UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UN CONMUTADOR ÓPTICO 4X4 EN ESPACIO LIBRE UTILIZANDO DISPOSITIVOS MEMS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO-ELECTRÓNICO

PRESENTA:

JOSÉ TRINIDAD YÁÑEZ MONTIEL

DIRECTOR DE TESIS: DR. VÍCTOR ARGUETA DÍAZ

México, D. F., Cuidad Universitaria, Marzo 2007

Agradecimientos

A la Facultada de Ingeniería
Por darme mi formación profesional.

Quiero dar mi más sincero reconocimiento y gratitud
a todas las personas que hicieron posible este trabajo
ya que sin su ayuda y colaboración no hubiera sido
posible la conclusión satisfactoria del mismo.

En primer lugar quiero destacar a mi director de tesis,
Víctor Argueta Díaz, cuya paciencia, ideas y consejos
me ayudaron a salir de innumerables baches
y así poder llevar a buen término este trabajo.

Quiero dar las gracias a mis padres, Epifanio y Maria Inés,
en especial a mi madre por sus consejos, apoyo
y por los valores que me ha transmitido
los cuales procuro tener presentes en todos los ámbitos de mi vida.

A mis hermanos, Josefa Marisol, Maria de la Luz, Tomás,
Vicente y Lina Claudia, por su apoyo incondicional e incuestionable
durante todo el tiempo que estuve realizando este trabajo.
De ellos he aprendido mucho, lo que realmente importa
y sin su ayuda nada de todo esto habría sido posible.
Espero que este trabajo les haga sentir lo orgulloso
que yo me siento de ellos.

Por último pero no menos importante quiero dar las gracias a mis amigos
(larga lista que por motivos obvios no se pone), sin embargo,
no quiero dejar pasar la oportunidad de darles las gracias,
a mis amigos con los cuales he compartido mis recientes vivencias
las que me han hecho crecer como persona, ya que me han demostrado
que uno no esta sólo y me han enseñado el valor de la amistad
y a nunca darme por vencido y lucha hasta alcanzar mis metas,
muchas gracias Omar, Edgar, Gerardo, Luís Antonio,
Cynthia, Mary Lincoln y José Manuel.

Agradecimientos

Índice

Objetivo

Capítulo I Introducción…….. 1

I.1 Generaciones en los Sistemas de Comunicaciones…….. 3

I.2 Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM)…… 5

I.3 Micro-Sistemas Electro-Mecánicos (MEMS)…..…….. 8

I.4 Sistemas de Conexión Cruz Óptica (OXC)…….. 9

I.4.1 Transparencia en redes de comunicación……...…… 9

I.5 Conmutadores MEMS 2D y 3D……... 11

I.5.1 Conmutador MEMS 2D o Bidimensional…….. 11

I.5.2 Conmutador MEMS 3D o Tridimensional……. 14

I.6 Núcleo Óptico o Eléctrico en OXC……... 16

I.7 Resumen por Capítulo…… 18

Capítulo II Marco Teórico…….. 20

II.1 Etapas para el Diseño del conmutador Óptico OXC….……... 20

II.2 Óptica Paraxial…… 21

II.2.1 Aproximación Paraxial…….……. 22

II.3 Óptica Matricial…….….. 23

II.3.1 Matrices de transferencia de elementos ópticos simples….…….…. 27

II.3.1.1 Propagación en espacio libre…….…. 27

II.3.1.2 Refracción en un límite plano…….…… 28

II.3.1.3 Refracción en un límite esférico…….… 28

II.3.1.4 Transmisión a través de una lente gruesa…….…….. 29

II.3.1.5 Transmisión a través de una lente delgada……. 30

II.3.1.6 Reflexión en un espejo plano……. 31

II.4 Haz Gaussiano…….… 32

II.4.1 Método algebraico Matriz ABCD…….… 36

II.5 Acoplamiento entre guías de onda…….…….…. 37

II.5.1 Eficiencia de acoplamiento…… 37

II.6 Aberración geométrica y cromática……... 38

II.6.1 Coma…….… 39

II.6.2 Astigmatismo…… 40

II.6.3 Aberración esférica……... 41
II.7 Curvas de intersección de rayos…….……. 42
II.7.1 Curvas para aberración esférica…….…… 42
II.7.2 Curvas para Coma……. 43
II.7.3 Curvas para Astigmatismo…… 44

Capítulo III Desarrollo del Conmutador Óptico OXC……. 45

III.1 Diseño del Sistema OXC……..... 45

III.2 Especificaciones y/o requerimientos del sistema OXC…….…….. 46
III.3 Cálculo de la Matriz de Transferencia ABCD……..……. 46
III.4 Cálculo del tamaño del spot y el radio de curvatura del frente de onda en la superficie plana de la primera microlente……...…… 50

III.5 Análisis de Pérdidas por tamaño de abertura…….…. 52

III.5.1 Por pantalla Rectangular y Circular……..… 53

III.6 Eficiencia de acoplamiento……. 55

III.6.1 Tolerancia al desplazamiento…… 56

III.6.2 Eficiencia de acoplamiento para un desplazamiento transversal en el eje z……. 58
III.6.2.1 Eficiencia de acoplamiento para un desplazamiento longitudinal en el eje z en la fibra óptica de salida……. 59
III.6.2.2 Eficiencia de acoplamiento para un desplazamiento longitudinal en el eje z entre las dos microlentes…….. 62
III.6.2.3 Eficiencia de acoplamiento para un desplazamiento longitudinal en el eje z tanto δ_1 en la salida de la Fibra óptica, así como δ_2 entre las microlentes..... 64

III.6.3 Eficiencia de acoplamiento para un desplazamiento transversal en el eje x.…… 66

III.6.4 Eficiencia de acoplamiento para un desplazamiento transversal tanto en el eje x y en el eje y…….…….. 67
III.6.5 Eficiencia de acoplamiento para un desplazamiento longitudinal en el eje z, además de un desplazamiento angular……. 68

Capítulo IV Diseño Final de conmutador OXC.....……. 71

IV.1 Simulaciones en OSLO……..…….…… 71
IV.2 Simulación en OSLO para el sistema base empleando la microlente de $330\ \mu m$ …..... 74

IV.2.1 Simulación del sistema base sin desplazamiento……...……..…. 74
IV.2.2 Cálculo de las pérdidas debidas al paso de la luz por las superficies circulares de las microlentes.…….……..…. 76
IV.2.3 Cálculo de las pérdidas de Fresnel…… 77
IV.2.4 Simulación del sistema base con un desplazamiento δ_1 en la fibra de salida….. 78

IV.2.5 Simulación del sistema base con un desplazamiento δ_2 entre las microlentes.... 80
IV.3 Simulación en OSLO para el sistema base empleando la microlente de $900\ \mu m$ …..... 83

IV.3.1 Simulación del sistema base sin desplazamiento……...……..…. 83

IV.3.2 Cálculo de las pérdidas debidas al paso de la luz por las superficies circulares de las microlentes.……..……..…. 85

IV.3.3 Cálculo de las pérdidas de Fresnel…… 85

IV.3.4 Simulación del sistema base con un desplazamiento δ_1 en la fibra de salida….. 86

IV.3.5 Simulación del sistema base con un desplazamiento δ_2 entre las microlentes.... 87

IV.4 Diseño Final del conmutador OXC…… 89

Resultados, Conclusiones y consideraciones finales 93

Anexos 94

Bibliografía 113

Resumen de la Tesis 115

Trabajo Futuro 116

Índice de Figuras 117

Índice de Tablas 119

OBJETIVO

En el presente trabajo se presenta el Diseño de un conmutador óptico en espacio libre de 4x4 puertos. El conmutador se analizará para diferentes casos de desalineación con la finalidad de obtener un conmutador óptimo.

El análisis del conmutador se realizará mediante óptica matricial, este será modelado mediante las matrices de transferencia que integran el sistema. Obteniéndose un sistema simplificado que servirá como un modelo matemático para su estudio.

Se obtendrán las pérdidas por difracción debidas a los elementos ópticos y las pérdidas de Fresnel debidas a la reflectividad en el cambio de los diferentes medios que experimenta la luz a su paso a través del sistema. Además se realizará el análisis de eficiencia de acoplamiento para los diferentes tipos de desalineación en el sistema.

Para el diseño del conmutador se obtendrán las distancias y dimensiones de los elementos ópticos que integraran el conmutador final. Dicho diseño se evaluará por medio de programas de simulación (OSLO).

El sistema final se podrá construir mediante MEMS (microespejos, debido a su rendimiento y a sus dimensiones), una celda White o cristal líquido.

Capítulo I

Introducción

A pesar de que en la actualidad los sistemas de comunicaciones tienen una gran capacidad tanto para la adquisición, manejo y distribución de información, es necesario acondicionar las redes de comunicaciones para mejorar la distribución y conmutación de la gran cantidad de información que se esta generando en la actualidad. Ya que no solamente se transmiten datos por las redes de comunicaciones, sino que además en la actualidad se transmite audio, video y multimedia. Por tal motivo es necesario lograr hacer una red de comunicaciones completamente óptica con la cual se tendría una mayor eficiencia en cuanto a la conmutación de la información.

En la actualidad la conmutación de la información en una red óptica se lleva a cabo por medio de un conmutador electrónico. El conmutador electrónico solamente manipula señales eléctricas, por lo que para poder realizar la conmutación de una señal óptica, esta debe ser primero convertida a una señal eléctrica para así poderse llevar a cabo la conmutación de la información, una vez que ya se realizó la conmutación la señal eléctrica se vuelve a convertir a una señal óptica para continuar su trayectoria final dentro de la red óptica.

Sin embargo, debido al proceso de conversión de la señal óptica-eléctrica-óptica en el conmutador electrónico, se presenta una saturación en este debido a la cantidad de información que debe reconvertirse. La saturación ocasiona un retardo significativo en la entrega de la información a los usuarios finales. Así que al sustituirse el conmutador electrónico por un conmutador óptico se evitarían dichas conversiones y por consecuencia se tendría una conmutación más eficiente.

Al incorporarse un conmutador óptico dentro de una red óptica se obtendría una mejor operatividad de la misma, es decir, no se tendría la necesidad de convertir la señal óptica a una señal eléctrica para poderse llevar a cabo la conmutación, puesto que el conmutador óptico es capaz de manipular la señal óptica para efectuar la conmutación necesaria. Al no tener que convertir las señales ópticas se tendría una red completamente óptica, logrando así aumentar la capacidad de la red óptica y una mayor eficiencia para transportar información con varias longitudes de onda simultáneamente [1].

La idea de poder transmitir información por medio de la luz no es una novedad puesto que esta tiene siglos de antigüedad. Hacia 1880, Bell construyó un aparato al que denomino *el fotófono* [2] el cual era capaz de enviar señales vocales a una distancia corta por medio de la luz. Este consistía de un sistema de lentes que enfocaban un rayo de luz solar, modulándolo y lanzándolo después en espacio libre hacia un receptor. Sin embargo, su aplicación no fue posible en su totalidad en ese momento, debido a la falta de una fuente de luz adecuada como medio de propagación, en la cual se presentaran bajas pérdidas.

Ya para la segunda mitad del siglo XX se preveía que la utilización de la luz como medio de transporte de la información podría llegar a incrementar significativamente la capacidad de los sistemas de comunicación. Al inventarse en 1958 el LÁSER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, por sus siglas en inglés), que es un método capaz de generar ondas con la misma frecuencia y fase, teniéndose en la salida por medio de este método un haz de luz coherente.

La importancia de láser radica en que este produce radiaciones electromagnéticas en las longitudes de onda del espectro visible, empleando los estados energéticos de los átomos. Además de que el láser es empleado como soporte para el transporte de altos flujos de información, debido a la alta frecuencia de la portadora luminosa que ha de transportar la información hacia el receptor.

Otra característica importante del láser es que las trayectorias de los rayos emergen paralelas con la misma frecuencia y fase, lo que permite concentrar una alta cantidad de energía en superficies reducidas, lo que es de gran utilidad en el caso de las fibras ópticas [2].

Sin embargo fue necesario esperar la demostración satisfactoria del primer láser en el año de 1960 para así poder contar con una fuente de luz intensa y coherente [3]. Ya con la concepción del láser como una fuente de luz coherente, se retomo la idea de poder transmitir información en espacio libre utilizando el láser como soporte de la transmisión de la información en los sistemas de comunicación. El láser se presenta como un sistema alternativo o sustituto de los sistemas existentes, estableciéndose al mismo tiempo los primeros pasos para la transmisión por medio de una guía de onda de vidrio. La técnica del láser resulta particularmente atractiva en comunicaciones digitales, ya que con una fuente láser disipada a alta velocidad se pueden transmitir los unos y ceros de un sistema de comunicación digital desde un emisor hasta a un receptor.

La transmisión en fibra óptica tiene lugar a frecuencias ópticas de varios órdenes de magnitud superior a las de microondas [2]. Conceptualmente, un sistema de transmisión por fibra óptica es similar a un sistema de microondas en muchos aspectos. La principal diferencia radica en que mientras en uno el medio de transmisión es el espacio libre, para el otro su medio de transmisión es una guía de onda de vidrio. En la tecnología de fibra óptica se habla en términos de longitud de onda, en lugar de hablar de frecuencias, estas magnitudes están íntimamente relacionadas por la siguiente ecuación [2].

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{1.1}$$

Donde λ, es la longitud de onda del haz de luz en el medio considerado, c es la velocidad de la luz en el mismo medio y f es la frecuencia de la onda luminosa.

De acuerdo a las bases de que es posible transportar información en espacio libre, se realizará el análisis de un conmutador óptico de 4×4 puertos en espacio libre basado en tecnología MEMS, el cual podrá realizar la conmutación óptica sin necesidad de una conversión óptica-eléctrica-óptica, teniendo así una red de comunicaciones completamente óptica.

I.1 Generaciones en los Sistemas de Comunicaciones

La evolución de los sistemas de comunicación óptica y sus correspondientes *ventanas* de transmisión y generaciones se pueden diferenciar de acuerdo a las longitudes de onda que caracterizan a las respectivas ventanas de transmisión, estando estas localizadas en: $0.85, 1.3\ y\ 1.55\ \mu m$. La ubicación de las *ventanas* se muestra en la Figura 1.1, en la cual se presenta el parámetro de atenuación contra la longitud de onda de trabajo de la fibra óptica. La banda de trabajo comprende el rango desde 0.8 hasta $1.6\ \mu m$. Los valores de atenuación muestran el estado de la tecnología para la fibra óptica, observándose tres valores principales que son las denominadas ventanas de trabajo con mínimas pérdidas y están localizadas en $0.85, 1.3\ y\ 1.55\ \mu m$ respectivamente [4].

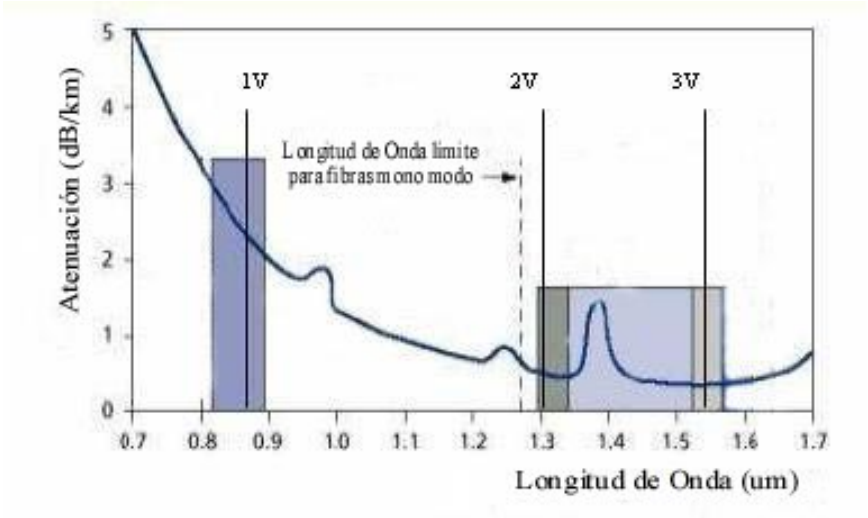


Figura 1.1. Ancho espectral de las ventanas de trabajo en la fibra óptica (A partir de [5]).

Dichas ventanas señalan las zonas de trabajo óptimo y están relacionadas con la evolución tecnológica de la fibra óptica como un medio de transporte. La primera generación de los sistemas de comunicación óptica se introdujo comercialmente en 1980, con *fibras multimodo de índice escalonado* que operaban a una longitud de onda de $0.85\ \mu m$, es decir, en la *primera ventana* de los sistemas de comunicaciones ópticas. Estos sistemas operaban a una tasa de transmisión de $45\ Mbit/s$ con una distancia entre repetidores (punto donde se regenera la señal) de $10\ km$. La máxima distancia posible entre repetidores estaba dada por la atenuación de las fibras ópticas las cuales limitaban la relación señal a ruido que entregaba el sistema [5].

Debido a que era deseable la transmisión de información en longitudes de onda mayores y con la menor atenuación posible en las fibras ópticas, para así lograr incrementar la distancia entre repetidores, se tuvo que desarrollar la tecnología de las *fibras multimodo de índice gradual*, que operaban a una longitud de onda de $1.3\ \mu m$ (segunda ventana), obteniéndose una atenuación en la fibra óptica menor a $0.4\ dB/km$. Los sistemas en esta ventana estaban limitados a una capacidad de transmisión menor a $100\ Mbits/s$ debido a la dispersión modal propia de las fibras multimodo. Para solucionar los problemas de las fibras multimodo se tuvieron que emplear fibras monomodo. Durante el año de 1987 existían sistemas comerciales con una tasa de transmisión de $1.7\ Gbits/s$ con repetidores separados a una distancia de $50\ km$ [5].

La *tercera ventana* es considerada la más importante ya que emplea la tecnología conocida como *fibras monomodo* las que pueden operar a longitudes de onda de $1.3\ y\ 1.55\ \mu m$. Donde $\lambda = 1.55\ \mu m$ es la región mínima donde es deseable que una fibra óptica trabaje, ya que desde el punto de vista de la atenuación a esta longitud de onda se presenta una atenuación de $0.2\ dB/km$ [4] y un ancho de banda que permite alcanzar más de $10\ Gbits/s$, con tramos de repetición de aproximadamente $100\ km$. En esta ventana se tiene al menos idealmente un ancho de banda del orden de $200\ nm$ [4].

Una característica de las Fibras Monomodo Estándar (SSMF - Standar Single Mode Fiber, por sus siglas en inglés), es que estas presentan un elevado valor de dispersión cromática [5] en la tercera ventana. La dispersión cromática es el resultado de la dependencia del índice de refracción de la fibra con la longitud de onda. Es decir, diferentes componentes (modos) de frecuencia de los pulsos transmitidos viajan a diferentes velocidades lo que produce un ensanchamiento temporal de los pulsos transmitidos, este fenómeno se muestra en la Figura 1.2, en la figura se observa que debido a la dispersión cromática los pulsos aumentan su duración temporalmente a medida que se propagan en la fibra óptica, teniéndose un ensanchamiento de los pulsos de la salida con respecto a los pulsos de entrada.

Este efecto puede originar la superposición de diferentes pulsos, aumentando la probabilidad de ocurrencia de errores en la detección. Debido a la dispersión cromática no es factible emplear fibras multimodo para sistemas de alta capacidad, restringiéndose su utilización a sistemas cortos de algunas decenas de kilómetros [5].

En la práctica para los sistemas de alta capacidad se emplean Módulos Condensadores de Dispersión (DCMs, por sus siglas en inglés), que permiten cancelar el efecto de la dispersión cromática acumulada.

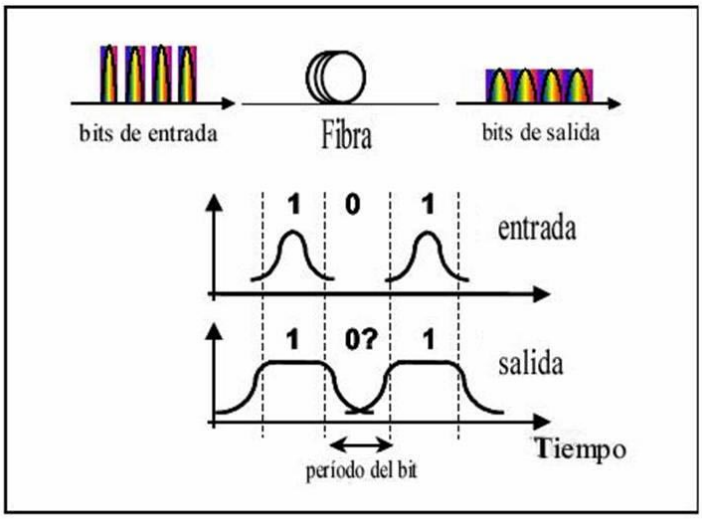


Figura 1.2 Efecto de la dispersión cromática en una fibra óptica monomodo (A partir de [5]).

La introducción comercial de las Fibras de Cambio de Dispersión (DSF, por sus siglas en inglés) en los comienzos de los años 90's, fue posible al estar buscando una fibra óptica que presentara un mínimo de dispersión cromática en la tercer ventana. Las DSF presentan una dispersión cromática aproximadamente 10 veces inferior a la que presentan las fibras monomodo estándar [5].

I.2 Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM)

Dos de los principales inconvenientes de las redes de comunicaciones actuales son, por un lado la falta de capacidad para soportar el aumento del tráfico producido en los últimos años y por otro lado, la diversidad de protocolos de comunicación que se utilizan, los cuales son incompatibles unos con otros. Las redes de fibra óptica con Multiplexación por División de Longitud de Onda (WDM, por sus siglas en inglés), se presentan como una buena alternativa para resolver ambos problemas.

Los primeros sistemas instalados con tecnología WDM, utilizaban la segunda y tercer ventana, transmitiendo por cada una de ellas un número pequeño de portadoras ópticas, separadas varios nanometros entre si. Debido a que en la actualidad el transporte de la información no solo incluye voz y datos sino que además de estos se transporta video y multimedia, la tendencia actual es la implementación de sistemas que sólo utilicen la tercer ventana, en la cual están presentes centenares de portadoras ópticas separadas nanometros entre si. La tecnología más adecuada para realizar dicha tarea es la conocida como Multiplexación por División de Longitud de Onda Densa (DWDM, por sus siglas en inglés), la que permite aumentar la capacidad de la fibra óptica como medio de transporte, además de proporcionar una forma de conmutación totalmente óptica al formato de transmisión de los datos.

Para las redes de comunicación óptica DWDM es primordial puesto que esta soporta la demanda creciente en el ancho de banda de las estructuras de trasporte. La tecnología DWDM permite incrementar y aprovisionar el ancho de banda de la fibra óptica, logrando transmitir simultáneamente varias longitudes de onda sobre la misma fibra óptica, teniéndose una atenuación de aproximadamente $0.2\,dB/km$ en la ventana de transmisión de $1.5\,a\,1.6\,\mu m$, que representa un ancho de banda disponible de alrededor de $15000\,GHz$, o una tasa de transmisión digital de al menos $5\,Tbit/s$ por fibra, equivalente a $80\,millones$ de canales telefónicos [6].

La utilización de la tecnología WDM en los enlaces ópticos es el primer paso hacia las redes totalmente ópticas, conocidas también como redes ópticas transparentes, en estas redes los canales son conmutados basándose en su longitud de onda y las señales conservan su naturaleza óptica a lo largo de toda su trayectoria, sin la necesidad de reconversiones optoelectrónicas. Este avance mejora las características de capacidad y flexibilidad de las redes de comunicación, proporcionando transparencia a los formatos de modulación y a los protocolos utilizados, evitando la saturación debido a las limitaciones en la velocidad de la electrónica asociada a la conmutación.

Las redes actuales que incorporan WDM utilizan la tecnología óptica para realizar enlaces punto a punto de larga distancia, multiplexando 40 longitudes de onda centradas entorno a la tercera ventana $(1.55\,\mu m)$. En estas redes las labores de enrutamiento, multiplexación, y regeneración son realizadas por los equipos electrónicos de (SONET - Synchronous Optical Network, por sus siglas en inglés) o (ATM - Asynchronous Transfer Mode, por sus siglas en inglés).

La utilización de WDM en los enlaces punto a punto permite que la interfase óptica soporte la transmisión de señales con varios protocolos diferentes, aunque el enrutamiento se realiza en el dominio electrónico y de forma separada para cada uno de los protocolos. Para lograr la conexión sin reconversión electrónica de enlaces ópticos y así obtener estructuras complejas como anillos o buses, se necesita un dispositivo selector de longitud de onda, como el multiplexor óptico add/drop (OADM, por sus siglas en inglés), que se encargará de extraer la información que llega a su longitud de onda de trabajo y transmitir una nueva señal en el mismo puerto, eliminando la necesidad de reconvertir al dominio electrónico todos los puertos para extraer la información de uno de ellos.

El último paso para lograr la flexibilidad completa de las redes es la incorporación de las Conexiones Cruz Ópticas (OXCs, por sus siglas en inglés), que son las que redireccionan los puertos entre varias fibras de entrada y salida en función de la longitud de onda. Las OXCs han emergido como un elemento alternativo indispensable para la construcción de las redes de comunicación de la próxima generación. Debido a que la transparencia de los conmutadores ópticos en espacio libre pueden enrutar las señales en sistemas de comunicación de fibra de banda ancha, se tiene una inserción de pérdidas bajas, baja interferencia de la señal, insensibilidad a la longitud de onda y a la polarización, alta capacidad manejable de potencia y escalabilidad para un gran número de puertos.

Sabiendo las ventajas que presentan las OXCs, en esta tesis se realizará el análisis de un conmutador de Conexión Cruz Óptica (OXC, por sus siglas en inglés) de 4×4 puertos, con microespejos de posición múltiple con un eje simple, el esquema de dicho sistema se muestra en la Figura 1.3.

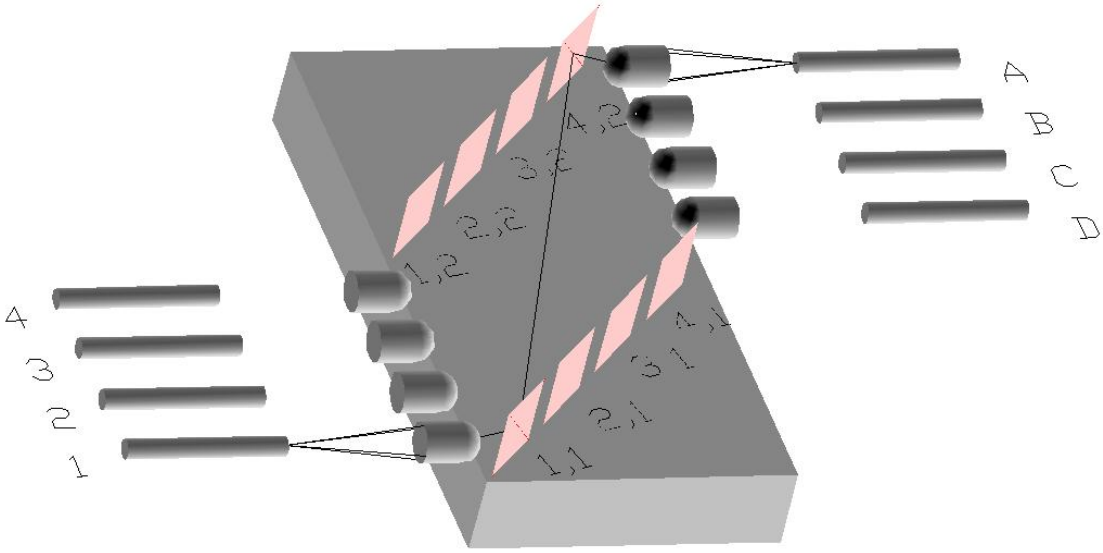


Figura 1.3 Sistema Conexión Cruz Óptica en espacio libre con rotación de espejo de 4x4.

El sistema OXC que se analizará estará constituido por un arreglo lineal de 4 fibras ópticas tanto en la entrada como en la salida (puertos) y este operará como se indica a continuación: la luz proveniente de la fibra óptica 1 del arreglo de fibras de entrada viajará una pequeña distancia en espacio libre hasta que su trayectoria óptica se encuentra con su microlente correspondiente, la cual tendrá la función de colimar la luz que pase a través de la ella.

La luz al salir de la microlente viajará una trayectoria óptica en espacio libre hasta el microespejo $1{,}1$ del arreglo 1 de microespejos. Al incidir la luz colimada sobre el microespejo $1{,}1$, la luz será direccionada al microespejo $4{,}2$ del arreglo 2 de microespejos siguiendo una trayectoria óptica en espacio libre, esto se logra debido a que cada microespejo individual puede ser girado cualquier ángulo variable determinado y así poder direccionar la luz a cualquiera de los microespejos del arreglo 2 de microespejos.

Ya por último la luz colimada que llega al microespejo $4{,}2$ del arreglo 2 de microespejos es direccionada a la fibra A del arreglo de fibras de salida, pasando previamente por su correspondiente microlente la cual tendrá la función de acoplar la luz colimada a la fibra A, después de viajar una pequeña distancia en espacio libre entre la microlente y la fibra A. Este sistema es capaz de realizar la conmutación de cualquiera de las 4 fibras de entrada con cualquiera de las 4 fibras de salida.

I.3 Micro-Sistemas Electro-Mecánicos (MEMS)

Los Micro-Sistemas Electro-Mecánicos (MEMS, por sus siglas en inglés), son considerados una subcategoría de los conmutadores optomecánicos, sin embargo debido al gran interés de la industria de Telecomunicaciones que los ha visto como elementos con un gran potencial para poder implementarse en redes de sistemas de comunicaciones ópticas, estos se pueden considerar de manera aislada puesto que presentan gran rendimiento cuando son incorporados a dispositivos que conforman la red de comunicación.

Los dispositivos MEMS que se emplearan en el conmutador OXC de 4×4 puertos en espacio libre, serán los microespejos de los arreglos 1 y 2 de la Figura 1.3. Los microespejos nos permitirán hacer la conmutación de los puertos de entrada con los puertos de salida.

Los microespejos MEMS empleados en una conexión cruz, utilizan su superficie reflexiva para poder desviar los haces de luz a un puerto deseado. Es decir, la luz proveniente desde un puerto de entrada al incidir sobre la superficie reflexiva del microespejo MEMS, esta será desviada al puerto de salida deseado [8], con lo que se logrará realizar la conmutación de cualquier puerto de entrada con cualquier puerto de salida, un dispositivo MEMS que puede realizar esta operación es el denominado crossbar.

Las investigaciones de los MEMS y los avances tecnológicos de las últimas décadas, han logrado producir versiones microscópicas de la mayoría de los dispositivos electrónicos utilizados en comunicaciones. La utilización de MEMS para la conmutación óptica resulta ser más atractivo para aplicaciones en Telecomunicaciones en donde se utilizan fibras ópticas, ya que cubre las propiedades de escalabilidad, mejor rendimiento, tamaño pequeño, alta velocidad, bajo consumo de energía, alto grado de funcionalidad y cumplen los requisitos de confiabilidad para aplicaciones importantes en redes de fibra óptica [9].

Los MEMS que habían sido objetos de curiosidad académica desde 1980, han emergido recientemente como un medio importante para implementar dispositivos que se pueden emplear para mejorar las redes de comunicaciones, puesto que estos son compactos y tiene un bajo costo. Los dispositivos MEMS son micromaquinados en silicio produciéndose conjuntamente los caminos de interconexión, similares a los caminos de interconexión en los circuitos integrados de silicio.

La técnica de fabricación para la Integración en Escala Muy Grande (VLSI – Very Large Scale Integration, por sus siglas en inglés), permite diseñar sistemas micromecánicos integrados, dispositivos microelectrónicos analógicos y digitales sobre el mismo chip, produciendo sistemas integrados multifuncionales y hasta subsistemas para sistemas de comunicaciones basados en fibra óptica. Algunas de las aplicaciones principales incluyen rayos láser, conmutadores ópticos y filtros sintonizables. La actuación de los dispositivos MEMS se realiza mediante fuerzas electrostáticas, electrotérmicas, magnéticas, electromagnéticas y piezoeléctricas.

De manera general los dispositivos MEMS, se ha podido materializar gracias a la existencia de diferentes métodos de fabricación en la industria de semiconductores, al igual que las nuevas necesidades de la actualidad han hecho que estos dispositivos tengan un mejor rendimiento. No se puede predecir el éxito comercial de los dispositivos basados en MEMS, sin embargo estos son considerados una de las tecnologías indispensables para los siguientes años, ya que los dispositivos MEMS tienen la ventaja de que aparte de operar en el domino eléctrico, también pueden ser operados tanto en el dominio mecánico y a menudo en el dominio de la energía [10].

En la actualidad el diseño y la fabricación de dispositivos a base de MEMS son en la gran mayoría aplicaciones especificas predeterminadas, por consecuencia su ciclo de desarrollo no es explotado al máximo, unos de los usos en la actualidad para los MEMS, incluyen sensores mecánicos para la industria automotriz (sensores de presión y de aceleración), en la industria de la medicina (sensores disponibles para la medición de la presión) y en la inyección de tinta para las impresoras [10].

I.4 Sistemas de Conexión Cruz Óptica (OXC)

La principal aplicación de una Conexión Cruz Óptica (OXC), es que esta presenta una reconfiguración dinámica en una red de comunicaciones, en cuanto a sus longitudes de onda, tanto para el restablecimiento como para la adaptación de los cambios de acuerdo a la demanda del ancho de banda. Las Conexiones Cruz Ópticas (OXCs) son capaces de realizar las siguientes funciones [11]:

- La administración de la conexión y del ancho de banda, para suministrar conexiones de puertos libres (para servicios de longitud de onda de línea privada) y de puertos ópticos además de proveer la función de inserción/extracción de longitudes de onda.
- Reagrupación de las longitudes de onda, para mejorar la utilización de la infraestructura instalada.
- La protección/restablecimiento, de la longitud de onda para aumentar al máximo la eficiencia y fiabilidad de la infraestructura de la red principal.
- La asignación dinámica de la longitud de onda, acoplando la OXC con un núcleo de ruteadores, para realizar una solución confiable frente a los cambiantes requisitos de ancho de banda en la red de datos.

I.4.1 Transparencia en redes de comunicación

La transparencia de la velocidad binaria sobre el conjunto de velocidades soportadas mejoraría la flexibilidad de la red, sin embargo para lograr la transparencia en una red el conmutador se debe diseñar para el peor de los casos, es decir, la velocidad binaria más alta, con lo que se incrementaría el costo de la red. Siendo la regeneración 3R (Rehacer, Retener, Reamplificar), tanto para velocidad única como múltiple una función clave de la red principal.

Gran parte de las OXCs, en la actualidad utilizan un núcleo eléctrico para realizar los cambios de los diferentes puertos, referido como conmutadores óptico-eléctrico-óptico (OEO), donde las *señales ópticas* son cambiadas primero a *señales eléctricas*, las que son manipuladas por dispositivos eléctricos para ser direccionadas a algún puerto deseado y finalmente se vuelven a convertir a *señales ópticas* para seguir su camino dentro de la red óptica. La regeneración OEO es la más eficiente y rentable de las instalaciones actuales en los sistemas de comunicaciones.

La transparencia total de la red en cuanto a la infraestructura frente a los incrementos de la velocidad binaria y a los nuevos tipos de tráfico, reduciendo así los dispositivos en la trayectoria de la señal, disminuye el costo. No obstante, esta misma transparencia limita la escalabilidad, en cuanto al número de puertos y la velocidad binaria o la extensión geográfica de la red. Estas limitaciones provienen de [11]:

- La acumulación de problemas de transmisión, resultantes de la Dispersión Cromática (CD, por sus siglas en inglés), la Dispersión en Modo de Polarización (PMD, por sus siglas en inglés), los Efectos No Lineales (NLE, por sus siglas en inglés), el ruido del amplificador, la curvatura de ganancia, las Pérdidas Dependientes de la Polarización (PDL, por sus siglas en inglés), la falta de alineación de la longitud de onda.
- La dificultad en la ingeniería de la red, que tendrá que ser diseñada para el peor caso. Una vez diseñada la red no se puede extender más allá de los límites previstos en el diseño.

Las OXCs completamente ópticas son más atractivas debido a que evitan las etapas de conversión de las señales, además de que los datos son transparentes al protocolo utilizado, lo que permite que la conexión cruz óptica este lista para el futuro en la actualización de los datos estimados.

Para la próxima generación de redes totalmente ópticas se requerirá de una OXC que tenga la capacidad de conmutar una señal óptica desde un puerto de entrada a múltiples puertos de salida sin ninguna conversión electrónica intermedia. Los MEMS-OXC son vistos como una tecnología dominante para las redes en Telecomunicaciones. Las estructuras de conmutación óptica realizadas con tecnología MEMS han demostrado superioridad sobre tecnologías competidoras, tales como los conmutadores de inyección de burbuja [12], conmutadores de cristal líquido [13], conmutadores termo-ópticos [14], y conmutadores acusto-ópticos [15], en términos de escalabilidad, inserción de pérdidas, pérdida dependiente de la polarización, dependencia de la longitud de onda y propiedades de interferencia de la señal.

Los conmutadores MEMS consiguen el cambio usando dos enfoques principales, conmutadores MEMS (2D) bidimensional o digitales y conmutadores MEMS (3D) tridimensionales o analógicos.

I.5 Conmutadores MEMS 2D y 3D

I.5.1 Conmutadores MENS 2D o Bidimensionales

La arquitectura de los conmutadores MEMS 2D o bidimensionales, utilizan microespejos binarios para realizar la conmutación los cuales pueden cambiar dentro de los dos estados posibles que son *ON y OFF* [16], [17], [18]. El posicionamiento de los microespejos logra el cambio de la trayectoria óptica. Los haces de luz colimada se propagan paralelamente al plano del substrato y al ser activado un microespejo *ON*, este cambia la trayectoria óptica del haz dirigiéndolo a un puerto de salida, debido a que el microespejo hace un ángulo de 45º con el haz incidente sobre el. Este arreglo también deja pasar los rayos de luz sin la necesidad de pasar por un microespejo, cuando este esta desactivado *OFF*, lo que se puede utilizar para añadir o quitar canales ópticos (longitudes de onda). Este conmutador es mostrado en la Figura 1.4, en la cual se muestra como es cambiada la trayectoria óptica de un haz de luz, procedente de un arreglo de fibras colimadas de entrada a un arreglo de fibras colimadas de salida, el cambio de la trayectoria óptica se realizará cuando el haz de luz de la fibra de entrada incide sobre el microespejo activado *ON* en el conmutador y así al ser desviada la trayectoria óptica 45º se puede lograr la conexión a cualquier salida deseada.

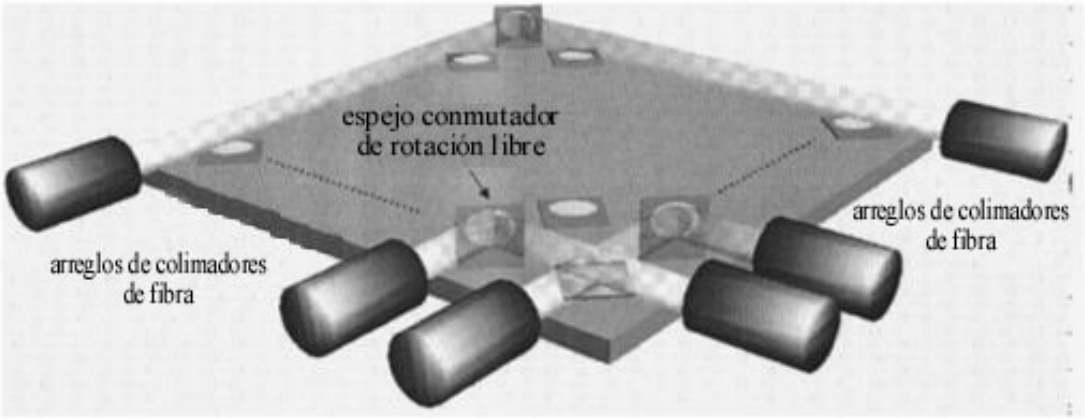


Figura 1.4 Conmutador óptico basado en Tecnología MEMS 2D en espacio libre (A partir de [16]).

La mayoría de los conmutadores ópticos MEMS 2D en espacio libre, están basados en la arquitectura crossbar la cual se muestra en la Figura 1.4. Este tipo de arquitectura presenta dos problemas principales que son:

1) Debido a que las diferentes trayectorias desde los puertos de entrada a los puertos de salida no tienen la misma longitud, se debe de seleccionar la cintura del haz donde la inserción de pérdidas sea la más baja, es decir para la longitud de onda donde se presenta la trayectoria óptica más frecuente, puesto que la inserción de pérdidas más

baja ocurrirá entre las distancias de las trayectorias mayor y menor. Al incrementarse el número de puertos se incrementaran las pérdidas [16].

2) No se tiene una uniformidad en la inserción de pérdidas en todos los puertos, debido a las diferentes longitudes en cada trayectoria óptica de acoplamiento entre los puertos de entrada y salida [19]. Al no tenerse una uniformidad de la inserción de pérdidas ópticas los conmutadores MEMS 2D, se ven limitados a un tamaño de 32×32, ya que las pérdidas de inserción para un conmutador con un número mayor de puertos, son muy considerables y se perdería una gran cantidad de la luz que se desea enviar.

Comercialmente los conmutadores 2D disponibles en uso actualmente se caracterizan por una máxima inserción de pérdida de $3.7\ dB$ para un conmutador de 8×8; $5.5\ dB$ para un conmutador de 16×16 y $7.0\ dB$ para un conmutador de 32×32 [20]. Por lo que las estructuras 2D son poco prácticas más allá de puertos con 32 entradas y 32 salidas. Mientras que múltiples etapas de conmutadores de 32×32 en teoría pueden formar un conmutador de 1000 puertos, sin embargo, las altas perdidas ópticas hacen impracticas tales implementaciones. Las altas pérdidas ópticas pueden ser compensadas por la amplificación óptica, pero esta incrementará el costo del sistema en su conjunto.

Aparte de las consideraciones del costo, se debe de considerar que los amplificadores ópticos no son dispositivos ideales. Teniendo así dos características principales indeseables para los *amplificadores ópticos* que son:

Primero, los *amplificadores ópticos* introducen ruido, además de proveer ganancia. Segundo, la ganancia del amplificador depende del total de la energía de todas las entradas. Se debe de cuidar que la energía en las entradas del amplificador no sea alta, para evitar una saturación en las entradas, al igual que se debe de disminuir la ganancia. Finalmente, aunque los amplificadores ópticos son capaces de amplificar muchas longitudes de onda en puertos simultáneamente, no se amplifican todos los puertos de forma equivalente, es decir, su ganancia no es constante durante toda la banda de paso [21].

Dentro de los conmutadores ópticos MEMS 2D, se observan las siguientes características [22]:

1) La arquitectura de conmutación óptica puede ser clasificada dentro de dos categorías principales:

   a) *Sin acoplamiento o una arquitectura desacoplada*: es la arquitectura de conmutación en la cual se tienen recursos independientes para lograr la conectividad entre algún puerto de entrada con un puerto de salida. Un ejemplo es la arquitectura crossbar Figura 1.4, ya que para establecer una conexión de un puerto de entrada a un puerto de salida, sólo se necesitaran esos dos puertos para establecer la conexión, es decir, no se necesitara ayuda de otros puertos para lograr dicha conexión.

b) *Con acoplamiento*: es la arquitectura de conmutación en la cual se tiene recursos compartidos para llevar a cabo la conectividad entre algún puerto de entrada con un puerto de salida. Un ejemplo es el conmutador de Intercambio L, debido a que este utiliza espejos de doble superficie (DS, por sus siglas en inglés), teniéndose por consiguiente que los caminos ópticos de algunas conexiones pueden compartir una dirección en su conectividad.

En la Figura 1.5, se muestra el esquema del conmutador L de 8×8; en la parte izquierda se muestran la ubicación de los puertos de entrada y de salida. El conmutador ocupa un cuadrante para las entradas (cuadrante de cruce) y dos cuadrantes para las salidas.

En la parte derecha se muestran un conjunto de conexiones mediante el conmutador L, siendo estas {(1,5), (2,2), (3,3), (4,8), (5,4), (6,7), (7,6), (8,1)}, cada par representa una conexión, identificándose estas de la siguiente manera (entrada, salida).

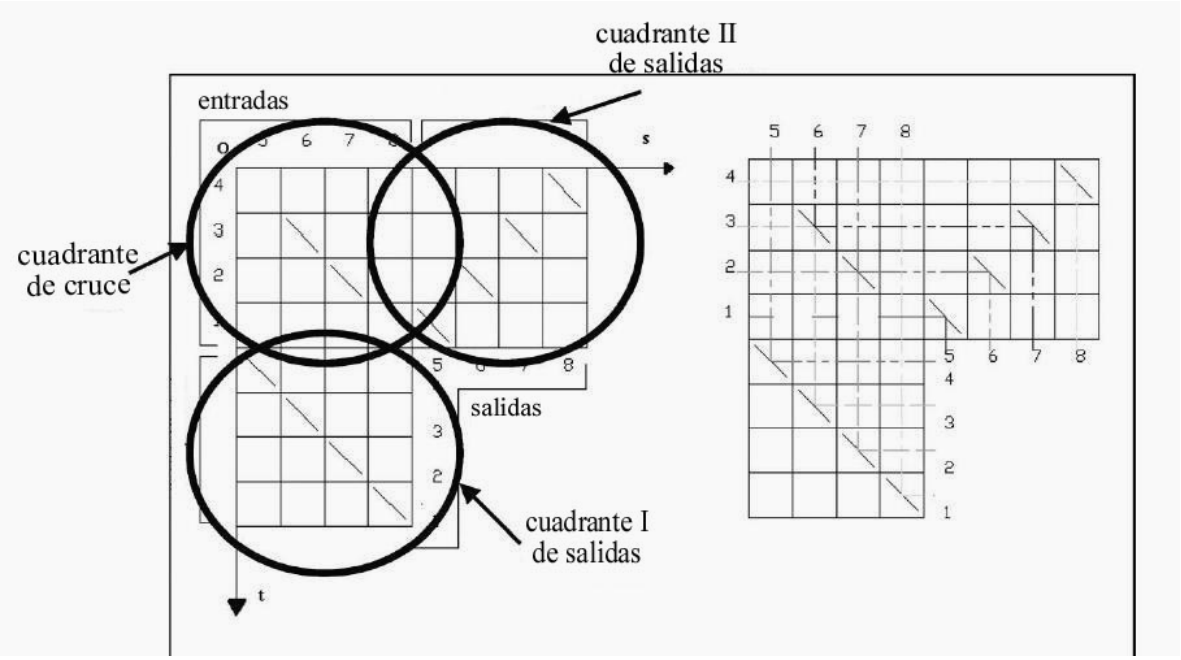


Figura 1.5 Representación de un Conmutador L de 8x8 (A partir de [22]).

2) Los algoritmos de conmutación pueden ser clasificados dentro de dos principales categorías [22]:

a) *Algoritmo sin memoria* (MLA, por sus siglas en inglés) (*algoritmo de primer reinicio o algoritmo siempre reordenable)*: esta clase de algoritmo no toma en cuenta las conexiones efectuadas anteriormente. Cuando un nuevo par de conexiones son requeridas, el conmutador se reinicia y establece la nueva configuración de conmutación, lo que se logra con el cambio de los estados de los espejos. La principal desventaja de un MLA

es la interrupción de las conexiones existentes cuando un nuevo par de conexiones son solicitadas.

b) *Algoritmo con Memoria* (MA, por sus siglas en inglés): este algoritmo recuerda las conexiones sostenidas anteriormente y el estado de la dirección (espejos) que establecen esas conexiones. El algoritmo trata de establecer las nuevas conexiones sin interrumpir las conexiones sostenidas con anterioridad.

3) Dada la combinación (arquitectura y algoritmo de conmutación), un conmutador óptico basado en MEMS puede ser clasificado dentro de tres categorías principales [22]:

a) *Conmutador de No bloqueo en sentido estricto* (SSNB, por sus siglas en inglés): Un conmutador óptico es de no bloqueo en sentido estricto, si las nuevas conexiones pueden ser siempre establecidas sin afectar sustancialmente las conexiones de las otras direcciones. Una arquitectura desacoplada (como una arquitectura crossbar) garantiza las propiedades de SSNB.

b) *Conmutador de No bloqueo en sentido amplio* (WSNB, por sus siglas en inglés): Es aquel en el cual el algoritmo utilizado establece la trayectoria óptica de todos los puertos de entrada disponibles con cada uno de los puertos de salida uno después de otro, logrando así el establecimiento de todas las posibles conexiones de la entrada que no se utilizaban, con lo que se logrará obtener salidas que no se utilizaban anteriormente.

c) *Conmutador* (RNB, por sus siglas en inglés): Este conmutador es capaz de lograr la conectividad con cada una de las posibles conexiones existentes. En este conmutador siempre se trata de establecer la conexión con la mejor trayectoria óptica a la que le da la prioridad para ser establecida.

I.5.2 Conmutadores MEMS 3D o Tridimensionales

La arquitectura de los conmutadores 3D o tridimensionales utiliza microespejos que pueden ser rotados alrededor de dos ejes. La luz puede ser redireccionada con gran precisión en espacio libre a ángulos múltiples, pudiendo tener un número mayor de entradas con respecto de los interruptores MEMS digitales o 2D. Estos conmutadores pueden tener N *o* $2N$ microespejos, donde N es el número de puertos [23], [24], [25]. Actualmente, la mayoría de los diseños de conmutadores comerciales de MEMS 3D usan dos juegos de N microespejos (dando por resultado $2N$ microespejos), para minimizar la inserción de pérdidas. Alternativamente si solamente se usan N microespejos, el número de puertos estará limitado por la inserción de pérdidas, resultando en una limitación de los ángulos de las fibras/microlentes.

Otra ventaja de los conmutadores 3D es que las diferencias de las distancias de propagación en espacio libre entre conmutadores, puertos a puertos dependen mucho menos de la escalabilidad del número de puertos.

Estas arquitecturas pueden ser escalables a miles por miles de puertos [23] con alta uniformidad de pérdidas, sin embargo la escalabilidad, los hace más costosos en términos de las necesidades ópticas más rigurosas y la necesidad de dispositivos de control más complejos [26].

Debido a que una OXC se caracteriza por su arquitectura y su algoritmo de conmutación, la estructura de un conmutador determina el número de trayectorias que la luz tiene para viajar en espacio libre. Por lo tanto, una buena arquitectura para un conmutador debe minimizar la distancia de propagación en espacio libre entre los puertos de entrada y salida. Al mismo tiempo, las diferencias durante toda la conmutación de puerto a puerto deben también ser minimizadas. El algoritmo de conmutación, debe optimizar el funcionamiento del conmutador, el cual debe presentar una mínima y preferentemente ninguna interrupción en las conexiones existentes cuando las nuevas conexiones sean solicitadas.

En la Figura 1.6, se muestra un conmutador MEMS 3D el cual para realizar una trayectoria óptica desde alguna fibra de entrada a una fibra de salida utilizará dos elementos, un ruteador de espejos el cual dirige los haces a la matriz de espejos selectores los que finalmente dirige los haces de luz a la fibra de salida deseada.

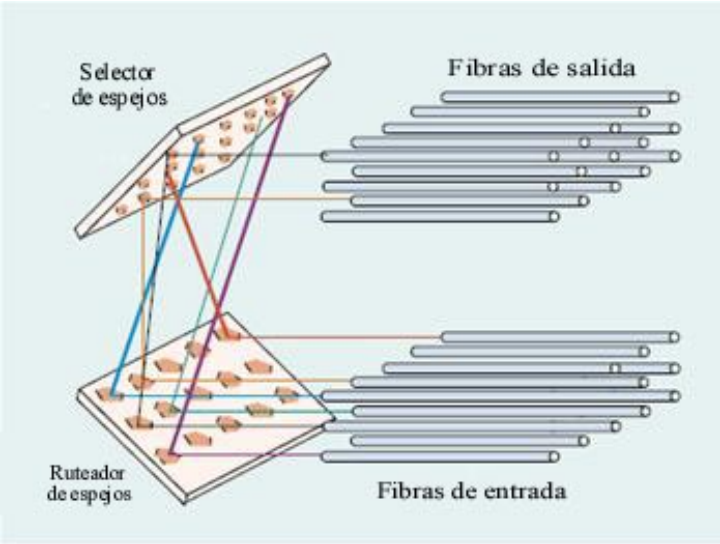


Figura 1.6 Conmutador con Tecnología MEMS 3D o Analógico (A partir de [9]).

En los conmutadores MEMS 3D, se tiene un espejo móvil para cada uno de los puertos de las entradas y salidas. Una trayectoria de conexión es establecida por la inclinación independiente de dos espejos seleccionados en la dirección de la luz desde un

puerto de entrada a un puerto de salida. Los espejos funcionan de modo analógico, inclinándose libremente respecto de sus dos ejes [21]. Esta tecnología es más prometedora para conmutadores OXC que tengan un número mayor de puertos, es decir, puertos de entrada y salida >1000.

Una desventaja de estos conmutadores es que se requiere un sistema de retroalimentación complejo y muy costoso para mantener la posición de los espejos (para lograr la estabilización de la inserción de pérdida) durante los disturbios externos, como el ruido o el desplazamiento.

Las fuerzas de actuación mueven las partes del conmutador ya sea de forma electrostática, electromagnética o térmica. La actuación magnética ofrece el beneficio de gran bidireccionalidad (atractivo y repulsivo) de la fuerza lineal de la salida, pero requiere un proceso de fabricación complejo y de una protección electromagnética. La actuación electrostática es el método preferido, principalmente debido a la relativa facilidad de fabricación y a la integración, permitiendo la baja disipación de energía.

Los beneficios potenciales de una OXC basado en MEMS incluyen escalabilidad, inserción de pérdida baja, tiempo de conmutación corto, bajo consumo de energía, baja interferencia de la señal, e independencia de la longitud de onda y de la tasa de transmisión [21]. Otras aplicaciones para los MEMS incluyen la multiplexación add/drop de longitud de onda, servicio de monitoreo óptico y la protección óptica para la conmutación. Los desafíos referentes a MEMS incluyen la fabricación de un microespejo, empaquetamiento optomecánico, algoritmo de control para el microespejo y la puesta en práctica o implantación.

Como se menciono anteriormente los sistemas MEMS-OXC 2D que se utilizan más frecuente en sistemas de comunicación, están implementados con estructuras croossbar donde el número de microespejos para realizar la conmutación es del orden de N^2, siendo N el número de puertos. Por tal motivo en esta tesis propondremos un sistema al que denominaremos sistema de transición Z, donde se utilizara un número menor de microespejos del orden de $2N$, siendo el último más eficiente en cuanto al número de microespejos utilizados para realizar la conmutación. Nuestro diseño también contemplara el análisis para minimizar las pérdidas por acoplamiento y alineación.

I.6 Núcleo Óptico o Eléctrico en OXC

La construcción de una estructura de conmutación óptica escalable ha sido un poco difícil de realizar debido a la falta de elementos ópticos funcionales para la conmutación. Esta limitación ha tenido un gran peso directo en la arquitectura de la OXC, debido a su tamaño final y a su costo, por lo que algunos fabricantes de equipos han desarrollado un *conmutador de interfaz óptica*, basado en una matriz eléctrica.

Por tal motivo, la mayoría de los conmutadores ópticos comercialmente tienen sistemas electrónicos y no ópticos en su núcleo. La Figura 1.7(a), muestra un conmutador óptico con núcleo eléctrico, en el cual al procesar las señales se obtiene la velocidad mayor binaria eléctrica de $2.5\,Gbits/s$.

La razón por la cual se selecciona la velocidad binaria eléctrica es debido a que las señales ópticas que entran y salen de la OXC van a través tanto de interfaces ópticas como eléctricas, siendo la eléctrica la más simple de manipular.

Sin embargo se presentan fallas al tratar de hacer la conmutación electrónicamente cuando se incrementa la velocidad binaria en las redes con grandes distancias, limitándose a dispositivos pequeños del orden de 32×32. Otra dificultad que se tendrá en la interconexión eléctrica para la conmutación es que la arquitectura de etapas múltiples se hará cada vez más compleja, ya que se deben de poder lograr la interconexión a largas distancias y reducir al mismo tiempo las interferencias electromagnéticas.

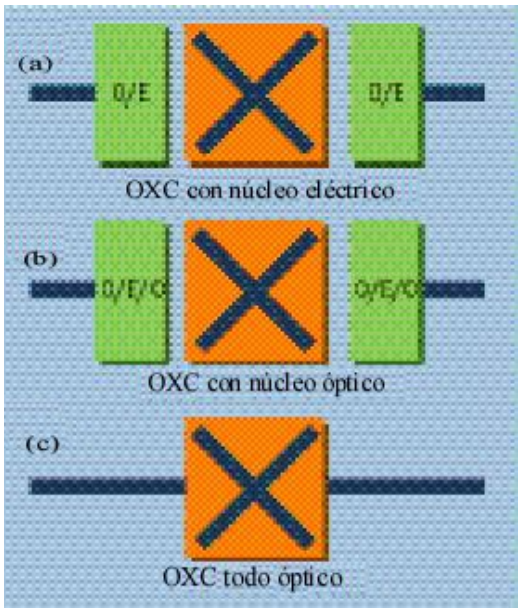


Figura 1.7 Conmutadores ópticos OXC a) Con núcleo eléctrico b) Con núcleo óptico y c) Totalmente óptico (De [11]).

Una alternativa para vencer las limitaciones anteriores es la utilización de la conmutación óptica transparente, ahorrándose las interfases óptica-eléctrica-óptica dentro de la estructura. Teniéndose conmutadores con un verdadero núcleo óptico de conmutación, como se muestran en las Figuras 1.4(b) y 1.4(c). Sin embargo debido a su costo y transparencia, el conmutador óptico con núcleo óptico de la Figura 1.4(b), se observa como una solución opaca y factible, este conmutador tiene un núcleo óptico que está rodeado por una función 3R (Rehacer, Retener, Reamplificar).

I.7 Resumen por Capítulo

Capítulo I

En este capítulo se presenta una introducción de la evolución de los sistemas de comunicaciones ópticas, de la mano con el desarrollo de las ventanas de trabajo para las fibras ópticas permitiendo cada vez realizar redes de comunicación en las que se tuviera una mayor distancia entre repetidores y una menor atenuación.

Se mencionan las configuraciones posibles con las que se pueden diseñar un conmutador óptico en espacio libre, siendo estas las de MEMS-OXC 2D y MEMS-OXC 3D, diferenciándose principalmente por la cantidad de puestos que puede manejar uno respecto del otro, siendo las MEMS-OXC 3D capaz de manejar más de 1000 puertos tanto de entrada y salida, pero más costosos en cuanto a sus necesidades ópticas que requiere, así como de los dispositivos de control más complejos que se necesitan para manipular los microespejos.

Capítulo II

En este capítulo se presentan las herramientas de óptica, que se utilizan para ir desarrollando las diferentes etapas del conmutador OXC, se establecerán condiciones necesarias para llevar a cabo el análisis del conmutador, tales como que los rayos en el sistema se consideraran rayos paraxiales y que los campos del sistema base serán representados mediante haces Gaussinos complejos.

Capítulo III

En este capítulo se emplearan las herramientas del Capítulo II, para desarrollar el diseño del conmutador óptico OXC de 4×4 en espacio libre a base de dispositivos MEMS.

En primer lugar se mencionan las características de las microlentes comerciales que se utilizaran para el diseño del conmutador, para que los resultados que se obtengan se puedan adaptar fácilmente a elementos comerciales.

Se establece un sistema base para obtener las distancias óptimas para capturar una mayor cantidad de luz en la salida del sistema en dicho sistema, identificando al mismo tiempo las matrices de transferencia para cada elemento óptico.

Se realizo el análisis de un haz Gaussiano en la primera microlente del sistema base, tanto en su superficie plana y esférica para descartar las microlentes en las que su radio fuera menor al tamaño del spot en esas superficies, esto con la finalidad de capturar el 99.99% de la luz que entre al sistema.

Se realizó el análisis de acoplamiento para distintos casos de desalineación, tales como un desplazamiento longitudinal en el $eje\ z$, colocando un desplazamiento δ_1 en la fibra de salida y un desplazamiento δ_2 entre las microlentes del sistema base; un desplazamiento transversal en el $eje\ x\ o\ eje\ y$ en la salida del sistema; un desplazamiento transversal en el $eje\ x$ y $eje\ y$ y un desplazamiento tanto longitudinal en el $eje\ z$ y al mismo tiempo un desplazamiento angular θ, encontrando en cada caso la eficiencia de acoplamiento.

Capítulo IV

En este capítulo se realizan las simulaciones en OSLO, tanto del sistema cuando no se presenta ninguna desalineación, obteniéndose con esta simulación las gráficas de las aberraciones presentes en el sistema base.

También se obtienen los valores de $w_1\ y\ R_1$, tanto para cuando se tiene un desplazamiento δ_1 en la fibra óptica de salida y un desplazamiento δ_2 entre las microlentes, de estos valores y mediante la ecuación general de la eficiencia de acoplamiento (3.11), se obtienen un par de puntos que son el desplazamiento correspondiente y la eficiencia de acoplamiento que se tiene en determinado desplazamiento.

Al graficarse el conjunto de puntos se obtendrá el comportamiento del sistema cuando se presenten los desplazamientos tanto $\delta_1\ y\ \delta_2$, esto con la finalidad de obtener el diseño final más eficiente en cuanto a la captura de la luz en la salida del sistema.

Se presentan las Tablas de resultados 4.6 y 4.9, donde se detallan los resultados que se obtuvieron, así como los incrementos que se pueden tener en el sistema y las pérdidas totales que se tienen en el sistema. De acuerdo a las Tablas de resultados se toma la decisión final de con cual microlente se logrará que el diseño final del conmutador OXC sea el más eficiente. Por último se presenta un esquema final del conmutador final ya con los microespejos MEMS.

Capítulo II

Marco Teórico

En este capítulo se mencionarán las etapas para el diseño del conmutador óptico OXC de 4×4 en espacio libre a base de dispositivos MEMS, así como las herramientas en las cuales nos apoyaremos, para llevar a buenos términos el diseño final del conmutador OXC óptimo, tales como óptica paraxial, óptica matricial, propagación de un haz Gaussiano y la integral para la eficiencia de acoplamiento

También se mencionara que clase de aberraciones se pueden presentar en el sistema óptico y como identificar el tipo de aberración que se presenta en un sistema mediante las curvas de trazo de rayos.

II.1 Etapas para el Diseño del Conmutador Óptico OXC

Para lograr el diseño óptimo del conmutador óptico OXC, se realizarán diversas etapas en las cuales utilizaremos herramientas de óptica, siendo estas las que a continuación se mencionan.

Se utilizará óptica paraxial para poder asumir que los rayos que salen de un punto objeto y al propagarse estos en espacio libre forman un ángulo pequeño con respecto al eje óptico. Una característica de óptica paraxial es que todos los rayos convergen en el mismo punto imagen.

Se empleará óptica matricial, para poder representar el sistema óptico que utilizaremos como base para el diseño del conmutador OXC. La representación del sistema base se realizará mediante matrices ópticas de transferencia ya establecidas, para cada uno de los elementos ópticos que se utilizan en el sistema base. Las matrices ópticas proporcionaran una matriz de transferencia final que es una representación del sistema real.

Posteriormente para poder analizar la cantidad de luz que se puede capturar en el salida del sistema, así como las pérdidas por acoplamiento que se tendrán, se utilizarán los principios del haz Gaussiano, debido a que ya que la propagación de la luz en el conmutador óptico OXC, tiene una forma similar a la de un haz Gaussiano.

El empleo de un haz Gaussiano durante el análisis del conmutador OXC, nos proporcionara una relación entre los campos electromagnéticos (haces Gaussianos complejos), de entrada y salida del sistema y la matriz final de transferencia del sistema base.

Dicha relación queda establecida mediante el parámetro q, este parámetro nos ayudará a obtener el tamaño del spot (radio) $w_1(z)$ y el radio de curvatura del frente de onda $R_1(z)$ en la salida del sistema, ya que tanto el tamaño del spot (radio) $w_0(z)$ y el radio de curvatura del frente de onda $R_0(z)$ en la entrada serán conocidos.

Después de calcular los valores tanto del tamaño del spot $w_1(z)$ y el radio de curvatura del frente de onda $R_1(z)$ en la salida, estos serán sustituidos en la integral de acoplamiento. La integral de acoplamiento nos permitirá saber la eficiencia de acoplamiento del sistema. En el análisis de la eficiencia de acoplamiento, se estudiaran varios casos de desalineación para poder proponer un posible rango de tolerancia sin que se tengan pérdidas considerables.

El último punto de este Capítulo es un estudio de aberraciones que se pueden presentan en el sistema óptico, así como la identificación de estas mediante las curvas de trazo de rayos y su posible eliminación o mitigación, para obtener un sistema eficiente y confiable. Este estudio nos ayudará a identificar las aberraciones presentes en el conmutador OXC, cuando ya tengamos las simulaciones en OSLO, que se efectuaran en el Capítulo IV, para cada diferente caso.

II.2 Óptica Paraxial

Una definición común para óptica paraxial es que los rayos paraxiales son rayos muy cercanos al eje óptico. Óptica paraxial se ocupa del estudio de la propagación de la luz a través de un sistema óptico centrado, dicho sistema esta formado por superficies simétricas rotacionalmente de refracción o reflexión que tienen un eje en común, llamado *eje óptico*. Un ejemplo simple de un sistema centrado es una lente simple, donde su eje es la línea que pasa a través del centro de curvatura de las dos superficies.

Una sucesión de lentes simples constituirán un sistema centrado si todas las lentes son alineadas sobre un eje en común. Si se tiene un sistema con espejos planos inclinados, este puede resultar en un sistema centrado, si las lentes sobre cualquier cara de un determinado espejo están sobre el eje de simetría, sin embargo por lo general, los sistemas que tienen superficies inclinadas no tienen un eje en común de simetría, por lo tanto no forma un sistema centrado.

Los sistemas ópticos centrados tienen la propiedad de que si un rayo pasa muy cercano al eje óptico, siempre existirá un pequeño ángulo de incidencia con la normal en cualquier superficie, este rayo es denominado *rayo paraxial* y la refracción de ese rayo será descrita por la ecuación simple de Snell.

Si un rayo incide sobre una superficie, el rayo es reflejado haciendo un ángulo I con la normal de la superficie, el rayo también es refractado haciendo un ángulo I' con la normal de la superficie, donde I e I' son determinadas por la ley de Snell. Los rayos tanto el incidente y refractado se muestra en la Figura 2.1 los que se localizan en el mismo plano [27]. La forma de la ley de Snell que relaciona los ángulos I e I' es la que se presenta a continuación.

$$n \sin I = n' \sin I' \tag{2.1}$$

Donde n y n' son los índices de refracción, de los medios de incidencia y de refracción respectivamente. Si en un sistema centrado el eje óptico esta contenido en el plano de incidencia; los rayos en el plano de incidencia se denominaran *rayos meridionales*, de lo contrario serán *rayos distorsionales.*

II.2.1 Aproximación Paraxial

Cuando un rayo está lo suficientemente cerca al eje óptico en todos los puntos <15º, el ángulo de incidencia del rayo sobre todas las superficies del sistema al ser muy pequeño, se puede asumir que es igual al valor cuando se le aplica el seno a dicho ángulo, por lo que solamente se puede tomar el valor del ángulo tal cual y no el seno del ángulo, reduciéndose así la ley de Snell de la forma siguiente [27].

$$ni = n'i' \tag{2.2}$$

Donde i es usada para denotar el valor paraxial del ángulo real de incidencia de ángulo I .

De acuerdo con la ley de la refracción, en una frontera con índices de refracción diferentes, tanto el rayo incidente, rayo refractado y la superficie normal están contenidos en el mismo plano, tal plano se muestra en la Figura 2.1, en esta se muestra además los ángulos de incidencia I y refracción I' con respecto a la normal Gp de la superficie. El rayo incidente está representado por el vector ne con longitud n, mientras que el rayo refractado se representa por el vector $n'e'$ con longitud n'.

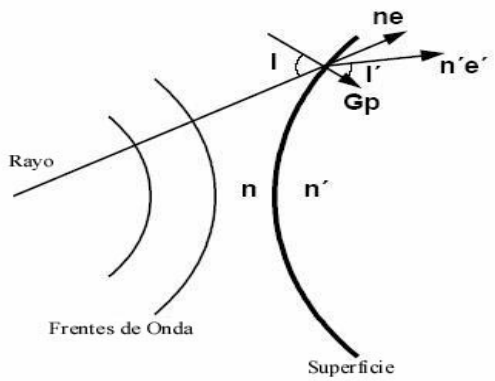


Figura 2.1 Representación de un rayo incidente y refractado en el límite de una superficie (A partir de [27]).

Aunque las trayectorias de los rayos paraxiales formales a través de un sistema óptico no representan el paso verdadero de la luz, estos proporcional una aproximación de la localización de los puntos imagen en un sistema ideal, es por esta razón que los rayos paraxiales son usados con frecuencia para describir de forma rápida y simple la formación de una imagen en un sistema óptico

Las trayectorias de un rayo real y un rayo paraxial son comparadas en la Figura 2.2. Asumiendo que tanto el rayo real y paraxial salen del mismo punto objeto O, se observa sin embargo, que ambos rayos son refractados con diferentes ángulos, puesto que son trazados con procedimientos diferentes. Además, el rayo real es refractado en la superficie verdadera, mientras que el rayo paraxial es refractado en un plano tangente a la superficie. La intersección axial del rayo refractado paraxial define la localización de la imagen paraxial O', mientras que el rayo real cruza el eje en otro punto O''. El hecho del desplazamiento del punto O' con respecto al punto O'' indica que la superficie introduce aberraciones.

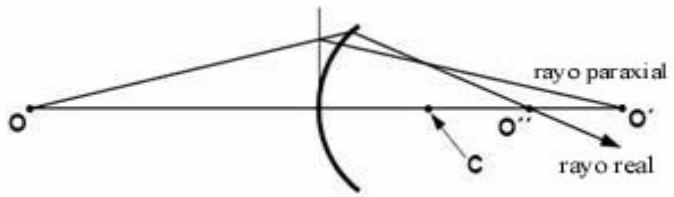


Figura 2.2 Comparación de las trayectorias de un rayo real y un rayo paraxial formal (A partir de [27]).

II.3 Óptica Matricial

Para poder saber, y en un momento dado lograr predecir el comportamiento de un sistema óptico se puede utilizar la técnica conocida como *Óptica Matricial*, esta técnica permite el trazo de rayos paraxiales. Se asume que los rayos se desplazan solamente dentro de un sólo plano, siendo por esta razón que la técnica de óptica matricial es aplicable a sistemas con geometría plana.

Debido a que un haz puede ser descrito por su posición y su ángulo con respecto al eje óptico. Un sistema óptico puede ser estudiado completamente mediante óptica matricial debido a que la posición de un haz y su respectivo ángulo son modificados conforme el haz va viajando a través de los diferentes elementos del sistema óptico.

En aproximación paraxial, la posición y el ángulo tanto en los planos de entrada y de salida de un sistema óptico están relacionados por dos ecuaciones algebraicas lineales, por lo tanto, un sistema óptico puede ser descrito completamente por una matriz de 2×2, la cual es conocida como *matriz de transferencia*. La utilización de la matriz de transferencia se puede emplear en el estudio de sistemas ópticos, debido al hecho de que la matriz de transferencia total de un sistema, será igual a la matriz de transferencia de cada uno de los elementos ópticos en cascada, siendo la matriz de transferencia total igual al producto de cada una de las matrices de transferencia de los elementos ópticos individuales del sistema óptico.

La obtención de la *matriz de transferencia*, se logrará al considerar un sistema óptico circular simétrico formado por una sucesión de superficies refractantes y reflejantes las cuales están centradas en el eje óptico z. En el eje óptico z se localizan los puntos en la dirección en la que viajan los haces. Considerando que los haces inciden en el *plano* y conteniendo el eje óptico, es decir, el plano $y - z$.

Al trazar un haz a través del sistema de la Figura 2.3, este cruza los planos transversales a diferentes distancias del eje óptico. Un haz al cruzar el plano transversal en z en alguna posición determinada, quedará completamente caracterizado por la coordenada en y del punto donde se cruza y su respectivo ángulo θ con respecto al eje óptico, como se muestra en la Figura 2.3 [28].

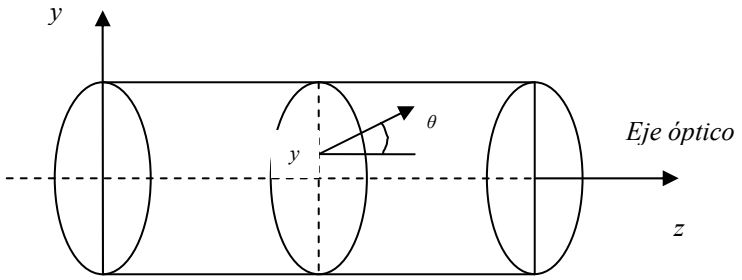


Figura 2.3 Caracterización de un haz por su coordenada *y* y su ángulo θ (A partir de [28]).

Al considerar un sistema óptico el cual esta compuesto por dos elementos ópticos, que corresponderán a dos planos transversales z_1 y z_2, referidos como plano de entrada y plano de salida respectivamente.

El sistema quedará caracterizado completamente por los efectos de un haz entrante con posición y dirección arbitrarias (y_1, θ_1), el cual después de pasar a través del sistema óptico presentará una nueva posición y dirección (y_2, θ_2) en el plano de la salida, tales cambios de posición y dirección se muestra en la Figura 2.4.

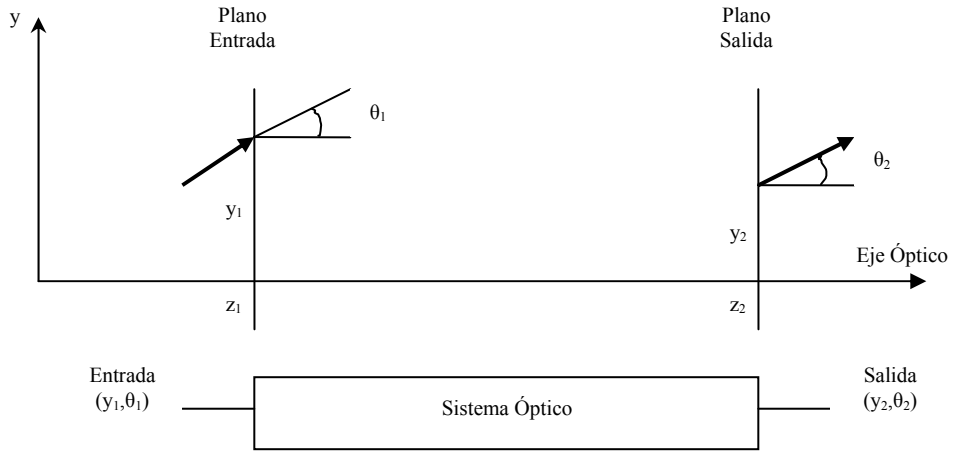


Figura 2.4 Un haz que entra a un sistema óptico en una posición y_1 y ángulo θ_1, resultara en una posición y_2 y ángulo θ_2 (A partir de [28]).

En una aproximación paraxial, si todos los ángulos de los haces con respecto al eje óptico son lo suficientemente pequeños se considera que $sen(\theta) \approx (\theta)$, por lo tanto se tiene una relación lineal entre (y_2, θ_2) y (y_1, θ_1), la que se puede escribir de forma general como [28]:

$$\begin{aligned} y_2 &= A\, y_1 + B\, \theta_1 \\ \theta_2 &= C\, y_1 + D\, \theta_1 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Donde $A, B, C\ y\ D$ son números reales. Es conveniente escribir las ecuaciones anteriores en forma de matrices. Siendo M la matriz de transferencia, con elementos $A, B, C\ y\ D$, capaz de caracterizar completamente un sistema óptico ya que esta permite obtener (y_2, θ_2) a partir de (y_1, θ_1).

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

Los elementos A, B, C y D tienen un significado físico, referido cuando estos elementos son igualados a cero. Las condiciones para que esos elementos puedan ser nulos, quedan limitadas por la siguiente ecuación [29].

$$A \cdot D - B \cdot C = 1 \tag{2.5}$$

La ecuación (2.5) se cumplirá debido a que el determinante de un producto de matrices es igual al producto de los determinantes de cada una de las matrices individuales que se multiplican.

Evaluando a cero cada elemento de la matriz de transferencia, resulta en términos de óptica geométrica, en condiciones específicas para el sistema, como se muestra a continuación:

- $A = 0$. Esta condición implica que todos los haces que pasan por el punto principal objeto formando el mismo ángulo, llegarán a un mismo punto en el plano de salida.
- $B = 0$. Al ser nulo este elemento, abra una relación objeto-imagen entre los plano de entrada y de salida. Es decir, se cumplirá que $A = |y_2| / |y_1|$, siendo A el aumento lateral del sistema óptico, esta es la condición de imagen e implica que todos los haces que pasen por el mismo punto en el plano de entrada, pasarán por el mismo punto en el plano de salida.
- $C = 0$. Esta condición indica que todos los haces que entran al punto principal objeto con una misma inclinación, salen del punto principal imagen formando el mismo ángulo.
- $D = 0$. Este caso es equivalente a exigir que el plano de entrada sea el plano focal del objeto y los rayos provenientes de un punto del plano focal, saldrán del punto principal imagen paralelos en el plano de salida.

Estas condiciones se muestran más claramente en la Figura 2.5, siendo H y H' el punto principal objeto y punto principal imagen respectivamente.

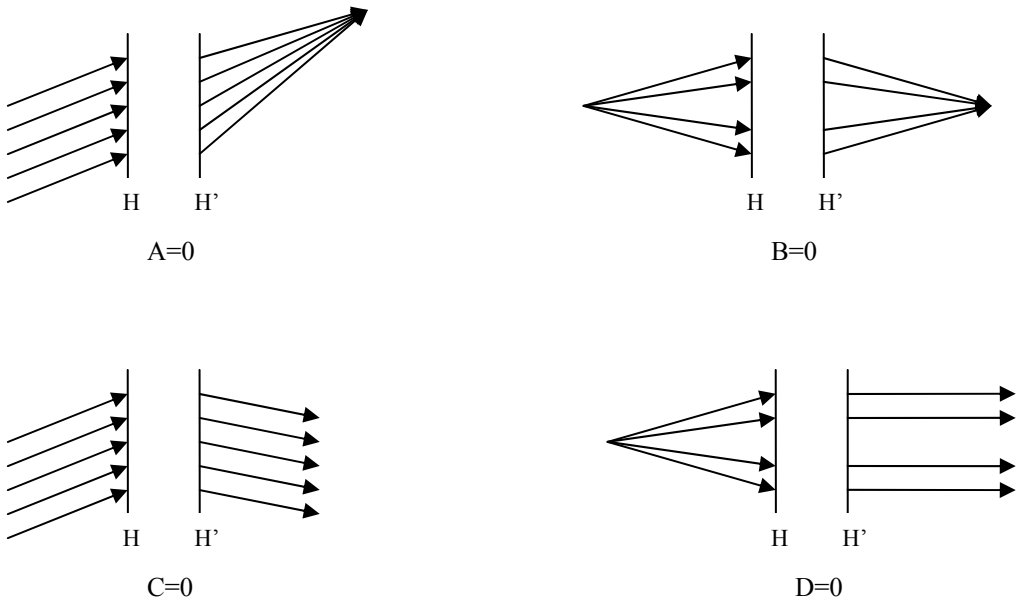


Figura 2.5 Ilustración cuando los elementos de la matriz de transferencia se igualan a cero.

II.3.1 Matrices de transferencia de elementos ópticos simples

II.3.1.1 Propagación en espacio libre

Los haces que se propagan en espacio libre viajan en líneas rectas, por lo tanto, un haz que viaja una distancia d es modificado de acuerdo con la siguiente ecuación $y_2 = y_1 + \theta_1 d$ y debido a que su ángulo no cambia, es decir $\theta_1 = \theta_2$. La matriz de transferencia se obtiene a partir de la Figura 2.6, en la cual se muestra la condición óptica, cuando un rayo se propaga una distancia d en espacio libre [28].

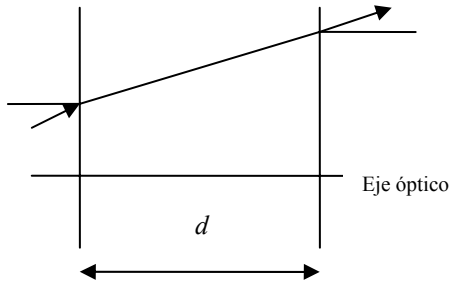


Figura 2.6 Para la Matriz óptica, en la propagación de una distancia *d* en espacio libre (A partir de [28]).

Siendo la matriz de transferencia, que representa dicha condición óptica la siguiente [28].

$$M = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

II.3.1.2 Refracción en un límite plano

Cuando la condición óptica es la refracción en un límite plano con dos diferentes índices de refracción n_1 y n_2, el ángulo del haz cambiará de acuerdo con la ley de Snell $n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2$. En la Figura 2.7 se muestra el cambio de la trayectoria que sufre un haz que viaja en un medio con índice de refracción n_1, al incidir sobre una superficie con un índice de refracción n_2.

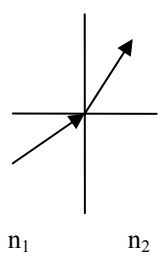


Figura 2.7 Para obtener la Matriz óptica debido a la refracción en un límite plano con diferente índice de refracción (De [28]).

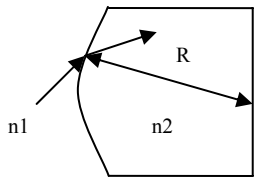
Empleando aproximación paraxial se obtiene de la ley de Snell que $n_1\theta_1 \approx n_2\theta_2$. Puesto que la posición del haz no cambia, se tiene entonces que $y_2 = y_1$. Así entonces, la matriz de transferencia que expresa esta condición óptica es la siguiente [28].

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n_1 / n_2 \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

II.3.1.3 Refracción en un límite esférico

La relación entre θ_1 y θ_2 para la refracción de haces paraxiales cuando estos inciden en un límite esférico entre dos medios con diferentes índices de refracción, como se muestra en la Figura 2.8.

Al igual que el caso de la refracción en un límite plano, la altura de un haz incidente en la superficie esférica no se modifica significativamente, teniéndose que $y_2 \approx y_1$. Considerando el radio de curvatura R de la superficie esférica se obtiene la matriz de transferencia que caracteriza esta condición óptica, siendo esta la que se muestra a continuación [28].



Convexo R>0 ; Cóncavo R<0

Figura 2.8 Para obtener la Matriz óptica debido a la refracción en un límite esférico (A partir de [28]).

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\dfrac{(n_2 - n_1)}{n_2 R} & \dfrac{n_1}{n_2} \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

II.3.1.4 Transmisión a través de una lente gruesa

La forma más general para la transmisión en una lente involucra un cambio en el índice de refracción a través de una superficie curva de radio R_1, para después propagarse a través del material de la lente y saliendo a través de una segunda superficie curva de radio R_2, como se muestra en la Figura 2.9.

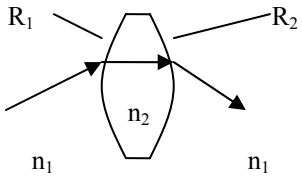


Figura 2.9 Transmisión en una lente gruesa.

Asumiendo que los índices de refracción en la entrada y en la salida son idénticos, es decir n_1 y el índice de refracción de la lente n_2, la matriz que se obtiene es la siguiente, de acuerdo a la refracción en un límite esférico.

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_2 - n_1}{n_1}\frac{1}{R_2} & \frac{n_2}{n_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{n_1 - n_2}{n_2}\frac{1}{R_1} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2 - n_1}{n_1}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Pudiéndose definir la longitud focal f como:

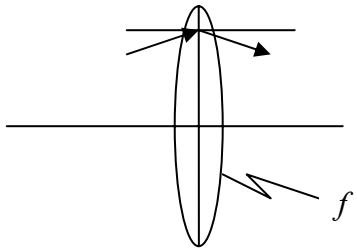
$$\frac{1}{f} = \frac{n_2 - n_1}{n_1}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right) \quad (2.10)$$

Siendo R positivo para una superficie convexa y negativo para una superficie cóncava. Para una lente biconvexa simétrica se tiene que $R_2 = -R_1$ sistema biconvexo, mientras que para una plano cóncava se tendrá que $R_2 \to \infty$.

II.3.1.5 Transmisión a través de una lente delgada

Cuando se tiene una lente delgada (de espesor muy pequeño), como se muestra en la Figura 2.10, un haz al incidir sobre la superficie de la lente sufrirá un cambio de posición como se pudo observa en el caso de una lente gruesa, teniéndose una relación entre los ángulos θ_1 y θ_2 para la transmisión de los haces paraxiales en la lente delgada con longitud focal *f*, debido a que las alturas no sufren ninguna modificación, es decir, $y_2 = y_1$, la matriz de transferencia que modela un haz que pasa por una lente delgada es la que se muestra a continuación [28].

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/f & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$



Convexo f >0 ; Cóncavo f <0

Figura 2.10 Para obtener la Matriz óptica debido a la transmisión en una lente delgada (A partir de [28]).

II.3.1.6 Reflexión en un espejo plano

Si el elemento óptico es un espejo plano, al incidir un haz sobre su superficie, la posición del haz no se modificará, teniéndose en consecuencia que $y_2 = y_1$. Por convención se toma el eje z como la dirección de propagación del los haces, como se muestra en la Figura 2.11, por lo tanto, la incidencia de los haces se llevará a cabo hacia el espejo plano y de este se presentará la reflexión de los haces, teniéndose así que $\theta_2 = \theta_1$. Por lo tanto la matriz de transferencia es la matriz identidad, que es la que se muestra a continuación.

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

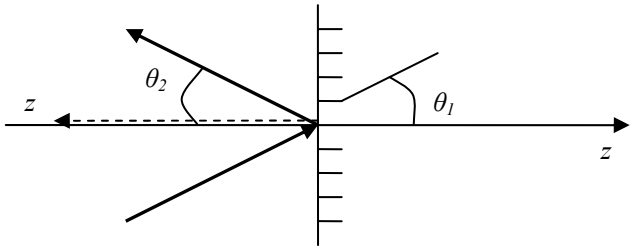


Figura 2.11 Para obtener la Matriz óptica para un espejo plano (De [28]).

Mediante el empleo de las matrices de transferencia que modelan los diferentes elementos ópticos, se pueden combinar estos entre si para formar cualquier sistema óptico que se desee estudiar y así poder obtener una respuesta rápida y precisa con lo que se podrá saber si los resultados que se obtendrán mediante esta técnica, serán los resultados esperados por el sistema en estudio.

Para la solución de un sistema que este implementado con diferentes elementos ópticos en cascada, se deben multiplicar cada una de las matrices de transferencia, de los elementos ópticos que integran el sistema óptico en orden inverso, es decir, el primer elemento que se debe de tomar en cuenta para la solución del sistema, es el último elemento óptico que se coloco.

Por ejemplo si los elementos ópticos del sistema se fueron colocando de izquierda a derecha, entonces el primer elemento óptico que se debe de tomar en cuenta para la multiplicación, y así obtener la matriz de transferencia resultante M, es el primer elemento que se encuentre a la derecha del sistema óptico y se siguen multiplicando las demás matrices de transferencia individuales de los elementos ópticos restantes, de derecha a izquierda consecutivamente hasta terminar con el primer elemento del lado izquierdo.

II.4 Haz Guassiano

Debido a que la propagación de la luz en una fibra óptica tiene una forma similar a la propagación de un haz Guassiano, aunado a que para los haces Gaussianos ya se tienen ecuaciones establecidas que modelan su propagación. Es por tal motivo que para el diseño del conmutador OXC, se emplearán campos electromagnéticos tanto en la entrada como en la salida del sistema óptico en estudio, pudiéndose representar estos como haces Gaussianos complejos. Con el empleo de un haz Gaussiano se pueden encontrar los parámetros apropiados que representen un modelo matemático de la luz que queremos estudiar durante su propagación por el sistema óptico.

Como el campo electromagnético de un haz óptico Gaussiano es una función de su coordenada axial z y su coordenada radial r, este se puede escribir como [7].

$$E(r,z) = A_0 \exp[-r^2 / w^2] \exp[-jk_0 r^2 / 2R] \tag{2.13}$$

Donde el término $\exp[-r^2 / w^2]$ describe la variación de amplitud radial y $\exp[-jk_0 r^2 / 2R]$ es la variación radial en fase. La representación gráfica de un haz Gaussiano se muestra en la Figura 2.12, en esta se muestra la distribución radial del tamaño del haz r, contra la irradiancia I_0, destacando la distancia $r = w$, la cual es un radio donde la amplitud cae a $1/e$, de su valor máximo sobre el eje r. Debido a que la irradiancia es igual al cuadrado de los módulos del campo se tiene entonces que la irradiancia en $r = w$, es igual a $1/e^2$ de su valor umbral axial normalizado [27].

El parámetro R es el radio de curvatura del frente de onda y k la constante de propagación, que esta definida como $k = 2\pi / \lambda$, siendo λ la longitud de onda.

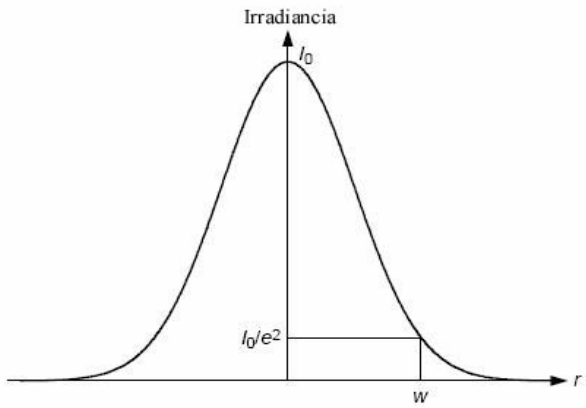


Figura 2.12 Representación de un Haz Gaussiano (A partir de [27]).

Al relacionar el radio del haz w (tamaño de spot) y el radio de curvatura del frente de onda R, en función de la distancia de propagación se obtienen las siguientes expresiones para el radio del haz y el radio de curvatura del frente de onda, respectivamente [7], que son conocidos como los parámetros del haz Gaussiano [27].

$$w^2 = w_0^2\left[1+\left(\frac{z}{z_0}\right)^2\right]$$
$$R = z\left[1+\left(\frac{z_0}{z}\right)^2\right] \tag{2.14}$$

Donde w_0 es el tamaño del radio del haz mínimo, el cual esta localizado en $z = 0$ como se muestra en la Figura 2.13, la que es conocida como la cintura del haz Gaussino.

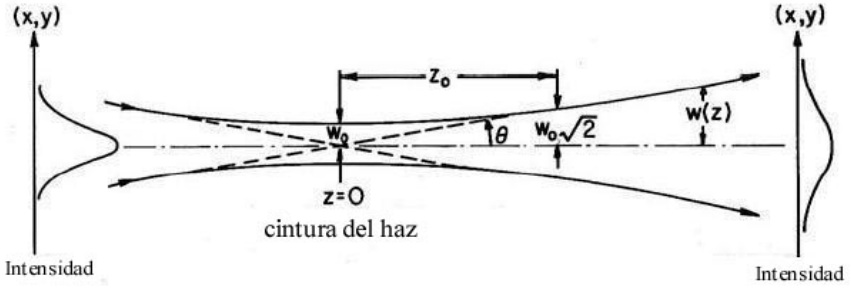


Figura 2.13 Variación del tamaño del spot *w(z)* de un haz Gaussiano (A partir de [30]).

La distancia z_0 es la distancia medida desde la cintura del haz Gaussiano en la dirección de propagación del haz Gaussiano y es conocida como el *rango de Rayleigh,* el cual es definido como [7]:

$$z_0 = k\, w_0^2 / 2 \tag{2.15}$$

El tamaño del haz en el punto del rango de Rayleigh es igual a $\sqrt{2}\, w_0$, que es donde el haz Gaussiano tiene el ancho final más pequeño [7] para una distancia de propagación z en particular, como se observa en la Figura 2.13. Por lo que el valor final del haz siempre esta relacionado con su valor inicial multiplicado por una constante simple, siendo el valor final del haz independiente de la distancia z [7].

El rango de Rayleigh puede ser empleado para definir la longitud de la región focal, o longitud de colimación, de un haz Gaussiano. Cerca de la cintura $(z << z_0)$ el haz es estrecho y el frente de onda es plano como se muestra en la Figura 2.14. Por otro lado a distancias grandes desde la cintura del haz Gaussiano, es decir, $(z >> z_0)$ el haz diverge en forma de una onda esférica con centro en la cintura del haz Gaussiano, tal como se puede observar en la Figura 2.14.

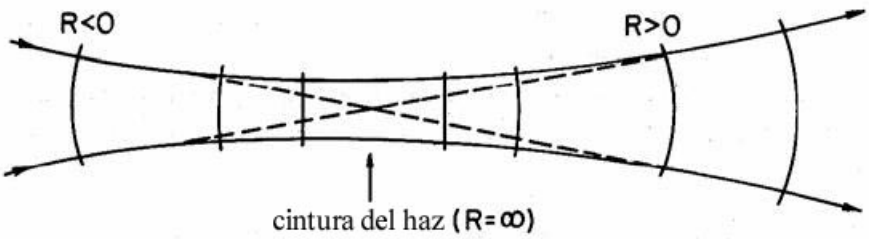


Figura 2.14 Variación del radio de curvatura del frente de onda de un haz Gaussiano (A partir de [30]).

Para lograr separar la amplitud y la fase se escribe la propagación de un haz Gaussiano como un parámetro complejo $q = z + j\, z_0$ [7]. En términos de su parte real e imaginaria, este al sustituirse en el campo de la ecuación (2.13) se obtiene [7]:

$$E(r,z) = A_0 \exp[-j\, k\ r^2 / 2\, q] \tag{2.16}$$

Para el campo (2.16) se obtienen el tamaño del spot w y el radio de curvatura del frente de onda R, en términos del parámetro q de la siguiente manera [7].

$$\begin{aligned} 1/w^2 &= -(k/2)\,\mathrm{Im}(1/q) \\ 1/R &= \mathrm{Re}(1/q) \end{aligned} \tag{2.17}$$

Agrupando tanto la parte real e imaginaria en una sola ecuación se obtiene [27].

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - j\frac{\lambda}{\pi\, n\, w^2(z)} \tag{2.18}$$

Siendo $w(z)\ y\ R(z)$ el tamaño del haz (radio del haz y no su diámetro), y el radio de curvatura del frente de onda respectivamente.

Al sustituir el *rango de Rayleigh* en los parámetros del haz Gaussiano, ecuación (2.14) se obtiene el tamaño del haz $w(z)$ y el radio de curvatura del frente de onda $R(z)$ en función de $w_0, z\ y\ \lambda$ como [27]:

$$w^2(z) = w_0^2\left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2}\right)\right] \tag{2.19}$$

$$R(z) = z\left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z}\right)^2\right] \tag{2.20}$$

Para facilitar la medición de la distancia radial z desde la cintura del haz, a algún punto que se desee observar se debe tener en cuenta que tanto $z\ y\ R(z)$ tengan el mismo signo. En la Figura 2.15, se muestre como debe de estar z con respecto a R, para que al medir tanto $z\ y\ R$ estos sean ambos positivos. Esta convención de signo para el radio de curvatura es generalizado para un haz Gaussiano y en la literatura del rayo láser [27].

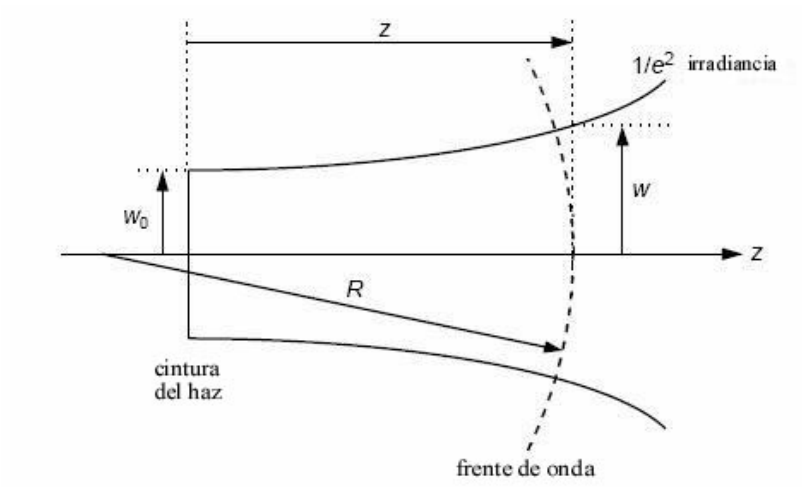


Figura 2.15 Convención de signos para un haz Gaussiano (A partir de [27]).

Un haz Gaussiano queda completamente caracterizado por dos de sus cuatros parámetros $w, w_0, z\ y\ R$ (además de la longitud de onda λ). Al tener dos parámetros cualesquiera, los otros dos parámetros pueden ser calculados empleando las ecuaciones (2.19) y (2.20).

La irradiancia que es útil para el análisis de un haz Gaussiano siendo esta $1/e^2$, se encuentra lejos del campo divergente a un ángulo θ, el cual se mide desde el eje z y esta dado por la siguiente ecuación [27].

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\lambda}{\pi w_0}\right) \cong \frac{\lambda}{\pi w_0} \tag{2.21}$$

II.4.1 Método Algebraico Matriz ABCD

Para calcular la propagación de haces Gaussianos a través de un sistema óptico se utilizan las expresiones algebraicas de un haz Gaussiano. Debido a la propagación a través de elementos ópticos, se producirá una modificación del parámetro q, el cual queda definido por la ley $ABCD$ siendo este q'.

Debido a que un haz Gaussiano conserva su forma Gaussiana al propagarse a través de un sistema óptico ortogonal, el parámetro q de la salida del sistema óptico ($\hat{\hat{q}}$, en un medio con índice de reflexión n'), estará relacionado con el parámetro q de entrada del sistema óptico (q, en un medio con índice de reflexión n) por la siguiente ecuación [27].

$$\frac{\hat{\hat{q}}}{n'} = \frac{A(q/n) + B}{C(q/n) + D} \tag{2.22}$$

Donde $A, B, C\ y\ D$ son los elementos de las matrices paraxiales de 2×2. La ecuación (2.22) es llamada ley $ABCD$ y al parámetro q es conocido como *radio de curvatura complejo*.

Al simplificar la ley $ABCD$ en términos de la longitud de onda estándar $\lambda_0 = n\lambda$, se obtendrá el parámetro q', siendo este [27].

$$\frac{1}{q'} = \frac{n}{q} = \frac{n}{R} - j\frac{\lambda_0}{\pi w^2} \tag{2.23}$$

Que simplificando y reordenando se obtiene que q' es [27]:

$$q' = \frac{A\,q + B}{C\,q + D} \tag{2.24}$$

Siendo la ecuación (2.24) la que relaciona los campos electromagnéticos de entrada y salida de un sistema óptico, y conociendo la matriz de transferencia $ABCD$ así como el tamaño del spot w_0 y el radio de curvatura del frente de onda de la onda R_0 de la entrada, se podrá obtener el tamaño del spot w_1 y el radio de curvatura del frente de onda R_1 en la salida del sistema óptico.

II.5 Acoplamiento entre guías de onda

El cálculo del acoplamiento entre dos guías de onda ópticas es de suma importancia ya que este nos permitirá saber la cantidad de luz que es capturada el final del sistema, con respecto de la luz que es introducida al sistema. El acoplamiento esta basado en la descripción modal de las guías de onda y depende de la alineación, de sus dimensiones y forma geométrica.

Debido a la mala alineación entre fuentes y guías de onda monomodo se pueden presentar pérdidas significativas entre las conexiones ópticas de dos dispositivos. Por lo que un buen análisis de desalineación en un sistema de comunicaciones evitará la pérdida significativa de información ya que este análisis proporcionara las tolerancias a las cuales el sistema sufrirá un menor número de pérdidas.

II.5.1 Eficiencia de acoplamiento

La eficiencia de acoplamiento por lo tanto se verá afectada por cualquier cambio en los parámetros del haz, ya que esto implicará que se modifique el foco del spot en la fibra de salida. La eficiencia es calculada al hacer coincidir el campo de entrada E_{in} y el campo de la salida E_{out}, mediante la integral de acoplamiento, la cual es definida como [7]:

$$\eta = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} E_{in}\; E_{out}^{*} \right|^{2}}{\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} E_{in}\; E_{in}^{*} \int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} E_{out}\; E_{out}^{*}} \tag{2.25}$$

Donde el símbolo ($*$) indica conjugado complejo y la doble integral se realiza sobre toda la sección transversal.

Para nuestro diseño en particular los campos de salida y de entrada, que utilizamos son haces Gaussianos complejos, definidos como:

$$E_{in}(x,y) = \exp\left[-\frac{x^2+y^2}{w_0^2}\right]$$
$$E_{out}(x,y) = \exp\left[-\frac{x^2+y^2}{w_1^2}\right]\exp\left[-I\,k\,\frac{x^2+y^2}{2\,R_1}\right] \tag{2.26}$$

Por lo que al sustituir los campos tanto de entrada y salida en la ecuación (2.25), se obtiene la expresión que nos permitirá el cálculo de la eficiencia de acoplamiento en la salida del sistema.

$$\eta = \frac{\left|\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} E_{in}(x,y)\,E_{out}^{*}(x,y)\,dx\,dy\right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} E_{in}(x,y)\,E_{in}^{*}(x,y)\,dx\,dy\;\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} E_{out}(x,y)\,E_{out}^{*}(x,y)\,dx\,dy} \tag{2.27}$$

Una de las condiciones que probaremos durante el desarrollo de esta tesis es que la eficiencia de acoplamiento debe ser $\eta = 1$, cuando se tenga que $w_{in} = w_{out}$ (cuando el tamaño del spot en la entrada es igual al tamaño del spot de la salida) y el radio de curvatura del frente de onda $R_{out} \to \infty$, es decir, se tenga un frente de onda plano, lo que implicaría que se tiene el acoplamiento máximo, es decir toda la luz que entra al sistema es la que se recupera, esto sólo podrá ser cierto en un sistema ideal ya que en un sistema real se tienen que considerar las pérdidas debidas a las aberraciones, lo que hará que no se tenga una eficiencia del 100 %.

II.6 Aberración geométrica y cromática

Además de la mala alineación que sufre un sistema óptico, lo que se refleja en una disminución de la eficiencia de acoplamiento. Otro de los problemas que se tiene en los sistemas ópticos son las aberraciones, las que se presentan como una serie de defectos que causan distorsión a los sistemas ópticos, al pasar la luz a través de los diferentes elementos que conforman el sistema óptico.

Las aberraciones se pueden clasificar en dos principales grupos, en primer lugar las *aberraciones geométricas,* que se presenta al utilizar luz monocromática en un sistema óptico, este tipo se dividen en: astigmatismo, aberración esférica, coma, curvatura de campo y distorsión. El segundo tipo es la *aberración cromática*, que se presenta cuando se trabaja con varias longitudes de onda.

Las aberraciones en las que nos enfocaremos para fines de esta tesis serán astigmatismo, coma y aberración esférica, las cuales se podrán presentar en nuestro sistema, puesto que estas se refieren a la calidad de la imagen de un punto y su estudio será necesario para poder identificarlas y tratar de corregirlas, las aberraciones restantes no se tomarán en cuenta ya que estas se presentan en sistemas de formación de imágenes y estas no están involucradas en nuestro diseño.

II.6.1 Coma

Es una aberración de abertura. Esta se presenta cuando un haz de gran abertura con un ángulo de inclinación muy grande con respecto al eje óptico, incide en el sistema óptico como se muestra en la Figura 2.16. Este haz varía proporcionalmente a la distancia de la imagen al eje óptico y aumenta con el cuadrado de la abertura. Así, para observar más claramente su efecto en un sistema se puede dividir el haz incidente en un conjunto de haces estrechos $A, P\ o\ B$, asumiendo que cada uno de ellos tiene un ángulo de inclinación muy próximo al eje óptico, estos haces formaran un conjunto de puntos focales que serán la imagen del punto objeto producida por el haz incidente.

La convergencia de los haces $A, P\ o\ B$ al no coincidir en el punto imagen puesto que se localizaran a diferente posición con respecto al eje óptico, es más ni siquiera cruzarán el eje óptico, producirán una forma distorsionada la cual se conoce como cometa y de donde adapta su nombre esta aberración.

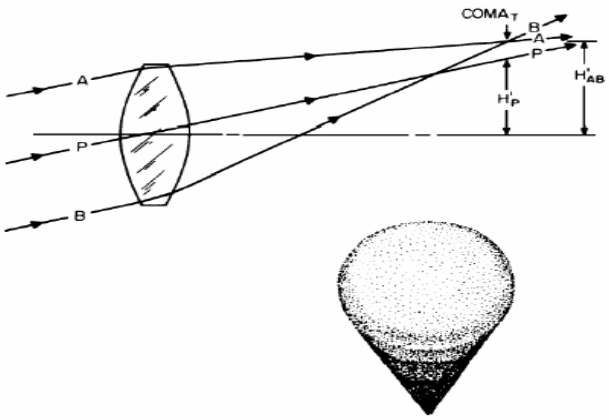


Figura 2.16 Representación de coma (De [31]).

Coma, es particularmente una aberración preocupante debido a que su destello no es simétrico. Su presencia es muy perjudicial para la determinación exacta de la posición de la imagen debido a que es mucho más difícil localizar *el centro de gravedad* de la zona de coma por lo que se obtiene una imagen circular borrosa tal como la que es producida por la aberración esférica

II.6.2 Astigmatismo

Es una aberración de campo. Se presenta en un sistema óptico muy diafragmado, por puntos fuera del eje óptico. En el caso de un sistema óptico muy diafragmado, la imagen de un punto del objeto sobre el eje óptico es también un punto en el plano imagen sobre el eje óptico (astigmatismo sobre el eje). Sin embargo, si la oblicuidad de un haz luminoso procedente de un punto imagen fuera del sistema es demasiado grande, el haz emergente ya no es cónico con un sólo punto de concurrencia, sino un haz que presenta dos zonas de concentración (o estrechamiento) que son dos pequeños segmentos perpendiculares entre sí, normales a la dirección media del haz. Estos segmentos son denominados focal sagital y focal tangencial.

El astigmatismo se presenta en algunos sistemas ópticos cuando el haz incidente es estrecho pero su ángulo de inclinación con respecto al eje óptico no es pequeño, debido a que la onda que produce la superficie del sistema no es esférica, los rayos normales a la superficie no llegan al mismo punto. La Figura 2.17 muestra el diagrama del haz refractado cuando es cortado en diferentes posiciones sucesivas por una pantalla perpendicular al rayo medio del haz. La imagen del punto B es una mancha, una sección elíptica que degenera en segmento de recta en las focales (imágenes primarias y secundarias, respectivamente, de B). Para una cierta posición entre ellas se obtiene la mejor imagen de B (círculo de mínima confusión o pseudoimagen).

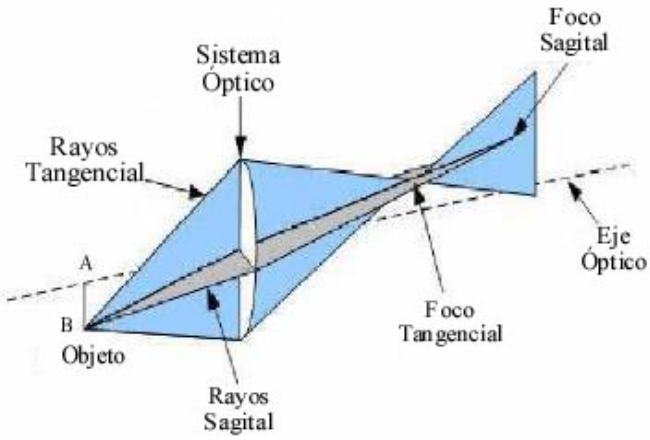


Figura 2.17 Representación de Astigmatismo (A partir de [31]).

Astigmatismo ocurre cuando las imágenes tangencial o sagital no coinciden. En la presencia de astigmatismo, la imagen de una fuente puntual no es un punto, pero toma la forma de dos líneas separadas como se muestra en la Figura 2.17. Entre el enfoque del astigmatismo la imagen es una imagen borrosa elíptica o circular.

La cantidad de astigmatismo en una lente es una función de la potencia, la forma de la lente y su distancia desde la abertura o diafragma que limita el tamaño del conjunto de rayos que pasan a través de la lente. En el caso de una lente simple o espejo que propiamente limitan el diámetro del tamaño del conjunto de rayos. El astigmatismo es igual al cuadrado de la distancia desde el eje óptico a la imagen (es decir la altura de la imagen) dividida por la longitud focal del elemento, $-h^2 / f$.

II.6.3 Aberración esférica

Es una aberración de abertura. Se presenta cuando hay un comportamiento diferente de los rayos marginales respecto a los rayos centrales, procedentes todos de un punto del eje óptico, cuando pasan a través de un sistema óptico de abertura suficientemente grande. Como se muestra en la Figura 2.18, los rayos marginales dan una imagen en el punto B y los rayos céntrales dan otra imagen en el punto A .

La imagen que se obtiene para cualquier plano perpendicular al eje óptico entre A y B es un círculo. Existe una posición intermedia donde el círculo es mínimo, que es el denominado círculo de mínima confusión.

La distancia AB es la aberración esférica longitudinal para el punto objeto (es proporcional al cubo de la apertura).

El radio r del círculo que se obtiene en el plano frontal y que pasa por B es la aberración esférica transversal (o lateral) para el punto objeto. Esta aberración es el caso opuesto al astigmatismo, donde se considerará que la pupila del haz es muy ancha y su eje también coincidirá con el eje óptico, de tal manera que los rayos podrán tener ángulos de inclinación grandes, por simetría del sistema se tendrá que todos los rayos que parten de un punto objeto y formen el mismo ángulo con el eje óptico se cortaran después de pasar por un elemento óptico en el mismo punto del eje óptico y al colocar una pantalla normal al eje, para buscar la imagen del punto objeto, se obtendrá una imagen (punto luminoso).

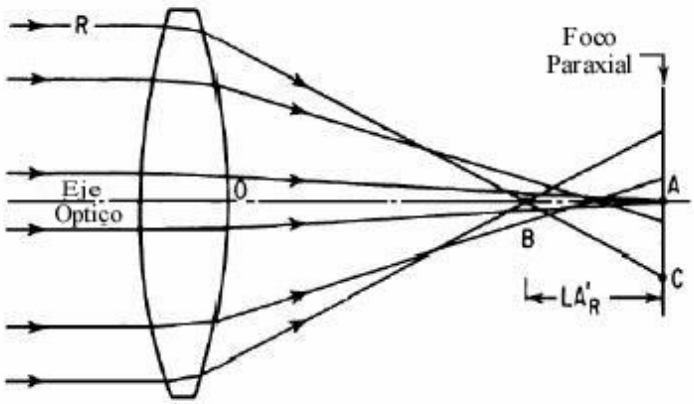


Figura 2.18 Representación de la aberración esférica (A partir de [31]).

II.7 Curvas de intersección de rayos

Para conocer que tipo de aberración presenta un sistema óptico, y así poder mitigarlas o contrarestarlas lo más posible. Se emplea una técnica que permite saber que tipo de aberración se presenta en un sistema, la cual se denomina *curvas de aberraciones de rayos transversales* o simplemente curvas de trazo de rayos. Con el trazo grafico de los rayos el diseñador tendrá la capacidad de saber que tipo de aberración esta presente en su diseño.

La medición transversal de una aberración está relacionada directamente con el tamaño de la imagen borrosa. Graficando esta como un trazo de intercepción de rayo, permite observar e identificar los diferentes tipos de aberraciones que sufren los sistemas ópticos. Esto es de gran valor para el diseño de lentes, y el trazo de la intercepción de rayo de las aberraciones transversales es universalmente usado para la representación de las aberraciones.

Las técnicas gráficas para representar las funciones de aberración son usadas para el diseño de lentes, debido a que cada tipo de aberraciones tiene características propias y su obtención es de la siguiente manera.

II.7.1 Curvas para aberración esférica

Para la curva de intersección de rayos meridionales de la aberración esférica de tercer orden, que es simplemente una función cúbica, como se muestra en la Figura 2.19, en esta se aprecia que la curva cerca al origen es plana e incrementa rápidamente para grandes aperturas positivas y negativas.

La única diferencia significativa entre la aberración de tercer orden y una de orden superior, como la curva de intersección de quinto grado, es que en la aberración de orden superior, la parte plana corresponde a la curva meridional, es decir, las aberraciones de orden superior no se llegan a presentar hasta que una abertura lo suficientemente grande es alcanzada.

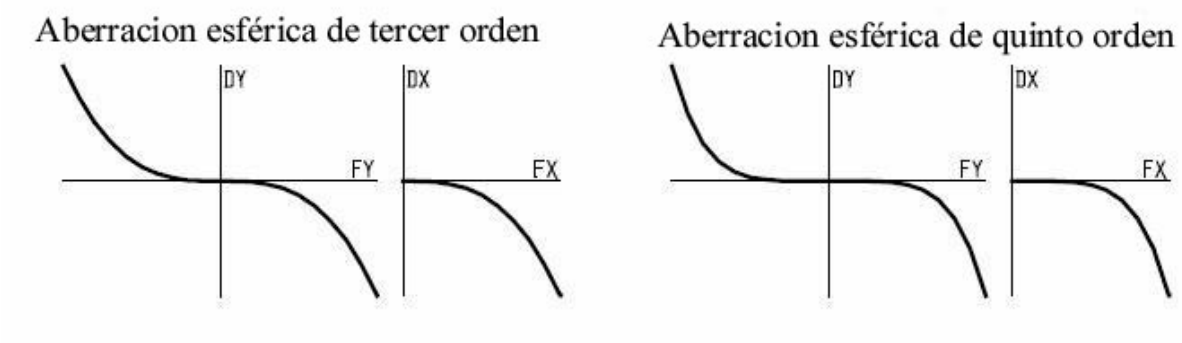


Figura 2.19 Curva de intersección de rayos para aberración esférica de tercer y quinto orden (A partir de [27]).

II.7.2 Curvas para Coma

La aberración lineal coma o solamente coma es un tipo de aberración que dependen de la altura del objeto, teniendo una dependencia linealmente con h.

Para visualizar más fácilmente la naturaleza de coma lineal, se asume que todos los coeficientes de la aberración excepto los de primer orden, desaparecen de coma. Por lo que las curvas de abertura anular están constituidas por una familia de círculos, uno para cada punto de la abertura del sistema, como se observa en la Figura 2.20.

Figura 2.20 Curva de abertura anular para coma (A partir de [27]).

La imagen es muy asimétrica, estando completamente sobre un lado de la imagen paraxial por lo que coma en una imagen es muy indeseable. La curva meridional de coma de tercer orden es una parábola; la curva sagital es una línea recta a lo largo del eje x. Las curvas de aberración de coma de orden superior son similares a las curvas de coma de tercer orden, pero las curvas meridionales son mucho más planas, como se muestra en la Figura 2.21.

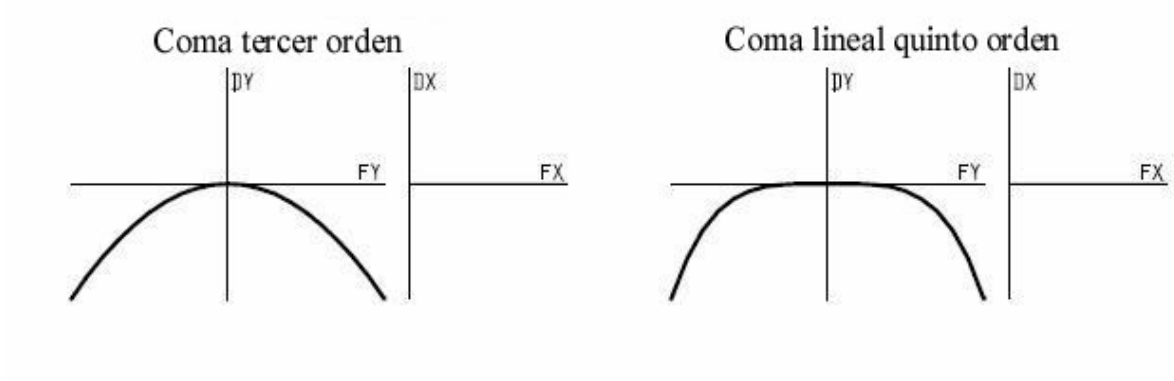


Figura 2.21 Curva de intersección de rayos para coma de tercer y quinto orden (A partir de [27]).

II.7.3 Curvas para Astigmatismo

Las curvas de intersección de rayos son líneas rectas, con diferentes inclinaciones para los rayos sagital y meridional. Además, la inclinación de las líneas depende del ángulo del campo, como se muestra en la Figura 2.22.

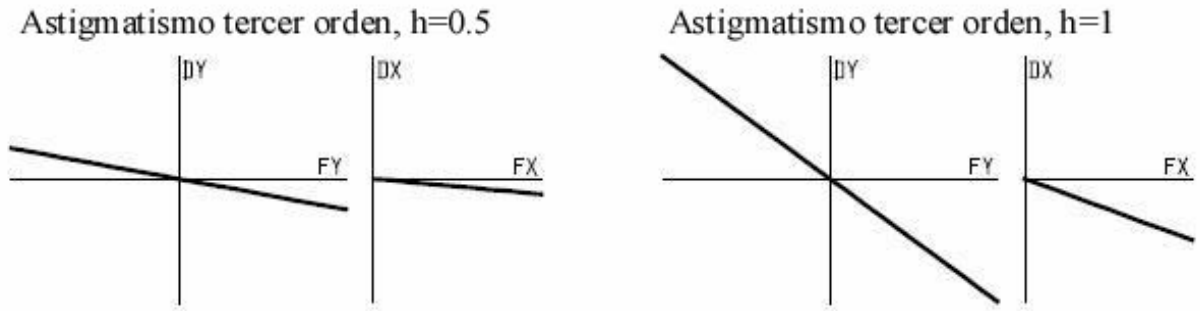


Figura 2.22 Curva de intersección de rayos para astigmatismo de tercer y quinto orden (A partir de [27]).

Capítulo III

Desarrollo del Conmutador Óptico OXC

En este Capítulo se irán desarrollando las diversas etapas que comprenden el diseño del conmutador OXC, las cuales fueron mencionadas en el Capítulo II, para obtener el diseño óptimo del conmutador óptico OXC de 4×4 puertos en espacio libre empleando microespejos MEMS. También se mencionarán las características y consideraciones generales para el diseño final.

De los diferentes casos que se estudiarán para el conmutador OXC, se minimizaran lo más posible las pérdidas que se puedan presentar tanto por desalineación y/o aberraciones, para así lograr capturar la mayor cantidad de luz en la salida del sistema.

III.1 Diseño del Sistema OXC

En la actualidad la mayoría de los sistemas MEMS-OXC 2D son realizados mediante una configuración crossbar, la cual para realizar la conmutación utiliza N^2 microespejos, siendo N el número de puertos que se tienen en el sistema. Para disminuir la cantidad de microespejos se propone un sistema que se denominará *sistema de transición Z*, donde el número de microespejos utilizados para realizar la conmutación es de $2N$, en estos dos sistemas la única diferencia es el número de microespejos empleados para poder realizar la conmutación. El *sistema de transición Z* es más eficiente en cuanto al número de microespejos, en comparación con el sistema crossbar, ya que para logar la conmutación de 4 puertos de entrada con cada uno de los 4 puertos de salida, el sistema de transición Z requerirá 8 microespejos, mientras que el sistema crossbar para realizar la misma operación requerirá 16 microespejos.

La finalidad de nuestro conmutador óptico OXC, además de disminuir la cantidad de microespejos, es la de eliminar la etapa de conversión de una señal óptica a una señal eléctrica y así tener un sistema de comunicación totalmente óptico. En la actualidad las señales ópticas provenientes de una red óptica, para ser direccionadas a diferentes puertos, son convertidas a señales eléctricas para poder ser manipuladas por los conmutadores electrónicos y así poder ser direccionadas a su respectiva salida. La conversión origina una saturación debido a la gran cantidad de información que se transporta actualmente y por consecuencia se tiene un retardo en la llegada de las señales a los usuarios finales.

III.2 Especificaciones y/o requerimientos del sistema OXC

Para iniciar el diseño de conmutador OXC se tomarán en cuenta características de microlentes acopladoras de fibra óptica comerciales, lo que nos permitirá encontrar parámetros reales para una posible implementación del conmutador OXC. Las características de las microlentes acopladoras nos serán de utilidad al plantear un sistema base, el que estaremos trabajando durante esta Tesis. Las características de las microlentes son el material del que están fabricadas, es decir, su índice de refracción, geometría de la lente (i.e. plano convexas), su radio de curvatura, espesor y su diámetro [32]. En un principio para el diseño se utilizaran 5 diferentes microlentes comerciales, de las cuales sus características se muestran en la Tabla 3.1.

ROC [μm]	Espesor [mm]	Material	n @ 1.55 μm	Diámetro [μm]
330	0.9	Sílice	1.444024	240
900	0.5	Silicio (IF)	1.444085	500
950	0.5	Silicio (IF)	1.444085	500
1650	0.7	Silicio (IF)	1.444085	240
2350	0.5	Silicio (IF)	1.444085	500

Tabla 3.1. Características de las microlentes [32].

III.3 Cálculo de la Matriz de Transferencia ABCD

Para continuar el diseño del conmutador OXC se emplea la técnica de óptica matricial, para obtener la matriz de transferencia óptica que modela cada uno de los elementos ópticos que se incluyen en el sistema base, así como la matriz de transferencia final. Puesto que la matriz de transferencia que modelará el conmutador OXC podrá ser obtenida mediante la multiplicación de las matrices individuales en cascada de cada uno de los elementos ópticos que se encuentren presentes en el conmutador OXC.

El esquema general del conmutador óptico OXC que se analizará se muestra en la Figura 3.1. El esquema muestra los arreglos de fibras con sus respectivas microlentes acopladoras de fibra óptica tanto en la entrada como en la salida del sistema, así como la posición de los arreglos de los microespejos MEMS que permitirán hacer la conmutación entre los puestos de entrada y de salida.

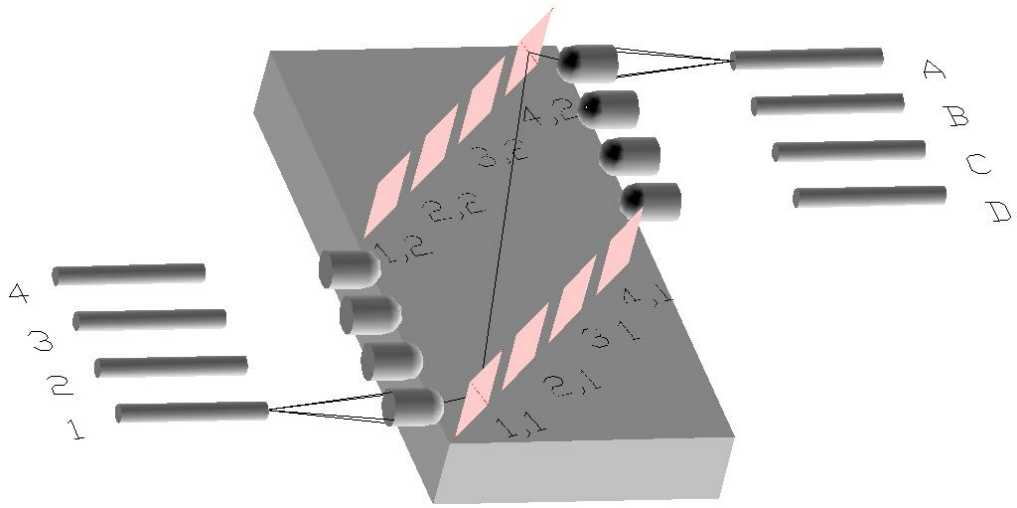


Figura 3.1 Esquema del conmutador óptica OXC de 4x4 en espacio libre con rotación de espejos.

De acuerdo al esquema de la Figura 3.1 para el conmutador OXC, se identifican los elementos ópticos presentes en el conmutador OXC. Ya identificados los diferentes elementos ópticos estos son asociados con su respectiva matriz de transferencia, de acuerdo al tema de óptica matricial del Capítulo II. Para simplificar el sistema de la Figura 3.1 se propondrá un sistema base de 1×1, el cual se muestra en la Figura 3.2. La simplificación del conmutador OXC se puede llevar a cabo debido a que la matriz de transferencia de los microespejos es la matriz identidad. El análisis del sistema base nos proporcionará los parámetros para el diseño del conmutador óptico OXC.

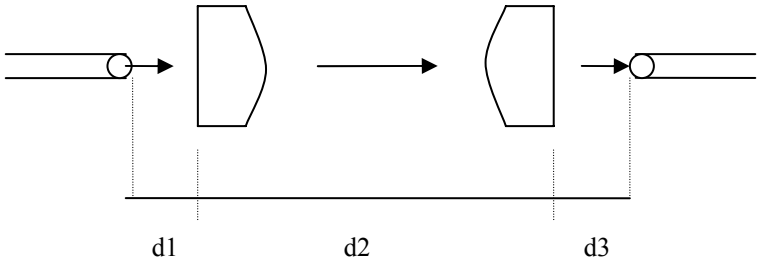


Figura 3.2 Esquema del sistema base en estudio.

En el esquema de la Figura 3.2 se observa una fibra óptica de entrada separada una distancia $d1$ de su microlente de acoplamiento, esta microlente se encuentra separada una distancia $d2$ de una segunda microlente, la cual a su vez está separada una distancia $d3$ con respecto a la fibra óptica de salida.

La propagación de la luz ocurre de la siguiente manera: la luz proveniente de la fibra óptica de entrada viaja en espacio libre una distancia $d1$ divergiéndose, hasta llegar a incidir en la superficie plana de la primera microlente, por lo que un buen cálculo de esta distancia evitará que se tenga una pérdida considerable de luz que se introduce al sistema.

Al incidir la luz sobre la superficie plana de la microlente, la luz disminuye su divergencia y esta pasa a través de la microlente saliendo colimada por su superficie esférica, para viajar una distancia $d2$ en espacio libre hasta llegar a la superficie esférica de la segunda microlente.

Al incidir luz colimada en la superficie esférica de la segunda microlente, la luz atravesará la microlente y saldrá por su superficie plana para viajar una distancia $d3$ en espacio libre hasta ser acoplada a la fibra de salida. Como se considera que el sistema es simétrico, se tendrá por consiguiente que $d1 = d3$, por tal motivo solamente será necesario el cálculo de la distancia $d1$ y $d2$, para obtener la máxima transferencia de la luz que se introduce en el sistema.

En la Figura 3.3 se identifican las matrices de transferencia para cada una de los elementos ópticos presentes en el sistema base, siendo n_L el índice de refracción de las microlentes.

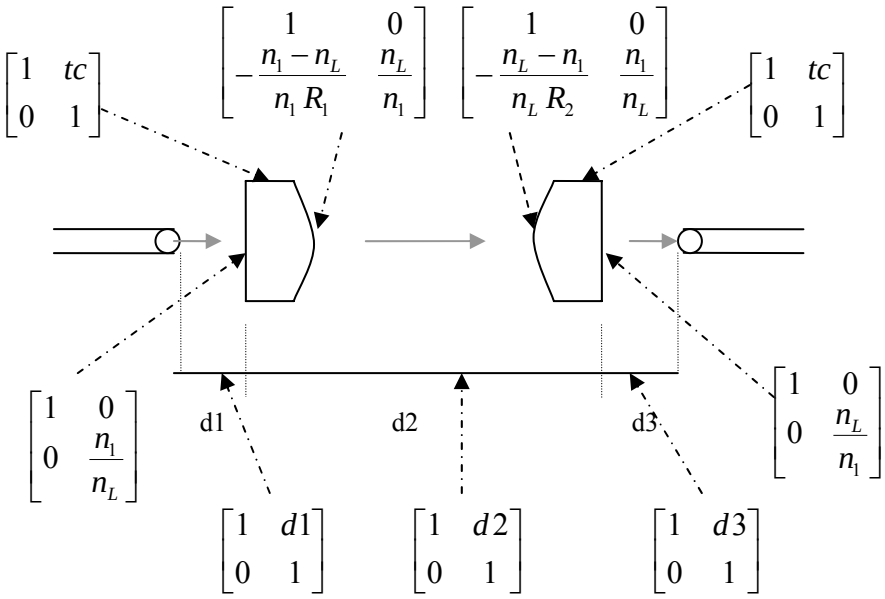


Figura 3.3 Representación de las matrices de transferencia en el sistema base.

Tomando en cuenta el sistema base y las matrices de transferencia que modelan los elementos ópticos, que se encuentran presentes en el sistema base, se realizo un programa con ayuda del programa de software Maple 10 (Anexo 1). En este programa se introdujeron las matrices de transferencia que modelan lo más fielmente posible al sistema base y se realiza la multiplicación de todas las matrices de transferencia del sistema base de acuerdo a la técnica de óptica matricial.

De la multiplicación de todas las matrices individuales de los elementos ópticos, se obtiene la matriz de transferencia total que modela el sistema base, siendo esta una matriz de 2×2. Para la obtención de la matriz de transferencia final también se programaron el radio de curvatura (ROC, por sus siglas en inglés), índice de refracción del aire $n_1 = 1$, índice de refracción de la microlente n_L y el espesor de la microlente tc.

El programa se realizo de manera general y para obtener la solución de la matriz de transferencia para una microlente en particular se sustituyen los valores correspondientes para cada microlente. El procedimiento que se menciona a continuación para la solución de la matriz de transferencia, la cual queda en función de $d1\ y\ d2$, se realizo para cada una de las microlentes.

Después de haber obtenido la matriz de transferencia final la cual modela al sistema base y quedando esta en función de $d1\ y\ d2$, se procede a su solución para obtener los valores de $d1\ y\ d2$ óptimos. La solución particular que se muestra a continuación es para la microlente con $ROC = 330\,\mu m$.

Para la solución de la matriz de transferencia se establecen dos condiciones que la matriz de transferencia final debe cumplir siendo estas $A = \pm 1\ \ y\ \ B = 0$. La finalidad por la que se deben de cumplir las dos condiciones, es para asegurar que se tenga una imagen en la fibra óptica de la salida de iguales características al haz de entrada, ya que queremos minimizar las pérdidas por acoplamiento.

En base al programa del Anexo 1 y al incluir las condiciones anteriores, se obtiene dos expresiones para $d1\ y\ d2$, las cuales se muestran a continuación.

$$d1 := \frac{0.2972812280\ 10^{-9}\,(0.2096527733\ 10^{19} + 0.5428829391\ 10^{18}\ d2)}{-0.1000000000\ 10^{10} + 0.1345527273\ 10^{10}\ d2} \tag{3.1}$$

$$d2 := 3.407999156 \tag{3.2}$$

Al obtener la solución de la matriz de transferencia del sistema base, bajo las condiciones establecidas, se obtuvieron varias soluciones para las distancias mínimas de $d1\ y\ d2$ que satisfacen las restricciones planteadas, pero sólo se toman en cuenta las soluciones en las que tanto $d1\ y\ d2$ son positivas, es decir las soluciones que tienen un significado físico dentro del sistema base.

Las distancias $d1\ y\ d2$ que se obtuvieron para el sistema base con cada una de las diferentes microlentes se muestran en la Tabla 3.2.

ROC [μm]	d1 [mm]	d2 [mm]
330	0.3272216803	3.407999156
900	1.680399038	2.026639044
950	2.535565314	8.301980100
1650	3.985488193	22.00704364
2350	7.688503390	15.50078579

Tabla 3.2. Distancias d1 y d2 para diferentes microlentes en Maple 10.

En la Tabla 3.2 se muestran las distancias $d1\ y\ d2$ óptimas que resultan de resolver la matriz de transferencia final del sistema base, las cuales cumplen las condiciones para que en la salida del sistema se tenga una imagen con magnificación de 1.

III.4 Cálculo del tamaño del spot y el radio de curvatura del frente de onda en la primera microlente.

El siguiente paso que se realizo para proseguir con el diseño del conmutador OXC, fue obtener el tamaño del spot (radio) $w(z)$ y el radio de curvatura del frente de onda $R(z)$, en la superficie plana de la primera microlente. La finalidad de obtener el tamaño del spot en la cara plana de la primera microlente es para poder observar el tamaño del spot (diámetro) y poder compararlo con el diámetro de la microlente y así poder saber que microlentes se pueden descartar antes de continuar con el diseño. Ya que si el tamaño del spot (diámetro) en la superficie plana de la primera microlente es mayor que el diámetro de la microlente, se tendrá una pérdida significativa de la luz que entra al sistema y puesto que la meta es obtener un conmutador OXC con la máxima transferencia de luz, dicha microlente no cumpliría las condiciones del diseño y esta será descartada para las siguientes etapas del conmutador OXC.

Para la obtención del tamaño del spot $w(z)$ y el radio de curvatura del frente de onda $R(z)$ se realizo un programa en Maple 10 (Anexo 2a), en este se programaron las formula tanto para el tamaño del spot y el radio de curvatura del frente de onda, las cuales fueron mencionada en el Capítulo II, mediante las ecuaciones (2.19) y (2.20) respectivamente. Para calcular las dimensiones del spot del haz, se utilizaron los datos de longitud de onda del haz, el tamaño del spot inicial en cada etapa y la distancia existente entre los distintos elementos ópticos.

De la programación de la ecuación para el tamaño del spot en la superficie plana de la primera microlente, se obtuvo la siguiente expresión

$$W := (z, w0, \lambda) \rightarrow w0 \sqrt{1 + \frac{z^2 \lambda^2}{\pi^2 w0^4}} \tag{3.3}$$

Mientras que para el radio de curvatura del frente de onda en la superficie plana de la primera microlente se obtuvo la siguiente expresión

$$R := (z, w0, \lambda) \rightarrow z \left(1 + \frac{\pi^2 w0^4}{z^2 \lambda^2} \right) \tag{3.4}$$

Las distancias que se tomaron para obtener tanto el tamaño del spot $w(z)$ y el radio de curvatura del frente de onda $R(z)$, son las distancias $d1$ que se obtuvieron anteriormente para cada una de las microlentes ya que a esta distancia se encuentra la cara plana de la primera microlente, con la que se quiere comparar el diámetro del spot.

Para la microlente con $ROC = 1650\ \mu m$ se obtuvo un tamaño de spot (radio) $w(d1) = 0.3188387688\ mm$, el cual al compararse con el radio de la microlente que es de $0.120\ mm$, se puede observa que el tamaño del spot (radio) es mayor que el radio de la microlente, por lo que esta microlente se descarta para las siguientes etapas del conmutador OXC.

Al realizar la misma operación para el resto de las microlentes, se observo que las microlentes que cumplirán las condiciones de diseño, son las microlentes de $330\ y\ 900\ \mu m$, así ya pudiendo descartar las microlentes de $950, 1650\ y\ 2350\ \mu m$. En la Tabla 3.3 se observa la comparación de los tamaños del spot (radio) $w(z)$, con los radio de las microlentes en la primer superficie plana.

ROC [μm]	Distancia "d1" [mm]	Radio del haz (spot) w(z) [mm]	Radio frente Onda R(z) [mm]	Comparando el radio de la microlente con el radio del haz w(z)	
				Radio microlente [μm]=[mm]	
330	**0.3272216803**	0.03267378374	0.3350681499	120=**0.120**	SI
900	**1.680399038**	0.1658905322	1.681926970	250=**0.250**	SI
950	**2.5355655314**	0.2502495835	2.536578139	250=**0.250**	NO
1650	**3.985488193**	0.3933040742	3.986132414	120=**0.120**	NO
2350	**7.688503390**	0.7586877340	7.688837335	250=**0.250**	NO

Tabla 3.3 Comparación del Radio del spot w (z) con el Radio de la microlente en la superficie plana de la primer microlente, en Maple.

Para asegurar que las condiciones de diseño se mantuvieran después de que la luz atravesará la microlente se cálculo el radio del spot $w_1(z)$ y el radio de curvatura del frente de onda $R_1(z)$ en la superficie esférica de la microlente, para este cálculo se realizo un programa en Maple 10 (Anexo 2b). El programa consiste en obtener la matriz de transferencia desde la salida de la fibra óptica de entrada, hasta la superficie esférica de la primera microlente.

Después de obtener la matriz de transferencia se emplea el parámetro q para obtener las expresiones que permitan obtener el tamaño del spot $w_1(z)$ y el radio de curvatura del frente de onda $R_1(z)$ en la superficie esférica.

En la Tabla 3.4 se muestran los valores particulares tanto de $w_1(z)$ y $R_1(z)$, en la superficie esférica para las diferentes microlentes, para poder comparar el tamaño del spot (radio) $w_1(z)$, con el radio de la microlente.

ROC [μm]	Distancia "espesor" Microlente [mm]	Radio del haz (spot) w1(z) [mm]	Radio frente Onda R1(z) [mm]	Comparando del radio microlente con el radio del haz w1(z)	
				Radio microlente [μm]=[mm]	
330	**0.9**	0.09392281036	-3.373717403	120=**0.120**	SI
900	**0.5**	0.2000432617	-3244.021459	250=**0.250**	SI
950	**0.5**	0.2844091838	-8.294593065	250=**0.250**	NO
1650	**0.7**	0.4411324696	-21.99313323	120=**0.120**	NO
2350	**0.5**	0.7928526251	-15.49959649	250=**0.250**	NO

Tabla 3.4 Comparación del Radio del spot w1 (z) con el Radio de la microlente en la superficie esférica de la microlente, en Maple.

III.5 Análisis de Pérdidas por tamaño de abertura

Para proseguir con el diseño del conmutador OXC, se realizo el análisis de las pérdidas provocadas cuando un Haz Gaussiano atraviesa una abertura finita de una superficie cuadrada y/o circular. Esto con la finalidad de optimizar el tamaño de las componentes que emplearemos para el diseño de nuestro sistema final. Mediante este análisis se obtuvieron dos expresiones en función del tamaño del spot w_0 para cada una de las superficies.

En tales expresiones se estimará una transmitividad del $99.99\ \%$ de la potencia de la luz del haz en la superficie plana en cada superficie. Este límite en las pérdidas será el mismo tanto para la superficie circular de las microlentes, como para la superficie cuadrada de los microespejos. Al asumir que el sistema es simétrico al lograr capturar el 99.99% de la luz en la superficie circular de la primera microlente, en teoría se tendrá la misma cantidad de luz capturada en la segunda microlente.

Las expresiones que se obtuvieron tanto para la superficie circular y cuadrada nos ayudaran a obtener el tamaño óptimo de las microlentes y microespejos que se emplearan en el conmutador OXC, logrando reducir las pérdidas por difracción al igual que se reducirá el tamaño de los micro-componentes. En caso de tener elementos más pequeños a las dimensiones óptimas se tendrá una mayor cantidad de pérdidas cuando la luz viaje a través de ellos.

III.5.1 Por pantalla Rectangular y Circular

Para la solución de esta etapa se realizo un programa tanto para una superficie circular y cuadrada, tales programas se muestran en el Anexo 3. Mediante estos programas se obtienen las expresiones en las que se captura el $99.99\ \%$ de la luz que se introduce al sistema, en cada superficie que compone el sistema. En la Figura 3.4, lado izquierdo se muestra el esquema de un haz Gaussiano al atravesar una superficie cuadrada con dimensiones $2L$, en el lado derecho se muestra la potencia del haz limitada por la superficie cuadrada. Puesto que el haz Gaussiano es limitado por la superficie cuadrada, la potencia capturada mediante la superficie cuadrada será menor al $100\ \%$ de la potencia del haz Gaussiano.

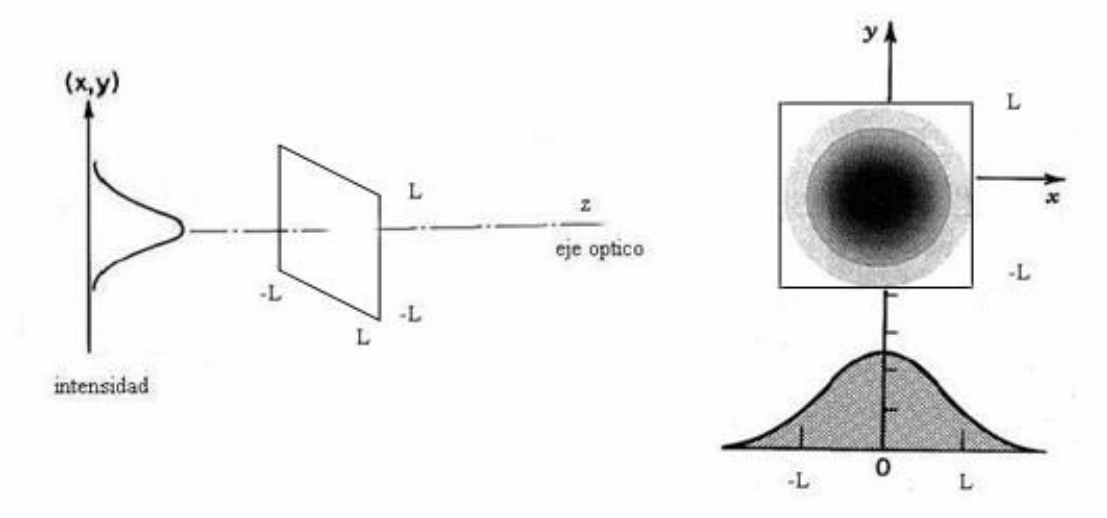


Figura 3.4 Un haz Gaussiano al pasar a través de una superficie cuadrada (A partir de [30]).

La expresión para obtener el $100\ \%$ de la Potencia de un haz Gaussiano es la que se muestra a continuación.

$$\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{w_0^2}\right) dx \cdot dy \tag{3.5}$$

La cual se modifica cuando el haz Gaussiano pasa a través de una superficie finita. Si la superficie finita es un cuadrado la expresión resultante será.

$$\int_{-L}^{L}\int_{-L}^{L} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{w_0^2}\right) dx \cdot dy \tag{3.6}$$

Siendo L, las dimensiones del cuadrado.

Por lo tanto para obtener la expresión que asegure la captura del $99.99\ \%$ de la potencia de un haz Gaussiano cuando este atraviesa una superficie finita se realiza el cociente de la potencia capturada por la superficie finita, entre el $100\ \%$ de la potencia de un haz Gaussiano cuando este no esta limitado por ninguna superficie finita.

La expresión cuando un haz Gaussiano atraviesa una superficie cuadrada finita, deseando que se obtenga una captura del $99.99\ \%$ de la luz introducida, es la que se muestra a continuación. La expresión resultante quedará en función del tamaño del spot w_0 de la entrada del sistema.

$$\frac{\int_{-L}^{L} \exp\left(-\frac{x^2}{w_0^2}\right) dx \cdot \int_{-L}^{L} \exp\left(-\frac{y^2}{w_0^2}\right) dy}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{x^2}{w_0^2}\right) dx \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{w_0^2}\right) dy} = 0.9999 \tag{3.7}$$

Mientras que la expresión para tener una captura del $99.99\ \%$ de la potencia de un haz Gaussiano, cuando este pasa a través de una superficie circular es la que se muestra a continuación, quedando esta también en función del tamaño del spot w_0 de la entrada.

$$\frac{\int_{0}^{2\pi}\int_{0}^{r} \exp\left(-\frac{2r^2}{w_0^2}\right) \cdot r\, dr\, d\theta}{\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{2r^2}{w_0^2}\right) \cdot r\, dr\, d\theta} = 0.9999 \tag{3.8}$$

Siendo r el radio de la superficie circular que atraviesa el haz Gaussiano.

Después de programar las ecuaciones (3.7) y (3.8) y solucionarlas para la captura de la luz deseada, se obtuvieron las siguientes expresiones de $2.2252485\ w0$ y $2.286775\ w0$ para obtener el 0.9999 de la luz introducida en el sistema, en la superficie circular y cuadrada respectivamente.

Sabiendo que el tamaño del spot en la primera superficie circular de la microlente de $330\ \mu m$ es de $w_0 = 0.0326737837\ mm$, el tamaño del spot mínimo que se requiere para capturar el 0.9999 de la potencia del haz Gaussiano en esa superficie es de 0.07270729 mm. Mientras que para la microlente de $900\ \mu m$, el spot mínimo que se requiere en su superficie circular es de $0.36914765\ mm$, por lo que se puede observar que las microlentes son adecuadas para obtener la captura de la luz deseada.

III.6 Eficiencia de acoplamiento

La siguiente etapa para el diseño del conmutador OXC, es el análisis de la eficiencia de acoplamiento η, cuando la luz que sale de la superficie plana de la segunda microlente se acople a la fibra óptica de salida. Se calcularan las pérdidas que se presentan para diferentes casos que se mencionaran más adelante. El análisis de la eficiencia de acoplamiento permitirá obtener una expresión que podamos escalar para saber el comportamiento del diseño y por consiguiente nos proporcionará las tolerancias que nuestro sistema puede tener para hacerlo lo más eficiente posible.

La expresión que permite calcular la eficiencia de acoplamiento, se conoce como integral de acoplamiento y esta definida de la siguiente manera.

$$\eta = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(x,y)\, \psi^*(x,y)\, dx\, dy \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \phi(x,y)\, \phi^*(x,y)\, dx\, dy \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x,y)\, \psi^*(x,y)\, dx\, dy} \tag{3.9}$$

Donde $(*)$ indica complejo conjugado y $\phi(x,y)$ y $\psi(x,y)$ son las ondas electromagnéticas de la entrada y de salida del sistema respectivamente, las que quedan definidas como:

$$\begin{aligned} \phi(x,y) &= \exp\left[-\frac{x^2+y^2}{w_0^2} \right] \\ \psi(x,y) &= \exp\left[-\frac{x^2+y^2}{w_1^2} \right] \exp\left[-I\,k\,\frac{x^2+y^2}{2\,R_1} \right] \end{aligned} \tag{3.10}$$

Debido a que se trataran diversos casos de desalineación para la eficiencia de acoplamiento, en el Anexo 4 se presenta el cálculo de la expresión para la eficiencia de acoplamiento en forma general. Para la obtención de la expresión general de la eficiencia de acoplamiento se programo la integral de acoplamiento y los campos electromagnéticos de la entrada y salida, obteniéndose la siguiente expresión para la eficiencia de acoplamiento en forma general.

$$NU := \frac{16\ w0\sim^2\ w1\sim^2\ R1\sim^2}{4\ w1\sim^4\ R1\sim^2 + 8\ w1\sim^2\ R1\sim^2\ w0\sim^2 + 4\ w0\sim^4\ R1\sim^2 + k\sim^2\ w0\sim^4\ w1\sim^4} \tag{3.11}$$

Donde $w0$ y $w1$ son los tamaños de spot en la entrada y salida respectivamente, R_1 el radio de curvatura del frente de onda en la salida y k la constante de propagación que esta definida como: $k = 2\pi / \lambda$.

Al simplificar la expresión (3.11) se obtiene la siguiente expresión

$$NU = \frac{4w_0^2\ w_1^2}{(w_1^2 + w_0^2)^2 + (k^2\ w_0^4\ w_1^4 / R_1^2)} \tag{3.12}$$

De la expresión general para la eficiencia de acoplamiento, se obtiene el caso particular en el cual el sistema no presenta ninguna desalineación, tal expresión se obtuvo mediante un programa en Maple 10 (Anexo 5). Para obtener la expresión de la eficiencia de acoplamiento para este caso se asume un frente de onda plano es decir $R_1 \to \infty$ y se sustituyen los valores correspondientes para la constante de desplazamiento. Obteniéndose la siguiente expresión para la eficiencia de acoplamiento sin desplazamiento.

$$NU := \frac{4.000000004\ w0\sim^2\ w1\sim^2}{(w1\sim^2 + w0\sim^2)^2} \tag{3.13}$$

De la ecuación (3.13) se observa que si el tamaño del spot de la entrada w_0 es igual al tamaño del spot en la salida w_1, se tendrá la máxima eficiencia de acoplamiento, es decir $\eta = 1$, que es uno de los resultados que debemos corroborar en todos los casos que se realizarán.

III.6.1 Tolerancia al desplazamiento

Después de obtener la ecuación de la eficiencia de acoplamiento sin desalineación, se procede a realizar un análisis en presencia de una desalineación. En este análisis de desalineación se consideran 4 casos principalmente en la salida del sistema: 1) Desplazamiento longitudinal en el $eje\ z$, 2) Desplazamiento transversal, el cual puede suceder en el $eje\ x$ o $eje\ y$, 3) Desplazamiento transversal tanto en el $eje\ x$ y $eje\ y$ y 4) el caso más completo en el que existe un desplazamiento longitudinal en el $eje\ z$ y al mismo tiempo un desplazamiento angular. Tales casos de mala alineación se presentan en la Figura 3.5.

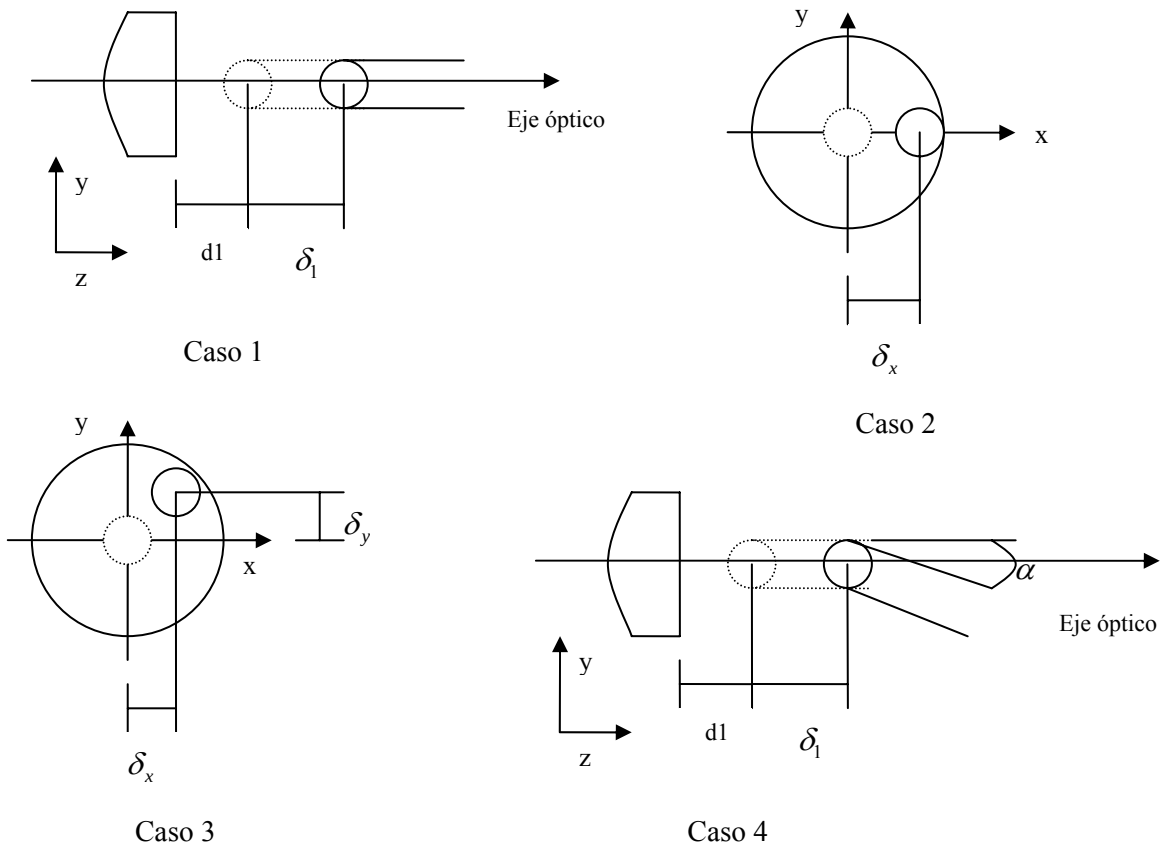


Figura 3.5 Casos de desalineación en la salida del sistema base.

Para obtener la eficiencia de acoplamiento η, en función de los desplazamientos se realizo un programa en Maple 10 para cada uno de los 4 casos, en dichos programas se introducen las dos ondas electromagnéticas siendo estas las que se presentan a continuación. Las ondas electromagnéticas representan nuestros campos de entrada y salida respectivamente.

$$\begin{aligned} \phi(x,y) &= \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{w_0^2}\right) \\ \psi(x,y) &= \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{w_1^2}\right)\exp\left(-i\,k\,\frac{x^2+y^2}{2\,R_1}\right) \end{aligned} \tag{3.14}$$

Siendo $\phi(x,y)$ la onda de entrada, $\psi(x,y)$ la onda de salida, w_0 el tamaño del spot en la onda de entrada, w_1 el tamaño del spot en la onda de salida y R_1 el radio del frente de onda de la onda de la salida.

III.6.2 Eficiencia de acoplamiento para un desplazamiento longitudinal en el eje z

Ya definidas las ondas electromagnéticas se realizo un programa en Maple 10 (Anexo 6), para obtener la eficiencia de acoplamiento cuando en el sistema se presenta un desplazamiento longitudinal δ_1, tal como se muestra en la Figura 3.5 Caso 1. En una primera etapa del programa se obtiene el tamaño del spot w_1 y el radio de curvatura del frente de onda R_1, para cuando se tiene un desplazamiento longitudinal δ_1. Ya con esas expresiones de w_1 y R_1, estas se sustituyen en la forma general de la integral de acoplamiento ecuación (3.11), para obtener la η en función del desplazamiento δ_1.

La manera en que se procedió para obtener η en función de δ_1, cuando se presenta un desplazamiento longitudinal en el *eje z* es la que a continuación se menciona.

De la expresión que relaciona un campo de entrada con uno de salida (haces Gaussianos paraxiales) y los elementos de la matriz de transferencia, se obtiene el parámetro q_1 de la siguiente manera.

$$q_1 = \frac{A q_0 + B}{C q_0 + D} \tag{3.15}$$

Siendo q_0 el parámetro referido al campo de entrada y q_1 el parámetro referido al campo de salida y A, B, C y D los elementos de la matriz de transferencia del sistema base. Para obtener el valor de q_0 se asume que en el campo de entrada se tiene un frente de onda plano, es decir $R_0(z) \to \infty$, el que al sustituirse en la siguiente expresión siguiente

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i\frac{\lambda}{n\pi\, w(z)^2} \tag{3.16}$$

Se obtiene la siguiente expresión para el valor de q_0

$$q_0 = \frac{i\, n\pi\, w(z)_0^2}{\lambda} \tag{3.17}$$

Ya con los valores de q_0 y $A, B, C\ y\ D$, se sustituyen en la ecuación (3.15) para obtener la expresión que será igualada a la ecuación (3.16). De la expresión obtenida se separa la parte real e imaginaria, para obtener el tamaño del spot $w(z)$ con la parte imaginaria y el radio del frente de onda $R(z)$ con la parte real, para la onda de la salida.

Con las expresiones del tamaño del haz y el radio de curvatura del frente de onda en la salida del sistema, se procede a sustituirlas en la expresión de la eficiencia de acoplamiento general mostrada en la ecuación (3.11), para obtener la eficiencia de acoplamiento para cuando se tiene un desplazamiento δ_1 en la fibra óptica de salida. Para este primer caso además de analizar la eficiencia de acoplamiento cuando se presenta un desplazamiento longitudinal δ_1 en la salida del sistema Caso 1a, también se analizó el caso en que se presenta un desplazamiento longitudinal δ_2 Caso 1b, entre las dos microlentes, además de la combinación de los dos casos anteriores, es decir, cuando se tiene un desplazamiento $\delta_1\ y\ \delta_2$ longitudinal en el $eje\ z$ Caso 1c, como se muestra a en la Figura 3.6.

III.6.2.1 Eficiencia de acoplamiento para un desplazamiento longitudinal en el eje z en la fibra óptica de salida.

Para solucionar cada caso de desplazamiento longitudinal en el sistema, se realizo un programa en Maple 10 para cada uno de los casos, obteniéndose η en función de su desplazamiento correspondiente para cada caso diferente.

Para el Caso 1a de la Figura 3.6, en el cual se añade un desplazamiento longitudinal δ_1 a la distancia $d3$, esto con la finalidad de desplazar la fibra óptica de salida y así observar el comportamiento del sistema bajo el desplazamiento δ_1. Este desplazamiento nos permitirá saber las tolerancias de desalineación que permitirá el conmutador OXC, sufriendo la menor cantidad posible de pérdidas para el acoplamiento de la luz en la fibra óptica de salida. Para obtener la eficiencia de acoplamiento que modelará esta condición se realizó un programa en Maple (Anexo 6), los datos que se utilizaron para este programa en particular fueron los de la microlente de 900 μm, obteniéndose así la eficiencia de acoplamiento en función de δ_1.

Debido a que la expresión de la eficiencia de acoplamiento para esta condición resulto muy grande y como algunos de sus términos se pueden despreciar puesto que son muy pequeños. Se procedió a hacer una aproximación mediante la serie de Taylor (Anexo 7), resultando la expresión (3.17).

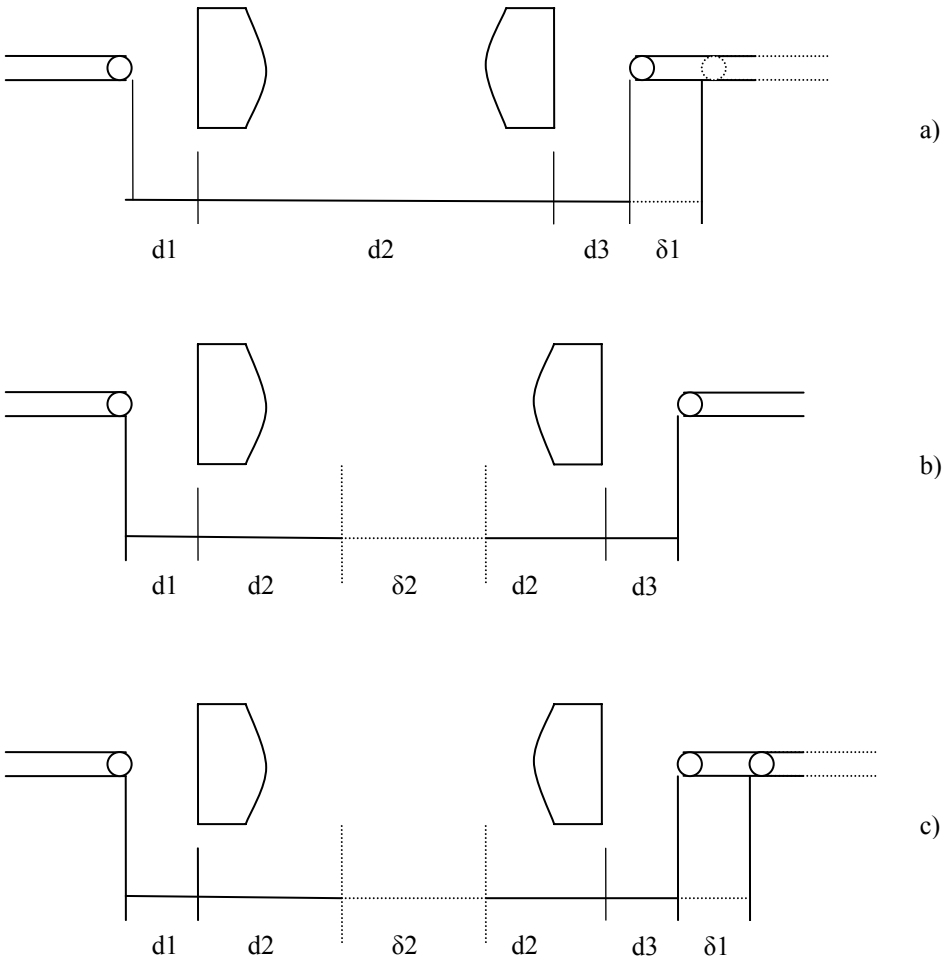


Figura 3.6 a) Desplazamiento δ1 en la fibra de salida b) Desplazamiento δ2 entre las dos microlentes c) Combinación de los casos anteriores δ1 y δ2.

$$NU := 1.000000000 + 0.0003237916628\ \delta 1 - 97.36965752\ \delta 1^2 - 0.06305497663\ \delta 1^3 \tag{3.17}$$

Al evaluar la eficiencia de acoplamiento en el caso de la microlente de $900\ \mu m$, en la condición de cero desplazamiento, es decir $\delta_1 = 0$, se obtiene una eficiencia de acoplamiento de 1.

La Figura 3.7, muestra el comportamiento de la eficiencia de acoplamiento al ir incrementando el desplazamiento δ_1 tanto de la ecuación original (línea continua) y de la aproximación mediante la serie de Taylor (línea con cuadrados), en pasos de $10\,\mu m$.

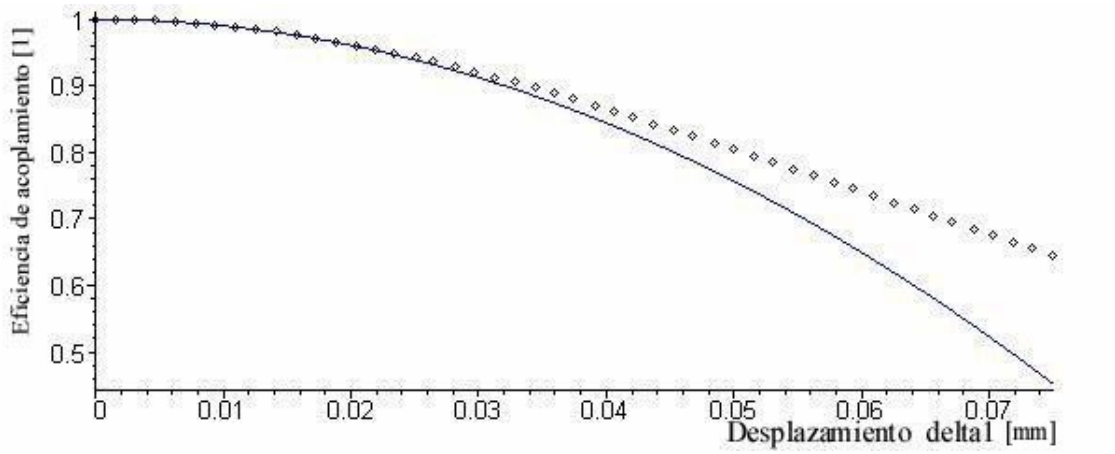


Figura 3.7 Gráfica cuando se presenta un desplazamiento δ_1 en la fibra óptica de salida.

En la Tabla 3.5 se muestran los valores de R_1, para cuando no se tiene desplazamiento y para un desplazamiento $\delta_1 = 15\,\mu m$, para las microlentes en estudio.

ROC [μm]	R1 con $\delta_1 = 0\ \mu m$	R1 con $\delta_1 = 15\ \mu m$
330	0.1035633143	0.08276461302
900	-1544.202822	0.1861863104

Tabla 3.5 Valores de R1 para cuando se presenta un desplazamiento δ_1 en la FO de salida.

En la Tabla 3.6 se muestran los valores de w_1, para cuando no se tiene desplazamiento y para un desplazamiento $\delta_1 = 15\,\mu m$, para las microlentes en estudio.

ROC [μm]	w1 con $\delta_1 = 0\ \mu m$	w1 con $\delta_1 = 15\ \mu m$
330	0.005000495465	0.005912975725
900	0.005000000000	0.005214434926

Tabla 3.6 Valores de w1 para cuando se presenta un desplazamiento δ_1 en la FO de salida.

En la Tabla 3.7 se muestra la eficiencia de acoplamiento para las microlentes en estudio, sin ningún desplazamiento y para un desplazamiento $\delta_1 = 15\ \mu m$.

ROC [μm]	$\eta(\delta_1 = 0\ \mu m)$	$\eta(\delta_1 = 15\ \mu m)$
330	0.9435215884	0.8624835285
900	1.	0.9785661562

Tabla 3.7 Valores de la eficiencia de acoplamiento sin desplazamiento δ_1 en la FO de salida.

Estos resultados a priori nos muestran que se tiene un mejor acoplamiento cuando el sistema es caracterizado con la microlente de $900\ \mu m$, también se puede observar que el tamaño del spot crece más en la microlente de $330\ \mu m$ en comparación con la microlente de $900\ \mu m$, cuando se tiene un desplazamiento $\delta_1 = 15 \mu m$.

III.6.2.2 Eficiencia de acoplamiento para un desplazamiento longitudinal en el eje z entre las dos microlentes.

Para el Caso 1b, donde se añade un desplazamiento δ_2, entre las dos microlentes se realizo un programa en Maple (Anexo8), primero se obtienen $w_1\ y\ R_1$ de forma general en términos de δ_2. Las expresiones en función de $w_1\ y\ R_1$ en función δ_2 son sustituidas en la expresión de la eficiencia de acoplamiento general, ecuación (3.11), obteniéndose la expresión para la eficiencia de acoplamiento cuando se tiene un desplazamiento entre las dos microlentes.

De la expresión resultante para cuando se tiene un desplazamiento entre las microentes se obtiene una expresión simplificada mediante la serie de Taylor. La expresión reducida tendrá el mismo comportamiento suprimiendo los términos muy pequeños, siendo esta la que se muestra a continuación. La expresión que se muestra es para las características de la microlente de $900\ \mu m$.

$$\begin{aligned} NU := {} & 1.000000000 - 0.2021652821\ 10^{-6}\ \delta 2 - 0.00003804965767\ \delta 2^2 \\ & + 0.1539989335\ 10^{-10}\ \delta 2^3 + 0.1447776447\ 10^{-8}\ \delta 2^4 - 0.8792312050\ 10^{-15}\ \delta 2^5 \\ & - 0.5508739806\ 10^{-13}\ \delta 2^6 + 0.4461328983\ 10^{-19}\ \delta 2^7 \end{aligned} \tag{3.18}$$

Al evaluar la eficiencia de acoplamiento en el caso de la microlente de $900\ \mu m$, cuando no se tiene ningún desplazamiento, es decir $\delta_2 = 0$, se obtiene una eficiencia de acoplamiento de 1.

La Figura 3.8, muestra el comportamiento de la eficiencia de acoplamiento al ir incrementando el desplazamiento δ_2 entre las microlentes. En línea continua se muestra la ecuación original, mientras que la línea con cuadrados es la representación por medio de la serie de Taylor. La gráfica esta en pasos de $20\ mm$.

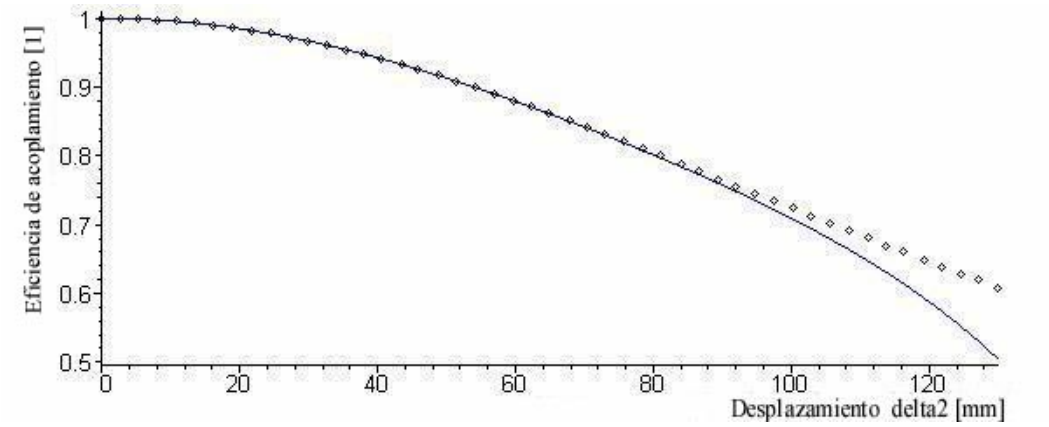


Figura 3.8 Gráfica cuando se presenta un desplazamiento δ_2 entre las microlentes.

En la Tabla 3.8 se muestran los valores de R_1, para cuando no se tiene desplazamiento y para un desplazamiento $\delta_2 = 15\mu m$, para las microlentes en estudio.

ROC [μm]	R1 con $\delta_2 = 0\ \mu m$	R1 con $\delta_2 = 15\ \mu m$
330	0.1035633143	0.09925261865
900	-1546.062296	-232.6193226

Tabla 3.8 Valores de R1 para cuando se presenta un desplazamiento δ_2 entre las microlentes.

En la Tabla 3.9 se muestran los valores de w_1, para cuando no se tiene desplazamiento y para un desplazamiento $\delta_2 = 15\mu m$, para las microlentes en estudio.

ROC [μm]	w1 con $\delta_2 = 0\ \mu m$	w1 con $\delta_2 = 15\ \mu m$
330	0.005000495465	0.005030006112
900	0.005000000005	0.005000000021

Tabla 3.9 Valores de w1 para cuando se presenta un desplazamiento δ_2 entre las microlentes.

En la Tabla 3.10 se muestra la eficiencia de acoplamiento para las microlentes en estudio, cuando no se tiene ningún desplazamiento y cuando se tiene un desplazamiento $\delta_2 = 15\ \mu m$ entre las microlentes.

ROC [μm]	$\eta(\delta_2 = 0\ \mu m)$	$\eta(\delta_2 = 15\ \mu m)$
330	0.9435215880	0.9381048606
900	1.	0.9999999881

Tabla 3.10 Valores de la eficiencia de acoplamiento sin desplazamiento δ_2 entre las microlentes.

En este caso se observa que se pueden tener grandes desplazamientos para δ_2 sin que el sistema se vea afectado considerablemente, sin embargo más adelante se vera el efecto que tiene δ_2, en las aberraciones del sistema.

III.6.2.3 Eficiencia de acoplamiento para un desplazamiento longitudinal en el eje z tanto δ_1 en la salida de la Fibra óptica, así como δ_2 entre las microlentes.

Para el Caso 1c que es la combinación de los Casos 1b y 1c, es decir existe un desplazamiento δ_1 en la fibra de salida y un desplazamiento δ_2 entre las microlentes. Para obtener la eficiencia de acoplamiento para este caso se realizo un programa en Maple. En este programa después de sustituir los expresiones de $w_1\ y\ R_1$, en la expresión (3.11) de la eficiencia de acoplamiento general se obtiene una expresión en función de $\delta_1\ y\ \delta_2$.

Al igual que en los casos anteriores se obtiene una ecuación simplificada de la ecuación de la eficiencia de acoplamiento cuando se tiene un desplazamiento en la fibra óptica de salida y un desplazamiento entre las microlentes. La expresión se obtiene por medio de la serie de Taylor resultando ser la siguiente. Los datos que se utilizaron para dicha expresión fueron las características de la microlente de 900 μm.

$$
\begin{aligned}
NU := {} & 0.9999998840 - 0.0001310382842\ \delta 1 - 0.2641734620\ 10^{-6}\ \delta 2 \\
& - 97.30334230\ \delta 1^2 + 0.1217525296\ \delta 2\ \delta 1 - 0.00003840918062\ \delta 2^2 \\
& - 0.0175966051\ \delta 1^3 + 0.0992003052\ \delta 1^2\ \delta 2 - 0.0001082526508\ \delta 2^2\ \delta 1 \\
& - 0.6777672799\ 10^{-7}\ \delta 2^3
\end{aligned}
\tag{3.19}
$$

En la Tabla 3.11 se muestran los valores de R_1, para cuando no se tiene desplazamiento y para un desplazamiento $\delta_1 = \delta_2 = 15\mu m$, para las microlentes en estudio.

ROC [μm]	R1 con $\delta_2 = \delta_1 = 0\ \mu m$	R1 con $\delta_2 = \delta_1 = 15\ \mu m$
330	0.1032610762	0.08132490076
900	3805.407768	0.1861412312

Tabla 3.11 Valores de R1 para cuando se presenta un desplazamiento en la FO de salida y otro entre las microlentes.

En la Tabla 3.12 se muestran los valores de w_1, para cuando no se tiene desplazamiento y para un desplazamiento $\delta_1 = \delta_2 = 15\mu m$, para las microlentes en estudio.

ROC [μm]	w1 con $\delta_2 = \delta_1 = 0\ \mu m$	w1 con $\delta_1 = \delta_2 = 15\ \mu m$
330	0.004990517069	0.005964622705
900	0.004998293319	0.005212580097

Tabla 3.12 Valores de w1 para cuando se presenta un desplazamiento en la FO de salida y otro entre las microlentes.

En la Tabla 3.13 se muestra la eficiencia de acoplamiento para las microlentes en estudio, cuando en el sistema no se presenta ningún desplazamiento, es decir $\delta_1 = \delta_2 = 0$ y cuando se tiene el mismo desplazamiento tanto en la fibra de salida y entre las microlentes, es decir cuando se tiene $\delta_1 = \delta_2 = 15\ \mu m$.

ROC [μm]	η con $\delta_1 = \delta_2 = 0$	η con $\delta_1 = \delta_2 = 15\ \mu m$
330	0.9434186362	0.8550250674
900	0.9999998840	0.9786091285

Tabla 3.13 Valores de la eficiencia de acoplamiento para cuando se presenta un desplazamiento en la FO de salida y otro entre las microlentes.

Se puede observar que para un mismo desplazamiento tanto para $\delta_1\ y\ \delta_2$ en la microlente de $900\ \mu m$ se tendrá mucho mejor acoplamiento que con la microlente de $330\ \mu m$, por lo que se puede predecir que el conmutador OXC final se diseñará con la microlente de $900\ \mu m$.

Para observar el comportamiento en este caso se fija $\delta_1 = 1\,\mu m$ y se varía el desplazamiento δ_2 como se muestra en la Figura 3.9. En dicha Figura se muestra con línea continua la expresión original y con la línea con cuadrados la aproximación mediante la seria de Taylor. La gráfica esta construida con las características de las microlente de $900\,\mu m$, a pasos de $20\,mm$.

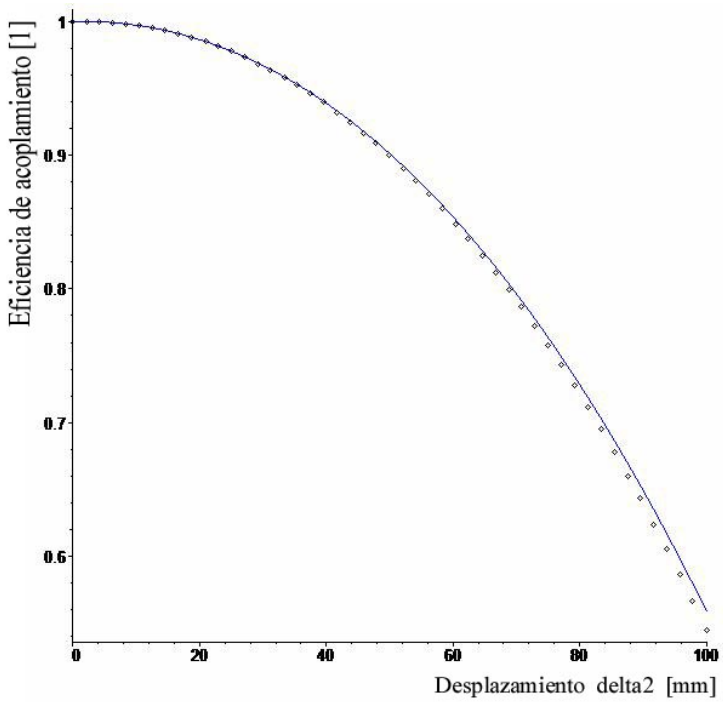


Figura 3.9 Gráfica cuando se presenta un desplazamiento δ_1 y δ_2 simultáneamente.

Al observar los resultados de los tres Casos anteriores 1a, 1b y 1c se puede concluir que un desplazamiento δ_1 en la fibra de salida, si afecta la eficiencia de acoplamiento, mientras que un desplazamiento δ_2 entre las microlentes, no afecta significativamente la eficiencia de acoplamiento.

III.6.3 Eficiencia de acoplamiento para un desplazamiento transversal en el eje x

Para obtener la eficiencia de acoplamiento cuando se presenta un desplazamiento transversal δ_x en el $eje\ x$, como se muestra en la Figura 3.5 Caso 2. Se realizo un programa en Maple (Anexo 9), en el cual se añade un desplazamiento δ_x a la onda electromagnética de la salida. Para este programa se asume que el radio de curvatura del frente de onda en la salida es plano, es decir $R_1 \to \infty$, además de que los tamaños de spot tanto en la entrada como en la salida son iguales, es decir $w_0 = w_1$.

La expresión para la eficiencia de acoplamiento que modela el caso en que se presenta un desplazamiento δ_x transversal en el $eje\ x$ es la que se muestra a continuación.

$$NU := \left(e^{\left(-1/2 \frac{\Re(deltax^2)}{w0\sim^2} \right)} \right)^2 \tag{3.20}$$

Siendo δ_x, el desplazamiento transversal en el $eje\ x$. La gráfica que se obtiene para diferentes desplazamiento en el $eje\ x$ para la fibra óptica en la salida del sistema se muestra en la Figura 3.10, la cual tiene pasos de $2\ \mu m$.

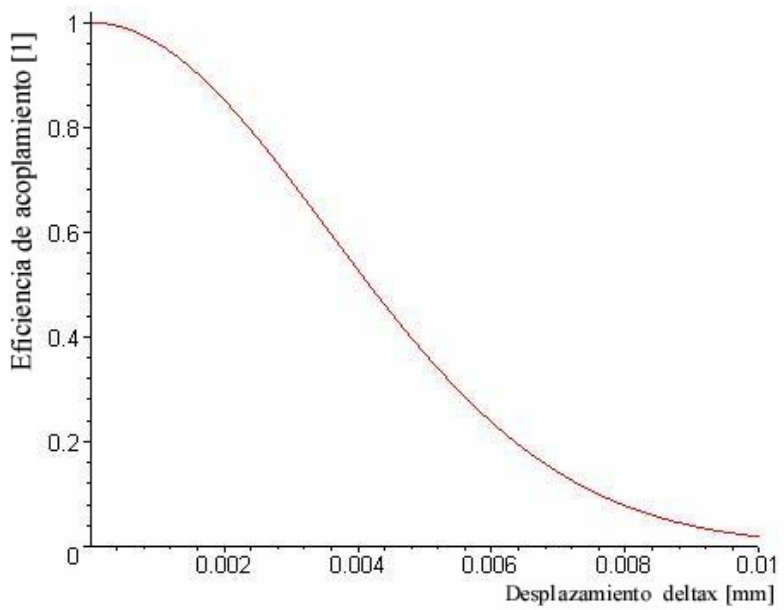


Figura 3.10 Gráfica cuando se presenta un desplazamiento transversal en el eje x.

III.6.4 Eficiencia de acoplamiento para un desplazamiento transversal tanto en el eje x y en el eje y

Para obtener la eficiencia de acoplamiento en el caso en que se presenta un desplazamiento transversal tanto en el $eje\,x$ y $eje\,y$, se realizo un programa en Maple (Anexo 10). En el programa se añade un desplazamiento δ_x en el $eje\,x$ y un desplazamiento δ_y en el $eje\ y$ a la onda de salida, obteniéndose la siguiente expresión de la eficiencia de acoplamiento. En este caso también se asumió que se tiene un radio de curvatura del frente de onda plano, es decir $R_1 \to \infty$ y que los tamaños de los spot en la entrada y salida son iguales.

$$NU := \left(e^{\left(-1/2 \frac{\Re(deltax^2 + deltay^2)}{w0\sim^2} \right)} \right)^2 \tag{3.21}$$

Siendo δ_x el desplazamiento transversal en el *eje x* (horizontal) y δ_y el desplazamiento transversal en el *eje y* (vertical), de la onda de salida.

Como la eficiencia de acoplamiento esta en función de dos desplazamientos, para observar su comportamiento se establece el valor de $\delta x = 2\mu m$ para observar el comportamiento de esta condición al ir variando δ_y en pasos de $2\mu m$ como se muestra en la Figura 3.11.

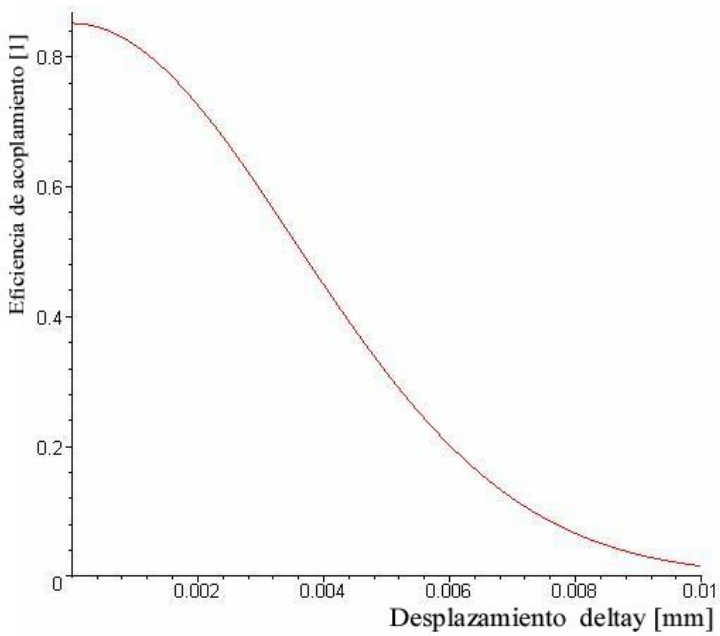


Figura 3.11 Gráfica cuando se presenta un desplazamiento en el eje y.

III.6.5 Eficiencia de acoplamiento para un desplazamiento longitudinal en el eje z, además de un desplazamiento angular

El último caso en estudio es el más completo ya que se considera un desplazamiento longitudinal δ_1 en el *eje z* y simultáneamente un desplazamiento angular de α. Para obtener la expresión bajo esta condición se realizo un programa en Maple (Anexo 11). Para la obtención de la eficiencia de acoplamiento primero se sustituyo la rotación de ejes en el campo de salida con lo que se obtiene η en función de w_1 *y* R_1. Después se sustituyen los valores de w_1 *y* R_1, del caso cuando sólo se tiene un desplazamiento longitudinal.

Finalmente se obtiene la siguiente expresión para la eficiencia de acoplamiento con la microlente de $900\,\mu m$, la cual resulta en términos del desplazamiento δ_1 y del desplazamiento angular α. Para dejar la expresión en función del desplazamiento angular α se asume que $\delta_1 = 0$, resultando la siguiente expresión.

$$NU := \frac{238456.2355\,\cos(\alpha)}{\sqrt{0.1421534409\;10^{11}\cos(\alpha)^4 + 0.2843068814\;10^{11}\cos(\alpha)^2 + 0.1421534407\;10^{11}}} \tag{3.22}$$

Para observar el comportamiento bajo esta condición se establecen valores de δ_1 y se gráfica su comportamiento al ir variando el ángulo. La Figura 3.12 muestra las gráficas para cuando se establecen los desplazamientos $\delta_1 = 0, 1, 2, 5\ y\ 7\ \mu m$, y se varía el ángulo. La gráfica que se muestra es para la microlente de $900\ \mu m$ con pasos de $200\ \mu m$.

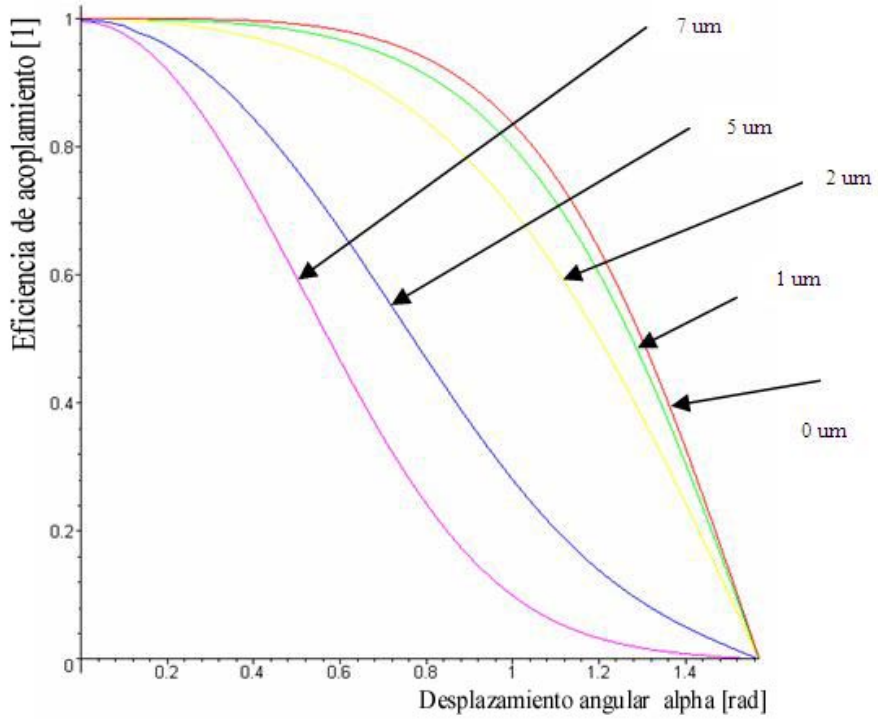


Figura 3.12 Gráfica cuando se presenta un desplazamiento longitudinal δ_1 en el eje z y un desplazamiento angular α.

En la Tabla 3.14 se presenta la eficiencia de acoplamiento asumiendo $\delta_1 = 0$, para cuando se tiene un desplazamiento angular de $\alpha = 0$ y $\alpha = 0.4$ rad .

ROC [μm]	η con $\alpha = 0$	η con $\alpha = 0.4$
330	0.9435215884	0.9445399723
900	0.9999999995	0.9966286926

Tabla 3.14 Valores de la eficiencia de acoplamiento para $\alpha = 0$ y $\alpha = 0.4$.

De acuerdo a la eficiencia de acoplamiento para este caso en particular se observa que la microlente $900\ \mu m$ tiene mejor acoplamiento y es menos sensible que la microlente de $330\ \mu m$ para un desplazamiento angular.

En la programación de los Casos 2 y 3 se asume que $w_0 = w_1$ y $R_1 \to \infty$, mientras que para los Casos 1 y 4 se considero que $w_0 \neq w_1$ y $R_1 \neq \infty$.

Capítulo IV

Diseño Final del conmutador OXC

En este capítulo se mostrará el diseño final para el conmutador OXC, incluyendo las dimensiones finales de los dispositivos ópticos (microlentes y microespejos), con los que quedará compuesto el conmutador óptico final. Para el diseño final nos apoyaremos en las simulaciones que se realizarán en OSLO para el sistema base. También se emplearan los resultados que se obtuvieron de los diferentes programas que se realizaron en MAPLE durante las diferentes etapas de diseño.

En este Capítulo se realizará un análisis para identificar las aberraciones que se presentan en el conmutador OXC, este análisis permitirá una posible mitigación de las aberraciones que se encuentren presentes en el diseño final. La disminución de las aberraciones en el sistema óptico final permitirá obtener un sistema óptimo con el cual se podrá capturar la mayor cantidad de luz en la salida del sistema.

IV.1 Simulaciones en OSLO

Para la simulación del sistema base se empleo un programa denominado OSLO el cual es un programa que permite la simulación de sistemas ópticos. OSLO es un programa muy sencillo de manejar ya que por un lado se introducen los datos de los diferentes elementos ópticos a manera de renglones (superficies) y en otra ventana se va formando el sistema que se va introduciendo.

La captura de los datos de los elementos ópticos y la representación del sistema resultante se muestra en la Figura 4.1. Los datos para cada elemento óptico que se deben de introducir para formar el sistema son el radio de curvatura, espesor o distancia de un elemento a otro, radio de abertura y el tipo del material para el caso de las microlentes.

En la Figura 4.1 se muestra la forma en que OSLO captura los diferentes elementos ópticos de los cuales se compone el sistema base del conmutador OXC. En la Tabla de la Figura 4.1 se muestran los datos para cuando el sistema base es diseñado con la microlente de $900\ \mu m$, también se muestra el esquema del sistema.

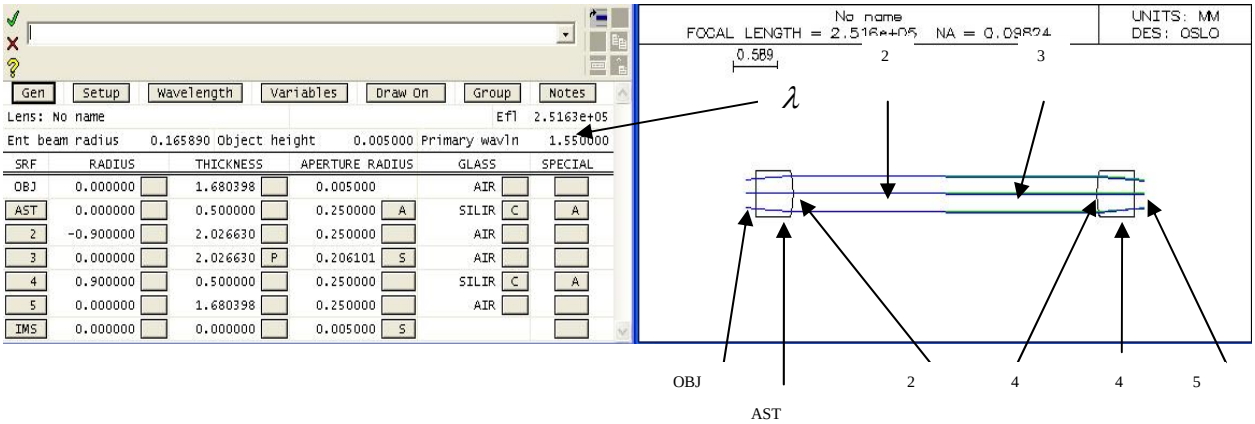


Figura 4.1 Captura y sistema base del conmutador OXC en OSLO.

En la Figura 4.2 se muestra el esquema del sistema base que se utilizo para las diferentes etapas del diseño del conmutador OXC. La razón de colocar 2 veces $d2$, es para asumir que el sistema es simétrico, pudiendo concluir que $d1 = d3$.

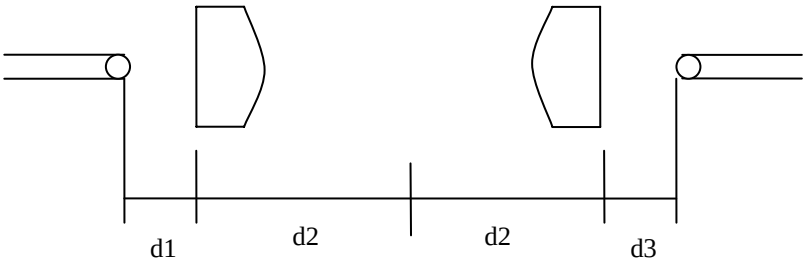


Figura 4.2 Esquema del sistema base para el conmutador OXC.

Con las distancias óptimas del sistema base que se obtuvieron en el Capítulo III, las cuales se muestran en la Tabla 4.1. Se procede a introducirlas en OSLO como puntos de partida para las simulaciones. También se introducen las características propias de las microlentes, el tamaño del spot $w_0 = 5\ \mu m$ y la longitud de onda de trabajo $\lambda = 1.55\ \mu m$.

$ROC\ [\mu m]$	$d1\ [mm]$	$d2\ [mm]$
330	0.3272216803	3.40799
900	1.680399038	2.02663

Tabla 4.1 Distancias óptimas para el sistema base, en Maple.

Ya con todos los datos introducidos de los diferentes elementos ópticos que integran el sistema base, además de haber elegido el índice de refracción para cada microlente se procede a simular el sistema. Para las simulaciones el programa (OSLO) hace las modificaciones en $d1$ y $d2$. Las modificaciones que OSLO hace a $d1$ y $d2$ es para asegurar una imagen en la salida del sistema con magnificación de 1. Después de realizar las simulaciones para las dos posibles microlentes que se podrían emplear para el diseño final del conmutador se obtuvieron las distancias óptimas las que se muestran en la Tabla 4.2.

$ROC\,[\mu m]$	$d1\ [mm]$	$d2\ [mm]$
330	0.3272232653292	3.40799
900	1.6803982010747	2.02663

Tabla 4.2 Distancias óptimas para el sistema base, en OSLO.

La simulación para cuando se utiliza la microlentes de $900\,\mu m$, se muestra en la Figura 4.1, en la cual se observan los datos del sistema, su representación esquemática y los rayos paraxiales al atravesar las diferentes superficies del sistema base.

Durante la captura de los datos en OSLO para la simulación del sistema óptico se aseguro que la distancia $d2$ fuera la misma tal como se observa en las Tablas de Maple y OSLO. Al ajustar OSLO la $d1$ para obtener una imagen de 1 se observa que esta no es modificada considerablemente con respecto a los valores obtenidos en Maple.

En la Tabla 4.3 se muestran las distancias $d1$ obtenidas en OSLO y en Maple, pudiéndose también observar el porcentaje de error entre las dos mediciones.

$ROC\,[\mu m]$	$d1[mm]$ En Maple	$d1[mm]$ En OSLO	$\%\ Error$
330	0.3272216803	0.3272232653292	0.0004843811078
900	1.680399038	1.6803982010747	0.00004980959767

Tabla 4.3 Comparación de las distancia d1, en Maple y OSLO

A continuación se realizara un análisis detallado para cada una de las microlentes posibles con las que se podrá llevar a cabo el diseño final del conmutador OXC de 4×4 en espacio libre empleando microespejos MEMS. Las simulaciones que se presentaran son cuando en el sistema no se presenta ningún desplazamiento; cuando se tiene un desplazamiento δ_1 en la fibra óptica de salida y cuando se tiene un desplazamiento δ_2 entre las dos microlentes.

Además se obtendrán las pérdidas de Fresnel $\Gamma_{fresnel}$ debidas a la transmitividad de la luz por las diferentes superficies del sistema base y las pérdidas debidas a la abertura Γ_T, en cada una de las superficies de las cuales esta compuesto el sistema base.

IV.2 Simulación en OSLO para el sistema base empleando la microlente de $330\ \mu m$

IV.2.1 Simulación del sistema base sin desplazamiento

En la Figura 4.3 se presenta la simulación del sistema base con las distancias $d1\ y\ d2$ óptimas, sin desplazamiento. En esta se muestra los datos del sistema, el tamaño del spot y radio de curvatura en cada una de las superficies del sistema, así como las gráficas de las aberraciones que se presentan en el sistema bajo la microlente en estudio. También se observa los rayos paraxiales al pasar por las distintas superficies del sistema óptico.

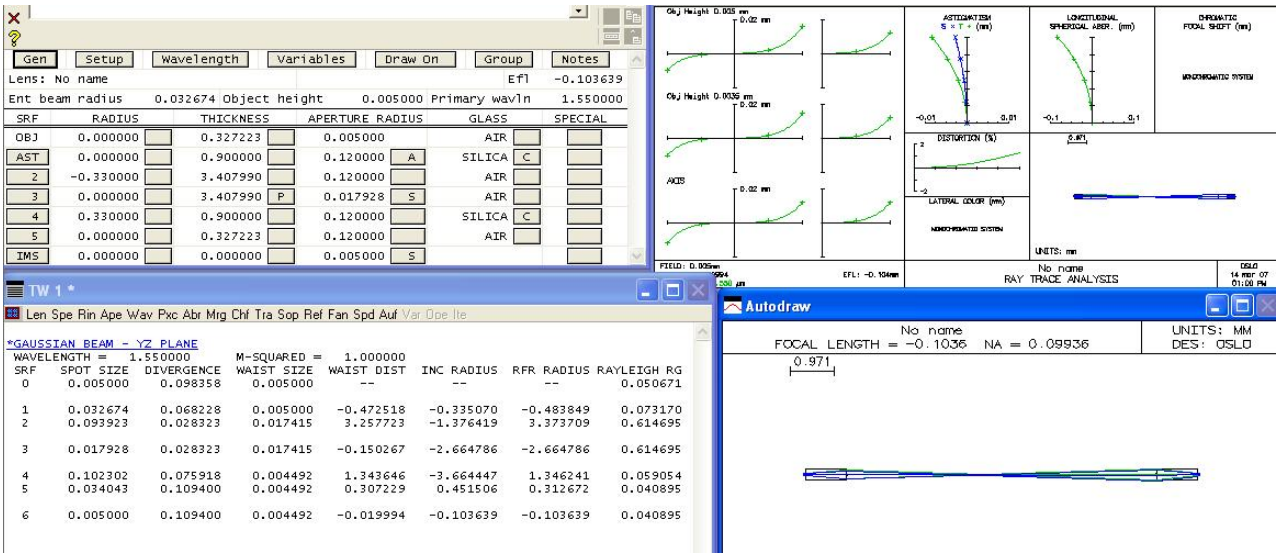


Figura 4.3 Simulación del sistema base con la microlente de $330\ \mu m$ sin desplazamiento.

Para observar mejor las aberraciones presentes en el sistema base se presentan estas en la Figura 4.4. De acuerdo a las gráficas el tipo de aberración que se presenta en el sistema óptico con la microlente $330\ \mu m$ es una aberración esférica la cual se representa como una curva cúbica.

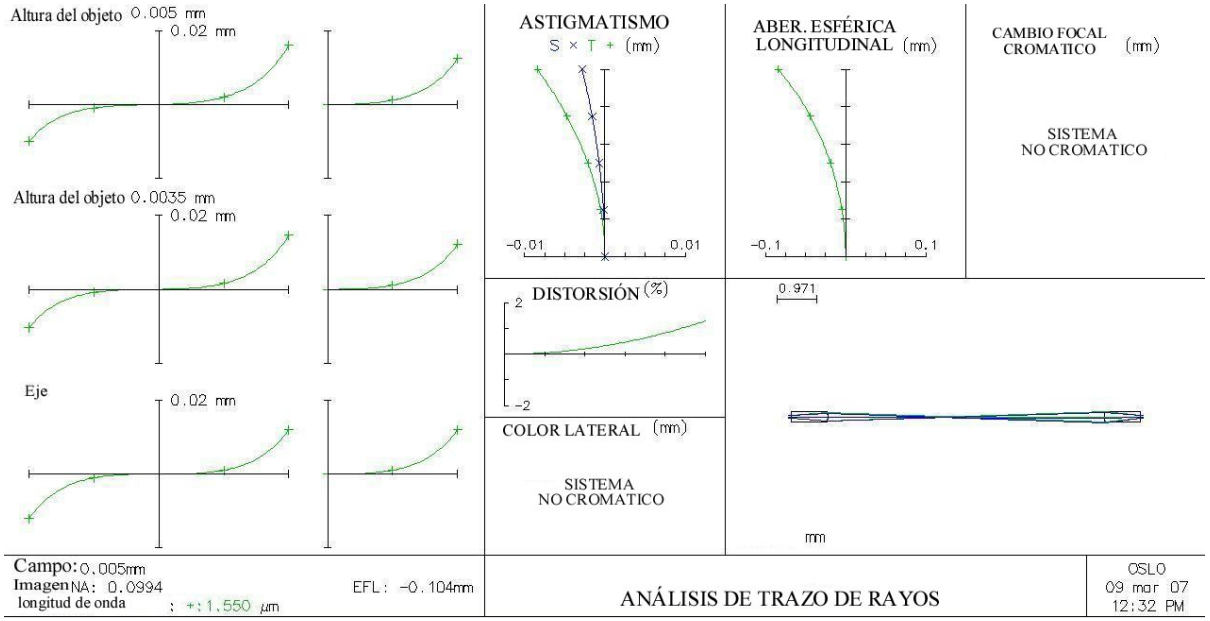


Figura 4.4 Aberraciones del sistema óptico base con la microlente de $330\ \mu m$, sin desplazamiento.

Para lograr disminuir la aberración esférica que se presente en este sistema en particular, se debe de disminuir la distancia $d2 \approx 3.23799\ mm$. La disminución en la distancia $d2$ hará que la curva cúbica sea más plana en su parte central, con lo que se lograría disminuir tal aberración. Y las curvas en la gráfica de ASTIGMATISMO se asemejaran lo más posible a líneas rectas como se muestra en la Figura 4.5.

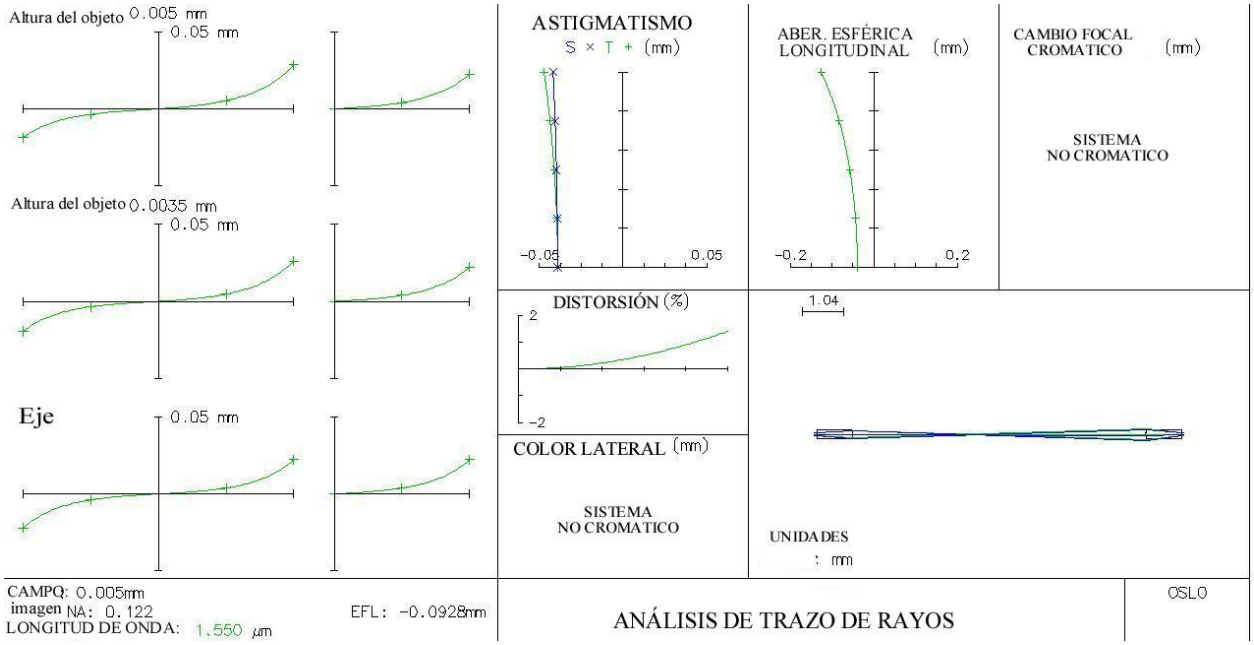


Figura 4.5 Disminución de la aberración del sistema óptico base con la microlente de $330\ \mu m$.

En la figura 4.6 se muestran las superficies en las cuales se requiere obtener el tamaño del spot para poder calcular las pérdidas debidas a la abertura en la siguiente sección, estos datos son tomados de la simulación de OSLO, además de que son calculados en Maple por medio de las matrices de translación.

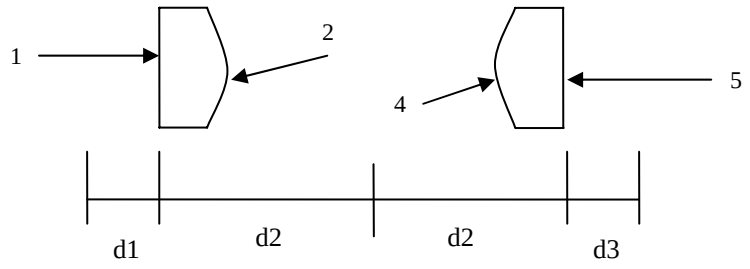


Figura 4.6 Superficies en las que nos interesa el tamaño del spot de acuerdo a OSLO.

En la Tabla 4.4 se presenta el tamaño del spot en las superficies de interés para el cálculo posterior de las pérdidas que se presentan al pasar la luz por las aberturas de las diferentes superficies que conforman el sistema base.

Sup.	w en OSLO	w en Maple
1	0.032674	0.03267378374
2	0.0939223	0.09392281036
4	0.102302	0.1023018611
5	0.034043	0.03404504405

Tabla 4.4 Tamaños de spot en las superficies de interés en OSLO y Maple para microlente $330\ \mu m$.

IV.2.2 Cálculo de las pérdidas debidas al paso de la luz por las superpies circulares de las microlentes

Para obtener las pérdidas Γ_T, debidas a la abertura de las superficies circulares de las microlentes con $r = 120\ \mu m$, se emplean los tamaños de spot de la Tabla 4.4. Con los tamaños de spot y con el programa de un haz Gaussiano para una superficie circular (Anexo 3), se obtienen las pérdidas debidas a la abertura de las microlentes, las cuales se muestran en la Tabla 4.5.

Sup.	w en OSLO	Γ_T
1	0.032674	1.000000000
2	0.0939223	0.9617949845
4	0.102302	0.9361900866
5	0.034043	1.000000000

Tabla 4.5 Pérdidas debidas a la abertura de las superficies circulares de las microlentes, para la microlente de $330\ \mu m$.

Al multiplicar todas las pérdidas debidas a la apertura de las superficies circulares, se obtienen las pérdidas en su conjunto que resultan ser de 0.9004229298

Las pérdidas debidas a la abertura de las microlentes circulares en dB son $0.4555345397\ dB$.

IV.2.3 Cálculo de las pérdidas de Fresnel

Las pérdidas de Fresnel por transmitividad se calcularan en cada uno de los cambios de fase que presenta la propagación de la luz a través del sistema base, como se puede observar en la Figura 4.7.

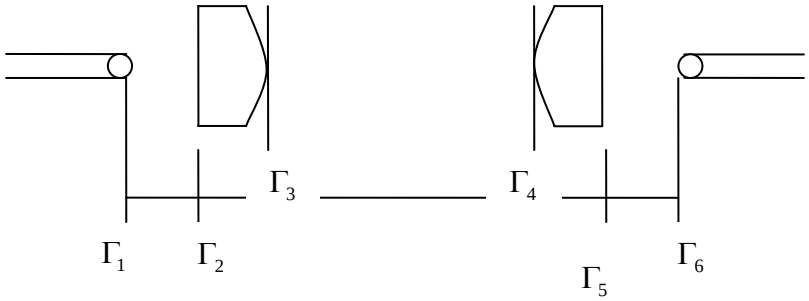


Figura 4.7 Para obtener las pérdidas de Fresnel.

Después de identificar los 6 cambios de fase y por consiguiente las 6 pérdidas de Fresnel debidas al cambio de medio, se realizo un programa en Maple (Anexo 12). Para obtener las pérdidas de Fresnel se programo la transmitividad en los diferentes cambios de medio que la luz sufre durante todo su recorrido por el sistema base.

La ecuación (4.1) muestra como se calcularon las pérdidas de Fresnel. Esta ecuación proporciona el resultado de las pérdidas en dB, las cuales al ser sumadas a las perdidas por la abertura circular de las microlentes se obtendrá el total de las pérdidas que se presentan en el sistema.

$$\Gamma_{fresnel} = -10 * \log 10(1-r) \tag{4.1}$$

Siendo $(1-r)$ la transmitividad y $r = \left(n1 - n2 \big/ n1 + n2 \right)^2$ la reflectividad.

Los índices de transmisión que se utilizaron fueron los siguientes $n_F = 1.4682$, $n_L = 1.444024$ y $n_A = 1$, siendo los índices de transmisión de la fibra óptica, de la microlente y del aire respectivamente.

Por ejemplo si se quiere calcular Γ_3 que es la pérdida de Fresnel lente-aire, la reflectividad quedara establecida como $r = \left(n_L - n_A \big/ n_L + n_A \right)^2$.

Por lo que al sumar las 6 pérdidas de Fresnel correspondientes a los 6 cambios de medio que sufre la luz durante su viaje a través de sistema base, se obtienen las pérdidas de Fresnel en su conjunto siendo estas $0.9013708950\ dB$.

Para obtener las pérdidas totales que presenta el sistema diseñado con la microlente de $330\ \mu m$, se realiza la suma de las pérdidas debidas a las aberturas de las microlentes circulares que son de $0.4555345397\ dB$ y las pérdidas de Fresnel $0.9013708950\ dB$. Por lo tanto las pérdidas totales que se presentan en el sistema base empleando la microlente de $330\ \mu m$ son de $1.356905435\ dB$.

IV.2.4 Simulación del sistema base con un desplazamiento δ_1 en la fibra de salida

Después de haber hecho el análisis del sistema cuando no se presenta ningún desplazamiento, se procede a realiza el análisis cuando en el sistema se presenta un desplazamiento δ_1 en la fibra de salida, esto para obtener las tolerancias de desplazamiento que el sistema podrá admitir sin sufrir pérdidas significativas.

Para este análisis se fueron realizando incrementos de δ_1, para desplazar la fibra óptica de salida de su posición original, el desplazamiento δ_1 se muestra en la Figura 4.8. Los desplazamientos se fueron haciendo de micra en micra para obtener el tamaño del spot w_1 y el radio de curvatura del frente de onda R_1, en la superficie de la fibra óptica de salida para cada uno de los desplazamientos efectuados.

Con los valores de w_1 y R_1 para los diferentes desplazamientos en la fibra óptica de salida, se obtuvo la eficiencia de acoplamiento mediante la ecuación (3.11), que es la ecuación que permite obtener la eficiencia de acoplamiento al proporcionarle los valores de w_1 y R_1. El valor de δ_1 se incrementa hasta obtener una eficiencia de acoplamiento de 0.5 que equivale a una pérdida de $3dB$, siendo esta la menor pérdida que se desea para que el sistema sea confiable.

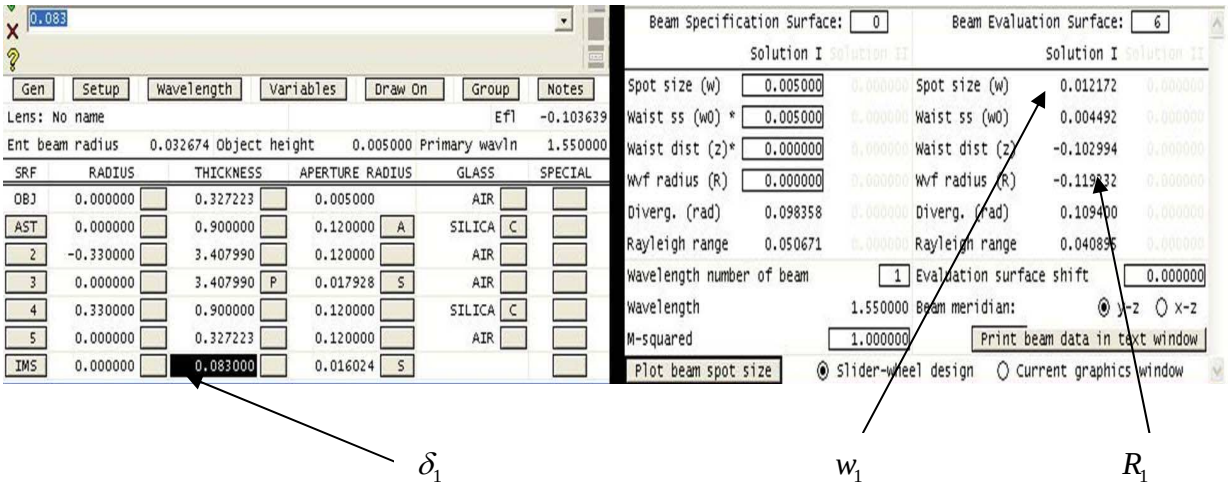


Figura 4.8 Obtención de los valores de w_1 y R_1 cuando el sistema base presenta un desplazamiento δ_1 en la fibra de salida, empleando la microlente de $330\ \mu m$.

Con los puntos obtenidos tanto del desplazamiento δ_1 y la eficiencia de acoplamiento η, se realiza la gráfica correspondiente, la cual se muestra en la Figura 4.9. En la cual se observan las gráficas en Maple y OSLO para cuando se presenta un desplazamiento δ_1 en la fibra óptica de salida.

La gráfica con línea continua representa los resultados de Maple y la gráfica con cuadrados representa los resultados de OSLO, teniendo esta pasos de $20\ \mu m$. En la gráfica también se muestra la aproximación mediante la serie de Taylor.

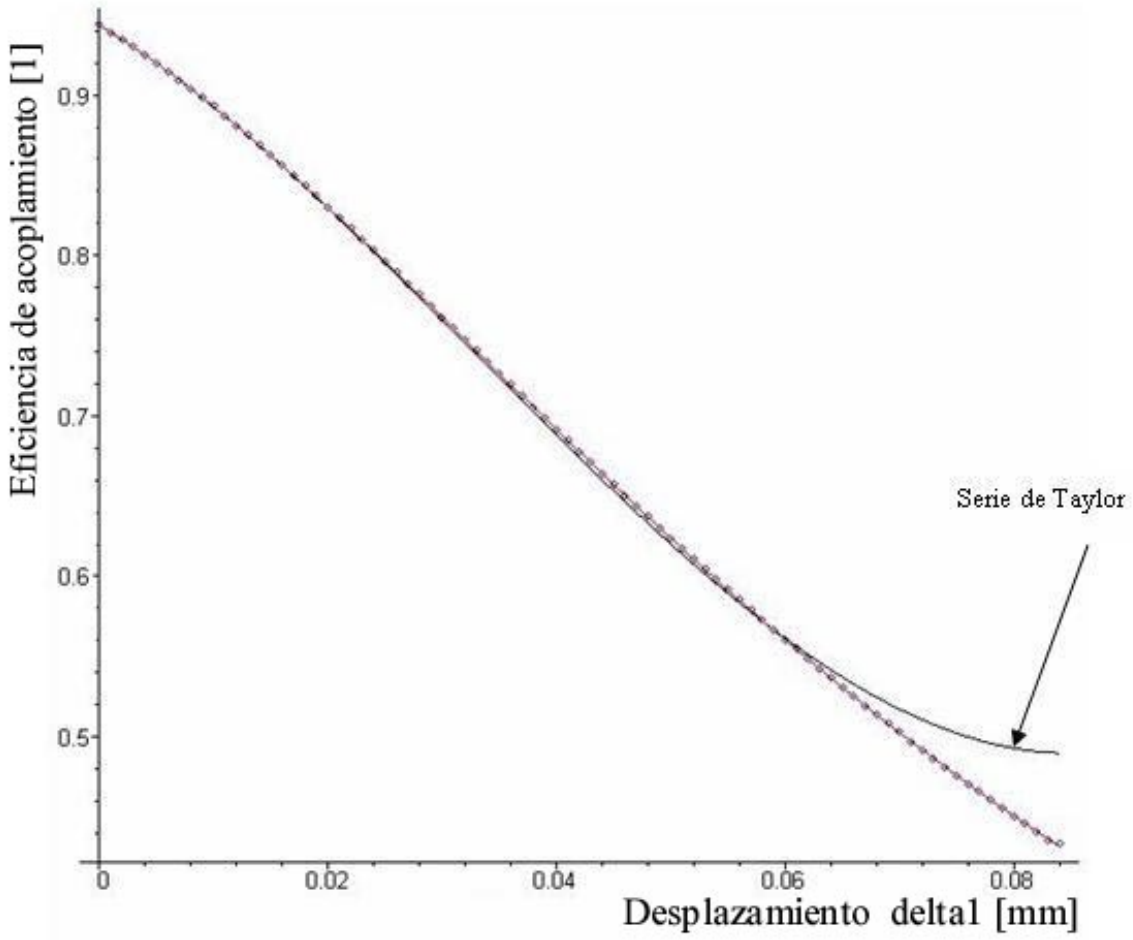


Figura 4.9 Gráfica en OSLO y Maple cuando en el sistema base se presenta un desplazamiento δ_1 en la fibra óptica de salida, empleando la microlente de $330\ \mu m$.

IV.2.5 Simulación de sistema base con desplazamiento δ_2 entre las microlentes

Por último se realiza la simulación cuando en el sistema base se presenta un desplazamiento δ_2, entre las microlentes. Para esta simulación se fueron realizando incrementos en δ_2, para desplazar las dos microlentes de su posición original, el desplazamiento δ_2 se ubica entre las microlentes como se muestra en la Figura 4.10. Los desplazamientos se fueron realizando de micra en micra para obtener el tamaño del spot w_1 y el radio de curvatura del frente de onda R_1, en la superficie de la fibra óptica de salida para cada uno de los desplazamientos efectuados.

Ya con los valores de w_1 y R_1 para los diferentes desplazamientos entre las microlentes, se obtiene la eficiencia de acoplamiento mediante la ecuación (3.11), que es la ecuación que permite obtener la eficiencia de acoplamiento al proporcionarle los valores de w_1 y R_1. El valor de δ_2 se incrementa hasta obtener una eficiencia de acoplamiento de 0.5 que equivale a una pérdida de $3dB$, siendo esta la menor pérdida que se desea para que el sistema sea confiable.

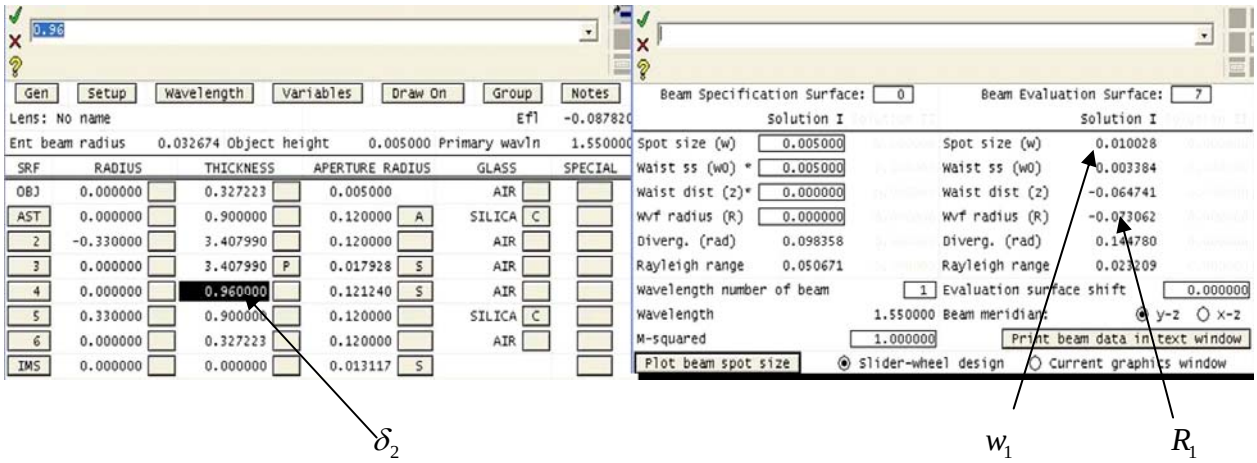


Figura 4.10 Obtención de los valores de w_1 y R_1 cuando el sistema base presenta un desplazamiento δ_2 entre las microlentes, empleando la microlente de $330\ \mu m$.

Con los puntos obtenidos tanto del desplazamiento δ_2 y la eficiencia de acoplamiento η, se realiza la gráfica para la condición en que se presenta un desplazamiento δ_2 entre las microlentes, la cual se muestra en la Figura 4.11. En la cual se observan las gráficas de Maple y OSLO para cuando se tiene un desplazamiento δ_2 entre las microlentes.

La gráfica con línea continua representa los resultados de Maple y la gráfica con cuadrados representa los resultados de OSLO, teniendo esta pasos de $200\ \mu m$. También se muestra una aproximación mediante la serie de Taylor.

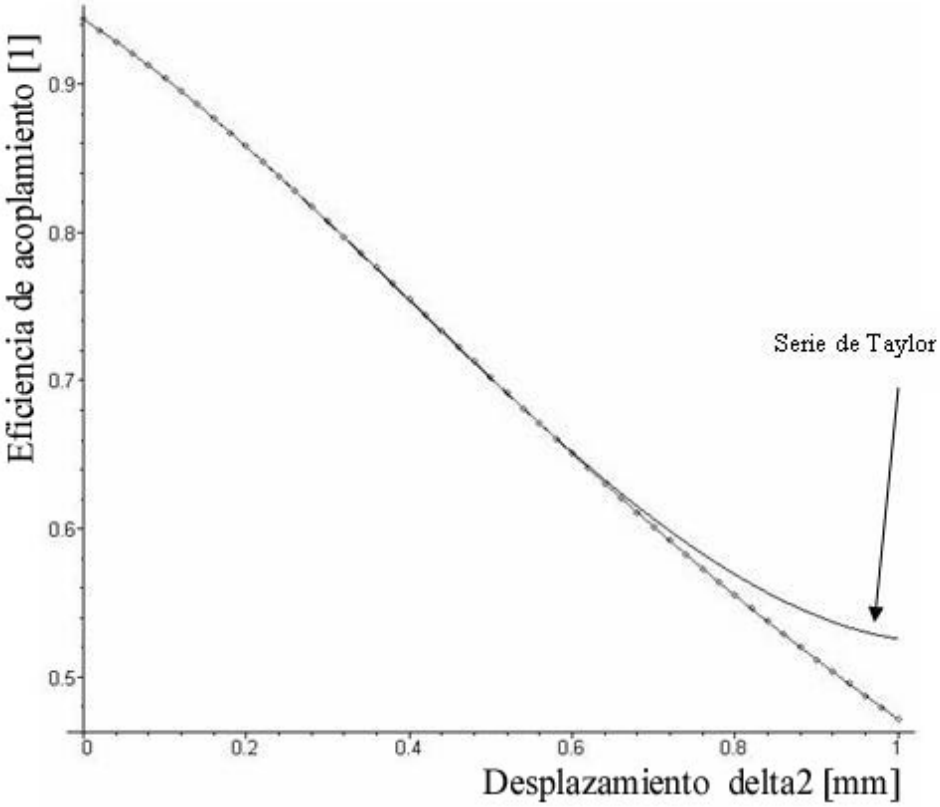


Figura 4.11 Gráfica en OSLO y Maple cuando en el sistema base se presenta un desplazamiento δ_2 entre las microlentes, empleando la microlente de $330\ \mu m$.

En la Tabla 4.6 se muestra una recopilación de los resultados obtenidos para cuando el sistema base es analizado con la microlente de $330\ \mu m$, con $n_L = 1.444024$.

	MAPLE	OSLO
$d1\ [mm]$	0.3272216803	0.3272232653292
$d2\ [mm]$	3.40799	3.40799
$\delta_1(\eta = 0.5)\ [\mu m]$	70	70
$\delta_2(\eta = 0.5)\ [\mu m]$	920	920
$\Gamma_T\ \ \sup.cir.$	0.9004229298	
$\Gamma_T\ [dB]$	0.4555345397	
$\Gamma_{Fresnel}\ \ [dB]$	0.9013708950	
$\Gamma_{TOTAL}\ [dB]$	1.356905435	

Tabla 4.6 Recopilación de los resultados para cuando el sistema base se analiza con la microlente de $330\ \mu m$.

En la Tabla 4.6 se muestran las distancias $d1$ y $d2$ óptimas, también se puede observar que la eficiencia de acoplamiento cae a 0.5, cuando se tiene un desplazamiento de $\delta_1 = 70\ \mu m$ y $\delta_2 = 920\ \mu m$ respectivamente, que son las tolerancias que se pueden tener para obtener en el sistema pérdidas de $3\,dB$, las que son aceptable para tener un sistema óptimo en cuanto a la luz que puede acoplarse en la salida del mismo.

También se observa que las perdidas debidas a Fresnel y a la abertura de las superficies circulares son de 1.356905435 dB similares a las pérdidas que se esperaban.

IV.3 Simulación en OSLO para el sistema base empleando la microlente de $900\ \mu m$

IV.3.1 Simulación del sistema base sin desplazamiento

En la Figura 4.12 se muestra la simulación del sistema base con las distancias $d1$ y $d2$ óptimas, sin desplazamiento, en esta se muestra los datos del sistema, el tamaño del spot y radio de curvatura en cada una de las superficies del sistema, así como las gráficas de las aberraciones que se presentan en el sistema con la microlente de $900\ \mu m$.

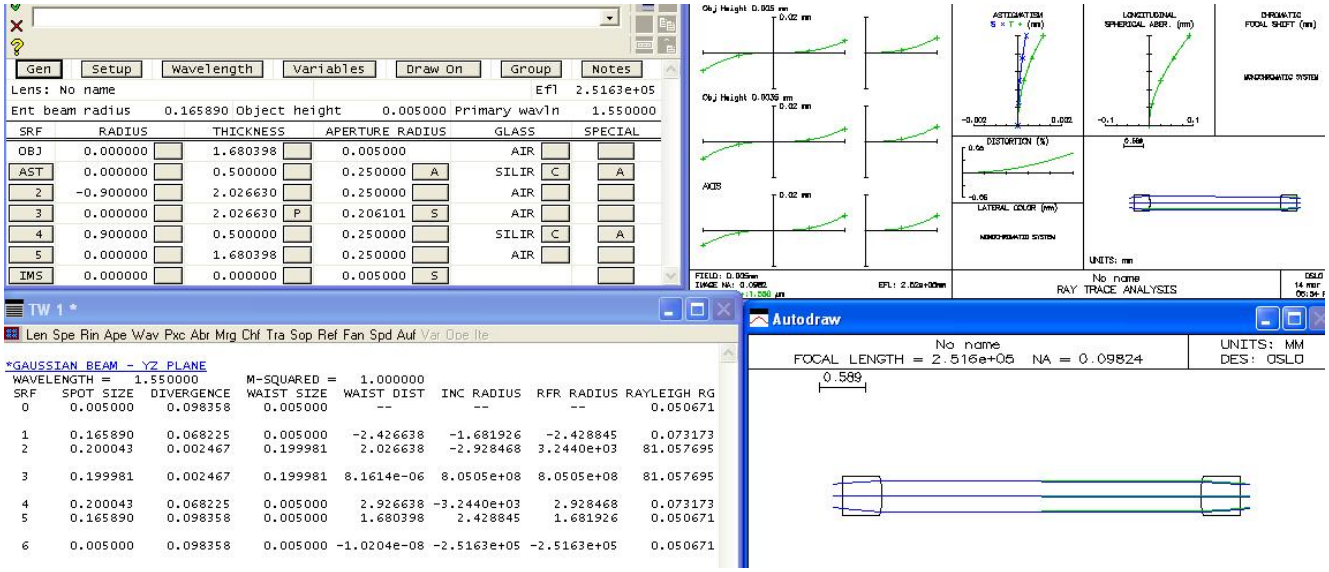


Figura 4.12 Simulación del sistema base con la microlente de $900\ \mu m$ sin desplazamiento.

En la Figura 4.13 se muestran las aberraciones presentes en el sistema base sin desplazamiento. Al observar las gráficas de la Figura 4.13 la aberración que se logra identificar en el sistema es la aberración esférica.

Para lograr disminuir la aberración esférica que se presente en este sistema en particular, se debe de incrementar la distancia $d2 \approx 2.72663\,mm$. El incremento de la distancia $d2$ hará que la curva cúbica sea más plana en su parte central, con lo que se lograría disminuir tal aberración.

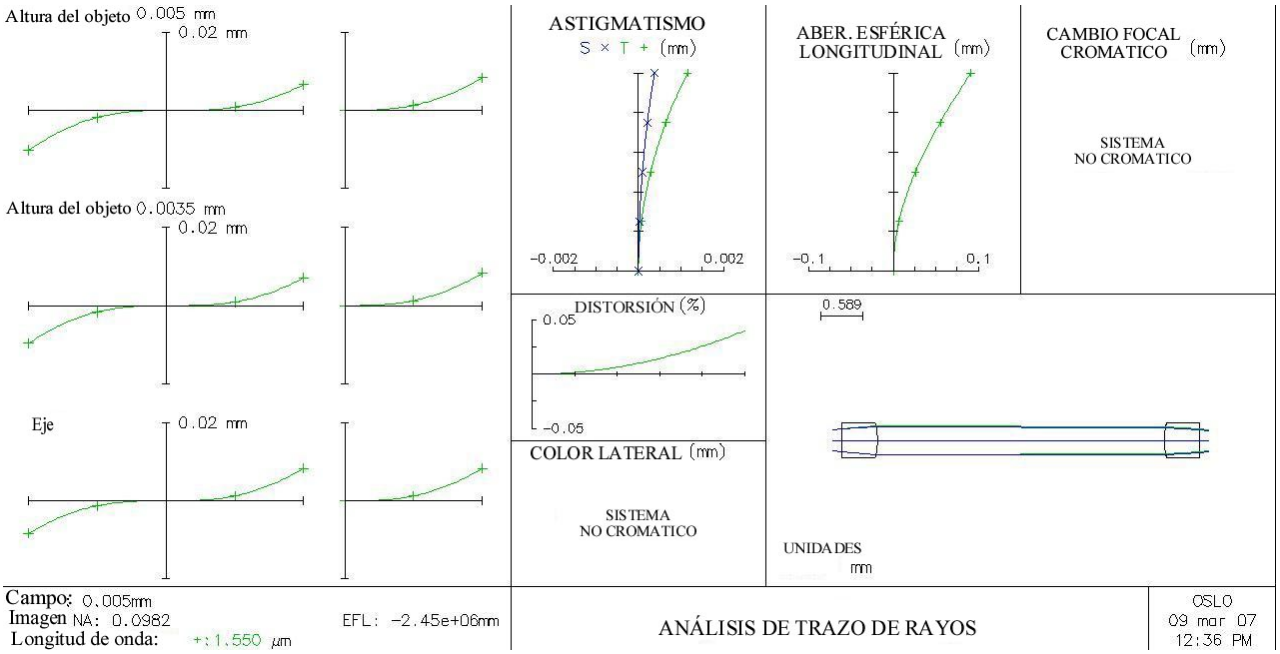


Figura 4.13 Aberraciones del sistema óptico con la microlente de $900\ \mu m$ sin desplazamiento.

El tamaño del spot se obtiene en las mismas superficies de la Figura 4.6, es decir en las superficies 1, 2, 4 y 5 para la simulación de OSLO. El tamaño del spot se emplea para calcular las pérdidas debidas a la abertura de las microlentes. Los tamaños del spot son tomados de la simulación de OSLO además de ser calculados en Maple por medio de las matrices de translación.

En la Tabla 4.7 se presentan el tamaño del spot en las superficies de interés para el cálculo posterior de las pérdidas que se presentan al pasar la luz por las aberturas de las superficies circulares de las microlentes.

Sup.	w en OSLO	w en Maple
1	0.165890	0.1658905322
2	0.200043	0.2000432617
4	0.200043	0.2000432600
5	0.165890	0.1658905381

Tabla 4.7 Tamaños de spot para las superficies de interés en OSLO y Maple, para microlente $900\ \mu m$.

IV.3.2 Cálculo de las pérdidas debidas al paso de la luz por las superpies circulares de las microlentes

Las pérdidas Γ_T, debidas a la abertura de las superficies circulares de las microlentes, para este caso se obtuvieron tanto para un radio de $r = 250\ \mu m$ y $r = 400\ \mu m$. La obtención de estas pérdidas se realiza empleando los tamaños de spot de la Tabla 4.7 y el programa de un haz Gaussiano para una superficie circular (Anexo 3). Las pérdidas debidas a la abertura de las superficies circulares de las microlentes se presentan en la Tabla 4.8.

Sup.	w en OSLO	Γ_T con $r = 250\mu m$	Γ_T con $r = 400\mu m$
1	0.165890	0.9893504219	0.9999910882
2	0.200043	0.9560040056	0.9996633818
4	0.200043	0.9560040056	0.9996633818
5	0.165890	0.9893504219	0.9999910882

Tabla 4.8 Pérdidas debidas a la abertura de las superficies circulares de las microlentes, para la microlente de $900\ \mu m$.

Al multiplicar todas las pérdidas debidas a la abertura de las superficies circulares, se obtienen la pérdidas en su conjunto para $r = 250\ \mu m$ siendo estas de 0.8945810836

Mientras que para el radio de $r = 400\ \mu m$ las pérdidas debidas a las aberturas circulares de las microlentes son de 0.9993090654

Las pérdidas en dB son de $0.4838028946\ dB$ y $0.0030017279\ dB$ para los radios de $r = 250\ \mu m$ y $r = 400\ \mu m$ respectivamente.

IV.3.3 Cálculo de las pérdidas de Fresnel

Al calcular las pérdidas de Fresnel por transmitividad en cada uno de los cambios de fase por los cuales se propaga la luz a través del sistema base mediante la ecuación (4.1), y al sumarse estas se obtiene que las pérdidas totales de Fresnel son de $0.9015042208\ dB$, considerando los índices de transmisión siguientes $n_F = 1.4682$, $n_L = 1.444085$ y $n_A = 1$.

Al realizar la suma de las pérdidas de Fresnel con las pérdidas de abertura de las microlentes se obtienen los valores de las pérdidas totales para cuando el sistema base es analizado con la microlente de $900\ \mu m$, siendo estas $1.385307115\ dB$ y $0.90450559488\ dB$ para los radios de $r = 250\ \mu m$ y $r = 400\ \mu m$ respectivamente.

IV.3.4 Simulación de sistema base con un desplazamiento δ_1 en la fibra de salida

Para realizar la simulación en el caso en que se presenta un desplazamiento δ_1, en la fibra de salida se van realizando desplazamiento de δ_1 en la fibra de salida. Los desplazamientos se realizan de micra en micra para obtener el tamaño del spot w_1 y el radio de curvatura del frente de onda R_1, en la superficie de la fibra óptica de salida. Los desplazamientos en δ_1 se llevan acabo hasta que se tenga una eficiencia de acoplamiento de 0.5, que es donde se presenta una pérdida de $3\,dB$ debido al desplazamiento. Para obtener las eficiencia de acoplamiento los valores del tamaño del spot w_1 y el radio de curvatura del frente de onda R_1 se sustituyen en la ecuación general de la eficiencia de acoplamiento (3.11). Obteniéndose los valores del desplazamiento δ_1 y la eficiencia de acoplamiento para tal desplazamiento.

El desplazamiento δ_1 es mostrado en la Figura 4.14, al igual que el tamaño del spot w_1 y el radio de curvatura del frente de onda R_1, en la superficie de la fibra óptica de salida.

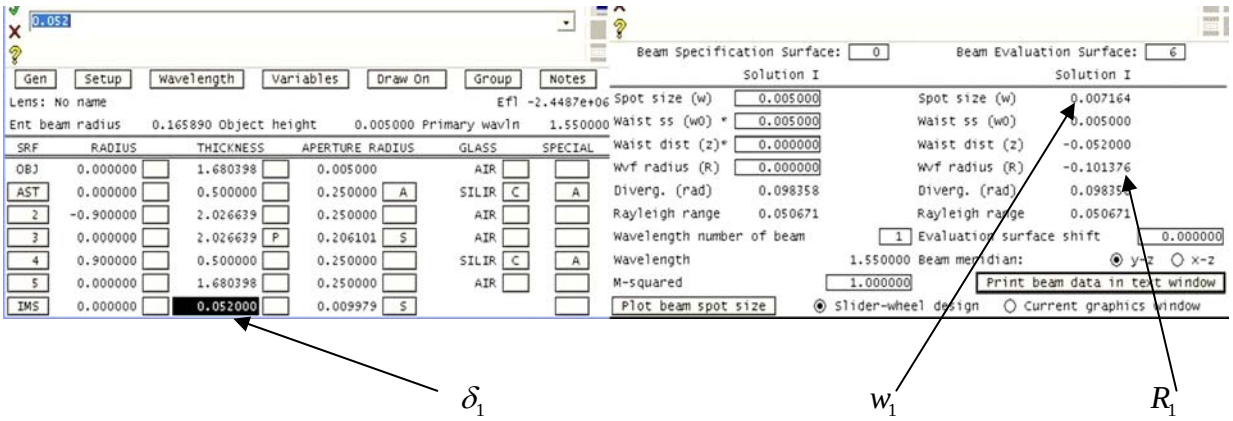


Figura 4.14 Obtención de los valores de w_1 y R_1 cuando el sistema base presenta un desplazamiento δ_1 en la fibra de salida, empleando la microlente de $900\ \mu m$.

Con los valores del desplazamiento δ_1 y de la eficiencia de acoplamiento η, se realiza la gráfica correspondiente, la que se muestra en la Figura 4.15. En dicha Figura se observan las gráficas en Maple y OSLO para cuando se presenta un desplazamiento δ_1 en la fibra óptica de salida.

La gráfica con línea continua representa los resultados de Maple y la gráfica con cuadrados representa los resultados de OSLO, teniendo esta pasos de $20\ \mu m$.

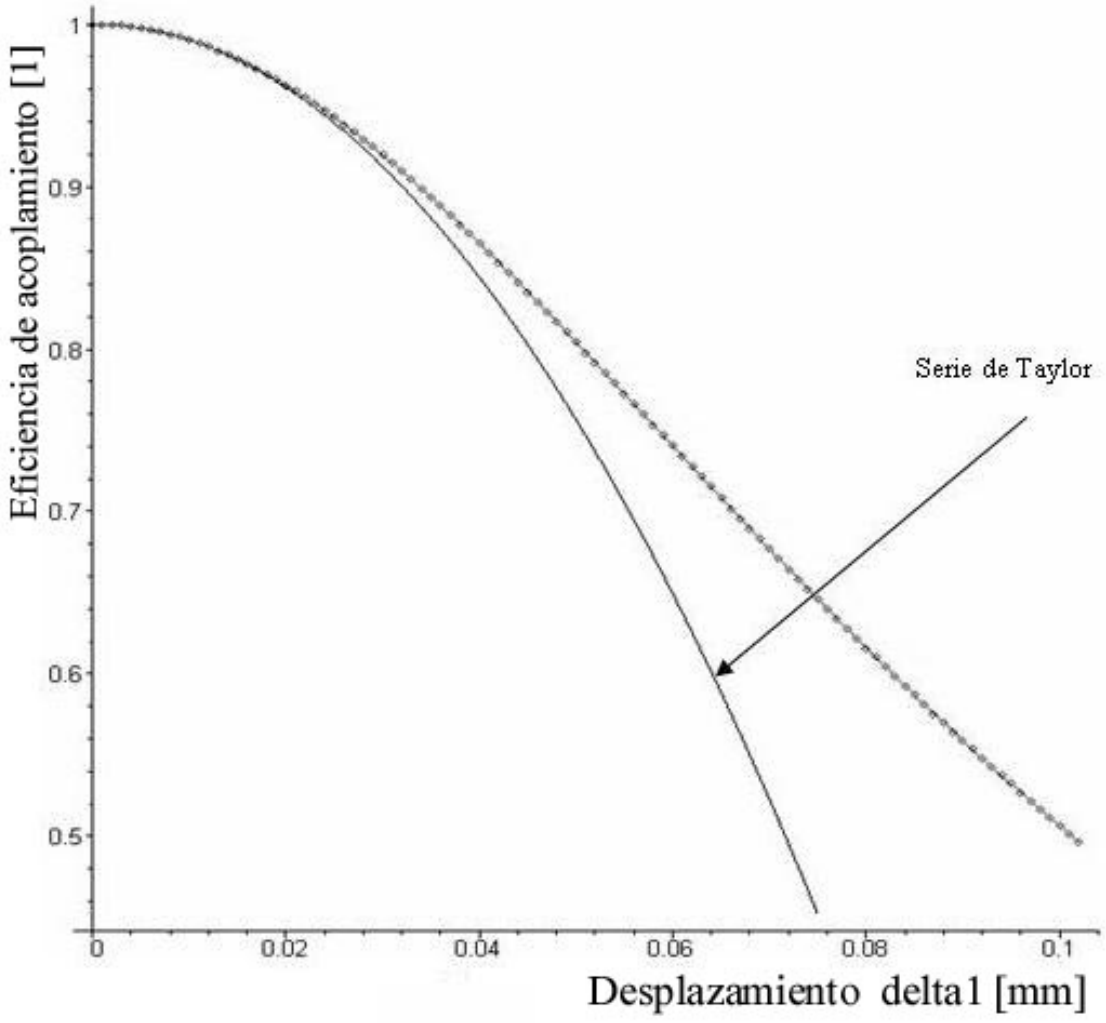


Figura 4.15 Gráfica en OSLO y Maple cuando en el sistema base se presenta un desplazamiento δ_1, en la fibra de salida, empleando la microlente de $900\ \mu m$.

IV.3.5 Simulación de sistema base con desplazamiento δ_2 entre las microlentes

La última simulación que se realizo para el caso cuando el sistema base es analizado con la microlente de $900\ \mu m$, es cuando en el sistema se presenta un desplazamiento δ_2 entre las microlentes. Para esta simulación se realizaron los mismos pasos de la sección IV.3.4 con la única diferencia de que ahora el desplazamiento δ_2 esta localizado entre las dos microlentes que conforman el sistema base, tal como se muestra en la Figura 4.16.

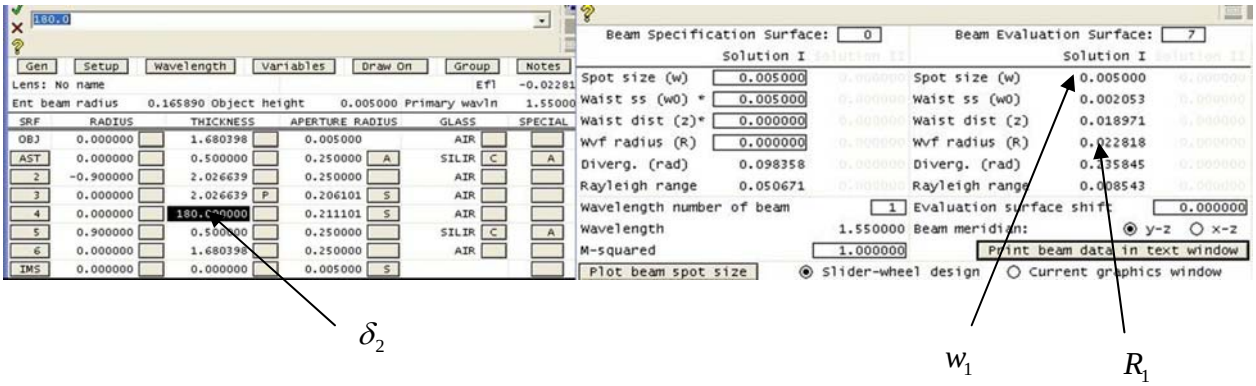


Figura 4.16 Obtención de los valores de w_1 y R_1 cuando el sistema base presenta un desplazamiento δ_2 entre las microlentes, empleando la microlente de $900\ \mu m$.

Con los puntos obtenidos del desplazamiento δ_2 y la eficiencia de acoplamiento η, se realiza la gráfica correspondiente, la cual se muestra en la Figura 4.17. En la cual se observan las gráficas de Maple y OSLO para cuando se tiene un desplazamiento δ_2 entre las microlentes. La gráfica con línea continua representa los resultados de Maple y la gráfica con cuadrados representa los resultados de OSLO, teniendo esta pasos de $20\ mm$.

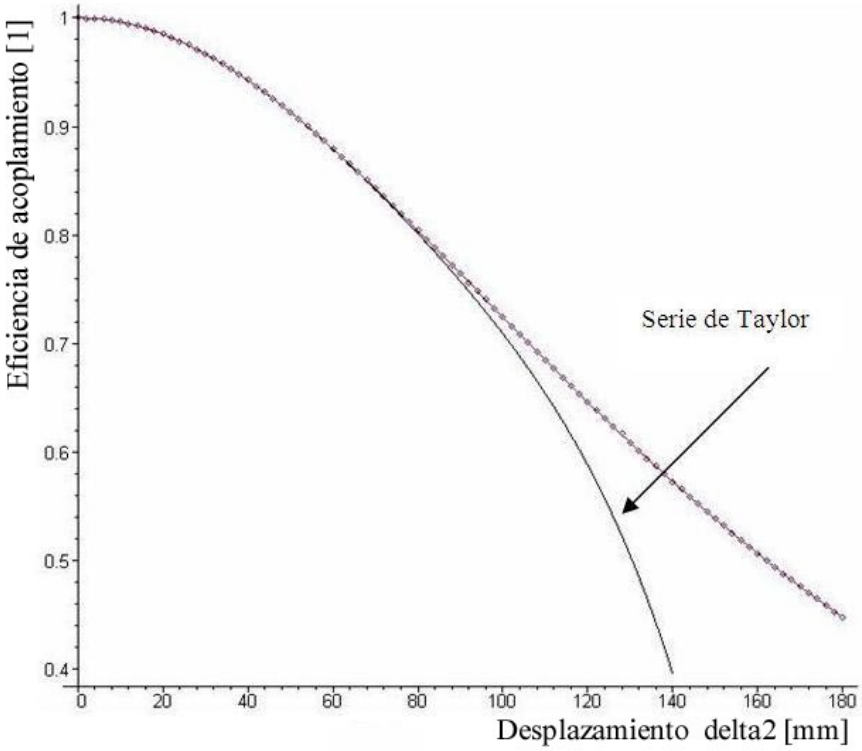


Figura 4.17 Gráfica en OSLO y Maple cuando en el sistema base se presenta un desplazamiento δ_2, entre las microlentes, empleando la microlente de $900\ \mu m$.

En la Tabla 4.9 se muestra una recopilación de los resultados obtenidos para cuando el sistema base es analizado con la microlente de $900\ \mu m$, con $n_L = 1.444085$.

	MAPLE	OSLO
$d1\ [mm]$	1.680399038	1.6803982010747
$d2\ [mm]$	2.02663	2.02663
$\delta_1(\eta = 0.5)\ [\mu m]$	101	101
$\delta_2(\eta = 0.5)\ [mm]$	162	162
$\Gamma_{Fresnel}\ [dB]$	0.9015042208	
	$r = 250\ \mu m$	$r = 400\ \mu m$
Γ_T, sup. $cir.$	0.8945810836	0.9993090654
$\Gamma_T\ [dB]$	0.4838028946	0.003001727960
$\Gamma_{TOTAL}\ [dB]$	1.385307115	0.9045059488

Tabla 4.9 Recopilación de los resultados para cuando el sistema base se analiza con la microlente de $900\ \mu m$.

En la Tabla 4.9 se observan las distancias $d1\ y\ d2$ óptimas, también se puede observar que la eficiencia de acoplamiento cae a 0.5, cuando se tiene un desplazamiento de $\delta_1 = 101\ \mu m$ y $\delta_2 = 162\ mm$ respectivamente, que son las tolerancias que se pueden tener para obtener en el sistema pérdidas de $3\ dB$, las que son aceptable para tener un sistema óptimo en cuanto a la luz que puede acoplarse en la salida del sistema.

También se observa que se presentan menos pérdidas cuando el radio de la microlente es mayor. Se tienen menos pérdidas en la microlente con $r = 400 \mu m$ puesto que esta tiene una mayor superficie con respecto a la microlente con $r = 250 \mu m$.

IV.4 Diseño Final del conmutador OXC

De acuerdo a las Tablas 4.6 y 4.9 para las dos posibles microlentes con las que se puede conseguir un conmutador OXC óptimo y debido a los resultados de las etapas previas. El conmutador OXC de 4×4 en espacio libre utilizando microespejos MEMS, será analizado finalmente en su conjunto con las microlentes de $900\ \mu m$. Una de las causas por la que se llego a esta determinación es por que con la microlente de $900\ \mu m$ se presenta un mayor rango para los desplazamientos tanto de $\delta_1\ y\ \delta_2$, los que se podrán realizar tanto en la salida de la microlente y entre las microlentes respectivamente.

Otra causa por la que se elige la microlente de $900\ \mu m$ es que mediante esta se tiene una mejor colimación de la luz al atravesar esta la primera microlente. Debido a que se tiene una buena colimación de la luz, esta viajara una mayor distancia $d2$ en espacio libre con el menor número de pérdidas.

Puesto que es deseable trabajar con elementos ópticos comerciales para el esquema final del conmutador OXC se empleará la microlente con $ROC = 900\ \mu m$ que tiene un diámetro de $500\ \mu m$, $n_L = 1.444085$ y $tc = 0.5\ mm$.

Las dimensiones de los microespejos para completar el diseño del conmutador OXC en espacio libre, se obtienen a partir del programa para cuando se tiene la propagación de un haz Gaussiano a través de una superficie cuadrada finita. Las dimensiones de los microespejos se obtienen de la siguiente forma.

Sabiendo que la ecuación para capturar el 0.9999 de la luz cuando un haz Gaussiano pasa a través de una superficie cuadrada finita esta en función del tamaño del spot y siendo esta de

$$2.286775\ w_0 \tag{4.2}$$

Para obtener las dimensiones de los microespejos se utiliza el tamaño del spot en la superficie esférica de la primera microlente el que resulto ser de $w_0 = 0.200043\ mm$. La utilización de este tamaño de spot se debe a que la luz al atravesar la primera microlente sale colimada y esa luz es la que incidirá sobre la superficie del microespejo.

Por lo que al sustituir el tamaño del spot en la ecuación (4.2) se obtienen las dimensiones de la mitad del microespejo que resulta ser de $L = 0.457453\ mm$. Como las dimensiones de cada espejos cuadrado son de $2L$, las dimensiones mínimas del microespejo para que este logre capturar el 0.9999 de la potencia de la luz deben ser de $2L = 0.915\ mm$.

Para obtener la ubicación de los microespejo en el conmutador OXC en espacio libre se procedió de la siguiente manera. Primero se relaciona la distancia $d2$ con la configuración final del conmutador OXC de la Figura 4.18 de la siguiente manera.

$$2\,d2 = 2\,a + c \tag{4.3}$$

Donde a es la distancia de la microlente al microespejo y c es la distancia entre los dos arreglos de microespejos.

Aproximando $d2 = 2.1\,mm$ las expresiones de $a\ y\ c$ en función de la distancia $d2$ resultan ser.

$$a = \frac{2d2 - c}{2}$$
$$c = 2d2 - 2a \tag{4.4}$$

Sabiendo que $2d2 = 4.2\,mm$ de acuerdo a la Tabla 4.9 y estableciendo $a = 0.1\,mm$ se obtiene el valor de c el cual tiene un valor de $c = 4\,mm$.

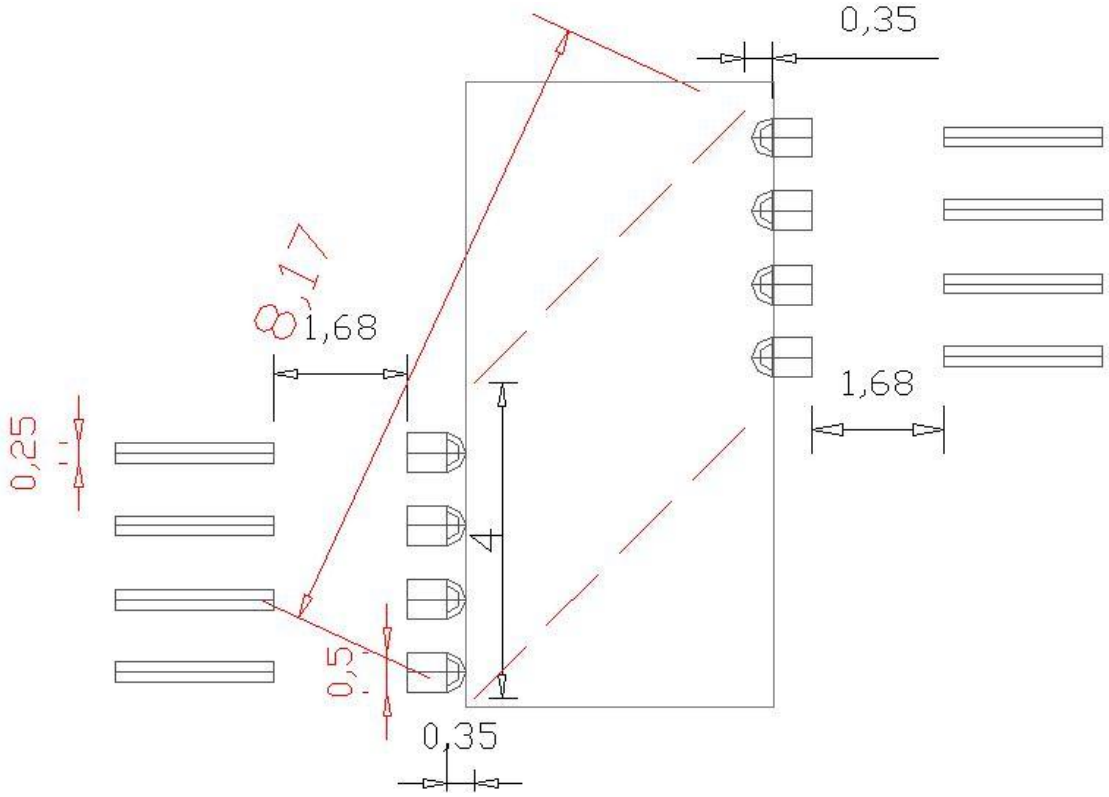
Ya obtenidas las distancias $a\ y\ c$, las que nos indicaran las distancias a las que se deben de colocar los microespejos, se procede a dimensionar el esquema Final del conmutador OXC el cual es mostrado en la Figura 4.18.

En el sistema de la Figura 4.18 se asume que no se tiene ningún desplazamiento. Debido a que en el sistema se desean tener pérdidas totales $< 7\,dB$ para decir que el sistema es confiable y puesto que debido a las características propias del sistema y de sus componentes se tienen pérdidas de $1.385\,dB$. Se podrá tener un rango de pérdidas debidas a la desalineación de $\approx 5.615\,dB$ para las cuales el sistema seguirá siendo confiable.

De acuerdo a la Tabla 4.9, se puede tener un desplazamiento de $\delta_2 = 162\,mm$. Como se puede observar en la Figura 4.18 la distancia entre los microespejos de los extremos para los dos arreglos de microespejos que representa la distancia máxima que se tiene para realizar la conmutación es de $8.17\ mm$.

Por lo que se puede concluir que para el conmutador OXC en espacio libre a base de dispositivos MEMS se cumplirán las características de diseño, es decir una captura del 0.9999 de la luz que se introduce al sistema al igual que se tendrán pérdidas totales $< 7\,dB$ debidas a la desalineación y las características propias del diseño.

En la Figura 4.18 se observan ya en su conjunto todos los elementos que integran el conmutador OXC en espacio libre de 4×4 puertos a base de microespejos MEMS con sus respectivas distancias y dimensiones.



4.18 Conmutador OXC Final en espacio libre de 4×4 puertos a base de dispositivos MEMS.

Resultados, conclusiones y consideraciones finales

Conclusiones

El esquema Final para el conmutador OXC en espacio libre de 4×4 puertos en espacio libre a base de dispositivos MEMS se muestra en la Figura 4.18.

De acuerdo a los diferentes análisis que se realizaron en esta tesis se llego a la conclusión de que el diseño óptimo se lograría con las microlentes de $900\ \mu m$. Dicha aseveración se realizo al observar que el conmutador OXC con la microlente de $900\ \mu m$ presenta un mejor grado de colimación de la luz al atravesar la primera microlente. La buena colimación de la luz permitirá que esta viaje una mayor distancia con el mínimo de pérdidas posibles.

Al realizarse el análisis de desalineación, es decir al incrementar un desplazamiento $\delta_1\ o\ \delta_2$, en la fibra óptica de salida y entre las microlentes respectivamente hasta obtener una caída de la $\eta = 0.5$. Se obtuvieron las tolerancias de desplazamiento que puede sufrir el sistema OXC para tener pérdidas de $3\ dB$, las que son aceptables para considerar un sistema óptimo.

En la Figura 4.18 se observa el diseño del conmutador OXC Final en el cual se presentan las distancias a las que se deben de colocar los diferentes elementos ópticos que conformaran el sistema. Debido a que es deseable trabajar el sistema con elementos ópticos comerciales, a continuación se proporcionaran las características de los elementos ópticos que deben integrar el sistema.

Microlentes con $ROC = 900\ \mu m$ y diámetro de $500\ \mu m$, $n_L = 1.444085$ y $tc = 0.5\ mm$. Las dimensiones mínimas de los microespejos deben ser de $2L = 0.915\ mm$. Las fibras ópticas que se emplearan son monomodo con $n_F = 1.4682$ y con un núcleo de $5\ \mu m$ de diámetro y recubrimiento de $250\ \mu m$ de diámetro. La longitud de onda de trabajo es de $\lambda = 1.55\ \mu m$.

Al realizar las simulaciones en OSLO se observo que las curvas obtenidas mediante Maple resultaron ser similares a las curvas obtenidad en OSLO, para los casos en que se agregaba un desplazamiento en la fibra de salida o un desplazamiento entre las microlentes.

Al observar las gráficas de aberraciones que se presentan en el sistema, se observo que la aberración presente en el sistema es esférica. Esta aberración se representa mediante una curva cúbica.

Con el conmutador óptico OXC se evitaría la conversión de una señal óptica a una señal eléctrica y por consecuencia se tendría una mejor respuesta en la conmutación de los puertos de entrada con los puertos de salida.

ANEXOS

Anexo 1

Cálculo de las distancias $d1$ y $d2$, del sistema base para obtener la máxima transferencia de luz en el sistema. Se muestra el programa para la microlente de $330\ \mu m$.

```
restart: with(student): #dis1=dis3        MICROLENTE DE SILICA
nL=1.444024
dis1:=Matrix([[1,d1],[0,1]]);   # Matriz óptica para la d1
```

$$dis1 := \begin{bmatrix} 1 & d1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

```
lga2:=Matrix([[1,0],[0,nL/n1]]);    # Matriz óptica en el
cambio de fase plana en la microlente de la Derecha
```

$$lga2 := \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{nL}{n1} \end{bmatrix}$$

```
lgb2:=Matrix([[1,tc],[0,1]]);  # Matriz óptica en el espesor
de la microlente de la Derecha
```

$$lgb2 := \begin{bmatrix} 1 & tc \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

```
lgc2:=Matrix([[1,0],[-(nL-n1)/(nL*(R2)),n1/nL]]);    # Matriz
óptica en el cambio de fase esférica en la microlente de la
Derecha
```

$$lgc2 := \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{nL - n1}{nL\ R2} & \frac{n1}{nL} \end{bmatrix}$$

```
dis2:=Matrix([[1,d2],[0,1]]);   # Matriz óptica para la d2
```

$$dis2 := \begin{bmatrix} 1 & d2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

```
lga1:=Matrix([[1,0],[-(n1-nL)/(n1*(R1)),nL/n1]]);    # Matriz
óptica en el cambio de fase esférica en la microlente de la
Izquierda
```

$$lga1 := \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n1 - nL}{n1\ R1} & \frac{nL}{n1} \end{bmatrix}$$

```
lgb1:=Matrix([[1,tc],[0,1]]);          # Matriz óptica en el
espesor de la microlente de la Izquierda
```

$$lgb1 := \begin{bmatrix} 1 & tc \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

lgc1:=Matrix([[1,0],[0,n1/nL]]); # Matriz óptica en el cambio de fase plana en la microlente de la Izquierda

$$lgc1 := \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n1}{nL} \end{bmatrix}$$

M:=dis1.lga2.lgb2.lgc2.dis2.dis2.lga1.lgb1.lgc1.dis1: # Multiplicación de las componentes ópticas para obtener la respuesta del sistema completo
R2:=0.330; # Radio de Curvatura de la microlente de la Derecha en [mm]
R1:=-R2; # Radio de Curvatura de la microlente de la Izquierda en [mm]
tc:=0.9: # Espesor de la microlente
n1:=1: # Índice de refracción del aire
nL:=1.444024: # Índice de refracción de la microlente
rest1:=M[1,1]; # Elemento [1,1] de la Matriz resultante

$$rest1 := -0.6772221867 - 2.691054546\ d1 - 2.691054546\ (0.1613889068 - 1.345527273\ d1)\ d2$$

rest2:=M[1,2]; # Elemento [1,2] de la Matriz resultante

$$rest2 := (-0.6772221867 - 2.691054546\ d1 - 2.691054546\ (0.1613889068 - 1.345527273\ d1)\ d2)\ d1 + 0.2011739639 - 0.6772221868\ d1 + 0.3227778133\ (0.1613889068 - 1.345527273\ d1)\ d2$$

 # Debido a que la matriz resultante queda en términos de d1 y d2 es necesario igualar los elementos [1,1] y [1,2] a 1 y 0 respectivamente para garantizar que se genere una imagen con magnificación de 1

d1:=solve(rest1=1,d1); #Igualando el elemento [1,1] =1

$$d1 := \frac{0.2972812280\ 10^{-9}\ (0.2096527733\ 10^{19} + 0.5428829391\ 10^{18}\ d2)}{-0.1000000000\ 10^{10} + 0.1345527273\ 10^{10}\ d2}$$

d2:=solve(rest2=0,d2)[2]: # Igualando el elemento [1,2]=0
d1:=d1; # Distancia d1 mínima para cumplir las condiciones que se plantearon

$$d1 := 0.3272216803$$

d2:=d2; # Distancia d2 mínima para cumplir las condiciones planteadas

$$d2 := 3.407999156$$

```
simplify(M);   # Matriz Final que cumple las condiciones de
[1,1] = 1 y [1,2] = 0
```

$$\begin{bmatrix} 1.000000005 & 0.1000000000\ 10^{-8} \\ 9.648926267 & 1.000000003 \end{bmatrix}$$

Anexo 2a

Cálculo del tamaño del spot w (z) (radio) y radio de curvatura del frente de onda R(z), en la primera microlente. Este cálculo se realiza para su superficie plana como para su superficie esférica. Se muestra primero el programa para la superficie plana de la microlente de 900 μm.

```
restart: with(student):
lambda:=0.00155:   # Longitud de onda en mm
w0:=0.005:  # Tamaño del spot en la entrada en mm
z:=1.680399038:  # Distancia de la FO a la microlente en mm
W:=(z,w0,lambda)->w0*sqrt(1+((z*lambda)/(Pi*w0^2))^2);      #
Para calcular el tamaño del spot (Radio) del Haz
```

$$\mathrm{W} := (z, w0, \lambda) \rightarrow w0 \sqrt{1 + \frac{z^2 \lambda^2}{\pi^2\, w0^4}}$$

```
W=simplify(%);  # Tamaño del spot en la superficie plana
```

$$\mathrm{W} = 0.1658905322$$

```
R:=(z,w0,lambda)->z*((1+((Pi*w0^2)/(z*lambda))^2));         #
Para calcular el Radio de curvatura del frente de onda
```

$$R := (z, w0, \lambda) \rightarrow z \left(1 + \frac{\pi^2\, w0^4}{z^2 \lambda^2}\right)$$

```
R=simplify(%);  # Tamaño del Radio de curvatura del frente de
onda en la superficie plana
```

$$R = 1.681926970$$

Anexo 2b

Cálculo del tamaño del spot y el radio de curvatura para la superficie esférica de la microlente de 900 μm.

```
### CALCULO DE w1 Y R1 EN LA SUPERFICIE ESFERICA DE LA
PRIMERA MICROLENTE. POR MEDIO DE MATRICES
restart:
dis1:=Matrix([[1,d1],[0,1]]):  # Matriz para d1
lgc1:=Matrix([[1,0],[0,n1/nL]]):  # Matriz para la superficie
plana de la microlente
lgb1:=Matrix([[1,tc],[0,1]]):  # Matriz para el espesor de la
microlente
```

```
lga1:=Matrix([[1,0],[-(n1-nL)/(n1*(R1)),nL/n1]]):   #  Matriz
para la superficie esférica de la microlente
M:=lga1.lgb1.lgc1.dis1;  # Matriz de transferencia resultante
```

$$M := \begin{bmatrix} 1 & d1 + \frac{tc\ n1}{nL} \\ -\frac{n1 - nL}{n1\ R1} & -\frac{(n1 - nL)\ d1}{n1\ R1} + \frac{\left(-\frac{(n1 - nL)\ tc}{n1\ R1} + \frac{nL}{n1}\right) n1}{nL} \end{bmatrix}$$

```
#### EMPLEANDO EL PARAMETRO q ####
#  1/q(z) = 1/R(z) - I*lambda/n*Pi*w(z)^2
q0:=(I*n*Pi*w0^2)/(lambda);   # Parámetro q en la entrada
```

$$q0 := \frac{n\ \pi\ w0^2\ I}{\lambda}$$

```
q1:=(A1*q0+B1)/(C1*q0+D1):   # Parámetro q en la salida
# Cambio de Variable     1/q1=q2
q2:=denom(q1)/numer(q1):
# Multiplicando por el conjugado para separar parte RE e Im
q2num:=numer(q2):  # Numerador de q2
q2den:=denom(q2):  # Denominador de q2
q2denc:=R1*n1*(-n*Pi*w0^2*nL*I+lambda*d1*nL+lambda*tc*n1):  #
conjugado del Denominador de q2
snu:=expand(q2num*q2denc):  # numerador por el conjugado
sden:=expand(q2den*q2denc):  # denominador por el conjugado
OPER:=snu/sden:  # q2 con parte Re e Ima
# Separando parte real e imaginaria a q2
## OPE=numer(OPER)/denom(OPER) = (hr+hi)/denom(OPER)
hr:=-n1^2*R1*n^2*Pi^2*w0^4*nL^2+n1*R1*n^2*Pi^2*w0^4*nL^3-n1^2
*R1*lambda^2*d1^2*nL^2-2*n1^3*R1*lambda^2*d1*nL*tc+n1*R1
*lambda^2*d1^2*nL^3+2*n1^2*R1*lambda^2*d1*nL^2*tc-n1^4*R1
*lambda^2*tc^2+n1^3*R1*lambda^2*tc^2*nL+n1^2*R1^2*lambda^2*nL
^2*d1+n1^3*R1^2*lambda^2*nL*tc: # Parte real del numerador de
q2
hi:=-I*n1^2*R1^2*lambda*nL^2*n*Pi*w0^2:  #Parte imaginaria
del numerador de q2
PAR:=(hr)/denom(OPER):  # Parte real de q2
PAI:=(hi)/denom(OPER):  # Parte imaginaria de q2
#### IGUALANDO PARTE REAL E IMAGINARIA ####
## 1/R1haz - I*[lambda/n*Pi*w1^2] = PAR + PAI
# PAR= 1/R1haz  y  PAI= - I*[lambda/n*Pi*w1^2]
# EL RADIO DE CURVATURA DEL FRENTE DE ONDA SERA
R1haz:=denom(PAR)/numer(PAR): # Radio de curvatura del frente
de onda
# RADIO DEL TAMAÑO SPOT
# w1^2 = w1_cuadrado  # cambio de variable
```

```
w1_cuadrado:=(denom(PAI)*(-I*lambda))/(numer(PAI)*(n*Pi)):
## evaluando para una lente particular
nL:=1.444085:  # Índice de refracción de la lente
n:=1:  # Índice de refracción para el parámetro q
tc:=0.5:  # Espesor de la microlente en mm
w0:=0.005:  # Tamaño del spot en la onda de entrada en mm
d1:=1.680399038:  # distancia de la FO a la superficie plana
de la microlente
n1:=1:  # Índice de refracción del aire
lambda:=0.00155;  # Longitud de onda en mm
w1:=simplify(sqrt(w1_cuadrado));  # Tamaño del spot en la
superpie esférica de la primera microlente en mm
```

$$w1 := 0.2000432617$$

```
R1:=simplify(R1haz);  # Tamaño del radio de curvatura del
frente de onda en la superficie esférica de la primera
microlente
```

$$R1 := -3244.021459$$

Anexo 3

Análisis de un Haz Gaussiano, tanto para una superficie cuadrada como para una superficie circular para obtener el tamaño óptimo tanto de las microlentes y microespejos para el diseño del conmutador.

Para una superficie Circular se tiene

```
restart: with(student):
assume(w0,positive);  # Asumir que w0 es positivo
R:=Doubleint((exp(-2*rho^2/w0^2)*rho),rho=0..r,theta=0..2*Pi);  #
Haz Gaussiano en una superficie circular
```

$$R := \int_0^{2\pi}\int_0^{r} e^{\left(-\frac{2\rho^2}{w0\sim^2}\right)}\rho\, d\rho\, d\theta$$

```
NUMX:=(2*Pi)*int(exp(-2*rho^2/w0^2)*rho,rho=0...r):
NUMY:=(2*Pi)*int(exp(-2*rho^2/w0^2)*rho,rho=0...r):
NUM:=NUMX*NUMY;  # Potencia de un haz Gaussiano limitada por
una superficie circular con radio r
```

$$\frac{1}{4}\pi^2\, w0\sim^4\left(-1+e^{\left(-\frac{2r^2}{w0\sim^2}\right)}\right)^2$$

```
DENX:=(2*Pi)*int(exp(-2*rho^2/w0^2)*rho,rho=0..infinity):
DENY:=(2*Pi)*int(exp(-2*rho^2/w0^2)*rho,rho=0..infinity):
```

```
DEN:=DENX*DENY;  # 100% de la Potencia de un haz Gaussiano
```

$$DEN := \frac{\pi^2\, w0\sim^4}{4}$$

```
POT:=NUM/DEN;  # Potencia capturada al pasar el haz Gaussiano
por la abertura de una superficie circular
```

$$\left(-1 + \mathbf{e}^{\left(-\frac{2\, r^2}{w0\sim^2}\right)}\right)^2$$

```
p99:=solve(POT=0.9999,r)[4];  # Condicionando que la captura
sea del 99.99%
```

$$p99 := 2.225248587\ w0\sim$$

Para una superficie Cuadrada

```
restart: with(student):
assume(w0>0);  # Asumir w0 positivo
R:=Doubleint((exp(-(x^2+y^2)/w0^2)),x=-L..L,y=-L..L);
# Haz Gaussiano en una superficie cuadrada
```

$$R := \int_{-L}^{L}\int_{-L}^{L} \mathbf{e}^{\left(-\frac{x^2+y^2}{w0\sim^2}\right)}\, dx\, dy$$

```
numx:=2*Int(exp(-(x^2)/w0^2),x=0..L):
numy:=2*Int(exp(-(y^2)/w0^2),y=0..L):
num:=numx*numy:  # Potencia de un haz Gaussiano limitada por
una superficie cuadrada con longitud 2L
NU:=value(num);
```

$$NU := \pi\, w0\sim^2\, \mathrm{erf}\left(\frac{L}{w0\sim}\right)^2$$

```
denox:=Int(exp(-(x^2)/w0^2),x=-infinity..infinity):
denoy:=Int(exp(-(y^2)/w0^2),y=-infinity..infinity):
deno:=denox*denoy:  # 100% de la Potencia de un haz Gaussiano
DE:=value(deno);
```

$$DE := \pi\, w0\sim^2$$

```
DIVI:=NU/DE;  # Potencia capturada al pasar el haz Gaussiano
por la abertura de una superficie cuadrada
```

$$DIVI := \mathrm{erf}\left(\frac{L}{w0\sim}\right)^2$$

```
solve(erf(x)^2=0.9999,x)[1]; # Condicionar que la captura sea
del 99.99%
```

$$2.286775$$

```
erf(2.286775);  # Para erf=2.286775 se obtiene una captura de
```

$$0.9999499988$$

```
2.286775/2;    # Obtener el valor para L
2*1.1433875*w0;  # Para obtener el 99.99% de la potencia
```

$$2.286775\ w0$$

Anexo 4

Cálculo de la eficiencia de acoplamiento de forma General

```
restart: with(student): # Cálculo de "NU" en forma GRAL
# ASUMIENDO R1=R1  Y w1^2=w1_cuadrado
assume(w1>0): assume(w0>0):  # Asumir w1 y w0 positivos
assume(k>0): assume(R1>0):   # Asumir k y R1 positivos
ond1:=exp(-(x^2+y^2)/w0^2):  # Onda eléctrica en la entrada
ond2:=exp(-(x^2+y^2)/(w1^2))*exp((-k*I)*(x^2+y^2)/(2*R1)):  #
Onda eléctrica en la salida
ond3:=exp(-(x^2+y^2)/(w1^2))*exp((+I*k)*(x^2+y^2)/(2*R1)):  #
Onda conjugada compleja de la onda de salida
Nnum:=Doubleint(ond1*ond3,x=-infinity..infinity,y=-
infinity..infinity):   # Numerador de la eficiencia
NdenUNO:=Doubleint(ond1*ond1,x=-infinity..infinity,y=-
infinity..infinity):  # Denominador 1 de la eficiencia
NdenDOS:=Doubleint(ond2*ond3,x=-infinity..infinity,y=-
infinity..infinity):  # Denominador 2 de la eficiencia
Nden:=NdenUNO*NdenDOS:  # Denominador completo
N:=(Nnum^2)/Nden:  # Eficiencia de acoplamiento GRAL.
ond1:                 # Onda en la entrada
int(ond1,x=-infinity..infinity):   # Solución de la onda 1
ond2:                 # Onda en la salida
int(ond2,x=-infinity..infinity):   # Solución de la onda 2
ond3:                 # Onda conjugada en la salida
int(ond3,x=-infinity..infinity):   # Solución de la onda 3
res1n:=int(ond1*ond3,x=-infinity..infinity):
RE1:=int(res1n,y=-infinity..infinity):
res2d:=int((ond1)^2,x=-infinity..infinity):
RE2:=int(res2d,y=-infinity..infinity):
res3d:=int(ond2*ond3,x=-infinity..infinity):
RE3:=int(res3d,y=-infinity..infinity):
sal:=(res1n^2)/(res2d*res3d):
NU:=(abs(RE1)^2)/(RE2*RE3);  # Valor de la eficiencia de
acoplameinto de Forma General
```

$$NU := \frac{16\ w0\sim^2\ w1\sim^2\ R1\sim^2}{4\ w1\sim^4\ R1\sim^2 + 8\ w1\sim^2\ R1\sim^2\ w0\sim^2 + 4\ w0\sim^4\ R1\sim^2 + k\sim^2\ w0\sim^4\ w1\sim^4}$$

Anexo 5

Cálculo de la Eficiencia de acoplamiento, cuando no se presenta ningún desplazamiento

```
restart: with(student): # Calculo de "NU" sin desplazamiento
assume(w1>0): assume(w0>0):  # Asumir w1 y w0 positivos
assume(k>0): assume(R1>0):   # Asumir k y R1 positivos
lambda:=1.55e-6:             # Longitud de onda
k:=(2*Pi)/(lambda):
R1:=infinity:  # Asumir frente de onda plano en la salida
ond1:=exp(-(x^2+y^2)/w0^2):  # Onda eléctrica en la entrada
ond2:=exp(-(x^2+y^2)/(w1^2))*exp((-k*I)*(x^2+y^2)/(2*R1)): #
Onda eléctrica en la salida
ond3:=exp(-(x^2+y^2)/(w1^2))*exp((+I*k)*(x^2+y^2)/(2*R1)): #
Onda conjugada compleja de la onda de salida
Nnum:=Doubleint(ond1*ond3,x=-infinity..infinity,y=-
infinity..infinity):  # Numerador de la eficiencia
NdenUNO:=Doubleint(ond1*ond1,x=-infinity..infinity,y=-
infinity..infinity):  # Denominador 1 de la eficiencia
NdenDOS:=Doubleint(ond2*ond3,x=-infinity..infinity,y=-
infinity..infinity);  # Denominador 2 de la eficiencia
Nden:=NdenUNO*NdenDOS;  # Denominador completo
N:=(Nnum^2)/Nden:  # Eficiencia de acoplamiento
ond1:                 # Onda en la entrada
int(ond1,x=-infinity..infinity):  # Solución de la onda 1
ond2:                 # Onda en la salida
int(ond2,x=-infinity..infinity):  # Solución de la onda 2
ond3:                 # Onda conjugada en la salida
int(ond3,x=-infinity..infinity):  # Solución de la onda 3
res1n:=int(ond1*ond3,x=-infinity..infinity):
RE1:=int(res1n,y=-infinity..infinity):
res2d:=int((ond1)^2,x=-infinity..infinity):
RE2:=int(res2d,y=-infinity..infinity):
res3d:=int(ond2*ond3,x=-infinity..infinity):
RE3:=int(res3d,y=-infinity..infinity):
sal:=(res1n^2)/(res2d*res3d):
NU:=(abs(RE1)^2)/(RE2*RE3);  # Valor de la eficiencia de
acoplameinto sin desplazamiento
```

$$NU := \frac{4.000000004\ w0\sim^2\ w1\sim^2}{(w1\sim^2 + w0\sim^2)^2}$$

Anexo 6

Cálculo de la eficiencia de acoplamiento, cuando se presenta un desplazamiento longitudinal en el eje z. Obtención primero los valores de w1 y R1 en la fibra de salida. El programa que se muestra es para la microlente de $900\ \mu m$.

```
restart: with(student):        #dis1=dis3        SISTEMA CON
DESPLAZAMIENTO "delta1" INICIO EN LA FIBRA DE SALIDA FORMA
GENERAL
dez1:=Matrix([[1,delta1],[0,1]]):
dis1:=Matrix([[1,d1],[0,1]]):
lga2:=Matrix([[1,0],[0,nL/n1]]):
lgb2:=Matrix([[1,tc],[0,1]]):
lgc2:=Matrix([[1,0],[-(nL-n1)/(nL*(R2)),n1/nL]]):
dis2:=Matrix([[1,d2],[0,1]]):
lga1:=Matrix([[1,0],[-(n1-nL)/(n1*(R1)),nL/n1]]):
lgb1:=Matrix([[1,tc],[0,1]]):
lgc1:=Matrix([[1,0],[0,n1/nL]]):
M:=dez1.dis1.lga2.lgb2.lgc2.dis2.dis2.lga1.lgb1.lgc1.dis1:
# MATRIZ DEL SISTEMA BASE CON DESPLAZAMIENTO EN LA FIBRA DE
SALIDA
R2:=0.900:
R1:=-R2:
tc:=0.5:
n1:=1:
nL:=1.444085:
d1:=1.6803982010747:
d2:=2.02663:
M;
```

$$\begin{bmatrix} -1.000000000 - 0.44038\ 10^{-5}\ \delta 1 & 0.1674\ 10^{-5} - 1.000000000\ \delta 1 \\ -0.44039\ 10^{-5} & -1.000000001 \end{bmatrix}$$

```
# emplenado el parametro q   PARA OBTENER    w1   Y R1
(tamaño spot y radio de curvatura)
#  1   =  1   -   I*lambda
# q(z)   R(z)    n*Pi*w(z)^2
q0:=(I*n*Pi*w0^2)/(lambda):
q0:=(I*n*Pi*w0^2)/(lambda);
```

$$q0 := \frac{n\ \pi\ w0^2\ I}{\lambda}$$

```
q1:=(A1*q0+B1)/(C1*q0+D1):
```

```
# 1/q1=q2
q2:=denom(q1)/numer(q1):
# multiplicando por el conjugado para separar parte RE e Im
q2num:=numer(q2):
q2den:=denom(q2):
### MANO  Obtener el conjugado de "q2den"
q2denc:=-1.*I*n*Pi*w0^2-.4403800000e-5*I*n*Pi*w0^2*delta1-
.1674000000e-5*lambda+1.*delta1*lambda:
snu:=expand(q2num*q2denc):
sden:=expand(q2den*q2denc):
OPER:=snu/sden:
expand(numer(OPER)):
denom(OPER):
# separando parte real e imaginaria
### OPE=numer(OPER)/denom(OPER) = (hr+hi)/denom(OPER)
hr:=.4403900000e-5*n^2*Pi^2*w0^4+.1939389482e-10*n^2    *Pi^2
*w0^4*delta1-.1674000002e-5*lambda^2   +1.000000001   *delta1
*lambda^2:
hi:=-1.000000001*I*lambda*n*Pi*w0^2+.99996e-10*I*n*Pi   *w0^2
*delta1*lambda:
PAR:=(hr)/denom(OPER):
PAI:=(hi)/denom(OPER):
# IGUALANDO PARTE REAL E IMAGINARIA
## 1/R1haz - I*[lambda/n*Pi*w1^2] = PAR + PAI
# PAR= 1/R1haz  y  PAI= - I*[lambda/n*Pi*w1^2]
# EL RADIO DE CURVATURA DEL FRENTE DE ONDA SERA
R1haz:=denom(PAR)/numer(PAR):
# EL RADIO DEL HAZ SERA (TAMAÑO SPOT)
# w1^2 = w1_cuadrado
w1_cuadrado:=(denom(PAI)*(-I*lambda))/(numer(PAI)*(n*Pi)):

restart:
#### CALCULO DE LA EFICIENCIA DE ACOPLAMIENTO ####
n:=1:
lambda:=0.00155:
k:=(2*Pi)/(lambda):
w0:=0.005:
## Pasar de ARRIBA las Expresiones de R1  y w1^2 en función
de DELTA1
R1:=.5000000000*(.7710628448e12-998655037.*delta1+
.3003125000e15*delta1^2)/(-249663721.+.1501562501e15*delta1);
```

$$R1 := \frac{0.5000000000\ (0.7710628448\ 10^{12} - 0.998655037\ 10^{9}\ \delta 1 + 0.3003125000\ 10^{15}\ \delta 1}{-0.249663721\ 10^{9} + 0.1501562501\ 10^{15}\ \delta 1}$$

```
w1_cuadrado:=-.6235149760e-3*(.7710628448e12-998655037.
*delta1+.3003125000e15*delta1^2)/(-.1923076925e14
+1923.*delta1);
```

$$w1_cuadrado := -0.0006235149760\,(0.7710628448\ 10^{12} - 0.998655037\ 10^{9}\ \delta 1 + 0.3003125000\ 10^{15}\ \delta 1^{2}) \big/ (-0.1923076925\ 10^{14} + 1923.\ \delta 1)$$

```
NU:=(16*w0^2*w1_cuadrado*R1^2)/(4*(w1_cuadrado)^2*R1^2+8*w1_c
uadrado*R1^2*w0^2+4*w0^4*R1^2+k^2*w0^4*(w1_cuadrado)^2);
```

$$NU := -0.7793937200\ 10^{-14}\,(0.7710628448\ 10^{12} - 0.998655037\ 10^{9}\ \delta 1 + 0.3003125000\ 10^{15}\ \delta 1^{2})\,(-0.1923076925\ 10^{14} + 1923.\ \delta 1) \big/ (0.1155695268\ 10^{12} - 0.187102281\ 10^{9}\ \delta 1 + 0.5626482620\ 10^{14}\ \delta 1^{2} - 0.2914893734\ 10^{11}\ \delta 1^{3} + 0.4382789474\ 10^{16}\ \delta 1^{4})$$

```
subs(delta1=0,NU);
```

1.

Anexo 7

Simplificación de la eficiencia de acoplamiento para el caso cuando se presenta un desplazamiento longitudinal δ_1 en la fibra de salida mediante una serie de Taylor. Pograma con las características de la microlente de $900\ \mu m$.

```
restart: with(plots):
NU1:=-.7793937200e-14*(.7710628448e12-998655037.*delta1
+.3003125000e15*delta1^2)*(-.1923076925e14+1923.*delta1)
/(.1155695268e12-187102281.*delta1+.5626482620e14*delta1^2-
.2914893734e11*delta1^3+.4382789474e16*delta1^4):          #
Eficiencia de acoplamiento para un desplazamiento delta1 en
la FO de salida
taylor(NU1,delta1=0,4);  #  Para obtener la serie de Taylor
de tercer orden
```

$$1.000000000 + 0.0003237916628\ \delta 1 - 97.36965752\ \delta 1^{2} - 0.06305497663\ \delta 1^{3} + O(\delta 1^{4})$$

```
NU:=convert(%,polynom);    #  Eficiencia  de  acoplamiento  de
tercer orden
```

$$NU := 1.000000000 + 0.0003237916628\ \delta 1 - 97.36965752\ \delta 1^{2} - 0.06305497663\ \delta 1^{3}$$

Anexo 8

Eficiencia de acoplamiento para la microlente de 900 μm cuando se añade un desplazamiento δ_2 entre las dos microlentes. Primero se calcula de w1 y R1 para obtener la eficiencia de acoplamiento al añadir el desplazamiento entre las microlentes.

```
restart: with(student): # SISTEMA CON DESPLAZAMIENTO "delta2"
INICIO ENTRE LAS MICROLENTES FORMA GENERAL
# ASUMIENDO R1=R1  Y w1^2=w1_cuadrado
dez2:=Matrix([[1,delta2],[0,1]]):
dis1:=Matrix([[1,d1],[0,1]]):
lga2:=Matrix([[1,0],[0,nL/n1]]):
lgb2:=Matrix([[1,tc],[0,1]]):
lgc2:=Matrix([[1,0],[-(nL-n1)/(nL*(R2)),n1/nL]]):
dis2:=Matrix([[1,d2],[0,1]]):
lga1:=Matrix([[1,0],[-(n1-nL)/(n1*(R1)),nL/n1]]):
lgb1:=Matrix([[1,tc],[0,1]]):
lgc1:=Matrix([[1,0],[0,n1/nL]]):
M:=dis1.lga2.lgb2.lgc2.dez2.dis2.dis2.lga1.lgb1.lgc1.dis1:
# MATRIZ DEL SISTEMA BASE CON DESPLAZAMIENTO ENTRE LAS
MICROLENTES DESDE EL INICIO
R2:=0.900:
R1:=-R2:
tc:=0.5:
n1:=1:
nL:=1.444085:
d1:= 1.6803982010747:
d2:= 2.02663:
M;
```

$$\begin{bmatrix} -1.000000001 - 0.2038843578\ 10^{-6}\ \delta 2 & 0.1672\ 10^{-5} + 0.1705\ 10^{-12}\ \delta 2 \\ -0.44038\ 10^{-5} + 0.2434709719\ \delta 2 & -1.000000000 - 0.2036\ 10^{-6}\ \delta 2 \end{bmatrix}$$

```
# emplenado el parametro q   PARA OBTENER    w1   Y R1
(tamaño spot y radio de curvatura)
#  1   =  1   -   I*lambda
# q(z)   R(z)    n*Pi*w(z)^2
q0:=(I*n*Pi*w0^2)/(lambda):
#restart:
q0:=(I*n*Pi*w0^2)/(lambda):
q1:=(A1*q0+B1)/(C1*q0+D1):
# 1/q1=q2


q2:=denom(q1)/numer(q1):
# multiplicando por el conjugado para separar parte RE e Im
```

```
q2num:=numer(q2):
q2den:=denom(q2):
### Obtener el conjugado de "q2den"
q2denc:=-1.000000001*I*n*Pi*w0^2-.2038843578e-6*I*n*Pi*w0^2
*delta2-.1672000000e-5*lambda-.1705000000e-12*delta2*lambda:
snu:=expand(q2num*q2denc):
sden:=expand(q2den*q2denc):
OPER:=snu/sden:
expand(numer(OPER)):
denom(OPER):
# separando parte real e imaginaria ##
OPE=numer(OPER)/denom(OPER) = (hr+hi)/denom(OPER)
hr:=.4403800004e-5*n^2*Pi^2*w0^4-.2434709721*n^2*Pi^2*w0^4*
delta2-.4963992275e-7*n^2*Pi^2*w0^4*delta2^2-.1672000000e-5
*lambda^2-.5109192000e-12*delta2*lambda^2-.3471380000e-19
*delta2^2*lambda^2:
hi:=-1.000000001*I*lambda*n*Pi*w0^2-.4008930e-9*I*delta2*
lambda*n*Pi*w0^2+.94546e-18*I*delta2^2*lambda*n*Pi*w0^2:
PAR:=(hr)/denom(OPER):
PAI:=(hi)/denom(OPER):
# IGUALANDO PARTE REAL E IMAGINARIA
## 1/R1haz - I*[lambda/n*Pi*w1^2] = PAR + PAI
# PAR= 1/R1haz  y  PAI= - I*[lambda/n*Pi*w1^2]
# EL RADIO DE CURVATURA DEL FRENTE DE ONDA SERA
R1haz:=denom(PAR)/numer(PAR):
# EL RADIO DEL HAZ SERA (TAMAÑO SPOT)
# w1^2 = w1_cuadrado
w1_cuadrado:=(denom(PAI)*(-I*lambda))/(numer(PAI)*(n*Pi)):

restart:
#### CALCULO DE LA EFICIENCIA DE ACOPLAMIENTO ####
n:=1:
lambda:=0.00155:
k:=(2*Pi)/(lambda):
w0:=0.005:
##   Pasar de ARRIBA las Expresiones de R1  y w1^2 en función
de  DELTA2
R1:=-.1000000000e-5*(.3084251385e23+.1257661225e17*delta2+
1282087253*delta2^2)/(.1994907574e14+.7509256815e16*delta2+15
31020001.*delta2^2);
```

$$R1 := -0.1000000000\ 10^{-5}\ (0.3084251385\ 10^{23} + 0.1257661225\ 10^{17}\ \delta 2 + 0.1282087253\ 10^{10}\ \delta 2^2) \big/ (0.1994907574\ 10^{14} + 0.7509256815\ 10^{16}\ \delta 2 + 0.1531020001\ 10^{10}\ \delta 2^2)$$

```
w1_cuadrado:=-.5066059180e-4*(.2467401109e23+.1006128979e17
*delta2+1025669803.*delta2^2)/(-.5000000005e23-.2004465000e14
*delta2+47273.*delta2^2);
```

$$w1_cuadrado := -0.00005066059180\,(0.2467401109\ 10^{23} + 0.1006128979\ 10^{17}\ \delta 2 + 0.1025669803\ 10^{10}\ \delta 2^2) \big/ (-0.5000000005\ 10^{23} - 0.2004465000\ 10^{14}\ \delta 2 + 47273.\ \delta 2^2)$$

```
NU:=(16*w0^2*w1_cuadrado*R1^2)/(4*(w1_cuadrado)^2*R1^2+8*w1_c
uadrado*R1^2*w0^2+4*w0^4*R1^2+k^2*w0^4*(w1_cuadrado)^2);
```

$$NU := -0.2026423672\ 10^{-35}\,(0.2467401109\ 10^{23} + 0.1006128979\ 10^{17}\ \delta 2 + 0.1025669803\ 10^{10}\ \delta 2^2)\,(0.3084251385\ 10^{23} + 0.1257661225\ 10^{17}\ \delta 2 + 0.1282087253\ 10^{10}\ \delta 2^2)^2\,(-0.5000000005\ 10^{23} - 0.2004465000\ 10^{14}\ \delta 2 + 47273.\ \delta 2^2) \big/ (0.3390940625\ 10^{49}\ \delta 2 + 0.9048785879\ 10^{50}\ \delta 2^2 + 0.2378151662\ 10^{55} + 0.1106943519\ 10^{45}\ \delta 2^3 + 0.5642211677\ 10^{38}\ \delta 2^4 + 0.1533811601\ 10^{32}\ \delta 2^5 + 0.2345401445\ 10^{25}\ \delta 2^6 + 0.1912762668\ 10^{18}\ \delta 2^7 + 0.6499706461\ 10^{10}\ \delta 2^8)$$

```
subs(delta2=0,NU);
```

$$1.$$

Anexo 9

Cálculo de la eficiencia de acoplamiento, cuando se presenta un desplazamiento transversal en el eje x

```
restart: with(student): # PARA CALCULAR "NU" DEBIDO A UN
DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL eje x EN LA SALIDA
# ASUMIENDO R1=R1  Y w1^2=w1^2
assume(w1>0): assume(w0>0):
assume(k>0): assume(R1>0):
assume(delta1>0):
k:=(2*Pi)/lambda:  # no afecta
R1:=infinity:
w1:=w0:
ond1:=exp(-(x^2+y^2)/w0^2):
```

```
ond2:=exp(-((x+deltax)^2+y^2)/(w1^2))*exp((-k*I)*
((x+deltax)^2+y^2)/(2*R1)):
ond3:=exp(-((x+deltax)^2+y^2)
/(w1^2))*exp((+I*k)*((x+deltax)^2+y^2)/(2*R1)):
Nnum:=Doubleint(ond1*ond3,x=-infinity..infinity,y=-
infinity..infinity):
NdenUNO:=Doubleint(ond1*ond1,x=-infinity..infinity,y=-
infinity..infinity):
NdenDOS:=Doubleint(ond2*ond3,x=-infinity..infinity,y=-
infinity..infinity):
Nden:=NdenUNO*NdenDOS:
N:=(Nnum^2)/Nden:
ond1:
int(ond1,x=-infinity..infinity):
ond2:
int(ond2,x=-infinity..infinity):
ond3:
int(ond3,x=-infinity..infinity):
res1n:=int(ond1*ond3,x=-infinity..infinity):
RE1:=int(res1n,y=-infinity..infinity):
res2d:=int((ond1)^2,x=-infinity..infinity)
RE2:=int(res2d,y=-infinity..infinity):
res3d:=int(ond2*ond3,x=-infinity..infinity):
RE3:=int(res3d,y=-infinity..infinity):
sal:=(res1n^2)/(res2d*res3d):
NU:=(abs(RE1)^2)/(RE2*RE3);
```

$$NU := \left(e^{\left(-1/2 \frac{\Re(deltax^2)}{w0\sim^2} \right)} \right)^2$$

```
# evaluar "NU" para dejarla solamente en términos de delta
w0:=0.005:
NU:=exp(-1/2/w0^2*deltax^2)^2;
```

$$NU := \left(e^{(-20000.00000\ deltax^2)} \right)^2$$

Anexo 10

Cálculo de la eficiencia de acoplamiento, cuando se presenta un desplazamiento transversal tanto en el eje x y eje y

```
restart: with(student): # Calculo de "NU" debido a un
desplazamiento transversal tanto en el eje x y eje y en la
salida
```

```
assume(w1>0): assume(w0>0): assume(R1>0): assume(delta1>0):
assume(delta2>0):  # Asumir que w1, w0, R1, delta1 y delta2
son positivos
w1:=w0:   # Asumiendo que tanto el tamaño del spot en la
entrada y en la salida son iguales
R1:=infinity:  # considerando un frente de onda plano en la
salida
ond1:=exp(-(x^2+y^2)/w0^2):
ond2:=exp(-((x+deltax)^2+(y+deltay)^2)/(w1^2))*exp((-k*I)*
((x+deltax)^2+(y+deltay)^2)/(2*R1)):
ond3:=exp(-((x+deltax)^2+(y+deltay)^2) /(w1^2))*
exp((+I*k)*((x+deltax)^2+(y+deltay)^2)/(2*R1)):
Nnum:=Doubleint(ond1*ond3,x=-infinity..infinity,y=-
infinity..infinity):
NdenUNO:=Doubleint(ond1*ond1,x=-infinity..infinity,y=-
infinity..infinity):
NdenDOS:=Doubleint(ond2*ond3,x=-infinity..infinity,y=-
infinity..infinity):
Nden:=NdenUNO*NdenDOS:
N:=(Nnum^2)/Nden:  "NU"  en función de delta1 y delta2
ond1:
int(ond1,x=-infinity..infinity):
ond2:
int(ond2,x=-infinity..infinity):
ond3:
int(ond3,x=-infinity..infinity):
res1n:=int(ond1*ond3,x=-infinity..infinity):
RE1:=int(res1n,y=-infinity..infinity):
res2d:=int((ond1)^2,x=-infinity..infinity):
RE2:=int(res2d,y=-infinity..infinity):
res3d:=int(ond2*ond3,x=-infinity..infinity);
RE3:=int(res3d,y=-infinity..infinity):
sal:=(res1n^2)/(res2d*res3d):
NU:=(abs(RE1)^2)/(RE2*RE3);  # eficiencia de acoplamiento en
presencia de un desplazamiento en el eje x y eje y
```

$$NU := \left(\mathbf{e}^{\left(-1/2\,\frac{\Re(deltax^2+deltay^2)}{w0\sim^2}\right)}\right)^2$$

```
# Evaluación cuando solo existe un desplazamiento en el eje
y, siendo deltax = 0
w0:=0.005:          # 5 micras el spot de entrada
deltax:=0e-6:
NU :=exp(-1/2*(delta1^2+delta2^2)/w0^2)^2;
```

$$NU := (\mathbf{e}^{(-20000.00000\ deltay^2)})^2$$

Anexo 11

Cálculo de la eficiencia de acoplamiento, cuando se presenta un desplazamiento longitudinal en el eje z y simultáneamente un ángulo α

```
restart: with(student): # Cálculo de "NU" debido a un
desplazamiento en el eje z=delta3 y un ángulo en la salida
# Los ejes rotaos son xrot=-z*sin(alpha)+x*cos(alpha) Y
zrot=z*cos(alpha)+x*sin(alpha)
assume(w1>0): assume(w0>0): assume(k>0): assume(R1>0):
assume(alpha>0):  assume(delta3>0):  assume((sin(alpha))>0):
assume((cos(alpha))>0):
xrot:=-delta1*sin(alpha)+x*cos(alpha);
```

$$xrot := -\delta 3\sim \sin(\alpha\sim) + x\cos(\alpha\sim)$$

```
ond1:=exp(-(x^2+y^2)/w0^2):
ond2:=exp(-(xrot^2+y^2)/(w1^2))*exp((-k*I)*(xrot^2+y^2)/(2*R1)):
ond3:=exp(-(xrot^2+y^2)/(w1^2))*exp((+I*k)*(xrot^2+y^2)/(2*R1)):
Nnum:=Doubleint(ond1*ond3,x=-infinity..infinity,y=-
infinity..infinity):
NdenUNO:=Doubleint(ond1*ond1,x=-infinity..infinity,y=-
infinity..infinity):
NdenDOS:=Doubleint(ond2*ond3,x=-infinity..infinity,y=-
infinity..infinity):
Nden:=NdenUNO*NdenDOS:
N:=(Nnum^2)/Nden:
ond1:
int(ond1,x=-infinity..infinity):
ond2:
int(ond2,x=-infinity..infinity):
ond3:
int(ond3,x=-infinity..infinity):
res1n:=int(ond1*ond3,x=-infinity..infinity):
RE1:=int(res1n,y=-infinity..infinity):
res2d:=int((ond1)^2,x=-infinity..infinity):
RE2:=int(res2d,y=-infinity..infinity):
res3d:=int(ond2*ond3,x=-infinity..infinity):
RE3:=int(res3d,y=-infinity..infinity):
sal:=(res1n^2)/(res2d*res3d):
NU:=(abs(RE1)^2)/(RE2*RE3):  # “NU” en forma GRAL.
# calculo de “NU” para un valor en particular
n:=1:
w0:=0.005:
delta3:=0.0010:
```

```
lambda:=0.00155:
k:=(2*Pi)/lambda:
# sustituyendo los valores de R1=R1  Y w1^2=w1_cuadrado
R1:= (n^2*Pi^2*w0^4+delta3^2*lambda^2)/lambda^2/delta3:
w1_cuadrado:=((n^2*Pi^2*w0^4+delta3^2*lambda^2)/n^2/Pi/w0^2/Pi):

NU:=16*exp(delta3^2*Re(sin(alpha)^2*(2*R1-I*k*w1_cuadrado)/(-2*
w1_cuadrado*R1-2*cos(alpha)^2*w0^2*R1+k*cos(alpha)^2*w0^2
*w1_cuadrado*I)))^2*w0^2*w1_cuadrado*R1^2/((-4*(w1_cuadrado)^2*R1^2-
4*w1_cuadrado*R1^2*cos(alpha)^2*w0^2-4*w0^2*R1^2*w1_cuadrado-
4*w0^4*R1^2*cos(alpha)^2+k^2*w0^4*(w1_cuadrado)^2*cos(alpha)^2)^2+(2*(w1_
cuadrado)^2*R1*k*cos(alpha)^2*w0^2+4*w0^4*R1*k*cos(alpha)^2*w1_cuadrado+2
*k*w0^2*(w1_cuadrado)^2*R1)^2)^(1/2)*cos(alpha): # expression para "NU"
cuando se presenta un desplazamiento longitudinal y un desplazamiento
angular
```

$$NU := 73928.85764$$

$$e^{\left(0.2000000000\ 10^{-9}\ \Re\left(\frac{(0.1950186283\ 10^{20} - 0.3848734159\ 10^{19}\ I)\sin(\alpha)^2}{-0.506535468\ 10^{9} - 0.487546571\ 10^{9}\cos(\alpha)^2 + 0.96218354\ 10^{8}\ I\cos(\alpha)^2}\right)\right)} \cos(\alpha) \Big/ \sqrt{0.2759346570\ 10^{10}\cos(\alpha)^2 + 0.1379673285\ 10^{10}\cos(\alpha)^4 + 0.1433408611\ 10^{10}}$$

Anexo 12

Para el cálculo de las pérdidas de Fresnel

```
restart: with(student):
# Cálculo de las pérdidas de Fresnel
# De forma Gral. se tine que las pérdidas se obtienen
# Per_dB = - 10 log10 NU = -10 log10 Pout/Pin
# nF = índice de refracción de la fibra , nA = índice de
refracción del aire
# nL = índice de refracción de la lente
# Reflectividad = r
# Cálculo de la TRANSMITIVIDAD de fresnel para el sistema
completo
r1:=((nF-nA)/(nF+nA))^2:  # reflectividad
Per_fres1:=-10*(log10(1-r1)):
r2:=((nA-nL)/(nA+nL))^2:
Per_fres2:=-10*(log10(1-r2)):
r3:=((nL-nA)/(nL+nA))^2:
Per_fres3:=-10*(log10(1-r3)):
r4:=((nA-nL)/(nA+nL))^2:
Per_fres4:=-10*(log10(1-r4)):
r5:=((nL-nA)/(nL+nA))^2:
Per_fres5:=-10*(log10(1-r5)):
```

```
r6:=((nA-nF)/(nA+nF))^2:
Per_fres6:=-10*(log10(1-r6)):
transmita:=Per_fres1+Per_fres2+Per_fres3+Per_fres4+Per_fres5+
Per_fres6;
```

$$transmita := -\frac{10\ln\left(1-\frac{(nF-nA)^2}{(nF+nA)^2}\right)}{\ln(10)} - \frac{20\ln\left(1-\frac{(nA-nL)^2}{(nA+nL)^2}\right)}{\ln(10)} - \frac{20\ln\left(1-\frac{(nL-nA)^2}{(nA+nL)^2}\right)}{\ln(10)} - \frac{10\ln\left(1-\frac{(nA-nF)^2}{(nF+nA)^2}\right)}{\ln(10)}$$

```
### para microlente de SILICE nL = 1.444024
nF:=1.4682:
nA:=1:
nL:=1.444024:
TRANF:=simplify(transmita);
```

$$TRANF := 0.9013708950$$

Bibliografía

[1] Promax Electrónica www.promax.es

[2] Ing. Oscar M. Santa Cruz, *Las comunicaciones Opticas*.

[3] T. H. Mainman, *Nature* 18, p. 493 (1960).

[4] Dr. Rene Rivera, *Telecomunicaciones sobre Fibra Óptica*, Departamento de Telemática. Revista de las Tecnologías de la información y las comunicaciones, 2002.

[5] Diego F. Grosz, *Sistemas de comunicación por fibra óptica*, Departamento de Física y Matemáticas Tecnológico de Buenos Aires (ITBA).

[6] J. Chesnoy, O. Gautheron, L. Le Gourrierec, V. Lemaire, *Evolution of WDM Submarine Systems towards Terabit/s Integrated Networks*, Telecommunications of Alcatel, 1998.

[7] Richard R. A. Syms, *Scaling Laws for MEMS Mirror-Rotation Optical Cross Connect Switches*, IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 20, No. 7, July 2002.

[8] A. Dugan, L. Lightworks, and J. C. Chiao, *The optical switching spectrum: A primer on wavelength switching technologies*, IEEE Telecommunícations Magazine, May 2001.

[9] Peter De Dobbelaere, Ken Falta, Li Fan, Steffen Gloeckner, and Susant Patra; *Digital MEMS for Optical Switching*; IEEE Communications Magazine, March 2002.

[10] Eric Peeters, *Challenges inside Commercialization MEMS*, IEEE Ciencia e Ingenieria de computo, Informe sobre la ingeniería marginal de NAE 1996.

[11] D.J. Monk, T. Maudie, D. Stanerson, J. Wertz, G. Bitko, J. Matkin, and S. Petrovic, *Media Compatible Packaging and Environmental Testing of Barrier Cozting Encapsulated Silicon Pressure Sensors*, Solid State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head, South Carolina, June 1996.

[12] A. Ware, *New photonic-switching technology for all-optical networks*, IEEE Lightwave, vol. 17, No. 3, Mar 2000.

[13] N. A. Riza and S. Yuan, *Low Optical Interchannel Crosstalk, Fast Switching Speed, Polarisation Independent 2×2 Fiber Optic Switch Using Ferroelectric Liquid Crystals*, IEEE Elect. Lett., Vol. 34, No.13, June 1998.

[14] T. Sakata, *Improvement of Switching Time in a Thermocapillarity Optical Switch*, IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 19, No. 7, July 2001.

[15] D. A. Smith, A. Alessandro, J. E. Baran, D. J. Fritz, J. L. Jackel, and R. S. Chakravarthy, *Multiwavelength performance of an apodized acoustooptic switch*, IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 14, No. 9, Sep 1996.

[16] Lih-Yuan Lin, Evan L. Goldstein, and Robert W. Tkach, *On the Expandability of Free-Space Micromachined Optical Cross Connects*, IEEE Journal of Lightwave Technology.

[17] Lih-Yuan Lin, and Evan L. Goldstein, *Opportunities and Challenges for MEMS in Lightwave Communications*, IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 8, No. 1, January/February 2002.

[18] Patrick B. Chu, Shi-Sheng Lee, and Sangtae Park, *MEMS: The Path to Large Optical Crossconnects*, IEEE Cummunications Magazine, March 2002.

[19] Walter Grote, Cristian Henry, Ricardo Olivares y Fideromo Saavedra, *Desarrollo de una red experimental IP/WDM*; UTFSM, Canadá.

[20] T. Li, *MPLS and the evolving internet architecture*, IEEE Communications Magazine, Dec 1999.

[21] R. Ramaswami and K. N. Sivarajan, *Optical Networks, A Practical Perspective*, 1998.

[22] Jonn T. W. Yeow, and Samer S. Abdallah, *Novel MEMS L-Switching Matirx Optimal Cross-Connet Architecture: Desing and Analysis – Optical and Staircase – Switching Algorithms*, IEEE Jornal of Linghtware Technology, Vol. 23, No 10, Oct 2005.

[23] J. Kim, C. J. Nuzman, B. Kumar, D. F. Lieuwen, J. S. Kraus, A. Weiss, *1100x1100 Port MEMS-Based Optical Crossconnect With 4-dB Maximum Loss*, IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 15, No. 11, Nov 2003.

[24] David T. Neilson, R. Frahm, Paul Kolodner, C. A. Bolle, Roland Ryf, J. Kim, A. R. Papazian, C. J. Nuzman, A. Gasparyan, *256x256 Port Optical Cross-Connect Subsystem*, IEEE Jornal of Linghtware Technology, Vol. 22, No 6, June 2004.

[25] V. A. Aksyuk, F. Pardo, D. Carr, D. Greywall, H. B. Chan, M. E. Simon, A. Gasparyan, H. Shea, *Beam-Steering Micromirrors for Large Optical Cross-Connects*, IEEE Jornal of Linghtware Technology, Vol. 21, No 3, March 2003.

[26] T. W. Yeow, K. L. E. Law, and A. Goldenberg, *MEMS optical switches*, IEEE Communications Magazine, Vol. 39, No. 11, Nov 2001.

[27] Optics Software for Layout and Optimization *Optics Reference Version 6.1*.

[28] Bahaa E. A. Saleh y Malvin Carl Teich, *Fundamental of Photinics*, Edit. John Wiley & Sons, Inc. 1991.

[29] F. L. Pedrotti, L. S. Pedrotti, *Introduction to Optics*, Edit. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1993.

[30] Procesado de materiales con Láser, Universidad de Salamanca.

[31] Warren J. Smith, *Modern Optical Engineering*, Edit. McGraw-Hill, 2000.

[32] http://www.suss-microoptics.com/

Resumen de la Tesis

El objetivo de esta tesis es obtener el diseño de un conmutador óptico OXC 4×4 puertos en espacio libre a base de tecnología MEMS (microespejos), para lo cual se realizaron las siguientes etapas.

Partiendo de la posibilidad de que el conmutador OXC se podía realizar mediante dos configuraciones distintas crossbar y la de translación Z. Se decidió realizar el diseño con la configuración de translación Z. La única diferencia que se tiene en las dos configuraciones es el número de microespejos que emplean para realizar la conmutación. La configuración translación Z requiere solamente $2N$ microeospejos, mientras que la configuración crossbar requiere N^2 microespejos, siendo N la cantidad de puertos que puede tener el sistema.

Ya seleccionada la configuración para el conmutador OXC, se establece un sistema base para facilitar el análisis del conmutador. La única diferencia que presenta el sistema base con respecto al conmutador OXC final es que en el sistema base no se incluyen los microespejos. Los microespejos serán colocados en el sistema OXC final después de que se tenga el valor óptimo de $d2$.

En un principio el diseño del conmutador OXC se trabajo con las microlentes de $330, 900, 950, 1650\ y\ 2350\ \mu m$, sin embargo se fueron descartando algunas de ellas conforme se realizaban las etapas posteriores del diseño. Por lo que en las etapas finales del diseño sólo se contemplaron las microlentes de $330\ y\ 900\ \mu m$.

Con la ayuda del programa OSLO se realizaron las simulaciones para cuando en el sistema se presentara un desplazamiento $\delta_1\ o\ \delta_2$, en la fibra óptica de salida o entre las microlentes respectivamente. De la simulación sin desplazamiento se identificaron las aberraciones que se presentaron en el sistema.

Se obtuvieron las pérdidas de Fresnel y las pérdidas debidas a la abertura de las microlentes. Estas pérdidas son propias del sistema y de los elementos que integran el sistema, las cuales no se pueden evitar.

Después de comparar los resultados para las dos microlentes con las que se podría esquematizar el conmutador OXC. Se toma la decisión de elegir la microlente de $900\ \mu m$ como la mejor opción para el diseño final del conmutador. La selección de la microlente de $900\ \mu m$ se realizo debido a que con esta se tiene una mayor distancia entre las microlentes lo que nos servirá para poder diseñar un conmutador con una mayor cantidad de puertos.

También se calcularon las dimensiones de los microespejos así como las distancias a las que se deben de colocar para obtener la máxima transferencia de la luz que es introducida en el sistema de comunicaciones.

Trabajo Futuro

De acuerdo a los resultados que se obtuvieron en esta tesis para el diseño del conmutador óptimo OXC en espacio libre. El siguiente paso es su implementación para lo cual se tendrían que construir los microespejos MEMS de acuerdo a las dimensiones de diseño.

Al construirse los arreglos de los microespejos MEMS con sus respectivas restricciones y con las características de los elementos ópticos que se mencionan en esta tesis se podrá implementar el conmutador óptico para logra tener una red de comunicaciones completamente óptica.

Sin embargo a priori se hace una aproximación de los ángulos mínimos que se requerirán para lograr la conmutación de los 4 puertos de entrada con los cuatro puertos de salida, teniendo estos los valores de 10.58 y 66.09 º.

Por último se hace una aproximación de la cantidad máxima de puertos que se pueden tener para el conmutador con la configuración de translación Z, tomando en cuenta el desplazamiento $\delta_2 = 162\ mm$. Al contemplar la distancia $d2$ óptima se podrá tener una distancia máxima de $166.2\ mm$ entre las microlentes. Por lo que la cantidad de puertos aproximados para el diseño del conmutador en esta tesis es de 105 puertos.

Sin embargo para obtener la cantidad de puertos exactos que se pueden tener en este conmutador se tendría que llevar acabo un análisis más a fondo.

Índice de Figuras

Figura 1.1 Ancho espectral de las ventanas de trabajo en la fibra óptica 3
Figura 1.2 Efecto de la dispersión cromática en una fibra óptica monomodo 5
Figura 1.3 Sistema Conexión Cruz óptica en espacio libre con rotación de espejo de 4x4 7
Figura 1.4 Conmutador ópticos basado en Tecnología MEMS 2D en espacio libre 11
Figura 1.5 Representación de un Conmutador L de 8x8 13
Figura 1.6 Conmutador con Tecnología MEMS 3D o Analógico 15
Figura 1.7 Conmutador óptico OXC a) Con núcleo eléctrico b) Con núcleo óptico y c) Totalmente óptico 17
Figura 2.1 Representación de un rayo incidente y refractado en el límite de una superficie 23
Figura 2.2 Comparación de las trayectorias de un rayo real y un rayo paraxial formal 23
Figura 2.3 Caracterización de un haz por su coordenada y y su ángulo θ 24
Figura 2.4 Un haz que entra a un sistema óptico en una posición y_1 y ángulo θ_1 y resultara en una posición y_2 y ángulo θ_2 25
Figura 2.5 Ilustración cuando los elementos de la matriz de transferencia se igualan a cero 27
Figura 2.6 Para la Matriz óptica, en la propagación de una distancia d en espacio libre 27
Figura 2.7 Para obtener la Matriz óptica debido a la refracción en un límite plano con diferente índice de refracción 28
Figura 2.8 Para obtener la Matriz óptica debido a la refección en un límite esférico 29
Figura 2.9 Transmisión en una lente gruesa 29
Figura 2.10 Para obtener la Matriz óptica debido a la transmisión en una lente delgada 31
Figura 2.11 Para obtener la Matriz óptica para un espejo plano 31
Figura 2.12 Representación de un Haz Gaussiano 33
Figura 2.13 Variación del tamaño del spot $w(z)$ de un haz Gaussiano 33
Figura 2.14 Variación del radio de curvatura del frente de onda de un haz Gaussiano 34
Figura 2.15 Convención de signos para un haz Gaussiano 35
Figura 2.16 Representación de coma 39
Figura 2.17 Representación de Astigmatismo 40
Figura 2.18 Representación de la aberración esférica 42
Figura 2.19 Curva de intersección de rayos para aberración esférica de tercer y quinto orden 43
Figura 2.20 Curva de abertura anular para coma 43
Figura 2.21 Curva de intersección de rayos para coma de tercer y quinto orden 44
Figura 2.22 Curva de intersección de rayos para astigmatismo de tercer y quinto orden 44
Figura 3.1 Esquema del conmutador óptico OXC de 4x4 en espacio libre con rotación de espejos 47
Figura 3.2 Esquema del sistema base en estudio 47
Figura 3.3 Representación de las matrices de transferencia en el sistema base 48
Figura 3.4 Un haz Gaussiano al pasar a través de una superficie cuadrada 53
Figura 3.5 Casos de desalineación en la salida del sistema base 57
Figura 3.6 a) Desplazamiento δ_1 en la fibra de salida b) Desplazamiento δ_2 entre las dos microlentes c) Combinación de los casos anteriores δ_1 y δ_2 60
Figura 3.7 Gráfica cuando se presenta un desplazamiento δ_1 en la fibra óptica de salida 61
Figura 3.8 Gráfica cuando se presenta un desplazamiento δ_2 entre las microelntes 63
Figura 3.9 Gráfica cuando se presenta un desplazamiento δ_1 y δ_2 simultáneamente 66
Figura 3.10 Gráfica cuando se presenta un desplazamiento transversal en el eje x 67
Figura 3.11 Gráfica cuando se presenta un desplazamiento en el eje y 68
Figura 3.12 Gráfica cuando se presenta un desplazamiento longitudinal δ_1 en el eje z y un desplazamiento angular α 69
Figura 4.1 Captura y sistema base del conmutador OXC en OSLO 72
Figura 4.2 Esquema del sistema base para el conmutador OXC 72
Figura 4.3 Simulación del sistema base con la microlente de $330\ \mu m$ sin desplazamiento 74
Figura 4.4 Aberraciones del sistema base con la microlente de $330\ \mu m$ sin desplazamiento 75
Figura 4.5 Disminución de la aberración del sistema óptico base con la microlente de $330\ \mu m$ 75

Figura 4.6 Superficies en las que nos interesa el tamaño del spot de acuerdo a OSLO 76
Figura 4.7 Para obtener las pérdidas de Fresnel 77
Figura 4.8 Obtención de los valores de w_1 y R_1 cuando el sistema base presenta un..... 79
desplazamiento δ_1 en la fibra de salida, empleando la microlente de $330\ \mu m$
Figura 4.9 Gráfica en OSLO y Maple cuando en el sistema base se presenta un desplazamiento δ_1 80
en la fibra óptica de salida, empleando la microlente de $330\ \mu m$
Figura 4.10 Obtención de los valores de w_1 y R_1 cuando el sistema base presenta un..... 81
desplazamiento δ_2 entre las microelntes, empleando la microlente de $330\ \mu m$
Figura 4.11 Gráfica en OSLO y Maple cuando en el sistema base se tiene un desplazamiento δ_2 82
entre las microlentes, empleando la microlente de $330\ \mu m$
Figura 4.12 Simulación del sistema base con la microlente de $900\ \mu m$ sin desplazamiento 83
Figura 4.13 Aberraciones del sistema óptico con la microlente de $900\ \mu m$ sin desplazamiento 84
Figura 4.14 Obtención de los valores de w_1 y R_1 cuando el sistema base presenta un..... 86
desplazamiento δ_1 en la fibra de salida, empleando la microlente de $900\ \mu m$
Figura 4.15 Gráfica en OSLO y Maple cuando en el sistema base se presenta un desplazamiento δ_1 87
en la fibra óptica de salida, empleando la microlente de $900\ \mu m$
Figura 4.16 Obtención de los valores de w_1 y R_1 cuando el sistema base presenta un..... 88
desplazamiento δ_2 entre las microelntes, empleando la microlente de $900\ \mu m$
Figura 4.17 Gráfica en OSLO y Maple cuando en el sistema base se tiene un desplazamiento δ_2 , ... 88
entre las microlentes, empleando la microlente de $900\ \mu m$
Figura 4.18 Conmutador OXC Final en espacio libre de 4×4 puertos a base de dispositivos 92
MEMS

Índice de Tablas

Tabla 3.1 Características de las microlentes 46
Tabla 3.2 Distancias mínimas d1 y d2 para diferentes microlentes en Maple 10 50
Tabla 3.3 Comparación del Radio del spot w(z) con el Radio de la microlente en la superficie plana de la primer microlente, en Maple 51
Tabla 3.4 Comparación del Radio del spot w1 (z) con el Radio de la microlente en la superficie esférica de la microlente, en Maple 52
Tabla 3.5 Valores de R1 para cuando se presenta un desplazamiento δ_1 en la FO de la salida 61
Tabla 3.6 Valores de w1 para cuando se presenta un desplazamiento δ_1 en la FO de la salida 61
Tabla 3.7 Valores de la eficiencia de acoplamiento sin desplazamiento δ_1 en la FO de salida 62
Tabla 3.8 Valores de R1 para cuando se presenta un desplazamiento δ_2 entre las microlentes 63
Tabla 3.9 Valores de w1 para cuando se presenta un desplazamiento δ_2 entre las microlentes 63
Tabla 3.10 Valores de la eficiencia de acoplamiento sin desplazamiento δ_2 entre las microlentes 64
Tabla 3.11 Valores de R1 para cuando se presenta un desplazamiento en la FO de salida y otro entre las microlentes 65
Tabla 3.12 Valores de w1 para cuando se presenta un desplazamiento en la FO de salida y otro entre las microlentes 65
Tabla 3.13 Valores de la eficiencia de acoplamiento para cuando se presenta un desplazamiento en la FO de salida y otro entre las microlentes 65
Tabla 3.14 Valores de la eficiencia de acoplamiento para $\alpha = 0 \;\; y \;\; \alpha = 0.4$ 70
Tabla 4.1 Distancias óptimas para el sistema base, en Maple 72
Tabla 4.2 Distancias óptimas para el sistema base, en OSLO 73
Tabla 4.3 Comparación de las distancias d1, en Maple y OSLO 73
Tabla 4.4 Tamaños de spot en las superficies de interés en OSLO y en Maple para la microlente de $330\ \mu m$ 76
Tabla 4.5 Pérdidas debidas a la abertura de las superficies circulares de las microlentes, para la microlente de $330\ \mu m$ 77
Tabla 4.6 Recopilación de los resultados para cuando el sistema base se analiza con la microlente de $330\ \mu m$ 82
Tabla 4.7 Tamaños de spot para las superficies de interés en OSLO y Maple, para microlente $900\ \mu m$ 84
Tabla 4.8 Pérdidas debidas a la abertura de las superficies circulares de las microlentes, para la microlente de $900\ \mu m$ 85
Tabla 4.9 Recopilación de los resultados para cuando el sistema base se analiza con la microlente de $900\ \mu m$ 89