



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**CONMUTADORES ÓPTICOS MOEMS EN  
ARREGLOS Y REDES LOCALES DE SENSORES**

**T E S I S**

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA - TELECOMUNICACIONES**

**P R E S E N T A :**

**ALBERTO ISRAEL HERRERA MARTÍNEZ**



**TUTOR:**

**DR. SERGEI KHOTIAINTSEV**

**2010**

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Martynyuk Oleksandr

Secretario: Dr. Vicente Vivas Esau

Vocal: Dr. Khotiaintsev Sergei

1er. Suplente: Moctezuma Flores Miguel

2do. Suplente: García Garduño Víctor

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Ciudad Universitaria UNAM, México D.F.

**TUTOR DE TESIS:**

Sergei Khotiaintsev

---

**FIRMA**

## **Agradecimientos**

A mis padres, Juan Herrera y Guadalupe Martínez, por haberme apoyado en todo momento, por sus valiosos consejos, gracias a ustedes este trabajo y mi sueño de seguir adelante han visto la luz.

A mis hermanas Susy, Mari y a mis sobrinos Susy, Luis, Bryan, por dar esa alegría a la familia y esa unión familiar tan fuerte.

A Claudia Alejandra, por tu apoyo y comprensión, por saber escucharme en esos momentos difíciles, pero sobre todo por el inmenso amor que me has brindado, gracias mi niña, te amo.

Al Dr. Sergei Khotiaintsev, por la paciencia, la experiencia y la confianza brindada para la realización de este trabajo.

A la UNAM, por abrirme sus puertas y permitirme ser un orgulloso miembro de la Universidad más importante de toda Latinoamérica.

A mis amigos Alejandra, Ramiro, Salomón, Alfredo, Selene, Juan, Ivan, Paty y a todos mis compañeros de generación, por demostrarme que la amistad va más allá de solo haber sido compañeros, gracias por todo el tiempo compartido.

## Resumen

En este trabajo se propone un nuevo tipo de conmutador óptico y se investigan sus características. A diferencia de los conmutadores ópticos existentes, el nuevo conmutador utiliza el movimiento vibratorio de una viga en dos situaciones, una viga con una fibra óptica integrada y una viga con un espejo en un extremo para llevar a cabo la conmutación. Se considera y se analiza la posibilidad de implementación del conmutador en dos escalas: tamaño normal (decenas de milímetros) y en forma de MOEMS (tamaños micrométricos).

El conmutador está destinado principalmente a la conmutación de fibras ópticas en arreglos y redes de sensores ópticos, en donde la conmutación se realiza con intervalos de tiempo relativamente largos (del orden de milisegundos) y por esto el principio mecánico de conmutación es totalmente aceptable.

Se presenta también una revisión del estado del arte de los conmutadores ópticos convencionales y en forma de MOEMS; se hace una propuesta de un nuevo tipo de conmutador óptico y se evalúan las características del mismo para dos variantes de su implementación: un dispositivo de tamaños milimétricos, y un dispositivo en forma de MOEMS, micrométrico.

La primera variante, en forma de maqueta funcional, se implementó con 1x10 puertos y 1x58 puertos. La segunda variante en forma de MOEMS se desarrolló teóricamente utilizando el software especializado Coventor Ware y luego se investigaron sus características utilizando el software de simulación por computadora ANSYS.

Los resultados del presente trabajo confirman la viabilidad de implementación de los conmutadores de tipo vibratorio con las características adecuadas para su utilización en redes de fibras ópticas.

# Índice

	Pág.
1. Introducción.....	1
— Antecedentes.....	1
— Objetivo general.....	1
— Objetivos particulares.....	1
— Metodología.....	2
2. Estado del arte de los conmutadores ópticos.....	3
2.1 Conmutadores ópticos convencionales.....	3
2.1.1 Interruptores ópticos.....	3
2.1.2 Conmutación térmica óptica.....	4
2.1.3 Interruptor de amplificador óptico semiconductor.....	6
2.1.4 Conmutador óptico de cristal líquido.....	6
2.1.5 Conmutador electro óptico.....	7
2.1.6 Conmutación de guías de onda basados en burbujas.....	8
2.2 Conmutadores MOEMS.....	9
2.2.1 Avances en la tecnología MOEMS.....	9
2.2.2 Parámetros clave en componentes de fibras ópticas.....	11
2.2.3 Movimiento directo de las fibras ópticas con MOEMS.....	11
2.2.4 Uso en una onda colimada.....	13
2.2.5 Matrices 2D de conmutadores.....	15
2.2.6 Matrices 3D de conmutadores.....	16
2.3 Conclusiones.....	23
2.4 Bibliografía.....	24
3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos $1 \times n$ .....	26
3.1 Propuesta conceptual de un dispositivo conmutador óptico multipuertos....	26
3.2 Implementación y caracterización experimental de un modelo a gran escala	27
3.2.1 Modos de vibración de una viga anclada en un extremo.....	28
3.3 Implementación de la maqueta a gran escala.....	33
3.3.1 Implementación de la primera variante de la maqueta funcional a gran escala.....	33
3.3.2 Implementación de la segunda variante de la maqueta funcional a gran escala.....	35
3.4 Realización de experimentos.....	38
3.4.1 Experimento #1.....	38
3.4.2 Experimento #2.....	49
3.5 Conclusiones.....	56
3.6 Bibliografía.....	57

4. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico MOEMS.....	58
4.1 Diseño del dispositivo a pequeña escala.....	58
4.2 Evaluación de las características del dispositivo.....	62
4.3 Conclusiones.....	64
5. Discusión.....	65
6. Conclusiones Generales.....	67
Anexos	
A.- Simulación mecánica de una viga por medio de ANSYS.....	A1
B.- Proceso de fabricación seleccionado para el conmutador óptico a pequeña escala: PolyMUMPS.....	B1

# 1. Introducción

## Antecedentes

El desarrollo de dispositivos microelectromecánicos (MEMS) ha tenido gran avance debido a la demanda de dispositivos funcionales de tamaño reducido y pequeño gasto energético por lo que se encuentran ahora en su auge.

En este rubro, los dispositivos ópticos MEMS, también conocidos como MOEMS (Micro Opto Electromechanical Systems) han prosperado gracias al desarrollo de diferentes aplicaciones de micro óptica.

En particular los conmutadores e interruptores ópticos MOEMS encuentran aplicaciones en redes de comunicaciones ópticas. Otra aplicación importante de los conmutadores MOEMS se encuentra en el área de instrumentación óptica, en donde los arreglos de sensores ópticos necesitan conmutadores ópticos multipuertos.

Los conmutadores MOEMS también encuentran área de aplicación en la instrumentación. Los sistemas de medición necesitan de arreglos de sensores ópticos. Es así como conmutadores, igual que diversos sensores MEMS, son una opción en el sensado óptico.

Sin embargo, las perspectivas y la competencia de los conmutadores ópticos MOEMS en las redes de fibra óptica (redes de telecomunicaciones y redes de sensores de fibra óptica) aun no están claras, por lo que es de un gran interés realizar investigaciones y desarrollos prácticos sobre estos elementos e intentar adaptarlos en el diseño de las redes de sensores ópticos.

## Objetivo general

Verificar la viabilidad de desarrollo de un conmutador multipuertos MOEMS de tipo vibratorio para aplicaciones en los arreglos de sensores ópticos.

## Objetivos particulares

1. Proponer un nuevo conmutador MOEMS multipuertos ( $1 \times n$ ) de tipo vibratorio con características adecuadas para la conmutación de fibras ópticas en arreglos y redes de sensores ópticos.
2. Verificar experimentalmente la viabilidad de la conmutación de las fibras ópticas con los conmutadores de tipo vibratorio.
3. Desarrollar teóricamente el nuevo conmutador en forma de MOEMS, utilizando el software especializado para el diseño y análisis de las características de los MOEMS.

## 1. Introducción

---

4. Proponer los procesos tecnológicos adecuados para la fabricación del conmutador MOEMS a desarrollar.
5. Verificar las características del conmutador MOEMS propuesto por medio de simulación por computadora.

## **Metodología**

Utilización de métodos teóricos, tales como el desarrollo y empleo de modelos matemáticos aplicados al comportamiento electromecánico del dispositivo propuesto.

Aplicación de métodos experimentales para la obtención de datos sobre las características de las maquetas funcionales de los conmutadores ópticos multipuertos.

Utilización de herramientas de software para realizar el diseño de un conmutador MOEMS y para la evaluación de sus características.

## 2. Estado del arte de los conmutadores ópticos

### 2.1 Conmutadores ópticos convencionales

#### 2.1.1 Interruptores ópticos

Los interruptores ópticos presentan una gran variedad de aplicaciones en redes ópticas de transmisión de datos, así como en redes de sensores. Las características variarán de acuerdo a las necesidades, como número de puertos y tiempo de actuación.

Tabla 2.1. Tiempo de actuación de los conmutadores de acuerdo a las aplicaciones.[1]

Aplicación	Tiempo de actuación requerido	Número de puertos
Aprovisionamiento de las rutas de señales ópticas	1-10 ms	Mayor a 1000
Conmutación de protección	1-10 ms	2 – 1000
Conmutación de paquetes	1 ns	Mayor a 100
Modulación externa	10 ps	1

La primera aplicación de los interruptores ópticos es la de aprovisionamiento de las rutas de luz. En esta aplicación los interruptores son utilizados dentro de los cruces de conexión de longitud de onda para reconfigurarlos y proveer nuevas rutas de luz. En esta aplicación los interruptores son reemplazos de los paneles de parcheo manuales.

En la conmutación de protección los interruptores son utilizados para conmutar el tráfico de una fibra primaria a otra en caso de que la primera falle. La operación completa desde la detección de la falla, la comunicación de la falla a la red adecuada y el tiempo de interrupción normalmente lleva algunas decenas de milisegundos.

Los conmutadores también son importantes en las redes de conmutación de paquetes. En estas redes, los conmutadores son utilizados para cambiar señales en una base paquete por paquete. Para esta aplicación, el tiempo de conmutación debe ser mucho más pequeño que la duración del paquete. Por ejemplo, un paquete de 53 bytes en una red de 10Gb/s tiene una duración de 42ns por lo que el tiempo de conmutación debe ser de pocos nanosegundos.

Otro uso de los conmutadores es como moduladores externos para encender y apagar la fuente de luz para el envío de datos. En este caso el tiempo de interrupción debe ser una pequeña fracción de la duración de bit. Un modulador externo para una señal de 10Gb/s (con una duración de bit de 100ps) debe tener un tiempo de conmutación de 10ps (o equivalente al tiempo de subida y bajada).

A continuación se analizan las tecnologías más importantes de conmutación óptica.

### 2.1.2 Conmutación térmica óptica

Existen varios tipos de interruptores termo ópticos. Su principio de funcionamiento consiste en el cambio del índice de refracción de un material en función de su temperatura.

Pequeños cambios térmicos del índice de refracción pueden alterar significativamente la distribución de la intensidad de la luz dentro de las guías de onda, especialmente en sistemas acoplados.

Estos interruptores son esencialmente interferómetros integrados Mach-Zehnder, por lo que al variar el índice de refracción en uno de los brazos del interferómetro, la diferencia relativa de la fase entre los brazos puede cambiar, resultando en una conmutación de la entrada de un puerto a otro.

El principio de funcionamiento es simple, sin embargo las investigaciones sobre esta técnica no son tan profundas como en otras técnicas de conmutación óptica. Esto se debe, principalmente, a que la velocidad de conmutación de estos interruptores es relativamente lenta. Los polímeros se han convertido en los perfectos candidatos para el uso de esta técnica, debido a sus grandes coeficientes termo ópticos y su baja conductividad térmica, por lo que los dispositivos basados en polímeros tienen una alta eficiencia de conversión de potencia. Estos conmutadores tienen la ventaja de que no poseen partes móviles.

Usando microcalentadores se pueden inducir gradientes de temperatura dentro de estas estructuras de guías de onda, manejando así los cambios en el perfil de índice de refracción, lo que es utilizado para conmutar las rutas de luz.

Los dos mecanismos principales involucrados en el cambio del índice de refracción de un material son:

1. El cambio en la polarización de un material con la temperatura.
2. El decremento de la densidad de un material con la expansión térmica.

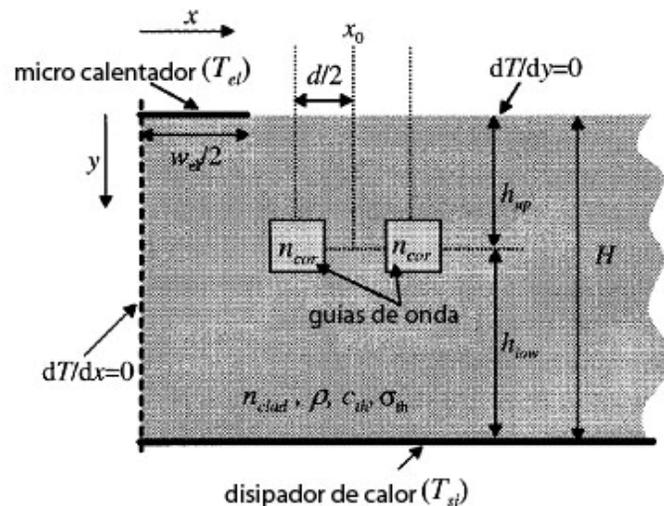


Figura 2.1. Esquema de un conmutador termo óptico con dos guías de onda (vista transversal).

## 2. Estado del Arte de los conmutadores ópticos

---

Para que el calentador induzca energía térmica se hace circular una corriente a través de él. Para obtener la mayor diferencia entre los índices de refracción de las dos ondas se deben tener en cuenta los siguientes puntos:

- 1.- El ancho del micro calentador  $W_{el}$  debe ser tan pequeño como sea posible.
- 2.- El revestimiento de la parte superior a la guía de onda  $h_{up}$  debe ser tan delgado como sea posible.
- 3.- El revestimiento de la parte inferior a la guía de onda  $h_{low}$  debe ser tan grueso como sea posible.
- 4.- El punto medio entre las dos guías de onda  $x_0$ , coincide con la posición de máximo cambio de temperatura en la dirección  $x$ .

Una variante al dispositivo aprovecha el efecto termo óptico en los polímeros. El índice de refracción del material disminuye cuando se aumenta su temperatura. Por lo que se puede formar un interruptor óptico de reflexión total interna si se coloca un calentador en un punto de cruce de una unión simétrica con forma de “x” como lo muestra la figura 2.2.

La señal de la entrada 1 es llevada a la salida 2 (estado cruzado) cuando no se ha encendido la fuente de calor. Cuando se aplica suficiente calor, la luz es reflejada en el punto cruzado de la unión con forma de “x” y su salida será la 2. La distribución de la temperatura tiene un campo gradiente a lo largo del cruce de unión tipo x por lo que la luz no es reflejada con un ángulo de reflexión nítido sino con la forma de un arco. Sin embargo, se le han realizado ciertas modificaciones. Se amplían las áreas en la sección de cruce de guías de onda para ayudar en la eficiencia de la propagación de la luz.

Para disminuir las pérdidas ópticas causadas por la difracción, las guías de onda son ensanchadas en la sección de cruce de guías de onda. Las estructuras de “cuerno” son utilizadas para unir las guías de onda ensanchadas con los accesos de entrada y salida de las guías de onda.[3]

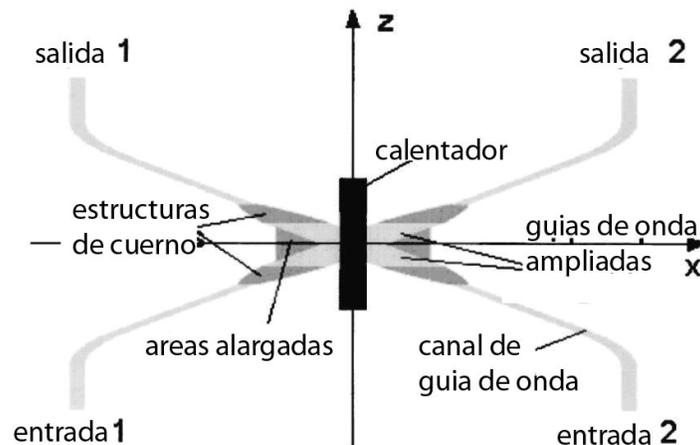


Figura 2.2. Conmutador termo óptico de cruce de guías de onda.

### 2.1.3 Interruptores de Amplificador Óptico Semiconductor (Semiconductor Optical Amplifier, SOA)

Los SOA pueden ser utilizados como interruptores "encendido-apagado" variando el voltaje de bias (voltaje de polarización) del dispositivo. Si se reduce el voltaje de bias, no se alcanza una población de inversión, y el dispositivo absorbe las señales de entrada, si el voltaje de bias está presente, el dispositivo amplifica la señal. La combinación de la amplificación en el estado "encendido" y la absorción en el estado "apagado" hacen que este dispositivo alcance razones de extinción muy grandes. La velocidad de interrupción es del orden de 1ns, sin embargo es un componente caro y además difícilmente se puede lograr independencia de la polarización debido a la alta orientación direccional de la región activa del láser, cuya anchura casi siempre es mayor que su altura.

### 2.1.4 Conmutadores ópticos de cristal líquido

El cristal líquido es un material en el cual sus moléculas pueden ser alineadas aplicando un pequeño campo eléctrico. Es muy útil para realizar interruptores debido a su alta birrefringencia, baja energía de consumo y bajo voltaje de polarización.

Las células de cristal líquido ofrecen otra manera de realizar pequeños conmutadores ópticos, estos conmutadores hacen uso de los efectos de polarización o cambios en el índice de refracción para realizar las funciones de conmutación como se muestra en la figura 2.3.

Aplicando un voltaje a una célula adecuadamente diseñada, es posible provocar un giro en la polarización de la luz que pasa a través de la célula. El giro de la polarización en la célula de cristal líquido no tiene que ser de naturaleza binaria (puede ser controlado análogamente con un control de voltaje).

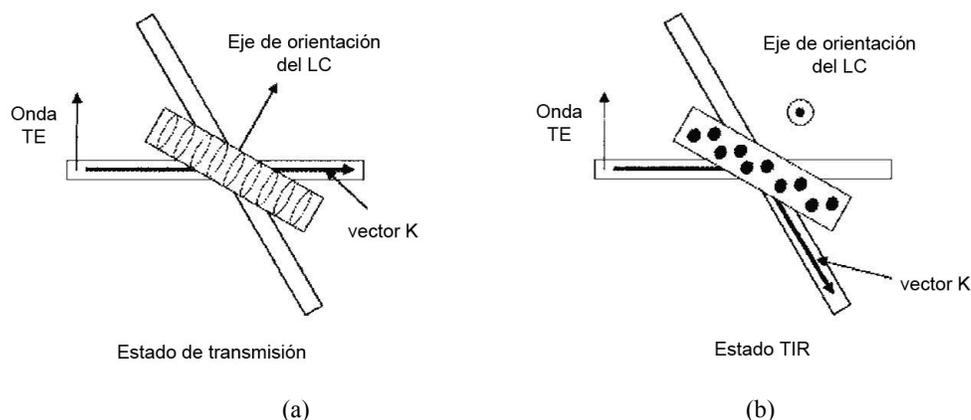


Figura 2.3. Estado de (a) transmisión y (b) reflexión total interna del cristal líquido.

Para sistemas comerciales con gran número de puertos, se han utilizado conmutadores de cristal líquido que controlan la reflexión y refracción de la luz en la superficie.

## 2. Estado del Arte de los conmutadores ópticos

El índice de refracción en un cristal líquido es anisotrópico y puede ser controlado con el alineamiento relativo de las moléculas en la dirección de propagación de la luz en el material. El cambio del índice de refracción es suficiente como para causar refracción del haz de luz a través de la superficie, o reflexión total interna (Total Internal Reflection, TIR) alejando el haz de la superficie. De esta manera se puede controlar la cantidad de luz que se refracta o se refleja.

Los conmutadores de cristal líquido son dispositivos de estado sólido, por lo que pueden ser manufacturados en volumen a bajo costo.

### 2.1.5 Conmutadores electro ópticos

Un conmutador electro óptico puede ser realizado utilizando una configuración de modulador externo. El material más comúnmente usado es el niobato de litio ( $\text{LiNbO}_3$ ).

En una configuración Mach-Zehnder, se varía la longitud relativa de las rutas entre los dos brazos. Un interruptor electro óptico puede cambiar su estado muy rápidamente. Esta velocidad está determinada por la capacitancia, la inductancia y la resistencia en la configuración del electrodo.

En una configuración con células de cristal líquido el haz de luz entra con cierto estado de polarización (SOP, State of polarization), pasando a través de un divisor de haz por polarización, que separa el haz en sus dos modos de polarización. Los dos haces resultantes viajan a través de células de cristal líquido que pueden o no modificar su polarización. Al final, el haz de salida atravesará un acoplador direccional, cuyo acoplamiento se varía cambiando el voltaje y así, el índice de refracción del material en la región de acoplamiento.

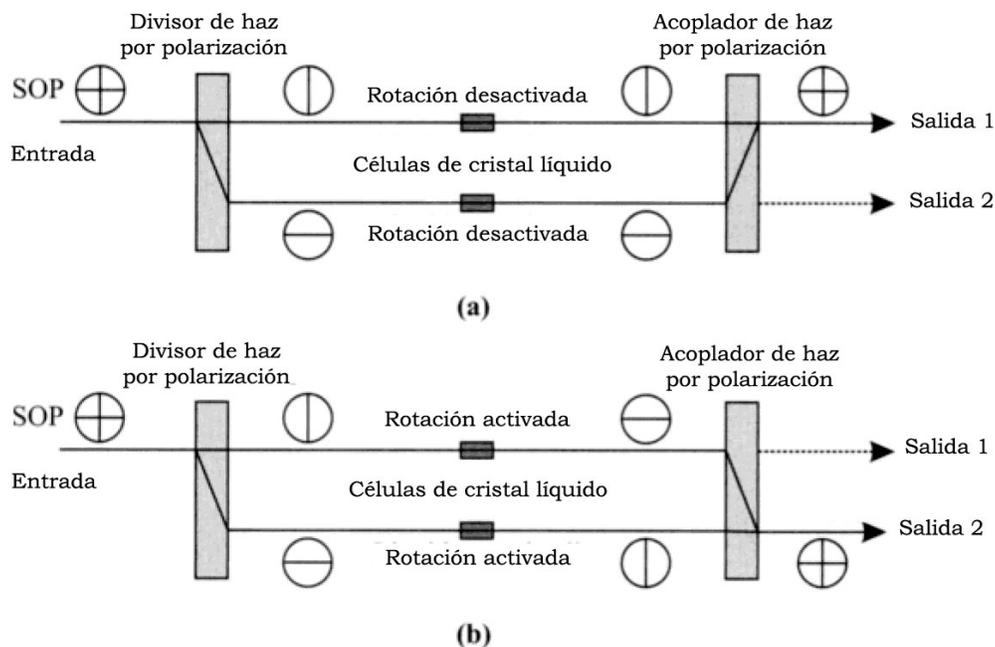


Figura 2.4. Esquema de un interruptor de cristal líquido de 1x2 (a) celda pasiva, (b) celda activa.

## 2. Estado del Arte de los conmutadores ópticos

---

La figura 2.4(a) muestra el esquema del interruptor cuando la célula de cristal líquido se encuentra sin rotación, ocasionando que la luz salga por la fibra de salida 1. En la figura 2.4(b) se observa que cuando la célula de cristal líquido se activa aplicando un voltaje ésta gira, provocando que el haz de luz salga por la fibra de salida 2.

En principio es posible realizar interruptores más grandes en el mismo sustrato integrando varios interruptores de 2x2. Sin embargo, suelen tener altas pérdidas dependientes de polarización (Polarization Dependent Loss, PDL).

### 2.1.6 Conmutadores de guía de onda basados en burbujas

En otro tipo de conmutador óptico la actuación del interruptor está basada en una tecnología similar a la utilizada en impresoras de inyección de tinta. Consiste en guías de onda que se entrecruzan.

El interruptor tiene trincheras longitudinales, y los puntos de cruce de las guías de onda alinean las trincheras. Las trincheras están llenas de un líquido con índice de refracción igual al de las guías de onda.

En condiciones normales, la luz se propaga a través de una guía de onda, pasa por los puntos de entrecruce y sigue por la misma guía de onda hasta la salida. Cuando se calienta el fluido, se forma una burbuja de aire, esta burbuja anula el acoplamiento cambiando el índice de refracción en las trincheras provocando una reflexión de la luz en ese punto.

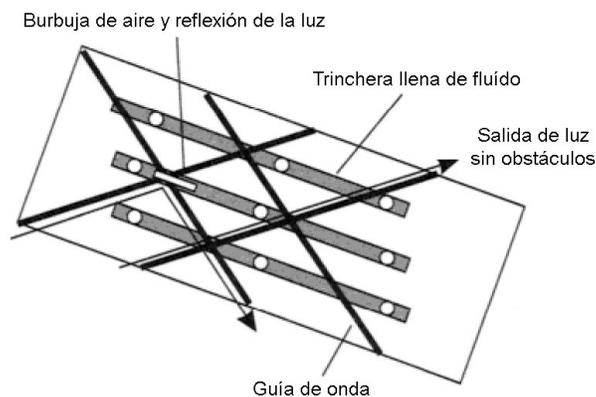


Figura 2.5. Esquema del conmutador de burbuja.

Una variante de este dispositivo que aprovecha el mismo principio de funcionamiento se muestra en la figura 2.6. La figura muestra una guía de onda del punto A al punto B y otra que la intersecta perpendicularmente de C a D, además el canal con la sustancia intersecta a ambas guías a 45°. En un estado “encendido”, el canal está en su fase líquida y las rutas AB y CD son independientes, cuando está en su estado “apagado” se encuentra reflejando y el canal CE se aísla.

## 2. Estado del Arte de los conmutadores ópticos

---

La célula interruptora que contiene un gas o líquido volátil cruza las guías de onda ópticas con un ángulo de 45°. La sustancia en su faceta líquida tiene un índice de refracción muy cercano al de la guía de onda. En su estado seco la célula es totalmente reflectiva debido a que el canal contiene gas.[4]

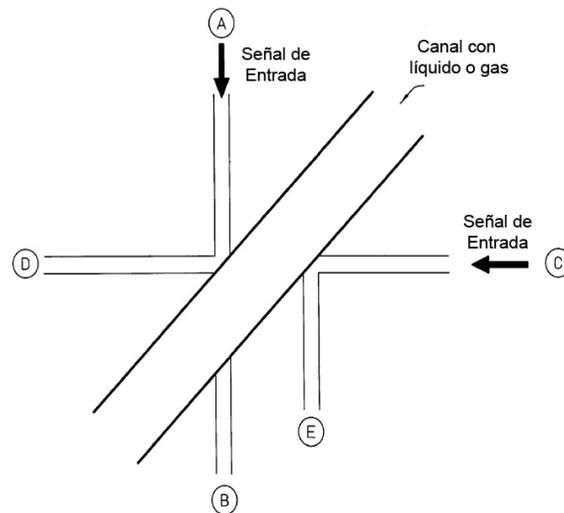


Figura 2.6. Interrupción óptica por medio de un canal con sustancia volátil.

Una vez que se ha cambiado el estado de la sustancia, no se requiere energía para mantenerlo así.

Este conmutador presenta un funcionamiento de  $n \times 2$  puertos.

## 2.2 Estado del arte de los conmutadores MOEMS

### 2.2.1 Avances en la tecnología MOEMS

Nuevos avances en la tecnología de internet y redes de datos de fibra óptica han impulsado el crecimiento en las redes de banda ancha. Estos requerimientos de banda ancha solo pueden ser abastecidos a través de redes ópticas. Los avances se han suscitado debido a diversas necesidades, como implementación de nuevos servicios, reducción de costos, mayor tasa de bits, menor potencia de consumo y protocolos más transparentes, donde el objetivo es brindar redes completamente ópticas a bajo costo.

Debido a esta creciente demanda comercial en sistemas ópticos, incluyendo telecomunicaciones y comunicaciones ópticas, se requiere la miniaturización de los elementos que conforman estos sistemas. Esto ha dado lugar a dos tecnologías: la micro óptica y los MEMS, que conjuntamente dieron lugar a la tecnología MOEMS.

La tecnología MOEMS está constituida por 3 áreas principales: Mecánica, Electrónica y Óptica, como se muestra en la figura 2.7.

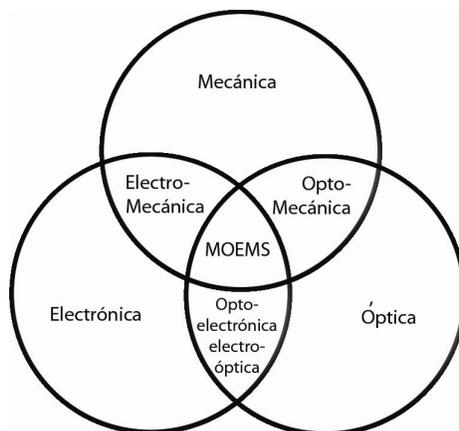


Figura 2.7. Interacción de la Electrónica, Mecánica y Óptica que resulta en los MOEMS.

La fabricación de MOEMS se lleva a cabo en 3 fases. La primera es el diseño funcional del dispositivo, en este proceso se determinan las características geométricas y ópticas, esto depende de las propiedades de los materiales deseados y el desempeño deseado. La segunda fase es el diseño electromecánico del dispositivo, en la cual, los cálculos mecánicos y eléctricos son obtenidos. La tercera fase consiste en la fabricación, donde procesos de depósito y remoción de material utilizando patrones son llevados a cabo, por lo que la fabricación de MOEMS se puede desarrollar masivamente.

Tabla 2.2. Características de los conmutadores ópticos existentes.[1]

Tipo	Tamaño del arreglo	Pérdidas(dB)	Diafonía(dB)	PDL(dB)	Tiempo de conmutación
Mecánico común	8x8	3	55	0.2	10 ms
2D MEMS	32x32	5	55	0.2	10 ms
3D MEMS	1000x1000	5	55	0.5	10 ms
Silicio termo óptico	8x8	8	40	Baja	3 ms
Basado en burbujas	32x32	7.5	50	0.3	10 ms
Cristal líquido	2x2	1	35	0.1	4 ms
Polímero	8x8	10	30	Baja	2 ms
Electro óptico LiNbO <sub>3</sub>	4x4	8	35	1	10 ms
SOA	4x4	0	40	Baja	1 ms

La tecnología MOEMS ha impulsado el desarrollo de redes ópticas de siguiente generación con interruptores completamente ópticos para restauración y aprovisionamiento de las redes.

## 2. Estado del Arte de los conmutadores ópticos

Estos interruptores deben tener bajas pérdidas de inserción, baja diafonía y tiempos de conmutación pequeños (menores a 10 ms).[5]

Escáners, fotodiodos, displays, filtros, espejos, interruptores, fototransistores y componentes de fibra óptica pueden ser fabricados utilizando tecnología MOEMS.[6]

### 2.2.2 Parámetros clave en componentes de fibra óptica

Pérdidas de inserción:

Representan la reducción que sufre la señal en dB cuando entre emisor-receptor se inserta un dispositivo. Normalmente se acepta un máximo del 20% (1 dB).

$$L_i = 10 \log \left( \frac{P_{in}}{P_{i\_out}} \right)$$

Interferencia:

Describe cuánta de la potencia de la luz entrante es dirigida a otro canal.

$$C_{i,j} = 10 \log \left( \frac{P_{j\_out}}{P_{in}} \right)$$

Reflexión de vuelta

Es la parte de la luz que se refleja desde el componente. El problema principal es que ésta provoca retroalimentación parásita no deseada en la fuente de luz (fluctuaciones en la potencia y longitud de onda).

$$R = 10 \log \left( \frac{P_r}{P_{in}} \right)$$



Figura 2.8 Parámetros clave en componentes de fibras ópticas.

### 2.2.3 Movimiento directo de la fibra óptica con MOEMS

La manera más sencilla de manipulación de luz con MOEMS es el movimiento directo de las fibras o guías de onda. Estas fibras son colocadas en vigas ancladas por un extremo (cantilevers) y utilizan actuación electrostática o térmica.

El principio de estos interruptores se basa en la deflexión mecánica de una viga cantilever que porta una fibra de entrada como se muestra en la figura 2.10.

## 2. Estado del Arte de los conmutadores ópticos

Para lograr este movimiento se utilizan actuadores térmicos, debido a que poseen fuerzas mayores para mover esa cantidad de masa. Para detener el movimiento entre los estados de interrupción se utilizan elementos de control mecánico.[6]

La posición relativa inicial de las terminales de dos guías de onda o fibras debe ser paralela, asegurando pérdidas mínimas.

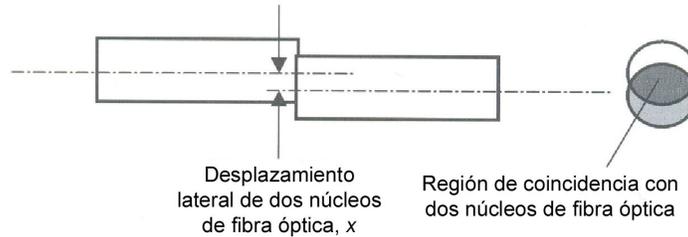


Figura 2.9 Desplazamiento lateral de dos fibras ópticas o guías de onda.

Las primeras estructuras se realizaron con tecnologías SiO<sub>2</sub>/Si.

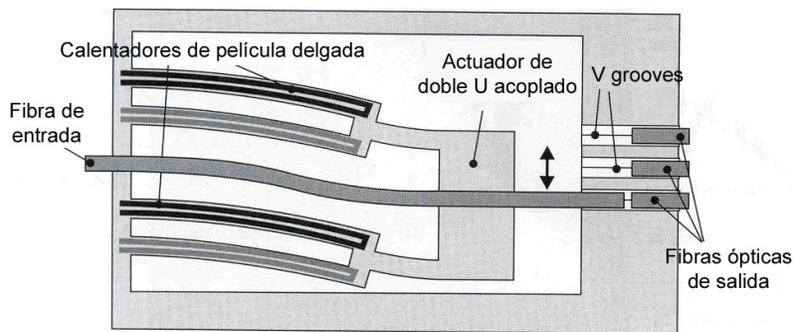


Figura 2.10. Esquema de acoplamiento de actuador en forma de "U".

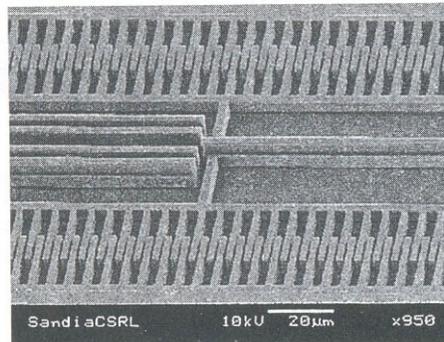


Figura 2.11. Conmutador de fibras ópticas con actuación térmica (fotografía).

## 2. Estado del Arte de los conmutadores ópticos

---

Existen reportes de arreglos de interruptores con cantilever de 8x8 que han demostrado 50dB de aislamiento entre canales y un ancho de banda de 1300 – 1650 nm. Este ancho de banda se debe a que no hay componentes ópticos en el camino de la guía de onda, solo el efecto Fabry-Perot en el espacio de aire con una dependencia menor a 0.2 dB, sin embargo las pérdidas de inserción son grandes debido al gran número de reflexiones de Fresnel en los espacios de aire entre el cantilever y la guía de onda.

Las fibras se colocan en una ranura o canal en forma de “V” (V-groove) para obtener un alineamiento más exacto en diferentes posiciones.

Debido al largo actuador térmico, el tiempo de interrupción es cercano a 100 ms.

### 2.2.4 Uso en una onda colimada

En una fuente de luz, los rayos salen en todas direcciones, pero con un colimador se pueden homogeneizar estas trayectorias, obteniendo haces de luz paralelos. Se puede colimar una onda con microlentes o arreglos de microlentes.

Mediante componentes MOEMS las funciones de transformación de la onda son las siguientes:

- Reflexión de la onda con un microespejo de exploración, cambiando la dirección de propagación de la onda entrante, de manera que la onda puede ser dirigida a la fibra de salida seleccionada.
- Cambiar la dependencia de la longitud de onda de la transmitancia de un arreglo de dos espejos (resonador de Fabry-Perot) alterando la distancia entre los dos espejos semireflectivos.
- Cambiar la dirección de propagación del haz entrante con un microprisma, insertándolo o removiéndolo del camino del haz con un microactuador.
- Desplazamiento lateral del haz con una placa paralela al plano.
- Cambiar la intensidad o dirección del haz con componentes ópticos difractivos.

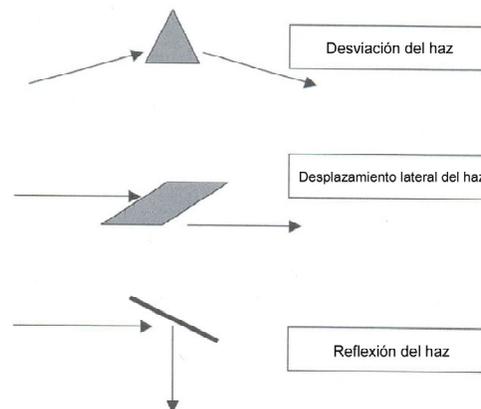


Figura 2.12. Diferentes tipos de manipulación del haz colimado en la salida de las fibras ópticas.

## 2. Estado del Arte de los conmutadores ópticos

---

Para lograr sistemas de fibra óptica de alta calidad se deben cubrir ciertos requerimientos:

- Montaje de los microlentes: Separados por  $250\mu\text{m}$  o múltiplos debido a un estándar en arreglos de fibras
- Exactitud de la dirección del rayo: Para obtener altas eficiencias de acoplamiento las ondas colimadas deben ser paralelas unas con otras con un error menor a  $1\text{ mrad}$  ( $0.05$  grados)

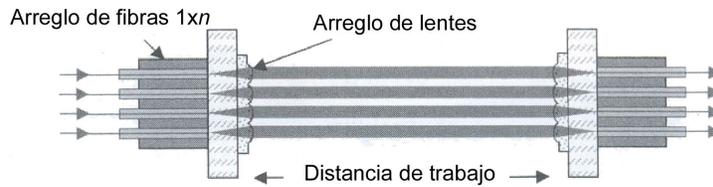


Figura 2.13. Configuración típica de dos arreglos de lentes colimadores separados por una distancia de trabajo.

- Perfil de la superficie del microlente: Debido a la apertura numérica de las fibras ópticas monomodo ( $0.11$  a  $0.13$ ) el microlente debe tener una apertura numérica de  $0.15$
- Homogeneidad de la distancia focal: Para obtener parámetros idénticos en todas las conexiones se permite un máximo de  $3\%$  de discrepancia en distancias focales de los lentes en diferentes arreglos y de  $0.5\%$  en un solo arreglo.

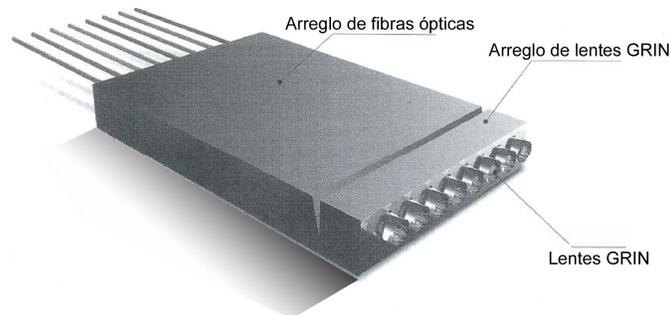


Figura 2.14. Esquema de montaje de un arreglo de fibras ópticas con un arreglo de lentes en *V-grooves*.

Para lograr los arreglos de colimadores es necesario realizar procedimientos de montaje para ajustar los microlentes al arreglo de fibras, tal como se puede observar en la figura 2.15.

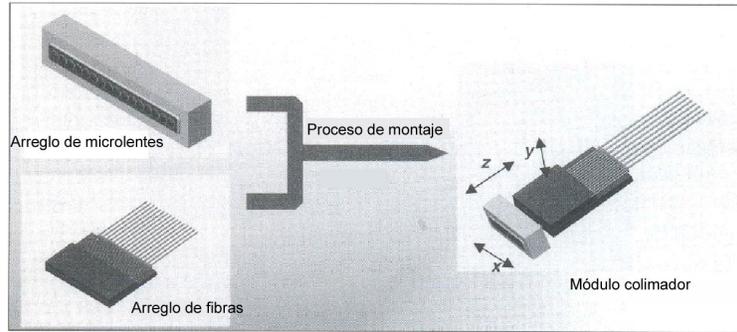


Figura 2.15. Montaje del arreglo de microlentes con el arreglo de fibras ópticas.

### 2.2.5 Matrices 2D de conmutadores

Estas matrices, también son llamadas arreglos 2D, debido a que utilizan  $N^2$  espejos individuales. Estos interruptores utilizan dos estados, encendido y apagado, por lo que se les conoce también como Matriz de Interruptores Digitales. Cuando el espejo está fuera del plano (apagado) la luz puede pasar del plano 1 al 4 como se ve en la figura 2.16. Si los microespejos se encuentran en el mismo plano que el rayo (se encienden) las señales del plano 1 salen por el plano 2. [14]

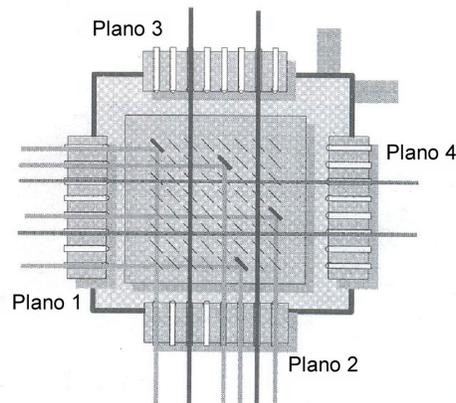


Figura 2.16. Arquitectura de una matriz de conmutadores de 8x8 puertos.

Sus características más importantes son:

- Distancia de trayecto larga: depende del diseño y puede ser de cientos de micrómetros.
- Distancias cortas entre diferentes microespejos: para minimizar la distancia de trabajo entre los puertos de entrada y de salida de las fibras.
- Tiempos de interrupción cortos: valores de milisegundos.
- Exactitud de ángulo del espejo: depende de la distancia focal del colimador. La exactitud debe ser de 1 mrad.
- Repetibilidad de ángulo (precisión). Las interrupciones se deben mantener con la misma exactitud después de millones de ciclos.

### 2.2.6 Matrices 3D de conmutadores

Son muy similares a las matrices 2D, pues utilizan el principio de redireccionamiento del rayo incidente con un movimiento del espejo. La diferencia entre las matrices de conmutación 2D y 3D es que las matrices 2D solo poseen 2 estados, encendido y apagado, mientras que las matrices 3D poseen, dentro de un cierto rango, libertad de giro, lo que permite dirigir un haz de luz incidente a diferentes salidas. Este tipo de matrices resulta en una arquitectura 2N, utilizando dos arreglos de N microespejos cada uno, con N entradas y N salidas y cada espejo tiene N posibles posiciones.

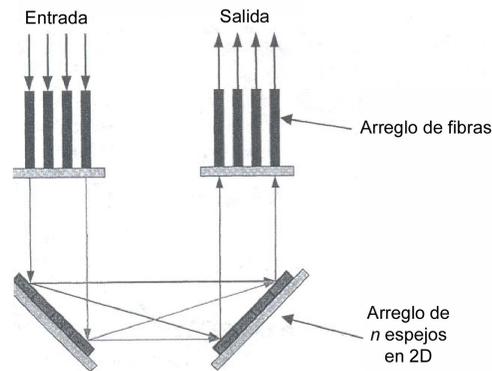


Figura 2.17. Arquitectura de una matriz de conmutadores tridimensional.

La principal desventaja de este tipo de matrices es el incremento en la dispersión de la luz a medida que la cantidad de puertos aumenta, sin embargo, la ventaja radica en el precio, ya que un solo espejo puede tener múltiples posiciones y por lo tanto mayor número de canales disminuyendo la relación precio/canal.

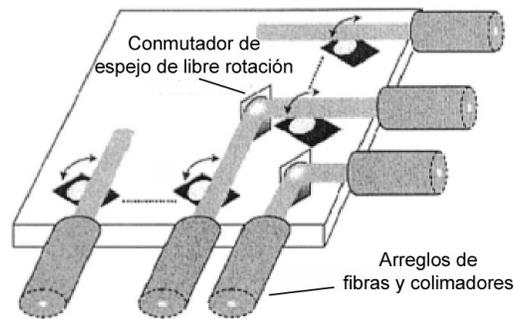


Figura 2.18 Esquema de matriz de micro espejos

El dispositivo mostrado en la figura 2.19 posee una estructura más compleja que las matrices 3D. Este modelo posee una montura de 1mm que posee un rango de 9 grados de inclinación y un tiempo de interrupción de aproximadamente 3ms, aunado al movimiento de giro del espejo como en las matrices 3D.

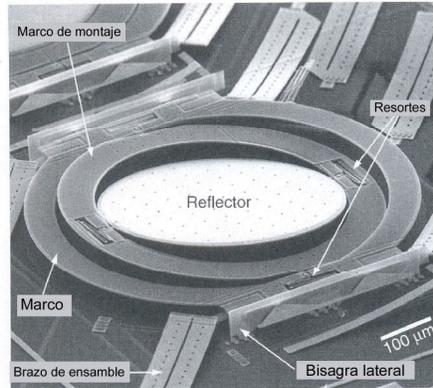


Figura 2.19. Microespejo con inclinación en dos ejes (fotografía).

Los interruptores de libre rotación están formados por un interruptor óptico de micro maquinado, en el que la salida es conmutada rotando el espejo. En éstos dispositivos, el parámetro más importante son las pérdidas. Hay muchos tipos de pérdidas, las pérdidas de inserción, las pérdidas de trayectoria (path loss), las pérdidas de dispersión (scattering) y las de absorción.

Estos dispositivos tienen tiempos de conmutación de nanosegundos con una excitación de onda cuadrada de 100V a 500kHz. El tiempo de conmutación es 500 $\mu$ s desde una posición de “apagado” a una posición de “encendido”.

Otros interruptores llamados conectores cruzados o de cruz, funcionan separando el sistema suscrito de las redes de fibra más importantes. Estos interruptores presentan un retraso de 10-25ms con unas pérdidas de inserción de -2.5dB en la reflexión y de 0.84dB en la transmisión con una diafonía (crosstalk) inferior a -45dB y un contraste de conmutación superior a 45dB. Aunque presenta elevados tiempos de conmutación, posee bajas pérdidas, altos contrastes en interrupción y baja diafonía.

Para los dispositivos de guía de onda basados en silicio, la pérdida puede ser atribuída a tres factores: dispersión, radiación y acoplamiento entre la fibra y la guía de onda.

Las pérdidas de dispersión son las más importantes en vidrio y guías de onda dieléctricas y ocurren debido a dos factores. El primero está basado en el volumen de dispersión, en el que la dispersión es causada por imperfecciones como defectos del cristal o contaminación de átomos en el volumen de la guía de onda. El segundo factor es debido a las irregularidades de la superficie de la guía de onda y a su dureza. Ésta puede deberse a las dispersiones laterales causadas por el método RIE (Reactive Ion Etching). El proceso RIE puede transferir fielmente la máscara de grabado sin irregularidades y sin suavizado. Entonces, los resultados de aspereza en las pérdidas por dispersión pueden ser incrementados por una diferencia de alto índice entre las capas laterales y las de sustento. Las pérdidas de dispersión normalmente contribuyen entre un 0.5 a 2dB a las pérdidas de las guías de onda de canal multicapa de núcleo de nitruro de silicio u oxinitrido en silicio.

Las pérdidas por radiación se vuelven importantes cuando las guías de onda se doblan en una curva, aunque son muy bajas cuando se les compara con las pérdidas de dispersión no se les puede considerar despreciables cuando existe doblamiento. La

## 2. Estado del Arte de los conmutadores ópticos

magnitud de estas pérdidas depende del radio de curvatura y el confinamiento del modo lateral, esto es debido a distorsiones en el campo óptico cuando las ondas guiadas viajan a través de una guía de onda doblada. Las guías de onda basadas en silicio ofrecen también eficientes conexiones entre la fibra y la guía de onda, esto es, un alineamiento perfecto entre la fibra y la guía de onda.

Las dos fuentes más importantes de pérdidas por acoplamiento son la reflexión (también conocida como pérdidas de Fresnel) y la pérdida causada por la desalineación entre la fibra y los modos de guía de onda. Las pérdidas de Fresnel son debidas a las diferencias existentes entre los índices de refracción efectivos entre la fibra y la guía de onda, por lo que el desalineamiento de modos entre la fibra y la guía de onda es la principal fuente de pérdidas de acoplamiento. Para reducir el desalineamiento de modos es necesario construir guías de onda con un tamaño y forma de modo de acuerdo a los de la fibra. La superposición entre la fibra y el canal del modo normalmente es baja, la forma del modo de la guía de onda normalmente es asimétrico, mientras que el de la fibra monomodo es circular simétrico, de mayores dimensiones.

La sensibilidad del acoplamiento entre la fibra y la guía de onda a la precisión del posicionamiento mecánico incluye una desalineación vertical  $\Delta x$ , desalineación lateral  $\Delta y$  e inclinación de los ángulos  $\theta$  y  $\Phi$ . Estas fuentes de desalineamiento se muestran en la figura 2.20.

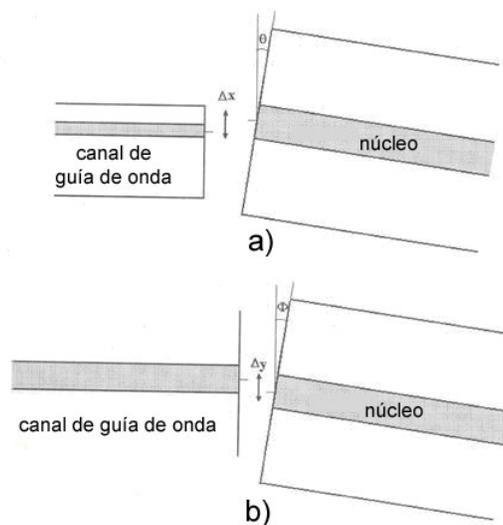


Figura 2.20. Fuentes de pérdidas: (a) sección transversal con desalineación vertical  $\Delta x$  y ángulo de inclinación  $\theta$ , (b) vista superior del desalineamiento  $\Delta y$  y ángulo de desalineación  $\Phi$ .

Si el tamaño del modo del canal es relativamente grande para acercarse al tamaño de las fibras monomodo, la eficiencia de acoplamiento no es muy sensible a pequeños desalineamientos. Para desalineamientos laterales y verticales de  $\pm 2.5\mu\text{m}$  las pérdidas de acoplamiento aumentan en el rango de entre 0.1 a 0.25dB relativo al mejor alineamiento. Las dos inclinaciones angulares se deben mantener debajo de 0.5 grados para producir pérdidas menores a 0.25dB.

Cuando se utilizan canales de guías de onda basados en silicio, estas restricciones de alineamiento pueden ser cumplidas mediante fotolitografía construyendo los *V-grooves*.

## 2. Estado del Arte de los conmutadores ópticos

La figura 2.21 muestra una representación esquemática de un acoplamiento de silicio *V-groove* entre una fibra y una guía de onda. El uso de un *V-groove* de silicio permite el control preciso de la forma de la ranura para asegurar la posición vertical de los núcleos y su alineamiento.

Utilizando la técnica de *V-grooves* se puede alcanzar una eficiencia de acoplamiento del 75% con una precisión angular de  $\pm 0.2$  grados y alineamiento lateral menor a  $\pm 0.5\mu\text{m}$ . [15]

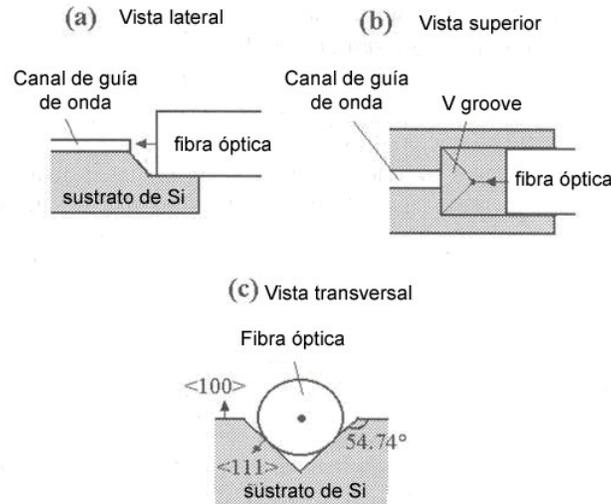


Figura 2.21 Representación esquemática de alineamiento fibra-guía de onda utilizando V-grooves: (a) vista lateral, (b) vista superior, (c) vista frontal.

El principal campo de aplicación sobre los conmutadores ópticos son las redes de comunicación de datos de alta velocidad. Hay muchas formas de lograr la función de un interruptor que se han intentado por medio de guías de onda combinadas con micro estructuras. La micro estructura puede jugar un papel pasivo o activo en la operación de conmutación.

Se han propuesto muchos interruptores ópticos que simplemente mueven y alinean una guía de onda óptica inicial a una o más guías de onda alternativas. En estos conmutadores mecánicos pasivos el uso de micro actuadores MEMS es conveniente debido a que su movimiento puede ser controlado con exactitud, las fuerzas de salida disponibles son adecuadas y el movimiento total es aceptable. Los interruptores mecánicos activos usan micro estructuras que interactúan con una onda guiada a través de un acoplamiento evanescente o descomponiendo las características de transmisión de la guía de onda. Con cualquiera de estos métodos, la interacción de la micro estructura y la guía de onda induce una fase óptica o modulación de intensidad, lo que conlleva a una función de conmutación.

La figura 2.22 muestra un interruptor óptico de 2x2 con actuación electrostática propuesto por Hogari. [16]

## 2. Estado del Arte de los conmutadores ópticos

Dos guías de onda ópticas forman una configuración de cruce de conexiones en la que un pequeño espaciamento separa el cruce en X en dos secciones tipo V.

Las dos guías de onda están integradas en una capa de aislamiento depositadas sobre un sustrato metálico. Un cantiliver metálico está montado encima de la región de cruce, con la cara insertada dentro del espaciamento. El interruptor opera en dos estados, cuando el cantiliver no está desviado, la cara de la membrana refleja la señal luminosa hacia la misma guía de onda. Cuando se aplica un voltaje, el cantiliver se dobla electrostáticamente hacia arriba y la membrana se mueve saliendo del camino de las guías de onda. La señal luminosa puede entonces ser transmitida a través del pequeño espacio y las guías de onda pueden comunicarse unas con otras.

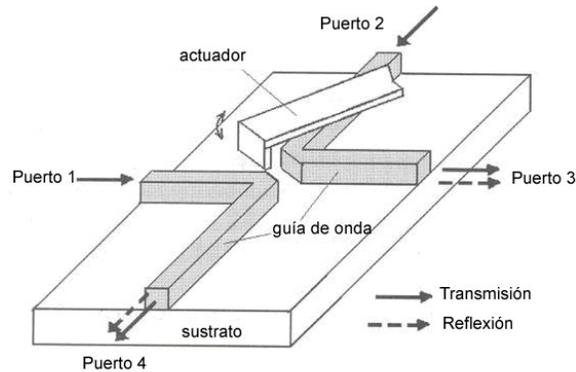


Figura 2.22. Interruptor óptico 2x2 de tipo "desvío" (bypass).

Las pérdidas de inserción de este dispositivo son menores a 3.1dB, su crosstalk es menor a -40dB con una longitud de onda de  $1.55\mu\text{m}$ . El voltaje de actuación es de 100V y el tiempo de conmutación es cercano a 2ms con un desplazamiento de la membrana de  $15\mu\text{m}$ .

Otro dispositivo basa su conmutación en un movimiento lateral del cantiliver. Este conmutador 1x2 propuesto por Ollier[17] utiliza una desviación de la viga que lleva la guía de onda de entrada y la coloca en alguna de las dos guías de onda de salida como se muestra en la figura 2.23. El núcleo de la guía de onda es dibujado con fotolitografía convencional seguida de un grabado por RIE.

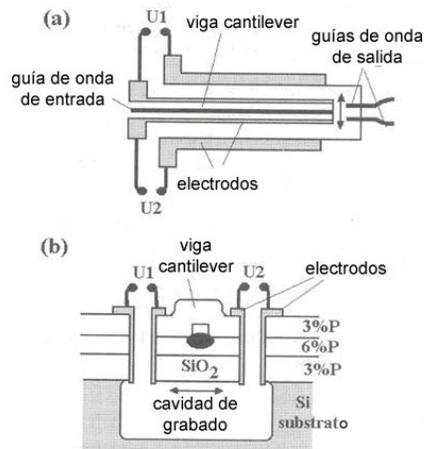


Figura 2.23. Conmutador óptico electrostático 1x2, (a) vista superior, (b) vista frontal

## 2. Estado del Arte de los conmutadores ópticos

Para evitar el desalineamiento vertical entre la guía de onda de entrada y las de salida, el estrés residual es compensado con tratamiento térmico.

El microcantiliver está fabricado con tres capas de silicio ( $25\mu\text{m}$  de espesor) y con una longitud de  $2\text{mm}$ .

Las pérdidas de inserción de este dispositivo son  $-3.5\text{dB}$  con una longitud de onda de  $1.3\mu\text{m}$  y su aislamiento óptico es de  $-35\text{dB}$ . Este dispositivo tiene una velocidad de conmutación de  $0.6\text{ms}$  y su voltaje de actuación es de  $300\text{V}$ .

La figura 2.24 muestra un escaneo micrográfico de electrones (SEM) del conmutador con la configuración antes mencionada.



Figura 2.24. Fotografía del conmutador óptico de cantilever.

Más recientemente NTT (Nipón Telephone and Telegraph) propuso una arquitectura de conmutador óptico  $2 \times 4$  mostrado en la figura 2.25. Con un micro maquinado en volumen se logran obtener los actuadores magnéticos que moverán cada una de las dos vigas con sus respectivas guías de onda a las salidas con dos guías de onda cada una.

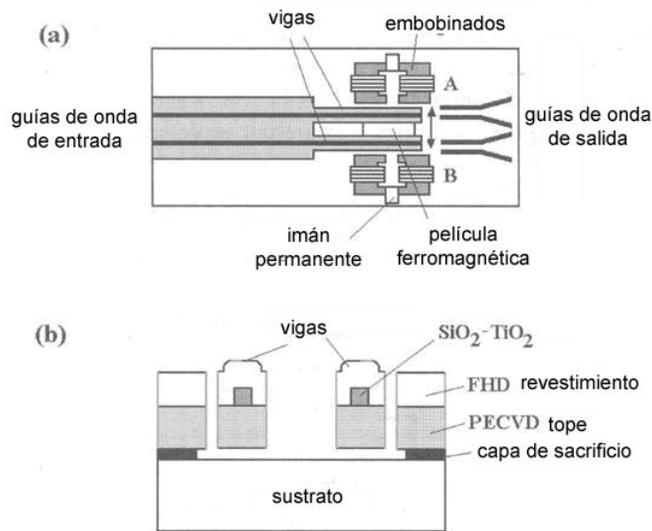


Figura 2.25. Conmutador óptico  $2 \times 4$  con actuación magnética, (a) vista superior, (b) vista frontal.

## *2. Estado del Arte de los conmutadores ópticos*

---

La actuación se efectúa por medio de una placa ferromagnética añadida a la cabeza de las vigas y circuitos laterales que contienen bobinas magnéticas e imanes permanentes. Cuando se aplica corriente a las bobinas en alguno de los dos lados, A o B, la cabeza es conducida por una corriente de conmutación y atraída a ese lado. Las pérdidas de inserción de este dispositivo son de 4.4dB y su crosstalk es de -40dB con un tiempo de conmutación aproximado de 40ms.

La principal desventaja de este dispositivo es el uso de un actuador magnético de volumen, ya que es muy difícil lograr bobinas en tres dimensiones y el material ferromagnético no está disponible al utilizar tecnología de micromaquinado. El uso de bobinas disponibles de dos dimensiones representan pequeñas fuerzas de actuación.

El uso de un par de electrodos planos separados por un aislante es normalmente más fuertes que los dispositivos magnéticos de volumen equivalente y son más fáciles de integrar en un entorno con MEMS.

### **2.3 Conclusiones**

Los conmutadores ópticos son dispositivos importantes para las redes de fibra óptica, debido a que la infraestructura de las redes electrónicas convencionales no puede manejar volúmenes de información tan altos como las redes ópticas.

Existen diversas tecnologías de conmutación óptica, y algunos modelos de conmutadores ópticos se encuentran ya en el mercado, sin embargo son complejos y caros y no existen los conmutadores económicos multipuertos para las fibras ópticas.

El uso en una red de sensores puede ser cubierto por conmutadores MOEMS, debido al tamaño de sus arreglos y velocidades de conmutación.

La fabricación de estos dispositivos resulta particularmente eficiente en producción en masa ya que de una sola oblea se pueden obtener decenas o cientos de dispositivos (chips). Por otro lado la fabricación de chips individuales es poco factible pues el costo de fabricación sería muy alto.

El empleo de tecnologías MOEMS presenta nuevas y poco conocidas perspectivas para el desarrollo de conmutadores ópticos con características mejores que los existentes en particular los conmutadores multipuertos para redes de fibra óptica.

## Bibliografía

1. Ramaswami Rajiv, Sivarajan Kumar, "Optical Networks, a Practical Perspective", Morgan Kauffman Publishers, USA, 2002.
2. Elbawab Tarek S. "Optical Switching", Springer Science and Business Media, Inc., USA, 2006.
3. Jianyi Yang, Qingjun Zhou, and Ray T. Chena "Polyimide-waveguide-based thermal optical switch using total-internal-reflection effect", *Microelectronics Research Center, University of Texas at Austin, Austin, Texas 78758* APPLIED PHYSICS LETTERS Vol. 81, no. 16, 2002.
4. [http://www.patentstorm.us/patents/pdfs/patent\\_id/6212308.html](http://www.patentstorm.us/patents/pdfs/patent_id/6212308.html)
5. Motamedi Manoucher Edward, "MOEMS: Micro-Opto-Electro-Mechanical Systems", The International Society of Optical Engineering, Ed SPIE, USA, 2005.
6. RAI-Choudhury Prosenjit, "MEMS and MOEMS technology and applications", The International Society of Optical Engineering, Ed. SPIE, USA 2001.
7. "Silicon-on-insulator micromechanical optical switch with postprocessed polymeric waveguides" T. Bakke, C. P. Tigges, C. T. Sullivan, Proc. SPIE 4561, 85-92, 2001.
8. P. Kopka, M. Hoffmann, E. Voges, "Bistable 2x2 and multistable 1x4 micromechanical fiber-optical switches on silicon" Proc. MOEMS '99, 1999.
9. L. Fan, S. Gloeckner, P. D. Dobbelaere, et. al. "Digital MEMS switch for planar photonic crossconnects", Technical Digest OFC 2002, paper Tu04, 2002.
10. P. Mottier, Int. Optoelectronics 9, 125, 1994.
11. D. Kobayashi, H. Okano, M. Horie, H. Otsuki, K Sato and M. Horino, Digest of Intern. Conf. IEEE/LEOS on Optical MEMS and Their Applications, 1997.
12. Y. Yamada and M. Kobayashi, "Single-mode optical fiber connection to high-silica waveguide with fiber guiding-groove", IEEE J. Lightwave Technology 5, pp. 1716-1720, 1987.
13. K. Shem, C. H. Bulmer, R. P. Moeller and W. K. Burns, "Digest of OSA Topical Meeting on Integrated Optics", Jan. 1980.
14. L. Fan, S. Gloeckner, P.D. Dobbelaere, S. Patra, D. Reiley, et. Al. "Digital MEMS switch for planar photonic crossconnects" Technical Digest OFC 2002, paper Tu04 2002.
15. Y. Yamada and M. Kobayashi, IEEE J. Lightwave technology 5, pp. 1716, IEEE, 1987.

## *2. Estado del Arte de los conmutadores ópticos*

---

16. K. Hogari, T. Matsumoto, *Applied Optics*, Vol. 30 Issue 10, pp.1253-1257, 1991.

17. E. Ollier, P. Labeye, F. Revol, "Digest of Summer Topical Meeting IEEE/LEOS on Optical MEMS and their Applications, 71, 1996.

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

#### 3.1 Propuesta conceptual de un conmutador óptico

El principio de operación consiste en el movimiento vibratorio de una viga de material ferromagnético por medio de un flujo magnético como se muestra en la figura 3.1. Se utiliza un electroimán que está excitado por el paso de una corriente eléctrica conmutada a la frecuencia de resonancia de la viga.

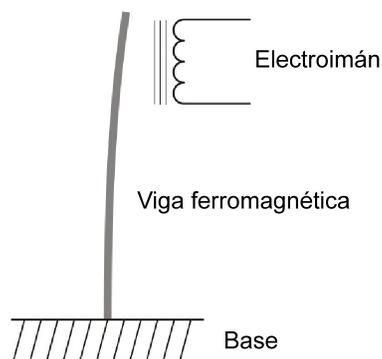


Figura 3.1. Esquema del movimiento de una viga anclada por flujo magnético de un electroimán.

Utilizando el movimiento oscilatorio de la viga, se presentan dos conmutadores:

1. Conmutador con una fibra óptica montada en la viga resonante. El movimiento de la viga, y por ende de la fibra óptica transmisora, es utilizado para conmutar la información enviada a través de ésta fibra transmisora a un arreglo de fibras ópticas receptoras como se puede apreciar en la figura 3.2.

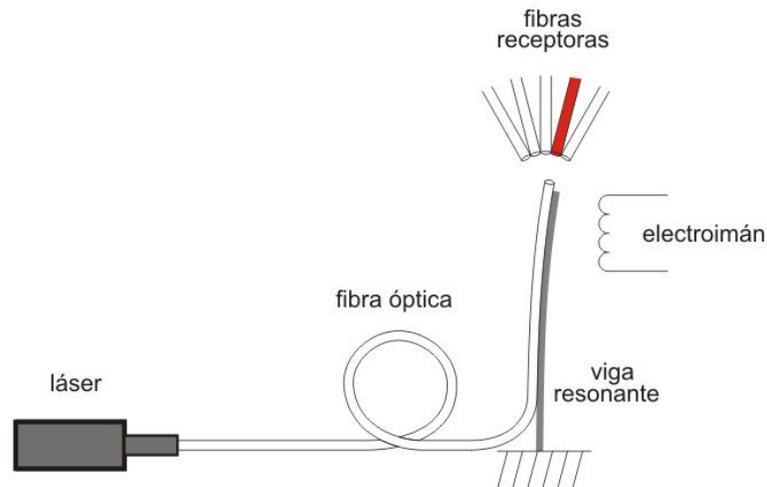


Figura 3.2. Esquema del conmutador de fibra óptica montada en la viga resonante.

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

---

2. Conmutador con una superficie reflectiva en un extremo de la viga resonante, que refleja un haz láser (fuente transmisora) a un arreglo de fibras ópticas receptoras como se puede apreciar en la figura 3.3.

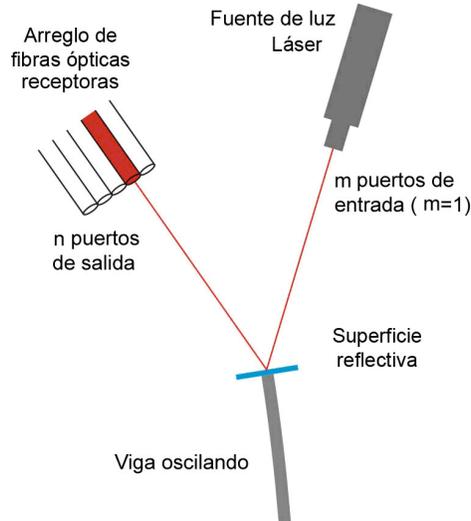


Figura 3.3. Esquema del conmutador de haz láser reflejado por un espejo montado en la viga.

### 3.2 Implementación y caracterización experimental de un modelo físico a gran escala

La utilidad de construir una maqueta funcional consiste en mostrar las principales características e inconvenientes a tener en cuenta en el diseño de un dispositivo a pequeña escala en un chip.

La selección de los materiales de construcción será de vital importancia pues sus características intrínsecas modelarán su comportamiento electromagnético y mecánico, siendo el más importante su frecuencia de resonancia.

Se selecciona acero como material de construcción debido a sus propiedades ferromagnéticas y bajo costo. Para lograr una viga con una frecuencia de resonancia específica se deben conocer sus dimensiones y su forma. Se parte de conocer el espesor de la lámina por medio de un microscopio encontrando que es de 0.19mm. El ancho de la viga es de 6mm.

Conocidos el ancho y espesor de la viga, se busca su longitud, es decir, la distancia a la que ha de anclarse para obtener una frecuencia de resonancia de 60Hz.

Para encontrar esta longitud se resuelve la ecuación de modos de vibración para una viga de acero.

### 3.2.1 Modos de vibración de una viga anclada en un extremo

Para encontrar los modos normales de vibración de una barra anclada por uno de sus extremos se tiene el siguiente procedimiento[1,2,3]:

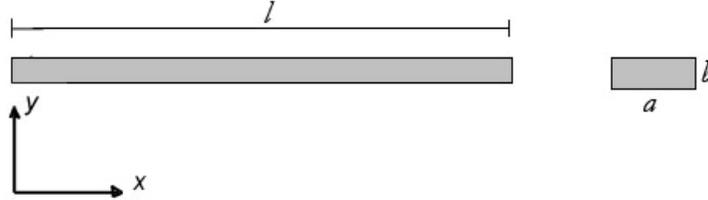


Figura 3.4. Diagrama de las dimensiones de la viga de acero.

1. La solución general de la ecuación que describe las vibraciones de una barra es:

$$\psi(x,t)=y(x)\cdot\text{sen}(\omega t)$$

2. La solución de la ecuación diferencial, la amplitud  $y(x)$  de la vibración de los puntos  $x$  de la barra es:

$$y(x)=A_1\text{senh}(qx)+A_2\cdot\text{cosh}(qx)+A_3\cdot\text{sen}(qx)+A_4\cdot\text{cos}(qx)$$

3. Las condiciones de frontera cambian

La barra está firmemente sujeta por su extremo izquierdo  $x=0$ , y la pendiente en este punto es  $dy/dx=0$ .

$$\frac{dy}{dx} = q(A_1 \cosh(qx) + A_2 \text{senh}(qx) + A_3 \cos(qx) - A_4 \text{sen}(qx))$$

$$0=A_2+A_4$$

$$0=A_1+A_3$$

En el extremos derecho libre  $x=l$ ,  $y(l)$  y su pendiente  $dy/dt$  no son cero, pero el momento y la fuerza son cero, lo que implica que  $d^2y/dx^2=0$  y  $d^3y/dx^3=0$

$$A_1(\text{senh}(ql)+\text{sen}(ql))+A_2(\text{cosh}(ql)+\text{cos}(ql))=0$$

$$A_1(\text{cosh}(ql)+\text{cos}(ql))+A_2(\text{senh}(ql)-\text{sen}(ql))=0$$

Eliminado  $A_1$  y  $A_2$  obtenemos una ecuación trascendente en  $ql$

$$\text{cosh}(ql)\cdot\text{cos}(ql)=-1$$

Las raíces  $r_n=q_n\cdot l$  de esta ecuación se calculan por el procedimiento numérico del punto medio, sus primeros valores son:

$$r_n=1.875, 4.693, 7.855, 10.996, \dots$$

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

---

Conocido los valores posibles de  $q_n$  se calculan las frecuencias de vibración  $\omega_n=2\pi f_n$

$$f_n = \frac{r_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{YI}{\rho ab l^4}} = C_n \sqrt{\frac{YI}{\rho ab l^4}}$$

Donde  $f_n$  es la frecuencia del modo normal  $n$  de vibración y  $C_n$  es un número que corresponde a este modo. Sus primeros valores son:

$$C_1=0.56, C_2=3.51, C_3=9.82, C_4=19.24, \dots$$

El coeficiente  $C_n$  es independiente de las características de la barra y el segundo término, bajo la raíz, depende del material y de las dimensiones de la barra.

La amplitud  $y(x)$  de los distintos puntos  $x$  de la barra en el modo normal de vibración  $n$  es:

$$y_n(x) = A \left\{ (\sinh(q_n x) - \sin(q_n x)) - \frac{\sinh(q_n l) + \sin(q_n l)}{\cosh(q_n l) + \cos(q_n l)} (\cosh(q_n x) - \cos(q_n x)) \right\}$$

El valor de la constante de proporcionalidad  $A$  es la escala vertical. Para que todos los modos de vibración estén dibujados a la misma escala, se calcula  $A$  de modo que

$$\int_0^L y_n^2(x) dx = cte$$

En este caso la barra es de acero y posee las siguientes características:

$$\text{Módulo de Young } Y=20 \times 10^{10} \frac{N}{m^2}.$$

$$\text{Densidad } \rho=7850 \frac{kg}{m^3}.$$

Frecuencia del primer modo de resonancia:  $f_1=60Hz$ .

Dimensiones conocidas de la viga:  $a=6mm$ ,  $b=0.19mm$ .

Por lo que se tiene:

$$I = \frac{ab^3}{12}$$

$$f_1 = \frac{r_1^2}{2\pi} \sqrt{\frac{YI}{\rho ab l^4}}$$

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

---

$$60\text{Hz} = \frac{1.875^2}{2\pi} \sqrt{\frac{YI}{\rho ab l^4}}$$

$$\left(\frac{60\text{Hz}}{0.56}\right)^2 = \frac{YI}{\rho ab l^4}$$

$$l^4 = \frac{YI}{\rho ab (11,479.59\text{Hz}^2)}$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{\left(20 \times 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right) (3.43 \times 10^{-15} \text{m}^4)}{\left(7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) (6 \times 10^{-3} \text{m}) (0.19 \times 10^{-3} \text{m}) (11,479.59\text{Hz}^2)}}$$

$$l = \sqrt[4]{\frac{6.86 \times 10^{-4} \text{Nm}^2}{102.73 \frac{\text{kg}}{\text{ms}^2}}}$$

$$l = \sqrt[4]{6.68 \times 10^{-6} \text{m}^4}$$

$$l = 5.08\text{cm}$$

Por lo que la longitud de la viga para que oscile a 60Hz es de  $l=5.08\text{cm}$ .

La frecuencia de resonancia de la viga también es obtenida con el software de simulación ANSYS[4], con las siguientes características:

Módulo de Young  $Y=20 \times 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ .

Densidad  $\rho=7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .

Coefficiente de Poisson  $\nu=0.345$ .

Tamaño de la viga:  $a=0.6\text{cm}$ ,  $b=0.19\text{mm}$ ,  $c=5.08\text{cm}$

Se crea el diseño de la viga y se aplica un seccionado para su análisis con FEA (Finite Element Analysis) por medio de un mallado fino a la estructura. En las condiciones de frontera se fija uno de los extremos y se realiza un análisis modal para obtener los dos primeros modos de resonancia.

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

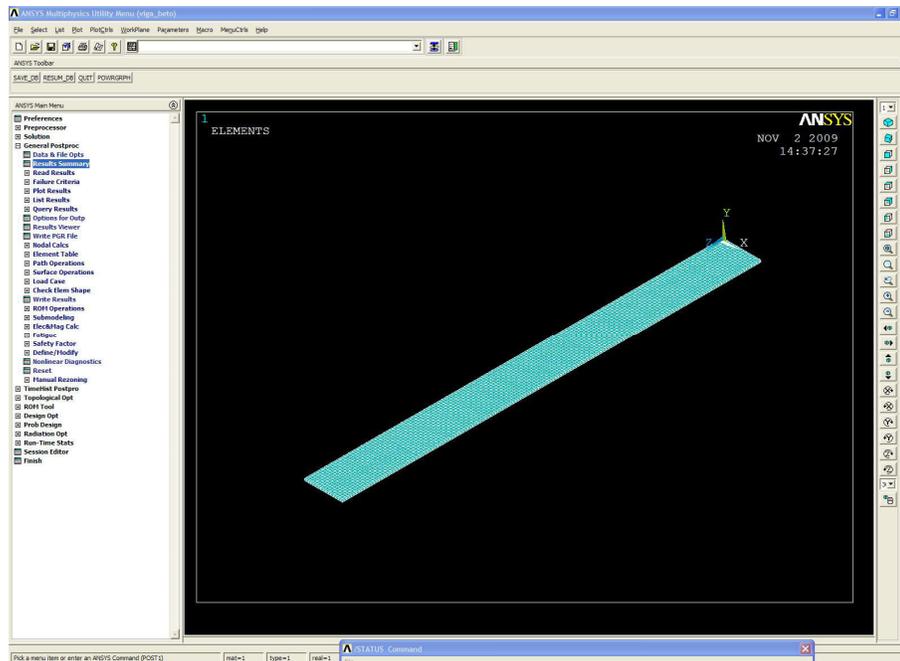


Figura 3.5. Simulación de la viga de acero con el programa ANSYS.

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	60.303	1	1	1
2	377.81	1	2	2

Figura 3.6. Frecuencia de resonancia de la viga de acero obtenida con ANSYS.

La frecuencia de resonancia del primer modo de vibración para la viga de acero de acuerdo al software de simulación ANSYS es de  $f_1=60.3\text{Hz}$ .

ANSYS entrega una secuencia de imágenes para simular el movimiento de la estructura. En la figura 3.7 se puede observar que la viga oscila por un extremo y permanece fijo por el otro.

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

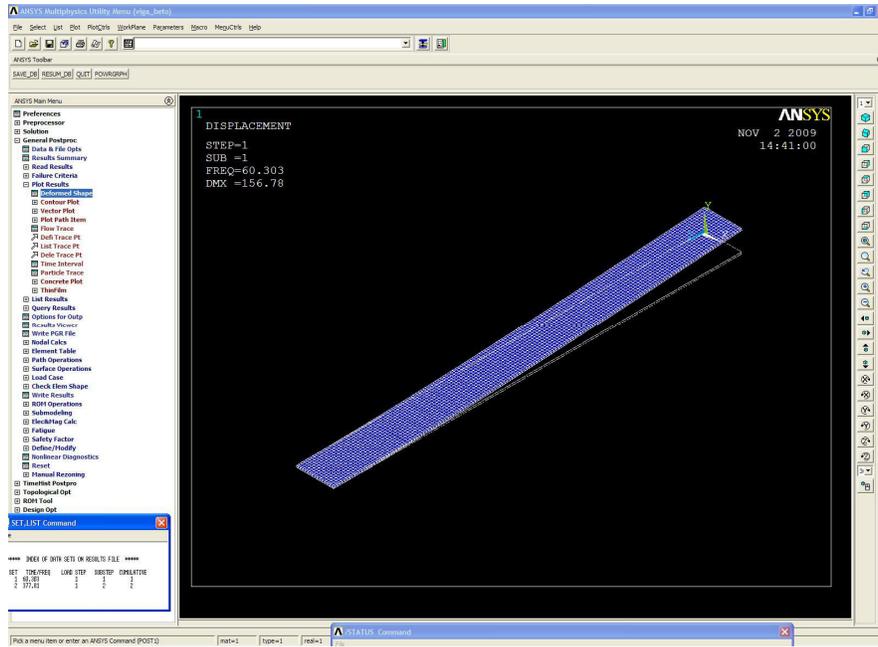


Figura 3.7. Simulación del movimiento de la viga al oscilar con el programa ANSYS.

Una vista lateral nos muestra una inclinación de  $\pm 7^\circ$ .

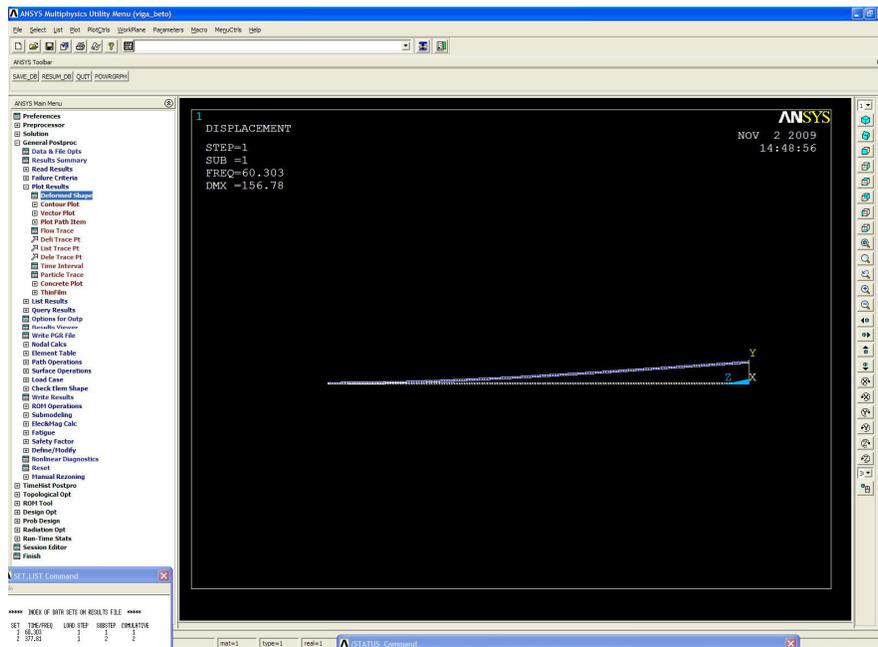


Figura 3.8. Vista lateral del movimiento de la viga de acero en oscilación con el programa ANSYS.

### 3.3 Implementación de una maqueta funcional a gran escala

Se desarrollaron variantes de la maqueta funcional con la finalidad de obtener un dispositivo con menos consumo energético, menos pérdidas y más eficiente.

#### 3.3.1 Implementación de la primera variante de la maqueta funcional a gran escala

##### Material utilizado

- 1 viga de acero de dimensiones 0.19mm x 6mm x 50mm
- 1 barra de acero de 10cm de largo con 1.5cm de diámetro
- Embobinado de 130 vueltas de alambre magneto
- Transformador 120V-12V 1A

##### Desarrollo

Las dimensiones de la viga se obtienen resolviendo la ecuación de modos de vibración para una barra con un extremo libre oscilando a 60Hz. Las dimensiones de la viga de acero son 50mm de largo, 6mm de alto y 0.19mm de espesor.

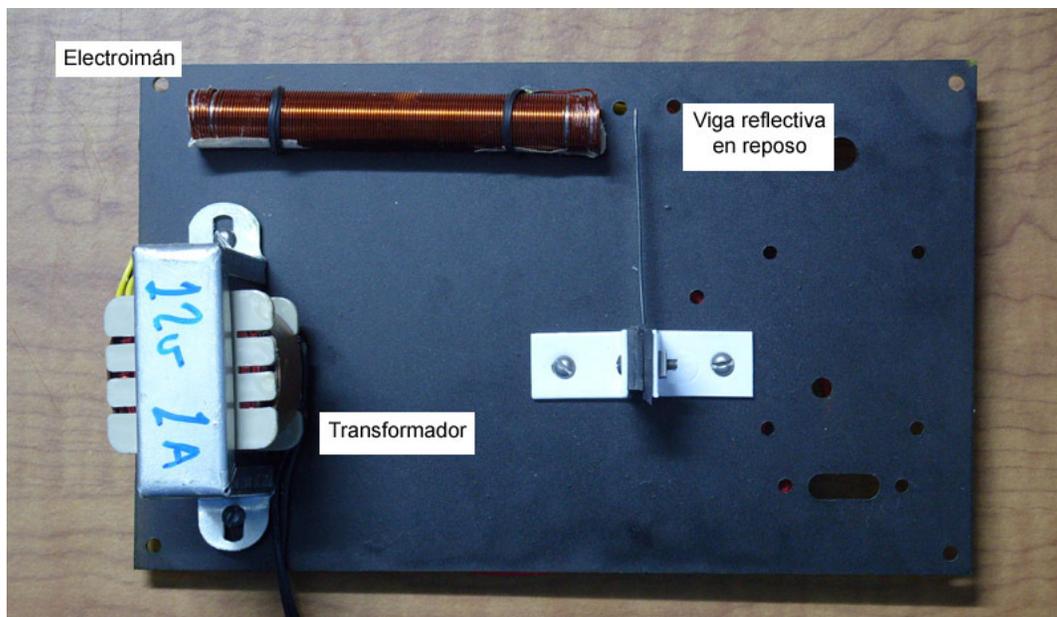


Figura 3.9. Vista superior del primer modelo de la maqueta en reposo (fotografía).

El electroimán posee un núcleo de acero y su embobinado está construido con 130 vueltas de alambre magneto que soporta hasta 1.2A con un área de  $0.411 \text{ mm}^2$ .

Este electroimán es excitado por un transformador que entrega 6V con una corriente de 1A a 60Hz que provoca un movimiento angular de  $14^\circ$  en la viga.

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

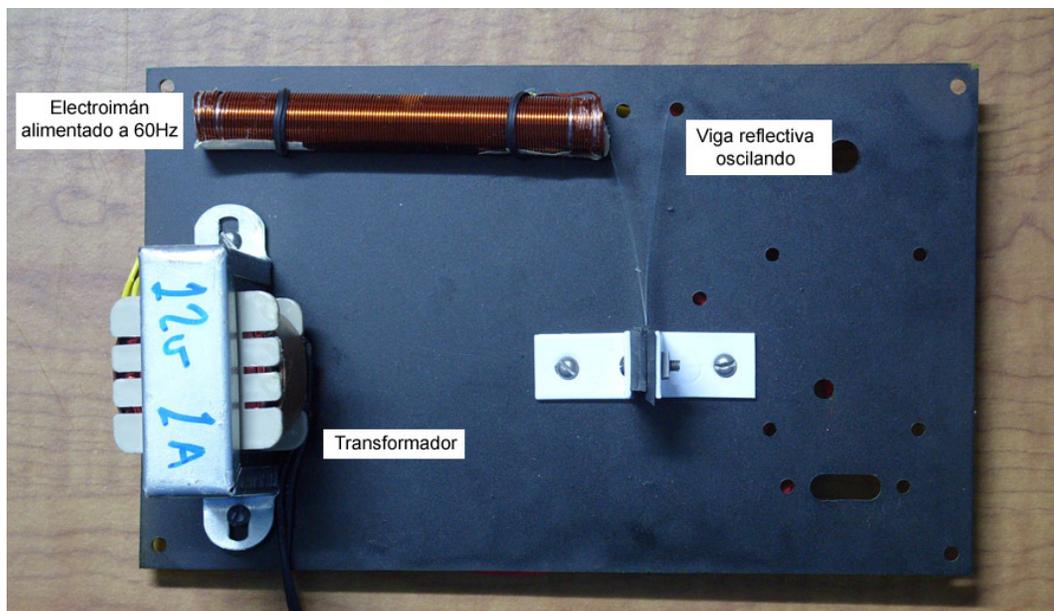


Figura 3.10. Viga de acero en oscilación en la primera variante de la maqueta (fotografía).

La viga en oscilación realiza un barrido al haz láser incidente reflejándose como una línea recta, como se puede observar en la figura 3.11. La longitud de la línea es dependiente del ángulo de incidencia del haz y de la distancia sobre la que se proyecta.

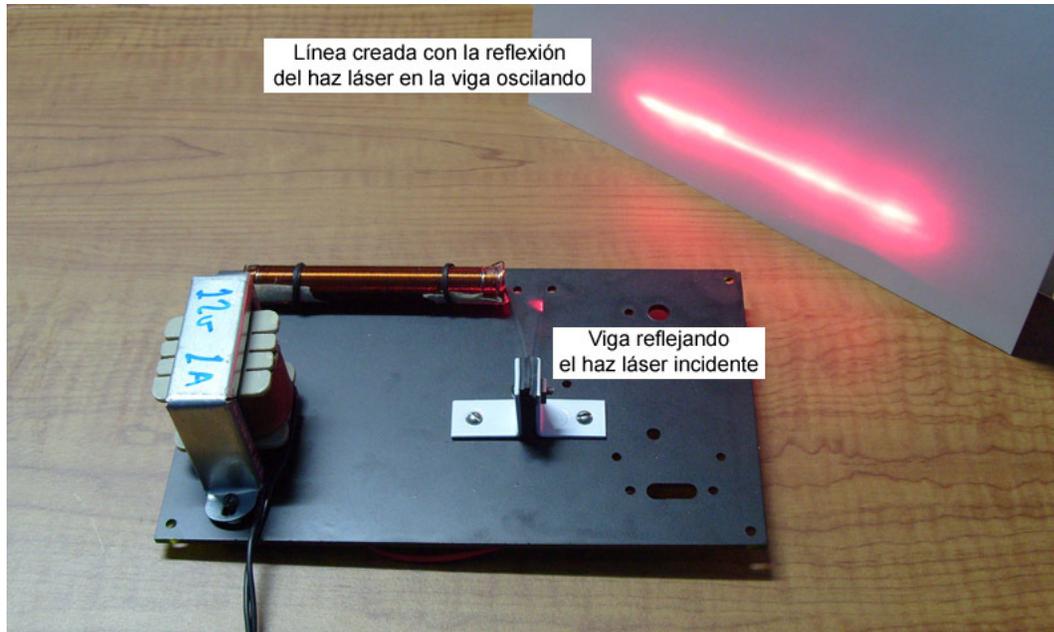


Figura 3.11. Barrido del haz láser cuando el modelo se encuentra en funcionamiento (fotografía).

El transformador entrega una señal senoidal al electroimán, que al atravesar su embobinado genera una fuerza magnética lo suficientemente fuerte como para atraer a

### **3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn**

---

la viga. Un problema ocurre luego de que la viga es atraída, debido a que es un material ferromagnético no polarizado, tanto el lóbulo superior como el inferior de la señal senoidal que excita al electroimán atraerán a la viga. De esta manera el flujo magnético provocado por la señal senoidal atrae a la viga con uno de los lóbulos de la señal a 60Hz, para luego regresar a una posición de flexión en el otro sentido, sin embargo este movimiento es frenado por la inmediata atracción que sufre por el siguiente lóbulo del mismo ciclo de 60Hz.

Para solucionar este problema, un diodo 1N4001 es colocado entre el transformador y el electroimán, de manera que se tiene una rectificación de media onda y se logra excitar al electroimán con una señal de medio ciclo senoidal a 60Hz. Esto reduce el consumo energético, y mejora el movimiento de la viga. Con esta modificación la corriente del transformador necesaria se reduce con un factor de 2, utilizando una corriente de 500mA con un voltaje de 6V. Esto es implementado en la segunda variante de la maqueta funcional.

#### **3.3.2 Implementación de la segunda variante de la maqueta funcional a gran escala**

##### **Material utilizado**

- Fibra óptica de vidrio FT-400 URT
- 1 barra de acero de 8cm de largo con 1.5cm de diámetro
- Embobinado de 230 vueltas de alambre magneto
- 1 diodo 1N4001
- Transformador 120V-12V 500mA
- 1 viga de acero de 0.19mm x 6mm x 65mm
- 1 viga de acero de 0.19mm x 6mm x 47mm

##### **Desarrollo**

Debido a que el electroimán genera líneas de campo magnético en sus dos extremos es posible implementar los dos conmutadores en una sola maqueta funcional.

Para realizar la implementación del primer conmutador (fibra óptica montada sobre la viga resonante) en la segunda variante de la maqueta funcional, se sigue el esquema de la figura 3.12.

La selección de las fibras ópticas FT-400 URT se debe a su gran apertura numérica de  $0.48 \pm 0.03$  y a que poseen un núcleo grande, con diámetro de  $400 \pm 8 \mu\text{m}$ . De esta forma, el acoplamiento se genera entre dos fibras, la que transmite el haz de luz y la que lo recibe, por lo que la distancia entre ellas debe minimizarse.

Al montar la fibra óptica en la viga se incrementa la masa del elemento mecánico vibratorio, esto reduce su frecuencia de resonancia, pero también añade rigidez que aumenta su frecuencia de resonancia. El resultado es una viga de 6.5cm que oscila a 60Hz. Se coloca una fibra óptica de vidrio FT-400 URT pegada a la viga, de manera que la vibración hace que la fibra óptica se mueva y pueda acoplarse en un arreglo de fibras ópticas receptoras

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

---

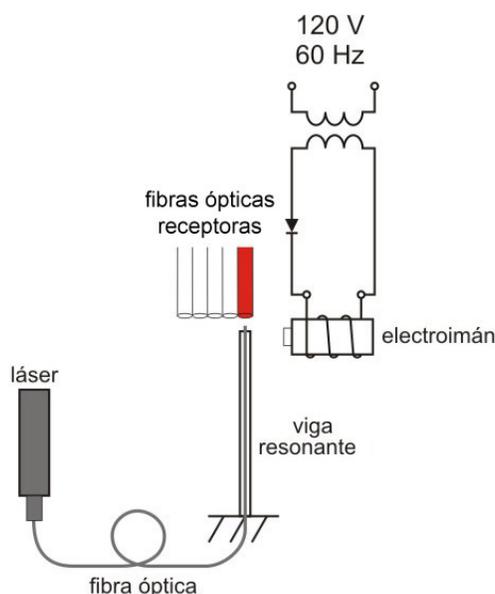


Figura 3.12. Esquema de la maqueta funcional del primer conmutador (fibra óptica montada en la viga).

La figura 3.13 muestra el movimiento vibratorio de la viga de acero con una fibra óptica montada.

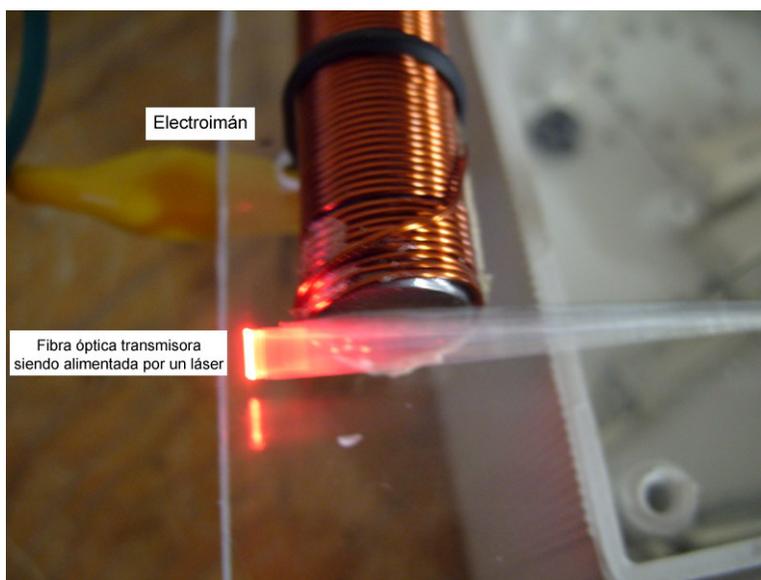


Figura 3.13. Viga oscilando en con fibra óptica transmisora montada (fotografía).

Para realizar la implementación del segundo conmutador (superficie reflectiva en el extremo libre de la viga) en la segunda variante de la maqueta funcional, se sigue el esquema de la figura 3.14. A pesar de que la viga es de acero liso, no es una superficie tan reflectiva como se desea. Fueron aplicados procesos de pulido a la viga de acero y la reflectividad mejora considerablemente sin embargo no es tan buena como la de un espejo. Para solucionar este problema se utiliza otra superficie del aluminio con terminado espejo de un grosor de 1mm.

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

Añadiendo material al extremo móvil de la viga se reduce su frecuencia de resonancia, pues la masa se ve incrementada. Para que la viga mantenga su resonancia a 60Hz se acorta su longitud. Cuanto más pequeño es un dispositivo, su frecuencia de resonancia es mayor. Utilizando una superficie de espejo se reducen las pérdidas de inserción. El resultado es una viga de 4.7cm que oscila a 60Hz.

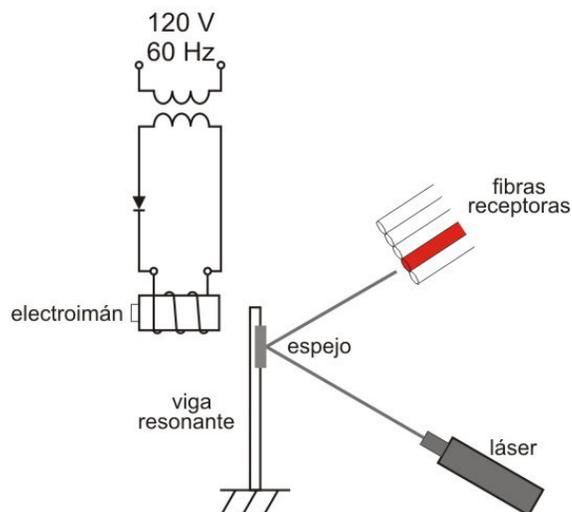


Figura 3.14 Esquema de la maqueta funcional del segundo conmutador (barrido de haz láser con espejo).

La figura 3.15 muestra el barrido del haz láser que realiza el espejo en la viga de acero cuando ésta se encuentra en movimiento vibratorio.

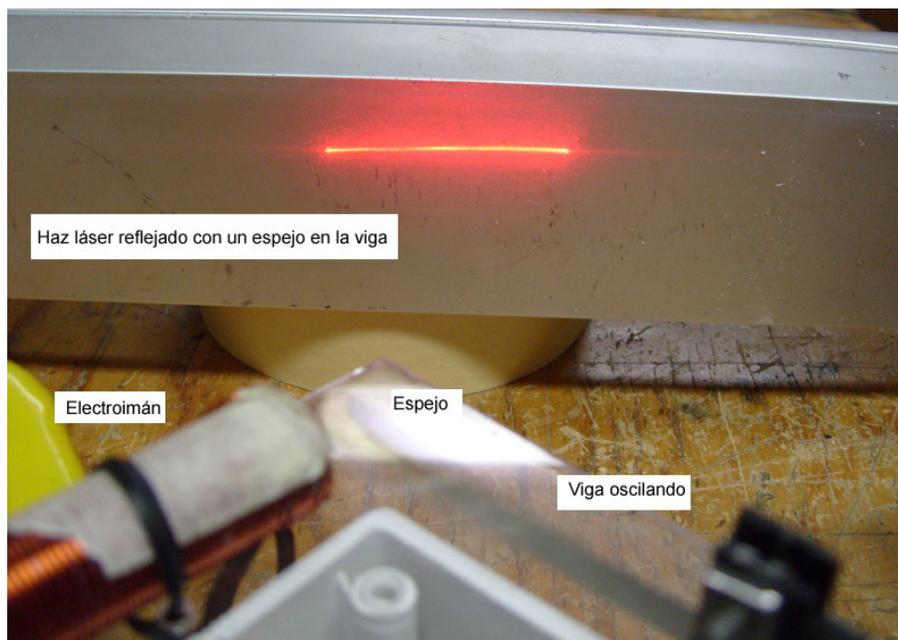


Figura 3.15. Barrido del haz láser por el espejo montado en la viga resonante (fotografía).

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

---

La figura 3.16 muestra la instalación de la maqueta funcional en su segunda versión y que implementa los dos conmutadores propuestos anteriormente.

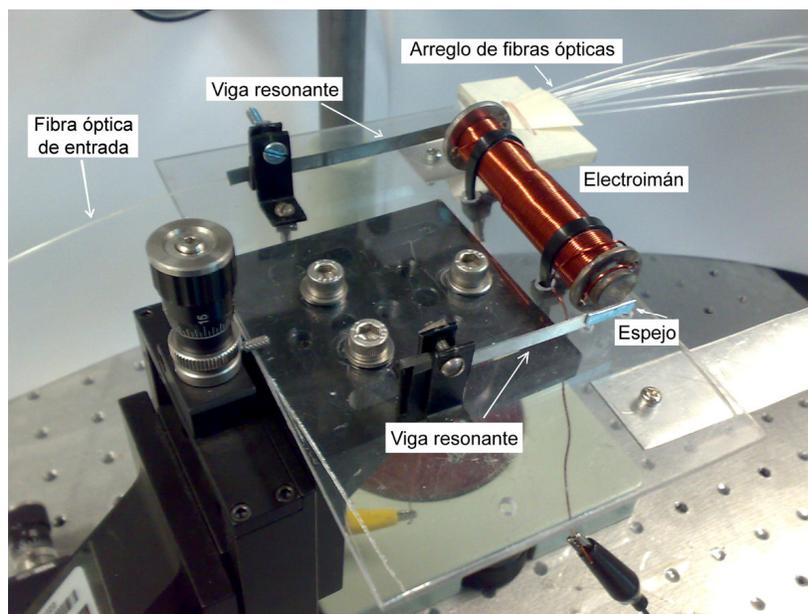


Figura 3.16. Segunda variante de la maqueta funcional con los dos conmutadores ópticos.

## 3.4 Realización de experimentos

Se realizan dos experimentos para mostrar el principio de operación de los conmutadores de fibra óptica.

### Material utilizado para la caracterización

- Mesa óptica Thor Labs
- Unidad de desplazamiento de 3 ejes modelo PT3 de Thor Labs
- Láser modelo 1507P-1 clase 3A (CDRH) de JDS Uniphase de 4mW @ 633nm
- Microscopio M6C-10
- Osciloscopio

### 3.4.1 Experimento #1

**Objetivo:** encontrar los tiempos de transmisión para cada una de las 10 fibras ópticas de un arreglo 1x10 con el conmutador de viga oscilante con fibra óptica montada.

### Procedimiento:

Se implementó un arreglo de fibras 1x10 de fibra óptica de vidrio FT-400 URT. Éstas reciben la luz que sale de una fibra óptica del mismo tipo que transmite la luz de una fuente de luz láser. La figura 3.17 muestra una vista desde el microscopio del arreglo de fibras siendo alimentado.

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

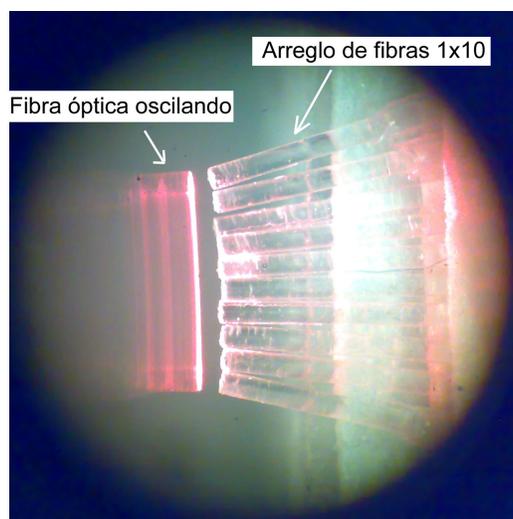


Figura 3.17 Conmutación entre fibras en un arreglo 1x10 vista desde el microscopio (fotografía).

Para calcular los tiempos de conmutación se debe modelar el movimiento de la fibra que se encuentra oscilando. El movimiento es el de una señal senoidal a 60Hz, donde el eje en el centro de la viga que se mueve seguirá la forma de una señal seno alimentando a las primeras 5 fibras ópticas de la misma manera que a las fibras 6 a la 10, por lo que sólo es necesario encontrar los tiempos de transmisión para las primeras 5 fibras ópticas. La figura 3.18 muestra cómo se espera sean alimentadas las primeras 5 fibras ópticas.

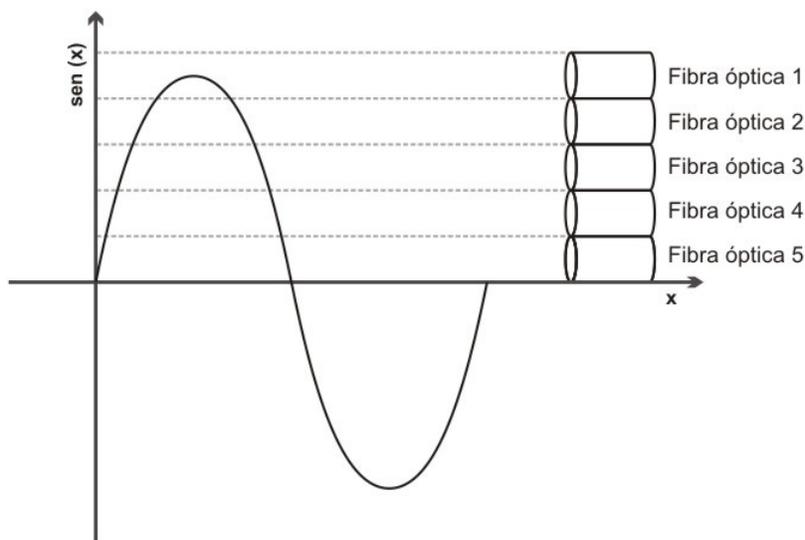


Figura 3.18 Esquema del movimiento de la fibra óptica transmisora y el arreglo de fibras receptoras.

Siguiendo el esquema anterior, se puede predecir que para un ciclo las fibras ópticas 2,3,4 y 5 son alimentadas dos veces y la fibra óptica 1 sólo es alimentada una vez y que los tiempos de recepción de la señal varían para cada una de las fibras receptoras. Las fibras ópticas en los extremos (fibra óptica 1 y 10) al ser alimentadas una sola vez por

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

ciclo presentarán una frecuencia de 60Hz, mientras que el resto presentarán frecuencias de 120Hz pues serán alimentadas 2 veces por cada ciclo de 60Hz.

El tiempo de transmisión de datos está determinado por la cantidad de tiempo que la fibra óptica transmisora está cercana a cada una de las fibras ópticas receptoras. El cono de aceptación juega un papel importante, ya que al existir cierta separación entre la fibra óptica transmisora y el arreglo de fibras ópticas receptoras el tiempo de transmisión es mayor.

Conociendo la separación entre las fibras, su apertura numérica y modelando su movimiento con una señal senoidal, es posible conocer el tiempo para el que cada una de las fibras ópticas receptoras recibe luz de la fibra óptica transmisora, como se muestra en la figura 3.19. Esto demuestra que en ciertos momentos la fibra transmisora alimenta 2 fibras receptoras al mismo tiempo.

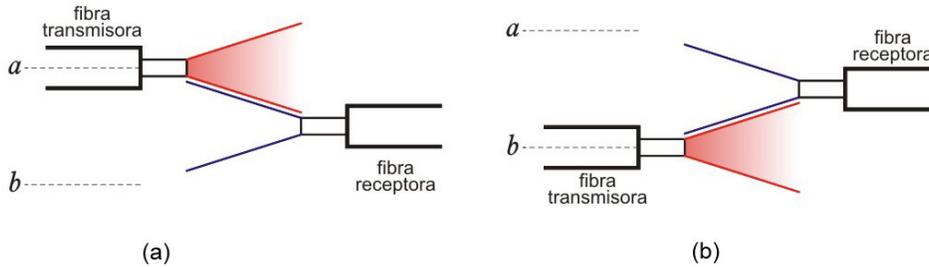


Figura 3.19 Esquema del barrido de la fibra óptica transmisora en fibra óptica receptora.  
(a) La recepción de luz en la fibra receptora comienza en el punto "a" de la fibra transmisora.  
(b) La recepción de luz en la fibra receptora termina en el punto "b" de la fibra transmisora.

Para conocer el inicio y fin de la recepción en cada fibra óptica se tiene:

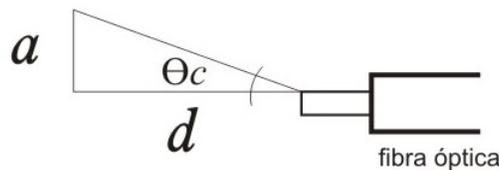


Figura 3.20 Diagrama de ángulo crítico de las fibras receptoras.

Apertura numérica:  $NA=0.48$

Ángulo crítico:  $\Theta_c=28.68^\circ$

Diámetro de las fibras:  $D=400\mu m$

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

---

#### Primer fibra receptora

La distancia de separación entre fibras es  $d=220\mu\text{m}$ . Existe un desalineamiento de  $18^\circ$  entre la primera fibra receptora y la fibra transmisora, por lo cual el ángulo crítico se ve reducido y se tiene:

$$\theta_c = 28.68^\circ - 18^\circ = 10.68^\circ$$

$$\tan(10.68^\circ) = \frac{a}{220\mu\text{m}}$$

$$a = 41.49\mu\text{m}$$

Por lo que la distancia que debe recorrer la fibra en el barrido es de:

$$D = 400 + 41.49 + 41.49 = 482.98\mu\text{m}$$

Para calcular el tiempo en el que se ilumina a la primer fibra óptica se debe ubicar el punto inicial "a" y el punto final "b" en que la fibra transmisora de  $400\mu\text{m}$  de diámetro ilumina la fibra óptica receptora, tal como se muestra en la figura 3.19. De los cálculos se sabe que la distancia a recorrer en el barrido es de  $482.98\mu\text{m}$ . El desplazamiento total de la fibra óptica montada en la viga resonante cuando esta se encuentra en oscilación es igual a  $1.8\text{mm}$  hacia arriba y  $1.8\text{mm}$  hacia abajo.

Con esta referencia se ubica la amplitud máxima  $\text{sen}(x)=1$  como la referencia de  $1.8\text{mm}$ . El eje de la primer fibra receptora está en la referencia de  $1800\mu\text{m}$  sin embargo debido a su cono de aceptación, comenzará a recibir luz de la fibra transmisora desde una referencia a  $1800\mu\text{m} - \frac{482.98\mu\text{m}}{2} = 1558.51\mu\text{m}$  y como la fibra transmisora tiene un diámetro de  $400\mu\text{m}$  su referencia debe estar  $200\mu\text{m}$  por debajo (pues el eje de referencia se ubica a la mitad de su diámetro), por lo que:  $1800\mu\text{m} - \frac{482.98\mu\text{m}}{2} - 200\mu\text{m} = 1358.51\mu\text{m}$  para los que la fibra transmisora llega a la altura de  $1358.51\mu\text{m}$  (referencia inferior) y hasta los  $1800\mu\text{m}$  (referencia superior, pues es el tope de su movimiento), por lo que se tiene la siguiente relación:

$$1800\mu\text{m} \rightarrow 1$$

$$1358.51\mu\text{m} \rightarrow x$$

Por lo que  $x=0.7547$

Ahora se deben encontrar los ángulos en el intervalo de  $x$  para el que la función  $\text{sen}(x) \geq 0.7547$

Los ángulos en los extremos del intervalo son  $49^\circ$  y  $131^\circ$ . Como la frecuencia de la señal senoidal es de  $60\text{Hz}$  encontramos los intervalos de tiempo:

$$t_1 = \frac{49^\circ}{2\pi f} = \frac{49^\circ}{(2)(180^\circ)(60\text{Hz})} = 2.2685\text{ms}$$

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

---

$$t_2 = \frac{131^\circ}{2\pi f} = \frac{131^\circ}{(2)(180^\circ)(60\text{Hz})} = 6.0648\text{ms}$$

$$t = t_2 - t_1$$

$$t = 3.7963\text{ms}$$

Para las siguientes fibras ópticas se procede de manera similar.

#### Segunda fibra receptora

$$\text{Desalineamiento} = 13^\circ$$

$$\theta_c = 28.68^\circ - 13^\circ = 15.68^\circ$$

Distancia de separación entre fibras  $d = 230\mu\text{m}$

$$\tan(15.68^\circ) = \frac{a}{230\mu\text{m}}$$

$$a = 64.56\mu\text{m}$$

Por lo que la distancia que debe recorrer la fibra en el barrido es de  
 $D = 400 + 64.56 + 64.56 = 529.167\mu\text{m}$

$$\text{Referencia inferior } 1400\mu\text{m} - \frac{529.167\mu\text{m}}{2} - 200\mu\text{m} = 935.43\mu\text{m}$$

Referencia superior  $1800\mu\text{m}$

$$1800\mu\text{m} \rightarrow 1$$

$$935.43\mu\text{m} \rightarrow x$$

Por lo que  $x = 0.5197$

$$0.5197 \leq \text{sen}(x) \leq 1$$

Los ángulos en los extremos del intervalo son  $31.31^\circ$  y  $90^\circ$

$$t_1 = \frac{31^\circ}{2\pi f} = \frac{31^\circ}{(2)(180^\circ)(60\text{Hz})} = 1.4496\text{ms}$$

$$t_2 = \frac{90^\circ}{2\pi f} = \frac{90^\circ}{(2)(180^\circ)(60\text{Hz})} = 4.1666\text{ms}$$

$$t = t_2 - t_1$$

$$t = 2.717\text{ms}$$

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

---

#### Tercera fibra receptora

$$\text{Desalineamiento} = 9^{\circ}$$

$$\theta_c = 28.68^{\circ} - 13^{\circ} = 19.68^{\circ}$$

Distancia de separación entre fibras  $d = 220\mu\text{m}$

$$\tan(19.68^{\circ}) = \frac{a}{220\mu\text{m}}$$

$$a = 78.68\mu\text{m}$$

Por lo que la distancia que debe recorrer la fibra en el barrido es de  $D = 400 + 78.68 + 78.68 = 557.367\mu\text{m}$

$$\text{Referencia inferior } 1000\mu\text{m} - \frac{557.367\mu\text{m}}{2} - 200\mu\text{m} = 521.3165\mu\text{m}$$

$$\text{Referencia superior } 1000\mu\text{m} + \frac{557.367\mu\text{m}}{2} + 200\mu\text{m} = 1478.68\mu\text{m}$$

$$1800\mu\text{m} \rightarrow 1$$

$$521.3165\mu\text{m} \rightarrow x$$

Por lo que  $x = 0.2896$  y también

$$1800\mu\text{m} \rightarrow 1$$

$$1478.68\mu\text{m} \rightarrow y$$

Por lo que  $y = 0.8215$

$$0.2896 \leq \text{sen}(x) \leq 0.8215$$

Los ángulos en los extremos del intervalo son  $16.83^{\circ}$  y  $55.23^{\circ}$

$$t_1 = \frac{16.83^{\circ}}{2\pi f} = \frac{16.83^{\circ}}{(2)(180^{\circ})(60\text{Hz})} = 0.7794\text{ms}$$

$$t_2 = \frac{55.23^{\circ}}{2\pi f} = \frac{55.23^{\circ}}{(2)(180^{\circ})(60\text{Hz})} = 2.5571\text{ms}$$

$$t = t_2 - t_1$$

$$t = 1.777\text{ms}$$

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

---

#### Cuarta fibra receptora

$$\text{Desalineamiento} = 6^{\circ}$$

$$\theta_c = 28.68^{\circ} - 6^{\circ} = 22.68^{\circ}$$

Distancia de separación entre fibras  $d = 240\mu\text{m}$

$$\tan(22.68^{\circ}) = \frac{a}{240\mu\text{m}}$$

$$a = 100.296\mu\text{m}$$

Por lo que la distancia que debe recorrer la fibra en el barrido es de  $D = 400 + 100.296 + 100.296 = 600.5915\mu\text{m}$

$$\text{Referencia inferior } 600\mu\text{m} - \frac{600.5915\mu\text{m}}{2} - 200\mu\text{m} = 99.704\mu\text{m}$$

$$\text{Referencia superior } 600\mu\text{m} + \frac{600.5915\mu\text{m}}{2} + 200\mu\text{m} = 1100.296\mu\text{m}$$

$$1800\mu\text{m} \rightarrow 1$$

$$99.704\mu\text{m} \rightarrow x$$

Por lo que  $x = 0.0554$  y también

$$1800\mu\text{m} \rightarrow 1$$

$$1100.296\mu\text{m} \rightarrow y$$

Por lo que  $y = 0.6113$

$$0.0554 \leq \text{sen}(x) \leq 0.6113$$

Los ángulos en los extremos del intervalo son  $3.176^{\circ}$  y  $37.68^{\circ}$

$$t_1 = \frac{3.176^{\circ}}{2\pi f} = \frac{3.176^{\circ}}{(2)(180^{\circ})(60\text{Hz})} = 0.1470\text{ms}$$

$$t_2 = \frac{37.68^{\circ}}{2\pi f} = \frac{37.68^{\circ}}{(2)(180^{\circ})(60\text{Hz})} = 1.744\text{ms}$$

$$t = t_2 - t_1$$

$$t = 1.597\text{ms}$$

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

---

#### Quinta fibra receptora

$$\text{Desalineamiento} = 4^0$$

$$\theta_c = 28.68^0 - 6^0 = 24.68^0$$

Distancia de separación entre fibras  $d=240\mu\text{m}$

$$\tan(24.68^0) = \frac{a}{240\mu\text{m}}$$

$$a = 110.286\mu\text{m}$$

Por lo que la distancia que debe recorrer la fibra en el barrido es de  $D=400+110.286+110.286=620.5724\mu\text{m}$

$$\text{Referencia inferior } 200\mu\text{m} - \frac{620.5724\mu\text{m}}{2} - 200\mu\text{m} = -310.286\mu\text{m}$$

$$\text{Referencia superior } 200\mu\text{m} + \frac{620.5724\mu\text{m}}{2} + 200\mu\text{m} = 710.286\mu\text{m}$$

$$1800\mu\text{m} \rightarrow 1$$

$$-310.286\mu\text{m} \rightarrow x$$

Por lo que  $x=-0.1724$  y también

$$1800\mu\text{m} \rightarrow 1$$

$$710.286\mu\text{m} \rightarrow y$$

Por lo que  $y= 0.3944$

$$-0.1724 \leq \text{sen}(x) \leq 0.3944$$

Los ángulos en los extremos del intervalo son  $-9.9274^0$  y  $23.2285^0$

$$t_1 = \frac{-9.9274^0}{2\pi f} = \frac{-9.9274^0}{(2)(180^0)(60\text{Hz})} = -0.46\text{ms}$$

$$t_2 = \frac{23.2285^0}{2\pi f} = \frac{23.2285^0}{(2)(180^0)(60\text{Hz})} = 1.0754\text{ms}$$

$$t = t_2 - t_1$$

$$t = 1.5354\text{ms}$$

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

Experimentalmente se mide la intensidad del haz a la salida de cada fibra mediante un fotodiodo en serie con una resistencia de 100 ohms obteniéndose las siguientes gráficas por cada fibra.

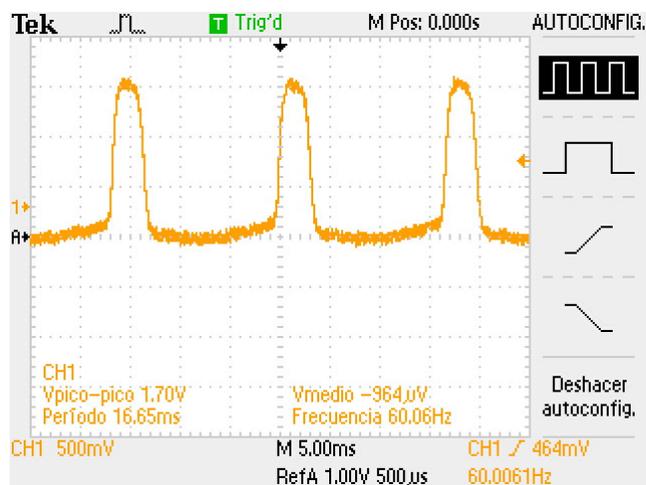


Figura 3.21 Señal de salida de la fibra óptica 1.

Posición de la fibra	1ra.
Tiempo del inicio al fin del pulso	3.6ms
Ancho RMS del pulso	2.8ms
Amplitud del pulso	1.7V
Frecuencia de la señal	60Hz

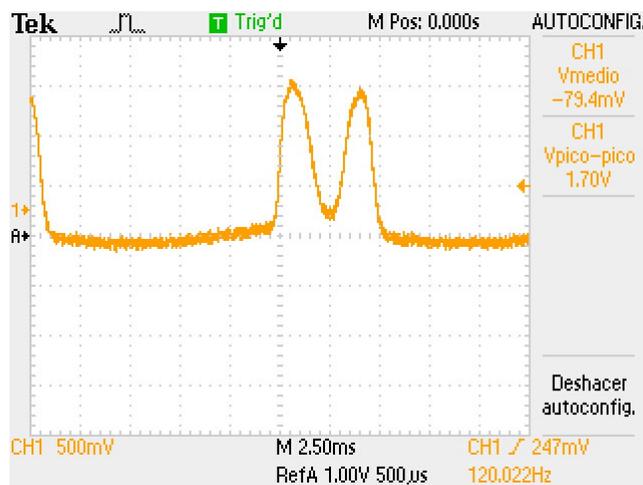


Figura 3.22 Señal de salida de la fibra óptica 2.

Posición de la fibra	2da.
Tiempo del inicio al fin del pulso	2.6ms
Ancho RMS del pulso	1.4ms
Amplitud del pulso	1.7V
Frecuencia de la señal	120Hz

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

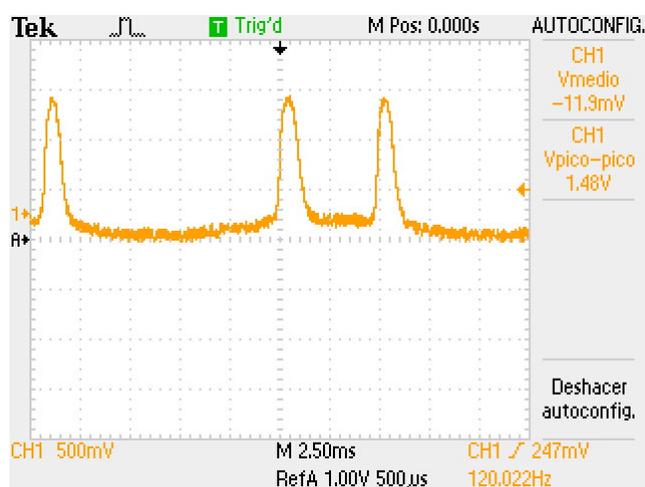


Figura 3.23 Señal de salida de la fibra óptica 3.

Posición de la fibra	3ra.
Tiempo del inicio al fin del pulso	1.7ms
Ancho RMS del pulso	0.9ms
Amplitud del pulso	1.48V
Frecuencia de la señal	120Hz

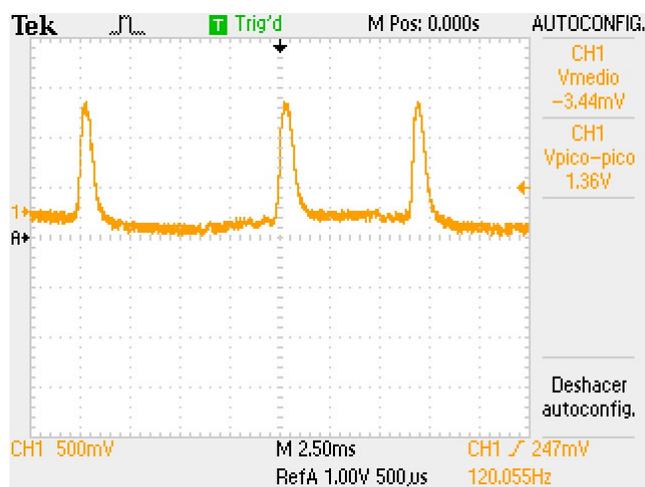


Figura 3.24 Señal de salida de la fibra óptica 4.

Posición de la fibra	4ta.
Tiempo del inicio al fin del pulso	1.5ms
Ancho RMS del pulso	0.7ms
Amplitud del pulso	1.36V
Frecuencia de la señal	120Hz

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

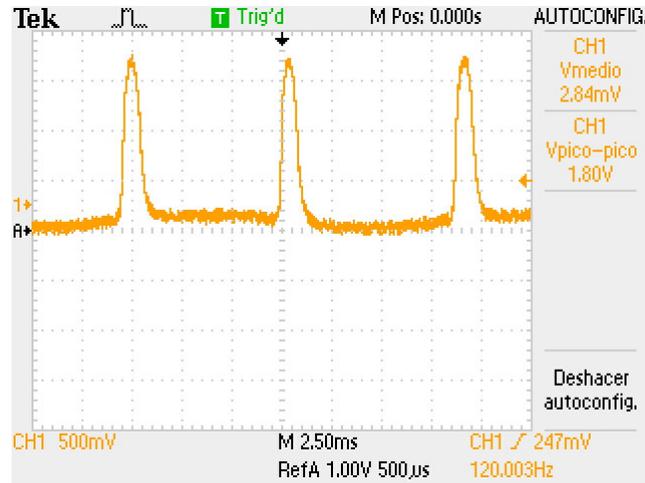


Figura 3.25 Señal de salida de la fibra óptica 5.

Posición de la fibra	5ta.
Tiempo del inicio al fin del pulso	1.4ms
Ancho RMS del pulso	0.6ms
Amplitud del pulso	1.8V
Frecuencia de la señal	120Hz

Tabla 3.1. Tiempos de transmisión teóricos y experimentales para el experimento 1.

	Tiempo de transmisión teórico (ms)	Tiempo de transmisión experimental (ms)	% error
Fibra óptica 1	3.8	3.6	5.3
Fibra óptica 2	2.72	2.6	4.4
Fibra óptica 3	1.78	1.7	4.5
Fibra óptica 4	1.6	1.5	6.3
Fibra óptica 5	1.54	1.4	9.1

### Conclusiones del experimento 1

Se demostró la factibilidad de construcción de un conmutador óptico funcional con una fibra óptica transmisora montada en una viga resonante a gran escala.

Se demostró que existen diferencias de los tiempos de transmisión de datos para cada una de las fibras ópticas receptoras.

Se compararon los tiempos de transmisión teóricos con los experimentales.

Las gráficas presentadas corresponden a solo 5 fibras ópticas de un total del arreglo de 1x10 esto es porque la señal de salida de la fibra 1 es igual a la de la fibra 10, la salida de la fibra 2 es igual a la salida de la fibra 9 y así sucesivamente. Como se puede observar, la salida para cada una de las fibras ópticas presenta un intervalo de tiempo de

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

---

transmisión diferente, tal como se esperaba. Para el tiempo de transmisión de la fibra 1 se observa que el osciloscopio muestra una frecuencia de 60Hz y un mayor tiempo de transmisión, esto es debido a que el movimiento es más lento y el osciloscopio registra una sola señal de entrada, pero en realidad está recibiendo la señal de ida y la de vuelta del movimiento de oscilación juntas.

Para las demás fibras, el osciloscopio muestra una frecuencia de 120Hz, esto se debe a que para un solo ciclo las fibras ópticas que no están en los extremos son iluminadas dos veces, cuanto más cerca de un extremo se puede notar que las fibras reciben la luz en un intervalo corto y después uno largo, y cuanto más al centro se encuentre la fibra en el arreglo receptor los intervalos de presencia de luz son más equiespaciados.

Las fibras ópticas centrales en el arreglo presentan el menor tiempo de transmisión, esto es provocado porque la velocidad de la viga en ese instante es máxima.

#### 3.4.2 Experimento #2

**Objetivo:** encontrar los tiempos de transmisión para cada una de las fibras ópticas de un arreglo 1xn con el conmutador de viga oscilante con superficie reflectiva.

**Procedimiento:**

Utilizando la variante de la viga con superficie reflectiva se hace incidir un haz láser Melles Griot clase 2 de 1mW de potencia. Las reflexiones del haz incidente en el espejo en movimiento producen una línea ocasionada por el barrido del haz mientras la viga se encuentra en resonancia.

Sin embargo, al igual que el conmutador anterior, el arreglo de fibras ha de colocarse en una forma semicircular. Esto se debe a dos motivos: a) la distancia recorrida por el haz láser debe ser la misma para todos los puntos de recepción garantizando la homogeneidad de la señal en los arreglos receptores y b) los haces reflejados deben ser captados por superficies perpendiculares (fotodetectores, cara de la fibra óptica, etc.) a la trayectoria del haz con la finalidad de minimizar las pérdidas y mejorar el acoplamiento.

Del esquema de la figura 3.26 se pueden apreciar dos distancias importantes:  $d_1$  que es la distancia que recorre el haz reflejado hasta su recepción (línea roja gruesa), y  $d_2$  que es la distancia adicional que recorre el haz antes de ser reflejado (línea roja punteada). Cuando la viga se encuentra en la posición extrema “a”, la distancia  $d_1$  es máxima y la distancia  $d_2$  vale cero. Cuando la viga se encuentra en la posición extrema “b”, la distancia  $d_2$  es máxima y la distancia  $d_1$  es cero.

De este modo se encuentra que la suma de las distancias  $d_1$  y  $d_2$  es una constante. Existen infinitud de líneas curvas que satisfacen la igualdad  $k=d_1+d_2$ , en la figura solo se muestran dos de ellas. Esto indica que el tamaño en el arreglo de fibras receptoras se puede incrementar tanto como la intensidad del haz láser, las pérdidas del medio y la calidad de la superficie reflectiva lo permitan.

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

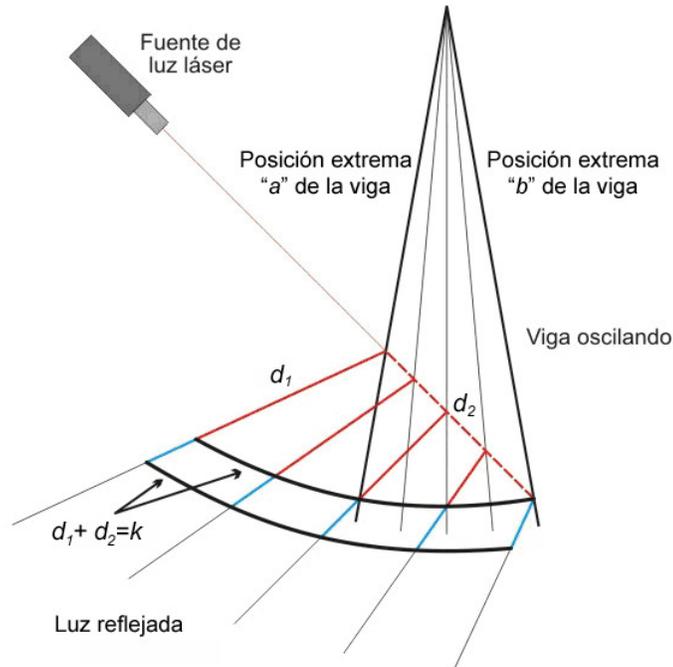


Figura 3.26 Esquema del haz láser reflejado en una viga oscilando con superficie reflectiva.

Si el haz proveniente de la fuente láser incide con un ángulo de  $45^\circ$  respecto a la viga en la posición extrema “a”, la longitud de la curva mínima para colocar el arreglo estará dada por el doble del arco que forma la viga en resonancia en su extremo móvil. Así se encuentra el lugar de todos los puntos sobre los que se puede colocar un arreglo de receptores lo más cercano posible al conmutador de viga con espejo, y se puede conocer entonces, la cantidad mínima de elementos del arreglo receptor.

$$l_{\text{arreglo}} = 2l_{\text{arco}}$$

En este caso la longitud de la viga (radio de la circunferencia) es de 47mm y su ángulo de movimiento es de  $14^\circ$  por lo que la longitud de la curva para cuando  $k=0$  es de:

$$l_{\text{arco}} = \frac{2\pi r \alpha}{360}$$

$$l_{\text{arco}} = \frac{2\pi(47\text{mm})(14^\circ)}{360}$$

$$l_{\text{arco}} = 11.48\text{mm}$$

$$l_{\text{arreglo}} = 23\text{mm}$$

El diámetro de las fibras ópticas con las que se trabajó es de  $400\mu\text{m}$ , por lo que la cantidad de elementos del arreglo de fibras receptoras mínimo es de 58 fibras ópticas.

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

Los siguientes resultados muestran las lecturas obtenidas con un arreglo de fibras de 1x10 colocados justo en el centro de la línea que forma el haz reflejado. Se colocan fibras en la recepción a una distancia  $d_1=5\text{cm}$  de la viga resonante. La siguiente figura muestra la señal a la salida de la fibra receptora.

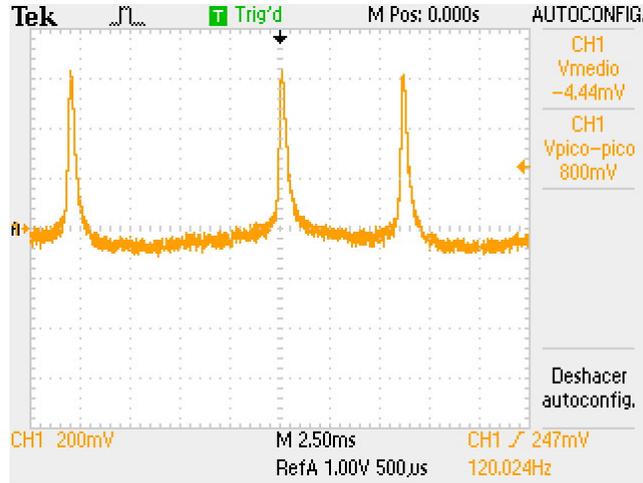


Figura 3.27 Señal de salida de la fibra óptica 1

Posición de la fibra	1ra.
Tiempo del inicio al fin del pulso	1.3ms
Ancho RMS del pulso	0.4ms
Amplitud del pulso	800mV
Frecuencia de la señal	120Hz

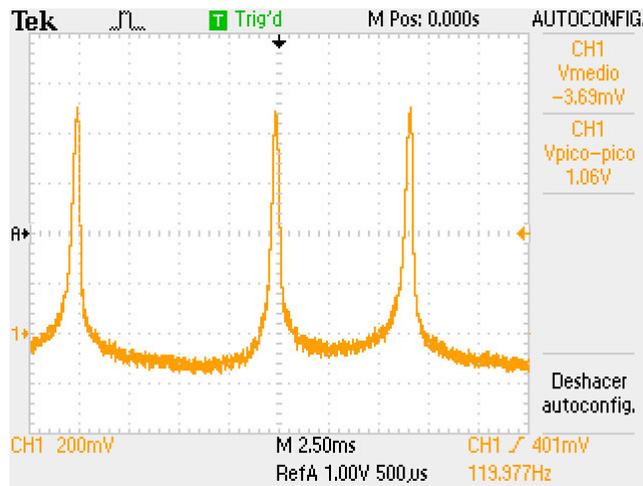


Figura 3.28 Señal de salida de la fibra óptica 2

Posición de la fibra	2da.
Tiempo del inicio al fin del pulso	1.4ms
Ancho RMS del pulso	0.4ms
Amplitud del pulso	1.06V
Frecuencia de la señal	120Hz

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

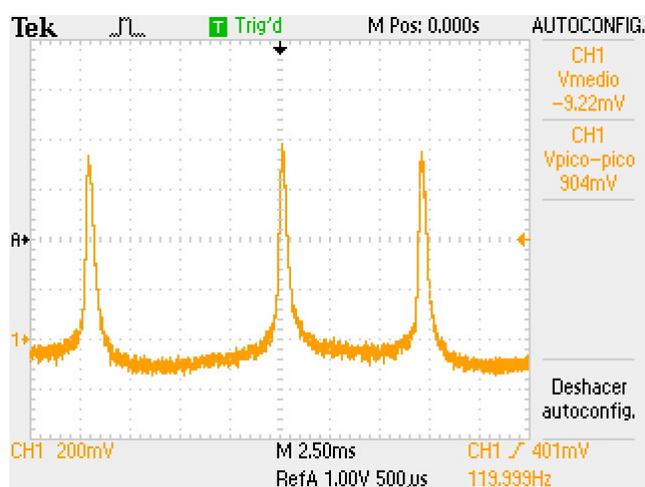


Figura 3.29 Señal de salida de la fibra óptica 3

Posición de la fibra	3ra.
Tiempo del inicio al fin del pulso	1.5ms
Ancho RMS del pulso	0.4ms
Amplitud del pulso	904mV
Frecuencia de la señal	120Hz

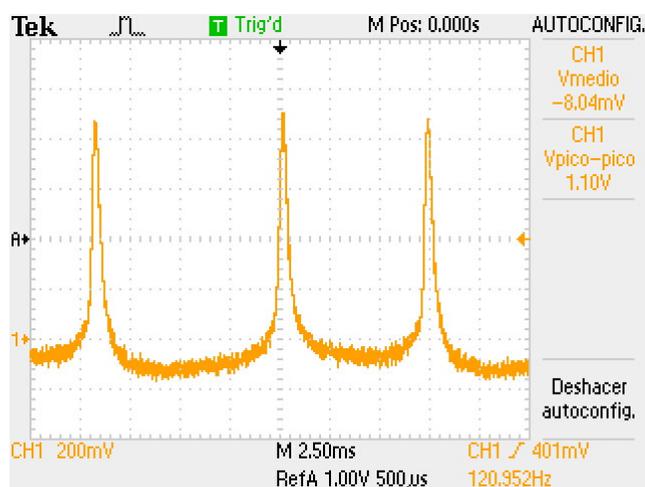


Figura 3.30 Señal de salida de la fibra óptica 4

Posición de la fibra	4ta.
Tiempo del inicio al fin del pulso	1.7ms
Ancho RMS del pulso	0.4ms
Amplitud del pulso	1.1V
Frecuencia de la señal	121Hz

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

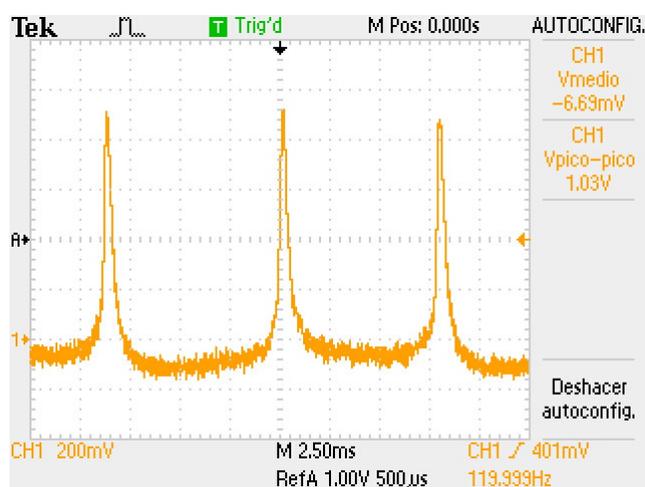


Figura 3.31 Señal de salida de la fibra óptica 5

Posición de la fibra	5ta.
Tiempo del inicio al fin del pulso	1.7ms
Ancho RMS del pulso	0.4ms
Amplitud del pulso	1.03V
Frecuencia de la señal	120Hz

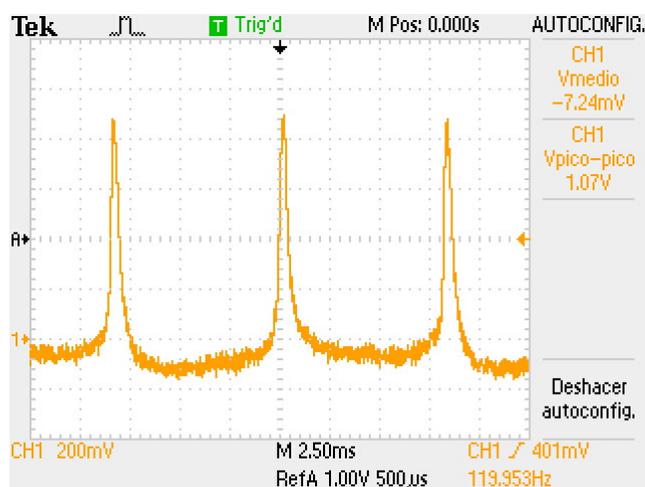


Figura 3.32 Señal de salida de la fibra óptica 6

Posición de la fibra	6ta.
Tiempo del inicio al fin del pulso	1.7ms
Ancho RMS del pulso	0.4ms
Amplitud del pulso	1.07V
Frecuencia de la señal	120Hz

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

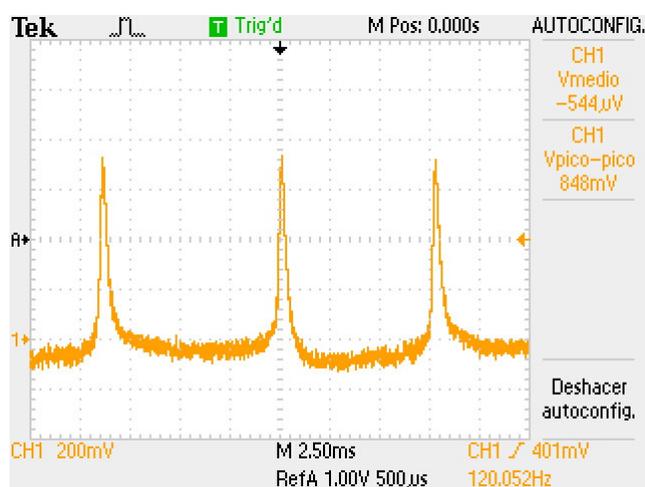


Figura 3.33 Señal de salida de la fibra óptica 7

Posición de la fibra	7a.
Tiempo del inicio al fin del pulso	1.4ms
Ancho RMS del pulso	0.3ms
Amplitud del pulso	848mV
Frecuencia de la señal	120Hz

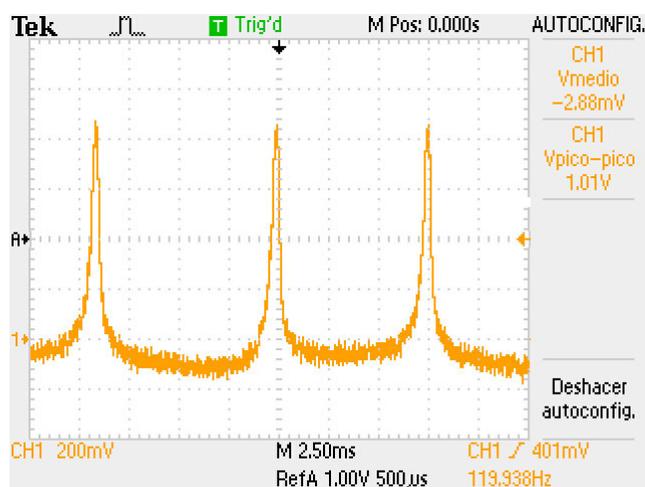


Figura 3.34 Señal de salida de la fibra óptica 8

Posición de la fibra	8va.
Tiempo del inicio al fin del pulso	1.5ms
Ancho RMS del pulso	0.4ms
Amplitud del pulso	1.01V
Frecuencia de la señal	120Hz

### 3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn

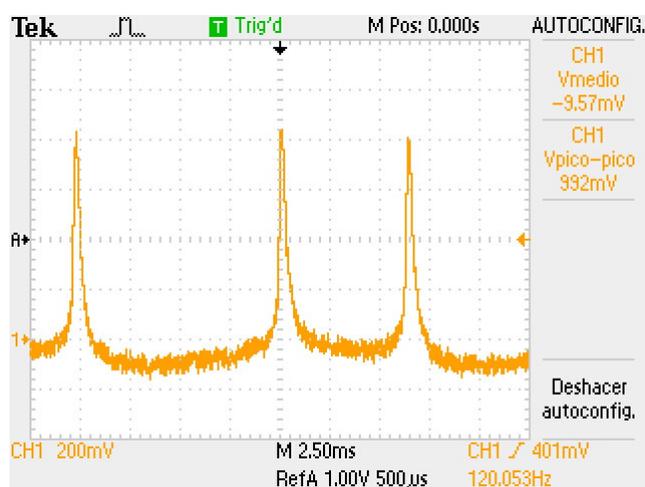


Figura 3.35 Señal de salida de la fibra óptica 9

Posición de la fibra	9a.
Tiempo del inicio al fin del pulso	1.8ms
Ancho RMS del pulso	0.3ms
Amplitud del pulso	992mV
Frecuencia de la señal	120Hz

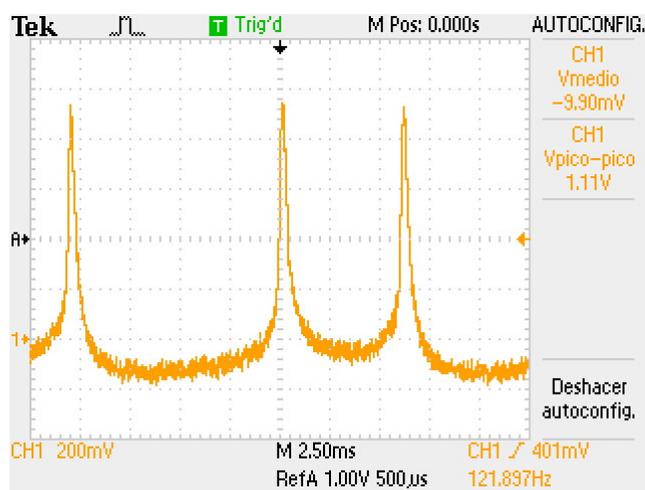


Figura 3.36 Señal de salida de la fibra óptica 10

Posición de la fibra	10a.
Tiempo del inicio al fin del pulso	2ms
Ancho RMS del pulso	0.4ms
Amplitud del pulso	1.11V
Frecuencia de la señal	121.9Hz

## Conclusiones del experimento 2

Se demostró la factibilidad de construcción de un conmutador óptico a gran escala funcional con una superficie reflectiva y barrido de haz láser en una viga resonante.

Se corroboraron los diferentes tiempos existentes en la separación de la señal de recepción de datos.

De las gráficas se observa que el comportamiento de la señal recibida es análogo al del experimento 1, ya que a medida que se toman muestras de las fibras ópticas centrales los espacios entre la señal de ida y vuelta recibidas se vuelven más equiespaciados. Debido a que el arreglo de fibras mínimo para recibir la señal es de 1x58, y que las muestras fueron tomadas en la sección central de la línea formada por el haz reflejado, se puede observar que el ancho de los pulsos varía muy poco y que el ancho de la señal útil es casi constante.

Es importante mencionar que el tamaño del arreglo de fibras receptoras dependerá de la distancia a la que ésta se coloque y ello dependerá de la calidad de la superficie reflectiva, la potencia del haz láser y las pérdidas en el medio.

## 3.5 Conclusiones

Se demostró la factibilidad de construcción de un conmutador óptico de una fibra óptica transmisora montada sobre una viga resonante y varias fibras ópticas receptoras.

Se demostró la factibilidad de construcción de un conmutador óptico con espejo montado en una viga resonante para realizar un barrido en el haz láser y la conmutación óptica de tipo 1xn.

Se demostró la existencia de intervalos de tiempo diferentes en la conmutación de canales ópticos para estos tipos de conmutadores.

Se corroboraron experimentalmente los cálculos de frecuencia de resonancia y tiempos de transmisión esperados en el primer experimento con diferencias entre las predicciones teóricas y datos experimentales de 5.3% para la primera y la décima fibra, 4.4% para la segunda y novena fibra, 4.5% para la tercera y octava fibra, 6.3% para la cuarta séptima fibra y 9.1% para la quinta y sexta fibra.

La segunda variante del conmutador (espejo montado sobre la viga) mostró un desempeño notablemente superior al de la primera variante (fibra óptica montada en la viga). La segunda variante del conmutador necesita un menor flujo magnético para oscilar, o con el mismo flujo magnético tiene un desplazamiento angular más grande. Otro punto a favor del conmutador con espejo es que el tamaño del arreglo receptor puede incrementarse aumentando la distancia entre las fibras receptoras y el haz láser reflejado.

### *3. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico multipuertos 1xn*

---

El empleo de un modelo físico a gran escala (maqueta funcional) ha mostrado importantes detalles a tomar en cuenta en el desarrollo de un conmutador en chip MOEMS.

El uso de un espejo en la segunda variante del conmutador mejora la reflectividad comparada con aplicar procesos de pulido para obtener un terminado espejo en la viga. Esto conlleva a la variación de la frecuencia de resonancia de la viga, la cual requiere un ajuste que consiste en la reducción de la longitud de la viga.

En el desarrollo de la maqueta funcional, el empleo de los modelos matemáticos de comportamiento mecánico de la viga y simulaciones de su comportamiento mecánico con software fue de gran utilidad.

Se encontró experimentalmente que la alimentación del electroimán con una forma de onda de 60 Hz rectificadas (pulsos de media onda obtenidos con la implementación de diodo único rectificador) fue muy eficiente, ya que redujo a la mitad el consumo de la energía y redujo el calentamiento del embobinado del electroimán (y del transformador eléctrico también). Una conclusión adicional es que la forma de onda de alimentación eléctrica de electroimán puede ser optimizada para obtener el mejor rendimiento en la implementación del movimiento oscilatorio de la viga.

Las diferentes modificaciones que se realizaron a la versión final del dispositivo conmutador óptico, incrementaron en gran medida su eficiencia y permitieron lograr una transmisión de la luz de uno a varios puertos (fibras ópticas) de salida con características adecuadas para la conmutación de redes de fibra óptica, más específicamente, de redes de sensores ópticos.

### **Bibliografía**

1. Dennis G. Zill, Francisco Sánchez Frago "Ecuaciones diferenciales con aplicaciones de modelado" 6ta ed., Ed. Thomson, pp. 222, 1997.
2. Wilson F., Lord A. E., "Young's modulus determination via simple, inexpensive static and dynamic measurements". Am. J. Phys. 41, pp. 653-656, 1973.
3. Turvey K. "An undergraduate experiment on the vibration of a cantilever and its application to the determination of Young's modulus". Am. J. Phys. 58 (5), pp. 483-487, 1990
4. <http://www.mece.ualberta.ca/tutorials/ansys/>

## 4. Propuesta de un conmutador óptico MOEMS

La propuesta conceptual del conmutador óptico MOEMS basa su principio de operación en el segundo conmutador descrito en la sección 3. Se seleccionó el conmutador de superficie reflectiva por su movimiento más amplio y mayores dimensiones en el puerto de salida. Tomando en cuenta los resultados obtenidos con el modelo físico a gran escala, se propone una adaptación a un modelo en pequeña escala MOEMS.

La selección de un proceso de fabricación adecuado es justificada por la exigencia de los costos de producción, pues utilizando un proceso estándar multiusuario, una sola oblea de silicio puede aprovecharse para la creación de muchos chips, ya sean iguales o con diferente diseño pero con el mismo proceso de fabricación.

Dado que se busca la reflexión de un haz láser, lo más conveniente es tener una delgada película de metal como superficie reflectiva. El proceso de fabricación que permite realizar depósitos de metal verticalmente es MetalMUMPS.

### 4.1 Diseño del dispositivo a pequeña escala

El primer modelo propuesto fue descartado pues el área reflectiva no era lo suficientemente grande para cubrir todo el movimiento de barrido de la viga y el peso en el extremo móvil limitaba su oscilación (figura 4.1 y 4.2).

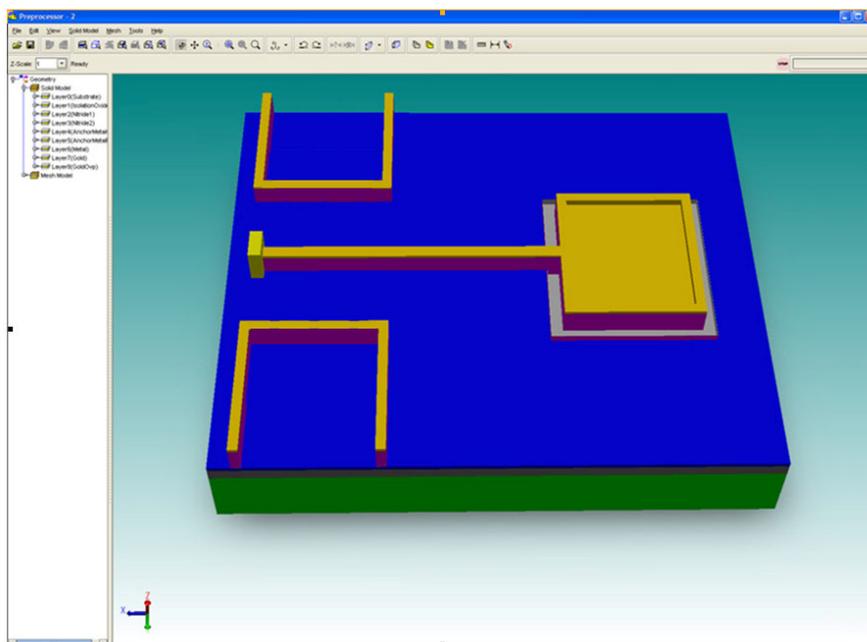


Figura 4.1 Primer prototipo de conmutador MOEMS modelado con COVENTOR.

#### 4. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico MOEMS

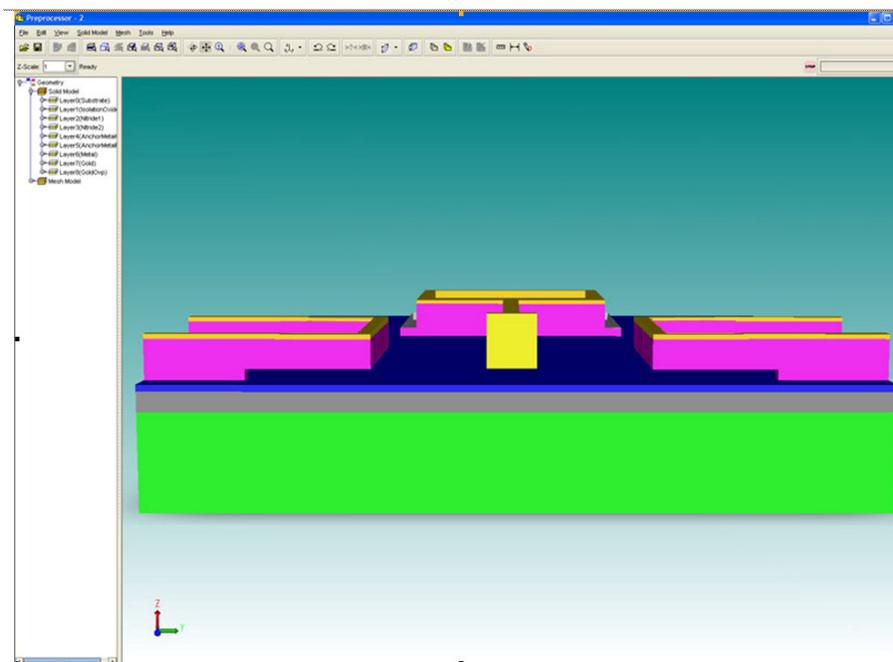


Figura 4.2 Vista frontal del primer prototipo realizado con el proceso MetalMUMPS modelado con COVENTOR

El segundo modelo también basa su movimiento en una flexión lateral con al menos un electrodo que, mediante fuerza magnética atraerá la viga. El modelo es análogo al modelo a gran escala, presentando el área reflectiva a un costado de la viga vertical y un electrodo de lado opuesto.

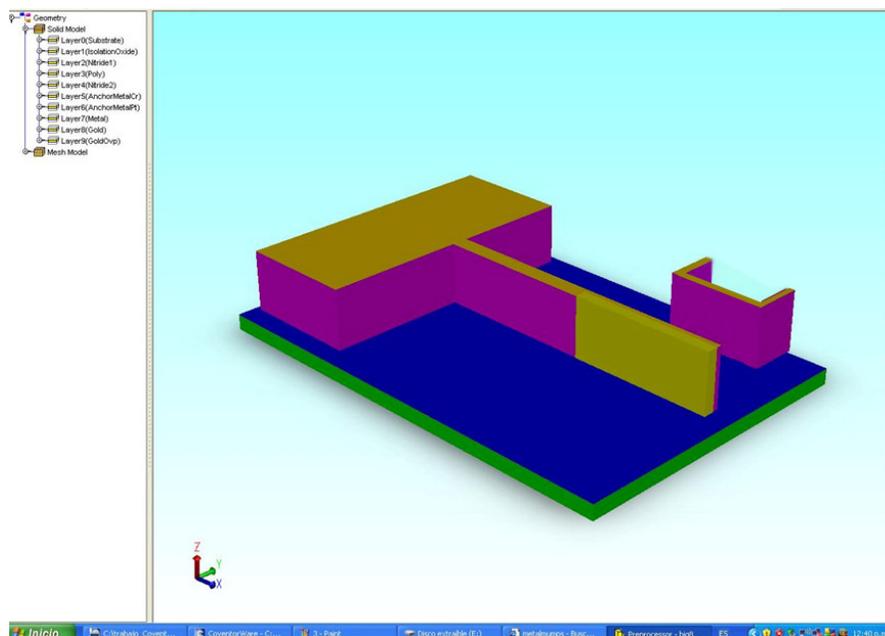


Figura 4.3 Segundo prototipo con superficie reflectiva lateral basado en el proceso MetalMUMPS realizado con el software COVENTOR.

#### 4. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico MOEMS

Debido a la estructura de la viga y de su anclaje, esta presentaba un movimiento vertical más que horizontal incluso en las pruebas mecánicas preeliminares con una presión en el costado del la viga cercano al electrodo como se muestra en la figura 4.4.

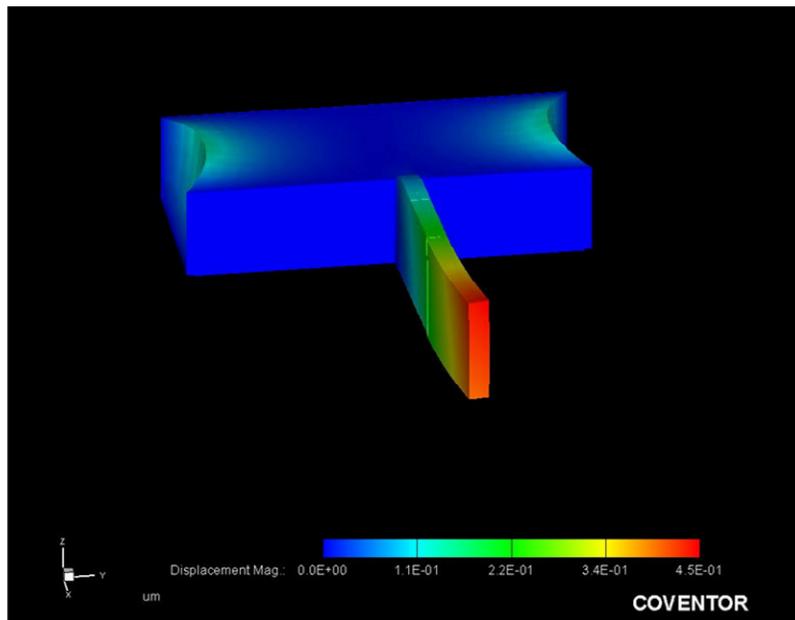


Figura 4.4 Flexión vertical de la viga con MetalMUMPS debido a su estructura.

Otra alternativa fue el empleo del proceso PolyMUMPS que tiene como fundamento, 3 capas de polisilicio y una delgada capa de metal para ser utilizada como material reflejante. El diseño cambia para presentar un modelo en el que las oscilaciones no son laterales sino verticales.

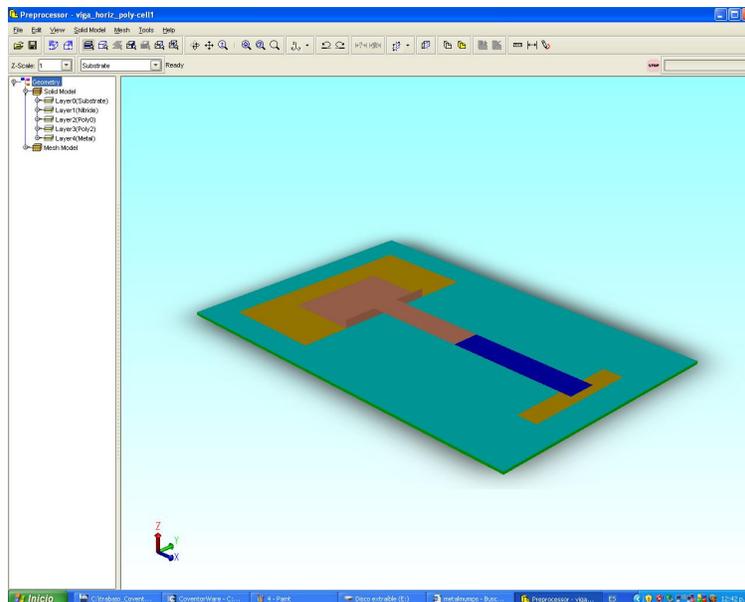


Figura 4.5 Tercer modelo del conmutador óptico basado en el proceso PolyMUMPS con COVENTOR.

#### 4. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico MOEMS

---

Las pruebas mecánicas preeliminares muestran un movimiento de flexión como se esperaba, sin embargo, alteraciones al proceso fueron necesarias. El espesor del segundo depósito de polisilicio llamado Poly1 es, normalmente de  $2\mu\text{m}$ . Para permitir el libre movimiento de la viga este depósito se incrementó a  $20\mu\text{m}$ .

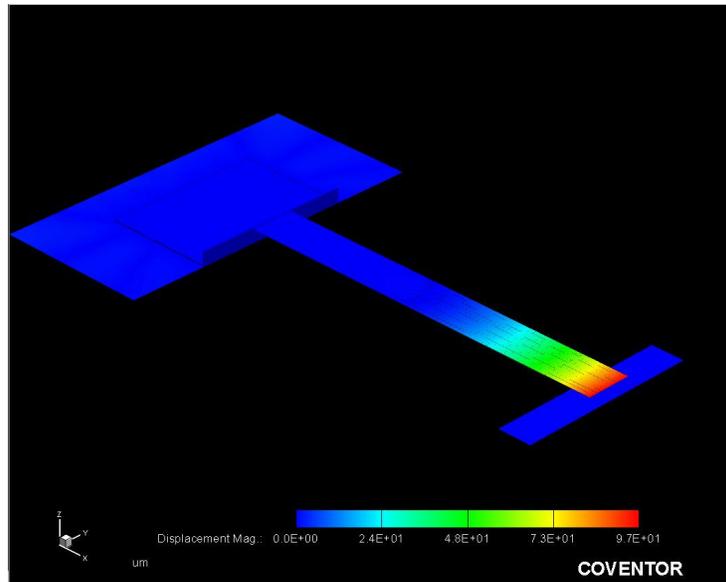


Figura 4.6 Análisis del conmutador con FEA (Finit Element Análisis) con COVENTOR.

La frecuencia de resonancia de este dispositivo intentará adaptarse respecto a su contraparte a gran escala, sin embargo su movimiento será el mismo y el comportamiento de la señal de salida hacia las fibras receptoras presentará características similares a la maqueta a gran escala.

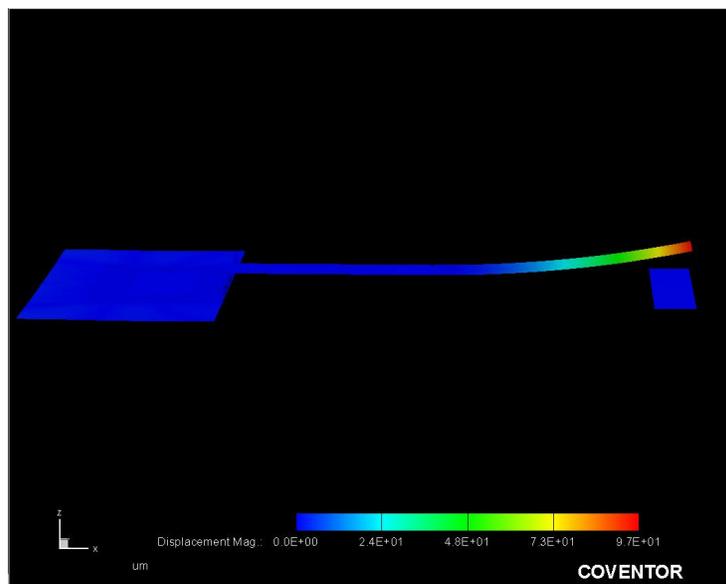


Figura 4.7 Movimiento de flexión vertical del dispositivo MOEMS simulado con COVENTOR.

### 4.3 Evaluación de las características del dispositivo

Para obtener la frecuencia de resonancia de la viga se procede igual que para la viga de acero de la maqueta funcional.

En este caso la viga es de polisilicio y posee las siguientes características:

$$\text{Módulo de Young } Y=169 \times 10^3 \frac{N}{m^2}.$$

$$\text{Densidad } \rho=2230 \frac{kg}{m^3}.$$

Dimensiones de la viga:  $a=20\mu m$ ,  $b=2\mu m$ ,  $l=220\mu m$ .

Por lo que se tiene:

$$I = \frac{ab^3}{12}$$

$$f_1 = \frac{r_1^2}{2\pi} \sqrt{\frac{YI}{\rho abl^4}}$$

$$f_1 = \frac{1.875^2}{2\pi} \sqrt{\frac{\left(169 \times 10^3 \frac{N}{m^2}\right) \left(1.33 \times 10^{-23} m^4\right)}{\left(2230 \frac{kg}{m^3}\right) \left(20 \times 10^{-6} m\right) \left(2 \times 10^{-6} m\right) \left(220 \times 10^{-6} m\right)^4}}$$

$$f_1 = (0.56) \sqrt{\frac{2.25 \times 10^{-18} Nm^2}{2.09 \times 10^{-22} kgm^3}}$$

$$f_1 = (0.56) \sqrt{10,767.8 \frac{N}{kgm^3}}$$

$$f_1 = 58.11 Hz$$

La simulación de la frecuencia de resonancia para este dispositivo por medio de ANSYS muestra una frecuencia de  $f_1=58.51 Hz$  como se puede ver en la figura 4.8.

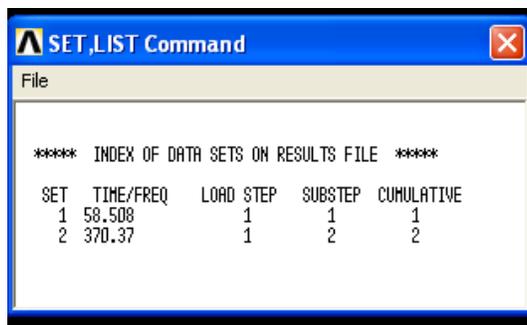


Figura 4.8 Resultado de la frecuencia de resonancia para la viga de polisilicio con ANSYS en sus primeros dos modos.

El movimiento que la viga presenta en resonancia es de  $\pm 16\mu\text{m}$  en su extremo en movimiento como se muestra en la figura 4.9, por lo que la altura del depósito de polisilicio en la capa Poly2 se trabaja a una altura de  $20\mu\text{m}$ .

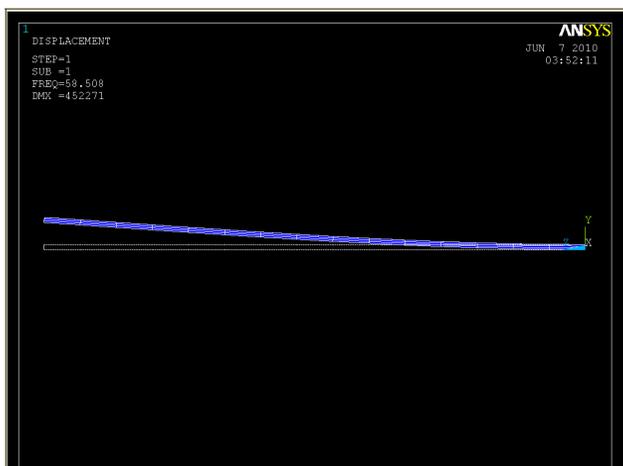


Figura 4.9 Movimiento máximo de la viga en resonancia.

El software de simulación ANSYS predice un movimiento de la viga de  $4.16^\circ$  hacia arriba y  $4.16^\circ$  hacia abajo, es decir,  $8.32^\circ$ . Sabiendo que la viga posee una longitud de  $220\mu\text{m}$ , se puede calcular la longitud del arco del movimiento de la viga y con ello la longitud mínima para colocar un arreglo.

$$l_{\text{arreglo}} = 2l_{\text{arco}}$$

$$l_{\text{arco}} = \frac{2\pi \cdot \alpha}{360}$$

$$l_{\text{arco}} = \frac{2\pi(220\mu\text{m})(8.32^\circ)}{360}$$

$$l_{\text{arco}} = 31.95\mu\text{m}$$

$$l_{\text{arreglo}} = 63.9\mu\text{m}$$

#### 4. Propuesta de un dispositivo conmutador óptico MOEMS

---

Con base en el resultado anterior, se observa que para alimentar un arreglo con varios puertos de salida, se debe colocar el arreglo de receptores a una cierta distancia del conmutador de la siguiente forma:

$$\text{Dimensión\_del\_arreglo} = \frac{4\pi(220\mu\text{m} + \text{dist})(8.32^\circ)}{(360^\circ)(\text{diámetro}_{\text{fibra}})} + 1$$

Se agrega un 1 al final de la expresión anterior porque no es necesario que el haz llegue a los bordes de la primera y la última fibra, sino simplemente al centro de la primera y de la última fibra en el arreglo.

Si el arreglo es de fibras de 400 $\mu\text{m}$  de diámetro, la distancia debe ser de 1.2mm para alimentar un arreglo de 1x2, colocando el arreglo receptor a una distancia de 5.3mm se alimenta a un arreglo de 1x5 fibras y 12.2mm para un arreglo de 1x10 fibras.

### Conclusiones

Mediante el software de simulación se obtuvieron los resultados para el dispositivo con las siguientes características:

Material: Polisilicio, proceso PolyMUMPS

Dimensiones de la viga: 220 $\mu\text{m}$ .x 20 $\mu\text{m}$  x 2 $\mu\text{m}$

Frecuencia de resonancia: 58.1Hz

Se demostró la factibilidad del desarrollo de un conmutador óptico MOEMS con el principio vibratorio de operación.

Se analizaron las características del dispositivo por medio del software de simulación ANSYS y Coventor.

Se analizaron diferentes procesos de fabricación para el desarrollo del conmutador óptico en forma de MOEMS.

Para que la fabricación del conmutador MOEMS sea factible, deben realizarse algunas modificaciones al proceso comercial utilizado, PolyMUMPS, depositando una capa más gruesa de polisilicio en la capa Poly1 con la finalidad de que la capa Poly2 tenga una mayor distancia de la base y permita así un libre movimiento resonante.

El dispositivo se apegó a un proceso comercial con la finalidad de garantizar una fabricación sin fallas debido a la garantía que ofrece MEMSCAP en la fabricación de dispositivos con sus procesos.

Algunos problemas a resolver se detallan en la siguiente sección.

### 5. Discusión

En este trabajo se ha analizado una nueva técnica de conmutación de fibras ópticas. Esta técnica consiste en utilizar el movimiento vibratorio de un elemento mecánico que desvía la luz de un puerto de entrada a varios puertos de salida. Los análisis teóricos, de software y empíricos demuestran la factibilidad de este principio. Los requerimientos de velocidad de conmutación fueron cubiertos exitosamente, dejando abierta la posibilidad de variar la frecuencia de oscilación del dispositivo siguiendo un análisis similar al utilizado en el presente trabajo, variando las dimensiones de la viga y la frecuencia de la señal que excita su movimiento.

El empleo de una viga en su frecuencia de resonancia disminuye la energía requerida para tenerla en oscilación. Se encontró que la alimentación con una corriente pulsátil (rectificación de media onda) proporciona una serie de impulsos de media onda de 60Hz y tiene una ventaja significativa respecto a la alimentación con corriente alterna de 60Hz sin rectificación. Sin esta rectificación, la corriente que circula por el electroimán cambiará de sentido una vez por ciclo, y dada la naturaleza ferromagnética de la viga, se verá atraída por los dos medios ciclos de la señal senoidal, con una frecuencia de 120Hz. El empleo de la alimentación anteriormente descrita brindó una oscilación más amplia de la viga y redujo la corriente necesaria para hacerla oscilar con un factor de 2 (de 1A a 500mA).

El principal problema a resolver en la maqueta del conmutador del experimento 1, ocurre al agregar fibra óptica la masa de la viga cambia drásticamente. Sabemos, por el modelo de resonancia de una viga que incrementar la masa en el extremo de la viga hace que su frecuencia de resonancia baje, sin embargo, en este caso y debido a que la fibra óptica está presente a lo largo de toda la viga, se incrementa enormemente su rigidez. El incremento de rigidez por el contrario, incrementa la frecuencia de resonancia y limita su movimiento, por ello se presenta un movimiento de solo  $\pm 4^\circ$  y la longitud de la viga se aumenta para continuar con una frecuencia de resonancia a 60 Hz. A pesar de que la amplitud de vibración es menor, es suficiente para poder realizar una conmutación con acoplamiento en un arreglo de  $1 \times 10$  fibras.

Es importante mencionar que la inclinación juega un papel importante, pues reduce el tiempo de recepción de las fibras y resta amplitud al ángulo crítico, sin embargo, debe colocarse la mayor cantidad de fibras posible para evitar pérdidas en tiempos de conmutación no utilizados.

Se observó en el experimento 2 que los tiempos de conmutación son de aproximadamente 1.5ms, con tiempos útiles de 0.4ms para un arreglo de fibras de  $1 \times 10$  en el centro y separados del conmutador por 50mm y que al igual que en el conmutador del experimento 1, los tiempos de transmisión dependerán de la ubicación respecto a la línea de láser formada por la reflexión y también de la distancia a la que se coloque la fibra receptora, pues a mayor distancia el haz reflejado forma una línea de barrido más larga. Esto resulta de gran interés pues es factible incrementar el número de fibras receptoras aumentando la distancia a la que es colocado el arreglo respecto al conmutador, sin embargo esto presenta el problema de que la potencia de la luz disminuye cuanto mayor es la distancia de separación.

## 5. *Discusión*

---

Para evitar pérdidas de potencia en la recepción se debe usar una superficie altamente reflectiva en la viga resonante.

Los intervalos de tiempo de transmisión de la luz utilizables se obtienen con el valor RMS del voltaje del pulso en cada una de las fibras receptoras en los dos experimentos, para asegurar que la información transmitida llegue completa.

El diseño del conmutador óptico MOEMS requirió de un análisis y selección adecuada de procesos tecnológicos. El empleo de un proceso comercial multiusuario reduce costos de producción y garantiza una fabricación exitosa.

Se buscó que la superficie reflectiva sea metálica para evitar pérdidas por el material y modificando el proceso comercial PolyMUMPS se obtuvieron resultados satisfactorios.

La naturaleza de la estructura de una viga delgada hace que su movimiento natural sea vertical, por ello se desechó el prototipo de movimiento lateral y se adoptó el de movimiento vertical. El movimiento será análogo al encontrado en el experimento 2, por lo que las características de acoplamiento óptico deben coincidir con los obtenidos en el experimento 2.

## 6. Conclusiones Generales

1. Se demostró la factibilidad de un nuevo principio de conmutación óptica con el movimiento vibratorio de un elemento conmutador (una viga), para dos variantes del conmutador, el de fibra óptica integrada y el de superficie reflectiva.
2. Se demostró teóricamente y experimentalmente la existencia de diferentes ranuras de tiempo de conmutación para las fibras ópticas del arreglo receptor en los conmutadores a gran escala.
3. Se obtuvo teóricamente y experimentalmente que las diferencias entre las predicciones teóricas y los datos experimentales sobre los tiempos de transmisión no son mayores al 9.1% en el conmutador de fibra óptica integrada a gran escala.
4. Se demostró experimentalmente que con el láser y la viga utilizada en el conmutador de superficie reflectiva a gran escala, el número de fibras receptoras fue  $n=58$ . Se considera que con la optimización de los parámetros de este conmutador, el número de puertos de salida (fibras ópticas receptoras) puede aumentar en un factor de 2.
5. Se desarrolló teóricamente una variante de conmutador MOEMS de superficie reflectiva basado en el proceso comercial PolyMUMPS y su factibilidad de construcción ha sido demostrada mediante el modelado por computadora.
6. El principio de conmutación presentado posee la ventaja de contar con un gran número de puertos de salida; por otro lado, los tiempos de conmutación son del orden de milisegundos, lo que satisface su aplicación principalmente a las redes ópticas de sensores y no a redes de telecomunicaciones.

## A. Simulación mecánica de una viga por medio de ANSYS

ANSYS es un software de simulación mecánica, eléctrica y magnética que utiliza el Análisis de Elemento Finito (Finit Element Analysis, FEA) como método de solución.

La obtención de la frecuencia de resonancia para una viga anclada por un extremo con ANSYS se muestra a continuación.

Del menú del lado izquierdo (ANSYS Main Menu) se selecciona: “Preprocessor”, “Element Type” y “Add/Edit/Delete” con lo que se escoge el tipo de elemento con el se que desea trabajar.

Se selecciona “Coupled Field” del tipo “Scalar Brick 5” como se muestra en la figura A1.

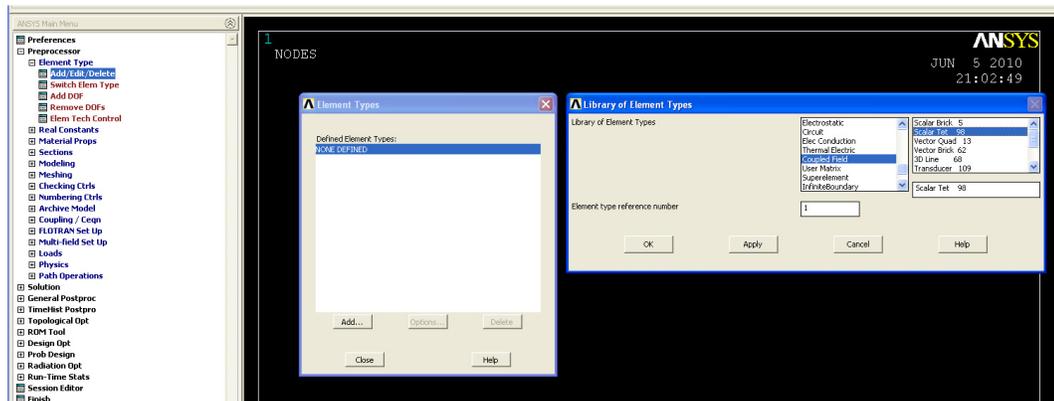


Figura A1. Selección del tipo de elemento para trabajar del menú principal de ANSYS.

Se cierra la ventana y del ANSYS Main Menú se selecciona: “Preprocessor”, “Material Props” y “Material Models” con el fin de ingresar las características del material a utilizar en el software de simulación como se muestra en la figura A2.

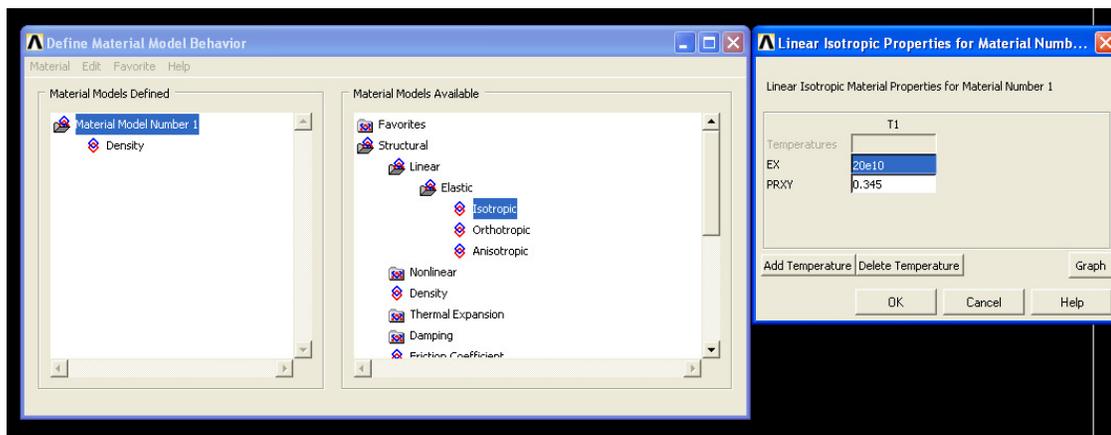


Figura A2. Introducción características mecánicas del elemento a utilizar.

Se introduce:

Density = densidad (en  $\frac{kg}{m^3}$ )

EX=módulo de Young (en MPa)

PRXY= coeficiente de Poisson

Después de ello se construye el la figura del modelo. Se selecciona: “Preprocessor”, “Modeling”, “Create”, “Volumen”, “Block” y “By 2 Corners & Z” se escriben las dimensiones del bloque en metros como se observa en la figura A3.

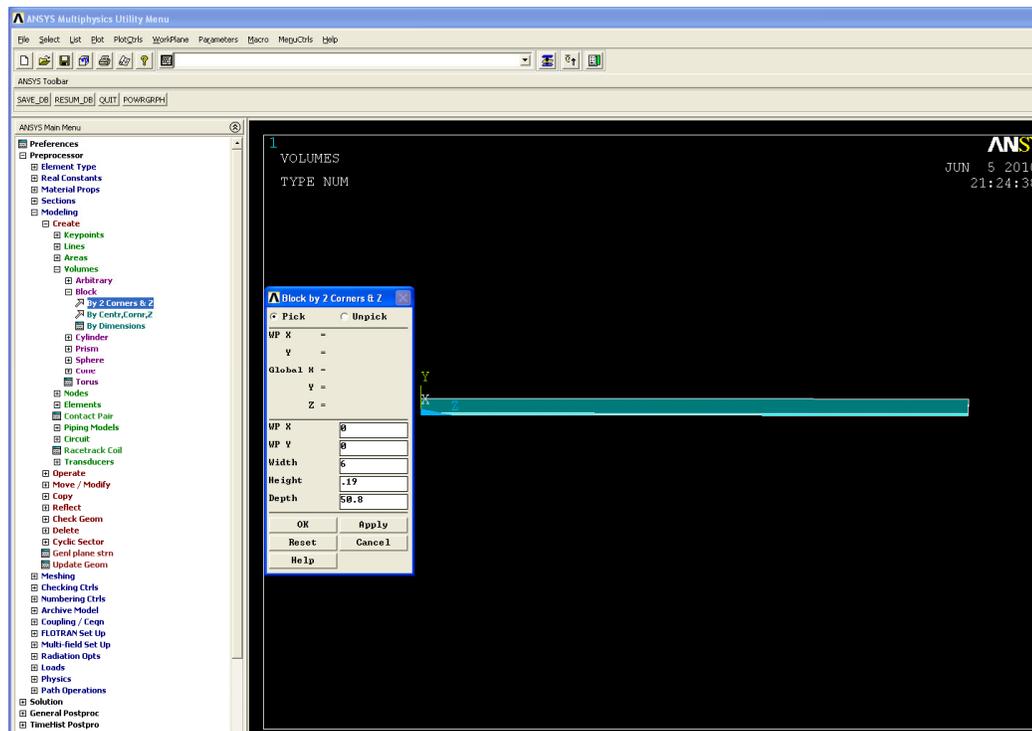


Figura A3. Construcción del modelo en ANSYS.

Se define una condición de frontera en la que se bloquea el movimiento de una de las caras del bloque.

Se selecciona: “Preprocessor”, “Loads”, “Define”, “Loads”, ”Apply”, “Structural”, “Displacement” y “On Areas” y se selecciona el área a la que se aplicará la condición de frontera. Una vez seleccionada, se introduce un valor de 0 para el movimiento de esa cara como se muestra en la figura A4.

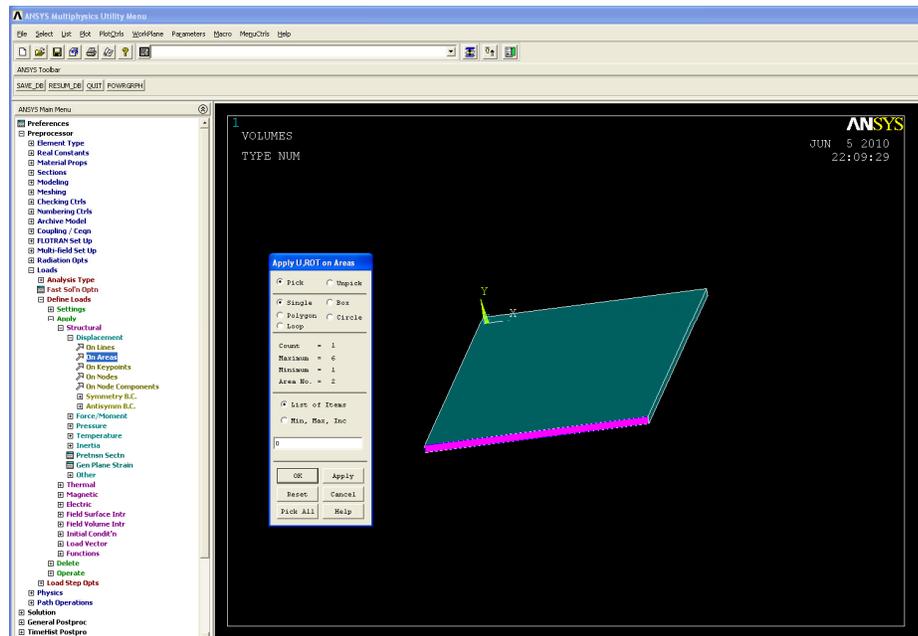


Figura A4. Condición de frontera de movimiento del bloque.

Para realizar un seccionado del modelo para su análisis, se selecciona: “Preprocessor”, “Meshing” y “Meshing Tool” y se escogen las características más convenientes de acuerdo a cada modelo. Esto se puede ver en la figura A5.

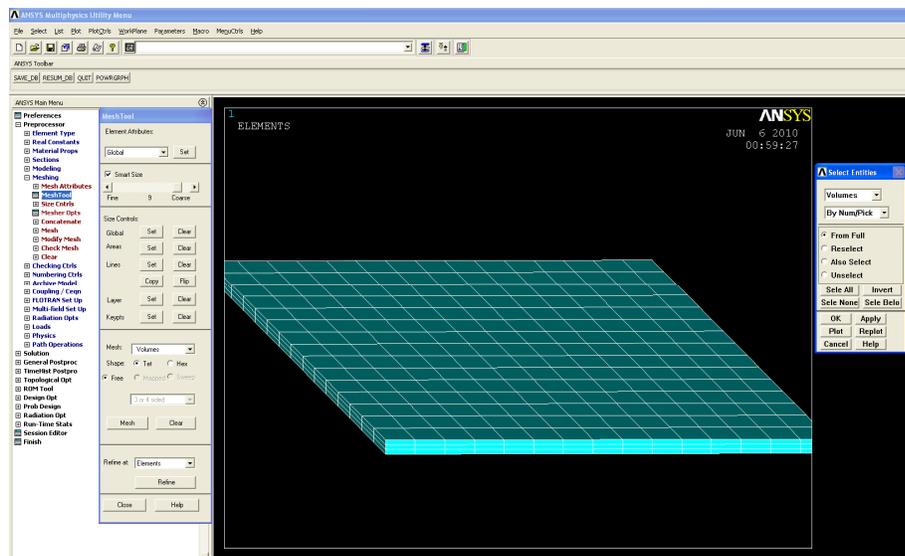


Figura A5. Seccionado del modelo para su análisis.

Una vez realizado el seccionamiento, se procede a realizar un nuevo análisis seleccionando: “Solution”, “Analysis type”, “New Analysis” y “Modal” se seleccionan las opciones del análisis tal como se muestra en la figura A6.

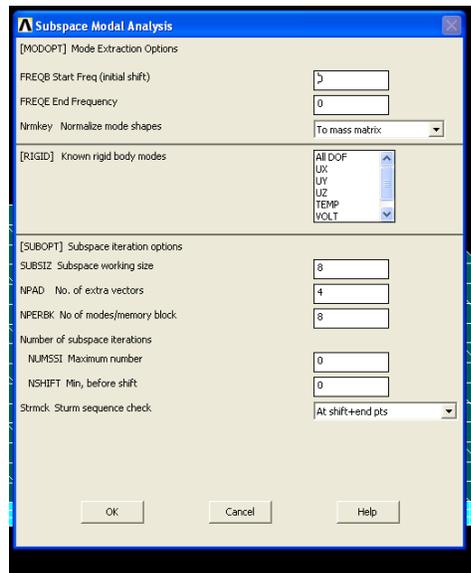


Figura A6. Programación de un análisis de tipo modal.

Para que efectúe la simulación se selecciona: “Solution”, “Solve” y “Current LS”. Una vez terminada, se pueden ver los resultados seleccionando: “Results Summary”. El cuadro que aparece entrega la información del número de modo y la frecuencia de resonancia obtenida como se puede observar en la figura A7.

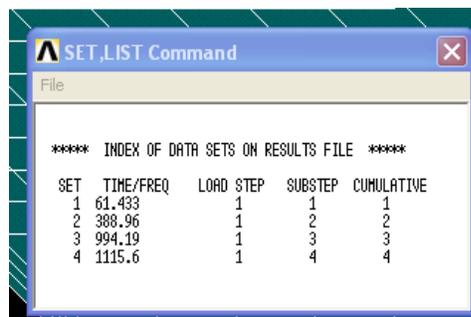


Figura A7. Resultado de la simulación con ANSYS.

Para ver la deformación del modelo se selecciona el modo con el que se quiera trabajar: “General Postproc”, “Read Results”, “First Set” con lo que se leen los datos del primer modo.

Para que aparezca en pantalla se selecciona: “General Postproc”, “Plot Results”, “Deformed Shape” y “Def + undef edge” como se muestra en la figura A8.

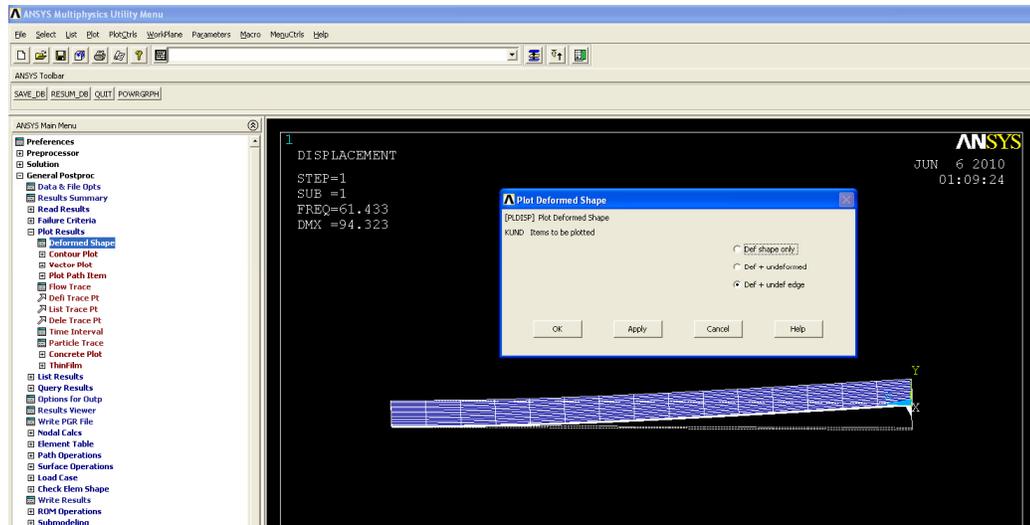


Figura A8. Modelo con movimiento máximo para el primer modo de resonancia.

Para observar una animación del movimiento de la estructura en resonancia se selecciona: “PlotCtrls”, ”Animate”, “Mode shape” y se introducen las características deseadas para la animación como se muestra en la figura A9.

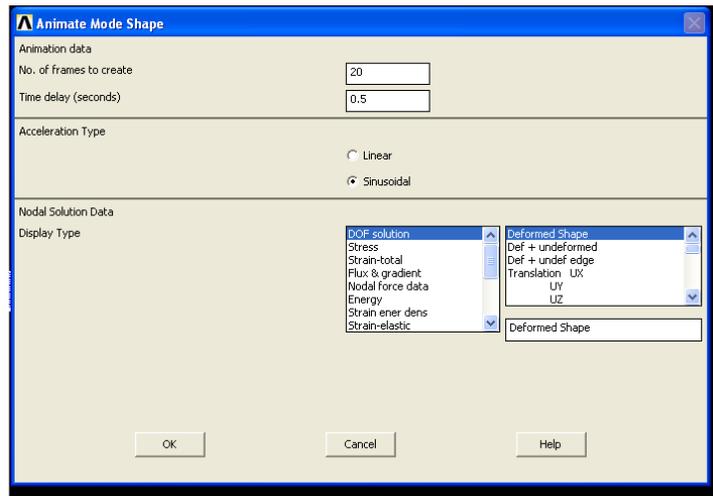


Figura A9. Obtención de la animación de la viga en resonancia.

## B. Proceso de fabricación seleccionado para el conmutador óptico a pequeña escala: PolyMUMPS

MEMSCAP es una empresa que ofrece procesos estándar de fabricación en MEMS. Los procesos MUMPs (Multi-User MEMS Processes por sus siglas en inglés, Procesos Multi-Usuarios MEMS) ofrecen a la industria, universidades y gobierno una alternativa a bajo costo para realizar pruebas de fabricación en MEMS.

Los procesos MUMPs de MEMSCAP son: PolyMUMPs, que es un proceso de micromaquinado en superficie con tres capas de polisilicio; MetalMUMPs, que es un proceso de níquel electro platinado; y SOIMUMPs, que es un proceso de micromaquinado de silicio en aislante.

PolyMUMPs es un proceso de micromaquinado en superficie que consta de tres capas de polisilicio con dos capas de sacrificio y una de metal. Ocho niveles de máscaras crean siete capas físicas.

### A.1 Pasos del proceso PolyMUMPs

El proceso comienza con obleas de silicio tipo n de 150mm con una resistividad de 1-2 ohms. La superficie de las obleas es primero dopada con fósforo en una difusión estándar en un horno usando una capa de sacrificio de vidrio de fosfosilicato (phosphosilicate glass PSG) como fuente de dopaje. Esto ayuda a reducir la realimentación al sustrato de los dispositivos electrostáticos en la superficie. Después, tras remover la capa de PSG, una capa de 600nm de nitruro de silicio es depositada por medio de un depósito químico de vapor a baja presión (low pressure chemical vapor deposition LPCVD) sobre la oblea como aislante eléctrico. Esto es seguido directamente por el depósito de una capa de Poly0 con LPCVD de 500nm. La capa de Poly0 es grabada con fotolitografía, proceso que incluye la cubierta de las obleas con fotorresist tal como se muestra en la figura B.1.



Figura B.1 El fotorresist es dibujada con litografía por exposición de luz UV a través de la primera máscara.

La exposición de fotorresist con la máscara adecuada es de gran importancia para crear la máscara de sustracción para los subsecuentes patrones de transferencia bajo la capa, como se muestra en la siguiente figura.



Figura B.2 El Fotorresist es dibujado con litografía por exposición de luz UV a través de la primer máscara.

Después de los patrones de fotorresist, la capa Poly0 es recortada en un sistema de plasma y el fotorresist es removido mediante un baño de solvente como se puede apreciar en la figura B.3.



Figura B.3 La remoción con plasma es utilizada para eliminar el polisilicio no deseado.

Luego, una capa de sacrificio de PSG de 2  $\mu\text{m}$  es depositada vía LPCVD y templada a 1050<sup>0</sup>C por una hora en argón. Esta capa de PSG conocida como "Primer Óxido" es removida al final del proceso para liberar la primer capa mecánica de polisilicio.



Figura B.4 Depósito de la primer capa de sacrificio.

La capa de sacrificio es dibujada mediante litografía con la máscara de DIMPLES (hoyos) y los agujeros se transfieren a la capa de sacrificio PSG y a un sistema RIE (Reactive Ion Etch, remoción por iones reactivos), como se muestra en la figura D.5. La profundidad nominal de los agujeros es 750nm.



Figura B.5 Hoyuelos de 750nm son extraídos de la primer capa de sacrificio.

Las obleas son entonces dibujadas con la tercera máscara (ANCHOR1) mediante Reactive Ion Etch como se puede ver en la figura B.6. Este paso provee de agujeros de anclaje que pueden ser luego llenados con la capa de Poly1.



Figura B.6 El tercer nivel (ANCHOR1) es litográficamente dibujado.

Después de depositar ANCHOR1, la primera capa de polisilicio estructural, Poly1, es depositada, con un espesor de  $2\mu\text{m}$ . Una delgada capa de PSG (200nm) es depositada sobre el polisilicio, y la oblea es templada a  $1050^{\circ}\text{C}$  por una hora. El templado dopa al polisilicio con fósforo de las capas de PSG, la superior y la inferior. El templado sirve también para reducir el estrés en la capa de Poly1. El resultado es como se muestra en la siguiente figura:



Figura B.7 Una capa de  $2\mu\text{m}$  de polisilicio es depositada seguida de una capa de 200nm de PSG.

El polisilicio (y su capa de PSG) son dibujados mediante litografía, usando una máscara diseñada para formar la primera capa estructural de Poly1. La capa de PSG es depositada para producir una “capa dura” para los subsecuentes depósitos de polisilicio. La máscara dura es más resistente al depósito químico del polisilicio que al fotorresist y asegura una mejor transferencia del dibujo al polisilicio. Después de los depósitos del polisilicio el fotorresist es removido y el óxido de la máscara dura restante es removido por RIE, cuyo resultado se muestra en la figura B.8.



Figura B.8 La oblea es cubierta con fotorresist y el cuarto nivel (POLY1) es grabado.

Luego de que la capa de Poly1 es removida, una segunda capa de sacrificio de PSG (segundo óxido con un grosor de 750nm) es depositada y templada como muestra la figura B.9.

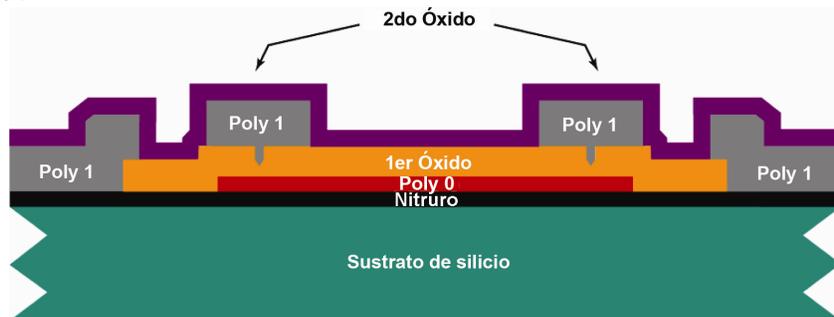


Figura B.9 El segundo óxido es depositado en una capa de 0.75µm de espesor.

El segundo óxido es dibujado usando dos diferentes máscaras de remoción con dos diferentes objetivos. El nivel Poly1\_Poly2\_Via provee una conexión mecánica y eléctrica a las capas Poly1 y Poly2 como muestra la siguiente figura B.10. La capa Poly1\_Poly2\_Via es dibujada mediante litografía y retirada mediante RIE.

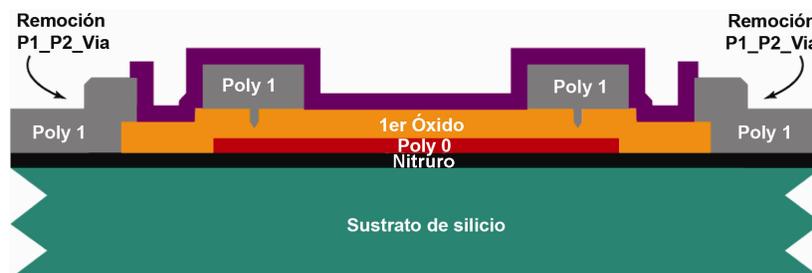


Figura B.10 La oblea es cubierta con fotorresist y el quinto nivel (Poly1\_Poly2\_Vía) es dibujado con litografía.

El nivel de ANCHOR 2 se logra removiendo las capas del primer y segundo óxido en un sólo paso, de esta forma se elimina cualquier desalineación entre los agujeros generados por separado. Más importante aún es mencionar que la remoción de ANCHOR 2 elimina la necesidad de hacer un corte en el primer óxido para hacer un anclaje a Poly1, el cual expone innecesariamente el sustrato a subsecuentes procesos que pueden dañar a la capa de Poly0 o al Nitruro. Al igual que la capa Poly1\_Poly2\_Via, ANCHOR 2 es retirado mediante RIE y el resultado se puede ver en la siguiente figura:



Figura B.11 La oblea es recubierta con fotorresist y ANCHOR2 es dibujado con litografía. Los dos óxidos son removidos mediante RIE y ANCHOR2 provee de contacto a Poly2 con el Nitruro o con Poly0.

Una capa de Poly2 de 1.5µm de espesor es depositada seguida por un depósito de 200nm de PSG. Al igual que con Poly1, la delgada capa de PSG actúa como una máscara y una fuente de dopaje para Poly2 como se puede apreciar en la figura B.12.

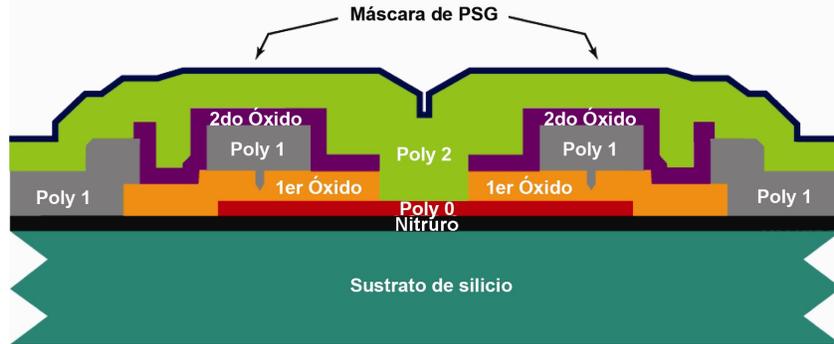


Figura B.12 Un depósito de 1.5µm de polisilicio no dopado es seguida de 200nm de PSG.

La oblea es templada por una hora a 1050 °C para dopar al polisilicio y reducir la tensión de la película. La capa de Poly2 es dibujada mediante litografía con la séptima máscara (POLY2). Las capas de PSG y polisilicio son retiradas por plasma y RIE, similar a los procesos usados para Poly1. El fotorresist y la máscara de óxido son entonces removidas.

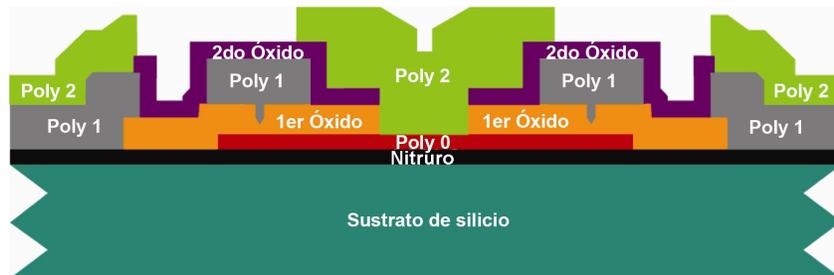


Figura B.13 La oblea es cubierta y Poly2 es litográficamente dibujado.

La última capa en el proceso PolyMUMPS es una capa de 0.5µm de metal, que provee de pruebas, vinculación, guías eléctricas y superficies de espejo altamente reflexivas. La oblea es dibujada con la octava máscara (METAL) y el metal es depositado utilizando "lift-off".

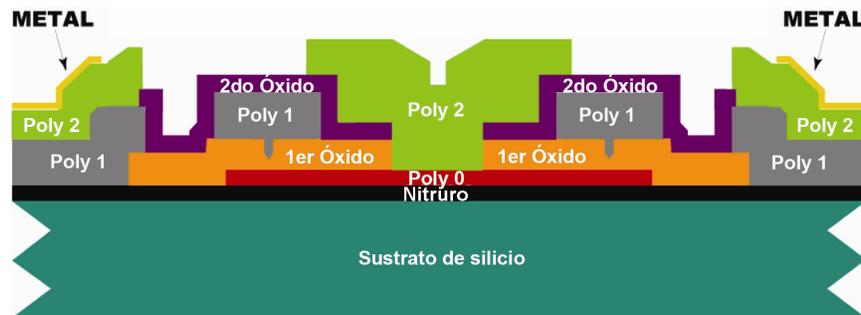


Figura B.14 Depósito de la capa de metal

La figura B.15 muestra el dispositivo después de que las capas de óxido de sacrificio son retiradas. Esto se logra con la inmersión del chip en un baño de 49% HF (Hydrofluoric Acid 49% Solution) a temperatura del cuarto durante 1:30 o 2 minutos. Luego de ello se sumerge por varios minutos en agua DI (de-ionized water) y luego en alcohol, seguido por 10 minutos en un horno a 110<sup>0</sup>C.

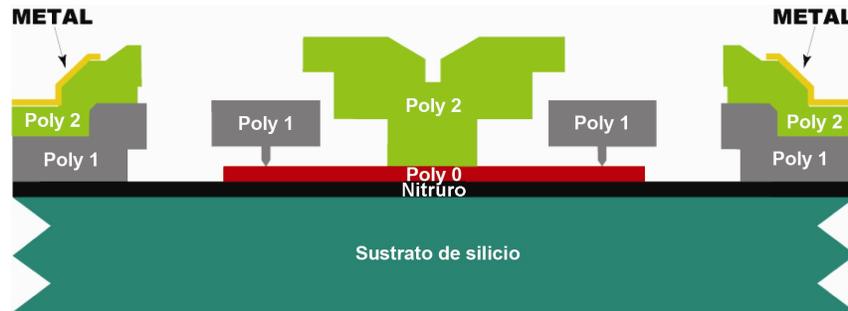
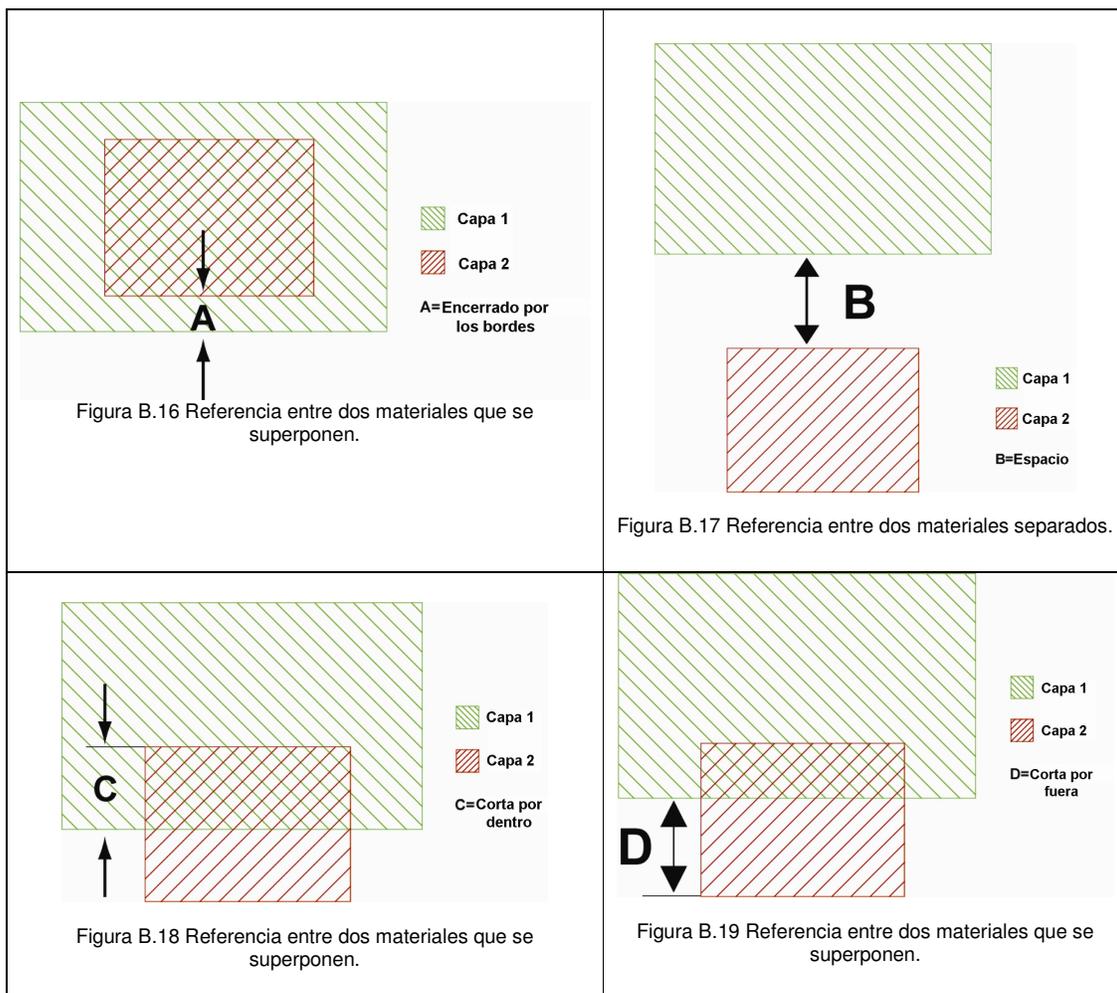


Figura B.15 Dispositivo luego de la remoción de los 2 óxidos.

## A.2 Reglas de diseño del proceso PolyMUMPS.

El objetivo de las reglas de diseño es tener una alta probabilidad de que la fabricación sea exitosa. Estas reglas se deben a las limitantes del proceso, basadas en la experiencia de MEMSCAP. En general, el diseño de estas reglas para el espacio mínimo está definido exclusivamente por la resolución y alineamiento del sistema litográfico. Las anchuras y los espacios mínimos son reglas obligatorias, lo cual se hace para mantener compatibilidad con el proceso litográfico de MEMSCAP, sin embargo las reglas de aviso pueden ser ignoradas por los usuarios bajo su propio riesgo y MEMSCAP no se hará responsable de las consecuencias en la fabricación de un proceso que viole las reglas de aviso o las reglas obligatorias.

Las siguientes figuras B.16, B.17 y B.18 muestran cómo es la relación que debe existir entre dos materiales, cuando se superponen y cuando debe existir una separación entre ellos.



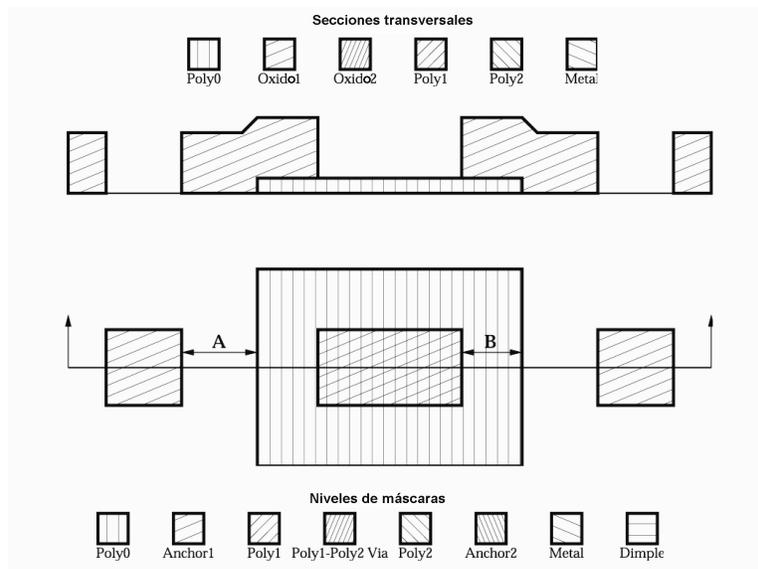


Figura B.20

- A: Espacio de POLY0 a ANCHOR1 -  $4\mu\text{m}$
- B: POLY0 encierra por los bordes a ANCHOR1 -  $4\mu\text{m}$

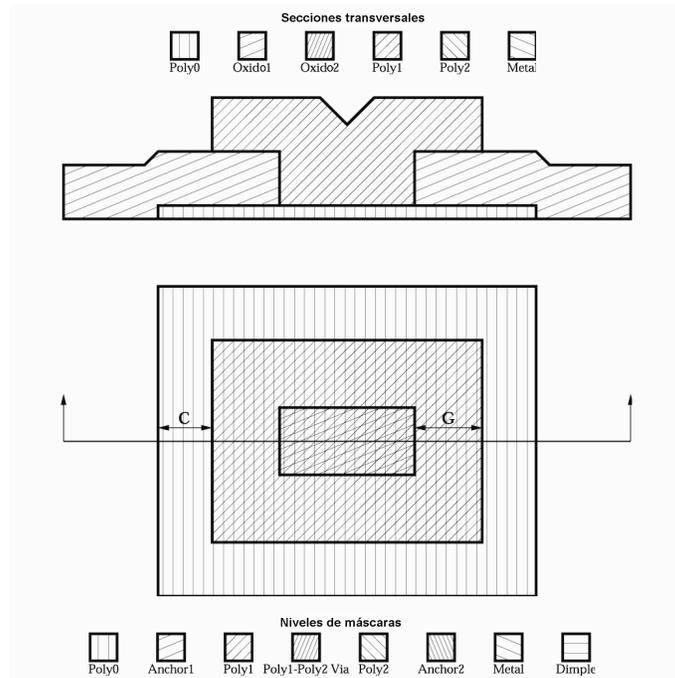
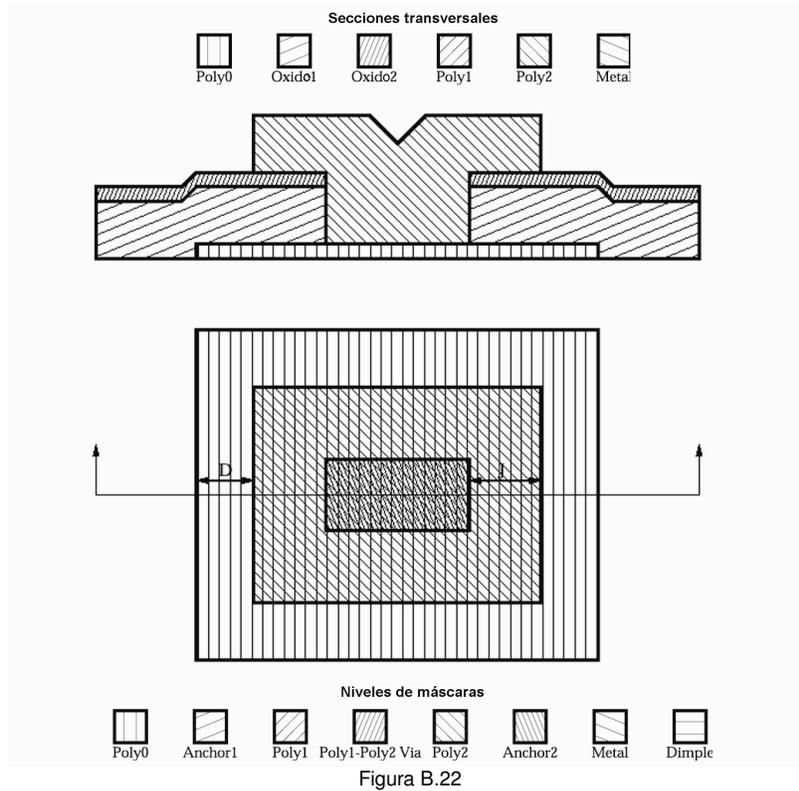


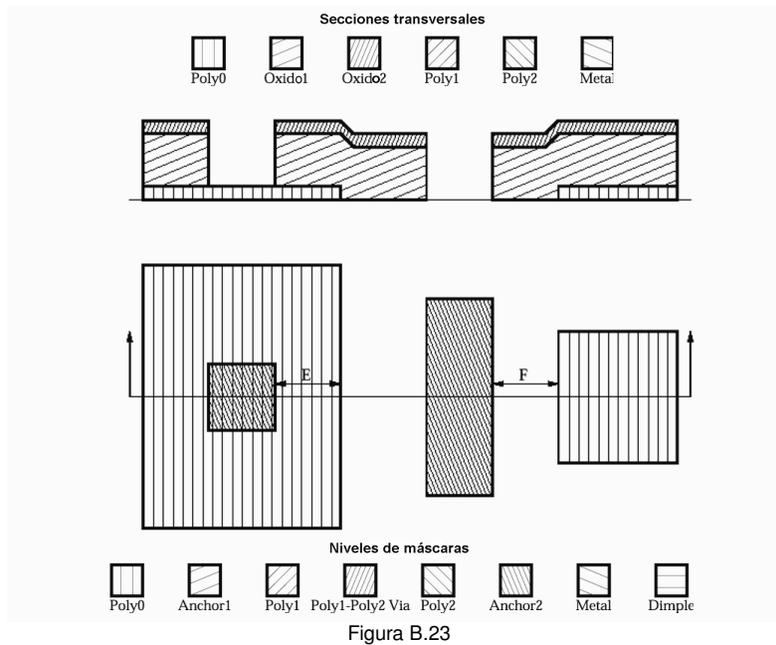
Figura B.21

- C: POLY0 encierra por los bordes a POLY1 -  $4\mu\text{m}$
- G: POLY1 encierra por los bordes a ANCHOR1 -  $4\mu\text{m}$



D: POLY0 encierra por los bordes a POLY2 -  $5\mu\text{m}$

J: POLY2 encierra por los bordes a ANCHOR2 -  $5\mu\text{m}$



E: POLY0 encierra por los bordes a ANCHOR2 -  $5\mu\text{m}$

F: Espacio de POLY0 a ANCHOR2 -  $5\mu\text{m}$

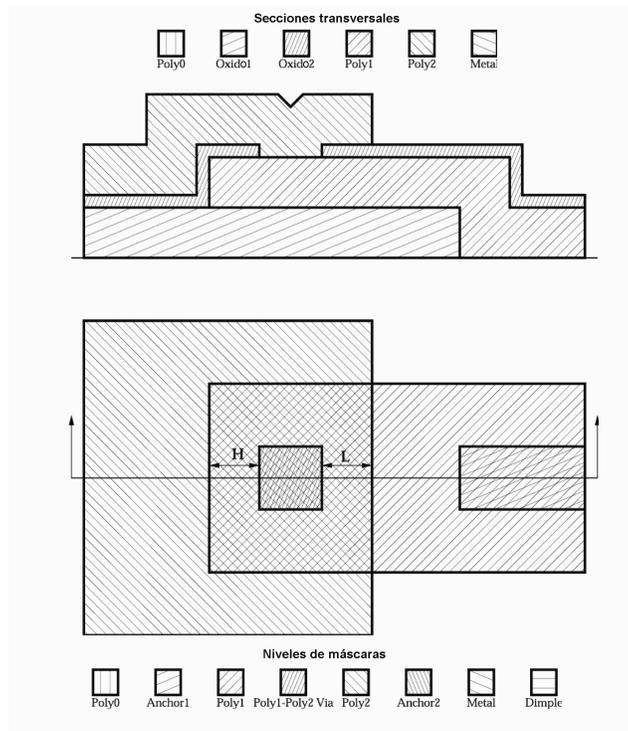


Figura B.24

H: POLY1 encierra por los bordes a POLY1\_POLY2\_VIA -  $4\mu\text{m}$

L: POLY2 encierra por los bordes a POLY1\_POLY2\_VIA -  $4\mu\text{m}$

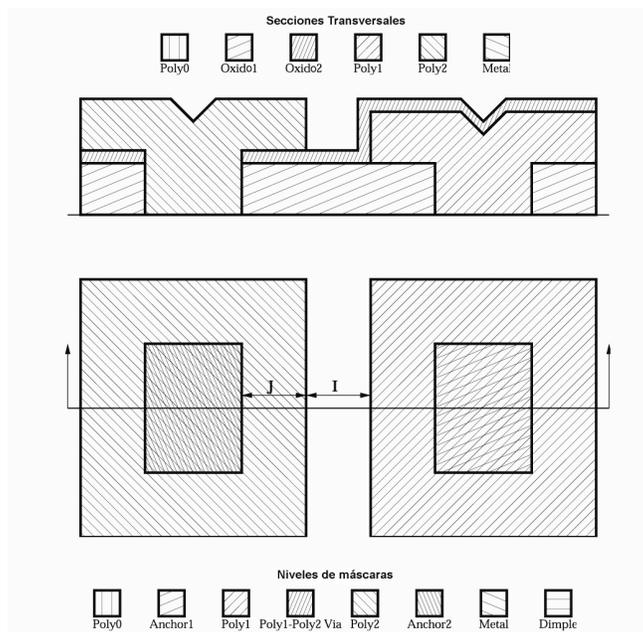


Figura B.25

J: POLY2 encierra por los bordes a ANCHOR2 -  $5\mu\text{m}$

I: Espacio de POLY2 a POLY1 -  $3\mu\text{m}$

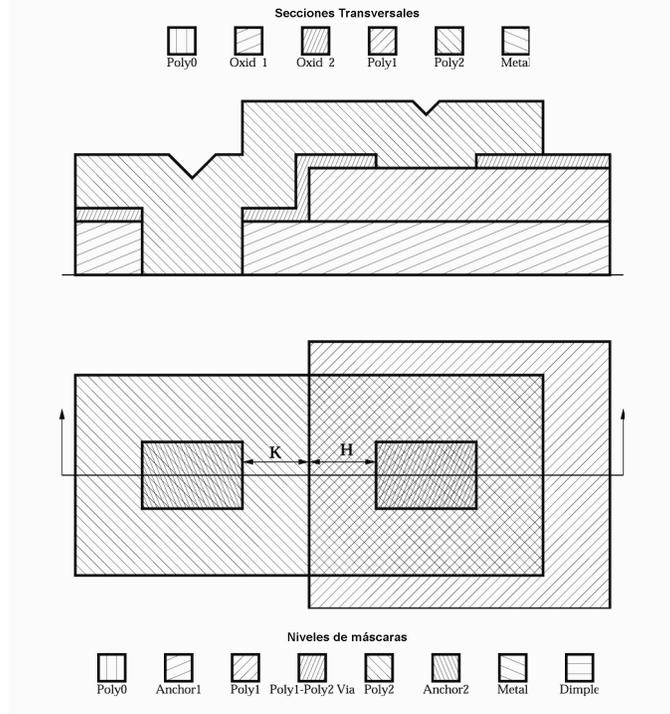


Figura B.26

K: Espacio de POLY1 a ANCHOR2 -  $3\mu\text{m}$

H: POLY1 encierra por los bordes a POLY1\_POLY2\_VIA -  $4\mu\text{m}$

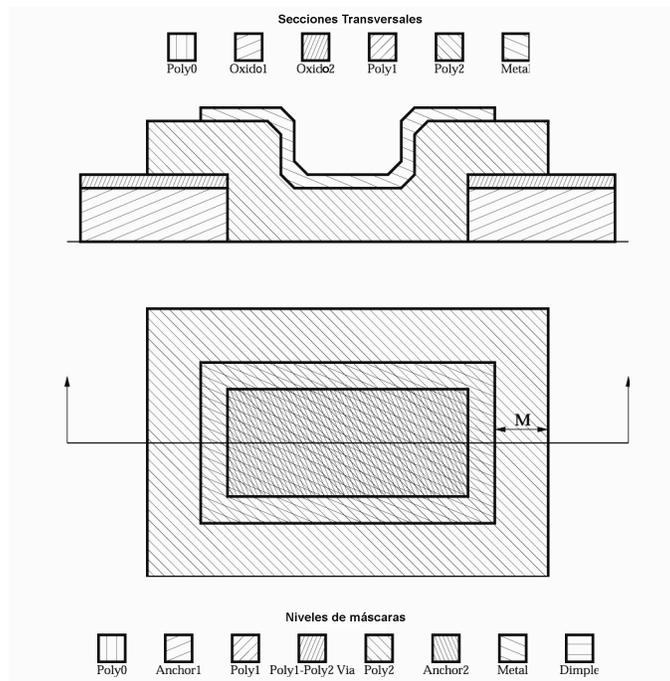


Figura B.27

M: POLY2 encierra por los bordes a METAL -  $3\mu\text{m}$

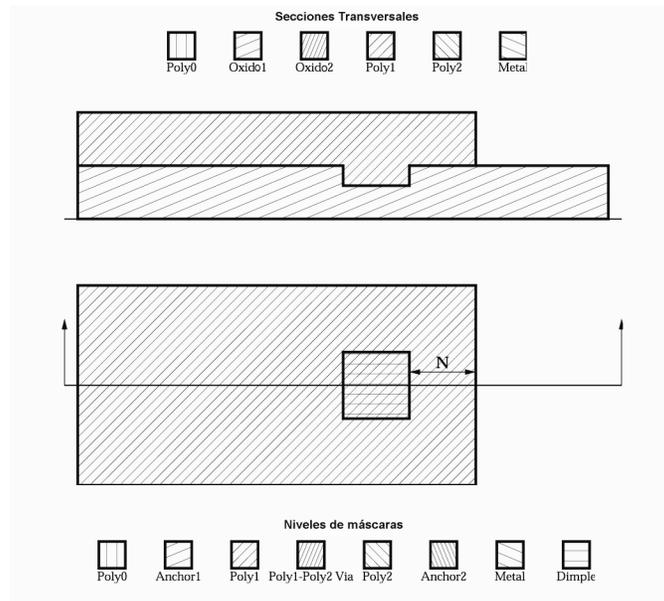


Figura B.28

N: POLY1 encierra por los bordes a DIMPLE -  $4\mu\text{m}$

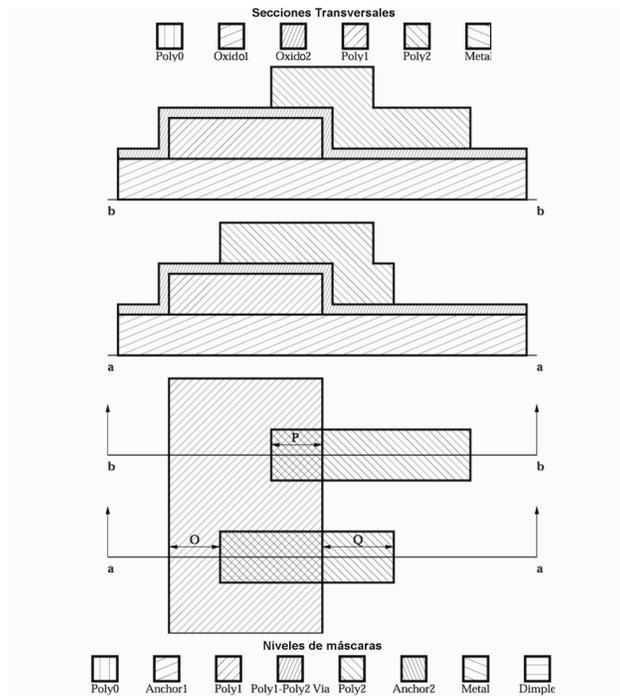


Figura B.29

P: POLY2 corta por dentro a POLY1 -  $5\mu\text{m}$   
 O: POLY1 encierra por los bordes a POLY2 -  $4\mu\text{m}$   
 Q: POLY2 corta por fuera a POLY1 -  $4\mu\text{m}$

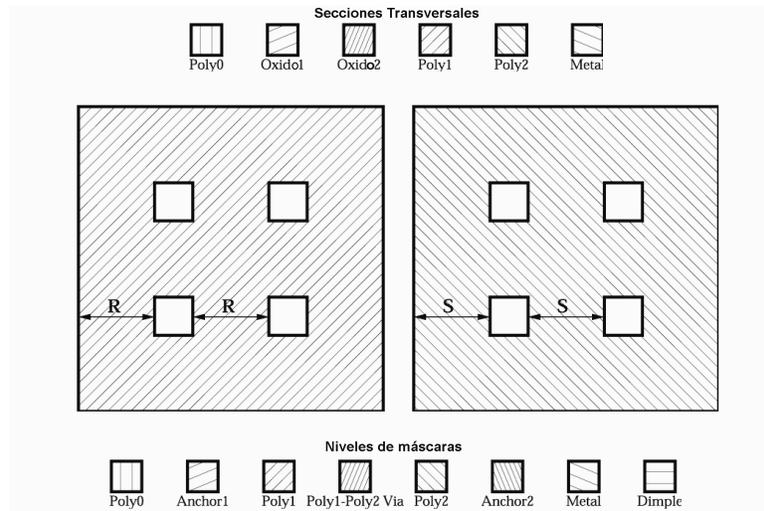


Figura B.30

R: Espacio de huecos HOLE en POLY1 -  $30\mu\text{m}$

S: Espacio de huecos HOLE en POLY2 -  $30\mu\text{m}$

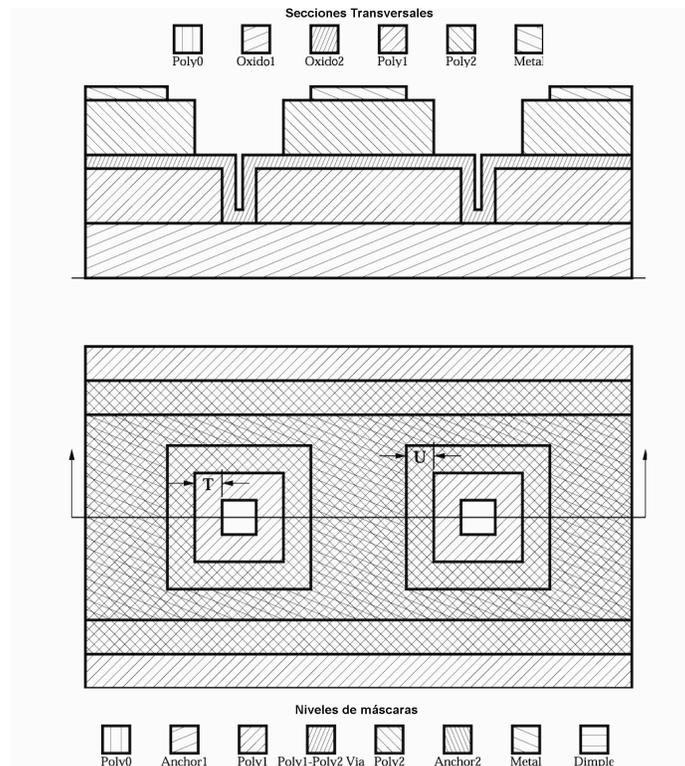


Figura B.31

T: HOLE2 encierra por los bordes a HOLE1 -  $2\mu\text{m}$

U: HOLEM encierra por los bordes a HOLE2 -  $2\mu\text{m}$

### A.3 Terminales de conexión recomendados para el proceso PolyMUMPS.

Gracias a múltiples observaciones de las terminales de conexión en diversos dispositivos, MEMSCAP menciona que el tamaño estándar de las terminales de conexión de interconexión es de  $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ , con lo que se evitan los problemas más comunes como cortos hacia el sustrato.

Las reglas de diseño PolyMUMPS siguen aplicándose y cada uno de los depósitos debe respetar las distancias mínimas permitidas, con lo que el diseño estándar de las terminales de conexión es como se muestra en la figura B.32.

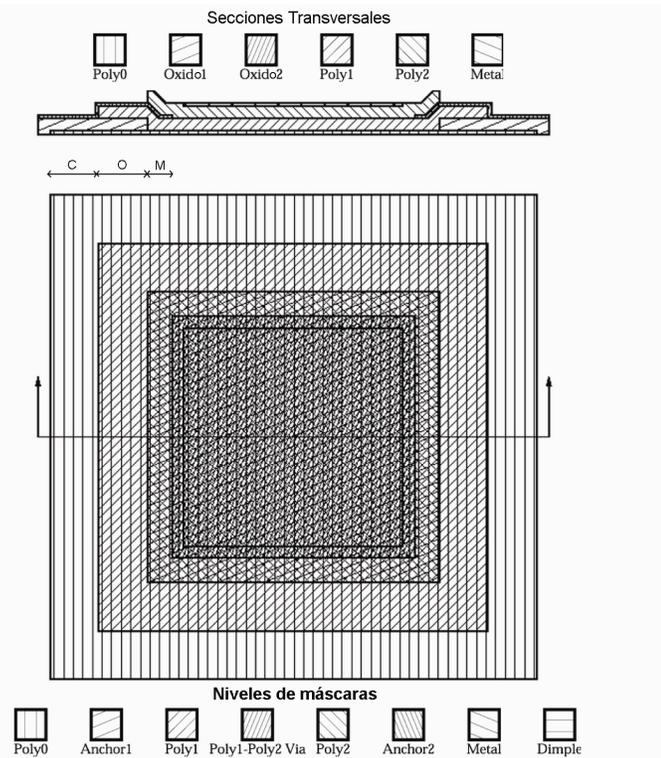


Figura B.32

Las distancias entre cada capa están dispuestas por las reglas: C, O y M, de  $4\mu\text{m}$ ,  $4\mu\text{m}$  y  $3\mu\text{m}$  respectivamente.