

**Centro de Investigación Científica y de  
Educación Superior de Ensenada**



**ANALISIS DE ESTABILIDAD Y ASTIGMATISMO EN  
UN RESONADOR DE TRES ESPEJOS**

**TESIS  
MAESTRIA EN CIENCIAS**

**ROBERTO JULIO RAMIREZ ZARATE**

Ensenada, Baja California, Mexico. Abril de 1998.

TESIS DEFENDIDA POR  
ROBERTO JULIO RAMÍREZ ZÁRATE  
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITE



Dra. Nooshin Jamasbi Jahromi

*Director del Comité*



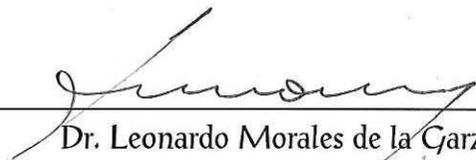
Dr. Serguei Miridonov

*Miembro del Comité*



Dr. Mehrdad Mohebi

*Miembro del Comité*



Dr. Leonardo Morales de la Garza

*Miembro del Comité*



Dr. Raúl Rangel Rojo

*Miembro del Comité*



Dr. Eugenio Rafael Méndez Méndez

*Jefe del Departamento de Optica*



Dr. Federico Graef Ziehl

*Director de Estudios de Posgrado*

27 de abril de 1998

*CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y  
DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA*



*DIVISIÓN DE FÍSICA APLICADA  
DEPARTAMENTO DE ÓPTICA*

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y  
ASTIGMATISMO EN UN RESONADOR  
DE TRES ESPEJOS**

*TESIS*

*que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
MAESTRO EN CIENCIAS presenta:*

*Roberto Julio Ramírez Zárate*

Ensenada, Baja California, 27 de Abril de 1998.

RESUMEN de la tesis de **ROBERTO JULIO RAMÍREZ ZÁRATE**, presentada en el CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA como requisito para obtener el grado de **MAESTRO EN CIENCIAS en ÓPTICA**. Ensenada, Baja California, 27 de Abril de 1998.

## ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y ASTIGMATISMO EN UN RESONADOR DE TRES ESPEJOS

Resumen aprobado por:



Dra. Nooshin Jamasbi Jahromi.  
Directora de tesis.

En el presente trabajo presentamos el estudio teórico y experimental sobre la estabilidad y el astigmatismo realizado a un láser de colorante con cavidad de tres espejos. En general en una cavidad láser, la estabilidad y el astigmatismo son función de los diferentes parámetros que componen la geometría de la cavidad, tales como la distancia entre espejos o el ángulo al que se colocan dichos espejos. El presente trabajo está enfocado a estudiar y a demostrar el efecto de los parámetros geométricos sobre la estabilidad del láser al igual que los cambios que sufre el haz al propagarse dentro y fuera de la cavidad. El estudio teórico realizado es una aproximación general y puede ser aplicado a cualquier tipo de láser y con cualquier configuración; sin embargo, para el presente trabajo se utilizó un láser de tres espejos, cuyo medio amplificador es una película de colorante con un espesor de  $200\mu m$ .

Teóricamente la cavidad es simulada y analizada utilizando la propagación de haces Gaussianos a través del parámetro complejo  $q$ , a través de este parámetro es posible conocer los cambios que sufre el tamaño y el radio de curvatura del haz. La propagación del haz en la cavidad se hace utilizando de la ley de matrices **ABCD**, la cual es la representación de las matrices **ABCD** particulares para cada uno de los elementos de la cavidad incluyendo la propagación en el espacio libre. Los cálculos numéricos son utilizados para encontrar los parámetros de estabilidad, las regiones de estabilidad de la cavidad y el tamaño del haz en cada punto dentro y fuera del resonador. Los cálculos teóricos fueron corroborados a través del estudio experimental.

**Palabras clave:** astigmatismo, diseño de láseres, estabilidad, propagación de haces Gaussianos.

ABSTRACT of the thesis of ROBERTO JULIO RAMÍREZ ZÁRATE, submitted to CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA in partial fulfillment of the requirements to obtain the MASTER IN SCIENCE degree in OPTICS. Ensenada, B.C., 27<sup>th</sup> of April, 1998.

## ANALYSIS OF STABILITY AND ASTIGMATISM IN A THREE MIRROR RESONATOR

Abstract approved by:



Dra. Nooshin Jamasbi Jahromi.  
Thesis Adviser.

We present a theoretical and experimental study of stability and astigmatism in a three mirror laser cavity. In general stability and astigmatism in a laser cavity are function of cavity geometry parameters such as distance between the mirrors and angles of incidence. In this work we have demonstrated the effect of cavity geometry on stability of the cavity and also on the beam size and beam shape inside and outside of the cavity. This is a general approach and can be applied to different laser resonators with different number of mirrors.

Theoretically, the cavity is simulated and analyzed using the propagation of the complex Gaussian beam parameter  $q$  by successive **ABCD** matrices representing the elements of the cavity including free space propagation. Numerical calculation are carried out to find stability parameters, stability regions, beam size and beam shape at each location inside and outside the resonator. The theoretical calculations are in agreement with the experimental results.

**Key words:** astigmatism, Gaussian beam propagation, laser design, stability.

## *AGRADECIMIENTOS*

Le agradezco a mi directora de tesis Dra. **Nooshin Jamasbi** quien me brindó su confianza y consejos durante la elaboración de esta tesis. Gracias por despertar en mi la inquietud de la investigación.

A mi comité de Tesis Dr. **Mehrdad Mohebi**, Dr. **Serguei Miridonov**, Dr. **Raúl Rangel** y Dr. **Leonardo Morales**, quienes con sus comentarios hicieron de este un mejor trabajo.

A la Dra. **Diana Tentori Santa Cruz**, por ser ella el pilar principal de mi formación como óptico y quien me enseñó a combinar mis conocimientos de ingeniería con los de física. Gracias por creer en mí y por su amistad incondicional.

A Todos los Doctores de óptica, quienes contribuyeron con su conocimiento contribuyeron mi formación.

Al **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE)** así como al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)**, por haberme dado la oportunidad de subir un peldaño mas en mi preparación profesional.

## ***AGRADECIMIENTOS***

A mis Compadres **Manuel May** y **Juan Carlos Martínez** con quienes compartí la gran odisea de estudiar una maestría. Quienes me brindaron su amistad incondicional durante todo este tiempo la cual hizo que esta aventura fuera divertida. A ellos solo me resta decirles una cosa. **¡LO HICIMOS!**

A **Rodolfo Cortés, Nestor Valles, Javier Camacho, Javier Villegas, David Salazar** y **Juan Peralta** por sus asesorías técnicas y por su invaluable amistad que hicieron que esta maestría fuera más provechosa.

A las secretarias de óptica **Doña Ofelia, Rosi, Caro** y **Marcia**, quienes siempre estuvieron al pendiente de todos nosotros y porque con su amistad hicieron que mi estancia en CICESE fuera menos monótona.

A **Georgina Beltrán, Juan Castillo** y **Juan Carlos Rodríguez** por fungir como sinodales en aquellas pláticas de preparación y con quienes formamos el grupo de los 6.

A mis compañeras de generación **Karina, Gladys** y **Martha** por valiosa amistad y por la ayuda recibida durante la maestría.

## *AGRADECIMIENTOS*

Al mis compañeros del grupo de fenómenos ultrarrápidos, **Miguel Angel García** y **Jesús Garduño** por su paciencia y las ideas que aportaron a mi trabajo.

A mi superamigocha **Silvia Medina Chaves** de quien desde que la conocí solo he recibido amistad y cariño.

A todos mis hermanos de la fraternidad de **JUFRA** y de **Fuego Nuevo** con quienes he compartido la gran aventura de vivir al servicio de Dios, gracias por brindarme su amistad.

A **Oswaldo López** y a todo el grupo de intendencia porque siempre se esforzaron por tener limpio nuestro centro de estudio

A Todos los que de una manera u otra colaboraron conmigo para la culminación de mi maestría de quienes en este momento no recuerdo su nombre mas sin embargo siempre les estaré agradecido.

# Índice General

<b>I INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
I.1 Resumen . . . . .	1
I.2 Introducción . . . . .	1
I.3 Objetivos . . . . .	4
<b>II ARREGLO EXPERIMENTAL</b>	<b>6</b>
II.1 Introducción . . . . .	6
II.2 Características de los láseres de colorante . . . . .	7
II.3 Descripción general del experimento . . . . .	8
II.3.1 Sistema de Bombeo . . . . .	10
II.3.2 Cavidad del Láser de colorante . . . . .	11
II.3.3 Sistema de detección . . . . .	13
II.3.4 Sistema de control . . . . .	14
II.4 Funcionamiento del sistema . . . . .	15
<b>III ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN UN RESONADOR DE TRES     ESPEJOS</b>	<b>18</b>

III.1	Introducción . . . . .	18
III.2	Propagación de haces a través de la ley de matrices ABCD . . . . .	19
III.3	Cálculo de la condición de estabilidad partiendo de la ecuación de autoconsistencia . . . . .	25
III.4	Cálculo de las regiones de estabilidad . . . . .	27
 <b>IV ANÁLISIS DE ASTIGMATISMO EN UN RESONADOR DE TRES ESPEJOS</b>		
	<b>ESPEJOS</b>	<b>36</b>
IV.1	Astigmatismo . . . . .	36
IV.1.1	Astigmatismo en resonadores de tres espejos. . . . .	39
IV.2	Características de los láseres de colorante con cavidad de tres espejos	40
IV.3	Análisis teórico y experimental del astigmatismo. . . . .	42
IV.3.1	Análisis del astigmatismo producido por el espejo $M_2$ . . . . .	43
IV.3.2	Análisis de astigmatismo producido por la longitud de la cavidad.	57
 <b>V CONCLUSIONES</b>		<b>63</b>
 <b>Referencias</b>		<b>68</b>
 <b>APÉNDICES:</b>		<b>69</b>
 <b>A CÁLCULOS DE LOS PARÁMETROS DE LA CAVIDAD UTILIZANDO LA ECUACIÓN DE AUTOCONSISTENCIA</b>		<b>70</b>
 <b>B DIAGRAMA DE FLUJO Y PROGRAMA PARA LA PROPAGACIÓN DE UN HAZ A TRAVÉS DE LA CAVIDAD</b>		<b>74</b>

B.1 Programa para la simulación de un haz a través de la cavidad . . . .	76
--	----

11	<i>Propagación de haces paralelos a través de un espejo esférico. En el plano imagen observamos el efecto de astigmatismo en donde los puntos <math>H</math> y <math>V</math> son perpendiculares entre si. . . . .</i>	37
12	<i>Superficie astigmática para en espejo esférico. . . . .</i>	38
13	<i>Variación del tamaño del haz al propagarse en un viaje completo dentro de la cavidad cuando <math>2\theta = 9^{\circ}</math>. . . . .</i>	45
14	<i>Perfil Gaussiano del haz para el plano horizontal cuando <math>2\theta = 9^{\circ}</math>. . .</i>	46
15	<i>Perfil Gaussiano del haz para el plano vertical cuando <math>2\theta = 9^{\circ}</math>. . . . .</i>	46
16	<i>Variación del tamaño del haz al propagarse en un viaje completo dentro de la cavidad, cuando <math>2\theta = 12^{\circ}</math>. . . . .</i>	49
17	<i>Perfil Gaussiano del haz para el plano horizontal cuando <math>2\theta = 12^{\circ}</math>. . .</i>	50
18	<i>Perfil Gaussiano del haz para el plano horizontal cuando <math>2\theta = 12^{\circ}</math>. . .</i>	50
19	<i>Variación del tamaño del haz al propagarse un viaje completo dentro de la cavidad cuando <math>2\theta = 18^{\circ}</math>. . . . .</i>	54
20	<i>Perfil Gaussiano del haz para el plano horizontal cuando <math>2\theta = 18^{\circ}</math>. . .</i>	55
21	<i>Perfil Gaussiano del haz para el plano vertical cuando <math>2\theta = 18^{\circ}</math>. . . . .</i>	55
22	<i>Variación del tamaño del haz al propagarse un viaje completo dentro de la cavidad cuando <math>2\theta = 18^{\circ}</math>. . . . .</i>	59
23	<i>Perfil Gaussiano real y ajustado del haz para el plano horizontal cuando <math>2\theta = 18^{\circ}</math>. . . . .</i>	60
24	<i>Perfil Gaussiano real y ajustado del haz para el plano vertical cuando <math>2\theta = 18^{\circ}</math>. . . . .</i>	60

25	<i>Perfil Gaussiano del haz de los datos reales para los planos horizontal y vertical cuando <math>2\theta = 18^\circ</math>.</i> . . . . .	61
26	<i>Diagrama de flujo generalizado.</i> . . . . .	75

# Índice de Tablas

Tabla		Página
I	<i>Parámetros teóricos de estabilidad de la cavidad para diferentes ángulos <math>2\theta</math> y diferentes longitudes. En donde la longitud del brazo <math>d_{23}</math> permanece constante en 7.56cm y se varia la longitud del brazo <math>d_{12}</math>. Marcamos como cavidad estable (Es) y como cavidad no estable (NEs). . . . .</i>	35
II	<i>Comparación numérica del tamaño de haz teórico y experimental para diferentes valores del ángulo <math>2\theta</math>. . . . .</i>	56
III	<i>Comparación en el tamaño de la cintura del láser de colorante para diferentes ángulos de la cavidad y tamaño del haz de bombeo en la posición en la cual se colocó el medio amplificador. . . . .</i>	57

# ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y ASTIGMATISMO EN UN RESONADOR DE TRES ESPEJOS

## INTRODUCCIÓN

### I.1 Resumen

Llevamos a cabo el estudio teórico y experimental de estabilidad y astigmatismo de un láser de tres espejos con cavidad doblada en V. El estudio teórico se realizó simulando la propagación de haces a través del principio de las matrices ABCD para la propagación de un haz dentro y fuera de la cavidad. Este estudio calcula la región para la cual la cavidad es estable, las variaciones en el tamaño del haz en la cavidad y el comportamiento exacto del grado de astigmatismo del haz dentro y fuera de la cavidad. El estudio teórico se complementa con la corroboración experimental de los resultados.

## I.2 Introducción

En general en las cavidades láser la estabilidad y el grado de astigmatismo son función de los parámetros que componen la geometría de la cavidad [Kogelnik *et. al.*, 1972]. En este trabajo se comprobaron los efectos que los diferentes parámetros tienen en la formación de las regiones de estabilidad de la cavidad. También se llevaron a cabo estudios relacionados con el astigmatismo y las principales causas que lo originan tanto dentro como fuera de la cavidad [Hanna. 1969]. Definiremos astigmatismo como una aberración monocromática primaria la cual genera una distorsión en el plano imagen; esta distorsión de la figura se genera cuando un haz incide en un espejo a un ángulo diferente al de la normal del espejo. El estudio realizado puede ser aplicado a cualquier tipo de láseres, sin embargo centramos este trabajo en el estudio de un láser de colorante orgánico de tres espejos.

Teóricamente, la cavidad fue simulada a través de un algoritmo computacional realizado en lenguaje turbo C++ el cual se muestra en el apéndice B. El análisis teórico y la simulación de la cavidad son realizados a través de la propagación de haces en la cavidad mediante la ley de las matrices  $ABCD$  en las cuales se representa a cada uno de los elementos de la cavidad incluyendo la propagación en el espacio libre [Kogelnik y Li. 1966 y Siegman. 1986]; y la ecuación de autoconsistencia, en la cual el parámetro complejo  $q$  contiene la información relacionada con el tamaño y el radio de curvatura del haz en cualquier punto dentro y fuera de la cavidad. El análisis numérico fue realizado con el fin de calcular las regiones de estabilidad del láser y el diámetro del haz en cada punto dentro y fuera de la cavidad.

La localización de las zonas de estabilidad en una cavidad láser, es un paso básico si queremos diseñar un láser estable y libre de astigmatismo, es por ello que le dedicaremos dos capítulos de esta tesis a estudiar los principios teóricos básicos de estabilidad y astigmatismo. Una vez conocidos los parámetros básicos de diseño se procede al ensamble, alineación y caracterización de la cavidad. Hay que resaltar que es necesario llevar a cabo este tipo de estudio teórico con el fin de ahorrar tiempo al diseñar y ensamblar láseres.

En este trabajo se muestran los pasos básicos que rigen el diseño y la construcción de láseres, los cuales nos llevan al cálculo de los parámetros geométricos óptimos bajo los cuales debe funcionar la cavidad como lo son la distancia entre espejos, localización del medio amplificador, y el ángulo de incidencia entre otros. Observemos que el ángulo de incidencia es aquel que se forma entre el haz incidente y el eje óptico del espejo. Es obvio que la existencia de este ángulo es inevitable en cavidades con más de dos espejos. El ángulo de incidencia, es también un factor dominante en la producción de astigmatismo en cavidades multiespejos [Kogelnik. *et. al.*, 1972]. En una cavidad operando en el modo  $TEM_{00}$  el astigmatismo causa que el perfil del haz cambie de forma considerable de un haz con forma circular a un haz con forma elíptica en diferentes puntos tanto dentro como fuera de la cavidad. Los efectos del astigmatismo serán discutidos con mayor detalle en el capítulo IV.

Un estudio experimental serio acerca del astigmatismo solo se podrá llevar a cabo si se cuenta con un láser cuyas regiones de estabilidad se encuentran previamente establecidas. A través de un estudio teórico como el que se realizó a la cavidad, es posible establecer los parámetros geométricos adecuados para llevar a cabo un estudio

formal acerca del astigmatismo y es posible llevar a cabo la compensación parcial del astigmatismo de la cavidad, con la finalidad que el láser pueda ser utilizado en algunas aplicaciones en las cuales se requiera un haz Gaussiano libre de astigmatismo [Jamásbi, *et. al.* 1988]. Notemos que la compensación de astigmatismo puede ser esencialmente requerida en experimentos particulares o en ciertas aplicaciones; por ejemplo un haz concentrado y libre de astigmatismo es un requisito esencial en la construcción de láseres de pulsos ultra cortos [Kenneth Li *et. al* 1981 y Diels, 1996].

El análisis experimental del astigmatismo se llevó a cabo realizando un barrido en intensidad del perfil del haz. A través de los datos obtenidos mediante este barrido se calcula el tamaño del haz en ambos planos. La comparación de los resultados obtenidos teórica y experimentalmente, se llevará a cabo en el capítulo IV de este documento y consiste en comparar numéricamente los resultados obtenidos a través de la simulación numérica y los resultados obtenidos mediante el barrido del perfil del haz.

En este trabajo se demuestra que es posible llevar a cabo en forma parcial la compensación del astigmatismo en algunos puntos particulares dentro y fuera de la cavidad. Esta compensación parcial del astigmatismo puede realizarse controlando los parámetros geométricos de la cavidad, sin embargo, llevar a cabo una compensación total del astigmatismo en todos los puntos de la cavidad y fuera de ella no es posible para el caso de cavidades multiespejos, no obstante dichos cálculos nos permiten diseñar cavidades multiespejos con un mínimo de astigmatismo o sin astigmatismo en un punto requerido.

## I.3 Objetivos

los objetivos de este trabajo los podemos resumir de la siguiente manera:

- Estudiar el criterio de estabilidad y astigmatismo en cavidades de tres espejos. El estudio teórico se lleva a cabo realizando una simulación por medio de un algoritmo computacional en lenguaje C++. Notemos que el estudio teórico realizado es una aproximación general y por lo tanto puede ser aplicada a cualquier clase de cavidades láser con cualquier número de espejos, sin embargo para este trabajo el programa solo trabaja para una cavidad de tres espejos.
- Construir una cavidad de tres espejos estable y estudiar el astigmatismo producido en la cavidad.
- Demostrar experimentalmente la validéz de los resultados teóricos.
- Demostrar que en general el astigmatismo es función de la geometría de la cavidad, que puede ser controlado, minimizado y compensado en un punto requerido fuera de la cavidad sin la necesidad de introducir en al cavidad elementos compensadores.

# Capítulo II

## ARREGLO EXPERIMENTAL

### II.1 Introducción

El presente capítulo lo dedicaremos a describir las principales características de un láser de colorante con cavidad de tres espejos, al igual que algunas de las principales características de los elementos que componen este tipo de sistemas.

Un aspecto importante que se tiene que tomar en cuenta es el hecho de que el estudio teórico y experimental que se realiza en este trabajo puede ser aplicado a cualquier tipo de láseres y con cualquier configuración.

En general los láseres de colorante juegan un papel primordial como fuentes sintonizables de radiación en las regiones cercanas al visible y en el visible del espectro de luz. Una de las principales desventajas que ofrecen este tipo de láseres, es el alto costo de las fuentes de bombeo utilizadas para este tipo de sistemas en particular, siendo esta fuente de bombeo una lámpara de destello u otro láser. El colorante que sirve como medio amplificador en estos láseres, es un compuesto orgánico con un tiempo aproximado de vida de 1000 watts-hora bajo condiciones favorables de operación y

por lo tanto requiere ser cambiado periódicamente, lo cual repercute en el costo de mantenimiento de estos dispositivos [Hecht J., 1984], sin embargo, para el presente trabajo se contó con los elementos necesarios para ensamblar la cavidad del láser de colorante utilizando como medio de bombeo un láser de argón cuyas características describiremos más adelante.

## II.2 Características de los láseres de colorante

Recordemos nuevamente que la característica más importante de los láseres de colorante es la facilidad con que estos elementos pueden ser sintonizados ofreciendo al usuario un amplio espectro de longitudes de onda. La facilidad para que estos elementos sean sintonizables dependerá principalmente del colorante utilizado, la fuente de bombeo y el tipo de recubrimiento utilizado en los espejos que componen la cavidad. El rango espectral que ofrecen este tipo de láseres al ser bombeados por un láser de argón es esencialmente completo, cubriendo un intervalo de longitudes de onda que van desde  $365nm$  hasta  $1000nm$  [Levine. 1971]. Es posible extender el rango de sintonización por medio de métodos no lineales con el fin de generar longitudes de onda en el infrarrojo o ultravioleta lejanos.

Las potencias alcanzadas en los láseres de colorante existentes son más que adecuadas para aplicaciones en espectroscopía [Tuccio y Strome, 1972]. La variación de la potencia de salida en estos tipos de láseres varía de acuerdo con el colorante, aunque generalmente este tipo de láseres ofrecen un rango de potencias que van desde  $100mW$  a  $1W$ . Sin embargo, existen algunas aplicaciones para las cuales se requiere

de una potencia ilimitada. Es por ello que se han desarrollado láseres sintonizables de alta potencia capaces de alcanzar decenas de watts de radiación visible.

Uno de los problemas asociados con la excitación de láseres líquidos, son los efectos térmicos de inhomogeneidad óptica inducidos en el líquido. Cuando un haz de luz con alta irradiancia pasa a través de un material con alto índice de pérdidas, los gradientes de temperatura son acompañados por gradientes de índices de refracción produciendo una distorsión en el haz .

Un método para reducir los efectos térmicos en las soluciones de colorante, es someterlos a irradiación por periodos de tiempo cortos. Esto se puede lograr si la solución de colorante fluye, ocasionando que el tiempo de transición a través de la región de excitación es menor que la constante de tiempo térmico por una cantidad que depende de la magnitud del efecto térmico [Dabby *et al.* 1969].

## II.3 Descripción general del experimento

Para la realización de este trabajo se construyó un láser de colorante de tres espejos bombeado con un láser de argón; el arreglo experimental se muestra en la figura 1.

El sistema mostrado en la figura 1, se divide en 4 partes: Sistema de Bombeo, cavidad láser de colorante, sistema de detección y sistema de control, cada una de estas partes serán descritas en los siguientes segmentos.

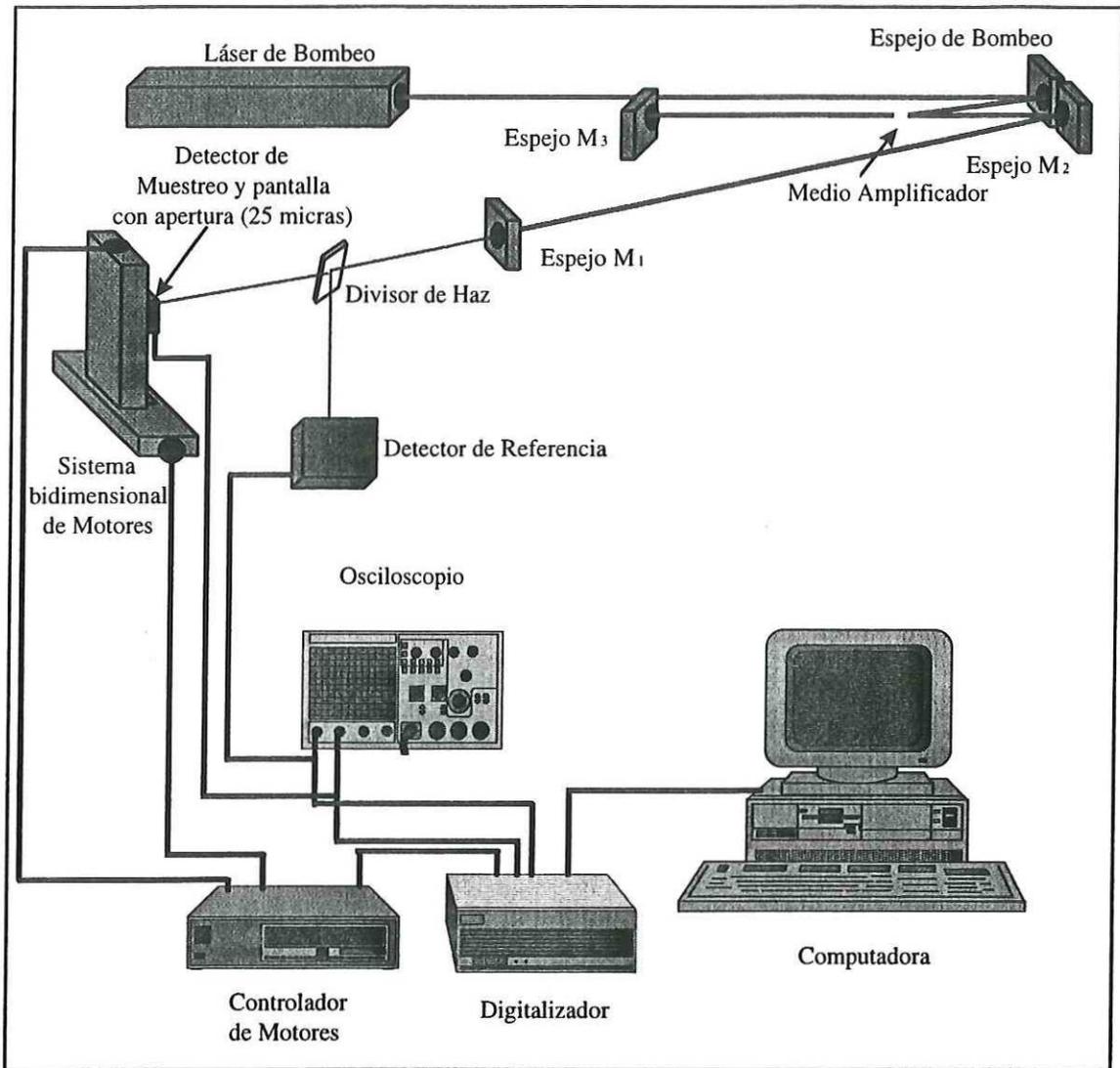


Figura 1: Arreglo experimental .

### II.3.1 Sistema de Bombeo

El sistema de bombeo está compuesto por un láser de argón, una placa retardadora de  $\lambda/2$ , un cristal Glan Thompson, y un espejo esférico de bombeo con las siguientes características.

1.- Láser de Argón: El láser de bombeo es un láser de argón INNOVA serie 400 de la compañía COHERENT con una potencia máxima de 20 watts, de la cual solo se utilizó una potencia de bombeo de 3.5 watts en modo continuo, a una longitud de onda de 514 nm. El diámetro del haz de 1.9 mm y una divergencia de 0.4 mrad, polarizado verticalmente. El haz proveniente de este láser de argón es llevado al láser de colorante utilizando un espejo esférico con las siguientes características.

2.- Espejo de Bombeo: Este elemento óptico es un espejo con recubrimiento dieléctrico diseñado para tener una reflectancia máxima en 515 nm, el diámetro del espejo es de 7mm con un radio de curvatura de 5cm.

El haz que incide en este espejo es enfocado en el medio amplificador, el cual consiste en un chorro de colorante con un espesor de  $200\mu m$  colocado al ángulo de Brewster para minimizar las pérdidas por reflexión; el haz enfocado es un haz circular con un diámetro aproximado de  $84.5\mu m$ . Un punto importante que se tiene que mencionar es que el haz de bombeo incide a un ángulo diferente a la normal del espejo de bombeo, originando cierto grado de astigmatismo, sin embargo, el astigmatismo producido por este espejo se controla reduciendo el ángulo de incidencia [Jenkins y White, 1957]. El ángulo de incidencia mínimo permitido físicamente por los elementos de la cavidad al que se colocó el espejo es de  $5^\circ$ .

### II.3.2 Cavity del Láser de colorante

Para la realización del presente experimento, se construyó un láser de colorante con cavidad lineal de tres espejos, la cual se compone de un espejo esférico, un espejo colimador y espejo plano. El medio amplificador utilizado en este láser es un chorro de rodamina 6G. Las características de cada uno de los elementos del sistema serán descritas a continuación (figura 2). Es importante mencionar que los espejos y el sistema de bombeo de colorante utilizados en el presente experimento, formaron parte de un láser comercial de la marca SPECTRA PHYSICS serie 375, el motivo por el cual se decidió rediseñar la cavidad es con la finalidad de tener un mayor control de los elementos que componen este láser y para optimizar su funcionamiento.

- 1.- El sistema de amplificación se compone de un sistema de bombeo el cual proporciona 80 [lb/in<sup>2</sup>] de presión de colorante. El colorante enviado a la cavidad pasa a través de una boquilla la cual cuenta con una abertura de 200 $\mu$ m generando un chorro de colorante en forma de película. Observemos que para lograr el funcionamiento óptimo para este sistema en particular, se requiere contar con un litro de colorante en el sistema de bombeo dadas las condiciones de instalación y la distancia existente entre el contenedor y la boquilla de aspersión; la finalidad de contar con este volumen de colorante, es mantener un flujo constante en el sistema lo cual va a generar una película de colorante uniforme, de lo contrario vamos a tener un haz inestable; otro factor que afecta la estabilidad del sistema son las vibraciones mecánicas que puedan generarse en el sistema a causa del flujo de colorante y esto a su vez puede imposibilitar la realización de las mediciones experimentales en forma exacta. Como

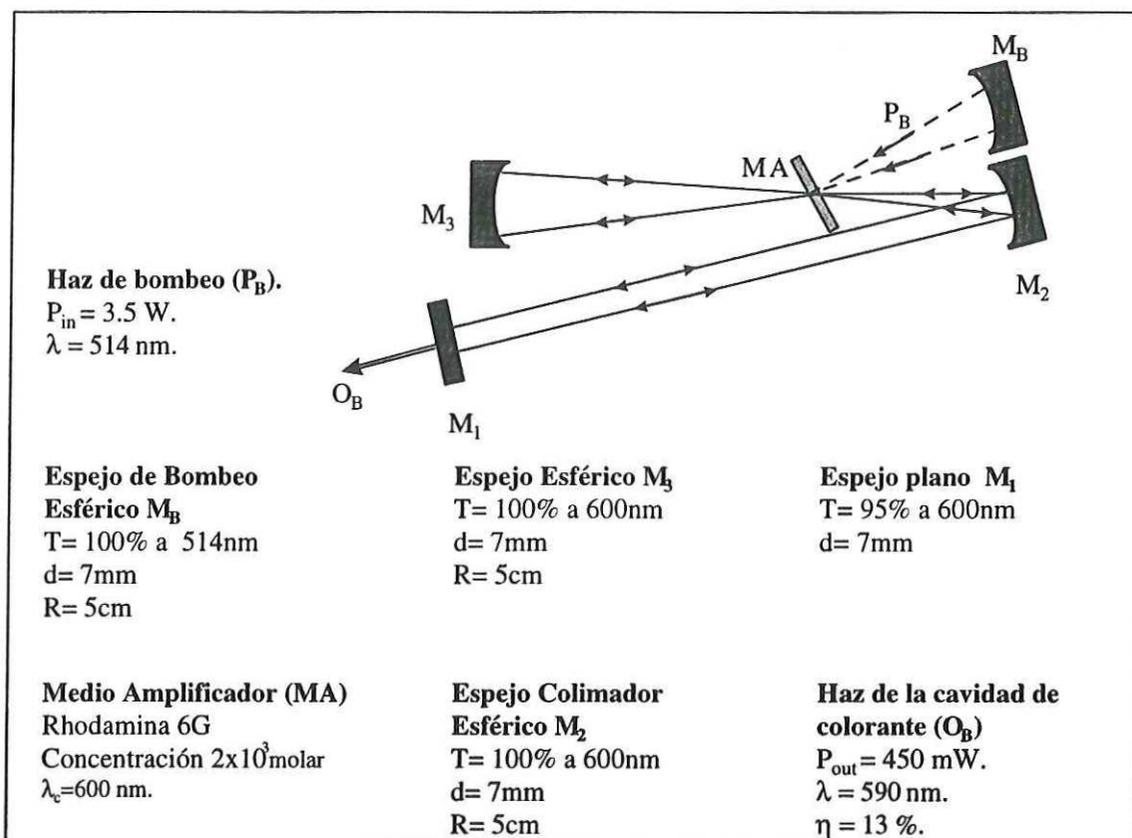


Figura 2: Características de los elementos que componen la cavidad.

medidas de prevención, la boquilla debe ser limpiada con frecuencia para evitar que se deposite en ella algún residuo que pudiera romper la uniformidad de la película de colorante que se debe formar para lograr un funcionamiento óptimo de la cavidad.

Como medio amplificador se utilizó rhodamina 6G con una concentración de  $2 \times 10^{-3}$  molar, disuelta en etilen glicol con una pureza del 99% en grado industrial.

2.- La cavidad se compone de tres espejos dieléctricos (figura 2), los cuales tienen su pico de reflectancia máxima en  $600 \text{ nm}$ . Los espejos  $M_3$  y  $M_2$  son espejos esféricos de alta reflectancia, con un diámetro de  $7 \text{ mm}$ . y un radio de curvatura de  $5 \text{ cm}$ . Estos espejos están montados sobre unidades de translación micrométricas de la compañía Newport serie 433. La finalidad del uso de estos dispositivos es el de poder variar la longitud de la cavidad en pasos muy pequeños al momento de realizar el experimento.

El espejo  $M_1$  de la cavidad es un espejo plano con un diámetro de  $7 \text{ mm}$ , con reflectancia del 95% el cual funciona como espejo de salida del sistema.

La potencia a la salida del láser es de  $450 \text{ mW}$  a una longitud de onda de  $580 \text{ nm}$  con una eficiencia del 13%.

### **II.3.3 Sistema de detección**

Para la caracterización del perfil del haz, existen diferentes métodos por medio de los cuales se pueden conocer los parámetros del perfil del haz, como son el uso de cámaras de CCD, cámaras Vidicon y la técnica de barrido del haz. En el presente experimento se utilizó la técnica de barrido del haz por ser esta una técnica muy sencilla de realizar, de gran precisión en sus resultados y en cuestión de costos es más

barata que las otras técnicas.

El sistema de detección mostrado en la figura 1, consta de los siguientes elementos: divisor de haz 50/50, una pantalla opaca con una microapertura con un diámetro de  $25 \mu m$  sujeto a la cara del detector de barrido, un detector de referencia y un fotodetector de silicón de alta velocidad para realizar el barrido del haz; este último se encuentra montado en un sistema bidimensional de motores de pasos; este sistema bidimensional de movimiento se utiliza para realizar un barrido en intensidad al haz de la cavidad de colorante en los planos horizontal (H) y vertical (V). Dicho sistema bidimensional de movimiento es manejado y controlado por computadora.

Los motores utilizados en el sistema bidimensional de barrido son motores de pasos de la compañía NEWPORT.

### II.3.4 Sistema de control

El sistema de control se compone de 4 elementos.

- Osciloscopio (Tektronix: model 540A), el cual nos va a auxiliar en la alineación y centrado del fotodetector de barrido.
- Unidad controladora de motores (Klinger scientific: modelo CD4), este instrumento maneja los motores a través de la señal enviada por la computadora.
- Digitalizador (IOtech: Modelo ADC488/16A), el cual convierte la señal analógica enviada por los detectores en una señal digital; dicha señal será interpretada por la computadora.

- Computadora 486, La función de la computadora es control de los dispositivos de translación y almacenamiento de datos.

## II.4 Funcionamiento del sistema

En la presente sección daremos una descripción detallada a cerca del funcionamiento del sistema.

El sistema comienza en el láser de bombeo, del cual obtenemos un haz de bombeo de  $3.5W$  con una longitud de onda de  $514.5nm$ . El haz incide en el espejo de bombeo enfocándolo en el centro del medio amplificador del láser de colorante. Un aspecto importante que tenemos que cuidar es el ángulo de incidencia al que se coloca el espejo de bombeo, ya que en los espejos esféricos al incidirles luz a un ángulo diferente al de su normal, se genera un efecto conocido como astigmatismo [Hanna. 1969], el cual será explicado con mayor detalle en el capítulo IV de este trabajo.

Una vez que el haz de bombeo es enfocado en el medio amplificador, se produce el efecto de inversión de población, generando el proceso de emisión estimulada. La luz generada en este proceso es confinada en la cavidad formada por los espejos  $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$ , como se muestra en la figura 1.

Una parte importante del viaje del haz en la cavidad, lo tendremos cuando la luz pasa por el espejo  $M_2$ , ya que la luz que incide en este espejo lo hace a un ángulo de incidencia diferente al ángulo de la normal del espejo, provocando un haz astigmático a la salida de la cavidad [Kogelnik *et. al.*, 1972]. Como se va a demostrar en el presente trabajo, el grado de astigmatismo del haz en la cavidad se debe principalmente al

ángulo de incidencia al que se coloca el espejo  $M_2$ . Un parámetro que también se debe considerar tanto en el cálculo de las zonas de estabilidad del láser como en el análisis de astigmatismo, es la longitud de la cavidad, ya que el tamaño del haz varía dependiendo la longitud de la cavidad.

Una vez que se produce un haz láser en la cavidad de colorante, se hace incidir en un divisor de haz, el cual divide el haz en dos haces ortogonales. Uno de los haces incide en el detector de referencia. El segundo haz incide en una pantalla opaca la cual cuenta con una apertura con un diámetro de  $25 \mu m$  el cual solo deja pasar aproximadamente el 10% del haz de incidencia, con la finalidad de realizar un barrido en intensidad al perfil del haz. La función del detector de referencia es eliminar el ruido ocasionado por las frecuencias bajas en el haz.

Para la realización del barrido del haz se fijó el detector en un sistema bidimensional de movimiento utilizando motores de pasos con la finalidad de realizar el barrido en pasos micrométricos en los planos horizontal y vertical.

El barrido del haz se realiza en intensidad, graficando la intensidad del haz contra la distancia de barrido. A partir del perfil Gaussiano del haz obtenido, se calculan los tamaños del haz en ambos planos.

Una vez que los detectores reciben la señal óptica, estos la convierten en una señal analógica, la cual es enviada a un osciloscopio y a un digitalizador. La función del digitalizador es convertir la señal analógica enviada por los detectores en una señal digital. Una vez que la señal es procesada por el digitalizador, la señal se envía a la computadora para su procesamiento final y almacenamiento.

La computadora tiene dos funciones, la primera función es controlar los motores

de pasos para la realización del barrido del haz los planos horizontal y vertical, la segunda es procesar y almacenar los datos enviados por los detectores.

El control de motores y el procesado de información se realiza a través de un programa de control y procesado de información realizado en Lab-View.

# Capítulo III

## ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN UN RESONADOR DE TRES ESPEJOS

### III.1 Introducción

El estudio del paso de rayos paraxiales a través de resonadores ópticos, líneas de transmisión y estructuras similares pueden revelar propiedades importantes del sistema. Una de las propiedades geométricas que se puede analizar es la estabilidad del sistema. La propagación de rayos paraxiales a través de varios elementos ópticos se puede describir por medio de las matrices ABCD [Aboites. 1991]. El conocimiento de estas matrices es particularmente útil por la manera en que estas describen la propagación de haces Gaussianos a través de estas estructuras. En el presente capítulo realizaremos un estudio breve de algunos conceptos que nos ayudarán a entender de una mejor manera algunos términos relacionados con los resonadores y haces láser.

Los haces que viajan entre espejos esféricos de un resonador láser experimentan

una acción de enfocamiento; sin embargo en la mayoría de los casos resulta más fácil analizar el viaje de un haz dentro de una cavidad utilizando un sistema de lentes delgadas [Kogelnik, 1965]. En el presente trabajo reemplazamos los espejos de la cavidad por un arreglo de lentes delgadas, con la finalidad de hacer más sencillo el análisis teórico de la cavidad. Para relacionar la distancia focal  $f$  de las lentes equivalentes con el radio de curvatura de los espejos de la cavidad está dada por:

$$f = \frac{R}{2} \quad (\text{Ec. 1})$$

En donde  $R$  representa el radio de curvatura de los espejos. En la figura 3 presentamos una cavidad lineal de tres espejos y un sistema equivalente de lentes delgadas para un viaje completo dentro de la cavidad, utilizando como punto de referencia el espejo  $M_1$ . En la figura 3 podemos observar que los espejos  $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$ , son reemplazados por un sistema de lentes delgadas  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$  respectivamente.

## III.2 Propagación de haces a través de la ley de matrices ABCD

Consideremos la propagación de un rayo luminoso a través de diferentes medios ópticos; el problema será describir su propagación.

Suponiendo  $z$  el eje óptico del sistema y considerando  $y$  una dirección de perpendicular al eje  $z$ , describiremos rayos propagándose en el plano  $y - z$ . Para un punto  $z$  cualquiera, un rayo estará totalmente determinado si se conoce la distancia  $y$  que

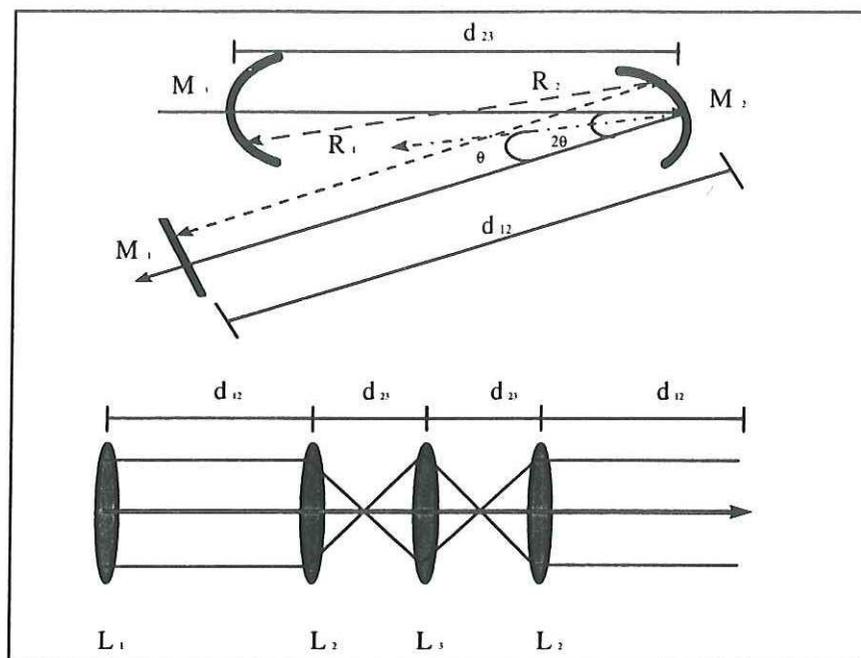


Figura 3: Cavity láser de tres espejos y su equivalente en un arreglo de lentes delgadas para un viaje completo dentro de la cavity.

separa al rayo del eje óptico en ese punto y el ángulo  $\alpha$  que dicho rayo hace con el eje óptico. En la figura 4, el rayo en propagación está totalmente descrito en el punto  $z$  por la pareja  $(y, \alpha)$ .

Durante el siguiente tratamiento, supondremos que el ángulo  $\alpha$  es siempre suficientemente pequeño para que la aproximación  $\tan(\alpha) \approx \sin(\alpha) \approx \alpha$  sea válida; esta es llamada **aproximación paraxial** [Aboites. 1991].

La descripción de un rayo a través de un sistema óptico cualquiera de un punto  $z_1$  a otro  $z_2$  es equivalente a buscar la matriz del sistema óptico que transforma a la pareja  $(y_1, \alpha_1)$  en  $(y_2, \alpha_2)$ . Esto puede escribirse como el producto matricial siguiente:

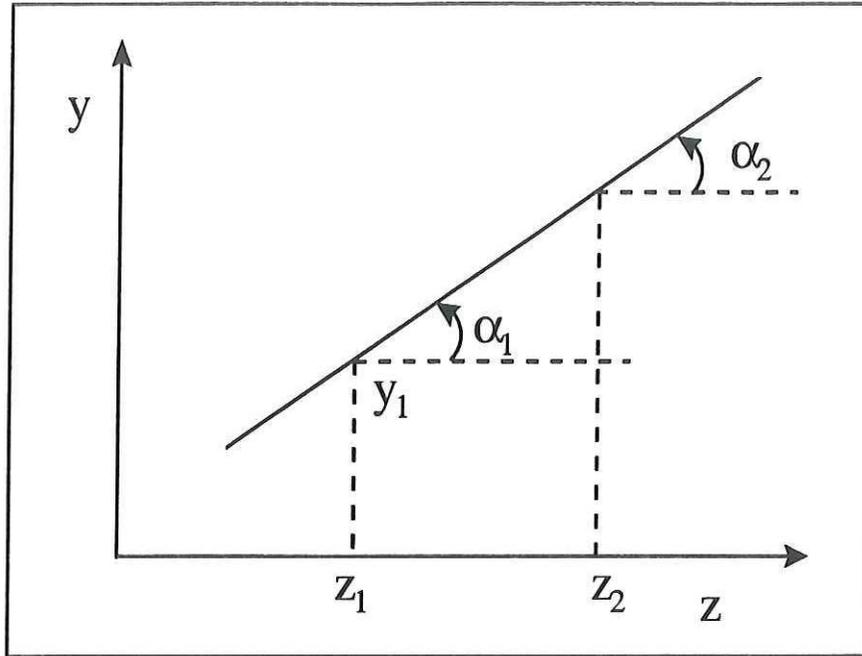


Figura 4: Propagación de rayos en sistemas paraxiales.

$$\begin{pmatrix} y_2 \\ \alpha_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} y_1 \\ \alpha_1 \end{pmatrix}.$$

En donde los elementos  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  dependen del sistema óptico particular.

Consideremos que un resonador está representado por una matriz  $ABCD$  característica [Saleh y Teich, 1991], la cual es el resultado del producto de las matrices  $ABCD$  correspondientes a cada elemento del sistema incluyendo la propagación en el espacio libre; las matrices  $ABCD$  representativas para cada elemento de la cavidad se muestran en la figura 5.

La cavidad mostrada en la figura 3, representa una cavidad de tres espejos, y su equivalente en un arreglo de lentes delgadas. Como ya se mencionó anteriormente, los espejos de la cavidad  $M_1$ ,  $M_2$  y  $M_3$ ; son sustituidos por lentes delgadas  $L_1$ ,  $L_2$  y

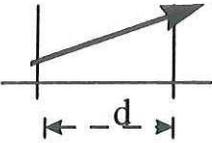
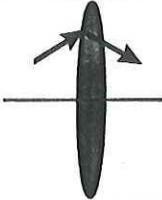
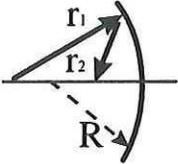
Espacio Libre		$\begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
Lentes Delgadas		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f} & 1 \end{bmatrix}$
Espejos Esféricos		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-2}{R} & 1 \end{bmatrix}$

Figura 5: Matrices ABCD características para cada uno de los elementos de la cavidad.

$L_3$  con la finalidad de hacer más sencillo en análisis. Recordemos que cuando un haz de luz incide en la superficie de un espejo a un ángulo diferente a su normal, el espejo actúa como una superficie con dos diferentes radios de curvatura y tiene por lo tanto dos distancias focales diferentes. Estos generalmente son conocidos como distancia focal tangencial el cual es perpendicular al plano formado por el eje óptico y el haz de incidencia y la segunda es llamada distancia focal sagital, esta es paralela al eje óptico y al haz de incidencia [Jenkins y White. 1957]. Este efecto será estudiado con mayor detalle en el capítulo IV del presente trabajo.

En el presente trabajo nos referiremos a las distancias focales tangencial y sagital como horizontal y vertical respectivamente. Estas distancias focales obedecen a las siguientes relaciones:

$$f_V = \frac{R \cos \theta}{2}, \quad (\text{Ec. 2})$$

$$f_H = \frac{R}{2 \cos \theta}, \quad (\text{Ec. 3})$$

en donde  $f_V$  y  $f_H$  son las distancias focales de los espejos en los planos vertical y horizontal respectivamente;  $\theta$  es el ángulo al que incide el haz en el espejo  $M_2$  y  $R$  es el radio de curvatura del espejo [figura 3].

Considerando el sistema de lentes delgadas dado en la figura 3 y el efecto de astigmatismo causado por la lente  $L_2$  podremos calcular la matriz  $ABCD$  resultante para un sistema de lentes delgadas [Verdeyen J., 1995]

De acuerdo a la figura 3, para el cálculo de la matriz  $ABCD$  resultante tomamos como plano de referencia la lente  $L_1$  la cual representa al espejo de salida por lo tanto el arreglo de matrices para un viaje completo del haz en la cavidad, lo podemos representar de la siguiente manera:

$$ABCD = d_{12} * L_2 * d_{23} * L_3 * d_{23} * L_2 * d_{12} * L_1, \quad (\text{Ec. 4})$$

en donde:  $d_{12}$ ,  $d_{23}$  son las matrices representativas para el espacio libre,  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$ , son las matrices representativas para los lentes de la cavidad mostrados en la figura 3.

Si tomamos en cuenta el efecto de astigmatismo introducido en la cavidad, después de un viaje completo en la cavidad obtendremos una matriz  $ABCD$  resultante para cada uno de los planos (horizontal y vertical) y sustituyendo las matrices carac-

terísticas para cada elemento en un arreglo de lentes delgadas para un viaje completo por la cavidad obtendremos:

$$ABCD_H = d_{12} * L_{2H} * d_{23} * L_3 * d_{23} * L_{2H} * d_{12} * L_1, \quad (\text{Ec. 5})$$

donde la matriz  $ABCD_H$  resultante en términos de matrices para el plano horizontal está dada por:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}_H = \begin{bmatrix} 1 & d_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f_{2H}} & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & d_{23} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f_3} & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & d_{23} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f_{2H}} & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & d_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f_1} & 1 \end{bmatrix}, \quad (\text{Ec. 6})$$

en donde  $f_{2H}$  representa la distancia focal de la lente  $L_2$  en el plano horizontal. De la misma manera, la matriz  $ABCD_V$  para el plano vertical es el producto de las matrices  $ABCD$  para cada elemento como el mostrado en la ecuación 7.

$$ABCD_V = d_{12} * L_{2V} * d_{23} * L_3 * d_{23} * L_{2V} * d_{12} * L_1. \quad (\text{Ec. 7})$$

Sustituyendo las matrices particulares para cada elemento de la ecuación anterior, la matriz  $ABCD_V$  resultante en término de matrices para el plano vertical esta dada por:

$$\begin{bmatrix} A & C \\ B & D \end{bmatrix}_V = \begin{bmatrix} 1 & d_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f_{2V}} & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & d_{23} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f_3} & 1 \end{bmatrix} * \quad (Ec. 8)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & d_{23} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f_{2V}} & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & d_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{-1}{f_1} & 1 \end{bmatrix},$$

en donde  $f_{2V}$  es la distancia focal de la lente  $L_2$  para el plano vertical.

Los parámetros  $A, B, C$  y  $D$  resultantes tanto para el plano horizontal como para el plano vertical son términos importantes para el cálculo de las regiones de estabilidad de la cavidad.

Un punto que tendremos que tomar muy en cuenta es el hecho de que la cavidad será estable si al aplicar la condición general de estabilidad la condición se cumple en ambos planos horizontal y vertical simultáneamente.

### III.3 Cálculo de la condición de estabilidad partiendo de la ecuación de autoconsistencia

En cualquier caso, necesitamos comprobar si existen modos en resonadores complejos con bajo índice de pérdidas y si esto es posible, es necesario calcular el tamaño del haz y el radio de curvatura en cualquier punto de la cavidad [Siegman, 1986].

Para la realización de estos cálculos, aplicaremos la condición de autoconsistencia la cual requiere un eigen modo estable en el resonador. Un eigen modo estable, es aquel que se reproduce a si mismo después de un viaje completo. Como primer

paso escogeremos un plano de referencia en el resonador. Nombremos a  $q_s$  como el parámetro complejo del haz en este punto de referencia. En el estado contínuo y usando la ecuación de autoconsistencia [Yariv, 1991] tendremos:

$$q_s = \frac{Aq_s + B}{Cq_s + D}. \quad (\text{Ec. 9})$$

Si nuevamente consideramos los efectos de astigmatismo en la cavidad y tomando en cuenta que para los planos horizontal y vertical se obtiene una matriz resultante en cada caso, tendremos que:

$$q_{sH} = \frac{A_H q_s + B_H}{C_H q_s + D_H}, \quad (\text{Ec. 10})$$

$$q_{sV} = \frac{A_V q_s + B_V}{C_V q_s + D_V}, \quad (\text{Ec. 11})$$

en donde  $q_{sH}$  y  $q_{sV}$  son los parámetros complejos  $q$  para los planos horizontal y vertical respectivamente. Los parámetros  $A_H$ ,  $B_H$ ,  $C_H$ ,  $D_H$ ,  $A_V$ ,  $B_V$ ,  $C_V$  y  $D_H$ , son los elementos de la matriz resultante para los planos horizontal y vertical.

Resolviendo las ecuaciones 10 y 11 para  $q_{sH}$  y  $q_{sV}$  en ambos planos, obtenemos que la cavidad es estable si se cumple con las siguientes condiciones.

$$\left| \frac{A_H + D_H}{2} \right| < 1, \quad (\text{Ec. 12})$$

$$\left| \frac{A_V + D_V}{2} \right| < 1. \quad (\text{Ec. 13})$$

Con lo que se puede decir que la cavidad es estable si se cumple la condición de estabilidad en ambos planos simultáneamente. En el apéndice A discutiremos con más detalle la obtención de las ecuaciones que presentamos en este capítulo.

### III.4 Cálculo de las regiones de estabilidad

Una vez conociendo los elementos de la matriz  $ABCD$  resultante para cada uno de los planos y conociendo la condición de estabilidad que rige a este tipo de cavidades, se calcularon las regiones de estabilidad para el sistema.

Un aspecto importante que hay que se debe considerar es el hecho que tanto numéricamente como matemáticamente es difícil tratar con las matrices resultantes, por lo cual se realizó una simulación en computadora la cual nos auxilió en el cálculo de las regiones en donde la condición de estabilidad se cumple para ambos planos simultáneamente [Apéndice B].

Los cálculos de las regiones de estabilidad para la cavidad se realizaron para diferentes valores del ángulo de incidencia  $\theta$  al que se encuentra colocado el espejo  $M_2$ .

El cálculo se inicia fijando el ángulo del espejo  $M_2$  a un valor constante, posteriormente se va a realizar un barrido con respecto a la longitud de los brazos de la cavidad verificando la ecuación general de estabilidad para cada punto de la cavidad. Recordemos que dado el astigmatismo introducido en la cavidad, la condición general de estabilidad tiene que cumplirse simultáneamente para ambos planos horizontal y vertical para que la cavidad sea estable. Este procedimiento se realizó para diferentes

ángulos, sin embargo como resultados presentamos el análisis realizado a la cavidad cuando el ángulo  $2\theta$  es  $6^0$ ,  $9^0$ ,  $12^0$ ,  $18^0$  y  $22^0$  respectivamente.

La finalidad de estos cálculos es conocer los parámetros óptimos a los cuales podremos alinear la cavidad y contar con un láser estable. Los resultados obtenidos a través de este cálculo se muestran en las figuras 6, 7, 8, 9 y 10.

Las figuras muestran en la zona sombreada de las gráficas, la región de estabilidad para la cavidad de tres espejos mostrada en la figura 3 a diferentes valores del ángulo  $2\theta$ . Los parámetros graficados son las distancias  $d_{23}$  (distancia entre el espejo  $M_2$  y  $M_3$  o longitud de brazo corto) contra el parámetro  $d_{12}$  (distancia entre el espejo  $M_1$  y  $M_2$  o longitud de brazo largo).

En la figura 6 podemos observar que para este tipo de configuraciones, teóricamente es posible construir una cavidad con una longitud  $d_{12} = 8m$ , cuando  $d_{23} = 7.56cm$ . Sin embargo, un punto que tenemos que tomar en cuenta es que estos son cálculos teóricos en los cuales no se toman en cuenta las pérdidas en la cavidad tales como reflexión y esparcimiento. Experimentalmente fue posible alinear una cavidad estable con los siguientes parámetros:  $d_{23} = 7.56cm$ ,  $d_{12} = 1.5m$ . En base a esto podemos concluir que para un ángulo  $2\theta = 6^0$  teóricamente es posible construir una cavidad con una longitud de brazo largo  $d_{12} = 8m$  solo si la longitud del brazo corto  $d_{23} = 7.55cm$  o  $d_{23} = 7.56cm$ , sin embargo experimentalmente se comprobó que los parámetros óptimos a los que es posible alinear una cavidad estable son los siguientes: si la longitud del brazo  $d_{12}$  se encuentra en el intervalo  $50cm \leq d_{12} \leq 1.5mt$ , la longitud de brazo corto  $d_{23}$  debe encontrarse en el intervalo  $7.5cm < d_{23} < 7.56cm$ . Cuando se requiera que la cavidad sea estable variando la longitud del brazo  $d_{12}$  en

el intervalo  $20\text{cm} \leq d_{12} \leq 50\text{cm}$ , la longitud del brazo corto debe encontrarse en el intervalo  $7.5\text{cm} \leq d_{23} \leq 7.65\text{cm}$ . La principal desventaja de incrementar la longitud del brazo corto en esta cavidad se va a reflejar en pérdidas en la potencia de salida. El alargamiento de la longitud del brazo  $d_{23}$  de la cavidad afecta en forma directa al tamaño de la cintura del haz, en la cual se debe encontrar localizado el medio amplificador, ya que es en este punto en donde se encuentra concentrada la mayor cantidad de energía del haz de la cavidad de colorante. los cálculos del tamaño del haz en la cavidad los observamos en el capítulo IV de este documento.

La figura 7 muestra el mapa de estabilidad cuando el ángulo al que incide la luz en el espejo es  $2\theta = 9^\circ$ . Como se puede observar en esta figura, la longitud  $d_{12}$  teórica a la que se puede construir una cavidad estable para esta cavidad es de  $3.75\text{m}$ , cuando la longitud del brazo corto varía dentro de los siguientes parámetros.  $7.5\text{cm} < d_{23} < 7.56\text{cm}$ . Experimentalmente fue posible alinear una cavidad estable bajo las siguientes condiciones:  $d_{23} = 7.56\text{cm}$ , y  $d_{12} = 1\text{m}$  máximo. Vale la pena destacar que para fines de demostración es posible alinear la cavidad a longitudes mayores a  $1\text{m}$ , sin embargo para fines prácticos o de estudio, la cavidad no es totalmente estable a longitudes mayores de un metro. Nuevamente resaltamos que para esta configuración de cavidad, existe una zona en la región de estabilidad en la cual es posible obtener una mayor eficiencia del láser. Para la configuración presentada en la figura 7 la cavidad es totalmente estable cuando  $7.55\text{cm} \leq d_{23} \leq 7.58\text{cm}$  y  $d_{12} \leq 1\text{m}$ . Para casos en los que la cavidad presenta una longitud de brazo largo  $d_{12} = 30\text{cm}$ , el rango de longitudes de brazo corto  $d_{23}$  para los cuales la cavidad es estable son  $7.5\text{cm} \leq d_{23} \leq 7.7\text{cm}$ , recordemos que al igual que en la configuración anterior entre

mayor sea la longitud de brazo corto la ganancia de la cavidad disminuye.( pérdidas en la cavidad se incrementan.)

En la figura 8 se muestra el diagrama de estabilidad bidimensional para una cavidad cuyo ángulo  $2\theta = 12^\circ$ . Como podemos observar en esta gráfica la longitud máxima a la que se puede alinear teóricamente la cavidad es  $d_{12} = 2m$  cuando  $7.5cm \leq d_{23} \leq 7.56cm$ ; sin embargo, como podemos observar en la gráfica 8 la región de estabilidad en este punto es muy angosta por lo cual experimentalmente hace imposible construir una cavidad estable en esta región . Experimentalmente fue posible alinear la cavidad bajo los siguientes parámetros:  $d_{23} = 7.56cm$ ,  $d_{12} = 60cm$ . Nuevamente podemos decir que tanto teórica como experimentalmente la mejor zona para la cual es posible alinear la cavidad es bajo los siguientes parámetros;  $d_{23} = 7.65cm$  y para  $30cm \leq d_{12} \leq 60cm$ .

En la figura 9 observamos que la región de estabilidad para una cavidad cuyo ángulo  $2\theta = 18^\circ$ , se encuentra limitada, sin embargo, el parámetro  $d_{23}$  permanece constante para todos los ángulos. Teóricamente en esta configuración observamos que es posible alinear la cavidad para una longitud de brazo largo  $d_{12} = 1m$ , cuando  $d_{23} = 7.56cm$ . Experimentalmente la máxima longitud de brazo largo a la que se alineó la cavidad es de 60cm. Nuevamente recordemos que es posible hacer emitir la cavidad a longitudes mayores pero dado que la región de estabilidad es demasiado angosta para longitudes mayores a 60 cm, la cavidades no es completamente estable y no es posible mantener emitiendo a la cavidad por periodos largos de tiempo. Los parámetros para los cuales es posible mantener la cavidad estable y alineada son:  $20cm \leq d_{12} \leq 60cm$  y  $7.55cm \leq d_{23} \leq 7.58cm$ .





La gráfica 10 muestra el análisis teórico de estabilidad realizado a la cavidad cuando el ángulo  $2\theta = 22^\circ$ , teórica y experimentalmente, este es el último ángulo para el cual la cavidad es estable. Teóricamente las distancias máximas a la cual es posible alinear la cavidad es para los siguientes parámetros;  $d_{12} = 60cm$  y  $d_{23} = 7.8cm$ , sin embargo experimentalmente la cavidad deja de ser estable a una distancia  $d_{12} = 30cm$  observando que la región óptima a la cual la cavidad es experimentalmente estable es  $d_{12} = 20cm$ , y  $d_{23} = 7.8cm$ .

No obstante que es posible alinear cavidades con gran longitud en sus brazos si utilizamos un ángulo  $2\theta$  pequeño; el parámetro  $d_{23}$ , juega un papel muy importante dentro del análisis de la estabilidad y del astigmatismo, ya que es este parámetro el que va a determinar que tanto podemos extender la longitud de la cavidad. Este punto lo podemos observar en las figuras 6, 7, 8, 9. En ellas se puede observar que la distancia  $d_{23}$  teórica óptima a la que podemos colocar los espejos de la cavidad y lograr construir un láser con una longitud superior a un metro se encuentra en el intervalo de 7.5 y 7.57cm.

En la tabla I podemos observar la dependencia existente entre el ángulo  $2\theta$  y la longitud  $d_{12}$  a la que es posible construir una cavidad estable, en donde la longitud del brazo corto de la cavidad se mantiene constante  $d_{23} = 7.56cm$ . Haciendo una comparación entre las figuras 6, 7, 8, 9 y 10 nos damos cuenta que la región para la cual la cavidad es estables varía dependiendo las condiciones a la que se haga la alineación de la cavidad. Experimentalmente la eficiencia de los datos mostrados en esta tabla fueron explicados en los párrafos anteriores. Basados en estos cálculos es posible diseñar una cavidad estable.

Un punto importante que hay que mencionar es el hecho de que este tipo de análisis no se restringe a una cavidad de tres espejos y es posible realizar este mismo análisis a una cavidad con cualquier cantidad de espejos y con cualquier medio amplificador; sin embargo en este análisis se trabajó con un láser de colorante de tres espejos y basándonos en el análisis de estabilidad realizado anteriormente los parámetros iniciales a los que se alineó la cavidad son los siguientes:  $2\theta = 9^\circ$ ,  $d_{12} = 30 \text{ cm}$ ,  $d_{23} = 7.65 \text{ cm}$  estable con una potencia de salida de  $450 \text{ mW}$  y una longitud de onda de  $590 \text{ nm}$ , sin embargo para la realización del análisis de astigmatismo se realizaron muestreos en los mismos ángulos a los que se analizó la estabilidad pero variando la longitud de la cavidad, los resultados teóricos y experimentales correspondientes al análisis de astigmatismo serán presentados en el capítulo IV de este documento.

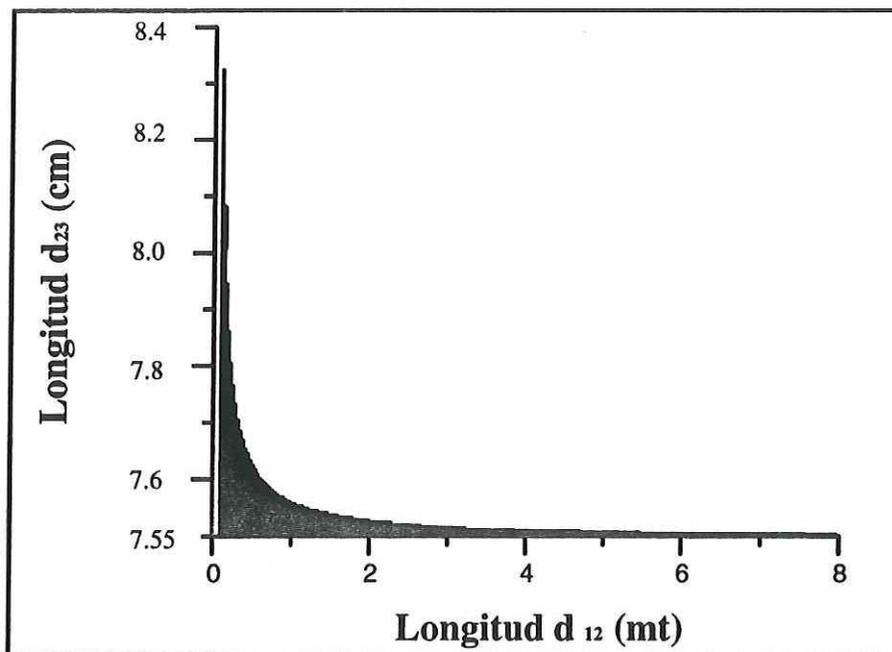


Figura 6: Análisis teórico de estabilidad cuando  $2\theta = 6^\circ$ .

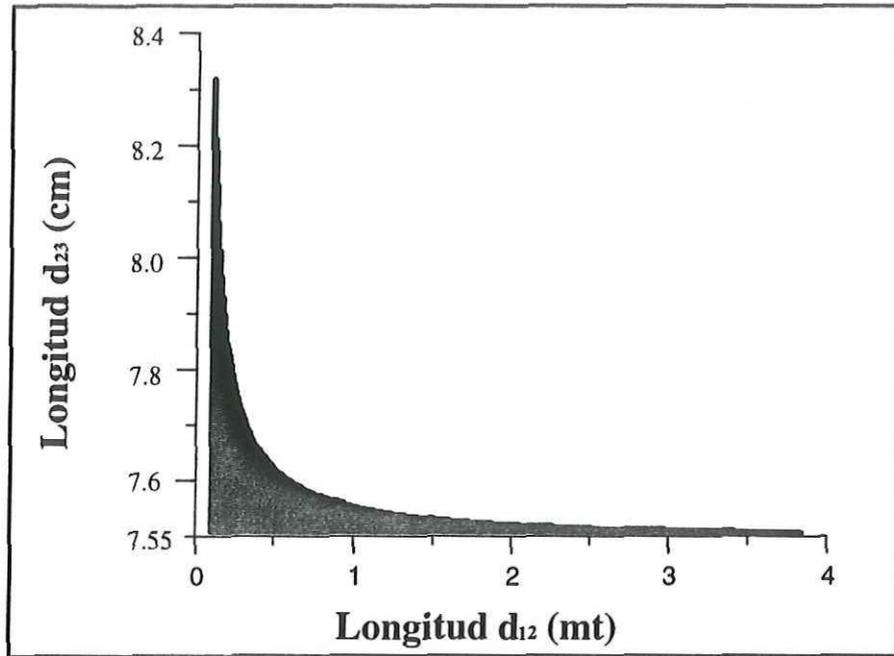


Figura 7: Análisis teórico de estabilidad cuando  $2\theta = 9^\circ$ .

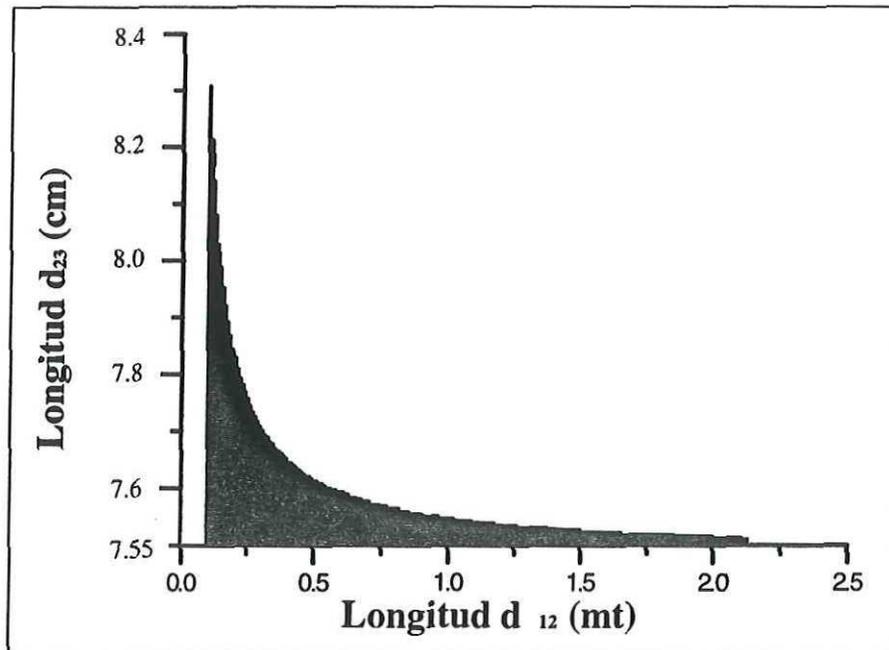


Figura 8: Análisis teórico de estabilidad cuando  $2\theta = 12^\circ$ .

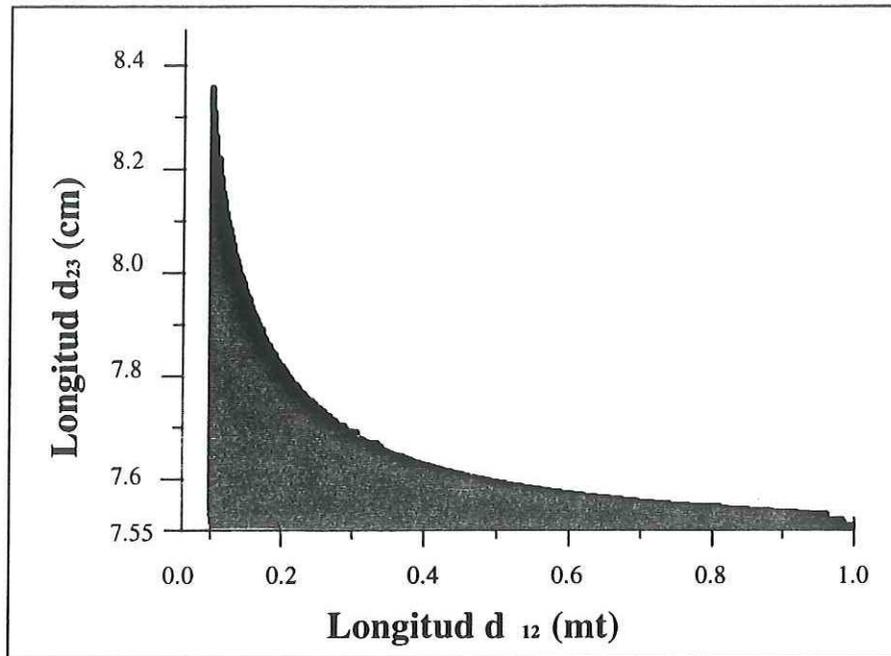


Figura 9: Análisis teórico de estabilidad cuando  $2\theta = 18^\circ$ .

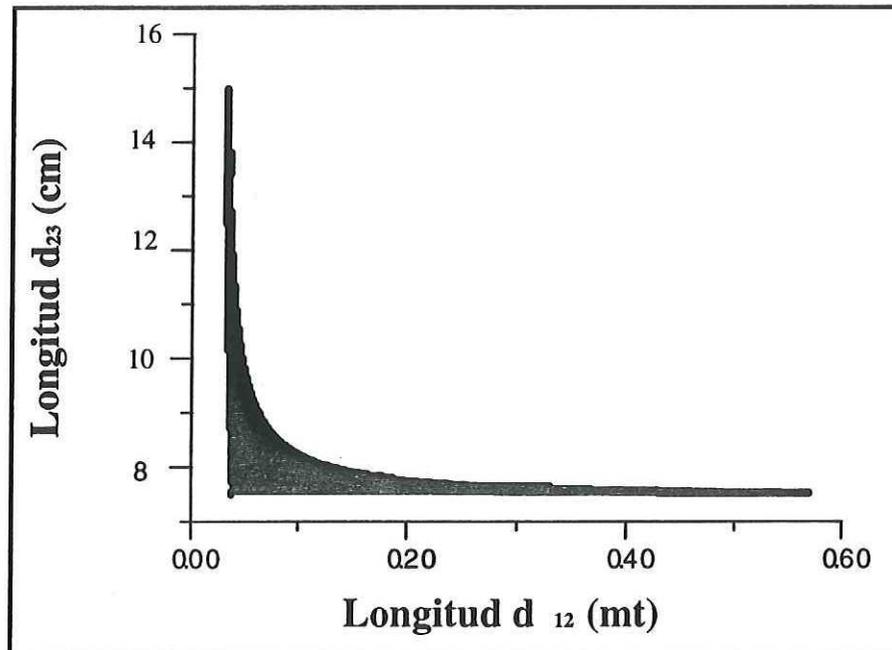


Figura 10: Análisis teórico de estabilidad cuando  $2\theta = 22^\circ$ .

Tabla I: Parámetros teóricos de estabilidad de la cavidad para diferentes ángulos  $\theta$  y diferentes longitudes. En donde la longitud del brazo  $d_{23}$  permanece constante en 7.56cm y se varia la longitud del brazo  $d_{12}$ . Marcamos como cavidad estable (Es) y como cavidad no estable (NEs).

$d_{12}[m]$	$6^\circ$	$9^\circ$	$12^\circ$	$18^\circ$	$22^\circ$
0.5	Es	Es	Es	Es	Es
1	Es	Es	Es	Es	NEs
1.5	Es	Es	Es	NEs	NEs
2	Es	Es	Es	NEs	NEs
2.5	Es	Es	NEs	NEs	NEs
3	Es	Es	NEs	NEs	NEs
3.5	Es	Es	NEs	NEs	NEs
4	Es	NEs	NEs	NEs	NEs
4.5	Es	NEs	NEs	NEs	NEs
5	Es	NEs	NEs	NEs	NEs
5.5	Es	NEs	NEs	NEs	NEs
6	Es	NEs	NEs	NEs	NEs
6.5	Es	NEs	NEs	NEs	NEs
7	Es	NEs	NEs	NEs	NEs
7.5	Es	NEs	NEs	NEs	NEs

# Capítulo IV

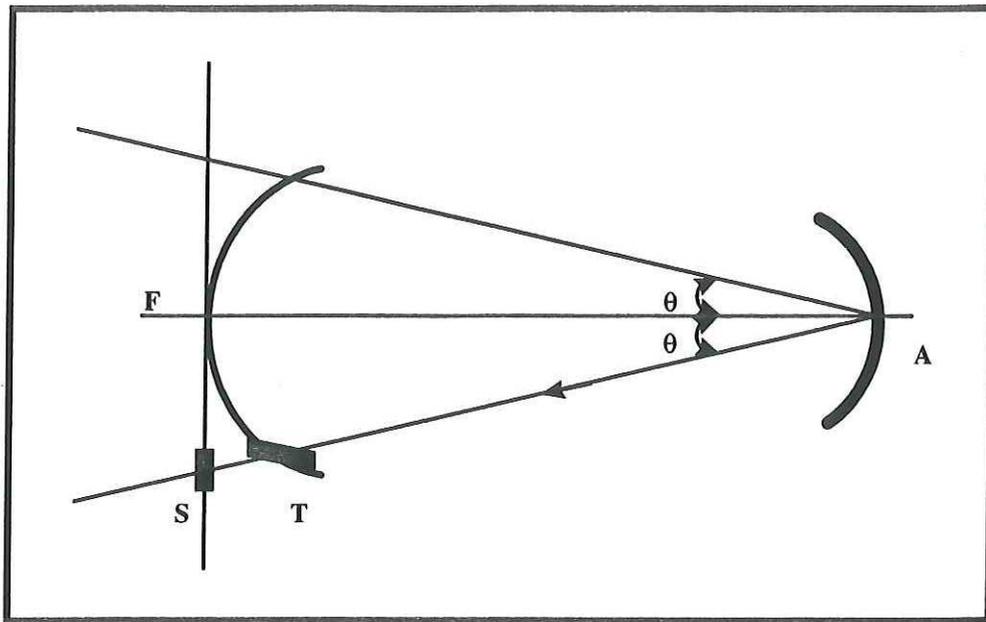
## ANÁLISIS DE ASTIGMATISMO EN UN RESONADOR DE TRES ESPEJOS

### IV.1 Astigmatismo

El astigmatismo es una aberración monocromática, la cual provoca una distorsión en la imagen; esta distorsión ocurre cuando un punto objeto se sitúa a una distancia  $d$  del eje óptico de un espejo [Zajac, 1977]. Los rayos incidentes, ya sean paralelos o no, se encuentran a un ángulo  $\theta$  con respecto al eje del espejo. El resultado, es que en lugar de obtener un punto en el plano imagen, se obtienen dos líneas perpendiculares entre sí. El efecto de astigmatismo se ilustra en la figura 11. En esta figura, los rayos reflejados convergen en dos líneas; una vertical( $V$ ) y otra horizontal( $H$ ). Los rayos reflejados en el plano RASE del espejo, son enfocados en el punto  $H$  del plano objeto, mientras el abanico de rayos reflejados en el plano JAKE del espejo, se cruzan o se enfocan en el punto  $V$  en el plano objeto. Si una pantalla se coloca en un punto  $E$



está dada por la distancia entre la superficies  $H$  y  $V$  medidas a lo largo de los rayos resultantes.



*Figura 12: Superficie astigmática para en espejo esférico.*

Las ecuaciones que rigen la posición de las dos imágenes astigmáticas son [Jenkins y White, 1957]:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'_H} = -\frac{2 \cos \theta}{R}, \quad (\text{Ec.14})$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'_V} = \frac{2}{R \cos \theta}, \quad (\text{Ec.15})$$

donde  $s$  es la posición a la que se encuentra el plano objeto, y  $s'_V$ ,  $s'_H$  es la posición a la que se ubica el plano imagen.

En ambos casos  $s$  y  $s'$  se miden a lo largo del rayo principal. El ángulo  $2\theta$  es el ángulo de oblicuidad del rayo principal, y  $R$  es el radio de curvatura del espejo.

La elipticidad y la índice de astigmatismo entre los haces que viajan en el plano horizontal y vertical, son dos aspectos importantes que debemos definir para realizar en una forma más precisa el análisis de astigmatismo.

La elipticidad es la razón entre el haz en el plano horizontal y el plano vertical, y está dada por la relación:

$$E = \frac{\omega_H}{\omega_V} \quad (\text{Ec.16})$$

El índice de astigmatismo, es la diferencia existente entre el haz en el plano horizontal y el plano vertical, esta diferencia va a estar dada por:

$$G.a = \frac{2|\omega_H - \omega_V|}{\omega_H + \omega_V} \quad (\text{Ec.17})$$

#### **IV.1.1 Astigmatismo en resonadores de tres espejos.**

En una cavidad de tres espejos como la mostrada en la figura 3 , existen dos elementos que provocan astigmatismo, el espejo central y el medio amplificador colocado al ángulo de Brewster [Kogelnik *et. al.*, 1972]. El astigmatismo como ya fue descrito, significa que el grupo de rayos que inciden en el plano horizontal, se comportan de diferente manera que los que inciden en el plano vertical. En esta sección analizaremos la cavidad a través del métodos de propagación de rayos paraxiales, pero pondremos un énfasis especial en el espejo  $M_2$  como principal fuente de astigmatismo. Recordemos que para el análisis realizado no se tomó en cuenta el astigmatismo introducido por la película de colorante, por ser esta de un espesor muy pequeño. Este estudio nos

proporcionará los elementos de las matrices **ABCD** correspondientes a la propagación de rayos y los cuales serán utilizados para llevar a cabo el estudio de estabilidad y astigmatismo de la cavidad.

Es bien conocido que los rayos inciden en el espejo  $M_2$  a un ángulo  $\theta$  con respecto a la normal del espejo, provocando que en el plano imagen los rayos que viajan en el plano horizontal sean enfocados en diferente posición que los rayos que viajan en el plano vertical [Monks, 1937]; esto se refleja en dos diferentes distancias focales efectivas  $f_H$  y  $f_V$ , las cuales se relacionan con la distancia focal actual  $f$  del espejo por las ecuaciones 2 y 3, en donde  $\theta$  es el ángulo de incidencia (figura 3).

## IV.2 Características de los láseres de colorante con cavidad de tres espejos

En aplicaciones con láseres de colorante de onda continua existe la necesidad de diseñar una cavidad que nos provea un foco intracavidad en el cual el haz sea altamente concentrado [Collins, 1964]. Otros de los requisitos de diseño necesarios en este tipo de láseres es contar con un amplificador en el cual tengamos pleno dominio de la longitud de la cavidad (típicamente  $1m$  o mayor) en el caso de querer ensamblar un láser de modos amarrados [Dienes, *et. al.*, 1971, Kuizenga, 1971 y Diels, 1996]. Este tipo de requerimientos solo pueden ser cubiertos con resonadores de tres espejos como el que se muestra en la figura 3. Este tipo de resonadores son preferidos porque las pérdidas en el espejo central en la práctica pueden ser mucho menores que las

pérdidas de Fresnel y las pérdidas ocasionadas por lentes colocados en el interior de la cavidad.

Hasta el momento hemos asumido que la estructura del modo transversal del láser de colorante es un modo  $TEM_{00}$  libre de astigmatismo. Pero de hecho la orientación de los espejos esféricos de la cavidad con respecto al haz de incidencia, altera la estructura transversal del modo fundamental  $TEM_{00}$ . Si tenemos un haz que incide en un espejo esférico a un ángulo diferente al de incidencia normal, causará que en el plano objeto obtengamos un haz con aberración de astigmatismo. Como ya se mencionó, el medio amplificador, en nuestro caso una película delgada de colorante, también es una fuente de astigmatismo porque este capta un haz láser con perfil Gaussiano altamente enfocado con un ángulo de incidencia, sin embargo al ser el espesor de la película de colorante de alrededor de  $200\mu m$  de espesor, el efecto de astigmatismo provocado por dicho medio amplificador es despreciado en este trabajo.

El astigmatismo es una aberración que distorsiona el modo  $TEM_{00}$  deseado del láser, dicha distorsión también afecta la estabilidad del resonador y reduce la eficiencia de conversión. En la mayoría de las cavidades diseñadas actualmente, el astigmatismo es compensado seleccionando los ángulos apropiados del resonador en los espejos esféricos o adicionando otro elemento óptico que introduce en la cavidad astigmatismo con un signo contrario al producido por el espejo  $M_2$ . Esto es posible aún para llevar a cabo una compensación en forma simultánea del astigmatismo y de la coma en los casos en que la cavidad presente estas aberraciones [Jenkins y White, 1957].

Utilizando una configuración como la mostrada en la figura 3, podemos seguir el análisis realizado por Kogelnik [Kogelnik *et. al.* 1972] para calcular el astigmatismo

introducido en la cavidad por el espejo esférico. La película de colorante con un espesor  $t$  se localiza entre los dos espejos esféricos ( $M_2$ ,  $M_3$ ) y es colocada al ángulo de Brewster relativo a la dirección de propagación del haz. Nuevamente recordemos que en esta geometría existen dos fuentes de astigmatismo, la primera es la película de colorante y la segunda es el espejo  $M_2$ . Afortunadamente, el signo del astigmatismo es opuesto para estas dos fuentes, y los ángulos a los que colocamos el espejo, cancela al astigmatismo provocado por la película de colorante. Dado que el espesor la película de colorante es demasiado pequeño y el radio de curvatura del espejo es de  $5\text{cm}$ , el ángulo de incidencia del haz  $\theta$  debe ser pequeño. Este tipo de ángulos no siempre son prácticos, por lo tanto se han utilizado otros métodos para llevar a cabo la compensación de astigmatismo, esto incluye adicionar a la cavidad lentes compensadoras, agregar a la cavidad espejos esféricos colocados a incidencia normal o cambiar la longitud de la cavidad. Este último método al igual que la variación del ángulo  $2\theta$  son dos métodos que se van a estudiar en este trabajo.

### **IV.3 Análisis teórico y experimental del astigmatismo.**

Una vez conocidos los parámetros básicos que se tienen que considerar para el análisis del astigmatismo en este tipo de cavidades, llevaremos a cabo un análisis teórico y experimental del astigmatismo. Este análisis se va a realizar en dos etapas; en la primera estudiaremos la contribución del ángulo  $2\theta$  al astigmatismo de la cavidad; en

la segunda etapa estudiaremos la influencia de la longitud de la cavidad al astigmatismo. Teóricamente el análisis del astigmatismo se realizó a través de un programa de computación [apéndice B], el cual como primer paso verifica si la cavidad a estudiar es estable, una vez realizado este procedimiento y a través de la ecuación de autoconsistencia en la cual el parámetro complejo  $q$  contiene la información relacionada con el tamaño y el radio de curvatura del haz; se hace la propagación del haz a través de la cavidad y una vez llegado el haz al final de la cavidad y nuevamente a través del parámetro complejo  $q$  se propaga el haz hasta el punto  $T$  colocado a  $20\text{cm}$  fuera de la cavidad (figuras 13, 16, 19 y 22) en donde se analizó el perfil del haz.

Experimentalmente, se realizó un barrido en intensidad al perfil Gaussiano del haz en el plano horizontal y vertical a través de un sistema de detección mostrado en la figura 1.

### **IV.3.1 Análisis del astigmatismo producido por el espejo $M_2$**

En láseres con cavidades de tres espejos, una de sus principales desventajas es la presencia de astigmatismo provocado por el ángulo  $\theta$  al que incide el haz en el espejo  $M_2$ , sin embargo existen diferentes métodos para controlar este astigmatismo; uno de ellos consiste introducir en la cavidad elementos ópticos compensadores, los cuales introducen en la cavidad un astigmatismo con signo contrario al astigmatismo producido por el espejo  $M_2$ , sin embargo la principal desventaja de este método lo encontramos al construir láseres de modos amarrados, ya que dicho elemento compensador provoca dispersión en los pulsos [Diels, 1996]. Otro inconveniente es el costo del elemento

óptico compensador.

La forma que proponemos el control del astigmatismo para este tipo de láseres, consiste en un estudio completo de la cavidad basando los cálculos en la propagación de rayos y el principio de las matrices  $ABCD$ , por medio de las cuales calculamos la matriz resultante para la cavidad y a partir de este cálculo y utilizando la ecuación de autoconsistencia analizaremos los parámetros para los cuales la cavidad es estable y parcialmente libre de astigmatismo en un punto  $T$  fuera de la cavidad (figura 13).

Teóricamente a través del programa realizado en computadora para la propagación de haces en la cavidad obtenemos la gráfica 13 para una cavidad con las siguientes características;  $d_{12} = 30cm$ ,  $d_{23} = 7.60cm$ ,  $2\theta = 9^\circ$  y  $T = 20cm$ .

En la gráfica 13 observamos el comportamiento teórico del perfil de un haz en los planos horizontal y vertical al propagarse un viaje completo dentro de la cavidad. El viaje del haz dentro de la cavidad comienza en el espejo  $M_1$ , terminando en el punto  $S$  de la figura. Notemos que el punto  $S$  de la cavidad se encuentra localizado en el espejo de salida  $M_1$  después de un viaje completo del haz por la cavidad; a partir de este punto el haz se propaga hasta el punto  $T$  en este punto se calculó el tamaño del haz en ambos planos ( $H, V$ ). El punto  $T$  se ubica a  $20cm$  fuera de la cavidad. De la gráfica teórica obtenida es importante resaltar los siguientes aspectos:

- Al inicio del recorrido del haz a través de la cavidad, existe una diferencia en el tamaño del haz en los planos horizontal y vertical. El astigmatismo introducido en este espejo, es generado por el ángulo de inclinación al que se encuentra el espejo  $M_2$ , en el cual al incidir el haz de propagación a un ángulo diferente

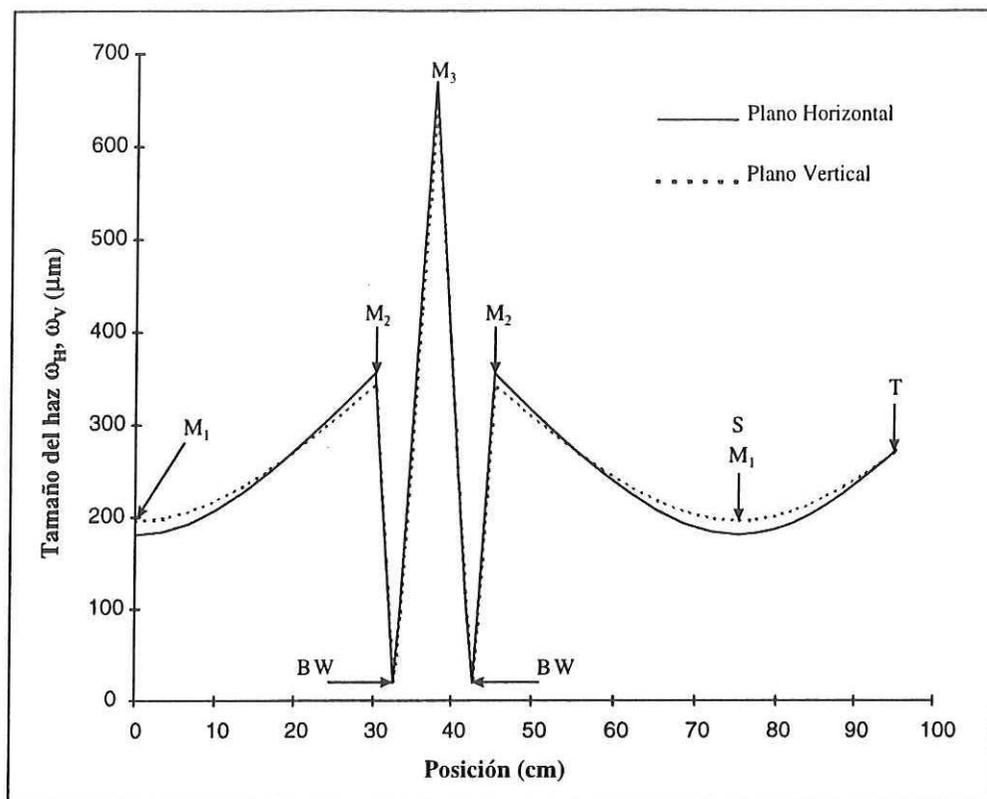


Figura 13: Variación del tamaño del haz al propagarse en un viaje completo dentro de la cavidad cuando  $2\theta = 9^\circ$ .

al ángulo de la normal del espejo, provoca que la distancia focal tanto para el plano horizontal como para el plano vertical sean diferentes, generando con esto un cierto grado de astigmatismo en la cavidad. Este efecto se ilustra en la figura12.

- El medio amplificador como lo podemos observar en la figura 13, será colocado en el punto *BW* en el cual se localiza el haz con el menor diámetro; a este punto se le conoce como cintura del haz (beam waist), la cual se localiza entre los espejos  $M_2$  y  $M_3$ . este es un punto en el cual el haz se encuentra totalmente enfocado y libre de astigmatismo, dado que el haz en ambos planos tiene el

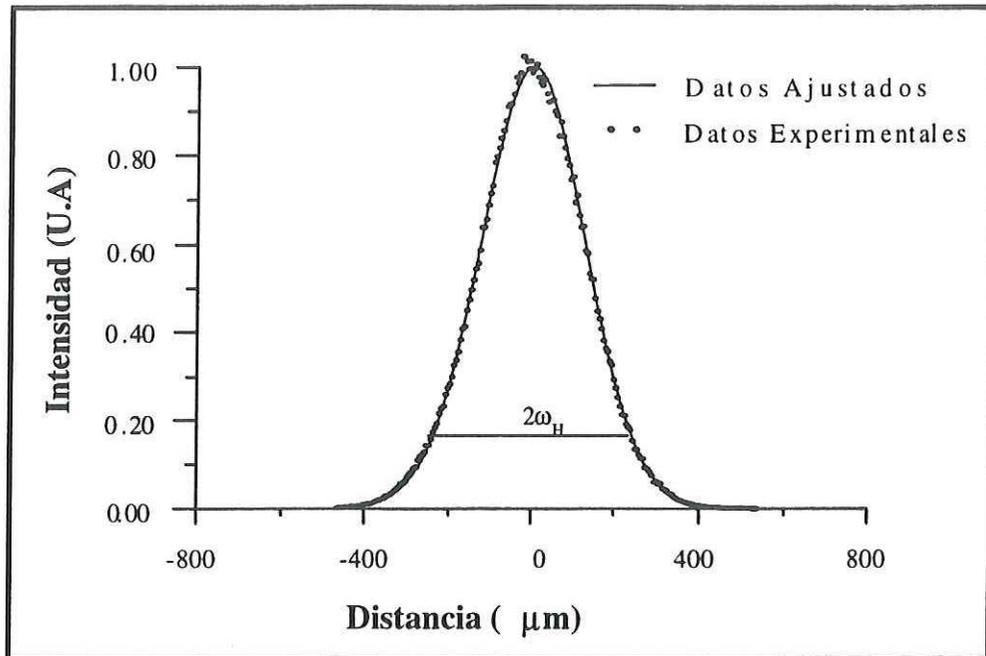


Figura 14: Perfil Gaussiano del haz para el plano horizontal cuando  $2\theta = 9^\circ$ .

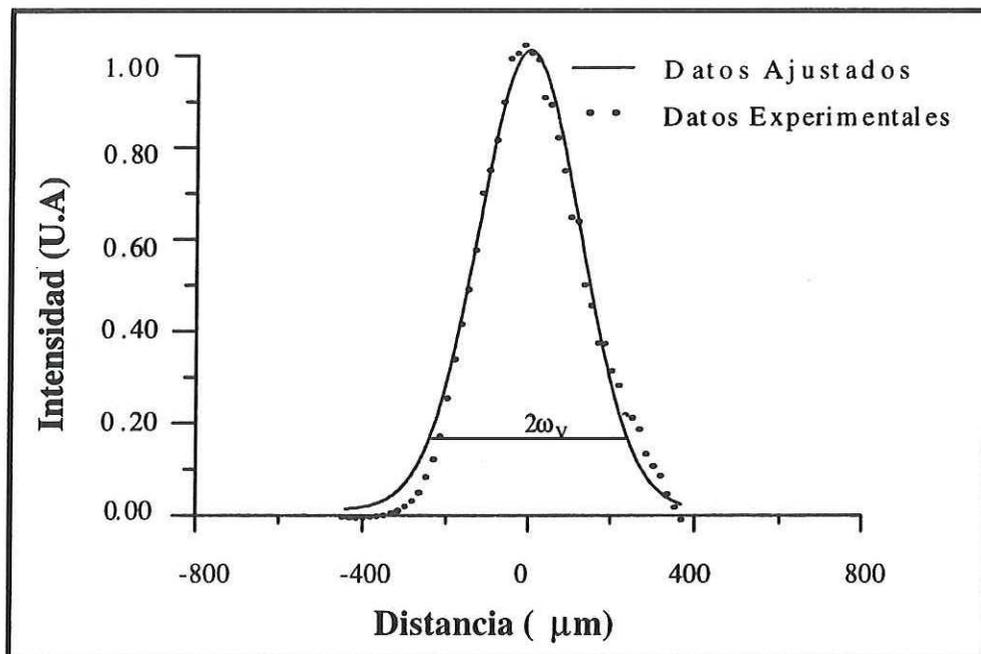


Figura 15: Perfil Gaussiano del haz para el plano vertical cuando  $2\theta = 9^\circ$ .

mismo diámetro. La compensación de astigmatismo en este punto es lograda dado que el haz que incide en el espejo  $M_3$  se encuentra a un ángulo cero con respecto a su normal, generando un haz libre de astigmatismo en la cintura del haz.

- Una vez que el haz llega al espejo de salida  $M_1$  (punto S en la figura 13), el 5% del haz continua su propagación en el espacio libre y podemos observar que a 20cm fuera de la cavidad (punto T) el tamaño del haz en los planos horizontal y vertical son aproximadamente iguales, por lo podemos decir que este es el punto en el cual el haz se encuentra parcialmente libre de astigmatismo.

Experimentalmente se realizó un barrido en intensidad al perfil del haz a 20cm fuera de la cavidad. Si sabemos que la intensidad de un haz con perfil Gaussiano está dado por:

$$I(r) = I_0 e^{-\frac{2r^2}{\omega^2}}, \quad (\text{Ec.18})$$

en donde  $I_0$  es la intensidad máxima del haz y  $\omega$  es el tamaño del haz (spot size).

A partir de la ecuación 18 podemos calcular  $\omega$  como el punto  $1/e^2$  de la intensidad máxima del haz ( $I_0$ ).

El arreglo experimental utilizado para este experimento se puede observar en la figura 1. A partir del barrido del haz se obtuvieron los siguientes resultados:

La figura 14, representa la gráfica normalizada del perfil Gaussiano experimental y ajustado del haz de salida para el plano horizontal. Este ajuste se hace a través del método de mínimos cuadrados; el ajuste realizado a los datos experimentales se hizo

con la finalidad de calcular el tamaño del haz ( $\omega$ ) en el punto T fuera de la cavidad.

La figura 15 se muestra la gráfica normalizada del perfil Gaussiano experimental y ajustado para el haz de salida en el plano vertical. Nuevamente, los datos experimentales son ajustados a una función Gaussiana con la finalidad de calcular el tamaño del haz en el punto de detección.

Como se puede observar en las gráficas 14 y 15, el láser se encuentra oscilando en el modo  $TEM_{00}$ . Numéricamente se realizó la comparación del tamaño del haz en ambos planos a partir de los datos experimentales con la finalidad de observar la variación del tamaño del haz de la cavidad al ser alineada a  $9^0$ .

$$\omega_H = 252\mu m,$$

$$\omega_V = 249\mu m.$$

Teórica y experimentalmente, se compararon los resultados obtenidos con la finalidad de corroborar los resultados obtenidos por ambos métodos obteniendo los resultados mostrados en la tabla II.

Una vez analizado teórica y experimentalmente el astigmatismo para una cavidad cuyo ángulo de inclinación  $2\theta = 9^0$ ; se realiza el mismo procedimiento a cavidades cuyos ángulos de inclinación  $2\theta$  son 12 y 18 grados, recordemos que la longitud de la cavidad permanece constante en ambos casos  $d_{12} = 30cm$ ,  $d_{23} = 7.60cm$ , y la posición a la que se hicieron las lecturas fuera de la cavidad  $T = 20cm$ .

A continuación presentamos otra serie de gráficas teóricas y experimentales por medio de las cuales podemos observar en una forma más clara la importancia de graduar el ángulo  $2\theta$  con la finalidad de controlar el astigmatismo en la cavidad.

Teóricamente podemos observar que a medida que el ángulo  $2\theta$  se incrementa, la

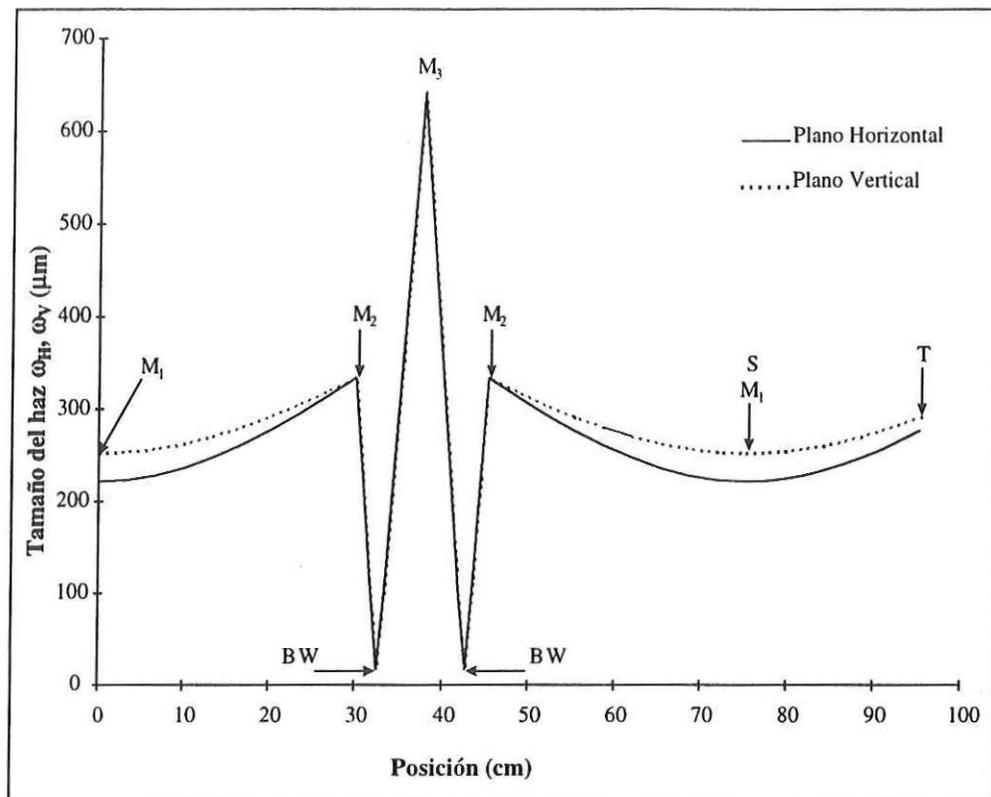


Figura 16: Variación del tamaño del haz al propagarse en un viaje completo dentro de la cavidad, cuando  $2\theta = 12^\circ$ .

diferencia entre el tamaño del haz en el plano horizontal y vertical en el punto  $S$  (espejo  $M_1$ ) de la cavidad es mayor; lo que indica que el grado de astigmatismo del haz de salida depende en forma directa del ángulo al que son colocados los espejos en la cavidad.

En la figura 16, observamos que el haz que se propaga entre los espejos  $M_2$  y  $M_3$  se encuentra prácticamente libre de astigmatismo; por lo cual podemos decir que el comportamiento del tamaño del haz en ambos planos es similar al presentado en la figura 13. Otro aspecto importante que se tiene que remarcar es el hecho de que en el punto  $S$  el cual corresponde al plano de salida de la cavidad, el grado de

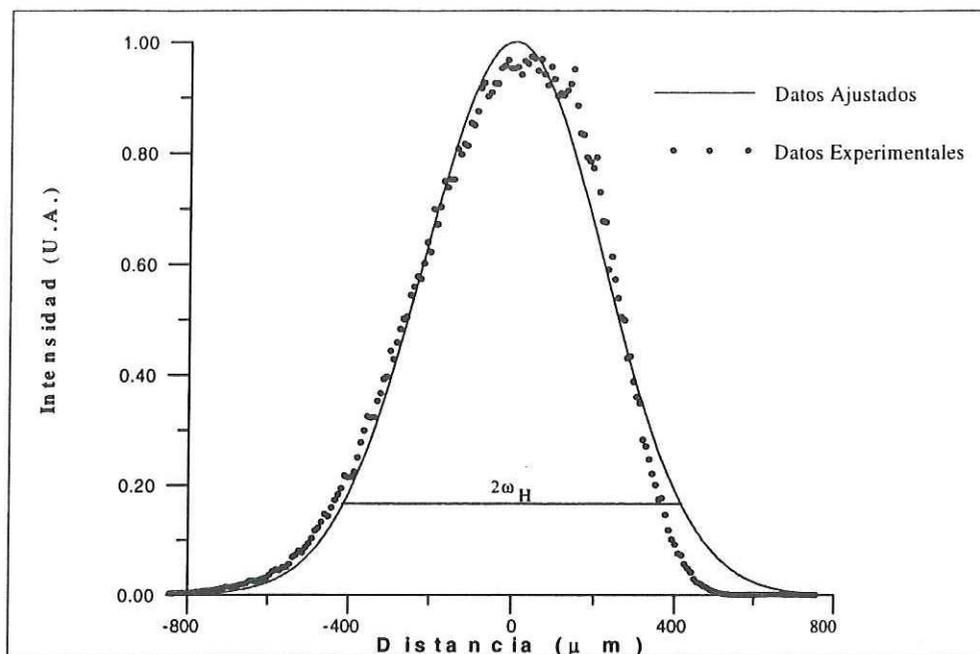


Figura 17: Perfil Gaussiano del haz para el plano horizontal cuando  $2\theta = 12^\circ$ .

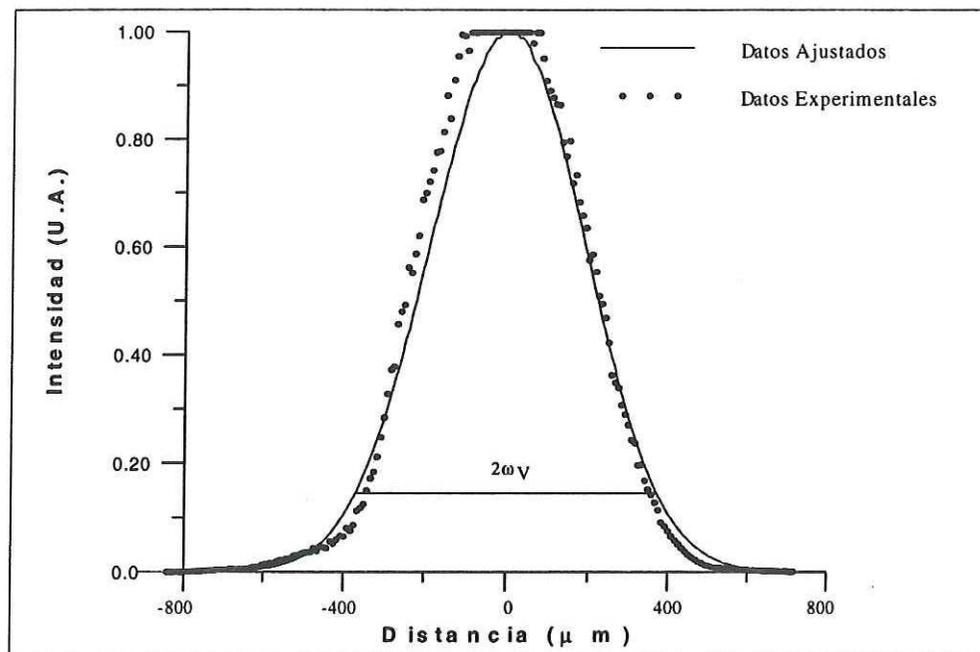


Figura 18: Perfil Gaussiano del haz para el plano horizontal cuando  $2\theta = 12^\circ$ .

astigmatismo es mayor al presentado en la configuración anterior; por lo tanto, en el punto  $T$  se observa que el grado de astigmatismo del haz de salida incrementa. Nuevamente el medio amplificador fue colocado en el punto en donde se localiza la cintura del haz (punto BW, en donde el tamaño del haz calculado es  $\omega_0 = 19.40\mu m$  en ambos planos); en este punto nuevamente podemos observar que el haz se encuentra totalmente enfocado y libre de astigmatismo.

Experimentalmente se barrió nuevamente en intensidad el perfil del haz en ambos planos (horizontal y vertical), a partir de este barrido, se calcula el tamaño del haz  $\omega$ , el cual corresponde a la mitad del diámetro total de la cavidad ( $2\omega$ ) obteniendo los resultados mostrados en las figuras 17 y 18.

En la figura 17 se muestra el perfil experimental y ajustado del haz en el plano horizontal. Al igual que en el caso anterior, el ajuste de los datos experimentales se realiza con la finalidad de calcular el tamaño del haz en el plano de barrido. En estas gráficas podemos observar el efecto de las perturbaciones del medio, como lo fueron en este caso el sistema de refrigeración del laboratorio y algunos problemas que se tuvieron con la línea de alimentación eléctrica.

La figura 18 se muestra el perfil experimental y ajustado del haz en el plano vertical; al igual que en los datos experimentales anteriores, a través del ajuste realizado a la curva experimental se calcula el tamaño del haz para cada plano. Un aspecto que se debe mencionar es el ruido que muestran los datos experimentales; este ruido fue causado por perturbaciones en el medio ambiente, ya mencionados anteriormente. Es preciso resaltar que este tipo de perturbaciones controlables mediante el aislamiento del sistema óptico y a través de la regulación de sistema eléctrico que alimenta los

equipos.

Una vez calculado el tamaño del haz de los datos experimentales para ambos planos (horizontal y vertical) en el punto  $T$  colocado  $20\text{cm}$  fuera de la cavidad, se comparan con la finalidad de conocer el cambio que sufre el haz al incrementar el ángulo  $2\theta$  del haz.

$$\omega_H = 277\mu\text{m},$$

$$\omega_V = 294\mu\text{m}.$$

Experimentalmente podemos observar que el grado de astigmatismo incrementa a medida que incrementa el ángulo  $2\theta$ , sin embargo la diferencia entre ambos planos no es tan notoria como en cavidades con ángulos mayores. Con el fin de observar en forma más clara este fenómeno se realizó una tercera prueba; este último barrido se hace a un ángulo  $2\theta = 18^\circ$  para observar en una forma más clara el deterioro que sufre el perfil del haz a causa del astigmatismo.

En la figura 19 es importante observar que el grado de astigmatismo en los espejos de la cavidad aumenta a medida que el ángulo  $2\theta$  es mayor, sin embargo en el punto en donde se localiza la cintura del haz ( $BW$ ) el haz se encuentra totalmente enfocado y libre de astigmatismo; el valor calculado de la cintura del haz corresponde a  $\omega_0 = 19.51$ . Otro aspecto de gran importancia que se tiene que observar en la figura 19 es el incremento del grado de astigmatismo en el punto  $T$  fuera de la cavidad; en base a los resultados teóricos obtenidos es posible confirmar que el astigmatismo en resonadores multiespejos es causado principalmente al ángulo de incidencia de la luz en los espejos intracavidad.

Una vez realizado el análisis teórico, se realiza el análisis experimental con fines

de corroboración. Los resultados del análisis experimental, los presentamos en las gráficas 20 y 21.

En la figura 20 se muestra el perfil experimental y ajustados del haz en el plano horizontal. Recordemos que en base al ajuste realizado a los datos experimentales se calcula el tamaño  $\omega$ , lo cual corresponde a la mitad del valor del diametro total del haz ( $2\omega$ ) en este plano.

En la figura 21 se muestra el perfil del haz experimental y ajustado para el plano vertical. A partir de esta figura es posible observar más claramente el efecto del astigmatismo en una cavidad con un ángulo intracavidad mayor, en donde el ancho del perfil de haz en el plano horizontal es mayor al mostrado en el plano vertical; numéricamente la comparación experimental entre el tamaño del haz en el plano horizontal y vertical en el punto  $T = 20cm$  fuera de la cavidad, se muestra a continuación.

$$\omega_H = 243\mu m,$$

$$\omega_V = 326\mu m.$$

A través de esta última muestra, se comprueba experimentalmente que a medida que el ángulo de inclinación al que se coloca el espejo  $M_2$  incrementa, los efectos por astigmatismo son mayores.

Para poder observar en una forma más clara la dependencia del ángulo  $2\theta$  en el índice de astigmatismo, presentamos la tabla II en la cual hacemos una recopilación numérica de los resultados presentados en el análisis presentado anteriormente.

Como podemos observar la tabla II muestra una comparación numérica teórica y experimental del tamaño del haz para una cavidad de tres espejos en donde los parámetros  $d_{12}$  y  $d_{23}$  son constantes; el parámetro que se varía es el ángulo  $2\theta$ . El

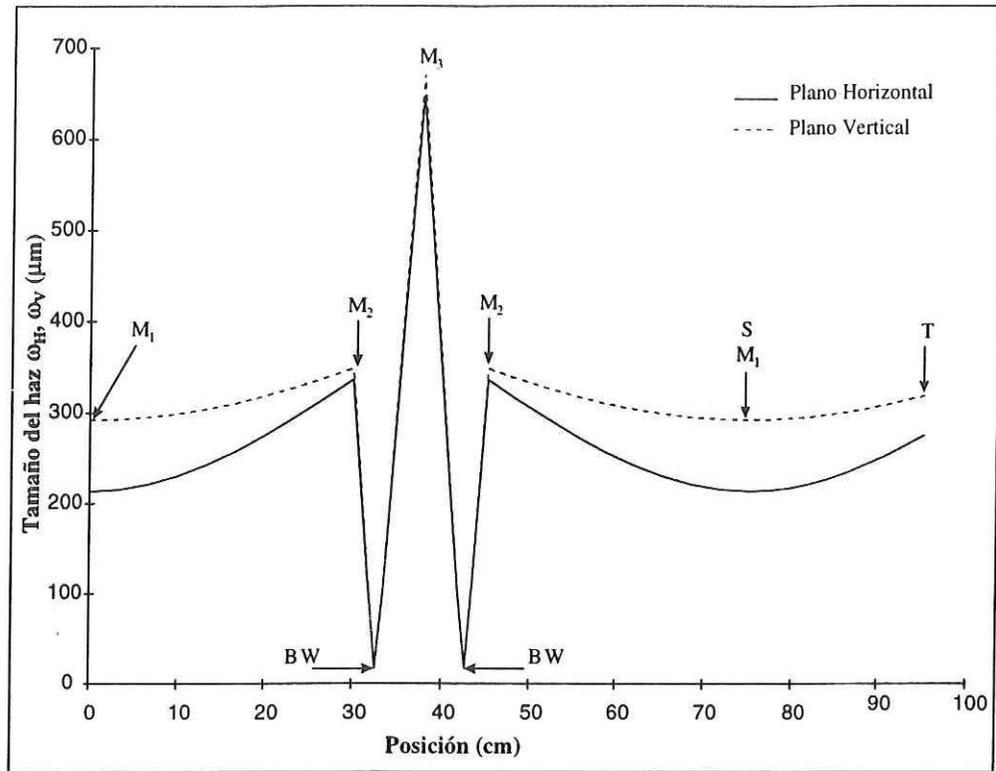


Figura 19: Variación del tamaño del haz al propagarse un viaje completo dentro de la cavidad cuando  $2\theta = 18^\circ$ .

objetivo principal de esta tabla es comparar los resultados numéricos resultantes entre el proceso experimental y teórico. En base a los resultados obtenidos podemos decir que es posible diseñar y construir cavidades de tres espejos partiendo de los resultados obtenidos en forma teórica a través del programa de simulación.

Es importante mencionar que teóricamente es posible construir una cavidad estable a un ángulo de  $22^\circ$ , sin embargo experimentalmente no es posible mantener dicha cavidad totalmente estable, lo que significa que nos encontramos en el umbral de estabilidad.

Otro aspecto que debemos considerar es el hecho que en el medio amplificador el

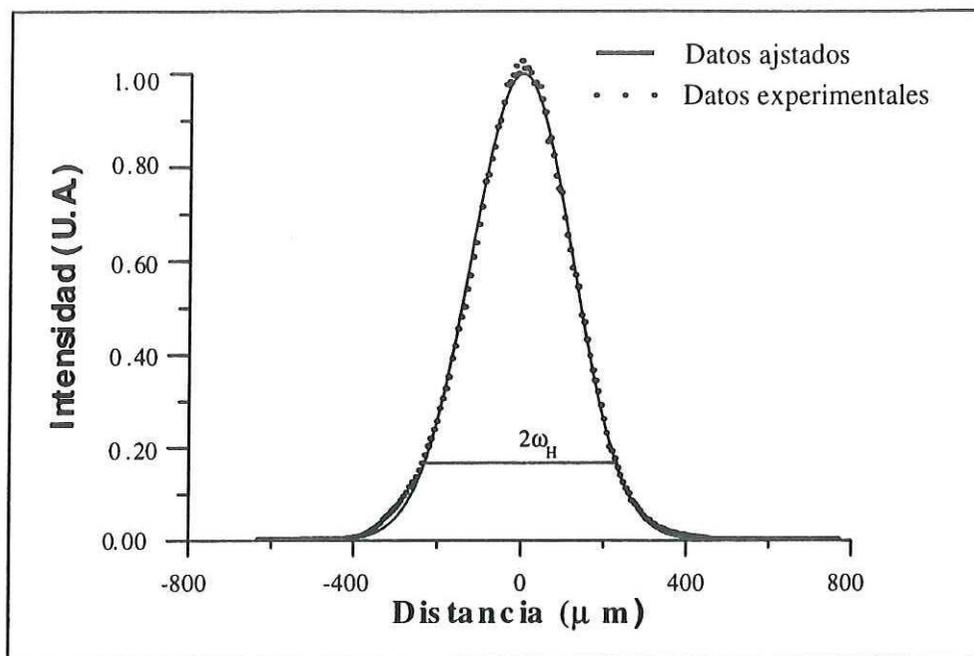


Figura 20: Perfil Gaussiano del haz para el plano horizontal cuando  $2\theta = 18^\circ$ .

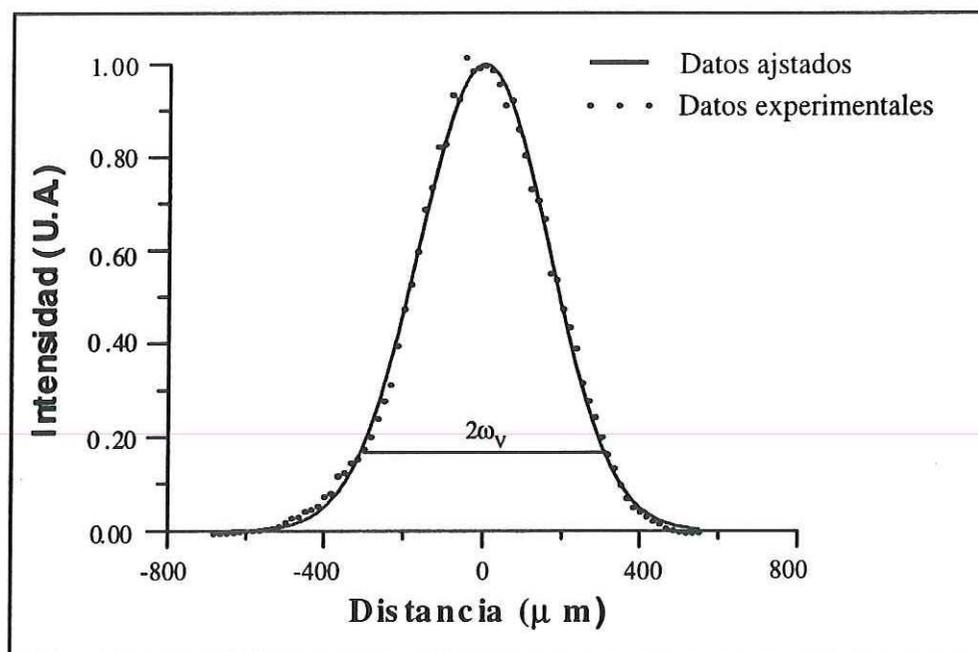


Figura 21: Perfil Gaussiano del haz para el plano vertical cuando  $2\theta = 18^\circ$ .

Tabla II: Comparación numérica del tamaño de haz teórico y experimental para diferentes valores del ángulo  $2\theta$ .

$2\theta^\circ$	$\omega_{HT}[\mu m]$	$\omega_{VT}[\mu m]$	$E_T$	$G.a_T\%$	$\omega_{HE}[\mu m]$	$\omega_{VE}[\mu m]$	$E_E$	$G.a_E\%$
9	272	271	1.003	0.3	252	249	1.01	1.19
12	277	292	0.94	5.27	277	294	0.94	5.95
18	275	318	0.86	14.5	243	326	0.74	29.17

grado de astigmatismo tiende a ser cero, por lo que tenemos un mayor aprovechamiento de la energía de bombeo que se enfoca en el medio amplificador. Recordemos que con el fin de aprovechar al máximo la luz de bombeo, es necesario que tanto el haz de bombeo como el haz de la cavidad cumplan con las siguientes condiciones. Que ambos haces se encuentren enfocados y parcialmente libres de astigmatismo en el momento de incidir el medio amplificador de la cavidad. Otro aspecto importante se debe considerar es que los haces que inciden en el medio amplificador (bombeo y de la cavidad) se traslapen lo mejor posible en el medio amplificador; es en este punto donde debemos considerar importancia de contar con un haz de bombeo y un haz intracavidad libre de astigmatismo con la finalidad que la luz que es enfocada en el medio amplificador se encuentre lo más concentrada posible. Para verificar que tanto el haz de bombeo como el haz de la cavidad de colorante cumplan con la condición de enfoque y que se encuentren libres de astigmatismo, se presenta la tabla III.

La tabla III se muestra el tamaño del haz de bombeo en el medio amplificador siendo el ángulo de incidencia igual a  $5^\circ$  y el tamaño de la cintura del haz de la cavidad de colorante para diferentes valores del ángulo  $2\theta$ , a través de esta tabla es posible

Tabla III: Comparación en el tamaño de la cintura del láser de colorante para diferentes ángulos de la cavidad y tamaño del haz de bombeo en la posición en la cual se colocó el medio amplificador.

Fuente	$\omega_H$ ( $\mu m$ )	$\omega_V$ ( $\mu m$ )
Haz de Bombeo a un ángulo de incidencia de $5^0$	88.1	88.4
Cavidad de colorante cuando $2\theta = 9^0$	19.4	19.4
Cavidad de colorante cuando $2\theta = 12^0$	19.4	19.4
Cavidad de colorante cuando $2\theta = 18^0$	19.5	19.5

observar que en el plano en el cual se encuentra ubicado el medio amplificador, el grado de astigmatismo tanto para el haz de bombeo como para el haz intracavidad es nulo.

### IV.3.2 Análisis de astigmatismo producido por la longitud de la cavidad.

Una vez conocidos los efectos del ángulo  $2\theta$  en la cavidad, es necesario analizar la influencia que tiene la longitud de esta en el grado de astigmatismo del haz de salida, por lo cual se realizó el análisis teórico y experimental de los efectos que produce la longitud en la cavidad cuando el ángulo  $2\theta$  se mantiene constante. Partimos de las condiciones utilizadas en la figura 19 manteniendo el ángulo  $2\theta$  constante en  $18^0$  y la longitud de brazo largo  $d_{12} = 30cm$ , se hace un barrido a la longitud de brazo corto  $d_{23}$ . Como hemos mencionado anteriormente uno de los objetivos de este tipo de análisis es comprobar que es posibles controlar el astigmatismo en un punto fuera de

la cavidad cuando el ángulo de la  $2\theta$  es mayor a  $12^0$ . Los resultados teóricos obtenidos a través de este análisis, se muestran en la gráfica 22.

En la figura 22 podemos observar la diferencia entre el tamaño del haz horizontal y vertical al propagarse dentro de la cavidad, sin embargo el grado de astigmatismo disminuye al propagarse el haz hasta el punto  $T$  fuera de la cavidad. Nuevamente hacemos notar que el medio amplificador para esta configuración se ubicó en el punto  $BW$  en donde se localiza la cintura del haz en el interior de la cavidad, ya que es en este punto en donde la diferencia entre haces es mínima y el haz se encuentra más enfocado.

Una vez demostrado teóricamente que no solo el ángulo al que incide la luz en el espejo  $M_2$  es la principal causa de astigmatismo y que es posible controlar dicho astigmatismo variando los diferentes parámetros de la cavidad, es importante corroborar experimentalmente que a un ángulo  $2\theta = 18^0$  es posible obtener un haz parcialmente libre de astigmatismo en el punto  $T$  fuera de la cavidad; nuevamente utilizando la técnica de barrido de haz se obtuvo el perfil del haz en el punto  $T$ , del cual se muestran siguientes resultados.

En la figura 23 mostramos el perfil ajustado y experimental del haz. La toma de datos al igual que en la sección anterior se realizó en un punto  $T$  a  $20cm$  a la salida de la cavidad.

En la figura 24, se observa el perfil Gaussiano del haz en el plano vertical, en este punto podemos observar físicamente que la diferencia que existe entre el perfil del haz en el plano horizontal y vertical son mínimas. Un aspecto que también se observa en esta figura es una deformación en el perfil del haz antes del ajuste, esta deformación

es atribuible a ruido ambiental, el cual ocasiona fluctuaciones de potencia del haz de salida.

Cabe mencionar que el sistema construido es sensible tanto a ruido físico provocado por motores o sistemas de refrigeración ambiental, como a variaciones en el voltaje en la línea de alimentación del motor de la bomba de colorante lo que ocasiona variaciones en el flujo de dicho colorante y por lo tanto variaciones en el haz de salida de la cavidad.

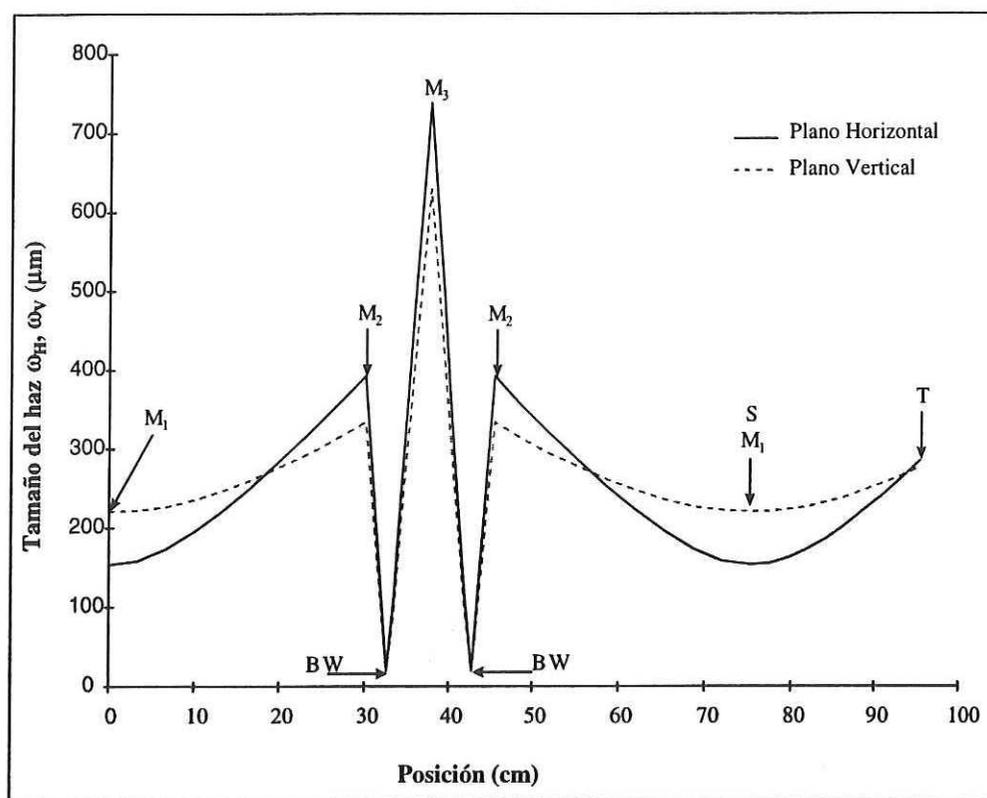


Figura 22: Variación del tamaño del haz al propagarse un viaje completo dentro de la cavidad cuando  $2\theta = 18^\circ$ .

Numéricamente la comparación entre los resultados teóricos y experimentales los mostramos a continuación.

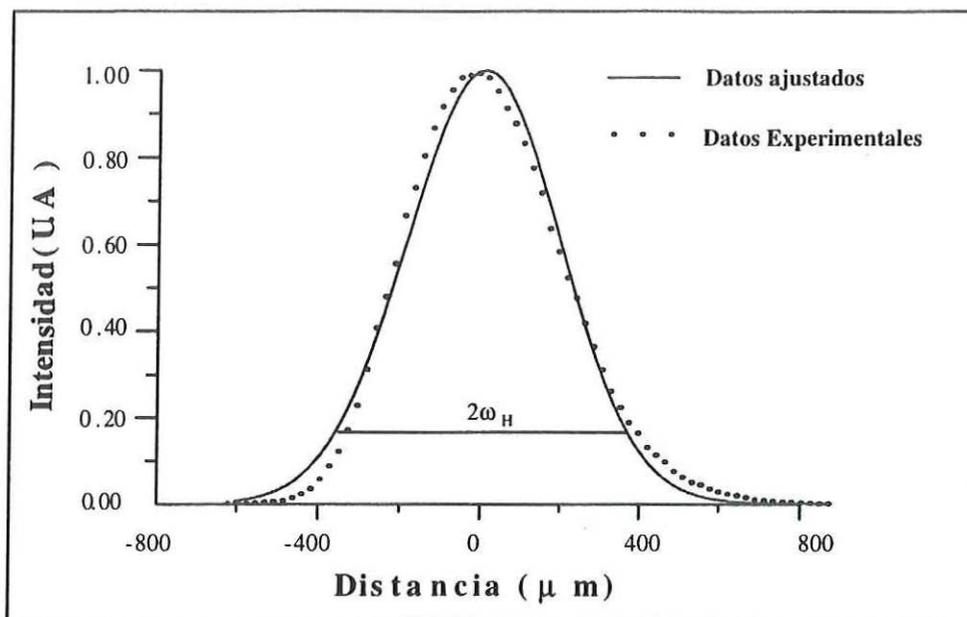


Figura 23: Perfil Gaussiano real y ajustado del haz para el plano horizontal cuando  $2\theta = 18^\circ$ .

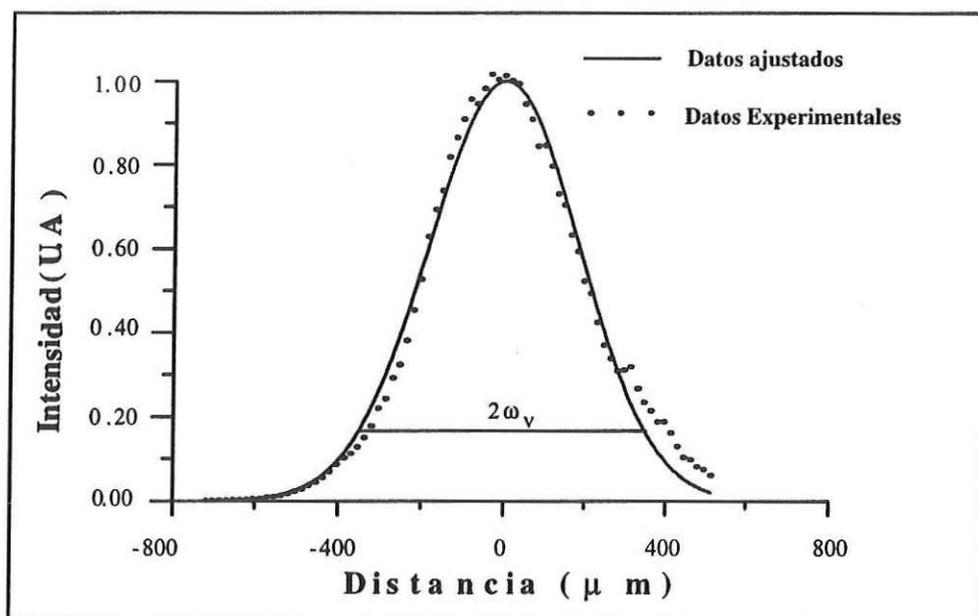


Figura 24: Perfil Gaussiano real y ajustado del haz para el plano vertical cuando  $2\theta = 18^\circ$ .

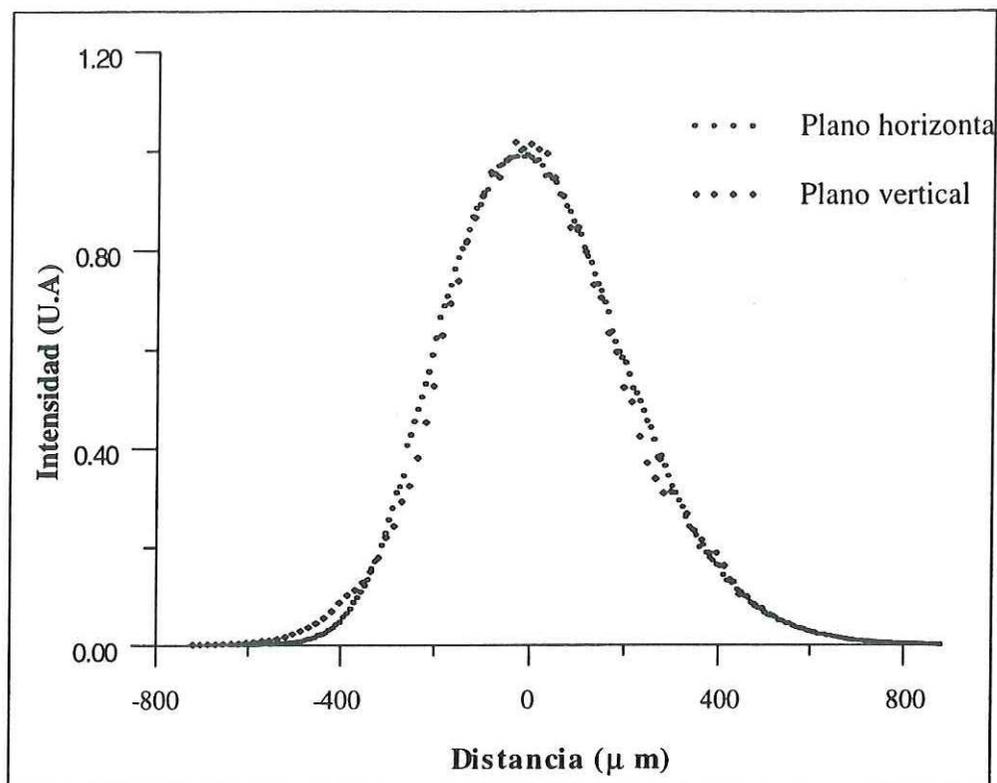


Figura 25: Perfil Gaussiano del haz de los datos reales para los planos horizontal y vertical cuando  $2\theta = 18^\circ$ .

	$\omega_{horizontal}$ ( $\mu m$ )	$\omega_{vertical}$ ( $\mu m$ )	$E$	$G.a$ (%)
<i>Teórico</i>	284	277	1.02	2.49
<i>Experimental</i>	271	260	1.03	3.75

La gráfica 25 muestra la comparación de los datos experimentales reales del perfil Gaussiano del haz en los planos horizontal y vertical; en esta gráfica cual podemos observar que el grado de astigmatismo es casi nulo en donde  $\omega_H \approx \omega_V$ . En esta comparación podemos observar físicamente que la geometría de la cavidad es un factor importante para controlar el astigmatismo para un punto fuera de la cavidad. A partir

de análisis realizado anteriormente podemos decir que al incrementar o disminuir  $d_{23}$  la diferencia en el tamaño de haz en ambos planos tiende a aumentar, este cambio se debe a que de acuerdo al principio de propagación de haces en medios astigmáticos al variar la longitud de la cavidad variamos la posición de los puntos en los cuales se ubican las distancias focales en los planos horizontal y vertical respectivamente; sin embargo como se observa en las figuras 13, 16, 19 y 22 existe un punto fuera de la cavidad para el cual la diferencia entre ambos planos es nula, a este punto se le conoce como punto círculo de mínima confusión el cual se muestra en la figura 11 y se le denomina como punto L.

Para concluir con el análisis realizado en la presente sección podemos decir lo siguiente:

Es posible controlar el astigmatismo en un punto fuera de la cavidad variando la distancia intracavidad  $d_{23}$ , este punto lo podemos observar a través de la figura 25, teóricamente lo que se hace al cambiar la longitud de la cavidad es localizar o enfocar en un punto deseado fuera de la cavidad el círculo de mínima confusión en el cual el haz es circular o libre de astigmatismo.

En este tipo de cavidades es importante tener control del astigmatismo tanto dentro como fuera de la cavidad, esto con el fin de querer construir láseres de modos amarrados o para algunos usos específicos en los cuales es necesario contar con un haz libre de astigmatismo.

# Capítulo V

## CONCLUSIONES

En el presente capítulo daremos a conocer los resultados finales después del análisis teórico y experimental de estabilidad y astigmatismo de la cavidad. Recordemos que aunque el análisis teórico realizado se aplicó a un láser de colorante, este estudio puede ser aplicado a cualquier clase de láseres con cualquier configuración.

Nuevamente por simplicidad las conclusiones las realizaremos en dos etapas. En la primera discutiremos los puntos importantes que hay que tomar en cuenta para la construcción de una cavidad multiespejos estable. En la segunda etapa indicaremos los pasos necesarios para el control de astigmatismo en una cavidad de tres espejos estable.

- Como primer punto es importante mencionar que al construir cualquier tipo de láser es necesario realizar un estudio teórico con la finalidad de conocer los parámetros iniciales de alineación. Este estudio no debe ser considerado como un obstáculo, sino como una herramienta importante que nos ayudará a ahorrar tiempo de alineación de la cavidad. En el caso de láseres de colorante un ahorro en el tiempo de alineación significa una optimización del tiempo de vida de

colorante, el cual se ve limitado por el tiempo de uso y la potencia de bombeo utilizada.

- Al contar con una fuente de bombeo en este tipo de láseres es importante contar con un haz enfocado y libre de cualquier tipo de aberraciones en el medio amplificador, por lo cual es importante contar con un espejo de buena calidad y colocado a un ángulo de bombeo mínimo para evitar astigmatismo en la cavidad perdiendo eficiencia en el proceso de conversión.
- Teórica y experimentalmente se ha demostrado que la distancia  $d_{23}$ , la cual es la distancia que existe entre los espejos  $M_2$  y  $M_3$  es un parámetro crítico para la estabilidad de una cavidad de tres espejos, ya que es esta distancia la que nos va a permitir alinear una cavidad con mayor o menor longitud.
- Otro aspecto por lo cual el parámetro  $d_{23}$  es tan importante en este tipo de cavidades es el punto en el cual se va a enfocar el haz de la cavidad. Recordemos que para contar con una cavidad estable es necesario que el haz de bombeo y el haz de la cavidad se encuentren enfocados en el medio amplificador, que exista un traslape entre ambos haces y que dichos haces se encuentren libres de astigmatismo. Teóricamente demostramos que es posible obtener un haz intracavidad enfocado y parcialmente libre de astigmatismo en el medio amplificador ajustando la distancia  $d_{23}$ . Se comprobó que aún variando el ángulo de inclinación del espejo  $M_2$  es posible enfocar en el punto  $BW$  un haz libre de astigmatismo si ajustamos el parámetro  $d_{23}$ , figuras 19 y 22.

- Experimentalmente hemos comprobado que la posición del medio amplificador juega un papel importante en láseres cuyo medio amplificador es un chorro de colorante, ya que si no existe un traslape total entre los haces de bombeo y de la cavidad, obtendremos un haz inestable. Por lo cual el medio amplificador debe ser colocado a la distancia focal del espejo de bombeo y esta debe coincidir con la cintura del haz de la cavidad, ya que es en este punto en el cual existirá un traslape mayor entre ambos haces.
- Las pérdidas por reflexión son una de la principales causas de baja eficiencia en los láseres de colorante, por lo cual se sugiere colocar el chorro de colorante al ángulo de Brewster, el cual es el ángulo en el que el factor de calidad  $Q$  de la cavidad se incrementa.
- En las figuras 6, 7, 8 y 9 comprobamos teóricamente que el ángulo de incidencia de la cavidad es un factor limitante en el caso de querer ensamblar una cavidad estable con una longitud total mayor a un metro. En estas gráficas observamos que entre menor el ángulo de inclinación de la cavidad la posibilidad de construir una cavidad con un longitud mayor se incrementa. Sin embargo experimentalmente en nuestro caso no es posible alinear cavidades demasiado largas, ya que al contar con espejos de un diámetro de 7mm entre mayor es la cavidad el haz que se propaga en esta tiene un diámetro mayor debido a la divergencia y por lo tanto menor es la cantidad de energía que se va a poder regresar al medio amplificador ocasionando que una baja eficiencia de conversión.
- Recordemos que dado el efecto de astigmatismo de la cavidad, esta será estable

solo cuando la condición general de estabilidad se cumpla en ambos planos simultáneamente, lo cual es mostrado en las figuras 6, 7, 8 y 9. En estas figuras la zona sombrada nos indica en que región la cavidad es estable en ambos planos.

- Es importante mencionar que es posible obtener mapas de estabilidad con contornos mas suavizados dependiendo de la cantidad de pasos que le demos a la simulación numérica. En el presente trabajo se presentan resultados teóricos obtenidos utilizando 300 pasos para cada uno de los ejes graficados. Es posible realizar mapas de estabilidad con una finesa de hasta 3000 pasos por eje; sin embargo no se presentan los resultados obtenidos de este tipo de cálculos por contar con limitantes en cuanto al software con el que se cuenta para graficar esta cantidad de datos.

Tomando en cuenta el fenómeno de astigmatismo dentro de la cavidad, podemos concluir lo siguiente.

- En el análisis realizado en el capítulo IV comprobamos teórica y experimentalmente que la principal causa de astigmatismo en este tipo de cavidades es el ángulo de incidencia al que se coloca el espejo  $M_2$ , observando que a menores ángulos el astigmatismo es menor, sin embargo como se observa en la figura 25 es posible controlar parcialmente el astigmatismo si variamos la longitud de la cavidad.
- Nuevamente corroboramos que el parámetro  $d_{23}$  es un parámetro de gran influencia en la cavidad, ya que al variar esta longitud dentro de la cavidad es

posible controlar los efectos de astigmatismo en la cavidad. Sin embargo el punto mas importante que se tiene que remarcar es que a través de este parámetro es posible controlar el tamaño del haz en el medio amplificador, con lo cual vamos a tener un mejor translope entre el haz de bombeo y el haz de la cavidad, y como consecuencia una mayor eficiencia de convesión.

- Se comprobó que es posible controlar el astigmatismo en el haz de salida de la cavidad de acuerdo a las necesidades del usuario; esto significa que la compensación de astigmatismo se lleva a cabo para un punto en particular fuera de la cavidad.
- En base a este estudio se demostró que es posible construir un láser de colorante con cavidad de tres espejos al cual le podemos controlar el astigmatismo de acuerdo a las necesidades del usuario sin la necesidad de introducir en la cavidad elementos compensadores los cuales repercuten en costos extras para el usuario y en pérdida de tiempo al alinear estos elementos.

Teoricamente se elaboró y probó un programa en TC++ confiable, el cual sirve como una herramienta de diseño para aquellos que quieren construir láseres con cavidad de tres espejos estables y parcialmente libres de astigmatismo.

## Referencias

- Aboites V.** 1991. "Láseres, una Introducción". Centro de Investigaciones en Óptica. Primera Edición. México. 225 p.
- Collins A.** 1964. "Analysis of optical resonators involving focusing elements". Applied Optics. 3. 1263-1275 p.
- Diels J. C.** 1989. "Dye laser Topics". F. J. Duarte and Hilman. Orlando Florida.
- Diels J. C y Wolfgang R.** 1996. Paul F. Liao. "Ultrashort laser pulse phenomena. fundamentals, techniques, and applications on a femtosecond time scale". Academic Press. Primera edición. San Diego Ca. 582 p.
- Dienes A. , Ippen E., Shank C.** 1971. "A Mode-Locked cw Dye Laser". Applied Physics Letters. 19(8). 258-260 p.
- Fowles R. Grant.** 1989. "Introduction to Modern Optics". Dover Publication. Segunda edición. New York. 328 p.
- Fowles R. Grant.** 1969. "Astigmatic Gaussian Beams Produced by Axially Asymmetric Laser Cavities". Journal of Quantum Electronics. QE-5(10). 483-488 p.
- Hecht J.** 1984. "Comparing types of Dye Lasers". Lasers and applications. 53-61 p.
- Hecht E., Zajac A.** 1977. "Óptica". Fondo Educativo Interamericano, S.A. Bogotá. 585 p.
- Hercher M., H. Pike.** 1971. "Tunable Dye Laser Configurations". Optics Communications. 3. 65-67 p.
- Hollberg Leo.** 1990. "CW Dye-Lasers". Duarte F.J., Hillman L. "Dye Laser Principles with Applications". Academic Press, inc. Boston. 185-237 p.
- Jamasbi N., J. C. Diels.** 1988. "Study of a Linear Femtosecond Laser in Passive and Hybrid Operation". Journal of Modern Optics. 35(12). 1891-1906 p.
- Jenkins F., Harvey E. White.** 1957. "Fundamental of Optics". Tercera Edición. McGraw Hill. New York. 637 p
- Johnson W.D., P. K. Runge.** 1972. "An improved astigmatically compensated resonator for CW Dye Laser". Journal of Quantum Electronics. QE-8. 724-725 p.

- Kenneth K. , Andrew D., Whinnery J.** 1981. "Stability and Astigmatic compensation Analysis of Five-Mirror Cavity for Mode-Locked Dye Lasers". Applied Optics. 20(3).407-411p.
- Kogelnik H.**, 1965. "Imaging of Optical Modes Resonators with Internal Lenses". The Bell system Technical Journal. 455-493 p.
- Kogelnik H., Li T.**, 1966. "Laser Beams And Resonators". Applied Optics. 5(10). 1550-1567 p.
- Kogelnik H., Erich P. Ippen, Andrew Dienes y Charles V. Shank.** 1972. "Astigmatically Compensated Cavities for CW Dye Lasers". Journal of Quantum Electronics. QE-8. 373-379 p.
- Kuizenga D. J.** 1971. "Mode Locking of the cw Dye-Laser". Applied Physics Letters. 19(8). 260-263 p.
- Levine A. , DeMaria A.** 1971. "Lasers Volume 3". Marcel Dekker inc. Primera Edición. New York. 367 p.
- Lloyd W.** 1990. "Dye Laser Principles with Aplications". F. J. Duarte. Primera edición. Estados Unidos de Norte América. 456 p.
- Monks G. S.** 1937. "Ligth Principles And Experiments". McGraw Hill. Primera Edición. New York. 480 p.
- Saleh B., Teich M.** 1991. "Fundamental of Photonics". J.W. Goodman. Primera Edición. United States of America. 966 p.
- Schildt, Herbert.** 1990. "Programación en Turbo C". McGraw-Hill. Segunda edición. España. 449 p.
- Schildt, Herbert.** 1995. "C++, The Complete Reference". McGraw-Hill. Primera edición. New York. 592 p.
- Siegman A.** 1986. "Lasers". University Science Books. Primera Edición. Mill Valley, Ca. 1283 p.
- Tuccio Strome F.** 1972. "Design and operation of a Tunable Contnuos Dye Lasers". Applied Optics. 11(1). 63-74 p.
- Verdeyen J.** 1995. "Laser Electronics". Prentice Hall. Tercera Edición. Englewood Cliffs, New Jersey. 778 p.
- Weichel H., Pedrotti L. S.** "A summary of useful laser equations". Department of Physics, Air Force Institute of Technology. 8p
- Yariv Amnon.** 1991. "Optical Electronics". CBS College. Fourth Edition. New York. 552 p.

## Apéndice A

# CÁLCULOS DE LOS PARÁMETROS DE LA CAVIDAD UTILIZANDO LA ECUACIÓN DE AUTOCONSISTENCIA

El análisis numérico se realiza con la finalidad de calcular los parámetros a los cuales la cavidad es estable. De la misma manera, a través de este análisis teórico se calcula el tamaño del haz para ambos planos (horizontal y vertical) en cualquier punto dentro y fuera de la cavidad. En este caso los cálculos los basaremos en la ley de matrices ABCD para la propagación de haces Gaussianos utilizando el parámetro complejo  $q$ . Esta ley también nos va a permitir el cálculo de los tamaños del haz y su localización. Retomando el parámetro complejo  $q$ , el cual contiene información acerca del tamaño y los radios de curvatura del haz en cualquier punto dentro y fuera de la cavidad siempre y cuando se conozca el elemento de propagación en el caso de querer propagar el haz

fuera de la cavidad.

Como se mencionó en capítulo III, en la mayoría de los casos resulta más sencillo analizar la cavidad como una sucesión de lentes delgadas y desdoblado la cavidad, por lo tanto solo tendremos que propagar un haz a través de un arreglo de lentes delgadas en un viaje completo. Recordemos que el espejo  $M_2$  introduce astigmatismo en la cavidad; por lo tanto al sustituir dicho espejo por una lente delgada, el efecto de astigmatismo se reflejará en la distancia focal de esta lente, provocando que obtengamos dos distancias focales ( $f_H$ ,  $f_V$ ), la distancia existente entre los dos planos focales de la lente  $L_2$  se determina por el ángulo  $\theta$  de incidencia y por la distancia existente entre las lentes  $L_1$  y  $L_2$  como se comprobó en el capítulo IV. Un punto que tenemos que recalcar antes de comenzar los cálculos es que la condición de estabilidad se debe cumplir de la misma manera para una cavidad de espejos o para su equivalente en un arreglo de lentes delgadas como la mostrada en la figura 3.

Para el cálculo del parámetro complejo  $q$  de la cavidad, asignamos como plano de referencia la lente de salida  $L_1$  y partiendo de ahí se comienza la propagación del haz por la por la cavidad, iniciando y terminando en el plano de referencia  $L_1$ . En el caso de la cavidad que estudiamos, se cuenta con un arreglo de 8 matrices como el que se muestra a continuación :

$$ABCD = d_{12} * L_2 * d_{23} * L_3 * d_{23} * L_2 * d_{12} * L_1$$

En donde:

$L_1$	Lente de Salida
$L_2$	Lente causante de astigmatismo en la cavidad
$L_3$	Lente de fin de cavidad
$d_{12}$	Distancia entre las lentes $L_1$ y $L_2$
$d_{23}$	Distancia entre las lentes $L_2$ y $L_3$

La representación de cada matriz la podemos ver en la figura 3.

El producto matricial del arreglo anterior lo calculamos a través del programa que se muestra en el apéndice B.

Para la realización del cálculo de los tamaños de haz en la cavidad partimos de la ecuación de autoconsistencia dada por la siguiente relación:

$$q_s = \frac{Aq_s + B}{Cq_s + D} \quad (\text{A.1})$$

Donde los términos A, B, C y D son los elementos de la matriz para la propagación de haces en un viaje completo dentro de la cavidad (ver capítulo 3 del presente documento). Resolviendo la ecuación A.1 para  $1/q_s$

$$\frac{1}{q_s} = \frac{(D - A) \pm \sqrt{(D - A)^2 + 4BC}}{2B}$$

$$\frac{1}{q_s} = \frac{D - A}{2B} \pm i \frac{\sqrt{1 - [(D - A)/2]^2}}{B} \quad (\text{A.2})$$

a partir de las ecuaciones anteriores, observamos que la relación de  $1/q_s$  también se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - i \frac{\lambda}{\pi\omega} \quad (\text{A.3})$$

En donde  $n$  es el índice de refracción del medio de propagación,  $\lambda$  es la longitud de onda del láser,  $\omega$  el tamaño del haz en la cavidad y  $R$  es el radio de curvatura del espejo.

Partiendo de las ecuaciones A.2 y A.3, podemos calcular la condición general de estabilidad [Yariv. 1991], la cual se da por la siguiente relación:

$$\left| \frac{D + A}{2} \right| < 1 \quad (\text{A.4})$$

Esta relación es aplicada a cualquier cavidad. en nuestro caso y dados el efecto de astigmatismo introducido en la cavidad, tendremos que aplicar dicha condición a ambos planos utilizando los elementos de las matrices ABCD resultantes para cada caso. Resaltando que la cavidad será estable si se cumple la condición de estabilidad en ambos planos simultaneamente.

Por medio de este método obtenemos una manera más sencilla de calcular el tamaño del haz y el radio de curvatura en el plano de referencia para un resonador compuesto por cualquier cantidad de elementos ópticos. De esta manera a partir de la ecuación A.2 y de la ecuación A.3 obtenemos:

$$R = \frac{2B}{D - A} \quad (\text{A.5})$$

$$\omega = \left( \frac{\lambda}{\pi n} \right)^{1/2} \frac{B^{1/2}}{\left[ 1 - [(D + A)/2]^2 \right]^{1/4}} \quad (\text{A.6})$$

Por lo tanto el parámetro complejo  $q$  y de aquí  $\omega$  y  $R$ , en cualquier otro plano se puede obtener aplicando la ley de matrices ABCD a  $q_s$ .

## Apéndice B

# DIAGRAMA DE FLUJO Y PROGRAMA PARA LA PROPAGACIÓN DE UN HAZ A TRAVÉS DE LA CAVIDAD

El siguiente diagrama se muestra en forma general el funcionamiento del programa utilizado para el cálculo de las regiones de estabilidad y análisis del astigmatismo para un láser de tres espejos, este programa calcula los tamaños de haz dentro y fuera de la cavidad. Este programa está escrito utilizando el principio general de propagación de haces Gaussianos y puede ser utilizado para realizar los cálculos de estabilidad y análisis de astigmatismo de un haz para cualquier láser ajustando solamente los parámetros iniciales y las matrices ABCD correspondientes.

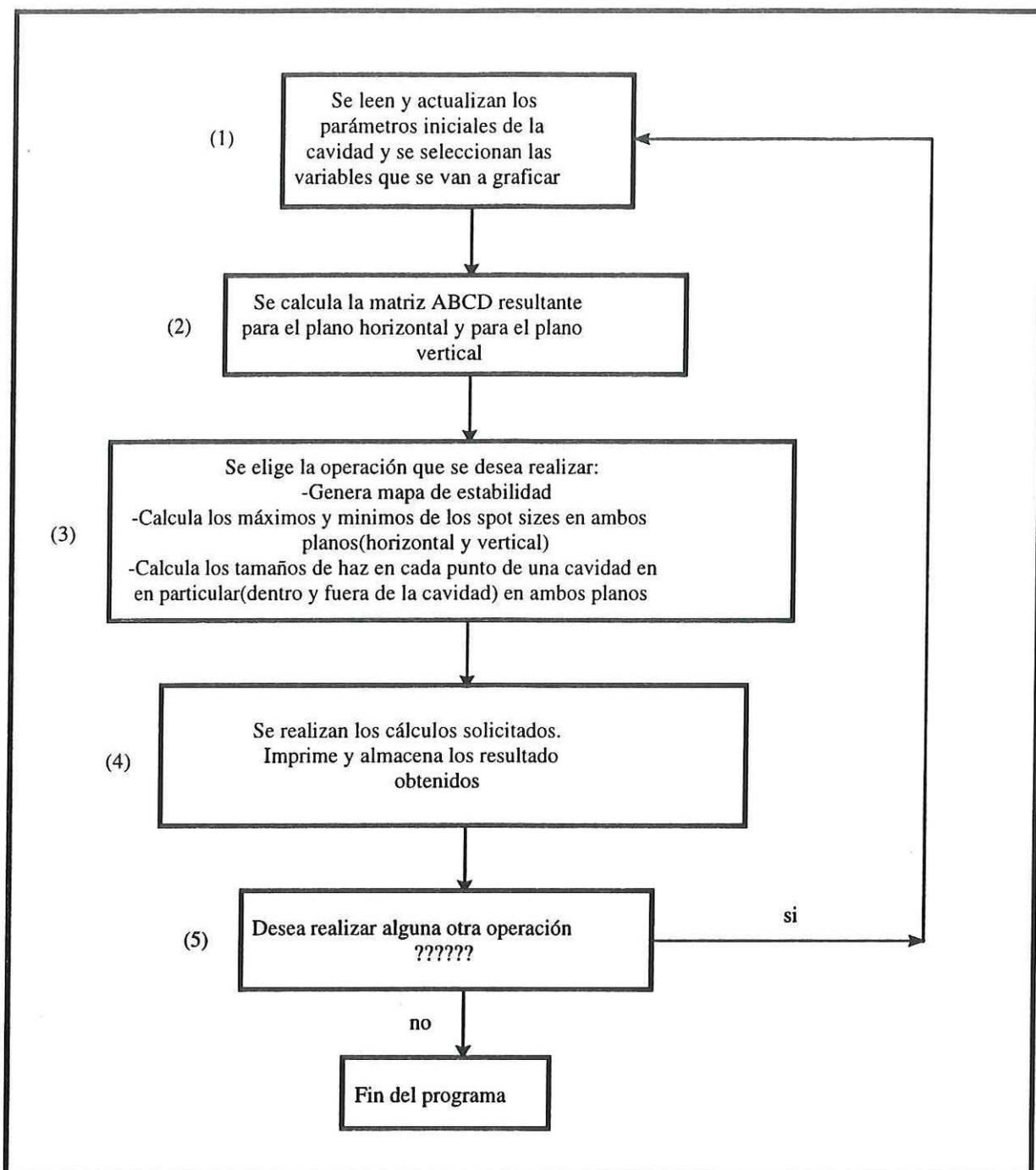


Figura 26: Diagrama de flujo generalizado.

## B.1 Programa para la simulación de un haz a través de la cavidad

\*\*\*\*\*

En este programa se realiza el análisis de estabilidad de un láser de pigmento con cavidad de tres espejos, tomando en cuenta el astigmatismo introducido por la inclinación del espejo M1. También se calcula el diámetro del haz transversal vertical y horizontal dentro de la cavidad.

\*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*LIBRERIAS UTILIZADAS\*\*\*\*\*

```
#include <stdio.h>
```

```
#include <math.h>
```

```
#include <complex.h>
```

```
#include <conio.h>
```

```
#include <graphics.h>
```

```
#include <stdlib.h>
```

```
#include <string.h>
```

```
#include <ctype.h>
```

```
#define Ntot 40
```

\*\*\*\*\*DEFINICION DE VARIABLES GLOBALES\*\*\*\*\*

```
struct matrix { double A, B, C, D; };
```

```
void matinit( struct matrix *Mt, double Ax, double Bx, double Cx, double Dx)
```

```
{ Mt->A=Ax; Mt->B=Bx; Mt->C=Cx; Mt->D=Dx; }
```

```

*****

void mulmat( struct matrix *M1, struct matrix *M2 )

{

struct matrix Ml;

Ml.A = M1->A * M2->A + M1->B * M2->C;

Ml.B = M1->A * M2->B + M1->B * M2->D;

Ml.C = M1->C * M2->A + M1->D * M2->C;

Ml.D = M1->C * M2->B + M1->D * M2->D;

*M1=Ml;

}

*****

complex q0, qz, Q0, Qz ;

char format1[30]="%10.8f %10.8f \n" ;

double Ehc,Evc,

dnd0, X, Cp, den, Kth, n2, RH2,

RH1,RV1,RV2,R1,R2;

double W3H[Ntot-7],W3V[Ntot-7],f;

int Nr , savew, N1, N2,N3,var1,var2,var3, procesar, *otrasvar[4];

double inc1,inc2,inc3;

double Lz, Lr,L1,L1i,L1max,L2,L2i,L2max,L3,L3i,L3max,t1,t1i,t1max,

t2,t2i,t2max,Pp,Ppi,Ppmax,PLC,PLCi,PLCmax,lambda,nf,nr;

double wmin=1.0,wmax=0.0, w0, wz, zmin, zmax ;

double wmincwh=1,wmaxcwh=0,wmaxcwhv=0,wmincwhv=1,

```

```

dminhc,dmaxhc,dminvc,dmaxvc;

double Whor, Wver, Wsalh, Wsalv;

double A,B,C,D, *vars[25];

FILE *omegas;

void procesa(struct matrix Mx, double RC1,double RC2, double Pot,

double *W3, double *Wsal);

*****

Leé los parámetros necesarios para comenzar los cálculos

*****

void readpar(void)

{

int cont;

char cadena[30];

FILE *params;

params = fopen("PIGMEN.DAT","r");

if (params==NULL)

{ printf("\n file PIGMEN.DAT missing...\n"); exit(1); }

for (cont=0; cont <4; cont++)

{

fscanf(params, "%s", cadena );

*otrasvar[cont] = atoi(cadena);

}

for (cont=1; cont <25; cont++)

```

```

{
fscanf(params, "%s", cadena );
*vars[cont] = atof(cadena);
}

fscanf(params, "%s", cadena );

N3 = atoi(cadena);

fclose(params);
}

```

```
//FIN DE READPAR//
```

```
*****
```

almacenar los datos provenientes de los cálculos realizados en el programa en el archivo pigmen.dat.

```
*****
```

```

void writepar(void)
{
int cont;

FILE *params;

params=fopen("PIGMEN.DAT", "w");

for (cont=0; cont < 4; cont++)
{
fprintf(params, "%d\n", *otrasvar[cont] );
}

for (cont=1; cont < 25; cont++)

```

```

{
fprintf(params, "%f\n", *vars[cont] );
}

fprintf(params, "%d\n", N3 );

fclose(params);

}

char leetecla(void)

{

int tecla ;

tecla=getch();

if (tecla==0 ) { tecla=getch()+200; }

return tecla;

}

double size( double ImQ, double n, double lambda)

{ return sqrt( fabs(lambda/(ImQ*M_PI*n))); }

double stabMm(double R1, double R2, double PotL, struct matrix *Mx,

double *W3)

*****

En esta sección se lleva acabo la multiplicación de las matrices ABCD corres-

pondientes a cada uno de los elementos de la cavidad, obteniendo la matriz ABCD

resultante para cada uno de los planos.

*****

{

```

```

matrix M1, M2;

matinit(&M1,1.0, L1, 0.0, 1.0); //LONGITUD DEL BRAZO VARIABLE L1.

matinit(&M2,1.0, 0.0, -2/R1, 1.0); //ESPEJO R1 GIRADO.

mulmat(&M1, &M2); //MULTIPLICACION DE MATRICES.

matinit(&M2,1.0, L2, 0.0, 1.0); //LONGITUD DEL BRAZO L2 CONSTANTE.

mulmat(&M1, &M2);

matinit(&M2,1.0, 0.0, -2/R2, 1.0); //ESPEJO FINAL R2.

mulmat(&M1, &M2);

matinit(&M2,1.0, L2, 0.0, 1.0); //REGRESO POR L2.

mulmat(&M1, &M2);

matinit(&M2,1.0, 0.0, -2/R1, 1.0); //REGRESO POR ESPEJO R1.

mulmat(&M1, &M2);

matinit(&M2,1.0, L1, 0.0, 1.0); //REGRESO POR L1.

mulmat(&M1, &M2);

matinit(&M2,1.0, 0.0, 0.0, 1.0); //ESPEJO DE SALIDA R3(PLANO).

mulmat(&M1, &M2);

*Mx = M1;

return ((M1.D - M1.A)*(M1.D - M1.A))+(4.0*M1.B*M1.C);

}

//FIN DE LA SUBROUTINA WRITEPAR//

*****

void modografico(void)

{

```

```
int gdriver = DETECT, gmode;

initgraph(&gdriver, &gmode, "");

}
```

\*\*\*\*\*

Elaboración del mapa de estabilidad y almacenamiento de resultados correspondientes a la estabilidad de la cavidad.

\*\*\*\*\*

```
void map (double *W3H, double *W3V)

{

double dif1, dif2;

FILE *stabs, *wmaxmin, *totstab ;

struct matrix Mhc, Mvc;

double Whor, Wver;

struct matrix Mxx;

int cont1, cont2, cont3, estabilidad, x, y, color, coincide=0, tecla;

int colores[4]={6, 11, 13, 14 };

char cadena[30];

stabs=fopen("stabs", "w");

fclose(stabs);

dif1=*vars[var1+16]- *vars[var1+8];

dif2=*vars[var2+16]- *vars[var2+8];

modografico();

rectangle(0,0,getmaxx(), getmaxy());
```

```

gcv(*vars[var1+8], 8, cadena); outtextxy(3, getmaxy()/2, cadena);

gcv(*vars[var1+16], 8, cadena);

outtextxy(getmaxx()-80, getmaxy()/2, cadena);

gcv(*vars[var2+16], 8, cadena);

outtextxy(getmaxx()/2, 10, cadena);

gcv(*vars[var2+8], 8, cadena);

outtextxy(getmaxx()/2, getmaxy()-10, cadena);

wmaxmin=fopen("maxmin", "w");

stabs=fopen("stabs", "a");

totstab=fopen("totstab", "w");

fprintf(wmaxmin,

"Variable1 Variable2 WMinH WMinV WMaxH WMaxV \n");

fprintf(totstab,

"Estabilidad Ehc Evc \n");

for (cont3 =0; cont3 < N3; cont3++)

{

*vars[var3]= *vars[var3+8] + cont3 *( *vars[var3+16]- *vars[var3+8])/N3;

for (cont2 =0; cont2 < N2; cont2++)

{

*vars[var2]= *vars[var2+8] + cont2 *(dif2)/N2;

for ( cont1 =0; cont1 < N1; cont1++ )

{

*vars[var1]= *vars[var1+8] + cont1 *(dif1)/N1;

```

$RV1=R1/\cos(t1*M\_PI/180)$ ; //Radio de curvatura del espejo M2 para el plano vertical.

$RH1=R1*\cos(t1*M\_PI/180)$ ; // Radio de curvatura del espejo M2 para el plano horizo.

$RH2=R2$ ;

$RV2=R2$ ;

if (kbhit())

{

tecla=leetecla();

if (tecla==27)

{

cont1=N1; cont2=N2; cont3=N3;

}

}

$Ehc= \text{stabMm}(RH1,RH2, PLC, \&Mhc,W3H)$ ;

$Evc= \text{stabMm}(RV1,RV2, PLC, \&Mvc,W3V)$ ;

$\text{estabilidad}=\left(\left(\left(Ehc<0.0\right)\right) \&\& \left(Evc<0.0\right)\right)*1$  ;

if (estabilidad==1) {; coincide++ ; }

color=colores[estabilidad];

if ( dif1==0.0) { x=getmaxx()/2 ;}

else

{ x= (getmaxx()-2)\*(\*vars[var1] - \*vars[var1+8] ) /(dif1 )+4; }

if ( dif2==0.0) { y=getmaxy()/2 ;}

```

else

{ y= getmaxy()- (getmaxy()-4)*(*vars[var2] - *vars[var2+8] ) /(dif2 )-2;}

putpixel(x,y,color);putpixel(x+1,y,color);

putpixel(x,y-1,color);putpixel(x+1,y-1,color);

if ( estabilidad == 1 )

{ if (estabilidad%10==1){

fprintf(stabs,"%e %e %d \n", *vars[var1],*vars[var2],estabilidad);

fprintf(totstab,"%d %e %e \n",estabilidad,Ehc,Evc);}

if (procesar)

{

if (savew) { omegas=fopen("horcw", "w"); }

procesa(Mhc, RH1, RH2, PLC, W3H, &Wsalh);

// Whor=*Wsal;

if (savew) {fclose (omegas);}

wmincwh=wmin; wmaxcwh=wmax;

if (savew) {omegas=fopen("vercw", "w"); }

procesa(Mvc, RV1, RV2, PLC, W3V, &Wsalv);

//Wver=Wsal;

if (savew) {fclose(omegas); }

wmincwv= wmin; wmaxcwv= wmax;

fprintf(wmaxmin, "%e, %e, %e, %e, %e, %e \n", *vars[var1], *vars[var2], fabs(wmincwh),

fabs(wmincwv), fabs(wmaxcwh), fabs(wmaxcwv));

wmax=0; wmin=1;

```

```

}}}}
gcvt(coincide, 8, cadena);

outtextxy(10, 10, cadena);

outtextxy(10, 30, "oprime cualquier tecla para continuar...");

leetecla();

closegraph();

fclose(totstab);

fclose(wmaxmin);

fclose(stabs);

}

/* FIN DEL MAP */

*****

Cálculo del diámetro del haz dentro de la cavidad.

*****

void free( double Li, double Lmax, unsigned int N, complex *q, double *Wsal)
{
int cont; double L ; complex qi, Q ;

qi= *q;

fprintf (omegas, "Lz, wz\n");

for ( cont=0; cont < N; cont++)

{

L= cont*(Lmax-Li)/(N-1);

Lz=Li+L;

```

```

*q= qi +L; Q= 1.0/ *q;

wz = size(imag(1.0/ *q), nf, lambda);

if (L1==L1max){*Wsal=wz;}

if (savew)

{fprintf (omegas, format1,Lz,wz); }

if(wz< wmin) { wmin=wz; zmin=Lz; }

if(wz> wmax) { wmax=wz; zmax=Lz; }

}

}

// END OF FREE//

*****

Cálculo del diámetro del haz en los espejos de la cavidad

*****

void espejo(double Radio)

{ complex Q;

qz = qz /(-qz*2.0)/Radio + 1.0);

Q=1.0/qz;

wz = size(imag(1.0/qz), 1.0, lambda);

if (savew) { fprintf (omegas, format1,Lz,wz); }

}

//FIN DE ESPEJO//

*****

```

Cálculo de  $z_0$ ,  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $r$  dentro de la cavidad y almacenamiento de los resultados en el archivo zetas

```

*****
void procesa(struct matrix Mx, double RC1,double RC2,double Pot,
double *W3, double *Wsal)
{
FILE *Zetas;

int cont; double A, B, C, D, R, Z1, Lz, Z2, Z0; complex qa;

Q0=complex( (Mx.D-Mx.A)/(2.0*Mx.B),
-sqrt( -(Mx.D-Mx.A)*(Mx.D-Mx.A) -4.0*Mx.B*Mx.C)/(2.0*Mx.B) );

q0= 1.00/Q0;

qa=(q0*Mx.A+Mx.B)/(q0*Mx.C+Mx.D);

qa=q0;

w0= sqrt ( fabs( lambda/( imag(Q0)*M_PI*nf) ));

R=((2*Mx.B)/(Mx.D - Mx.A));

Z0= (M_PI*wmin*wmin)/lambda;

Lz= L1max+L2;

Z1= -((Lz*(R1-Lz))/(R1+R2-2*(Lz)));

Z2= Z1+L1max+L2;

if (savew)
{ fprintf (omegas, format1,0.0,w0);

Zetas= fopen("Zetas" , "w");

fprintf(Zetas, "Z0= %10.8f Z1= %10.8f Z2= %10.8f R= %10.8f Whor= %10.8f

```

```

Wver= %10.8f \n", Z0, Z1, Z2, R, Wsalh, Wsalv);

fclose(Zetas);

}

qz=q0;

free( 0.0, L1, 10, &qz, Wsal);

espejo (RC1);

free (L1, L1+L2, 10, &qz, Wsal);

espejo (RC2);

free (L1+L2, (L1+(2*L2)), 10, &qz, Wsal);

espejo (RC1);

free ((L1+(2*L2)), ((2*L1)+(2*L2)), 10, &qz, Wsal);

free (((2*L1)+(2*L2)),((2*L1)+(2*L2)+0.20), 10, &qz, Wsal);

}

//FIN DEL PROCESA//

*****

Inicio de programa principal, en este podremos elegir que cálculos realizar, ya sea
el diagrama de estabilidad de la cavidad, las omegas, o los parámetros z1, z2, z0.

*****

void main(void)

{

char letrero[20][40], opcion;

int cont,fill,x1=10, x2=45, salir=0;

FILE *params ;

```

```
directvideo=1;

vars[1]=&L1; vars[9]=&L1i; vars[17]=&L1max;

vars[2]=&L2; vars[10]=&L2i; vars[18]=&L2max;

vars[3]=&t1; vars[11]=&t1i; vars[19]=&t1max;

vars[4]=&Pp; vars[12]=&Ppi; vars[20]=&Ppmax;

vars[5]=&t2; vars[13]=&t2i; vars[21]=&t2max;

vars[6]=&t1; vars[14]=&t1i; vars[22]=&t1max;

vars[7]=&PLC; vars[15]=&PLCi; vars[23]=&PLCmax;

vars[8]=&PLC; vars[16]=&PLCi; vars[24]=&PLCmax;

otrasvar[0]=&var1;

otrasvar[1]=&var2;

otrasvar[2]=&N1;

otrasvar[3]=&N2;

readpar();

for (cont=1; cont<9; cont++)

{ *vars[cont+8]= *vars[cont] ; }

nf=1.0;

nr=1.0;

R1=5.0e-2;

R2=5.0e-2;

Lr=0.009;

Cp = 775.0;

X = 0.6;
```

```

lambda=580e-9;

f=0.003;

clrscr();

strcpy(letrero[0],"Distancia (L1)..... ");
strcpy(letrero[1],"Distancia (L2)..... ");
strcpy(letrero[2],"Inclinación del espejo (t1)..... ");
strcpy(letrero[3],"Potencia de bombeo (Pp)..... ");
strcpy(letrero[4],"Distancia (L2)..... ");
strcpy(letrero[5]," ..... ");
strcpy(letrero[6]," ..... ");
strcpy(letrero[7]," ..... ");
strcpy(letrero[8],"Variable en X..... ");
strcpy(letrero[9],"Variable en Y..... ");
strcpy(letrero[10],"Puntos de la primer variable.... ");
strcpy(letrero[11],"Puntos de la segunda variable... ");
strcpy(letrero[15],"Calcular Omegas (para un punto) ");
strcpy(letrero[16],"Generar Mapa de estabilidad ");
strcpy(letrero[17],"Encontrar Máximos y Mínimos (V1) ");
strcpy(letrero[18],"Distancia de enfocamiento del Argón (f)");

while (!salir)

{

for (cont=0; cont<4; cont++)

{

```

```

gotoxy(x1,2+cont);

cprintf("%c ", 'A'+cont) ;

cprintf(letrero[cont]);

cprintf("%e %e ", *vars[cont+1], *vars[cont+17]) ;

}

for (cont=0; cont<4; cont++)

{

gotoxy(x1,11+cont);

cprintf("%c ", 'I'+cont) ;

cprintf("%s %d ", letrero[cont+8], *otrasvar[cont]);

}

gotoxy(x1,16); cprintf("M) %s", letrero[15]) ;

gotoxy(x1,17); cprintf("N) %s", letrero[16]) ;

gotoxy(x1,18); cprintf("O) %s", letrero[17]) ;

gotoxy(20,23); cout << "Escoge la variable que quieras modificar";

gotoxy(20,24); cout << "o la opción que desees ejecutar....";

opcion=leetecla();

opcion=toupper(opcion);

if (opcion >= 'A' && opcion <= 'D')

{

gotoxy(x2-strlen(letrero[opcion- 'A']),20);

cprintf( letrero[opcion-'A']);

cin >> *vars[opcion-'A'+1] ;

```

```

gotoxy(x2-strlen(letrero[opcion- 'A']),21);

printf( "Valor Máximo: " );

cin >> *vars[opcion-'A'+17] ;

*vars[opcion-'A'+9] = *vars[opcion-'A'+1] ;

}

if (opcion >= 'I' && opcion <= 'L') //NO SE UTILIZA.

{

gotoxy(x2-strlen(letrero[opcion- 'A']),20);

printf( letrero[opcion-'A']); cin >> *otrasvar[opcion-'I'] ;

}

gotoxy(x2-strlen(letrero[1]),20);

printf(" ");

gotoxy(x2-strlen(letrero[1]),21);

printf(" ");

switch (opcion)

{

case 'M': procesar=1; savew=1; map(W3H,W3V); break;

case 'N': procesar=0; savew=0; map(W3H,W3V); break;

case 'O': procesar=1; savew=0; map(W3H,W3V); break;

case 27: salir=1; break;

}

for (cont=1; cont < 9; cont++) { *vars[cont]= *vars[cont+8]; }

}

```