL LÁSER DE ARGÓN	1
2. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UN HAZ GAUSSIANO	6
2.1 PERFIL Y CINTURA DEL HAZ	8
2.2 TERMINO DE AMPLITUD Y DIVERGENCIA DEL HAZ	12
2.3 FLUJO DE POTENCIA	13
2.4 GRADO DE COHERENCIA	14
3. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DEL LIDAR	16
3.1 EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL	23
4. RESTAURACIÓN DE LA FUENTE DE POTENCIA DEL LÁSER DE ARGÓN	29
5. INSTALACIÓN Y MONTAJE DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DEL LÁSER	39
6. MEDIDA DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL HAZ LÁSER	46
6.1 MEDIDA DE LA POTENCIA ÓPTICA	46
6.2 MEDIDA ESPECTRAL DEL HAZ DE SALIDA	50
6.3 MEDIDA DE LA LONGITUD DE ONDA	52
6.4 MEDIDA DE LA CINTURA DEL HAZ	54
6.5 CALCULO DEL ANGULO DE DIVERGENCIA	62

6.6 MEDIDA DEL GRADO DE COHERENCIA	62
7. PRUEBAS PRELIMINARES DE RECOLECCIÓN DE LA LUZ LÁSER RETRODISPERSADA POR LA ATMÓSFERA	65
7.1 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL DEL SISTEMA	65
7.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES	68
8. CONCLUSIONES	73
BIBLIOGRAFÍA	75
ANEXOS	78

## LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 6.1. Datos obtenidos de la cintura del haz W, en función de la distancia z, 58  
para  $P = 4 \text{ mW}$

Tabla 6.2. Datos obtenidos de la cintura del haz W, en función de la distancia z, 58  
para  $P = 10 \text{ mW}$



## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1. Esquema de transición típico de un láser de cuatro niveles	3
Figura 1.2. Niveles de energía de las transiciones 4p-4s del láser de ión Argón ( $\text{Ar}^+$ )	3
Figura 1.3. Esquema Funcional del láser de Argón	5
Figura 2.1. Simetría alrededor de la cintura mínima del haz $W_0$	11
Figura 2.2. Perfil del haz en la cintura	12
Figura 2.3. Perfil del haz a una distancia $z$	12
Figura 2.4. Montaje básico del Experimento de Young	15
Figura 3.1. Configuraciones para un sistema Lidar	17
Figura 3.2. Esquema básico de funcionamiento de un Lidar	19
Figura 3.3. Fenómeno de dispersión	22
Figura 3.4. Capas de la atmósfera terrestre hasta una altitud de 300 km	23
Figura 4.1. Diagrama en bloques del láser de Argón	29
Figura 4.2. Panel frontal de la fuente de potencia del láser	32
Fotografía 4.1 Fuente de potencia eléctrica del láser de Argón	33
Fotografía 4.2 Láser de Argón	33
Figura 4.3. Diagrama en bloques de los circuitos y dispositivos de la fuente de potencia	36

Figura 5.1 Diagrama en bloques del sistema de refrigeración del láser de ión Argón (Ar <sup>+</sup> )	41
Fotografía 5.1. Sistema de refrigeración del láser	42
Figura 5.2 Temperatura del agua a la salida del láser, sin sistema de refrigeración, tiempo de trabajo del láser: 15,5 minutos	44
Figura 5.3 Temperatura del agua a la salida del láser, con el sistema de refrigeración; tiempo de trabajo del láser: (a) 30 minutos, (b) 60 minutos	45
Figura 6.1a. Curvas de potencia en función de la corriente de descarga. (a) $\lambda = 457,9$ nm (b) $\lambda = 476,5$ nm	47
Figura 6.1b. Curvas de potencia en función de la corriente de descarga. (a) $\lambda = 496,5$ nm (b) $\lambda = 514,5$ nm	48
Figura 6.1c. Curvas de la potencia óptica de salida en función del cuadrado de la corriente de descarga a) $\lambda = 457,9$ nm b) $\lambda = 476,5$ nm c) $\lambda = 496,5$ nm d) $\lambda = 514,5$ nm	49
Figura 6.2. Montaje experimental para la medida de la potencia óptica y la longitud de onda del haz láser	50
Figura 6.3. Espectros de la radiación láser para dos valores diferentes de potencia óptica $P = 2,09$ W y $P = 2,00$ W	52
Figura 6.4. Espectros de las longitudes de onda láser, para las líneas de $\lambda = 457,9$ nm , $\lambda = 476,5$ nm, $\lambda = 496,5$ nm y $\lambda = 514,5$ nm	53
Figura 6.5. Diagrama en bloque del sistema de medida para la cintura del haz	54
Figura 6.6. Perfiles del haz láser a diferentes distancias, $P = 4$ mW	56
Figura 6.7. Perfiles del haz láser a diferentes distancias, $P = 10$ mW	57
Figura 6.8. Curvas de $W^2$ en función de $z^2$ , para: a) $P = 4$ mW b) $P = 10$ mW	59
Figura 6.9. a) Gráfica de la función $W(z)$ , con $W_0 = 1,12$ mm y $Z_R = 1,96$ m b) Curva experimental de $W(z)$ , para $P = 4$ mW	60
Figura 6.10. a) Gráfica de la función $W(z)$ , con $W_0 = 1,15$ mm y $Z_R = 2,07$ m b) Curva experimental de $W(z)$ , para $P = 10$ mW	61

Figura 6.11. Montaje para la medición del Grado de Coherencia del Láser de ión Argón	62
Figura 6.12. Intensidad de las franjas de interferencia del experimento de Young	63
Figura 7.1. Montaje Básico del Sistema LIDAR	67
Figura 7.2. Señal láser retrodispersada. $P = 1,5 \text{ W}$	69
Figura 7.3. Señal láser retrodispersada. $P = 1,7 \text{ W}$	69
Figura 7.4. Señal láser retrodispersada, detectada con la óptica sin ajuste de focalización. $P = 1.5 \text{ W}$ y en el modo multilínea	70
Figura 7.5. Señal láser retrodispersada, con corrección de ruido de fondo y focalización de la óptica. $P = 1.5 \text{ W}$ y en el modo multilínea	71
Figura 7.6. Señal láser retrodispersada, detectada utilizando la óptica de recolección, Inyección vertical del haz láser, modo multilínea y $P = 2,7 \text{ W}$	72

## **RESUMEN**

Este trabajo comprende la recuperación y caracterización del láser de Ión Argón del Laboratorio de Óptica de la Universidad del Cauca, el cual incluye la restauración de la fuente de potencia, la adecuación del sistema de purificación de aire y la instalación del sistema de refrigeración del mismo. La tarea de caracterización del haz de salida, es realizada usando medidores de alta resolución y eficiencia, con el propósito de conocer los parámetros característicos, sus propiedades y modos de operación. La aplicación particular de este láser, consiste en el montaje preliminar de un sistema LIDAR básico para la recolección de luz láser retrodispersada por partículas atmosféricas en la ciudad de Popayán. Los resultados obtenidos indican la factibilidad de construir, posteriormente el sistema completo, funcionando en el modo de conteo de fotones.

## INTRODUCCIÓN

Los láseres se han constituido desde su invención, en herramientas de trabajo muy importantes a nivel científico, y se han involucrado de manera significativa en el desarrollo de las aplicaciones tecnológicas actuales. Particularmente, en la Universidad del Cauca se ha realizado un trabajo de recuperación y caracterización del láser de ión  $\text{Ar}^+$ , de alta potencia, este tipo de láser posee características especiales para realizar tareas de gran precisión y eficiencia. Aquí, se contempla la posibilidad de involucrar este láser en la construcción de un sistema de monitoreo remoto, (LIDAR), de aerosoles atmosféricos de origen volcánico y antropogénico, que inciden directamente en los niveles de contaminación atmosférica.

El contenido del desarrollo de este trabajo se presenta en dos partes principales, la primera, incluye tres capítulos: descripción del láser de Argón, parámetros característicos de un haz gaussiano y principios de funcionamiento del LIDAR, en éstos se presentan los fundamentos teóricos relacionados con el trabajo experimental aquí realizado.

La segunda parte, consta de cuatro capítulos: restauración de la fuente de potencia del láser de Argón, instalación y montaje del sistema de refrigeración del láser, medida de los parámetros característicos del haz láser y pruebas preliminares de recolección de la luz láser retrodispersada por la atmósfera, que describen con cierto detalle las técnicas experimentales desarrolladas y los resultados adquiridos, junto con su

análisis, tanto para la caracterización del láser como para las pruebas preliminares del sistema LIDAR básico.

Con el desarrollo del presente trabajo, se genera un gran número de posibilidades para trabajos posteriores, en cuanto a las diversas aplicaciones del láser de Argón, que permiten fortalecer las áreas de investigación y aplicación de la óptica. Además con el trabajo posterior, referente a la realización del sistema LIDAR, se tendrá un sistema que permitirá mejorar las técnicas que existen actualmente en el país, para el estudio y monitoreo de las partículas atmosféricas contaminantes de centros urbanos, consiguiendo de esta forma, aportar información que sea útil para las decisiones de las políticas de control ambiental.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL LÁSER DE ARGÓN

La palabra LÁSER significa, *light amplification by stimulated emission of radiation*, y se refiere a una fuente de luz particular, basada en la emisión estimulada de radiación por la materia, que se caracteriza fundamentalmente, por sus propiedades de intensidad, monocromaticidad, coherencia, polarización y alta direccionalidad.

La invención y construcción del primer láser ocurrió en el año de 1960 por *Theodore Maiman*, quien utilizó un cristal de rubí como medio activo. El primer láser de gas y de emisión continua apareció en 1961 y fue construido por *Ali Jaban, W. R. Bennett* y *D. H. Herriot*. En el año de 1962 se desarrollaron los láseres de semiconductor y en el año de 1964 apareció el primer láser molecular de CO<sub>2</sub> junto con los láseres químicos.

El láser de Argón fue inventado en 1964 por *Guillermo Bridges* y *Hughes Aircraft*; y su prototipo pertenece a la familia de los láseres de ión que utilizan un gas noble como medio activo. Este láser se encuentra clasificado como un láser de clase IV, (alta potencia), del tipo blando que trabaja en el rango visible del espectro electromagnético, [1]. El haz emitido por este láser de gas, además de las propiedades de monocromaticidad, coherencia y alta direccionalidad, tiene una colimación casi total, lo que significa que presenta escasa divergencia, además tiene un notable

rendimiento, puesto que el haz emitido alcanza hasta el 15 % de la potencia consumida.

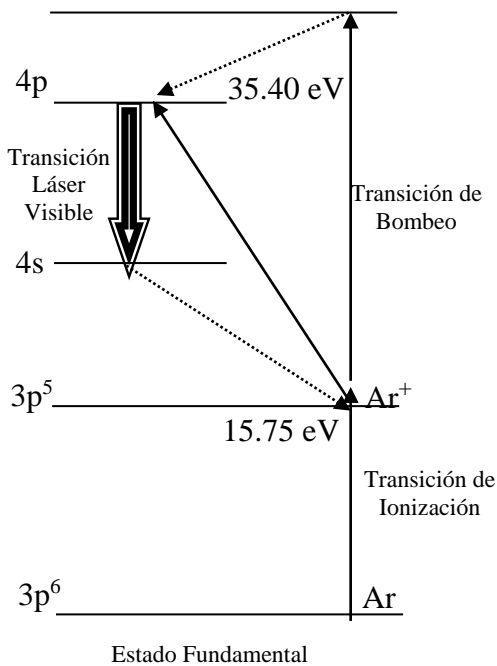
El láser de ión Argón ( $\text{Ar}^+$ ), opera en régimen multi-línea, es decir, emite en diferentes longitudes de onda. Cada una de las cuatro longitudes de onda que emite, se consideran como una fuente de luz monocromática en sí misma, con un ancho de banda muy estrecho. Las dos longitudes de onda dominantes son: 514,5 nm "verde" y 488,0 nm "azul", éstas conforman cerca del 67% de la potencia total del rayo de salida.

También es posible obtener una sola línea de operación si se insertan prismas, rejillas de difracción u otros dispositivos ópticos para seleccionar la longitud de onda deseada. En el caso del láser de ión Argón ( $\text{Ar}^+$ ), Modelo 2030 de *Spectra-Physics®*, la operación en modo de línea singular se consigue al insertar un prisma que dispersa cada una de las líneas del láser. Por supuesto, cuando se requiere una sola línea de operación, la potencia total de salida disminuye en forma apreciable.

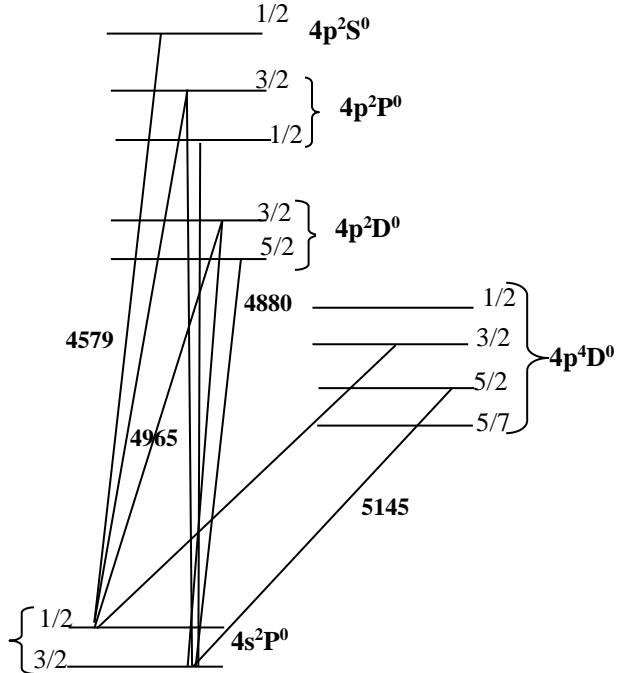
Las propiedades del gas noble Argón, son probablemente las más conocidas y entendidas de todos los medios láser de gas ionizados. El esquema de transición electrónica, usando este gas como medio activo, consta de cuatro niveles tal como se muestra en la Figura 1.1, y el correspondiente diagrama del nivel de energía visible se indica en la Figura 1.2.



La estructura electrónica del átomo de Argón en el estado fundamental es  $3s^2 3p^6(^1S_0)$  y cuando se excita uno de los seis electrones  $3p$  se mueve a una órbita más alta. El estado fundamental del ión Argón  $Ar^+$  es entonces  $3s^2 3p^5 (^2P)$ . El átomo neutral se bombea al nivel energético  $4p$  por una doble colisión con electrones, la primera ioniza el átomo y la segunda excita el ión desde su estado fundamental ( $E_1$ ) hasta el nivel de energía  $4p$  ( $E_3$ ) o al  $E_4$ , desde el cual desciende rápidamente al nivel  $4p$ . Los iones  $4p$  decaerán eventualmente al  $4s$  ( $E_2$ ) emitiendo un fotón. En el láser de ión Argón ( $Ar^+$ ) Modelo 2030 de *Spectra-Physics*®, se utiliza para la ionización, una corriente alta DC, regulable desde 0 a 60 amperios, a través del tubo, que provee una descarga suficiente para mantener el gas ionizado, [2].



**Figura 1.1.** Esquema de transición típico de un láser de cuatro niveles



**Figura 1.2.** Niveles de energía de las transiciones  $4p-4s$  del láser de ión Argón ( $Ar^+$ )

La ganancia del láser de ión Argón ( $\text{Ar}^+$ ) está directamente afectada por importantes factores como son: la densidad de corriente de descarga en el plasma, el campo magnético de confinamiento electrónico y la presión del gas. Puesto que se necesitan dos colisiones con electrones libres para bombear un átomo de Argón al nivel superior de las transiciones visibles, la ganancia del medio varía con el cuadrado de la densidad de corriente. Bajo saturación, la potencia del régimen multilínea o salida en todas las líneas del láser de ión se puede expresar como sigue:

$$P = k J^2 V \quad (1.1)$$

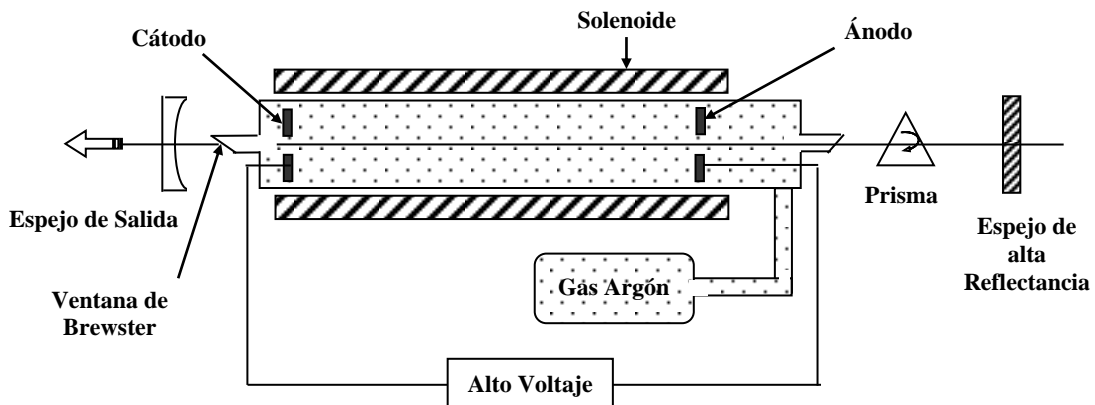
Donde  $P$  es la potencia de salida (W),  $J$  es la densidad de corriente ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ),  $V$  es el volumen del medio activo ( $\text{cm}^3$ ) y  $k$  es una constante.

El funcionamiento en modo continuo del láser de argón se debe a los valores de las vidas medias de los niveles de energía que intervienen. La vida media de los niveles superiores es del orden de 7 ns y la de los inferiores que se desexcitan al estado fundamental del ión es inferior a un ns.

El tubo de plasma está a una presión de 0,5 Torr y la alta corriente que necesita para su operación hace que se disipen en él potencias del orden de 10 kW, por lo cual el material del tubo debe ser especial, (en este caso, el tubo del plasma del láser de ión Argón ( $\text{Ar}^+$ ) Modelo 2030 de *Spectra-Physics®*, está hecho de compuesto de grafito que tiene un bajo coeficiente de expansión térmica), y estar dotado de un sistema de

refrigeración continua por agua. Se utiliza un campo magnético de unos 1000 gauss para confinar los electrones y aumentar el rendimiento de la descarga.

El tubo y la cavidad están separados, y ésta suele ir dotada de un prisma que actúa como elemento dispersor para seleccionar la longitud de onda. La cavidad resonante del láser se compone de dos espejos ubicados en los extremos, uno es altamente reflectivo y el otro es un espejo que posee una pequeña transmitancia y desde el cual el rayo emerge como luz láser. La ventana del ángulo de *Brewster* que se encuentra en uno de los extremos del tubo, minimiza las pérdidas por reflexión mientras polariza el rayo, como se muestra en la Figura 1.3.



**Figura 1.3.** Esquema funcional del láser de Argón

Los láseres de alta potencia, clasificación a la cual pertenece el láser de ión Argón ( $Ar^+$ ) Modelo 2030 de *Spectra-Physics®*, tienen diversas aplicaciones entre las que se encuentran la medicina forense, cirugía general y oftálmica, holografía, espectroscopia, litografía, se usa también como fuente de "bombeo" óptico para láseres de colorante; igualmente se ha venido aplicando a múltiples procesos de caracterización óptica de materiales, [2].

## 2. PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UN HAZ GAUSSIANO

La definición de los parámetros característicos de los haces gaussianos, se inicia con la deducción de la ecuación para una onda paraxial, para lo cual se considera la ecuación de onda escalar dependiente del tiempo para un campo eléctrico en un medio de índice de refracción  $n$  :

$$\nabla^2 \varepsilon(x, y, z, t) - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \varepsilon(x, y, z, t) = 0 \quad (2.1)$$

Recordando que un campo oscilatorio monocromático tiene una solución de la forma,

$$\varepsilon(x, y, z, t) = \varepsilon(x, y, z) e^{-i\omega t} \quad (2.2)$$

La ecuación de onda, Ecuación (2.1), puede escribirse como la ecuación de *Helmholtz*, con  $n = c / c'$ ,

$$\nabla_i^2 \varepsilon + \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} + k^2 \varepsilon = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla^2 \varepsilon(x, y, z) + k^2 \varepsilon(x, y, z) = 0, \quad k = \omega / c' \quad (2.4)$$

Si se considera una variación espacial de la forma:

$$\varepsilon(x, y, z) = \varepsilon_0 \psi(x, y, z) e^{-ikz} \quad (2.5)$$

Donde:  $\varepsilon_0$  es la amplitud del campo en  $x = y = z = 0$  y  $\psi(x, y, z)$ , es la función que determina cómo difiere la onda de una onda plana.

Colocando  $\varepsilon_0 = 1$ , para facilitar el procedimiento algebraico y evaluando la derivada, al sustituir  $\varepsilon(x, y, z)$ , en la Ecuación, (2.4), se obtiene:

$$\nabla_t^2 \psi + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} - 2ik \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0 \quad (2.6)$$

Se debe recordar que el módulo del vector de onda,  $k$ , es un número grande para ondas ópticas. Por lo tanto, utilizando la aproximación paraxial en forma diferencial, que se escribe como sigue:  $|\partial^2 \psi / \partial z^2| \ll |2k(\partial \psi / \partial z)|$ , la Ecuación (2.6), se reduce a la forma:

$$\nabla_t^2 \psi - 2ik \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0 \quad (2.7)$$

Esta es la ecuación que se conoce como *Ecuación de Onda Paraxial*.

## 2.1 PERFIL Y CINTURA DEL HAZ

El operador *Laplaciano* se puede expresar en coordenadas cilíndricas o cartesianas, por lo cual, existen dos conjuntos de soluciones para la ecuación de onda paraxial, Ecuación (2.7), pero se elige la que se ajuste a las observaciones experimentales del rayo “más simple”, que tiene simetría axial al eje de propagación, y una estructura transversal gaussiana. La teoría de difracción demuestra que una distribución Gaussiana de amplitud mantendrá este perfil mientras se propaga en el campo lejano, (difracción de *Fraunhofer*). A partir de la demostración de que las distribuciones *Hermitte-Gaussianas* de amplitud se propagan sin cambio en el campo cercano, (difracción de *Fresnel*), se asegura que el perfil gaussiano del rayo tiene la más baja divergencia para un diámetro dado de cualquier rayo limitado radialmente, [3].

Debido a ésta simetría, se utiliza en la Ecuación (2.7), el operador *Laplaciano* en coordenadas cilíndricas, pero se anulan las variaciones angulares, por la simetría axial del haz gaussiano. De esta forma, la ecuación diferencial es:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \psi_0}{\partial r} \right) - 2ik \frac{\partial \psi_0}{\partial z} = 0 \quad (2.8)$$

Para la cual se propone la siguiente solución:

$$\psi_0 = \exp\{-ip(z)\} \exp\left\{\frac{-ikr^2}{2q(z)}\right\} \quad (2.9)$$

Donde, las funciones  $p(z)$  y  $q(z)$  son en general complejas, y, mientras  $p(z)$  determina cómo se diferencia la fase longitudinal de la onda de una onda plana;  $q(z)$ , define la distribución de amplitud radial que es real y la fase radial (o curvatura del frente de onda), que es imaginaria, además se denomina el “Parámetro Complejo” del haz, y caracteriza su óptica.

En el punto donde el diámetro del rayo es mínimo, el frente de onda es plano, por lo que es conveniente elegir este punto como el origen,  $z = 0$ . Esta condiciones se logran haciendo,  $q(z = 0) = q_0$ , imaginario. Sea  $q_0 = i z_R$ , donde  $Z_R$  es un parámetro real con dimensiones de longitud, entonces se puede escribir  $q(z) = z + iz_R$  y así obtener,  $1/q(z)$ , para la solución dada en la Ecuación (2.9):

$$\frac{1}{q(z)} = \left( \frac{z}{z^2 + z_R^2} \right) - i \left( \frac{z_R}{z^2 + z_R^2} \right) \quad (2.10)$$

Ahora se introducen dos funciones de,  $z$ :  $R(z)$  y  $w(z)$ , para escribir:

$$\frac{1}{q(z)} = \left( \frac{1}{R(z)} \right) - i \left( \frac{2}{kw^2(z)} \right) \quad (2.11)$$

Donde:

$$R(z) = z \left[ 1 + \left( \frac{z_R}{z} \right)^2 \right] \quad (2.12)$$

$$w^2(z) = \frac{2}{k} z_R \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_R} \right)^2 \right] \quad (2.13)$$

Por lo tanto, la solución de la Ecuación (2.8), que cumple con las condiciones exigidas, se escribe así:

$$\psi_0 = e^{-iP(z)} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2(z)}\right) \exp\left(-\frac{ikr^2}{2R(z)}\right) \quad (2.14)$$

Al introducir,  $w(z)$ , en la forma dada en la Ecuación (2.13), se hace del término real de la Ecuación (2.14), una función gaussiana. El parámetro  $w(z)$ , puede interpretarse como la distancia radial a la cual la amplitud del campo alcanza el,  $e^{-1}$ , de su valor central, ( $r = 0$ ), y se conoce como tamaño de la mancha, (*spot size*), o también, como el radio efectivo del haz a una distancia  $z$ , desde la cintura mínima del rayo. Es decir, en algún punto,  $z$ , el perfil de la amplitud del campo del rayo es una gaussiana con un ancho determinado por  $w(z)$ .

La Ecuación (2.13), muestra que a una distancia  $z = 0$ , el tamaño de la mancha es mínimo, este punto se conoce como cintura del haz, (*waist beam*), y se referencia como  $w_0$ . La Ecuación (2.12), describe el radio de curvatura, que es infinito en la cintura del haz. Se define entonces,

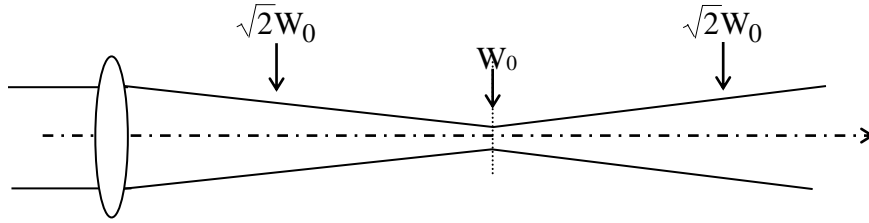
$$w_0^2 = \frac{2z_R}{k} \quad (2.15)$$

de donde,

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda} \quad (2.16)$$



Es útil tener presente que la simetría de la cintura del haz, se mantiene cuando el haz es proyectado desde un conjunto de elementos ópticos, que tengan simetría axial (Figura 2.1).



**Figura 2.1.** Simetría alrededor de  $W_0$

Ahora, la expresión para  $p(z)$ , viene dada por:

$$p'(z) = -\frac{i}{q(z)} \Rightarrow ip(z) = \ln\left(1 - i \frac{z}{z_R}\right) \quad (2.17)$$

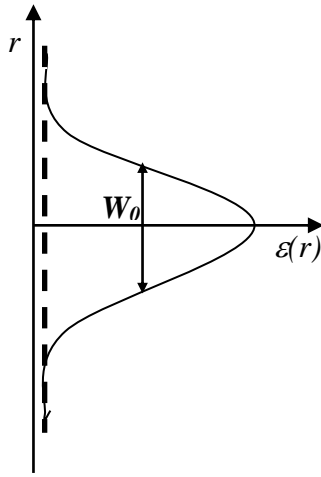
$$e^{-ip(z)} = \frac{w_0}{w(z)} e^{i \arctg\left(\frac{z}{z_R}\right)} \quad (2.18)$$

Luego, la solución completa para la onda paraxial, viene dada por:

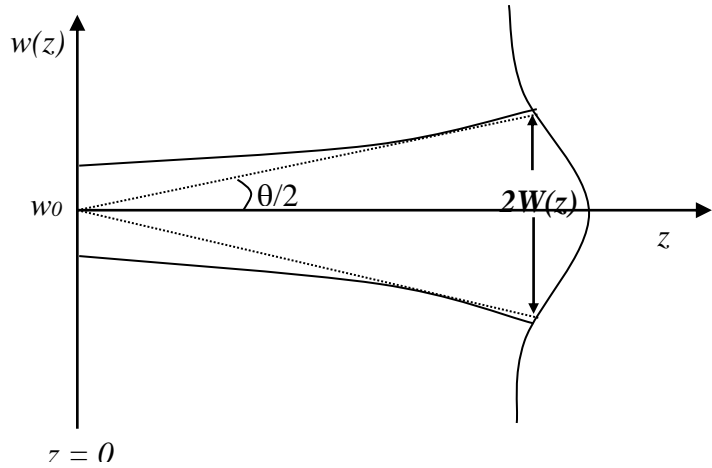
$$\varepsilon(r, \phi, z) = \varepsilon_0 \frac{w_0}{w(z)} \exp\left[-\frac{r^2}{w^2(z)}\right] \times \exp\left[-i\left(kz - \arctg \frac{z}{z_R}\right)\right] \times \exp\left[-i \frac{kr^2}{2R(z)}\right] \quad (2.19)$$

## 2.2 TÉRMINO DE AMPLITUD Y DIVERGENCIA DEL HAZ

El término real en la Ecuación (2.19), proporciona la información sobre la amplitud de la onda paraxial y permite determinar el comportamiento del perfil del haz, es decir, la amplitud, en un cierto punto  $z$  fijo (Figura 2.2), en particular, en  $z = 0$ , se tendrá  $W(0) = W_0$ . Además, la variación del tamaño de la mancha como una función de  $z$ , se puede observar a partir de la Ecuación (2.13), y se muestra en la Figura 2.3.



**Figura 2.2.** Perfil del haz en la cintura



**Figura 2.3.** Perfil del haz a una distancia  $z$

La Ecuación (2.13), se puede escribir de una forma más común, utilizando la Ecuación (2.15),

$$w(z) = w_0 \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_R} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.20)$$

El parámetro  $z_R$ , tiene dimensiones de longitud y de la Ecuación (2.20), en  $z = z_R$ , el tamaño de la mancha es:

$$w(z) = \sqrt{2}w_0 \quad (2.21)$$

Así, a una distancia,  $z_R$ , de la cintura, el área ocupada por la mancha se dobla. El parámetro,  $z_R$ , se conoce como *Parámetro Confocal*, ó,  $2z_R$ , como la *zona Confocal* ó *Rango de Rayleigh*.

La *Divergencia Angular Total* definida por el ángulo  $\theta$ , ó, apertura del haz en el campo lejano ( $z \rightarrow \infty$ ) según la Figura 2.2, y a partir de la Ecuación (2.20), es, el ángulo de las asíntotas de  $W(z)$ :

$$\theta = \frac{2\lambda}{\pi w_0} = 0.636 \frac{\lambda}{w_0} \quad (2.22)$$

### 2.3 FLUJO DE POTENCIA.

El flujo de potencia o irradiancia está dada por el vector de Poynting,  $S$ , ( $S = \frac{1}{2} \mathbf{E} \times \mathbf{H}^*$ , donde  $E$  y  $H$  son los campos eléctrico y magnético, respectivamente), y que en el espacio libre viene dado por  $S = \epsilon_0 c \mathbf{E} \times \mathbf{E}^*$ . La potencia total  $P$ , promediada sobre un ciclo en un haz gaussiano se obtiene integrando la irradiancia, dada por el vector de Poynting, sobre la sección transversal total del

haz, para un campo de la forma dada en la Ecuación (2.19). El cálculo da como resultado:

$$P = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c \mathcal{E}^2 \left( \frac{\pi w_0^2}{2} \right) \quad (2.23)$$

Para un haz gaussiano particular, la Ecuación (2.23), muestra que la potencia total es constante, como se requiere para conservar la energía de propagación en el espacio libre.

El tamaño de la mancha se define en relación a la amplitud del campo, pero normalmente será medido a partir del perfil de irradiancia, que será de la forma:

$$\exp\left\{-2r^2/w^2(z)\right\} \quad (2.24)$$

Así el tamaño de la mancha se puede definir como la distancia radial a la cual la irradiancia ha descendido como  $e^{-2}$  de su valor en  $r = 0$ , [4].

## 2.4 GRADO DE COHERENCIA.

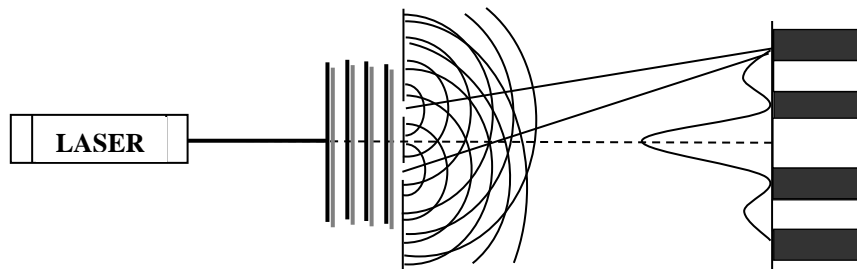
La calidad de las franjas producidas por un sistema interferométrico se puede describir cuantitativamente usando la *visibilidad*  $V$ , que fue formulada inicialmente por A. *Michelson*, como sigue:

$$V = \frac{I_{m\acute{a}x} - I_{m\acute{i}n}}{I_{m\acute{a}x} + I_{m\acute{i}n}} \quad (2.25)$$

Donde:  $I_{máx}$ ,  $I_{mín}$  son las irradiancias máxima y mínima, respectivamente, en el sistema de franjas.

Al hacer el montaje del experimento de Young, (Figura 2.4), se puede variar la separación de las aberturas o el tamaño de la fuente primaria cuasimonocromática, medir la visibilidad y relacionar esta medida con el concepto de **coherencia**, basado en la igualdad  $V = |\gamma_{12}(\tau)|$ , donde  $|\gamma_{12}(\tau)|$  es el grado de coherencia. Es decir, *el módulo del grado de coherencia complejo es idéntico a la visibilidad de las franjas*. Se pueden presentar los siguientes casos:  $|\gamma_{12}| = 1$ , límite coherente,  $|\gamma_{12}| = 0$ , límite incoherente y un valor en el intervalo,  $0 < |\gamma_{12}| < 1$ , significa coherencia parcial, [5].

Debido a que las dos aberturas circulares consideradas como nuevas fuentes, emiten ondas que presentan una diferencia de fase constante y que por lo tanto producen un patrón de interferencia observable, la coherencia que se mide en forma experimental, es la *Coherencia Espacial*.



**Figura 2.4.** Montaje básico del Experimento de Young

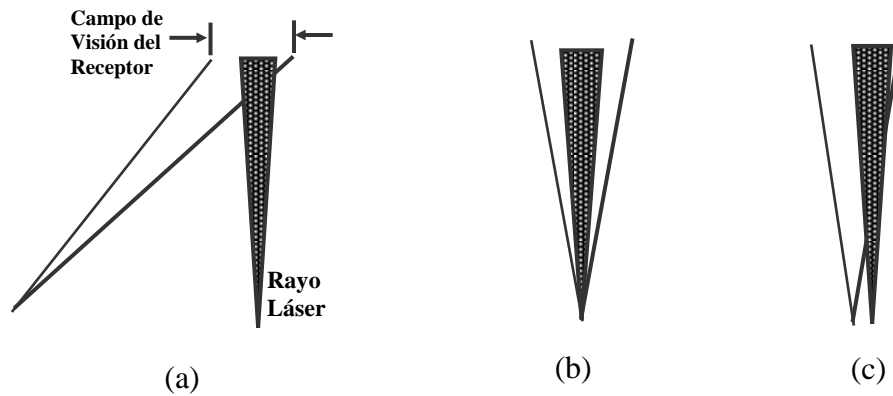
### **3. PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DEL LIDAR**

El conocimiento de las cantidades y propiedades de las partículas suspendidas en la atmósfera es una información muy valiosa para determinar el grado de pureza, (o de contaminación), del aire, además brinda información necesaria para el estudio de la química atmosférica, de la evolución de las especies químicas y su influencia en la calidad del aire.

Este tipo de estudios proporciona además, información que permite el estudio de la dinámica atmosférica. Estas son generalmente las razones que motivan el diseño de sistemas confiables, que permitan el estudio de los componentes atmosféricos y representan en esencia aplicaciones propias de las ciencias de la atmósfera y en particular de la fisicoquímica y la ecología atmosféricas.

La búsqueda de tales sistemas, ligada a la comercialización de los láseres, condujo a la construcción de los sistemas LIDAR. Además, una de las aplicaciones particulares de los láseres se encuentra en la espectroscopia atmosférica. Esta técnica surgió casi con la misma invención del láser, ya que fue la atmósfera una de las primeras áreas en la cual, las propiedades especiales de las fuentes de luz láser, tales como, alta potencia óptica, monocromaticidad y baja divergencia del haz, fueron utilizadas.

La técnica LIDAR surge en el año de 1930, cuando *E. H. Synge*, propuso determinar la densidad atmosférica detectando la dispersión de un rayo de luz proyectado hacia la atmósfera, usando un gran telescopio como receptor y un dispositivo fotoeléctrico como detector de la señal luminosa. La configuración del sistema fue realizada en el modo bistático o biaxial, es decir, la fuente y el receptor estaban separados por varios kilómetros (Figura 3.1a). Actualmente, el LIDAR también puede ser configurado como monostático, ya sea de modo coaxial, (Figura 3.1b) o biaxial, (Figura 3.1c), [6].



**Figura 3.1.** Configuraciones para un sistema Lidar,  
(a) Biaxial, (b) Monostático Coaxial, (c) Monostático Biaxial

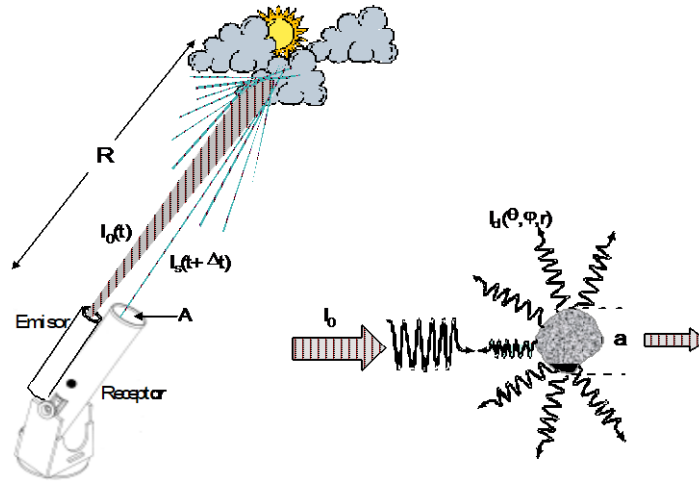
El primer LIDAR monostático fue usado en 1938, para determinar la altura de la base de una nube. Después de este año se hicieron diferentes e importantes avances tanto en la construcción como aplicación de los sistemas Lidar. En el año de 1962, L. Smullins y G. Fiocco, detectaron la luz láser dispersada desde la superficie lunar usando un láser de Rubí.

Los principios generales de operación de un sistema LIDAR son prácticamente idénticos a los del RADAR, por lo que también se le conoce como Radar Láser. En un radar, se transmiten ondas de radio a la atmósfera, las cuales sufren una retrodispersión de alguna parte de su potencia hacia el receptor del radar.

En el Lidar también se transmite y recibe radiación electromagnética, pero a una frecuencia más alta, es por esto que el acrónimo LIDAR, (*Light Detection and Ranging*), se creó utilizando la palabra luz, (*Light*), y enmarca el concepto de detección y medida de las propiedades atmosféricas por sensado remoto. Esta técnica se ha utilizado por más de treinta años para la investigación atmosférica.

El concepto básico es relativamente simple: Se envía un pulso de luz láser a la atmósfera (generalmente en la noche, para evitar el ruido óptico debido a la luz del sol), y se recoge la señal luminosa reflejada por las partículas suspendidas en el aire con un telescopio reflector, midiendo la intensidad de la radiación dispersada en función del tiempo, (Figura 3.2). La intensidad de la luz recibida es una medida de la *densidad atmosférica*. La luz dispersada, recolectada mediante un telescopio reflector es llevada a un sistema detector o fotodetector (comúnmente un fotomultiplicador), que convierte la luz colectada en una señal eléctrica, la cual es muestreada y almacenada en un computador.





**Figura 3.2.** Esquema básico de funcionamiento de un LIDAR

La intensidad de la señal recibida está determinada por las propiedades de la atmósfera que produce la dispersión en diversas direcciones y también por la atenuación atmosférica de doble camino. La magnitud de la dispersión atmosférica depende sobre todo de la longitud de onda de la luz, de la energía del láser usado, y del número, tamaño, forma y propiedades refractivas de las partículas o moléculas alcanzadas por la radiación incidente.

Aunque la dispersión producida por un grupo de dispersores es un fenómeno complicado, se puede decir en términos generales que la dispersión aumenta con el incremento de la concentración de dispersores. De esta forma la señal eléctrica que se produce en el fotodetector, contiene información sobre la presencia, clasificación y concentración de las partículas atmosféricas dispersoras y absorbentes.

Conociendo la velocidad de la luz,  $c$ ; el tiempo de vuelo,  $t$ , de la señal luminosa desde la salida del láser hasta el volumen dispersor a una altitud dada,  $Z$ , y hacia el detector se convierte en “altura” y está dado por,  $t = 2Z / c$ .

La señal almacenada contiene la información sobre los objetos que dispersan y modifican la luz original del láser y su estudio permite determinar las propiedades de los dispersores. Este estudio se realiza a partir de la ecuación básica del Lidar. La cual puede escribirse en la siguiente forma:

$$W_r(R) = W_o \left( \frac{cT}{2} \right) \beta(R) A_r R^{-2} \exp \left[ -2 \int_0^R \alpha(r) dr \right] \quad (3.1)$$

Donde,  $W_r$  [W], es la potencia instantánea recibida en el tiempo  $t$ ;  $W_o$  [W], es la potencia transmitida en el tiempo  $t_0$ ;  $c$ , es la velocidad de la luz en el aire [ $3 \times 10^8$  km/s];  $T$ , es la duración del pulso;  $\beta$ , es el coeficiente de dispersión del volumen de la atmósfera [ $\text{km}^{-1}\text{sr}^{-1}$ ];  $R$ , es el radio de acción [km];  $A_r$ , es el área efectiva del receptor [m]; y  $\alpha$  es el coeficiente de extinción del volumen de la atmósfera [ $\text{km}^{-1}$ ], definido como la sección transversal por unidad de volumen, y es numéricamente idéntico al coeficiente de extinción lineal usado en las ecuaciones de transmisión de la luz láser, [7].

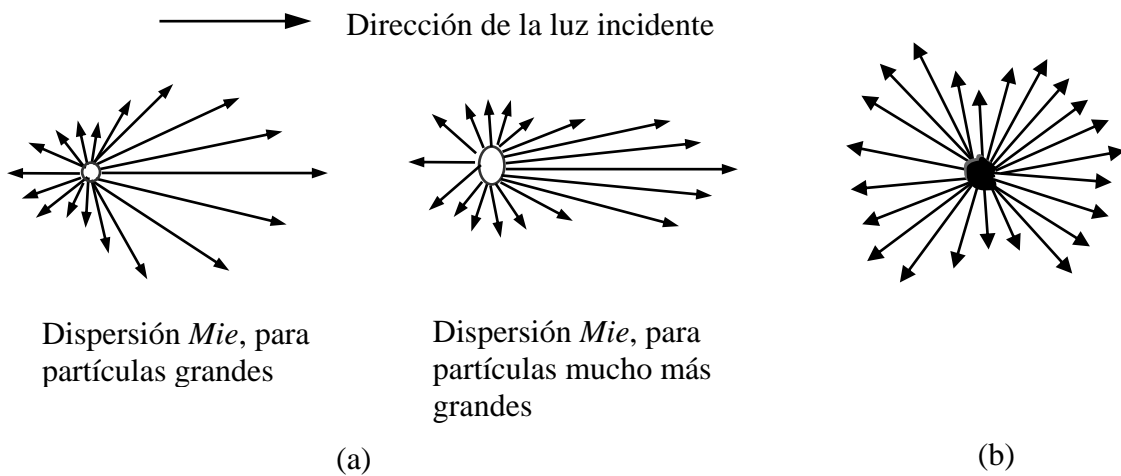
Desde la aparición de la técnica LIDAR hasta el presente, se han desarrollado numerosos instrumentos que basados en esta técnica permiten la recolección y el

análisis de la dispersión de la luz por las partículas presentes en la atmósfera. Los sistemas LIDAR han evolucionado para permitir el sensado remoto del movimiento de las nubes y de los cambios de concentración de diferentes contaminantes, así como para detectar, desde satélites en órbita, los cambios de composición de la atmósfera y aún los cambios en la vegetación. Los dispositivos LIDAR usan luz visible o cercana al visible, (en las proximidades del IR o del UV), para sondear un medio con partículas en suspensión. Existen varias clases de sistemas Lidar, y entre los más comunes se tiene: el *Lidar Doppler*, *Lidar Raman*, *Lidar de Absorción Diferencial (DIAL)* y el *Lidar Elástico*.

Este último es uno de los más simples, pues utilizan un sólo tipo de radiación láser y mide la señal luminosa dispersada por la atmósfera, en la misma longitud de onda de la radiación emitida inicialmente, es decir que se fundamenta en las interacciones elásticas entre fotones con moléculas, (Dispersión *Rayleigh*), y con partículas, (Dispersión *Mie*), que afectan la luz incidente y dispersan parte de ella. Además permite medir la concentración, el tamaño y la movilidad de las partículas suspendidas en el aire.

Para alturas menores de unos 30 km, las señales recibidas dan información sobre los aerosoles atmosféricos y el fenómeno físico involucrado es la dispersión *Mie*, la radiación láser dispersada elásticamente desde pequeñas partículas o aerosoles, (de tamaño comparable a la longitud de onda de la radiación), es observada sin cambio en la frecuencia, Figura 3.3a. Para alturas mayores a los 30 km la señal retrodispersada

se debe fundamentalmente al esparcimiento molecular ó dispersión *Rayleigh* (la radiación láser elásticamente dispersada desde átomos o moléculas es observada sin cambio en la frecuencia, Figura 3.3b, y la señal recibida suministra fundamentalmente la densidad atmosférica (ó concentración molecular).

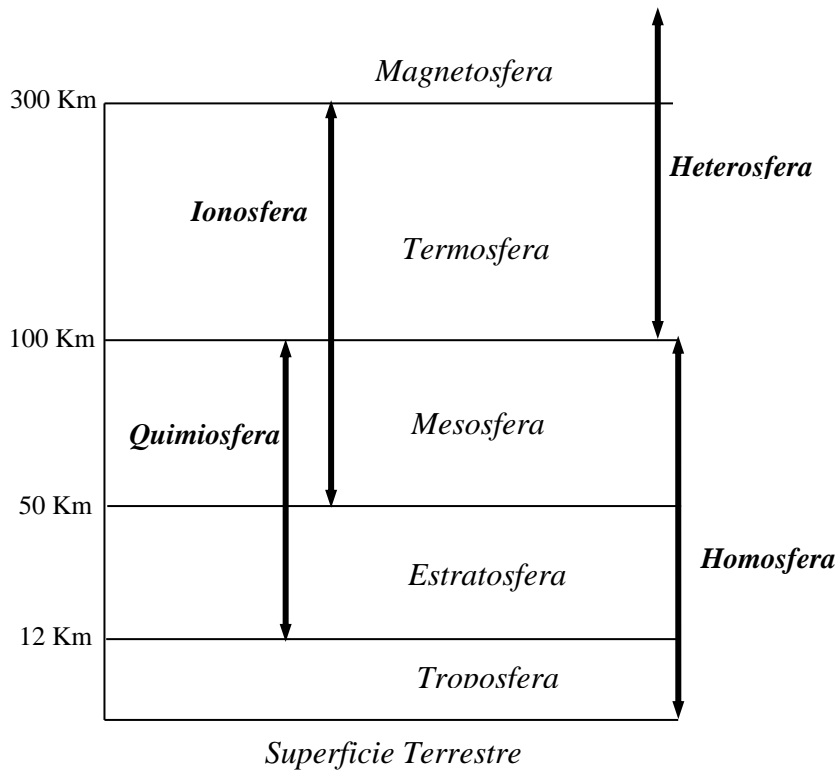


**Figura 3.3.** *Fenómeno de dispersión*  
(a) *Dispersión de Mie* (b) *Dispersión de Rayleigh*

Este tipo de interacción con moléculas y partículas en la atmósfera, tiene una sección transversal grande, (razón entre la cantidad de luz dispersada y la cantidad de luz incidente). El LIDAR elástico es generalmente el más pequeño y de exploración rápida. Son idealmente adaptables para rastrear el movimiento de estructuras en tiempo real o mapear la forma de una estructura sobre un gran volumen.

### 3.1 EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La atmósfera terrestre es una entidad muy compleja, pues su composición química y la meteorología dominante dependen de la altitud, en ella se distinguen varias regiones según la variación de la temperatura con la altitud, como se esquematiza en la Figura 3.4. En la zona más baja llamada *troposfera*, que se extiende desde la superficie hasta una altura de unos 10 km dependiendo de la latitud, la temperatura disminuye con la altitud al igual que en la zona denominada *mesosfera*. Por el contrario en la *estratosfera* y en la *termosfera*, la temperatura aumenta con la altitud. Finalmente, la zona ubicada por encima de los 300 km, la *exosfera*, se caracteriza por ser isotérmica.



**Figura 3.4.** Capas de la atmósfera terrestre hasta una altitud de 300 km

Además de estas regiones, se pueden definir otras que se distinguen fundamentalmente por los procesos y características químicas particulares, por ejemplo, se encuentra la zona denominada *ionosfera*, que se encuentra entre los 50 km y 300 km de altitud, ésta a su vez se subdivide en tres capas, de las cuales en la más alta se encuentran los iones monoatómicos positivos, como el oxígeno y el nitrógeno, y también los diatómicos ( $O_2^+$ ,  $NO^+$ ), mientras que en la capa inferior predominan iones de moléculas más complejas como por ejemplo,  $NO_3^-$  y  $H_3O^+$ . En la zona intermedia, a unos 110 km de altitud, se encuentran los cationes metálicos monovalentes, como  $Mg^+$ ,  $Fe^+$ ,  $Si^+$  y  $Ca^+$ . La zona más externa de la ionosfera se denomina *magnetosfera*, en ésta predominan los iones más livianos, como el hidrógeno y el Helio.

Debido a que la densidad y la presión atmosférica disminuyen exponencialmente con la altitud, resulta que es en las zonas inferiores donde se encuentra la mayor parte de la masa total de la atmósfera (el 99% por debajo de los 30 km). Esto trae como consecuencia que la composición química sea prácticamente la misma por debajo de los 90 km (*Homosfera*), y que esta zona se diferencie notablemente de la *heterosfera*, donde se producen cambios importantes en la composición química de la atmósfera (disociación del  $CO_2$  y del Oxígeno y Nitrógeno moleculares).

Además de las zonas mencionadas, se distingue otra región llamada *quimiosfera*, en la cual las reacciones químicas constituyen la actividad dominante, aunque los gases predominantes son el Oxígeno, Nitrógeno y Argón, se encuentran otras especies

químicas como: O, H, O<sub>2</sub> excitado, O<sub>3</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, vapor de agua, además de las especies cargadas de la parte inferior de la ionosfera. De esta región, hace parte la zona llamada *ozonósfera*, situada a unos 20 km de altitud, que es donde se genera el Ozono en mayor cantidad.

Por lo tanto, como la composición química de la región de la atmósfera que está por debajo de los 90 km no varía con la altitud, y específicamente la región que se extiende hasta los primeros 50 km de altitud, es ésta la región de mayor interés para estudiar el impacto de los contaminantes, para lo cual primero se debe conocer los elementos constituyentes de esta zona de la atmósfera. Los gases que están presentes en mayor proporción, son el Nitrógeno (78 %), el Oxígeno (21 %) y el Argón (0,9 %), respecto a la composición total de la atmósfera terrestre. El 0,1 % restante lo forma una gran variedad de compuestos gaseosos a muy baja concentración, pero que tienen un papel importante en las reacciones químicas de esta región, como son: CO<sub>2</sub>, Ne, He, CH<sub>4</sub>, Kr, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CO, Xe y O<sub>3</sub>.

Adicionalmente a estos compuestos existen otros que aparecen por actividades antropogénicas y pueden alcanzar concentraciones considerables como es el caso del dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos halogenados, compuestos aromáticos, entre otros. Otro gas que se encuentra en la troposfera es el vapor de agua, que aparece en cantidades muy variables tanto en el tiempo como en la altitud y latitud, [8].

Además de los compuestos gaseosos, en la atmósfera existen partículas sólidas y líquidas en suspensión, cuyo origen es muy diverso, por ejemplo se forman partículas sólidas a causa de la erosión del suelo, como de erupciones volcánicas, incendios forestales desintegración de meteoritos, etc., y que pueden afectar los procesos fisicoquímicos que ocurren en la atmósfera.

Para identificar los diferentes compuestos contaminantes de la atmósfera, es importante conocer que en la química atmosférica, una sustancia, ya sea gaseosa, líquida o sólida se considera contaminante, cuando, dependiendo de los niveles en que esté presente, puede causar directa o indirectamente, efectos nocivos tanto a los seres vivos como a los materiales. La concentración, tanto en exceso como en defecto, es un parámetro fundamental para identificar las sustancias contaminantes, que pueden ser de origen natural o antropogénico.

Casi todas las especies consideradas contaminantes, tienen un origen natural, excepto algunas sustancias organocloradas, compuestos aromáticos y olefinas, que tienen un origen típicamente antropogénico. Algunas de las principales fuentes de emisión de los contaminantes de origen natural son: los océanos, a través de las partículas líquidas que constituyen el aerosol marino que generan CO, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, S<sub>2</sub>C, SCO y CH<sub>3</sub>Cl; los incendios forestales, que originan CO, NO, NO<sub>2</sub> y CH<sub>3</sub>Cl, y las erupciones volcánicas, que introducen en la atmósfera NO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, SH<sub>2</sub>, SCO, HCl, HF y otras partículas de carácter inorgánico, éstas a diferencia de otras fuentes de polución, los logran introducir directamente en la estratósfera.



De otro lado, se conoce que cerca del 80 % de los contaminantes que se vierten en la atmósfera provienen de la combustión de carburantes fósiles. La polución de origen antropogénico generalmente se localiza en los centros urbanos o en las zonas industrializadas, aunque es de notar, que dependiendo de la estabilidad del contaminante y de las condiciones meteorológicas, la polución puede afectar regiones más o menos alejadas del foco emisor de los contaminantes. Entre las causas más probables de emisión de contaminantes de origen antropogénico, se encuentran la combustión de hidrocarburos, que originan CO, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub> y HCl; y las emisiones de los vehículos, que producen parafinas, olefinas e hidrocarburos aromáticos.

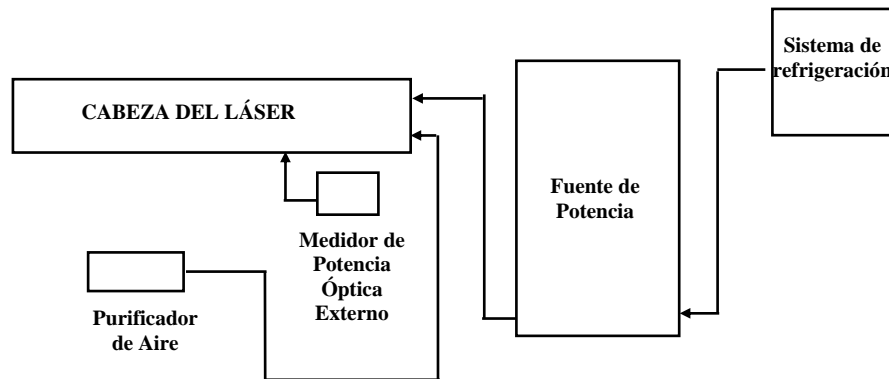
Además de los contaminantes generados en los procesos de combustión de carburantes fósiles, el hombre genera otros muchos en las actividades industriales y en cantidades considerables, que encuentran su destino final en la atmósfera, específicamente en la troposfera, debido a escapes accidentales o voluntarios, a su propia volatilidad, a emisiones causadas por residuos, etc. Otros compuestos persistentes en la atmósfera, y que son emitidos directamente por el hombre, son los clorofluorocarbonos (CFC), compuestos bastante utilizados en múltiples aplicaciones, como en propulsores de spray, extintores de espuma, y otros. Estos se caracterizan por su gran estabilidad y porque son capaces de ascender hasta la estratosfera, en la cual propician la disminución del ozono al interactuar con la radiación UV.

Finalmente, otros contaminantes que suelen estar presentes en cualquier tipo de atmósfera, son los compuestos metálicos, que también pueden tener origen natural o antropogénico. Para el primero, las principales fuentes son las erupciones volcánicas, las emisiones de origen biogénico, incendios forestales y el aerosol marino. El hombre es responsable de la deposición de metales en la atmósfera por medio de, principalmente, las industrias metalúrgicas, de los insecticidas y los funguicidas. Los metales generalmente encontrados en la atmósfera son: Cr, Se, Mg, Pb, Cd, Zn, Vd, As, Cu, Hg, Mb y Ni.

Según lo anterior, sistemas como los LIDAR tienen un amplio campo de aplicación en lo relacionado con el estudio y monitoreo de especies atmosféricas contaminantes. Por sus características de sensibilidad a partículas atmosféricas grandes (0,5 a 10  $\mu\text{m}$ ), y a contaminantes típicos (entre los cuales se encuentran principalmente el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y el amoníaco ( $\text{NH}_2$ ), responsables de los fenómenos de acidificación, y formación de ozono troposférico, denominado "ozono malo" presente en altitudes bajas, a diferencia del ozono estratosférico), los Lidar, se han vuelto los sistemas preferidos para tales propósitos.

## 4. RESTAURACIÓN DE LA FUENTE DE POTENCIA DEL LÁSER DE ARGÓN

La recuperación del láser de ión Argón ( $\text{Ar}^+$ ) se llevó a cabo en un proceso desarrollado en varias etapas, como fueron: revisión, restauración y optimización de cada uno de los dispositivos que conforman el sistema láser, (Figura 4.1).



**Figura 4.1.** Diagrama en bloques del láser de Argón

Una de las principales etapas en este proceso se refiere a la restauración de la fuente de potencia modelo 270-04 de *Spectra-Physics®*. Esta es una fuente regulada, que contiene un circuito de estabilización de amplio rango, que permite el funcionamiento del láser con una potencia de salida estable y un bajo ruido óptico; también contiene un interruptor para seleccionar el modo, manual o automático, de llenado de gas del tubo de plasma. La fuente de potencia modelo 270-04 de *Spectra-Physics®* requiere

de un servicio eléctrico trifásico de 480 V ( $\pm 8\%$ ) y 60 A, condiciones de operación que requieren considerar normas de seguridad adicionales a las conocidas en el trabajo con láseres de mediana potencia.

Para cumplir con las funciones descritas, la fuente tiene indicadores y dispositivos de control, que se pueden describir de acuerdo a sus características. Esta fuente tiene una llave interruptor (*Master Control*) que evita la operación no autorizada del láser, pero que al ubicarla en la posición *ON* habilita el botón de encendido, que activa todos los circuitos y empieza la secuencia para el pulso de inicio, puesto que el láser se inicia automáticamente después de 15 segundos; el botón de apagado, (*OFF*), opera desactivando los contactores principales, pero los indicadores de línea permanecen encendidos hasta que la potencia principal se desconecte.

La fuente de potencia posee un selector de medida (*METER switch*), que permite seleccionar una, de tres funciones de medida. *AMPS* en la escala de 0 – 60 y que es la corriente, en amperios, a través del tubo de plasma; *REG* en la escala de 0 – 300 y es el voltaje a través del regulador *passbank* (regulador de la corriente en el tubo de plasma, se compone de 24 cadenas paralelas de 6 transistores en serie), en el cual debe aparecer una lectura de al menos 22 V, para indicar que el *passbank* está funcionando correctamente; y *PRESS* que indica en la escala de 0 – 60 el voltaje a través del tubo de plasma, este voltaje es aproximadamente proporcional a la presión del gas en el tubo. El valor de la función seleccionada se despliega en el indicador análogo que tiene las dos escalas mencionadas, [9].

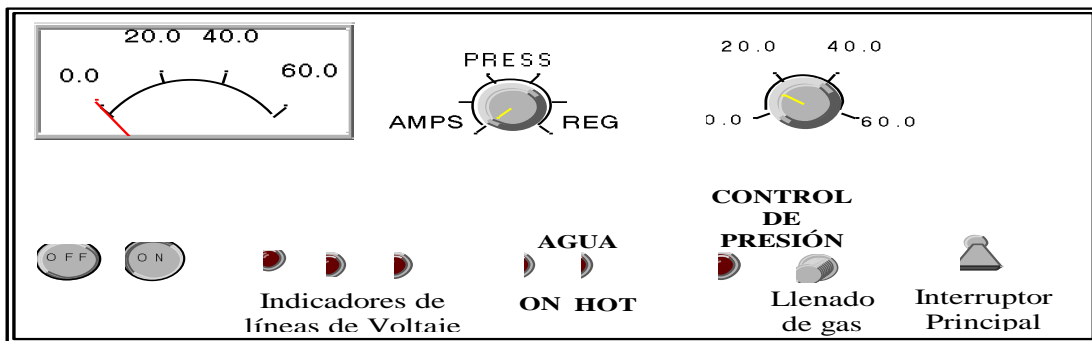
Igualmente, tiene una perilla de control de corriente, que fija la corriente en el tubo de plasma en cualquier valor superior a 17 A y hasta la corriente máxima, (60 A). La corriente de descarga es manejada por la tarjeta PC de control, construida con dispositivos microelectrónicos y que se encuentra ubicada en la parte interna de la fuente de potencia, y además el regulador *passbank*, antes mencionado, es el que regula esta corriente. Si el voltaje a través de este regulador es superior a 350 V, se activa el *spark gap*, que ocasiona un corto en paralelo con el regulador.

Un fusible F9, de 60 A, está en serie con el *passbank* y provee una protección continua en caso de sobrecarga del *passbank* y del tubo de plasma. Debido al paso de corriente a través de este regulador, la fuente de potencia está provista de un *interlock* de temperatura que se activa para prevenir la operación del láser, cuando la temperatura de esta bandeja de transistores es superior a 60 °C.

La fuente de potencia también contiene un led de control de Presión (*PRESS CONT*), que brilla cuando se necesita gas en el tubo de plasma, para lo cual la fuente cuenta con un botón, que al presionar da un ciclo de llenado del tubo de aproximadamente 1,0 V. El procedimiento de llenado y control del llenado de gas en el tubo de plasma, lo realiza la tarjeta de llenado, modelo 270-04, que es fabricada y calibrada para el Láser de ión Argón Modelo 2030. Esta tarjeta establece un valor umbral, (fijado por el fabricante), de llenado del tubo comparando la corriente a la cual el sistema está operando y el voltaje en el tubo de plasma. La potencia puede cambiar de 1% a 2% después de que el ciclo de llenado se ha completado. El sistema de llenado de gas

permite seleccionar el modo de operación con el interruptor ubicado en la tarjeta de llenado. En el modo automático, el sistema percibe cuando el voltaje en el tubo es inferior al valor umbral, para iniciar la secuencia de llenado. La fuente de potencia llenará el tubo hasta que alcance el voltaje óptimo. En el modo manual, se llena el tubo, sólo cuando brilla el led de *PRESS CONT.*

Así mismo, la fuente de potencia tiene un indicador para verificar que el flujo de agua suministrado es suficiente para la operación del láser, (*Water On*), y otro que indica si la temperatura del agua a la salida es superior a 79 °C, (*Water Hot*). La activación del primer indicador la realiza el *Flow Interlock*, que es un interruptor de flujo de agua que evita la operación cuando el flujo de agua es insuficiente. El segundo indicador lo activa el sensor de temperatura ubicado en la parte trasera e inferior de la fuente de potencia.



**Figura 4.2.** *Panel Frontal de la Fuente de Potencia del láser*

El suministro del voltaje de alimentación adecuado para la fuente de potencia se verifica si brillan los tres indicadores de línea ubicados en el panel frontal de la misma, y que indican la presencia de la potencia trifásica, uno por cada fase. Los tres indicadores deben permanecer activos, si las conexiones eléctricas son correctas. En

la Figura 4.2 se presenta un esquema del panel frontal de control de la fuente de potencia. En las Fotografías 4.1 y 4.2, se puede observar la fuente de potencia eléctrica y el láser de Argón, respectivamente.



**Fotografía 4.1.** Fuente de potencia eléctrica del láser de Argón



**Fotografía 4.2.** Láser de Argón

Al interior de la fuente de potencia se encuentran otros circuitos de control muy importantes en la descripción del funcionamiento del sistema, como son: transformador de control, rectificador, generador del pulso de inicio, estabilizador de luz, fuentes de potencia de bajo voltaje y el circuito para medir la potencia óptica.

El transformador de control T1 provee 115 V ac desde la entrada de 480 V ac, a la totalidad de los circuitos de control de potencia, entre los que se encuentran el contactor principal de potencia, las fuentes de potencia de bajo voltaje, el medidor de potencia, el circuito de inicio y también el ventilador.

El rectificador es un puente rectificador trifásico de onda completa que se compone de seis rectificadores, y del cual se deriva la potencia principal. Este puente produce un voltaje nominal de salida de 650 V y que es reducido por un filtro LC.

El generador del pulso de inicio consiste en un transformador de voltaje T4 en serie con un transformador de filamento. El pulso de inicio es generado por la descarga de un capacitor C12 a través del transformador primario T1. El capacitor C12 es cargado por un triplicador de voltaje.

Por otra parte, el estabilizador de luz tiene en cuenta que la luz láser a la salida pasa a través de un divisor de haz que refleja cerca del 2% de la salida del láser a una

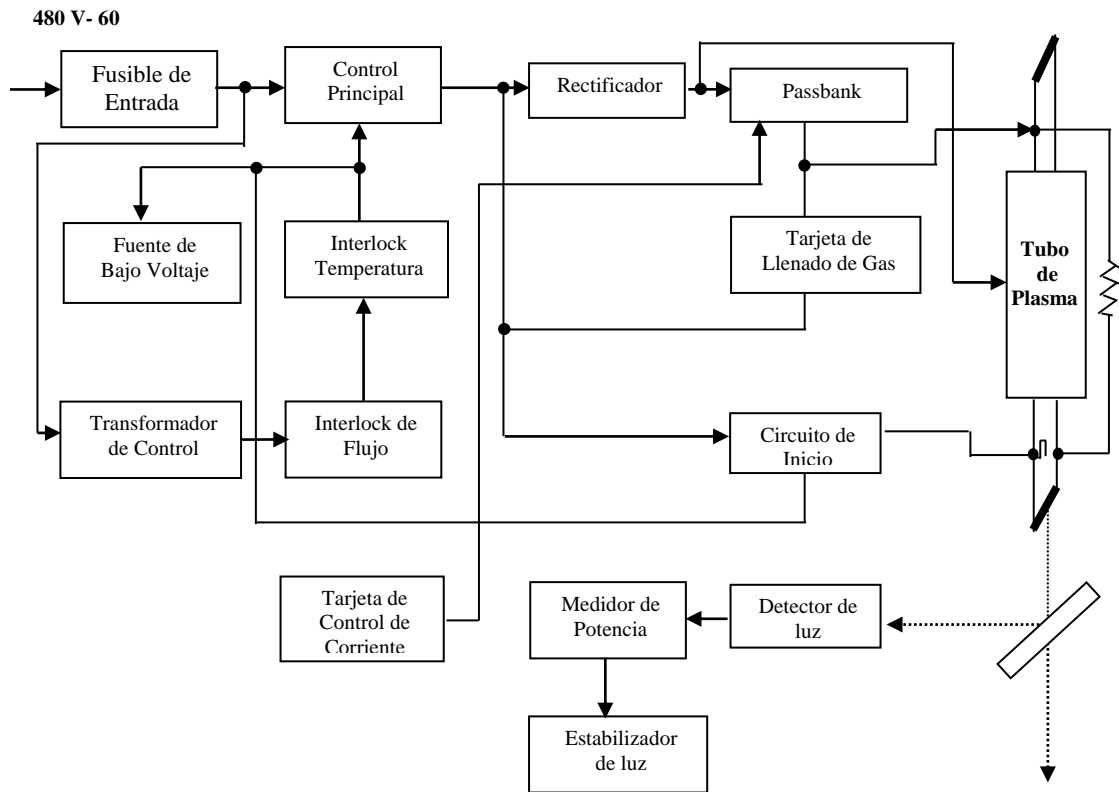


fotocelda, que consiste en un filtro de lentes compensadoras para las longitudes de onda visibles y de un dispersor que distribuye la potencia uniformemente sobre la fotocelda para prevenir la saturación de la celda y los efectos de calentamiento. La corriente de la fotocelda es amplificada por un amplificador operacional.

El voltaje de salida del amplificador del medidor de potencia se conecta a la tarjeta PC de control de luz . El voltaje del medidor de potencia es comparado con la señal del medidor de potencia de control de nivel de luz, y así la salida del láser será proporcional a ésta.

Las dos fuentes de potencia no reguladas que proveen la potencia para el control de los circuitos se derivan del transformador secundario T2, generan señales de +15 V y -15 V, con respecto al generador común. La señal de 5 V es generada por un regulador de voltaje que da la referencia para el regulador de corriente y los circuitos de llenado umbral.

La descripción esquemática de los dispositivos y circuitos electrónicos que constituyen la fuente de potencia se presenta en el diagrama en bloques de la Figura 4.3, al igual que la relación de ellos con el tubo de plasma.



**Figura 4.3.** Diagrama en bloques de los circuitos y dispositivos de la fuente de potencia

Al terminar la revisión de todos los dispositivos eléctricos, electrónicos e hidráulicos que conforman la fuente de potencia del láser de Ar, se encontró que sólo dos de los tres indicadores de línea estaban encendidos, lo que significa que el servicio eléctrico suministrado no era el adecuado. También se encontró que los indicadores de flujo de agua y de presión del gas en el tubo de descarga estaban inactivos, a pesar de tener la inyección de gas adecuada. Lo mismo ocurría con los botones de encendido, (*ON*), y apagado, (*OFF*), de la fuente de potencia, aunque se habilitara el sistema con la llave interruptor.

La restauración de la fuente de potencia se inició con la activación de las tres fases del voltaje de alimentación, para lo cual se trabajó en el transformador de alta potencia instalado para el funcionamiento del sistema láser.

Una vez habilitadas las tres fases del servicio eléctrico se procedió a la activación del indicador de flujo de agua, para esto se verificó el buen estado de los transductores de flujo de agua y de temperatura, también se corroboró que la entrada de este flujo tuviera el caudal y la presión necesarias que activaran los sensores, (13,3 l / min y 50 psi, respectivamente). Para satisfacer estos requerimientos se incluyó en el sistema de refrigeración, (Capítulo 5), una bomba de agua de alta presión de descarga y en la cual se acopló, a la salida, un dispositivo para medir la presión de salida, (manómetro), que permitió controlar esta variable en el flujo de agua de entrada a la fuente de potencia y así mantener el indicador activo. A pesar de cumplir con las especificaciones hidráulicas, referentes al flujo y presión del agua, y a las conexiones necesarias, la recuperación completa de este indicador se logró con la restauración del sistema eléctrico de control de la fuente de potencia.

Para la activación de los indicadores PRESS, ON y OFF, fue necesario una revisión más precisa de los dispositivos eléctricos y los circuitos electrónicos que controlan la distribución de la corriente y el funcionamiento del sistema. Se encontró que los circuitos de control de potencia, (contactores), estaban desactivados, debido a un corto circuito ocurrido en uno de los fusibles de 1 A, y que afectó al transformador primario T1 de control de potencia. El fusible fue reemplazado, y además

reconstruida su caja de soporte. Revisando el transformador primario de la fuente de potencia, se detectó una discontinuidad en una de sus bobinas, siendo necesaria su reconstrucción, la cual fue realizada en las instalaciones de equipos y mantenimiento de la Universidad del Cauca. Una vez restaurados estos dispositivos y las conexiones eléctricas de los circuitos dependientes de ellos, se consiguió la activación de todos los indicadores.

En cuanto a la descarga de corriente en el tubo de plasma, que depende del buen funcionamiento de la tarjeta PC de control, se reemplazó el amplificador operacional AR201 para restaurar el comando de corriente de la cabeza del láser; también se reemplazó el *spark gap*, que debe tener entre sus extremos resistencia “infinita” para que su funcionamiento sea el correcto y así proteger la bandeja de transistores de una posible sobrecarga.

Al terminar la restauración y/o adecuación de todos los dispositivos eléctricos y electrónicos que se encontraron desactivados, y la conexión de los dispositivos hidráulicos, se procedió a encender la fuente de potencia, para lo cual primero se habilitó el voltaje de alimentación, verificando que todos los indicadores se encontraran activos, posteriormente se habilitó el sistema con la llave interruptor y se fijó el valor de la corriente, al encender el láser transcurrieron los 15 segundos, especificados por el fabricante, antes de suceder la operación láser, esta fue la prueba definitiva en la restauración de la fuente de potencia y activación del sistema láser.

## **5 . INSTALACIÓN Y MONTAJE DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DEL LÁSER**

El láser de Argón dispone de un dispositivo de purificación de aire, (Tipo Spectra-Physics® Modelo 2200), que es un sistema en ciclo cerrado que suministra un flujo constante de aire seco a los espejos de la cavidad resonante del láser.

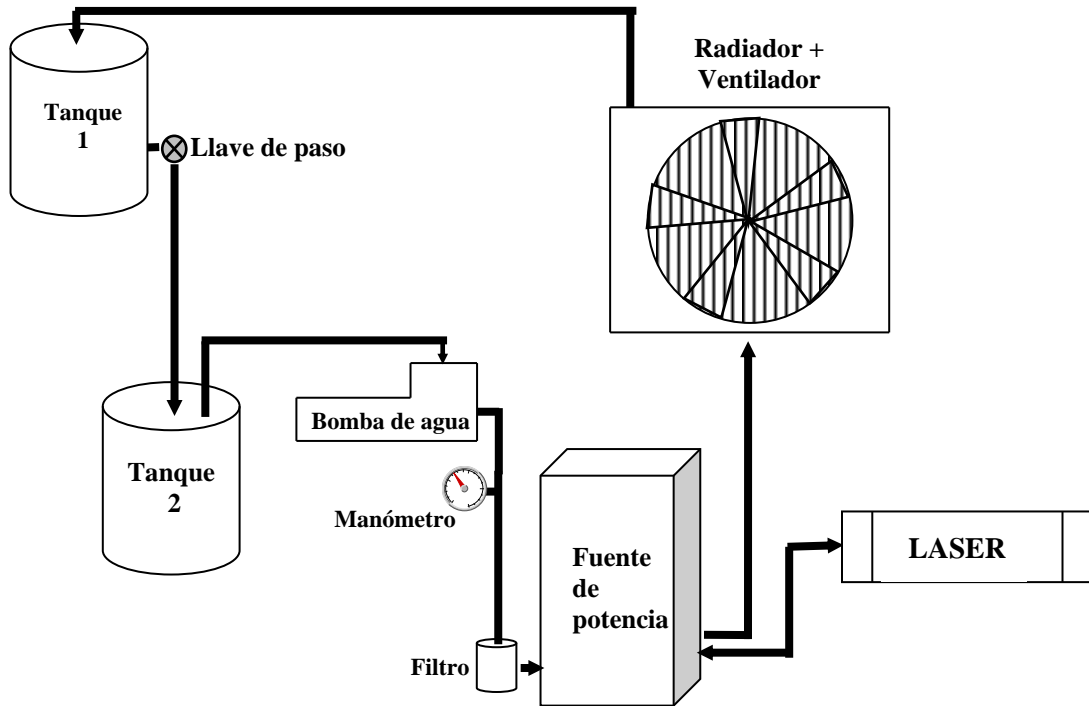
El filtro dentro del dispositivo purificador se compone de carbón, de silica y un tamiz molecular. Este dispositivo produce un flujo de aire capaz de remover las partículas de polvo y la humedad, previniendo así las pérdidas en la potencia de salida causadas por la contaminación de las superficies ópticas. La unidad opera a 115 V ac ó a 230 V ac, y el flujo de aire constante que provee se encuentra entre los 0,09 y 0,23 l/min. Tiene un tiempo de vida finito, típicamente 1500 horas de operación continua.

El sistema de flujo de aire es, por lo tanto, un dispositivo muy importante tanto para el adecuado funcionamiento como para la conservación del láser de argón, además, es fundamental en la prevención de daños de la óptica ubicada dentro de la cavidad resonante. Para que el purificador cumpliera su función, fue necesario realizar las instalaciones de los conductos de aire hasta la cabeza del láser y se reemplazó la

sustancia desecante, (silica), del filtro dentro del dispositivo, ya que ésta había perdido sus propiedades.

Por otro lado, el sistema de refrigeración del láser debe cumplir ciertas condiciones establecidas por el fabricante para el correcto funcionamiento del láser, como son: proveer un flujo de agua constante de 13,3 l/min, mantener la presión del agua dentro del intervalo comprendido entre 50 psi y 75 psi, regular la temperatura del agua, de tal manera que ésta se mantenga por debajo de los 79 °C y asegurar un suministro de agua químicamente tratada para evitar daños en las paredes exteriores del tubo de plasma.

El sistema de refrigeración que se ha diseñado y construido, es de flujo cerrado, por lo tanto evita el consumo permanente de agua y además cumple con los requerimientos antes señalados. Los principales componentes del sistema diseñado se presentan en el diagrama de bloques de la Figura 5.1. Se han utilizado dos tanques plásticos de almacenamiento con una capacidad de cien litros cada uno, una bomba de inmersión de succión centrífuga con una potencia de tres caballos de fuerza, y un máximo de 100 psi en la presión de descarga, un radiador de camión doble troque FR9000, un ventilador eléctrico de cinco aspas, de uso doméstico, y un filtro de agua, suministrado por el fabricante de Spectra Physics®. Las mangueras utilizadas para las conexiones son mangueras plásticas de uso común.



**Figura 5.1 .** Diagrama en bloques del sistema de refrigeración del láser

La motobomba saca el agua desde el tanque No. 2, y la hace pasar por el filtro antes de que entre a la fuente de potencia, desde la cual se distribuye, parte para enfriar el tablero de transistores dentro de la fuente de potencia y otra parte, fluye directamente a la cabeza del láser, para refrigerar el tubo de descarga, luego, regresa nuevamente al interior de la fuente de potencia para unirse al primer caudal y formar una sola salida. Este flujo de salida pasa través del radiador, donde es enfriada por el ventilador; y almacenada en el tanque No. 1, el cual dispone de una llave de paso para regular el flujo que llega al tanque No. 2, desde éste nuevamente es bombeada hacia la fuente de potencia, a una presión constante de 48 psi, que es el valor indicado por el manómetro análogo ubicado a la salida de la bomba de succión de agua. En las Fotografías 5.1a y 5.1b, se presenta en detalle, el sistema de refrigeración construido.



(a)



(b)

**Fotografía 5..1** *Sistema de refrigeración del láser*

Para el diseño de este sistema de refrigeración, se realizaron los cálculos correspondientes para mantener el flujo de agua constante en el ciclo cerrado, considerando factores como: evaporación del agua por calentamiento a la salida de la

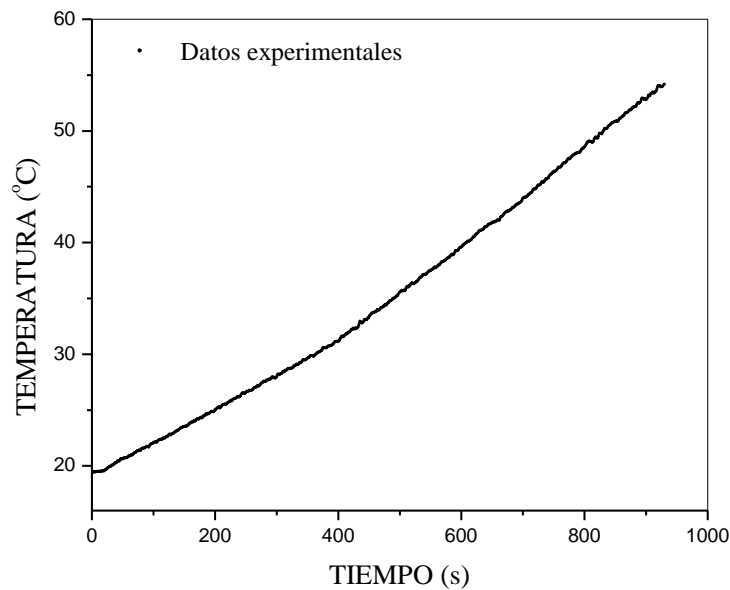


cabeza del láser, pérdida de presión en los tanques de almacenamiento y en el filtro de agua. Esto con el propósito de mantener un flujo constante y adecuado para garantizar una temperatura inferior al límite indicado.

El sistema de refrigeración diseñado, cuenta además con un control de nivel de agua en el tanque de almacenamiento No. 1, que apaga inmediatamente la motobomba sino existe un masa de agua suficiente para succionar, y con un indicador visual que permite al operador detectar fácilmente cualquier descenso del nivel de agua. De acuerdo a la especificaciones del fabricante, la temperatura del agua a la salida de la fuente de potencia, se debe mantener por debajo de los 79 °C. En el caso de sobrepasar este limite, un termómetro electrónico, ubicado al interior de la fuente, acciona el interruptor automático que deshabilita la operación normal del láser.

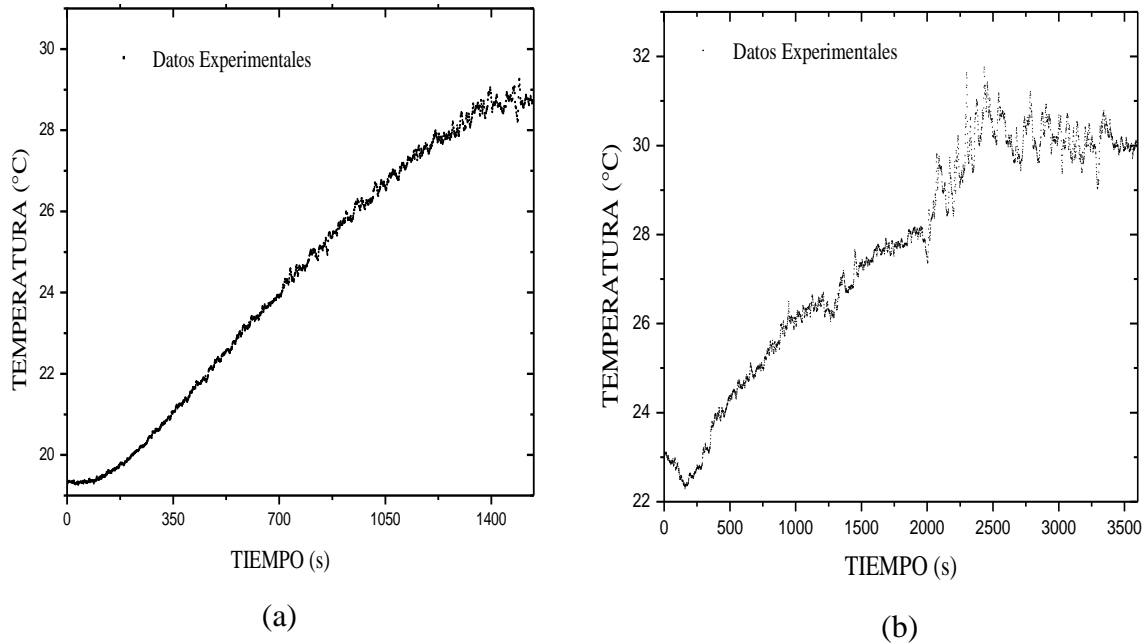
El procedimiento de control de la temperatura se realizó midiendo en forma permanente la temperatura del tanque de almacenamiento No. 2, utilizando una termocupla PT100 de NiCr-Ni, y el equipo COBRA 3 / PHYWE, el cual permite graficar los datos de temperatura adquiridos en función del tiempo. El rango de temperaturas que permite medir el módulo COBRA 3, está entre – 60 °C y 350 °C, con una resolución en la medida de 0,01 °C. Las condiciones bajo las cuales se realizaron las mediciones de temperatura y que se mantuvieron durante todo el tiempo de medición fueron las siguientes: presión del flujo de agua constante (48 psi), y una potencia óptica del rayo láser a la salida de 1W.

En la Figura 5.2, se presentan los datos de temperatura en función del tiempo, adquiridos utilizando simplemente un tanque de 100 litros de agua y produciendo un flujo en ciclo cerrado sin ningún dispositivo adicional. Esta prueba se realizó con el objetivo de tener un parámetro real de temperatura, alcanzada en un tiempo relativamente corto de funcionamiento del láser. El gráfico indica la evolución de la temperatura desde 19 °C hasta 54,09 °C en sólo 15,5 minutos.



**Figura 5.2.** *Temperatura del agua a la salida del láser, sin sistema de refrigeración, tiempo de trabajo del láser: 15,5 minutos*

A partir de estos datos experimentales se consideró la necesidad de disponer del doble de masa de agua, 200 litros, y de acoplar un sistema de enfriamiento. El monitoreo de la temperatura bajo estas condiciones, se presenta en la Figura 5.3, donde se tiene la evolución de los valores de temperatura para tiempos de trabajo del láser de 30 y 60 minutos respectivamente.



**Figura 5.3.** Temperatura del agua a la salida del láser, con el sistema de refrigeración; tiempo de trabajo del láser: (a) 30 minutos, (b) 60 minutos

En el gráfico obtenido para un tiempo de 60 min, se ve una tendencia a la estabilización en un valor de 31 °C. Se presenta una fluctuación en los puntos experimentales, debido a que el radiador, además del ventilador, también está expuesto al flujo de aire del medio ambiente, y cualquier cambio en éste, produce dichas variaciones.

Pruebas posteriores, con tiempos de trabajo del láser de hasta 4 horas, permitieron comprobar la eficiencia del sistema de refrigeración, donde la temperatura, en promedio, se estabilizó en un valor de 32 °C.

## 6. MEDIDA DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL HAZ LÁSER

### 6.1 MEDIDA DE LA POTENCIA ÓPTICA

La potencia óptica de salida del láser de Argón, depende del cuadrado de la densidad de corriente, ( $J$ ), aplicada al tubo de descarga, como se indicó en la Ecuación 1.1, ( $P = kJ^2V$ ), además, esta densidad de corriente y la intensidad de corriente, ( $I$ ), se relacionan por medio de la expresión:

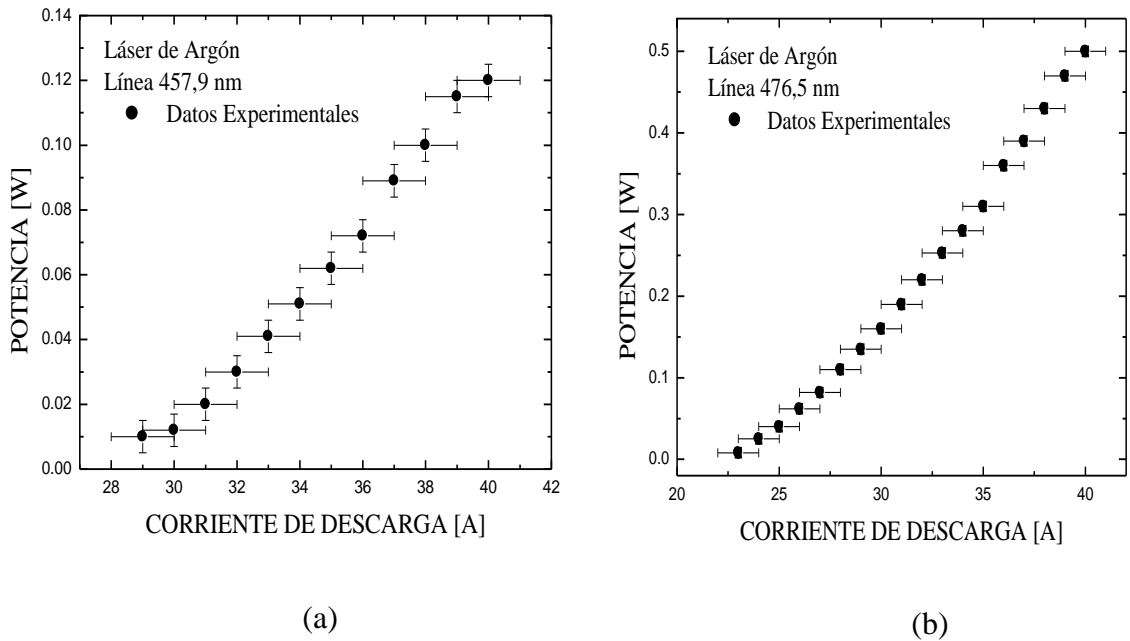
$$I = \iint_s \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (6.1)$$

Donde  $I$  es la corriente [A],  $J$ , la densidad de corriente [A / cm<sup>2</sup>] y  $s$ , la superficie de integración [cm<sup>2</sup>].

Las medidas experimentales corresponden a la medida de la corriente  $I$ , en función de la potencia óptica, las cuales fueron realizadas para cada una de las líneas de emisión del láser. Se utilizó el medidor de potencia del sistema láser, que tiene una resolución de medida en las escalas utilizadas de 5 mW y 20 mW, correspondientes a 0,3 W y 1 W, respectivamente. Para establecer los diferentes valores de la corriente de

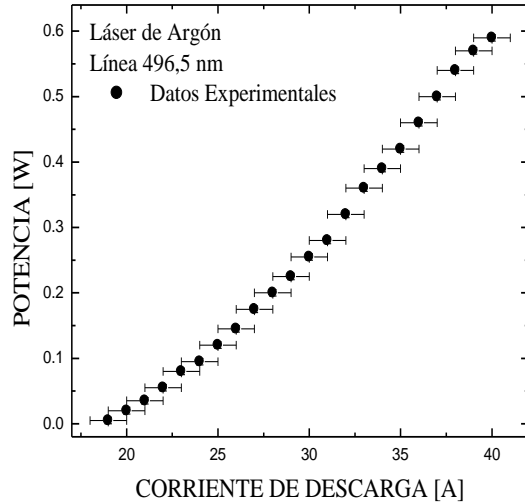
descarga en el tubo de plasma, primero se seleccionó la función de medida de corriente, (AMPS), en el selector *METER switch* de la fuente de potencia del láser, y con la perilla de control de corriente se fue cambiando los valores de la misma, a partir del valor mínimo de corriente para el cual existe emisión, hasta 40 A, con incrementos de 1 A para cada medida.

Los resultados obtenidos en estas mediciones se presentan en las Figuras 6.1a y Figuras 6.1b. Las gráficas muestran un comportamiento creciente similar, según la curva continua de tendencia parabólica.

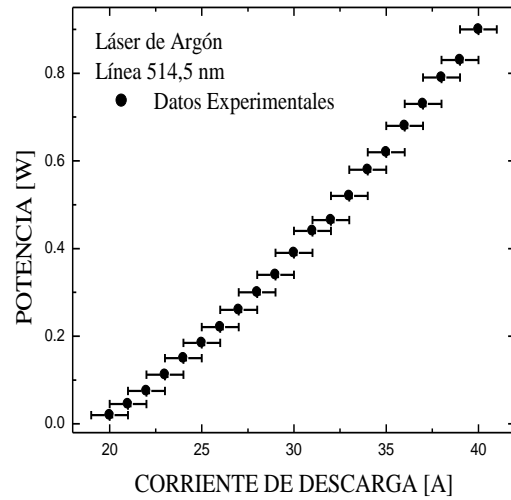


**Figura 6.1a.** Curvas de potencia en función de la corriente de descarga.

(a)  $\lambda = 457,9 \text{ nm}$  (b)  $476,5 \text{ nm}$



(a)



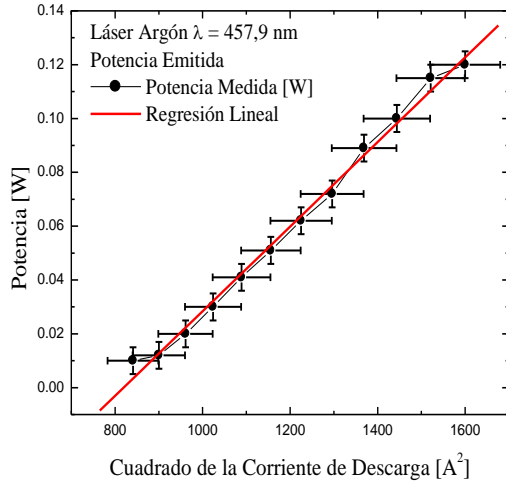
(b)

**Figura 6.1b.** Curvas de potencia en función de la corriente de descarga.

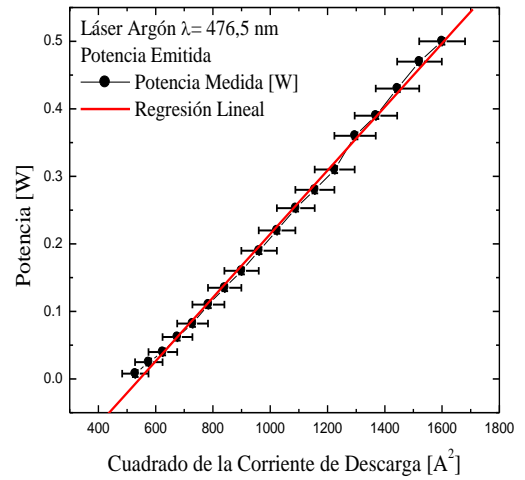
(a)  $\lambda = 496,5 \text{ nm}$  (b)  $\lambda = 514,5 \text{ nm}$

Además se pueden observar, los valores de corriente umbral, para cada caso: 29 A para el violeta, 22 A para el azul, 18,1 A para el azul verdoso y 19 A para el verde, por lo tanto, estos son los valores de corriente mínima para el inicio del proceso de laseo.

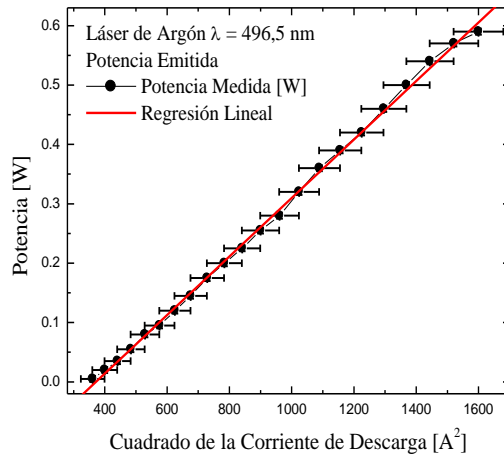
La relación directa entre la potencia óptica y la corriente de descarga en el tubo de plasma, se obtienen de la linealización de las gráficas de la Figura 6.1, como se observa en la Figura 6.1c.



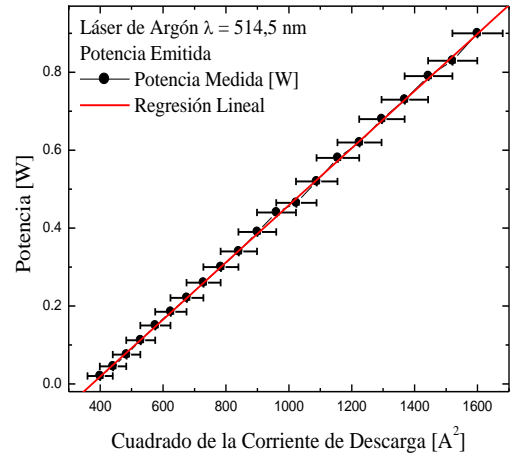
(a)



(b)



(c)

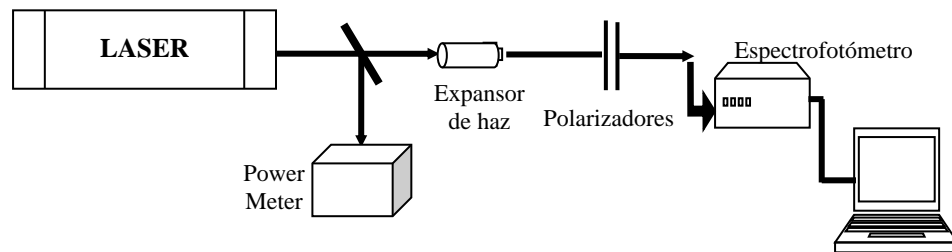


(d)

**Figura 6.1c.** Curvas de la potencia óptica de salida en función del cuadrado de la corriente de descarga a)  $\lambda = 457,9$  nm b)  $\lambda = 476,5$  nm c)  $\lambda = 496,5$  nm d)  $\lambda = 514,5$  nm

## 6.2 MEDIDA ESPECTRAL DEL HAZ DE SALIDA

El espectro de la radiación láser se obtuvo en el modo multilínea del láser. En la Figura 6.2, se indica el montaje experimental utilizado.



**Figura 6.2.** Montaje experimental para la medida espectral y la longitud de onda del haz láser

En este montaje, se utilizó el siguiente equipo:

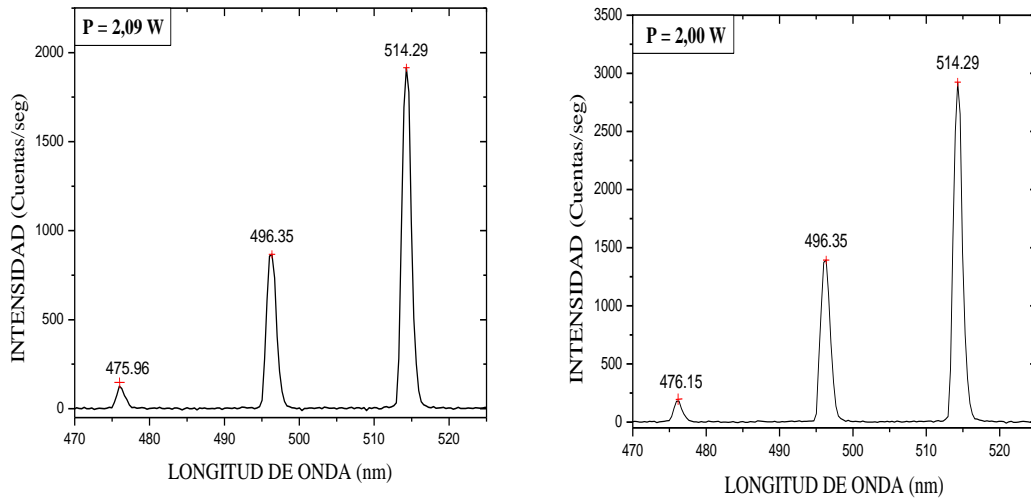
- Un divisor de haz, para iluminar el medidor de potencia y espectrofotómetro a la vez.
- Un medidor de potencia, MOLECTRON PM5200®, con un rango de operación de longitudes de onda, comprendido entre 20  $\mu\text{m}$  y 375 nm del espectro electromagnético, y con una resolución de 0,05 W.
- Un objetivo de microscopio con un aumento de 10X, para expandir el haz.



- Dos polarizadores, para disminuir la intensidad luminosa del rayo láser antes de su incidencia en el sensor.
- Una microlente, acoplada en el extremo de la fibra óptica que hace parte del sensor óptico.
- Un espectrofotómetro de red de difracción OCEANOPTICS® S2000, que tiene una resolución entre 3 y 10 nm, y completamente automatizado.

Los resultados, se obtuvieron con una potencia de operación del láser de 2,0 W y 2,09 W respectivamente, y se presentan en la Figura 6.3. En estos espectros, tomados en el modo multilínea, sólo se observan tres de las cuatro longitudes de onda del láser de ión argón, esto se debe a que el modo de oscilación correspondiente a la longitud de onda del violeta ( $\lambda = 457,9 \text{ nm}$ ), tiene una intensidad muy baja al salir de la cavidad resonante, en comparación con las de mayor longitud de onda, por lo que el fotosensor no la detecta.

Además, como se mencionó en el capítulo 2, las longitudes de onda dominantes en el láser de Argón, la verde y la azul, tienen el 67 % de la potencia total del láser, lo que hace que sus líneas en el espectro sean las más sobresalientes.

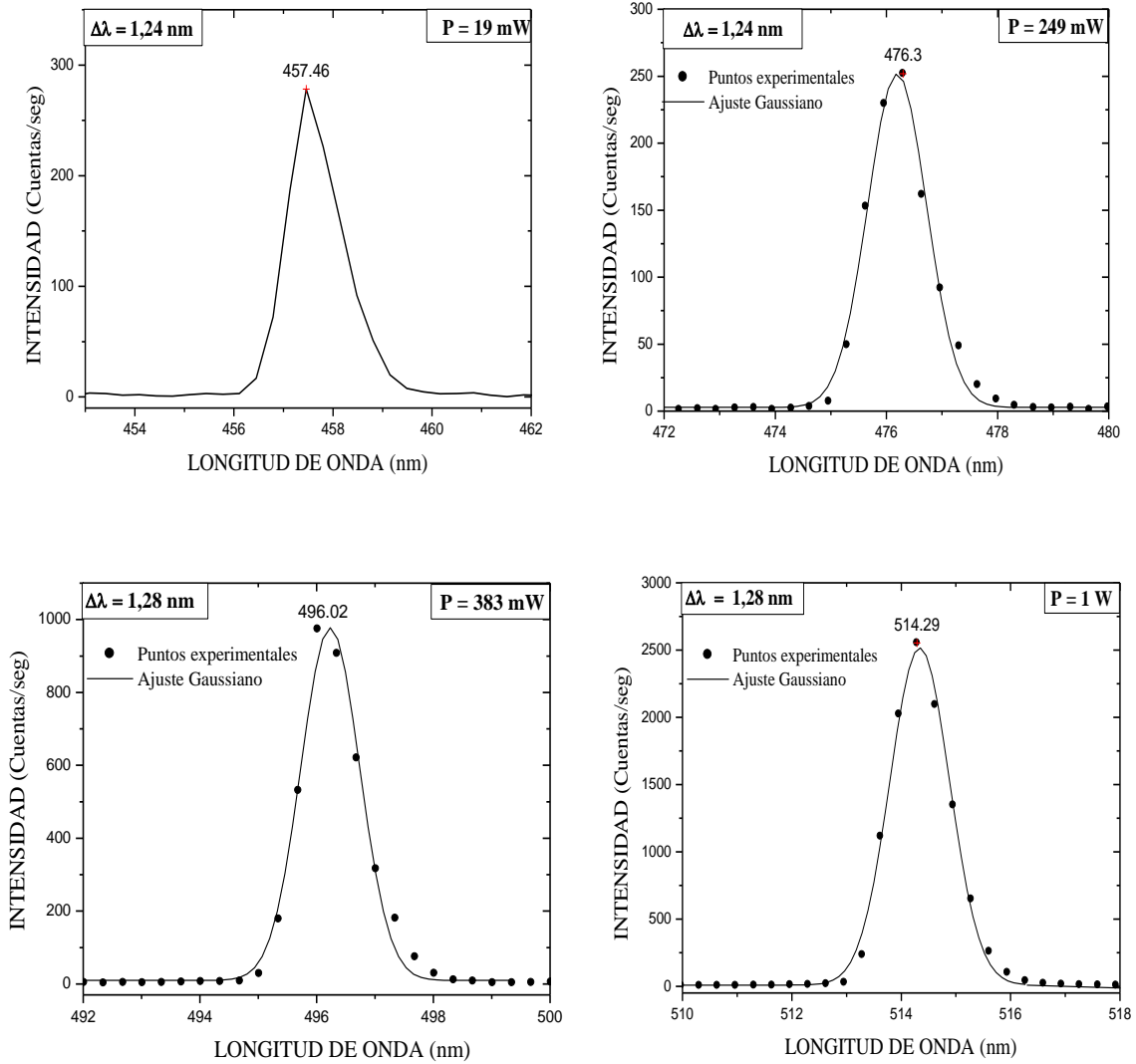


**Figura 6.3.** Espectros de la radiación láser para dos valores diferentes de potencia óptica  $P = 2,09 W$  y  $P = 2,00 W$

### 6.3 MEDIDA DE LA LONGITUD DE ONDA

Las medidas individuales de las líneas espectrales de la luz láser se realizaron en el modo de línea simple, a diferentes valores de potencia óptica, utilizando el espectrofotómetro de red de difracción OCEANOPTICS® S2000. Para este caso se utilizó el mismo montaje mostrado en la Figura 6.2. La luz es recolectada por una microlente acoplada a la fibra óptica y llevada al espectrofotómetro el cual está conectado al computador a través de una interfase permitiendo registrar y procesar los datos de intensidad luminosa en función de la longitud de onda.

Los resultados obtenidos en esta medición se presentan en la Figura 6.4, donde se indica el ancho de banda de cada una de las líneas espectrales, la potencia óptica a la cual fueron medidas y el respectivo ajuste a la curva gaussiana teórica.

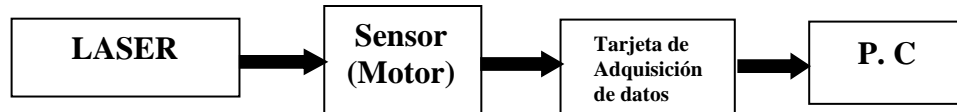


**Figura 6.4.** Espectros de las longitudes de onda láser, para las líneas de  $\lambda = 457,9 \text{ nm}$ ,  $\lambda = 476,5 \text{ nm}$ ,  $\lambda = 496,5 \text{ nm}$ ,  $\lambda = 514,5 \text{ nm}$

Las curvas de las líneas espectrales del láser de Argón, indican un estrecho ancho de banda, aproximadamente de 1,26 nm. Los valores obtenidos de las longitudes de onda del láser, a partir del valor máximo de la curva gaussiana experimental, se han confrontado con los valores nominales que reporta el fabricante, para garantizar la confiabilidad de los resultados.

#### 6.4 MEDIDA DE LA CINTURA DEL HAZ

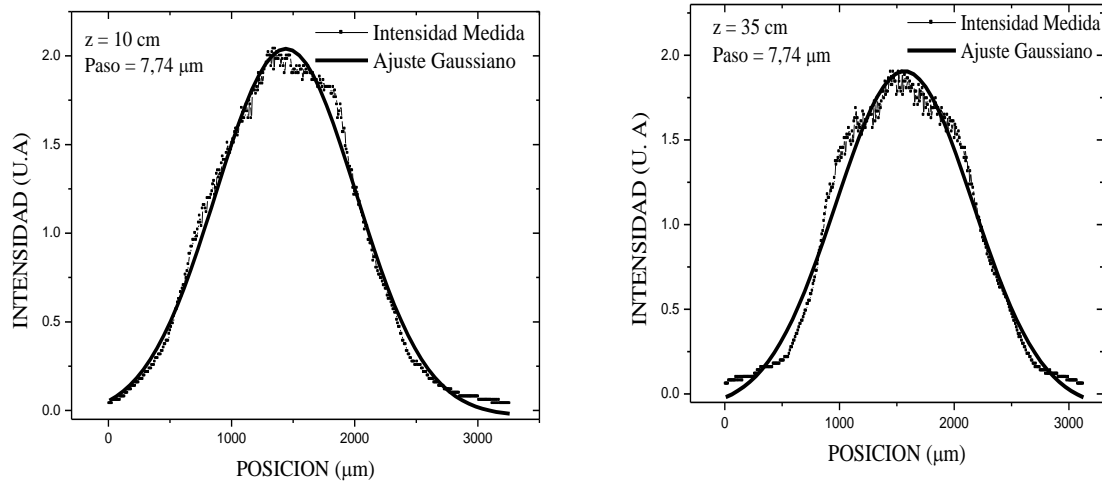
Las medidas para el perfil del haz láser se realizaron en el modo de operación monolínea, utilizando como sensor una fotorresistencia, que cruza la sección transversal de la región iluminada por el haz láser, accionada por medio de un motor de paso, que tiene dos escalas de avance con resoluciones de  $7,74 \mu\text{m} \pm 0,005\mu\text{m}$  y  $15,48 \mu\text{m} \pm 0,005\mu\text{m}$  por paso. Luego la señal del fotosensor es llevada a un computador por medio de una tarjeta de adquisición de datos conectada al puerto paralelo, para ser almacenada y procesada. Todas estas etapas de adquisición y manejo de los datos, se desarrollan en un solo sistema de medida, [10], que se esquematiza en el diagrama de bloques de la Figura 6.5.

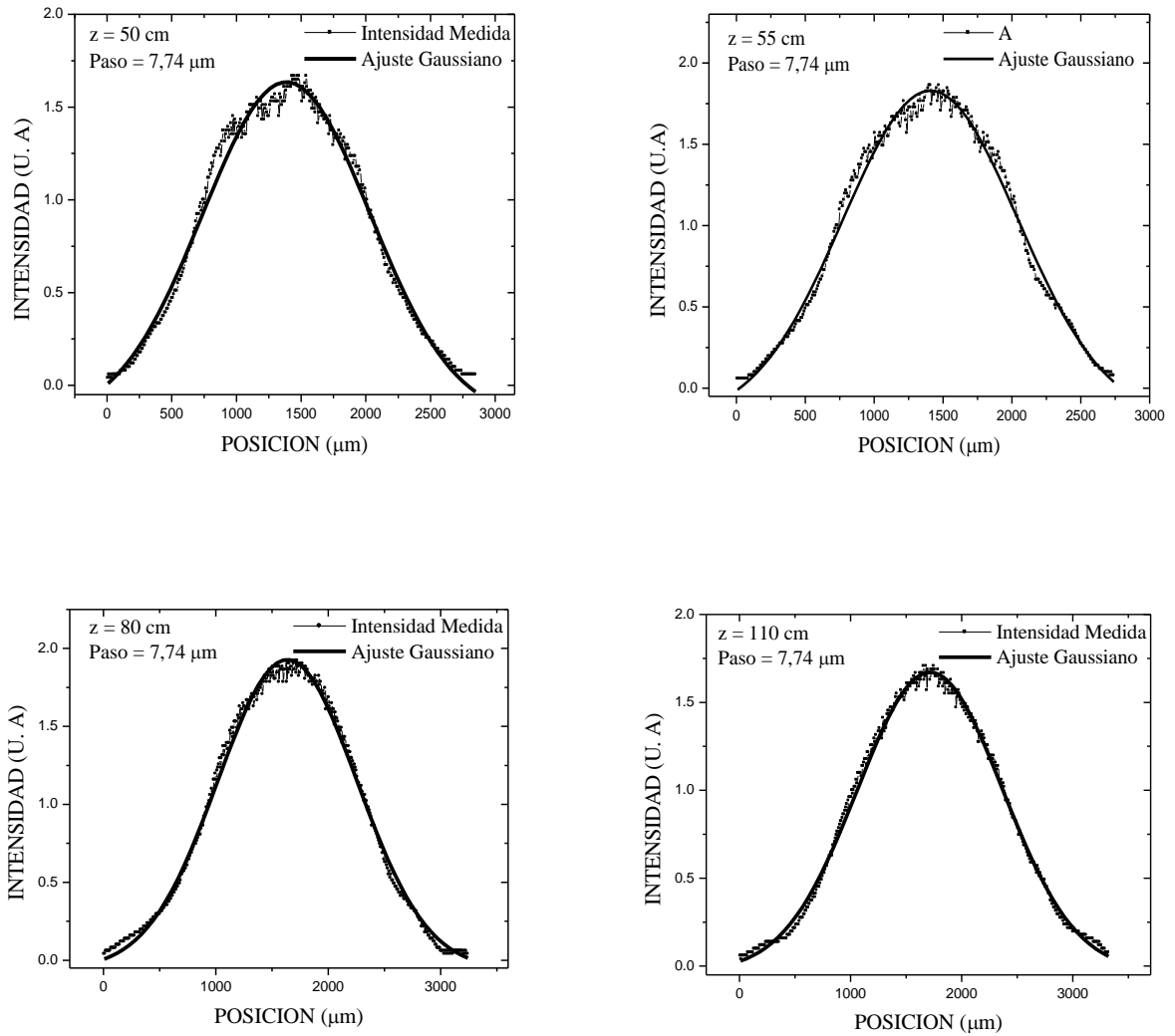


**Figura 6.5.** Diagrama en bloque del sistema de medida para la cintura del haz.

También se utilizó en el montaje descrito, un filtro de color verde ( $\lambda = 514 \text{ nm}$ ), para evitar el ruido óptico proveniente de la radiación del plasma, que aparece como un halo de color violeta, y que puede interferir en los resultados finales.

El registro de los datos se realizó a diferentes distancias ( $z_i$ ), entre la salida del láser y el sensor y para dos valores diferentes de potencia óptica (4 mW y 10 mW). Para los datos obtenidos a una potencia de 4 mW, el primer registro se hizo a una distancia,  $z$ , de 10 cm y el último a 110 cm respecto al espejo de salida del láser, al mismo tiempo, el computador realizaba la gráfica de la medida de la intensidad relativa en función de la distancia radial, dada en pasos del motor, tal como se indica en la Figura 6.6.





**Figura 6.6.** Perfiles del haz láser a diferentes distancias,  $P = 4 \text{ mW}$

Para las mediciones realizadas a una potencia de  $10 \text{ mW}$ , el primer registro de datos se hizo a  $90 \text{ cm}$  y el último a  $190 \text{ cm}$ , los perfiles obtenidos se presentan en la Figura 6.7.

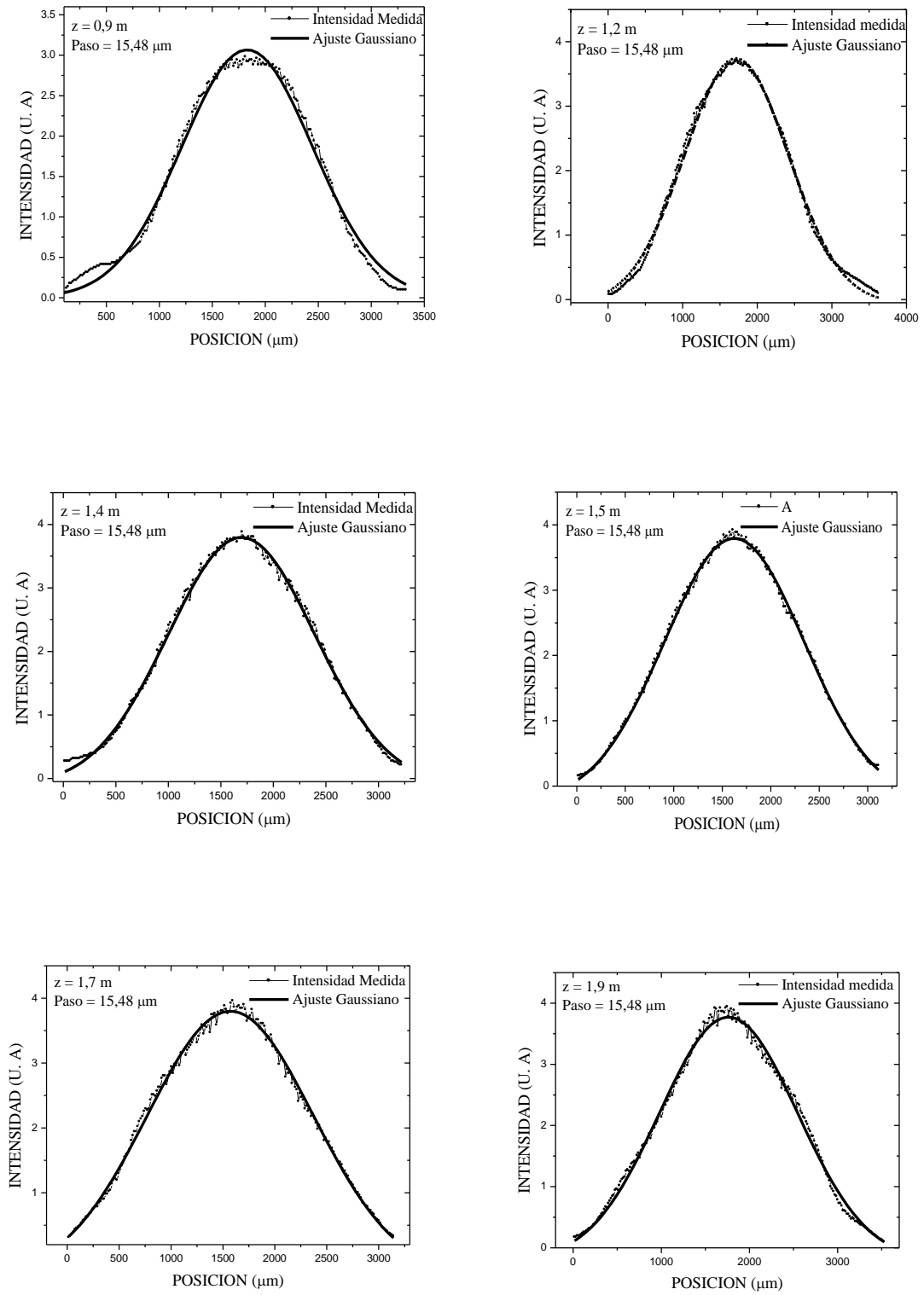


Figura 6.7. Perfiles del haz láser a diferentes distancias,  $P = 10 \text{ mW}$

Los resultados obtenidos del tamaño de la mancha,  $W(z)$ , para cada una de las distancias,  $z$ , se presentan en las Tablas 6.1 y 6.2.

**Tabla 6.1.** Datos obtenidos de la cintura del haz  $W$ , en función de la distancia  $z$ , para  $P = 4 \text{ mW}$

$W(z)$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta W(z)$ [ $\mu\text{m}$ ]	$z$ [m]	$\Delta z$ [m]	$W^2(z)$ [ $\mu\text{m}^2$ ]	$\Delta W^2(z)$ [ $\mu\text{m}^2$ ]	$z^2$ [m]	$\Delta z^2$ [ $\text{m}^2$ ]
1117,78	3,74	0,10	0,005	1,25	0,0083	0,01	0,0010
1136,85	7,26	0,35	0,005	1,29	0,0165	0,12	0,0035
1162,04	5,20	0,50	0,005	1,35	0,0120	0,25	0,0050
1148,42	5,40	0,55	0,005	1,32	0,0124	0,30	0,0055
1198,78	3,72	0,80	0,005	1,44	0,0089	0,64	0,0080
1282,69	3,22	1,10	0,005	1,65	0,0082	1,21	0,0110

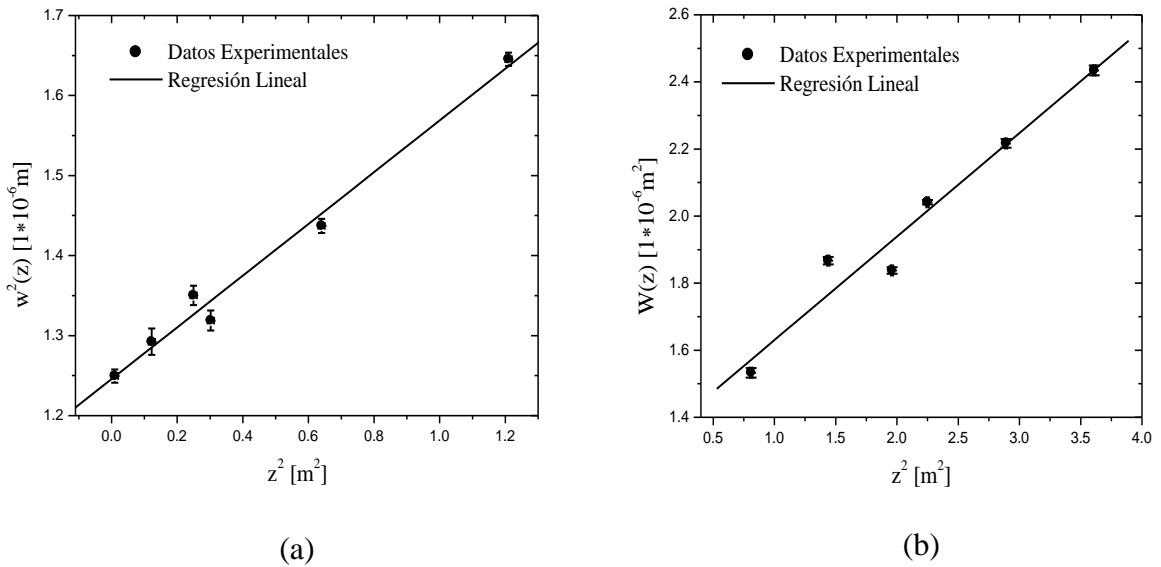
**Tabla 6.2.** Datos obtenidos de la cintura del haz  $W$ , en función de la distancia  $z$ , para  $P = 10 \text{ mW}$

$W(z)$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\Delta W(z)$ [ $\mu\text{m}$ ]	$z$ [m]	$\Delta z$ [m]	$W^2(z)$ [ $\mu\text{m}^2$ ]	$\Delta W^2(z)$ [ $\mu\text{m}^2$ ]	$z^2$ [m]	$\Delta z^2$ [ $\text{m}^2$ ]
1238,00	5,76	0,90	0,005	1,53	0,0143	0,81	0,0090
1366,39	4,08	1,20	0,005	1,87	0,0111	1,44	0,0120
1355,59	3,60	1,40	0,005	1,84	0,0098	1,96	0,0140
1428,69	2,34	1,50	0,005	2,04	0,0067	2,25	0,0150
1488,90	4,32	1,70	0,005	2,22	0,0129	2,89	0,0170
1560,29	4,70	1,90	0,005	2,43	0,0147	3,61	0,0190

A partir de la relación indicada en la Ecuación 2.20, [ $W^2(z) = W_0^2 + W_0^2 (z / Z_R)^2$ ], y de los datos presentados en las Tablas 6.1 y 6.2, se realizaron las gráficas de  $W^2(z)$  en función de  $z^2$ , que se muestran en la Figura 6.8. Los valores para la cintura mínima

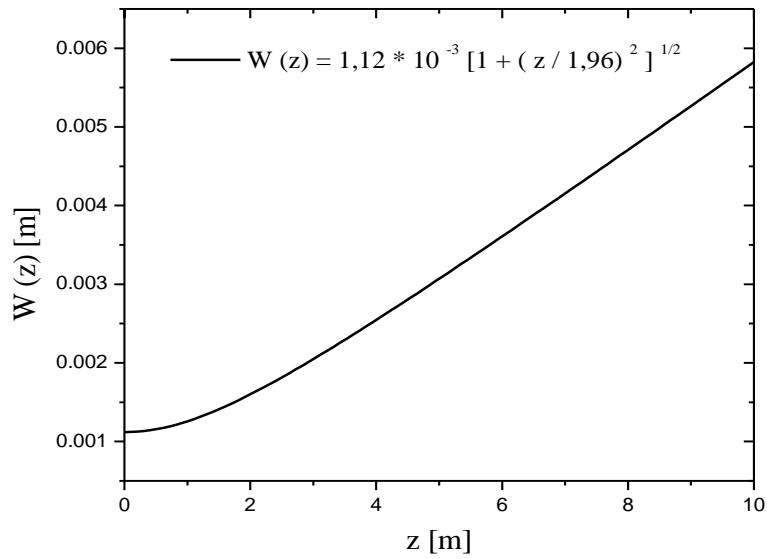


del haz ( $W_0$ ) y el rango de Rayleigh ( $Z_R$ ), se obtienen entonces, de la linealización de la Ecuación 2.20, que se realiza asignando nuevas variables,  $Y = W^2(z)$ ,  $X = z^2$ , y valores constantes,  $m = W_0^2 / Z_R^2$ ,  $b = W_0^2$ , de tal forma, que se puede obtener  $W_0$  mediante el intercepto con el eje  $Y$ , y  $Z_R$ , a partir de la pendiente de la recta.

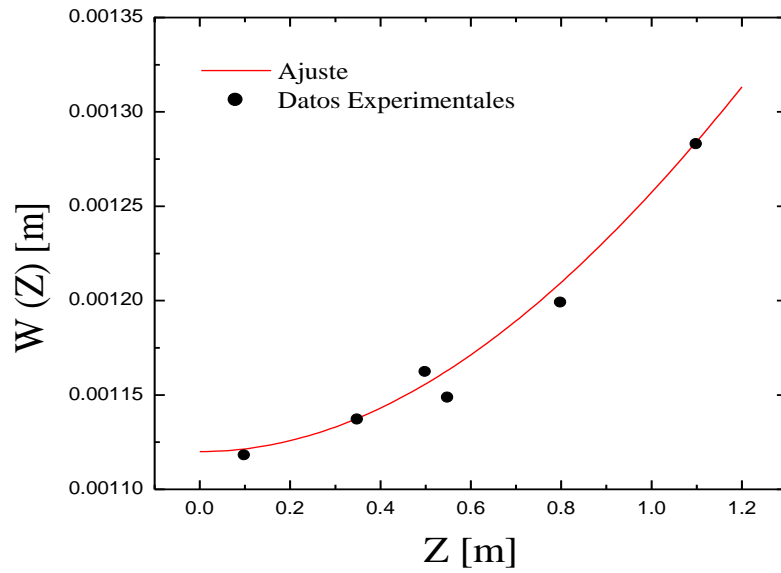


**Figura 6.8.** Curvas de  $W^2$  en función de  $z^2$ , para: a)  $P = 4 \text{ mW}$ , b)  $P = 10 \text{ mW}$

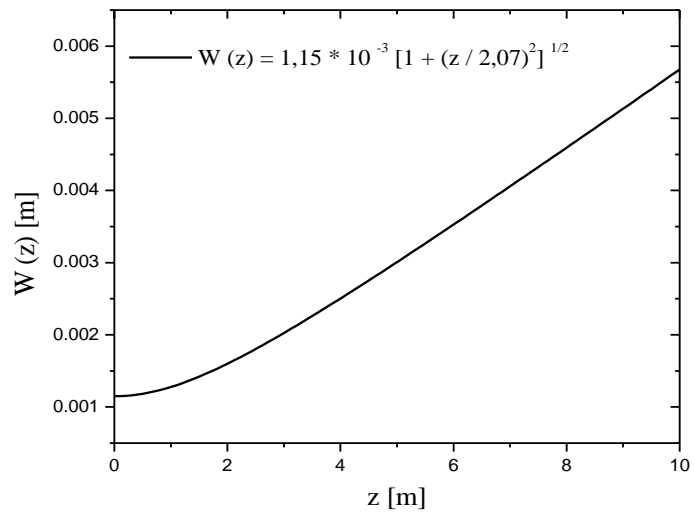
Así mismo, en las Figuras 6.9 y 6.10, se presentan las gráficas de la función  $W(z)$ , obtenidas de los valores calculados para  $W_0$  y  $Z_R$ , en los dos conjuntos de datos, éstas sirven como referencia para el comportamiento de las curvas experimentales de la variación del tamaño de la mancha ( $W(z)$ ), a través de los diferentes valores de la distancia,  $z$ , y que se presentan en las mismas Figuras.



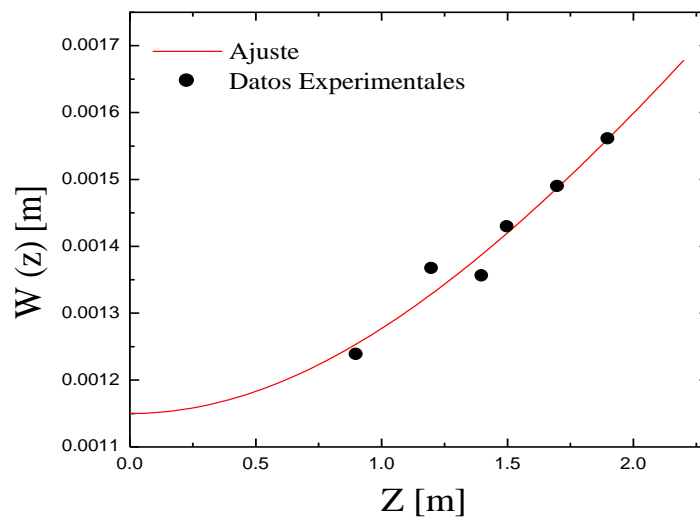
(a)



**Figura 6.9.** a) Gráfica de la función  $W(z)$ , con  $W_0 = 1,12 \text{ mm}$  y  $Z_R = 1,96 \text{ m}$ ,  
b) Curva experimental de  $W(z)$ , para  $P = 4 \text{ mW}$



(a)



(b)

**Figura 6.10.** a) Gráfica de la función  $W(z)$ , con  $W_0 = 1,15$  mm y  $Z_R = 2,07$  m, b) Curva experimental de  $W(z)$ , para  $P = 10$  mW

El resultado final para el valor de los parámetros es:  $1,12 \text{ mm} \pm 0,0052 \text{ mm}$  para la cintura mínima del haz y  $1,96 \text{ m} \pm 0,035 \text{ m}$  para el rango de Rayleigh, en los datos obtenidos para  $P = 4 \text{ mW}$ ; y  $W_0 = 1,15 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ ,  $Z_R = 2,07 \text{ m} \pm 0,08 \text{ m}$ , en el conjunto de datos para  $P = 10 \text{ mW}$ .

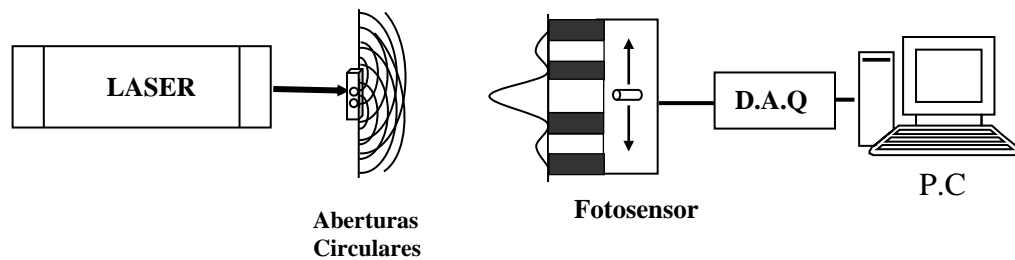
### 6.5 CALCULO DEL ANGULO DE DIVERGENCIA

Para obtener el valor del ángulo de divergencia, se utiliza el valor de la cintura del haz ( $w_0$ ) calculado anteriormente y se reemplaza en la Ecuación 2.22,  $[\theta = 2\lambda / \pi w_0]$ .

Por lo tanto, el ángulo de divergencia del haz del láser tiene un valor de  $0,29 \text{ mrad} \pm 0,0040 \text{ mrad}$ , en el modo de operación de línea múltiple. Este valor indica la baja divergencia del rayo láser,.

### 6.6 MEDIDA DEL GRADO DE COHERENCIA

Para medir el grado de coherencia del láser de ión Argón ( $\text{Ar}^+$ ), se utilizó el montaje esquematizado en la Figura 6.11.

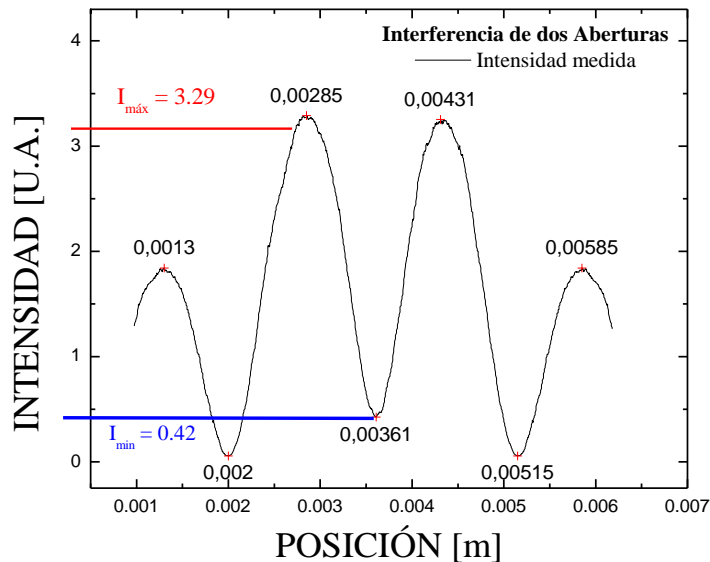


**Figura 6.11.** Montaje para la medición del Grado de Coherencia del Láser de ión Argón

Se utilizó como sensor una fotoresistencia que presenta una respuesta espectral favorable en el rango visible. Para el sistema de adquisición de datos y registro en el computador, se utilizó una tarjeta con un integrado ADC0809, construida en el laboratorio de Óptica. El movimiento horizontal de la fotoresistencia que cruza la región de las franjas de interferencia, se realizó por medio de un motor de paso cuya resolución de medida es de  $5,0 \mu\text{m}$  por paso.

Se generó un patrón de interferencia de *Young* iluminando dos aberturas circulares, separadas una distancia  $a = 1,0 \text{ mm}$ , con el láser de ión Argón ( $\text{Ar}^+$ ) operando en el modo de línea simple a una longitud de onda de  $514,5 \text{ nm}$  y  $50 \text{ mW}$  de potencia, y a una distancia de separación entre las aberturas y el sensor de  $180 \text{ cm}$ .

Los datos registrados fueron de intensidad relativa en función de la posición, como se presenta en la Figura 6.12.



**Figura 6.12.** Intensidad de las franjas de interferencia del experimento de Young

De acuerdo a la teoría descrita en el Capítulo 2, referente a la Visibilidad y Grado de Coherencia, las condiciones experimentales fueron ajustadas de tal forma que las densidades de flujo de las dos perturbaciones fueran iguales en las aberturas circulares, y así, por medio de la ecuación,  $V = |\gamma_{12}(\tau)|$ , se obtuvo el grado de coherencia de la distribución de franjas resultante y cuyo valor fue,  $V = 0,75$ , que indica el carácter de fuente de luz parcialmente coherente, puesto que existe la condición de que si el valor se encuentra en el intervalo,  $0 < |\gamma_{12}| < 1$ , significa coherencia parcial.

## **7. PRUEBAS PRELIMINARES DE RECOLECCIÓN DE LA LUZ LÁSER RETRODISPERSADA POR LA ATMOSFERA**

Todos los tipos de contaminantes, natural o antropogénico, y especialmente los emitidos por los volcanes, que se constituyen en una de las principales fuentes de polución, influyen y afectan en forma definitiva, la calidad de vida de los seres vivos, específicamente de los que se encuentran en regiones cercanas a estos focos de contaminación. Todos estos factores, han motivado el inicio del desarrollo de la técnica LIDAR, con la propuesta de la construcción de un sistema de monitoreo de contaminantes atmosféricos en la región del Cauca. Este sistema básico servirá para estudiar el tipo de partículas en forma de aerosol, presentes en la ciudad de Popayán, que entre otras cosas se encuentra en una región próxima a un sistema volcánico.

### **7.1 DESCRIPCION DEL MONTAJE EXPERIMENTAL DEL SISTEMA**

Para realizar las primeras pruebas de recolección de luz láser retrodispersada por la atmósfera, en Colombia; se construyó un sistema básico que se fundamenta en la técnica LIDAR del tipo elástico, técnica que se basa en la interacción elástica de fotones con las partículas atmosféricas, por lo tanto la luz que se refleja tiene la

misma la longitud de onda del láser de emisión. Este sistema se constituye además, en la primera etapa de la construcción de un equipo confiable para el estudio y monitoreo de partículas y compuestos contaminantes de la atmósfera en nuestra región.

El sistema básico construido conserva los componentes principales de un sistema Lidar, como son: el transmisor, el receptor y el detector. En la etapa de transmisión, que es la encargada de generar la luz y dirigirla a la atmósfera, se empleó el láser de Ión Argón ( $\text{Ar}^+$ ) Spectraphysics® modelo 2030-15S, restaurado en el desarrollo del presente trabajo y que, tal y como se presenta en los resultados de su caracterización en el Capítulo 6, ofrece el ancho de banda espectral, la divergencia y la potencia óptica adecuadas para éste tipo de sistemas. También se utilizaron, en la conformación de esta primera etapa, espejos con recubrimiento metálico para la inyección del rayo láser en la atmósfera, por lo tanto, en esta etapa la luz en generada por el láser y enviada a la atmósfera, por medio de espejos de alta reflectancia.

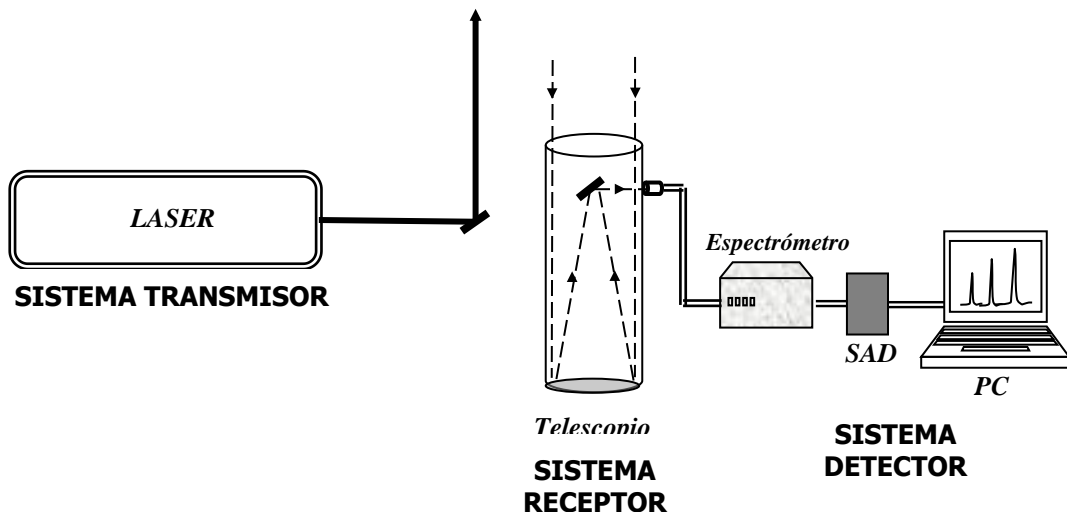
El sistema receptor, que recoge la luz láser dispersada, consistió en un telescopio Celestron® de 6", tipo Newtoniano, que tiene un sistema óptico de recolección, que focaliza la luz recogida por el telescopio en una fibra óptica.

Finalmente, en la etapa de detección y registro de la señal, que toma la luz desde el sistema receptor y produce un registro permanente de la intensidad de la luz dispersada como una función de la longitud de onda, se utilizó un espectrómetro de



red de difracción, Ocean Optics ®S2000, una interfase (SAD) y un computador. La señal que viaja a través de la fibra óptica, llega al espectrofotómetro, el cual contiene un detector multicanal CCD que se comunica con el computador a través de la interfase SAD, ésta digitaliza la señal y la transmite al PC a través del puerto serial, donde es finalmente registrada, [11].

El montaje final construido para el sistema básico LIDAR, se esquematiza en la Figura 7.1, éste tiene una configuración del tipo biaxial, condición bajo la cual se hizo necesario un cuidadoso proceso de alineación, tanto de la óptica de inyección del rayo láser a la atmósfera como de la óptica primaria de recolección en el sistema receptor. En esta Figura, se identifica también, cada una de las principales etapas en el sistema de recolección de luz láser retrodispersada por la atmósfera.



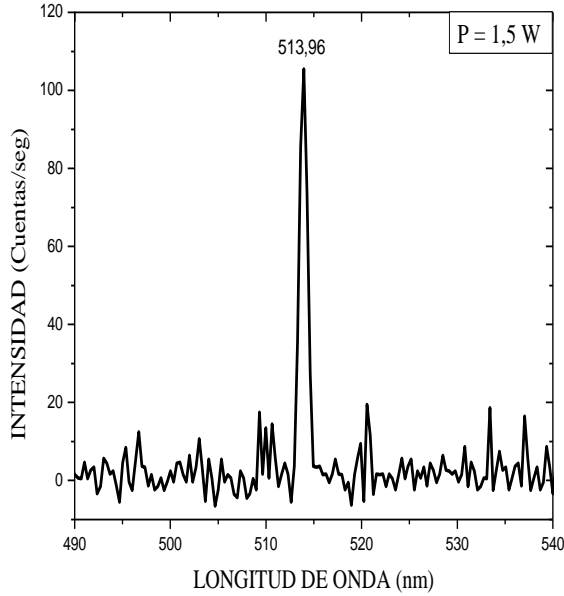
**Figura 7.1.** Montaje Básico del Sistema LIDAR

## **7.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES**

Utilizando el montaje descrito en la Figura 7.2, se realizaron las pruebas experimentales de detección de luz retrodispersada por la atmósfera de la ciudad de Popayán, en el Laboratorio de Óptica de la Universidad del Cauca, y como resultado de éstas mediciones se presentan a continuación, los registros espectrales, que marcan el inicio de la técnica Lidar en Colombia.

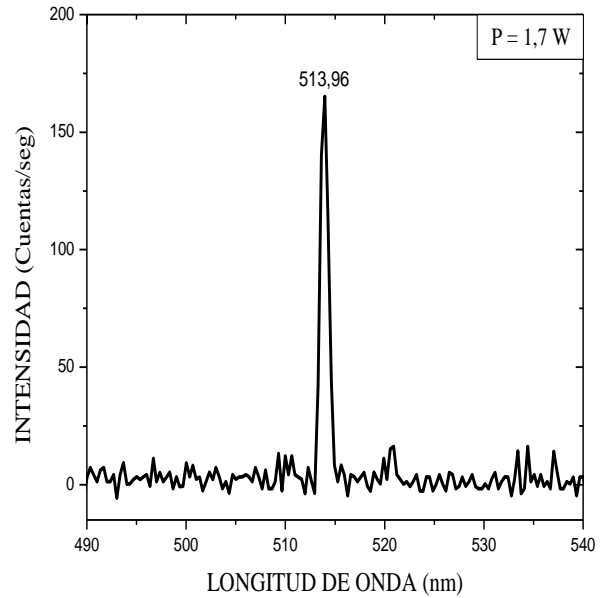
Se realizaron dos pruebas de recolección de luz láser retrodispersada; las dos durante las horas de la noche para minimizar los efectos de la luz solar, que se presentan en forma de ruido óptico, interfiriendo en los resultados finales.

En la primera prueba, se envió el haz del láser de Argón a la atmósfera, operando en el modo de línea simple a la longitud de onda correspondiente al color verde, ( $\lambda = 514,5 \text{ nm}$ ), porque es para esta longitud de onda específicamente, que se presenta un dominio de la dispersión sobre la absorción de la luz, por los aerosoles atmosféricos; y a una potencia de 1,7W; durante ésta primera experiencia se logró recolectar la dispersión producida por las partículas atmosféricas suspendidas entre los 2 y 4 km de altura aproximadamente, obteniendo dos registros espectrales, para las dos potencias ópticas ligeramente diferentes en las que trabajó el láser,  $P = 1,5 \text{ W}$  y  $P = 1,7 \text{ W}$ . Los resultados adquiridos se presentan en las Figuras 7.2 y 7.3.



**Figura 7.2.** Señal láser retrodispersada.

$P = 1,5 W$



**Figura 7.3.** Señal láser retrodispersada.

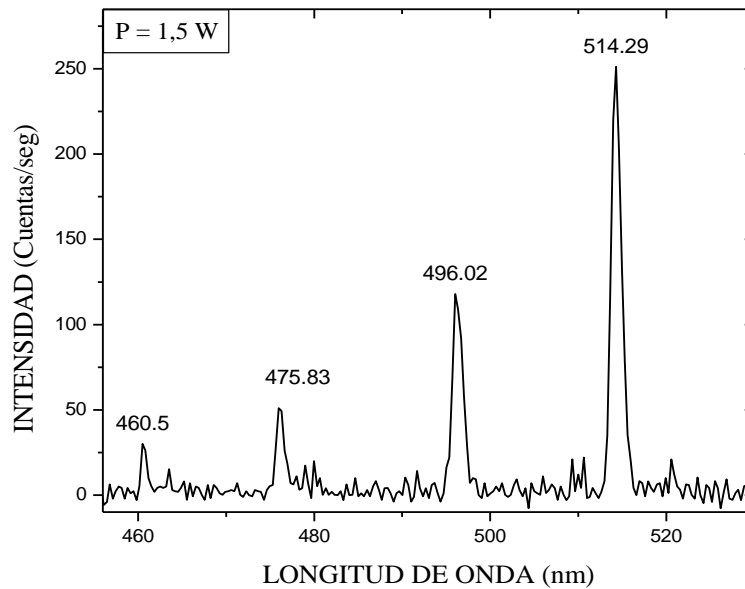
$P = 1,7 W$

Con la ejecución de esta primera prueba, y como lo muestran los espectros adquiridos de las Figuras 7.3 y 7.4, se logró comprobar la posibilidad de recoger luz dispersada desde la atmósfera, por lo que se puede decir, que el receptor presentó un rendimiento aceptable, al igual que el sistema de detección, para los objetivos perseguidos en el presente trabajo, como son los de iniciar la construcción de un sistema Lidar Elástico, de estudio y contaminación ambiental.

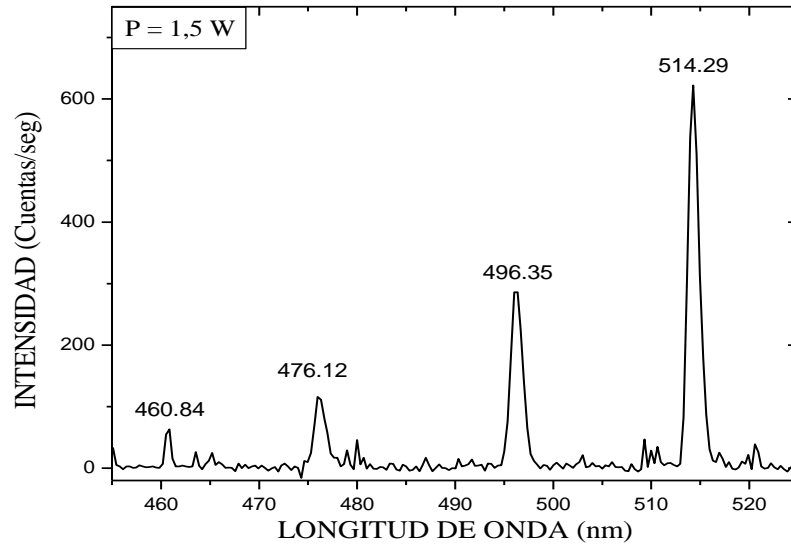
En la segunda prueba, se trabajó con el láser en el modo multilínea y con una potencia de 2,7 W. El objetivo de ésta, fue probar el sistema óptico de recolección de luz que se adapta al telescopio y lleva la señal al sistema de detección y registro. En esta medición, se detectó la señal retrodispersada por la capa atmosférica entre los 3

km y 5 km de altura de aproximadamente, para la señal luminosa multilínea del láser de Argón.

En las Figuras 7.4 y 7.5, se muestran los registros espectrales de la luz recogida por el telescopio durante la segunda prueba del sistema, en éstos se observan claramente las diferentes longitudes de onda de la luz inyectada en la atmósfera, y además en la Figura 7.6 se nota el incremento, en la intensidad de la señal detectada, al ajustar la óptica de recolección y el efecto de la corrección del ruido de fondo.

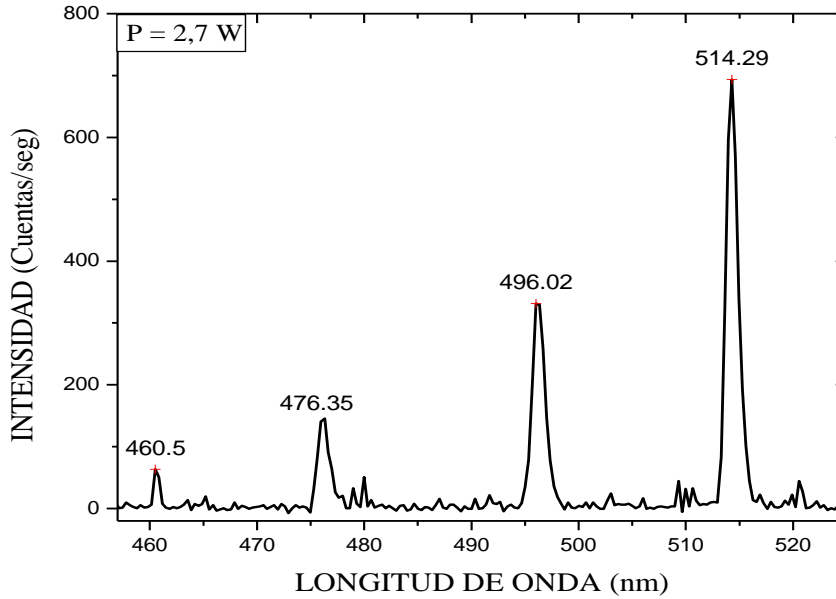


**Figura 7.4.** Señal láser retrodispersada, detectada con la óptica sin ajuste de focalización.  $P = 1.5\text{ W}$  y modo multilínea



**Figura 7.5.** Señal láser retrodispersada, con corrección de ruido de fondo y focalización de la óptica.  $P = 1.5\text{ W}$  y modo multilínea

Finalmente, en la Figura 7.6, se presenta la señal detectada para una potencia de inyección de 2.7 W de luz láser, operando en modo multilínea (ML). En este registro espectral, se ha corregido el ruido de fondo y se presenta la sección del espectro correspondiente al rango entre 457 nm y 530 nm que cubre las longitudes de onda del láser emisor.



**Figura 7.6.** Señal láser retrodispersada, detectada utilizando la óptica de recolección, Inyección vertical del haz láser, modo multilínea y  $P = 2,7$  W.

Con la adquisición de este último registro espectral, que al igual que los anteriores verifican la posibilidad de transmitir y detectar la luz dirigida a la atmósfera, se culmina la primera parte de la construcción del sistema LIDAR elástico.

La etapa que continúa se encamina al diseño y construcción del sistema de detección y registro de la señal de retorno, la cual permitirá tanto la medición como el análisis de la concentración, distribución y tamaño de las partículas dispersoras que se encuentran presentes en las primeras capas de la atmósfera de la ciudad de Popayán.

Para adquirir los datos que permitan la medición de los parámetros físicos de los aerosoles atmosféricos, se utilizará como sensor un fotomultiplicador, que permite

registrar su salida electrónicamente, para realizar un conteo individual de fotones, a partir del cual se calculará el valor de los coeficientes, de dispersión del volumen de la atmósfera ( $\beta$ ) y de extinción del volumen de la atmósfera ( $\alpha$ ), los cuales son fundamentales para determinar la información que se busca sobre los objetos que dispersan y modifican la luz original del láser a través de la ecuación básica del Lidar, Ecuación 3.1.

## **8. CONCLUSIONES**

Las actividades desarrolladas en este trabajo, relacionadas con la restauración y adecuación del láser de Argón, contribuyen a la preservación del patrimonio de la Universidad del Cauca.

El entendimiento de los principios físicos y operativos de cada una de las partes de este tipo de equipo, fue necesario para su restauración. El trabajo de caracterización del láser, combina la comprensión de los modelos teóricos del tratamiento de haces gaussianos con la necesidad de diseñar y realizar procesos de medida, desde el punto de vista del ingeniero, indispensables para el trabajo profesional con este tipo de luz.

El trabajo del diseño y acople de un sistema de refrigeración eficiente para la operación normal del láser, presenta una alternativa importante de solución a un problema técnico, que debe convertirse en un precedente de creatividad del ingeniero físico, con perspectivas a realizar construcciones y montajes de dispositivos de bajo costo.



De los ensayos realizados con el montaje básico de recolección de luz retrodispersada por partículas atmosféricas, se demuestra la factibilidad de utilizar este láser como fuente de luz primaria para un sistema LIDAR.

Finalmente, se considera, que este trabajo permitirá realizar proyectos que impulsen el desarrollo investigativo y tecnológico en nuestra Universidad, además, abre oportunidades de participación en investigaciones científicas, y de intercambio con otros grupos, para el fortalecimiento propio, con el respaldo de la comunidad científica nacional e internacional.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Bastidas G. Alvaro E., Construcción de un Láser Infrarrojo de Potencia Aplicable a las Tecnologías de Fabricación y de Modificación de Materiales Superconductores, Tesis de Maestría, Universidad del Valle, Santiago de Cali, 1995.
- [2]. J. Manuel Orza, Láseres y sus aplicaciones, Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid (España), 1986.
- [3]. J. Hawkes, I. Latimer, Lasers: Theory and practice, Prentice Hall, 1995.
- [4]. [www.photonics.com](http://www.photonics.com)
- [5]. Juan Tur, Ma. Rosario Martines, Tecnología y Práctica del Láser, Marcombo-Boixareu Editores, Barcelona (España), 1987.
- [6]. P. S.Argall, R. J. Sica, Lidar, The University of Western Ontario London, Ontario, Canada.
- [7]. Raymond M. Measures, Laser Remote Sensing Fundamentals and Applications, Wesley-Interscience John Wesley and Sons, 1984
- [8]. Doménech Xavier, Química atmosférica: origen y efectos de la contaminación, Miraguano Ediciones, 1995.
- [9]. Spectra Physics, Instruction Manual: model 2030 and 2035, high power ion laser.

- [10]. Muñoz J. A., Diseño y Montaje de un sistema Interferométrico para determinar el grado de Coherencia de fuentes de luz cuasimonocromáticas, Trabajo de grado, Ingeniería Física, Universidad del Cauca, Popayán, Cauca, 2003.
- [11]. A.E. Bastidas, F. Racedo, E. Rodríguez, E. Montilla <sup>1</sup>, J. León, M. Jaramillo <sup>2</sup>, E. Solarte <sup>3</sup>, Detección de Radiación Láser Retrodispersada en la Atmósfera, <sup>1</sup> Grupo de Óptica y Láser, Universidad del Cauca, Popayán; <sup>2</sup> Grupo de Producción Más Limpia, Pontificia Universidad Javeriana, <sup>3</sup> Grupo de Óptica Cuántica, Universidad del Valle, Cali, 2002. Edición No. 36, 30 de Junio de 2002.