



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA

DISPOSITIVOS DE FIBRA ÓPTICA RECUBIERTOS CON
AZOPOLÍMEROERO

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA ELÉCTRICA - INSTRUMENTACIÓN

P R E S E N T A :

AMADO MANUEL VELÁZQUEZ BENÍTEZ



TUTOR:

DR. JUAN A. HERNÁNDEZ CORDERO

2012

(Portada y primer hoja)



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Augusto García Valenzuela
Secretario: Dra. Laura Oropeza Ramos
Vocal: Dr. Juan Arnaldo Hernández Cordero
1er Suplente: Dr. Naser Qureshi
2do Suplente: Dr. Gabriel Eduardo Sandoval Romero

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM
Universidad de McGill, Montreal, Canadá

TUTOR DE TESIS

Dr. Juan Arnaldo Hernández Cordero

FIRMA

(Segunda hoja)

A mis padres y hermano:

*Por todo su apoyo, ayuda, afecto, comprensión y
paciencia, sin ustedes nunca habría llegado hasta
este punto de mi vida.*

Para la realización y término de este trabajo quisiera agradecer a:

A mi padre Rubén y a mi hermano Arturo, por su increíble ayuda y apoyo para la llevar a cabo mi trabajo, sin la cual no hubiera sido posible el término de mi tesis.

Al Dr. Juan Hernández Cordero por ser un excelente asesor e investigador, por su constante ayuda, apoyo y por ofrecerme su amistad.

I want to thank to Prof. Martin Rochette from the Photonic Systems Group of the McGill University in Montreal, Canada, who gave me the great opportunity of work under his supervision and always supported me.

A la Dra. Laura Oropeza por sus consejos y ayuda para realizar mi trabajo de investigación.

Al Dr. Mathieu Hautefeuille, por su colaboración y aportación con grandes ideas, así como la ayuda siempre proporcionada.

A todos los compañeros de laboratorio que compartieron sus experiencias conmigo, tuvieron la disposición de ayudarme e hicieron que el tiempo en el que estuve en el laboratorio fuera ameno y agradable.

A todos mis amigos por su apoyo en todo momento y convivencia.

Al Dr. Ernesto Rivera por brindarme su asesoría en varios temas y facilitarme material.

Al Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM por las instalaciones y el equipo facilitados; asimismo, a los técnicos del IIM, Omar Novelo P. y Miguel A. Canseco M., por ayudarme a analizar las muestras de mis experimentos.

Al apoyo otorgado por DGAPA-UNAM por el proyecto PAPIIT IN116509 para este trabajo de investigación.

Gracias a CONACyT por la beca otorgada durante mis estudios de Maestría y el apoyo otorgado para realizar la estancia de investigación en la Universidad de McGill en Montreal, Canadá.

ÍNDICE

RESÚMEN.....	1
1 ANTECEDENTES	3
1.1 FIBRAS ÓPTICAS	4
1.1.1 Materiales de fabricación.....	6
1.1.2 Fibras adelgazadas y microalambres	8
1.2 AZOPOLÍMEROS	11
1.2.1 Matrices poliméricas	14
1.2.2 Azobencenos DR1 y DR13	15
1.3 RECUBRIMIENTOS SOBRE FIBRAS ÓPTICAS.....	17
1.3.1 Técnicas de depósito para recubrimientos delgados	18
1.4 BIRREFRINGENCIA Y EFECTOS DE POLARIZACIÓN EN FIBRAS ÓPTICAS.....	19
1.4.1 Fibras altamente birrefringentes	21
1.4.1.1 Birrefringencia y dispersión de modos de polarización (PMD)	22
1.4.2 Arreglo para medir birrefringencia	23
2 DISPOSITIVOS DE FIBRA ÓPTICA DE VIDRIO CALCÓGENO	26
2.1 FABRICACIÓN DE FIBRAS RECUBIERTAS CON PMMA	27
2.2 CARACTERIZACIÓN	30
2.2.1 Pérdidas.....	31
2.2.2 Absorción fotoinducida (<i>Photodarkening</i>)	33
3 BIRREFRINGENCIA FOTOINDUCIDA EN DISPOSITIVOS DE FIBRA ÓPTICA DE VIDRIO CALCÓGENO RECUBIERTOS CON AZOPOLÍMERO	39
3.1 DOPAJE DEL RECUBRIMIENTO DE PMMA	39
3.1.1 Solución metanol-azobenceno	41
3.1.2 Caracterización del dopaje.....	42
3.1.3 Dopaje de fibras	47

3.2	ANÁLISIS DE LA SEÑAL ÓPTICA, EXCITACIÓN Y RESPUESTA FOTOINDUCIDA	50
3.2.1	Cambios en el espectro del proceso de dopaje	50
3.2.2	Cambios en el espectro mediante iluminación externa	53
4	DEPOSITO DE CAPAS DELGADAS DE POLÍMERO SOBRE FIBRAS DE SÍLICE.....	63
4.1	FABRICACIÓN DE FIBRAS ADELGAZADAS DE SÍLICE Y MICROALAMBRES	64
4.2	TÉCNICA DE RECUBRIMIENTO.....	65
4.2.1	Diseño de la máquina	68
4.3	RECUBRIMIENTOS DE DISPOSITIVOS DE FIBRA ÓPTICA.....	74
4.3.1	Caracterización de recubrimientos realizados con la máquina	74
4.3.2	Cambios espectrales causados por recubrimientos de PDMS.....	81
4.3.3	Recubrimientos de PDMS-azobenceno sobre fibras adelgazadas	83
5	CONCLUSIONES	86
	REFERENCIAS	91
	APÉNDICE A: ESPECIFICACIONES DE LAS FIBRAS DE VIDRIO CALCÓGENO (ASSE) COREACTIVE	97
	APÉNDICE B: ESPECIFICACIONES DE LAS FIBRAS DE VIDRIO DE DIÓXIDO DE SILICIO (SiO ₂)	100
	APÉNDICE C: ESPECIFICACIONES DEL PDMS SYLGARD 184, DOW CORNING	105
	APÉNDICE D: ESPECIFICACIONES DE MOTORES A PASOS.....	113
	APÉNDICE E: ESPECIFICACIONES DE LA TARJETA DE ADQUISICIÓN MEASUREMENT COMPUTING, PMD-1608S	117
	APÉNDICE F: PLANOS.....	127

RESÚMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo de dispositivos de fibra óptica con distintos recubrimientos de azopolímero. Los dispositivos de fibra óptica consistieron en fibras adelgazadas con secciones de microalambre, con el propósito de exponer la onda evanescente de la fibra y favorecer una interacción con el medio externo, en este caso el azopolímero. El mecanismo de funcionamiento de los azopolímeros se basa en la iluminación de estos materiales mediante una fuente de luz láser externa linealmente polarizada, la cual excita a las moléculas del compuesto reorientándolas de manera perpendicular a la polarización de este láser. Esta reorientación de las moléculas de azobenceno genera birrefringencia, la cual puede ser controlada mediante luz. Los materiales de las fibras ópticas utilizadas fueron vidrios calcógenos y vidrios de dióxido de silicio, los cuales poseen propiedades muy distintas que se ven reflejadas en la señal transmitida.

El dopaje de los recubrimientos poliméricos se realizó mediante el fenómeno de difusión, haciendo uso de una sustancia compuesta de metanol-azobenceno. La caracterización de este fenómeno fue realizada para el polímero utilizado, poli (metil metacrilato) (PMMA), para el posterior proceso de dopaje de las fibras adelgazadas recubiertas con PMMA. Al iluminar los dispositivos se generó birrefringencia en los recubrimientos, la cual fue detectada y medida haciendo uso de un arreglo de polarizadores cruzados. De igual manera, se desarrolló un máquina para realizar recubrimientos poliméricos delgados y uniformes sobre secciones de fibra adelgazada, donde el espesor puede ser controlado dependiendo de la velocidad a la que se desarrolle el proceso. Los recubrimientos realizados mediante esta máquina fueron caracterizados y comparados con la teoría, obteniendo resultados cercanos a los teóricos. Estos recubrimientos resultaron ser uniformes y de un espesor delgado, dando paso a su utilización para el posterior aplicación con azopolímeros.

ABSTRACT

This work presents the development of fiber optic devices with different azopolymer coatings. The fiber optic devices consisted of tapered fibers with microwire sections, in order to expose the evanescent wave of the fiber and be able of interact with the external environment, which in this case is the azopolymer. The operation mechanism of azopolymers is based on the illumination of these materials by an external laser light source linearly polarized, which excites the compound molecules aligning them in a perpendicular orientation to the polarization of the laser. This reorientation of the molecules of azobenzene produces birefringence, which can be controlled by light. The materials of the optical fibers used were chalcogenide glass and silicon dioxide glass, which posses very different properties that are reflected in the transmitted signal.

The doping of the polymeric coatings is performed using diffusion phenomenon, making use of a substance composed of methanol-azobenzene. The characterization of this phenomenon was conducted for the polymer used, poly (methyl methacrylate) (PMMA), for the subsequent doping process of tapered fibers coated with PMMA. By the illumination of the devices birefringence is generated in the coating, which was detected and measured using an array of crossed polarizers. Similarly, a machine for thin polymeric coatings of uniform taper sections was developed, where the thickness can be controlled depending on the speed at which the process takes place. The coatings made by this machine were characterized and compared with the theory, giving results close to the theoretical. These coatings were found to be uniform and of a thin thickness, leading to its use for further application with azopolymers.

1. ANTECEDENTES

El incremento en la demanda para transmitir información en grandes cantidades y a altas velocidades ha establecido a la fibra óptica como alternativa de medio de transmisión. La fibra óptica es un medio en el cual se confina y transmite luz, la cual puede codificarse como señal debido a cambios en intensidad (por ejemplo, su uso como bits), longitud de onda o polarización. El principal uso de las fibras ópticas es en telecomunicaciones, pero en los últimos años se ha explorado su uso para sistemas de iluminación, sensores y adquisición de imágenes [1, 2]. Estas aplicaciones diversas han impulsado el desarrollo de nuevos dispositivos como los son fuentes de luz, detectores, filtros, etc. Una ventaja que presentan las fibras ópticas dentro del campo de sensores es el material de fabricación, ya que este no reacciona con los organismos vivos, brindando así compatibilidad para aplicaciones biomédicas tales como la detección de bacterias, medición de pH, análisis de líquidos, y otros [3].

La polarización de la luz es de gran importancia en varias aplicaciones de las fibras ópticas. Las comunicaciones ópticas y sensores de fibra óptica, por ejemplo, son dos campos donde el control de la polarización puede ser determinante para interpretar la señal de salida. Hasta la fecha hay varios dispositivos para controlar la polarización de la luz confinada en guías de onda, siendo los efectos elasto-óptico y electro-óptico los más empleados para estos dispositivos [4-6]. Sin embargo, actualmente existen materiales que ofrecen opciones interesantes para controlar la polarización de un haz de luz que resultan atractivos para su aplicación en guías de onda ópticas. Dentro de estos materiales, los polímeros orgánicos dopados con moléculas de azobenceno son de particular interés debido a sus propiedades ópticas. Estas moléculas de azobenceno modifican sus

propiedades ópticas al interactuar con luz, permitiendo generar efectos ópticos no lineales, segundo armónico, movimiento mecánico activado ópticamente y grabado por relieve superficial, entre otros [7-10].

Los distintos materiales con los que están fabricadas las fibras ópticas determinan sus propiedades de transmisión. De igual manera, hay materiales especiales con los cuales las fibras ópticas pueden recubrirse para modificar la señal transmitida con algún parámetro de interés. Estos recubrimientos funcionales deben ser depositados uniformemente sobre la sección de interés de fibras, generando una zona de interacción uniforme y minimizar las pérdidas por atenuación. La interacción con el recubrimiento de interés se da mediante la porción de la luz que logra penetrar en el revestimiento, conocida como onda evanescente, logrando esto en regiones adelgazadas de fibra óptica.

El objetivo de este trabajo es estudiar de manera experimental la creación de recubrimientos azopoliméricos en fibras ópticas adelgazadas, con el fin de lograr el alineamiento de las moléculas de azobenceno y generar birrefringencia fotoinducida. La birrefringencia inducida en estos dispositivos genera cambios en la polarización de la señal, pudiéndose alterar este parámetro de la onda guiada de manera preferencial y a voluntad. El trabajo realizado comprende la fabricación de dichos dispositivos, su caracterización y la evaluación de su respuesta en dos tipos de guías de onda: fibras de sílice y fibras de vidrio calcógeno. En esta sección se cubren los principios fundamentales en los que se basa la realización de este trabajo.

1.1 Fibras ópticas

Las fibras ópticas son guías de onda que confinan la luz debido a la reflexión total interna, misma que se logra mediante la diferencia de índices de refracción entre el núcleo y el revestimiento. Típicamente las fibras ópticas se fabrican de materiales dieléctricos, poseyendo una geometría de sección transversal circular.

Al ser confinada la luz por efecto de reflexión total interna, se requiere que el índice de refracción del núcleo sea mayor que el del revestimiento. Este efecto se puede describir considerando que la luz que viaja dentro del núcleo se encuentra con un medio más denso (índice de refracción mayor), y si incide con un ángulo lo suficientemente grande, entonces la luz se refleja totalmente hacia el núcleo, tal como se ilustra en la figura 1.1. Al aumentar el ángulo de incidencia, la reflexión de la luz va aumentando hasta alcanzar o sobrepasar un ángulo conocido como ángulo crítico (θ_c). Bajo esta condición el haz de luz es completamente reflejado en la interfaz entre ambos medios y en particular al tener incidencia con ángulo crítico, el haz transmitido se refracta a 90° de la normal a la interfaz (ver figura 1.2) [12, 13].

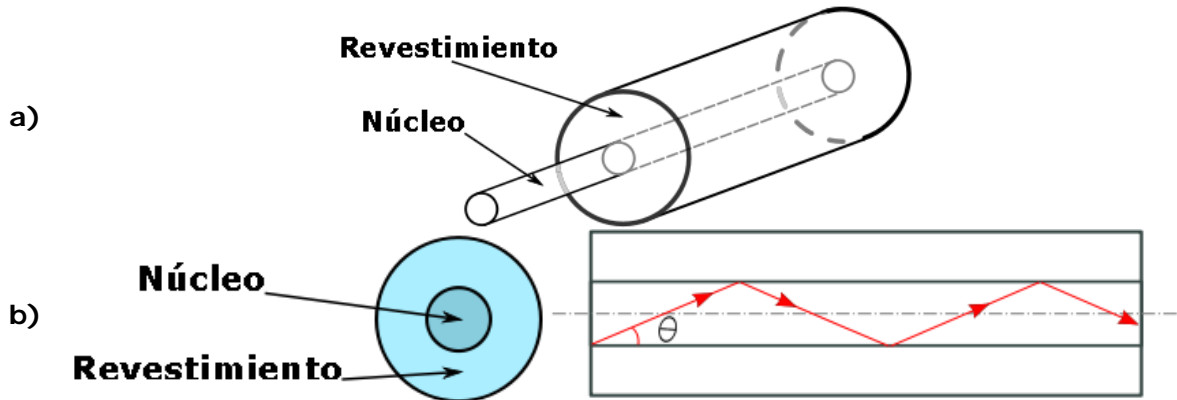


Fig. 1.1. a) Esquema de la estructura de una fibra óptica y b) propagación del haz de luz dentro de esta.

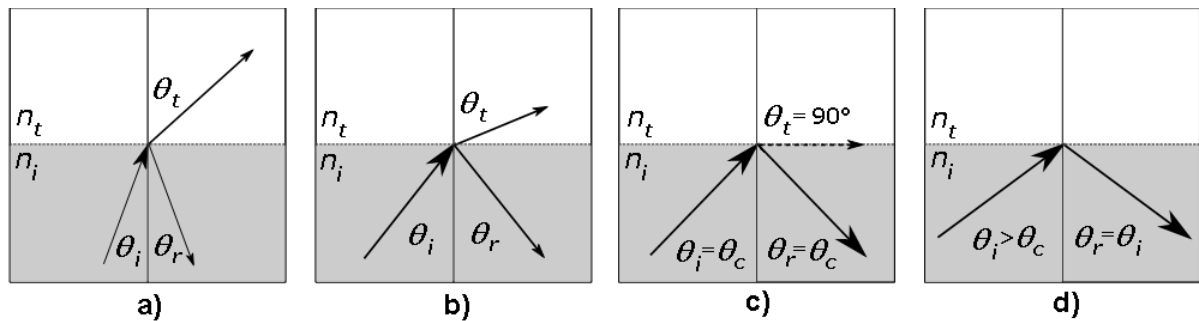


Fig.1.2. Variación de los ángulos de incidencia de un haz de luz (θ_i), de transmisión (θ_t) y de reflexión (θ_r) en la interfaz de dos materiales con distintos índices de refracción ($n_i > n_t$). a) Haz con ángulo de incidencia pequeño, b) al aumentar θ_i mayor cantidad del haz se refleja y se transmite menos, c) se alcanza el ángulo crítico y toda la señal se refleja en el medio incidente y d) para ángulos mayores se sigue reflejando todo en el medio incidente.

1.1.1 Materiales de fabricación

Los materiales dieléctricos utilizados para fabricar fibras ópticas son los plásticos y los vidrios. Los materiales plásticos permiten fabricar guías de onda de costos bajos, pero involucran grandes pérdidas por atenuación, y no son la mejor opción para aplicaciones en telecomunicaciones [13, 14]. En el caso de las fibras fabricadas con vidrio, el proceso de fabricación permite adquirir materiales con una mayor pureza, ya que es un proceso que se ha estudiado durante mucho tiempo. De igual manera las mismas propiedades del material conllevan a una menor absorción de la energía en ciertas longitudes de onda, lo cual se refleja en una menor cantidad de atenuación en la señal. Dentro de la categoría de los vidrios, los materiales más usados comúnmente son los vidrios de silicato y los vidrios calcógenos.

Los vidrios de silicato o sílice están compuestos por dióxido de silicio (SiO_2), que es un material transparente con índice de refracción de $n=1.458$. Con el fin de lograr el efecto de reflexión total interna, al material del núcleo se le introducen impurezas de germanio para incrementar su índice de refracción. Estas fibras poseen una transmisión espectral óptima en un rango de 1300 a 1600 nm. (figura 1.3) [12, 15]. En longitudes de onda al rededor de 1550 nm, estas fibras presentan una atenuación casi nula, característica que fue de gran interés para su uso en telecomunicaciones. La fibra más comúnmente utilizada es la SMF-28e, la cual es una fibra monomodal a 1550 nm y posee dimensiones de núcleo de $9 \mu\text{m}$ y revestimiento de $125 \mu\text{m}$ [15, 16]. Además de ser empleadas para las telecomunicaciones, las fibras de sílice también son empleadas para la fabricación de sensores. Debido a que son dieléctricos, biocompatibles, de tamaño muy reducido y con capacidad de transmitir señales a velocidades muy altas, los dispositivos de fibra de sílice se han diversificado en muchas áreas de la tecnología [17-19].

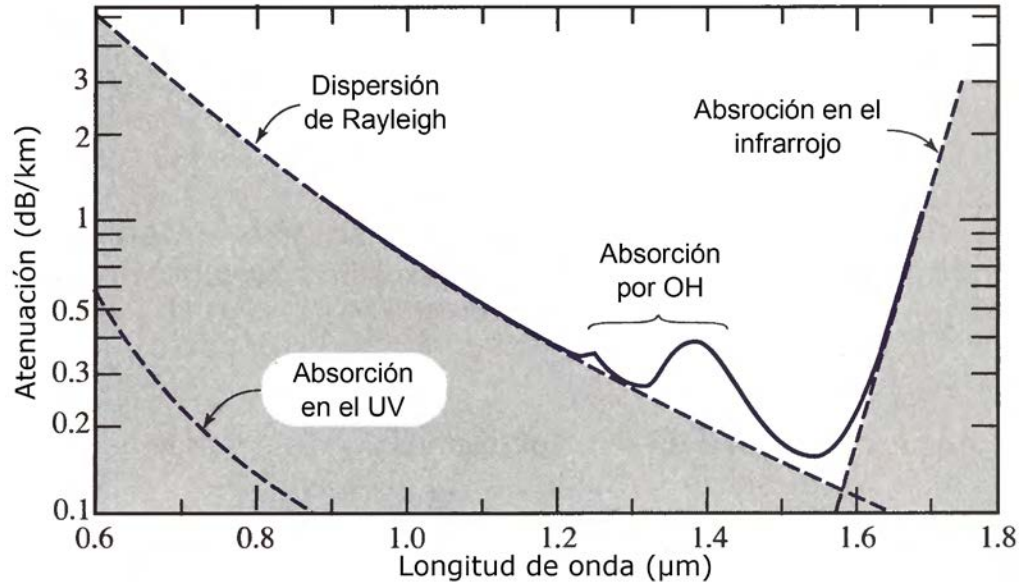


Fig. 1.3. Atenuación en la transmisión presentada en fibras de SiO_2 en función de la longitud de onda [12].

Los vidrios calcógenos son aquellos que contienen en su composición elementos calcógenos (S, Se, y TE) combinados con al menos uno de los siguientes elementos: As, Ge, Ga, Sb, o In. Pueden también contener otros elementos para brindar distintos efectos térmicos, mecánicos y ópticos, como lo son fósforo (P), bromo (Br), cloro (Cl), cadmio (Cd), bario (Ba), y otros [20, 21]. La característica principal de estos materiales es que poseen una banda de energía que les permite transmitir en longitudes de onda en el infrarrojo cercano. En comparación con los vidrios de sílice, las fibras de vidrios calcógenos pueden alcanzar un rango espectral de transmisión hasta los 12 μm [15, 22, 23], tal como se ilustra en la figura 1.4.

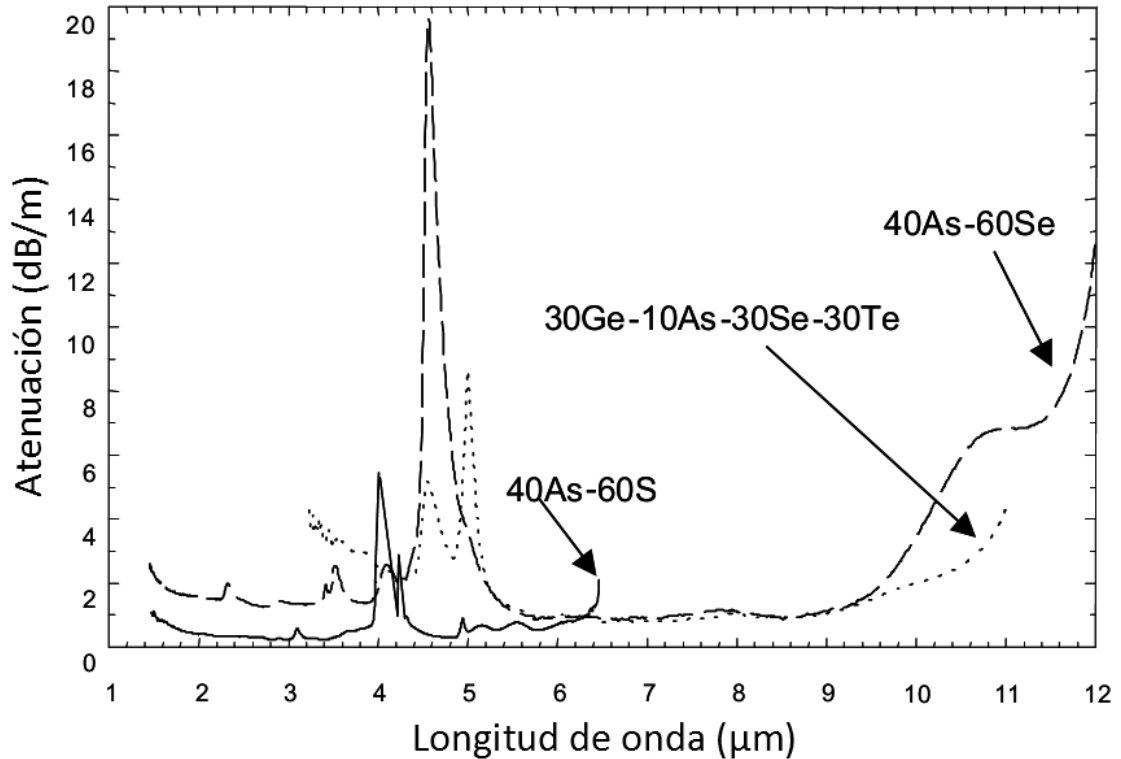


Fig. 1.4. Atenuación en la transmisión presentada en fibras de vidrio calcógeno en función de la longitud de onda [15].

Una propiedad importante de las fibras de vidrio calcógeno es que poseen un alto valor no lineal de tercer orden (χ^3), siendo tres ordenes de magnitud mayor que en vidrios de sílice. Estos efectos no lineales de tercer orden son de mucho interés para la rama de las telecomunicaciones, ya que son empleados para cambios ultra rápidos en multiplexado por división de tiempo, regeneración de señales, entre otros [15, 24]. A pesar de que tienen mayores pérdidas por atenuación que las fibras de sílice, las fibras de vidrios calcógenos permiten emplear longitudes muy reducidas de fibra para la generación de efectos no lineales [25].

1.1.2 Fibras adelgazadas y microalambres

Dentro de los dispositivos de fibra óptica están aquellos que funcionan por efecto de campo evanescente. Este tipo de dispositivos hace uso de la interacción

del campo electromagnético que se extiende fuera de la guía de onda; es decir, se hace uso de la luz que no queda confinada en el núcleo de la guía de onda y penetra al medio externo. En el caso de las fibras ópticas, la onda evanescente se extiende del núcleo hacia el revestimiento, donde este último posee un diámetro lo suficientemente grande para contener toda la onda evanescente hasta su total extinción. Un método para lograr exponer la onda evanescente consiste en retirar el revestimiento, ya sea por medios físicos (desbaste del material o pulido) [26] o por medios químicos (uso de ácido clorhídrico) [27].

Otro método para exponer la onda evanescente consiste en adelgazamiento y estiramiento de una sección de la fibra óptica [28]. En este proceso, el diámetro de la fibra es reducido gradualmente de forma adiabática hasta alcanzar una dimensión muy pequeña. De esta manera el núcleo de la fibra se vuelve tan pequeño que ya no es capaz de guiar más la luz, causando que el revestimiento se convierte en el nuevo núcleo de la guía de onda, mientras que el medio externo a la región adelgazada pasa a ser el nuevo revestimiento a lo largo del cual se propaga la onda evanescente (figura 1.5). Este método para exponer la onda evanescente es un proceso más simple, además de que se puede monitorear y controlar en tiempo real mediante una computadora.

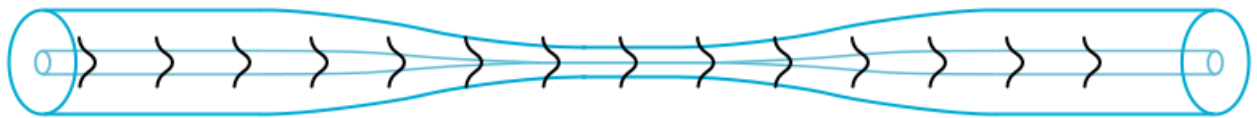


Fig. 1.5. Fibra óptica adelgazada: la onda evanescente queda expuesta en la sección adelgazada de la guía de onda.

Para analizar la manera en la que se propaga una onda a través de una fibra óptica adelgazada, esta se puede dividir en dos secciones: la sección de transición y la zona de microalambre óptico (*optical microwire*). La primera es la sección en donde el diámetro de la fibra va disminuyendo de manera gradual hasta alcanzar la sección del microalambre. Esta sección del microalambre es la región más adelgazada de la fibra y posee un diámetro constante (el cual puede ser de unos cuantos micrómetros). La zona de microalambre es la de mayor interés para

dispositivos que funcionan con base en la onda evanescente, pudiendo alcanzar una dimensión menor a la longitud de onda. Un esquema ilustrando las secciones de la fibra adelgazada se muestra en la figura 1.6.

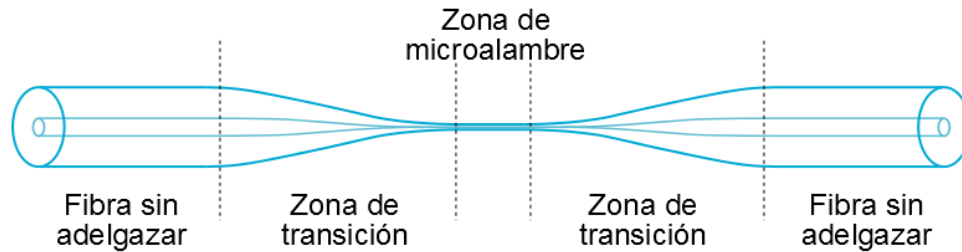


Fig. 1.6. Secciones de análisis en fibras ópticas adelgazadas.

Una aplicación de los microalambres se presenta en las fibras de vidrios calcógenos, donde efectos no lineales como la auto modulación de fase y la dispersión de velocidades de grupo pueden generarse al mandar pulsos de luz a través de ellos. El parámetro no lineal de las fibras ópticas (γ), definido en la expresión 1.1-1, está determinado por el índice no lineal de segundo orden (n_2), una frecuencia angular central (ω_0), la velocidad de la luz en el medio (c) y el área eficaz de la sección (A_{eff}) [15]. De esta expresión, podemos ver que al disminuir considerablemente el diámetro de las fibras, el parámetro no lineal de las fibras aumentará.

$$\gamma = \frac{n_2 \omega_0}{c A_{eff}} \quad 1.1-1$$

Con el uso de microalambres se obtienen efectos no lineales de mayor magnitud en secciones de fibra muy cortas, permitiendo el desarrollo de sistemas tales como regeneradores de señales ópticas [15, 30]. Otras aplicaciones para fibras ópticas adelgazadas incluyen sensores de onda evanescente para aplicaciones biomédicas [29], detección de fluidos [28], y otras.

1.2 Azopolímeros

Los azobencenos son cromóforos fotosensibles capaces de absorber energía luminosa en un rango de longitudes de onda específicas, provocando cambios físicos que alteran sus propiedades ópticas. La estructura química de estos compuestos se conforma por dos anillos fenilo unidos entre ellos por un doble enlace entre nitrógenos (-N=N-), formando la estructura principal denominada como grupo azo. Sus propiedades químicas e interacción materia-energía (por ejemplo: enlaces químicos, absorbancia, tiempos de vida, etc.), están determinadas por los grupos funcionales unidos en los extremos del grupo azo. Un efecto que presentan dichos compuestos al ser radiados con luz es la fotoisomerización, fenómeno que implica una transición de un isómero de la forma *trans* a uno *cis* (figura 1.7) [7, 31].

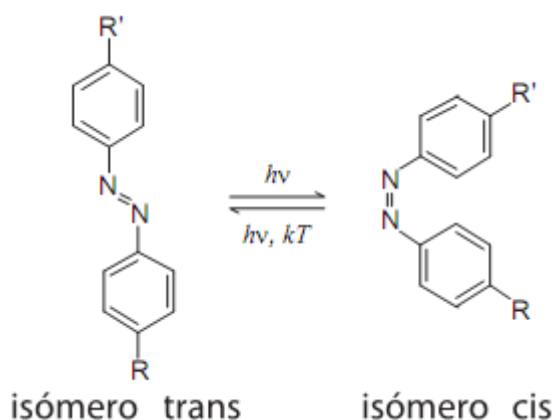


Fig. 1.7. Isómero de azobenceno y sus formas *trans* y *cis* [7].

Este tipo de compuestos fueron empleados en un principio como colorantes orgánicos utilizados entre otras cosas como tintes para fibras textiles [32]. Para la utilización de las moléculas de azobenceno, comúnmente se emplea un solvente compatible para formar una solución adecuada para la aplicación en particular. Es posible también realizar estructuras con un volumen y forma determinados mediante la contención de moléculas de azobenceno dentro de una matriz polimérica, generando así un azopolímero. La adición de las moléculas de azobenceno al polímero modifica las propiedades mecánicas, térmicas y ópticas,

brindando versatilidad para ajustarlas según a la aplicación requerida [32]. Dentro de las ventajas que ofrece este último método, está la creación de películas delgadas con estos materiales, estabilidad de respuesta y buena reproducibilidad en su fabricación.

La propiedad de los azobencenos de reaccionar a un estímulo luminoso genera movimientos en las moléculas que alteran las propiedades físicas y ópticas de estos materiales. Al irradiar las moléculas de azobenceno con luz linealmente polarizada se provoca el efecto de fotoisomerización, se activa solamente en aquellos solamente aquellos cromóforos que poseen un momento dipolar paralelo al de la polarización de la luz [31, 34]. Estos movimientos no se presentan en moléculas que originalmente poseen orientación perpendicular. El proceso de fotoisomerización se presenta de manera gradual hasta que todas las moléculas radiadas se posicionan de manera perpendicular con respecto a la polarización del haz de luz que ejerce dicho estímulo, denominado haz de escritura. La figura 1.8 ilustra la reacción de las moléculas bajo el estímulo del haz de escritura, indicándose también los ejes paralelo y perpendicular de las formas *trans* y *cis* que reaccionan a la polarización de la luz incidente.

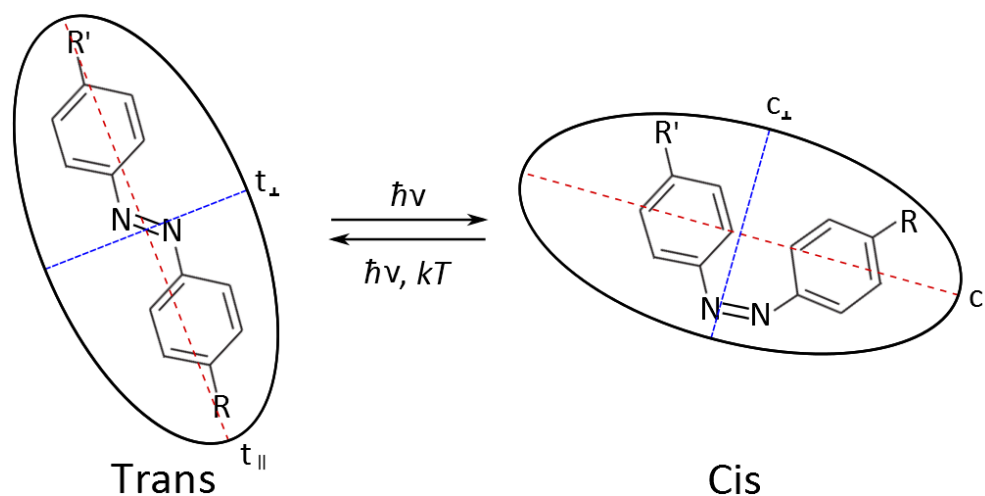


Fig. 1.8. Reorientación de los isómeros *trans* (t) y *cis* (c) dependiendo de la orientación del haz de escritura.

Dentro de una matriz polimérica en donde las moléculas de azobenceno poseen una estructura con mayor organización y orden, los efectos producidos en la reorientación de las moléculas debidos a la fotoisomerización se agrupan en dominios. El conjunto de estos dominios orientados en una misma dirección genera una orientación mayor, causando que una mayor cantidad de material se mueva en la dirección preferencial iluminada (figura 1.9). Las consecuencias de la orientación de los azobencenos son efectos de birrefringencia y dicroísmo. Una vez inducidos, estos efectos pueden ser eliminados mediante la iluminación de una fuente de luz polarizada circularmente, o bien, al calentar las muestras por encima de su temperatura de transición vítrea (T_g). Cabe mencionar que los cambios fotoinducidos alcanzarán un valor máximo mientras están bajo iluminación del haz de escritura, pero en cuanto se interrumpe la iluminación algunas moléculas de azobenceno permanecen en la posición inducida y otros tienden a retornar a su estado inicial. Este último efecto depende de la interacción que exista entre el azobenceno y el polímero, interviniendo en esto factores como lo es la rigidez de la matriz, espacio intramolecular, T_g , etc. [33, 35].

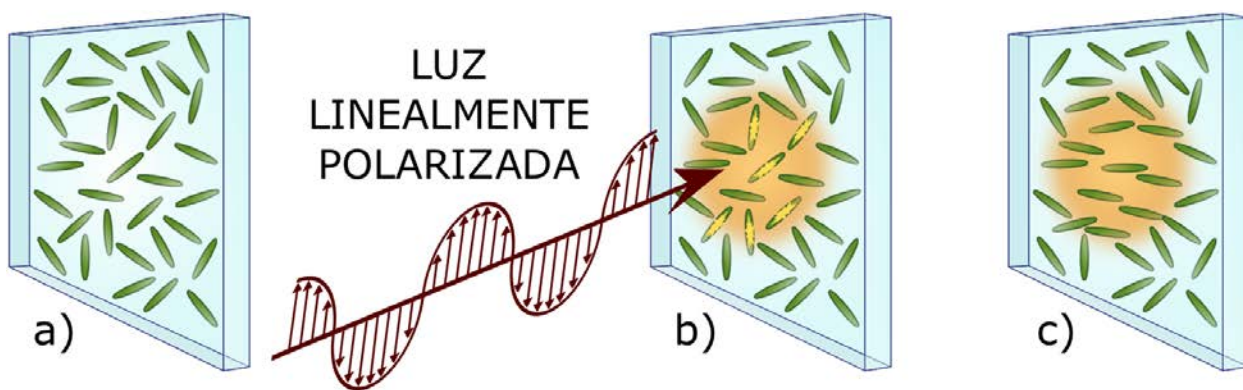


Fig. 1.9 Reorientación de moléculas de azobenceno en un azopolímero y agrupación en dominios.

1.2.1 Matrices poliméricas

Existen tres métodos para lograr incorporar azobencenos dentro de matrices poliméricas. El primero de ellos es el método de huésped-anfitrión (en inglés *guest-host*), que consiste en añadir las moléculas de azobenceno ya sea en forma de solución empleando un solvente, o bien simplemente en forma de polvo dentro de la matriz polimérica, donde el polímero actúa como el anfitrión. Al emplear este método no existe ningún tipo de interacción entre el azobenceno y la matriz polimérica, por lo que el polímero simplemente actúa como medio de contención. El segundo método es la síntesis de polímeros funcionalizados covalentemente, donde las moléculas de azobencenos se fijan a la cadena polimérica. La elaboración de azopolímeros mediante este método involucra un proceso más elaborado pero conllevan a una respuesta de mayor magnitud y eficiencia de los cromóforos. Por último, el tercer método es la incorporación de los azobencenos en una matriz polimérica con cadena supramolecular, donde por medio de enlaces no covalentes los azobencenos se acoplan espontáneamente a las cadenas del polímero. De este último los lazos formados poseen una simplicidad de fabricación similar al método de huésped-anfitrión y la eficiencia de respuesta de los polímeros funcionalizados covalentemente [8, 33, 35]. Los tres métodos para lograr un azopolímero se ilustran en la figura 1.10.

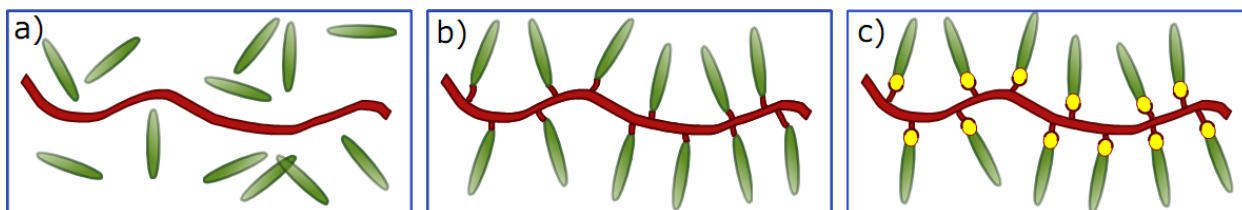


Fig. 1.10. Métodos de contención moléculas de azobencenos (verde) dentro de una matriz polimérica (rojo): a) huésped-anfitrión, b) polímeros funcionalizados covalentemente y c) polímero con cadena supramolecular.

De los tres métodos descritos anteriormente, el de huésped-anfitrión presenta la menor complejidad y costo de fabricación, debido a que involucra mayor libertad en la elección de los materiales y menor cantidad de pasos en el

proceso de obtención. Aunque la magnitud de la respuesta obtenida por este método es inferior a los de los otros dos, la facilidad de obtención significa una gran ventaja. Películas delgadas de azopolímero y dispositivos funcionando bajo el esquema de huésped-anfitrión han sido probados con anterioridad [33, 36].

Para poder hacer uso de azopolímeros sobre regiones adelgazadas de fibra óptica, la elección de la matriz polimérica es de suma importancia para conservar la condición de reflexión total interna. Para esto se necesita que el polímero a emplear posea un menor índice de refracción que el del material de la fibra óptica. El emplear un material con índice de refracción mayor implica la generación de pérdidas muy altas, pues la onda evanescente se acoplaría por completo al recubrimiento polimérico y se atenuaría por pérdidas durante la propagación. En trabajos previos, las matrices poliméricas empleadas en la creación de azopolímeros para la generación de efectos fotoinducidos incluyen el poli (metil metacrilato) (PMMA), poliestireno (PS), polydimetil siloxano (PDMS), sol-gel, polivinil pirrolidona (PVP), polivinil acetato (PVA) y algunos de sus derivados [8, 33, 36-38].

1.2.1 Azobencenos DR1 y DR13

En la amplia gama de los azobencenos se encuentra la serie del Rojo Disperso, siendo estas las series más básicas y con gran disponibilidad comercial. Dentro de esta serie se encuentra los compuestos Rojo Disperso 1 y el Rojo Disperso 13, conocidos también como DR1 y DR13 por sus siglas en inglés (*Disperse Red 1* y *Disperse Red 13*). Las estructuras químicas de ambos azobencenos se muestran en la figura 1.11. Ambos compuestos han sido probados anteriormente por poseer propiedades fotoinducidas como birrefringencia y dicroísmo dentro de matrices poliméricas [8, 35, 36, 40]. La diferencia entre ambos compuestos es la sustitución de una molécula de hidrógeno por una de cloro provocando un cambio en sus propiedades (tabla 1.2). Este cambio se puede apreciar claramente como un desplazamiento en la longitud de

absorción máxima [40], como se muestra en la figura 1.12 que muestra espectros de absorbancia adquiridos con un espectrómetro UV-Visible UNICA UV300.

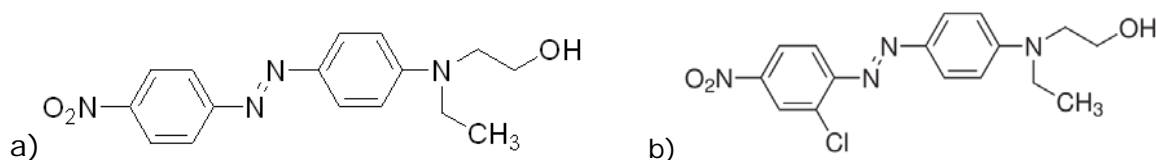


Fig. 1.11. Estructuras químicas de: a) DR1 y b) DR13.

Tabla 1.2. Características de los azobencenos DR1 y DR13.

Característica	Rojo Disperso 1 (DR1)	Rojo Disperso 13 (DR13)
Fórmula química	$C_{16}H_{18}N_4O_3$	$C_{16}H_{17}ClN_4O_3$
Peso molecular	314.34 [g/mol]	348.78 [g/mol]
Contenido de tinte	95 %	95 %
Temperatura de fusión	(160 – 162) [°C]	(122 - 129) [°C]
Longitud de onda de máxima absorción ($\lambda_{m\acute{a}x}$), disuelto en tetrahidrofurano (THF)	489 [nm]	501 [nm]

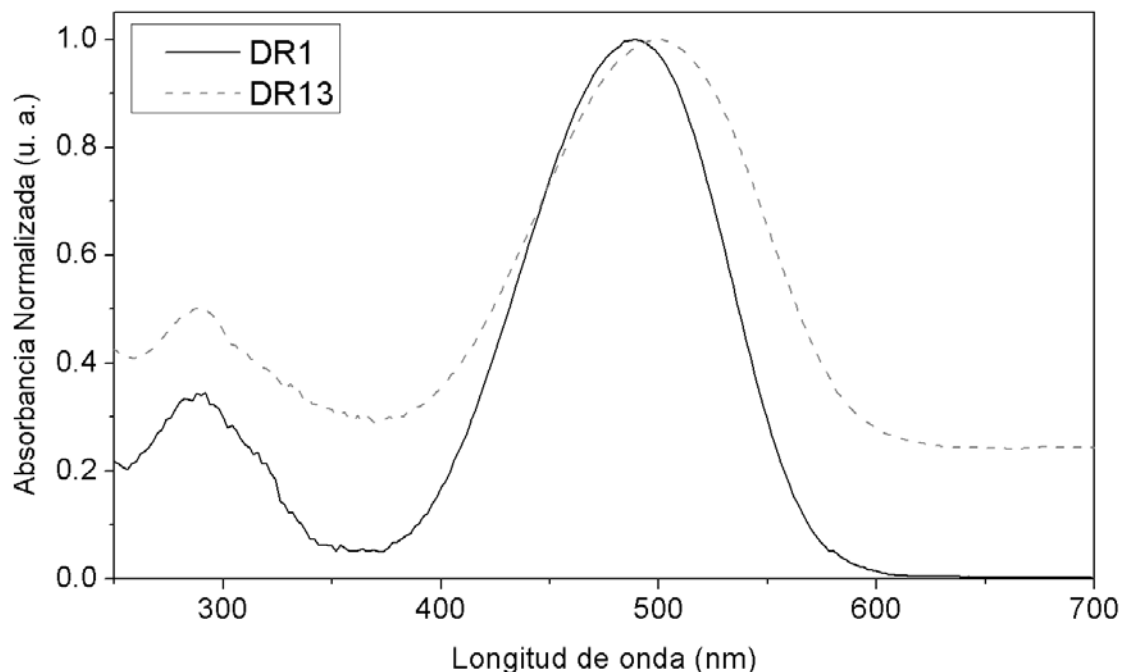


Fig. 1.12. Espectros de absorción de los azobencenos DR1 y DR13 disueltos en tetrahidrofurano (THF).

1.3 Recubrimientos sobre fibras ópticas

Al depositar recubrimientos sobre secciones adelgazadas de fibra óptica estos deben ser realizados de manera uniforme y con espesores adecuados según sea su uso. De haber alguna imperfección o cambio abrupto en el recubrimiento, esta creará perturbaciones en la señal y/o pérdidas por atenuación. Para la realización de recubrimientos azopoliméricos sobre fibras ópticas, el espesor de las capas debe ser delgado (unos cuantos micrómetros) para lograr una mayor eficiencia en el efecto fotoinducido. La razón de esto es que al tener una capa muy gruesa, la energía luminosa necesaria debe ser mayor para excitar los cromóforos situados en la frontera con la fibra óptica, ya que los azobencenos en capas más exteriores absorberán gran parte de ella. De igual manera, una consideración que debe ser tomada en cuenta para el recubrimiento de fibras

ópticas es su geometría cilíndrica, la cual es una limitante para ciertas técnicas de depósito de capas delgadas.

1.3.1 Técnicas de depósito para recubrimientos delgados

Actualmente existen varios métodos para la creación de capas o recubrimientos delgados sobre sustratos de diferente especie. Entre los más comunes podemos encontrar métodos de recubrimiento como lo son: por rotación (*spin coating*) [41], por flujo (*flow coating*) [42], por mojado (*dip coating*) [43] y por rodillos (*roll coating*) [44]. Estos métodos son generalmente empleados para recubrir superficies planas y sólidas con líquidos, sin embargo unas de ellas son usadas para recubrir fibras ópticas.

Comúnmente los recubrimientos poliméricos sobre fibras ópticas son hechos mediante una técnica de flujo y jalado (figura 1.13a). En el proceso de recubrimiento la fibra desnuda es inmersa en un recipiente que contiene la solución con la cual se recubre; posteriormente la fibra es jalada a través de un orificio ubicado en la parte inferior del recipiente adhiriéndose una capa de la solución a la fibra [42]. El grosor de la capa con la cual se recubre la fibra depende del flujo de líquido, que a su vez está dado por diámetro de la abertura del recipiente, la viscosidad de líquido, la fuerza de gravedad y la velocidad de jalado de la fibra.

Otro proceso similar para generar películas delgadas y que es aplicable a puntas de fibra óptica es la técnica de *dip coating*. Esta técnica consiste en introducir el sustrato a recubrir dentro del líquido de interés y después extraerlo de manera controlada. En este proceso el espesor del recubrimiento adherido a la muestra depende de las propiedades del líquido y de la velocidad a la cual se extrae el sustrato. Los parámetros del proceso que determinan el espesor del recubrimiento están relacionados de acuerdo a:

$$h = c_L \sqrt{\frac{U\eta}{\rho g}} \quad 1.3-1$$

donde h es el espesor del recubrimiento obtenido, U es la velocidad a la cual se retira la muestra del líquido, η es la viscosidad del fluido, ρ es la densidad del líquido, g es la fuerza de gravedad y c_L es una constante que depende del tipo de líquido (Newtoniano o no Newtoniano) [43-46]. Las fuerzas que intervienen para lograr que el líquido quede adherido a la muestra son la velocidad de arrastre debido al retiro de la muestra, la tensión superficial, la gravedad y la fuerza inercial del líquido. Un esquema de este proceso se muestra en la figura 1.13b.

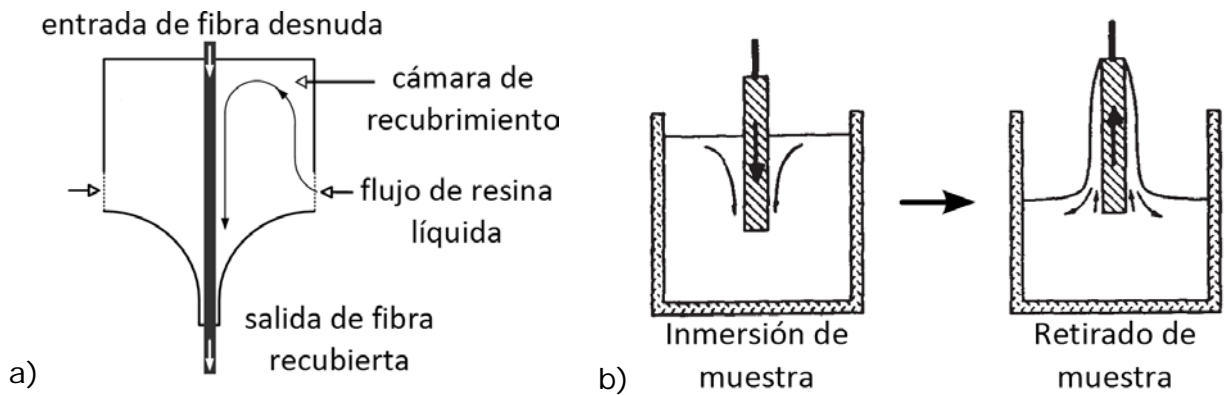


Fig. 1.13. Recubrimiento de fibras ópticas por métodos de flujo [42] y de mojado [43].

1.4 Birrefringencia y efectos de polarización en fibras ópticas

La luz al ser una onda electromagnética transversal posee componentes de campo eléctrico y de campo magnético, los cuales son ortogonales entre sí. Durante la propagación de la onda, la orientación del vector de campo eléctrico determinan la polarización de la onda. Dependiendo de la trayectoria que describa el vector de campo eléctrico se pueden clasificar principalmente en tres tipos de polarización, que son: polarización lineal, elíptica y circular, ya sea derecha o izquierda (figura 1.14).

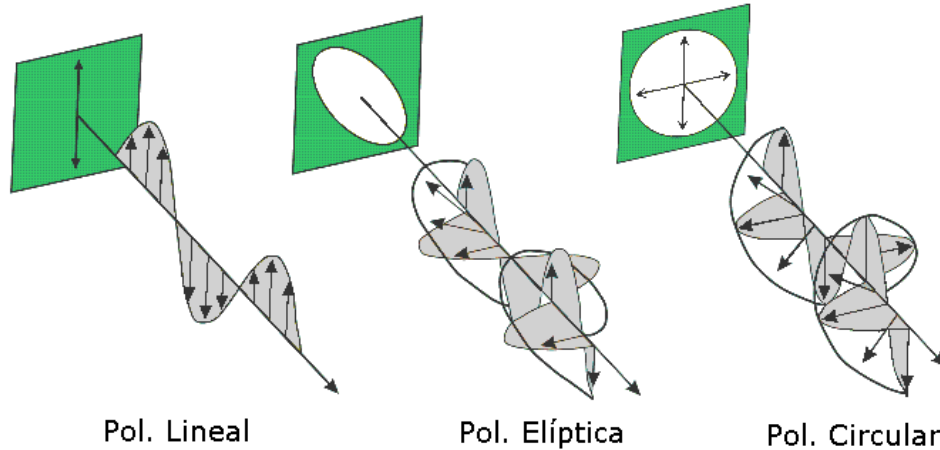


Fig. 1.14 Tipos de polarización de la luz.

La polarización de una onda electromagnética es de suma importancia para la interacción con materiales, al igual que para su detección. Debido a ligeras variaciones o imperfecciones en la fabricación, las fibras ópticas poseen asimetría en el núcleo y esto genera anisotropía, favoreciendo dos ejes de propagación con distinto índice de refracción. Esta propiedad es conocida como birrefringencia modal (B), determinada por la expresión [15, 18]:

$$B = \frac{|\beta_x - \beta_y|}{k_0} = |n_x - n_y| = \Delta n \quad 1.4-1$$

donde β_x , β_y y n_x , n_y son las constantes de propagación e índices de refracción para los dos estados de polarización ortogonales, respectivamente. Al irse propagando la señal por una fibra birrefringente, la polarización en cada uno de los ejes ortogonales evolucionará de manera diferente debido a las dos diferentes velocidades de propagación. Por esta razón, la polarización evolucionará en varios estados hasta retornar a su estado original, tal como se ilustra en la figura 1.15. La longitud requerida de fibra para que esto ocurra se denomina longitud de abatimiento (*beat length*, L_B). La longitud de abatimiento representa la distancia a la cual se produce un intercambio de energías entre ambos estados de polarización y se origina el retorno a la polarización inicial. Esta longitud se determina por la expresión:

$$L_B = \frac{2\pi}{|\beta_x - \beta_y|} = \frac{\lambda}{\Delta n} = \frac{\lambda}{B} \quad 1.4-2$$

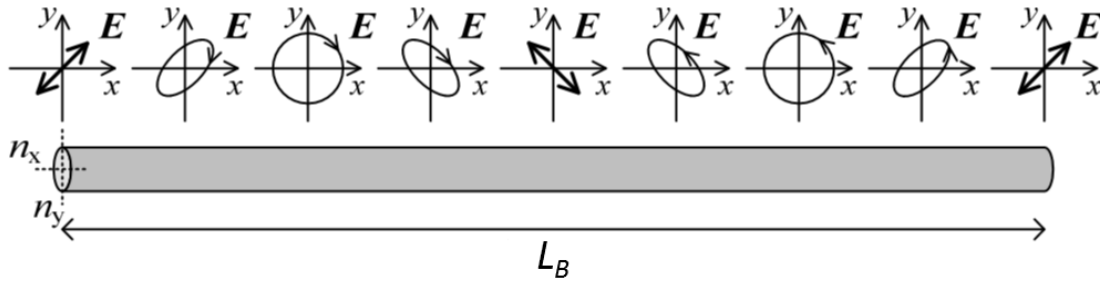


Fig. 1.15. Evolución del estado de polarización a lo largo de la longitud de abatimiento [18].

1.4.1 Fibras altamente birrefringentes

El mantener la polarización de la luz a lo largo de la transmisión es de vital importancia para ciertas aplicaciones. En fibras convencionales, la polarización es fácilmente alterada al presentarse una deformación mecánica y alterar la geometría de la fibra, al igual que debido al efecto elasto-óptico. Existen cierto tipo de fibras especiales que mantienen la polarización (fibras PM), poseyendo una estructura interna diferente en la cual es inducida una birrefringencia de gran magnitud. Este efecto se logra al fabricar la fibra con una gran asimetría, generando así una diferencia muy marcada en el índice de refracción en uno de los ejes ortogonales. El aumento en la birrefringencia genera una disminución importante en la longitud de abatimiento (ver ecuación 1.4-2), llegando a adquirir valor del orden de unos cuantos milímetros. Para propósitos prácticos, se puede considerar que el estado de polarización inicial se mantiene durante la propagación a lo largo de la fibra PM.

Actualmente la fabricación de las fibras que mantienen la polarización puede ser realizada al introducir en uno de los ejes ortogonales de la fibra elementos que aplican estrés mecánico, denominados SAM por sus siglas en ingles (*stress-*

applying members) [13, 15, 18]. Como resultado de la incorporación de los SAM en las fibras se produce asimetría en el índice de refracción, creando diferencias de índice a través del efecto elasto-óptico. Entre los materiales que se emplean para producir birrefringencia en la fibra se incluyen metales, aire y SiO₂ dopado con boro para obtener un mayor coeficiente de expansión térmico. Otra forma de generar birrefringencia en la fibra es fabricando el núcleo con geometría elíptica. En la figura 1.16 se muestran algunos ejemplos de las secciones transversales de fibras PM existentes.

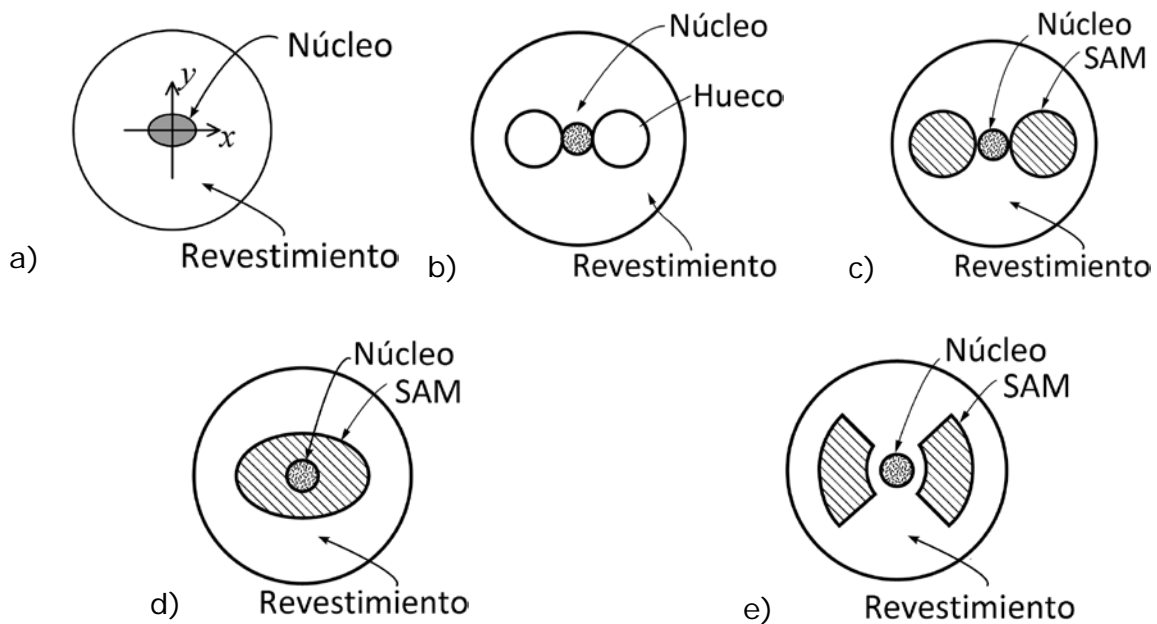


Fig. 1.16. Fibras de alta birrefringencia: a) núcleo elíptico, b) fibra de túnel lateral, c) fibra panda, d) fibra elíptica SAM y e) fibra de corbata de moño [13, 18].

1.4.1.1 Birrefringencia y dispersión de modos de polarización (PMD)

Debido a los efectos de la birrefringencia en las fibras ópticas las diferentes orientaciones de polarización se propagarán con diferentes velocidades de fase. Como consecuencia de esto al transmitir pulsos de luz estos sufren un ensanchamiento por el retardo ocasionado entre sus diferentes componentes

polarizadas. Este efecto es conocido como *dispersión de modos de polarización* o PMD (por sus siglas en inglés, *polarization mode dispersion*) [15, 47]. Un ejemplo de esto se observa en la transmisión de pulsos ultracortos, donde debido a la diferente velocidad de propagación en cada eje ortogonal, el pulso se ensancha. En sistemas de telecomunicaciones el ensanchamiento de pulsos es causa de pérdida de información provocando la deformación de los bits transmitidos. Cambios en el entorno como la temperatura o estrés mecánico son causa de variaciones estocásticas en este tipo de dispersión a lo largo del tiempo.

1.4.2 Arreglo para medir birrefringencia

Existen varias alternativas para medir la birrefringencia en fibras ópticas y la más simple se basa en el uso de un arreglo de polarizadores cruzados. Esta técnica consiste en hacer uso de la longitud de abatimiento para lograr la interferencia entre los modos de polarización y monitorear sus efectos en el espectro de transmisión. El mecanismo de funcionamiento consiste en proveer a la entrada del dispositivo a caracterizar una fuente de luz linealmente polarizada con espectro amplio; generalmente se emplea una fuente amplificada de emisión espontánea (ASE, por sus siglas en inglés, *Amplified Spontaneous Emission*). La luz proveniente de la fuente es introducida al dispositivo bajo estudio (DUT) y la señal de salida se hace pasar por otro polarizador que se encuentra rotado 90° con respecto al primero. Finalmente, la salida es observada en un analizador de espectros [48, 49]. Un diagrama del arreglo experimental de esta técnica se ilustra en la figura 1.17.

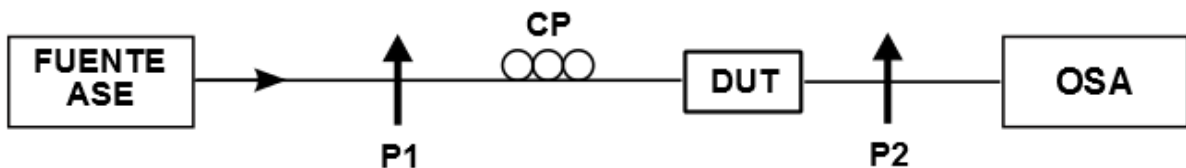


Fig. 1.17. Diagrama del método de polarizadores cruzados el cual brinda la posibilidad de visualizar variaciones en le espectro de transmisión y medir la birrefringencia. P1 y P2 son polarizadores lineales, CP es un controlador de polarización, DUT es el dispositivo bajo estudio y OSA es el analizador de espectros ópticos.

La luz transmitida a través del DUT sufre un cambio de fase generado en las dos componentes ortogonales de polarización debido a la birrefringencia. Dado que la señal a la salida del segundo polarizador es la suma de las proyecciones de las componentes ortogonales, el dispositivo birrefringente (DUT) en conjunto con el polarizador de salida, representan un interferómetro de Mach-Zender donde los dos brazos del interferómetro son los dos modos de polarización [12, 48]. A causa de la interferencia, el espectro de transmisión presentará bandas de atenuación periódicas en todo el rango espectral formando lóbulos (figura 1.18). La separación entre los lóbulos es medida entre los picos o valles situados entre dos longitudes de onda ($\Delta\lambda$), la cual en conjunto con la longitud de onda central a la que se miden los picos (λ) y la longitud total del dispositivo birrefringente, determinan la birrefringencia de acuerdo a:

$$\Delta n = B = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda L} \quad 1.4-3$$

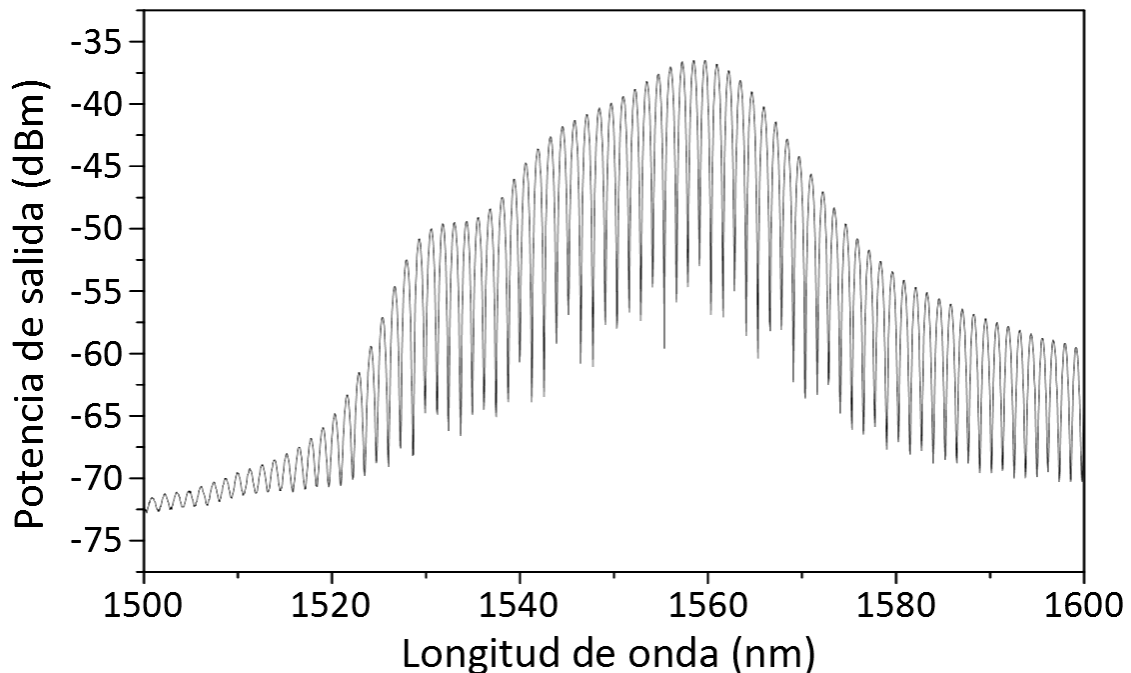


Fig. 1.18. Espectro de transmisión obtenido de un arreglo con polarizadores cruzados y un elemento birrefringente (DUT). La periodicidad de los lóbulos del espectro se utiliza para medir la birrefringencia del DUT [49].

Esta técnica para medir la birrefringencia permite también monitorear cambios en tiempo real. La única limitante para este método es que el ancho espectral de la fuente de luz debe ser lo suficientemente amplio, con el fin de que los lóbulos generados por la longitud de repetición del dispositivo birrefringente puedan ser observados. Como se mostrará en los siguientes capítulos, la técnica de polarizadores cruzados resulta útil para medir birrefringencia foto-inducida. En particular, fue una de las técnicas utilizadas para caracterizar los dispositivos de fibra óptica con recubrimientos de azo-polímero, cuyos detalles de fabricación y evaluación de respuesta se describen en la siguiente sección.

2. DISPOSITIVOS DE FIBRA ÓPTICA DE VIDRIO CALCÓGENO

Las fibras ópticas fabricadas con vidrios calcógenos son de gran importancia al poseer una ventana de transmisión en el lejano infrarrojo y propiedades no lineales de gran magnitud. Entre las aplicaciones más comunes se encuentran dispositivos ópticos infrarrojos, transmisión de láseres infrarrojos, adquisición de imágenes y microscopía en el infrarrojo. Dentro de la rama de las telecomunicaciones se ha hecho uso de sus propiedades no lineales aplicándolas en el procesamiento de señales ópticas (amplificación, conversión de longitud de onda, regeneración de señal, entre otros [15, 24, 25]).

En este capítulo se estudia la fabricación de dispositivos fabricados con fibras ópticas de vidrio calcógeno elaboradas de As_2Se_3 . Dichos dispositivos se basan en fibras ópticas adelgazadas recubiertas con polímero, PMMA, para obtener cables ópticos de tamaño micrométrico. El PMMA cumple dos funciones: proteger a la fibra de perturbaciones mecánicas externas logrando un dispositivo robusto y alojar moléculas de azobenceno para lograr efectos de birrefringencia fotoinducida. Las instalaciones y equipo para la realización de este trabajo de investigación, fueron proporcionados por el Grupo de Sistemas Fotónicos (PSG por sus siglas en inglés *Photonic Systems Group*), de la Universidad de McGill en Canadá. Las fibras ópticas de vidrio calcógeno son desarrolladas por el grupo de investigación del Prof. Martin Rochette.

2.1. Fabricación de fibras recubiertas con PMMA

Las fibras ópticas de vidrios calcógenos son empleadas generalmente para obtener fenómenos no lineales. Una forma de incrementar la magnitud de dichos efectos es utilizar un diámetro menor en la guía de onda, lo cual se logra al someter las fibras a un proceso de adelgazamiento. Las fibras empleadas para los experimentos realizados en este capítulo están fabricadas del compuesto de AsSe. Este tipo de material es muy frágil, causando que para su manejo se requiera de un recubrimiento polimérico con el fin de brindar una mayor resistencia mecánica. Cabe mencionar que al adelgazar una fibra óptica se expone la onda evanescente, la cual interactúa con el revestimiento aplicado a las fibras ópticas.

Originalmente las fibras calcógenas poseen un recubrimiento polimérico flexible, pero este no es apto para fines ópticos además de no ser compatible con las temperaturas a las cuales se reblandece el AsSe. Por esta misma razón para el recubrimiento polimérico de fibras de AsSe se emplea el PMMA [30, 50], brindando robustez y rigidez mecánica; además, este material posee una Tg compatible con el vidrio calcógeno e índice de refracción menor. Las fibras utilizadas en estos experimentos son fabricadas por la empresa CoreActive HighTech (apéndice A), poseyendo originalmente un núcleo hecho de $As_{39}Se_{61}$ con diámetro de $7\ \mu\text{m}$, recubierto por un revestimiento con una cantidad menor de As y diámetro de $170\ \mu\text{m}$. Para la fabricación de dispositivos, a esta fibra se le remueve el revestimiento y se adelgaza hasta obtener un diámetro del núcleo de $5.6\ \mu\text{m}$ para asegurar una propagación monomodal en una longitud de onda de $1550\ \text{nm}$ [30].

El proceso de recubrimiento de PMMA sobre las fibras se comienza primeramente adelgazando tubos de PMMA con diámetro externo aproximado a $1\ \text{cm}$. Este primer paso se realiza empleando una torre de adelgazamiento en la cual se coloca verticalmente el tubo de PMMA sujetándolo fijamente de la parte superior; la parte inferior del tubo de PMMA se sujeta a un soporte móvil que se desplaza de forma descendente causando que el PMMA sea estirado y como consecuencia sea adelgazado. Al rededor del tubo de PMMA se encuentra una

resistor eléctrico controlado mediante un controlador PID (Proporcional Integral Derivativo), el cual mantiene la temperatura a 200 °C (figura 2.1a). El proceso de adelgazamiento de los tubos de PMMA es repetido hasta que este alcanza dimensiones cercanas al diámetro exterior de la fibra óptica, siendo sus diámetros interior y exterior finales de 230/1000 μm , respectivamente [51].

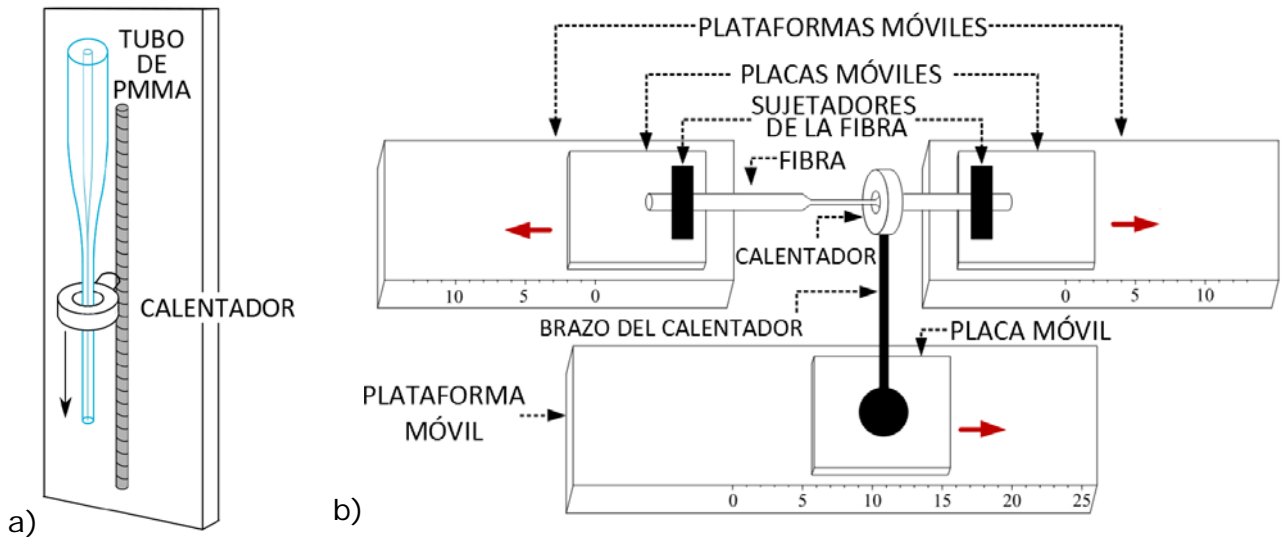


Figura 2.1. Proceso de fabricación de fibras ópticas adelgazadas de vidrio calcógeno con recubrimiento de PMMA. a) Torre de adelgazamiento de tubos de PMMA y b) máquina de adelgazamiento de las fibras de vidrio calcógeno[51].

Una vez obtenidas las dimensiones adecuadas del tubo de PMMA, la fibra de vidrio calcógeno es introducida en él. A su vez este arreglo de fibra-tubo de PMMA se coloca en una máquina que se encarga de calentarlos a 160 °C mediante una resistencia eléctrica, realizando un barrido longitudinal (figura 2.1b). Para lograr adherir el recubrimiento de PMMA sobre al fibra de AsSe, se realiza un primer barrido de la resistencia logrando que mediante un incremento de temperatura el tubo de PMMA se colapse sobre la fibra. Finalmente se obtiene una fibra de vidrio calcógeno recubierta con PMMA. A las fibras obtenidas con este proceso se les llama fibras de AsSe/PMMA.

Las fibras de AsSe/PMMA resultantes poseen grandes pérdidas, por lo cual sólo pueden ser fabricadas en longitudes cortas. Esto representa dificultad

para su uso al intentar poner conectores en los extremos y que resulten aptos para su uso junto con otros elementos y equipo óptico. Por este motivo en los extremos de la fibra de AsSe/PMMA se le añaden fibras de sílice (SiO_2) monomodales a una longitud de onda de 1550 nm (SMF-28e), para poder empalmarla con conectores. Antes de pegar las fibras, las puntas de la fibra de AsSe/PMMA tiene que ser lijadas y pulidas para lograr un buen acoplamiento de la señal óptica; esto debido a que los materiales no pueden ser cortados como las fibras de sílice convencionales. Una vez lijados los extremos de la fibra de AsSe/PMMA uno de ellos es alineado con una fibra de sílice, esto se logra optimizando la alineación entre ambas fibras utilizando una señal láser a 1550 nm y observando la señal de salida en el otro extremo de la fibra de AsSe/PMMA. En esta etapa de la alineación se busca excitar sólo un modo de la fibra y por lo tanto es necesario utilizar una cámara infrarroja de tal manera que pueda observarse a la salida una distribución modal adecuada. La alineación en el otro extremo se realiza monitoreando la señal con un multímetro óptico, buscando la mayor intensidad posible. Por último, se deposita una gota de pegamento con índice de refracción similar al de la fibra de sílice en ambas uniones y se cura con luz ultravioleta.

Para adelgazar la fibra de AsSe/PMMA, esta se sitúa en la misma máquina donde se colapso el tubo de PMMA sobre al fibra de AsSe. La diferencia en el proceso consiste en que esta vez sólo se sujeta una pequeña sección de la fibra de AsSe/PMMA y es estirada mientras la resistencia eléctrica realiza un barrido oscilatorio a lo largo de la sección longitudinal de la fibra [51]. Las temperaturas manejadas en este proceso se ubican en un rango de entre 180 y 200 °C. Una señal óptica de una fuente ASE, con un rango de espectral de emisión de 1510 a 1580 nm, es utilizada para mandar una señal óptica a la fibra y monitorear las pérdidas durante el proceso de adelgazamiento. Ambos extremos de la fibra se encuentran fijos sobre unos soportes móviles controlados mediante software; de esta manera la fibra es calentada y elongada para reducir su diámetro de manera controlada. Este proceso se lleva a cabo durante varias horas hasta lograr el

diámetro deseado en la sección de microalambre. Una fotografía de una fibra adelgazada de AsSe/PMMA se muestra en la figura 2.2.

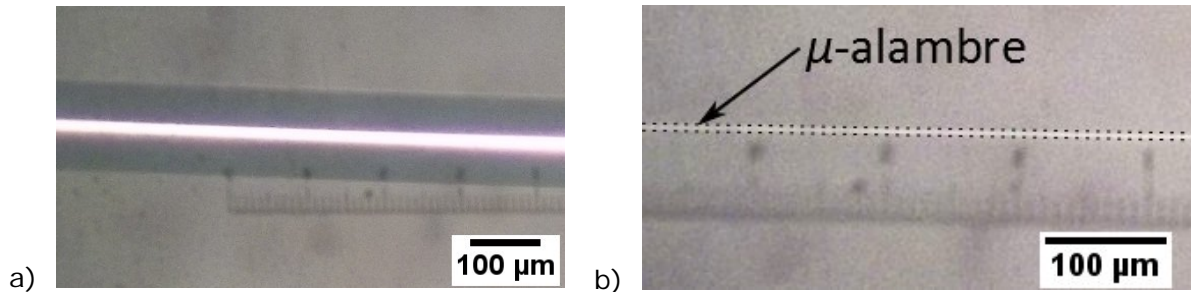


Figura 2.2. Foto de fibra de AsSe/PMMA: a) sección no adelgazada y b) sección de microalambre.

2.2 Caracterización

Las dimensiones de las fibras de vidrios calcógenos recubiertas con PMMA determinan tanto su resistencia mecánica como sus propiedades ópticas. Un esquema de la fibra se muestra en la figura 2.3, en donde puede observarse como la fibra de AsSe está contenida dentro del tubo de PMMA. En la sección longitudinal se muestra una capa exterior de PMMA y una capa interior de AsSe, conteniendo el revestimiento y núcleo de la fibra original. En las fibras fabricadas para los experimentos realizados en este trabajo los espesores de cada una de estas capas fueron todas de $0.7 \mu\text{m}$. La longitud de la sección adelgazada de las fibras fabricadas es de 14 cm, mientras que la sección de alambre es de 3 cm de longitud.

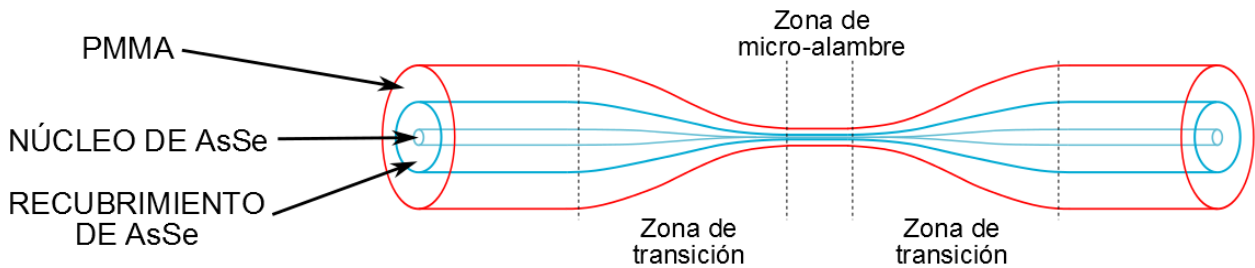


Figura 2.3. Esquema de microalambre de AsSe/PMMA.

Otros dos aspectos que definen las características ópticas de las fibras de AsSe/PMMA son las pérdidas inherentes de las fibras y el *photodarkening*. Estas dos características se discuten a continuación.

2.2.1 Pérdidas

El proceso de fabricación de las fibras de AsSe/PMMA genera pérdidas en la señal transmitida a través de ellas. Estas son producidas a causa del acoplamiento entre la fibra de AsSe/PMMA y las fibras monomodales de sílice, el proceso de adelgazamiento y debido a los mismos materiales. La atenuación de la señal óptica al viajar a través de los microalambres de AsSe/PMMA es muy importante, ya que las pérdidas de inserción son elevadas obteniendo a la salida una señal muy baja en intensidad. Para la caracterización de las fibras fabricadas se empleó la señal proveniente de una fuente de luz de espectro amplio de emisión (fuente ASE) con un rango de emisión en longitudes de onda de 1515 a 1575 nm. Las pérdidas por inserción pueden apreciarse en el espectro de transmisión mostrado en al figura 2.4 y 2.5, donde se observa que estas son dependientes de la longitud de onda y están en un rango de 15 a 19 dB.

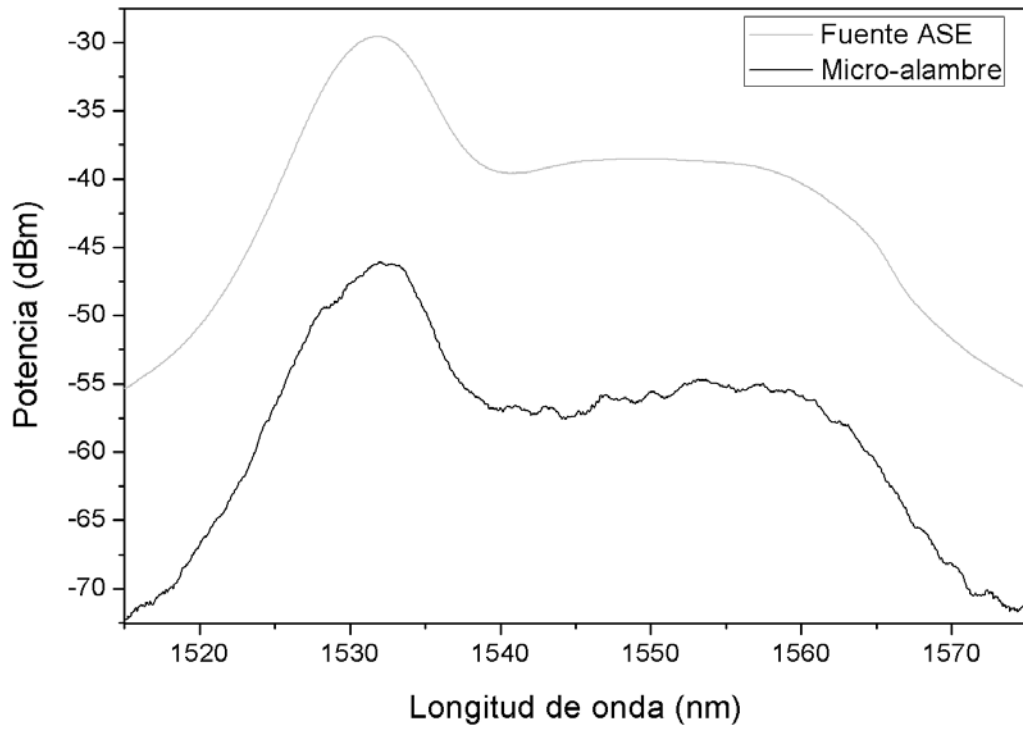


Figura 2.4. Espectro de pérdidas por inserción del microalambre de AsSe/PMMA.

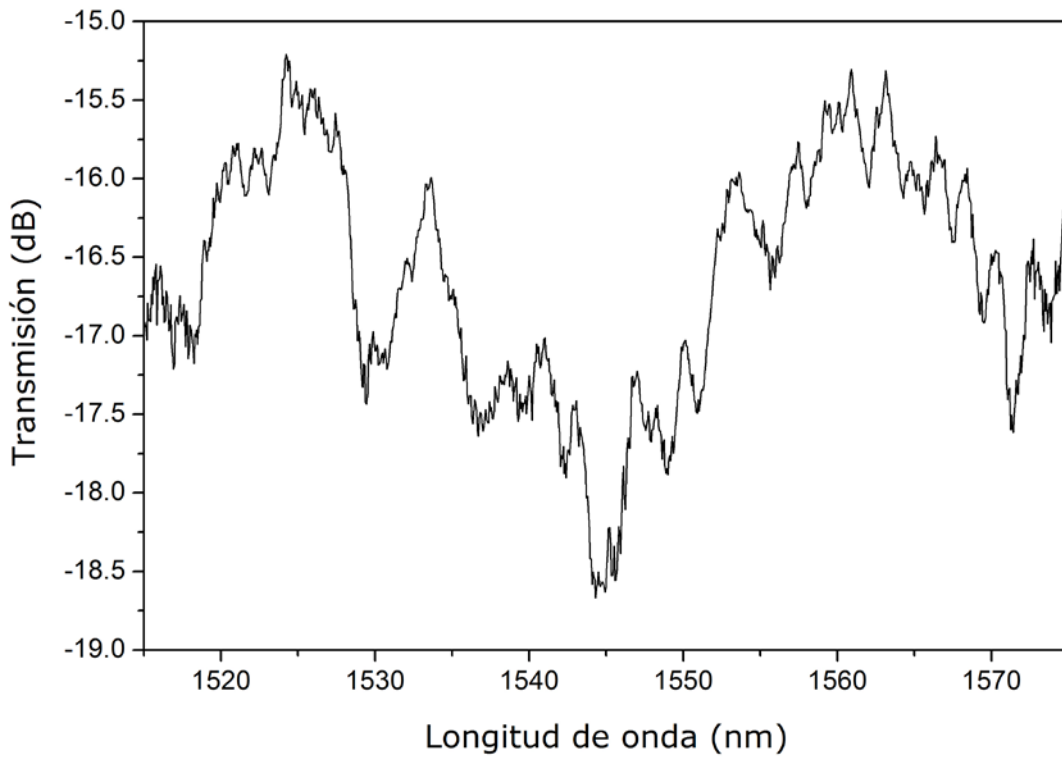


Figura 2.5. Pérdidas por inserción normalizados.

Otro aspecto importante que debe tomarse en cuenta es que la potencia máxima de entrada a los microalambres de AsSe/PMMA no puede ser mayor de 0 dBm, dado que una potencia mayor rompería la fibra. La razón de esto se debe al diámetro tan reducido de la fibra, que reduce considerablemente el umbral de daño del material y sólo permite manejar una cierta cantidad de potencia óptica. La suma de esta limitante y las grandes pérdidas que provoca el dispositivo dan como resultado una señal de salida de baja potencia, provocando restricciones para posibles aplicaciones que requieran una señal de mayor intensidad.

2.2.1 Absorción fotoinducida (*Photodarkening*)

La absorción fotoinducida o *photodarkening*, por su nombre en inglés, se refiere a la generación de portadores libres presentados en los materiales semiconductores al ser expuestos a una radiación luminosa [52, 53]. Esta liberación de portadores provoca una atenuación en la señal óptica transmitida, la cual depende de la intensidad del haz de luz y el tiempo de exposición. Este fenómeno se presenta para ciertas longitudes de onda características en donde el material absorbe la energía.

La generación de portadores libres se manifiesta en pares electrón-hueco, siendo generado por cada fotón absorbido por el material. La relación de portadores generada en la fibra debido al bombeo esta dada por la siguiente relación [54]:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\lambda_p P_p}{hc} - \frac{N}{\tau_c} \quad 2.2-1$$

donde hc/λ_p es la energía del fotón, P_p es la potencia del láser con el que se irradia la fibra en la sección de estudio, N es el número de pares electrón-hueco y τ_c es el tiempo de vida del portador. Cuando el movimiento de electrones en el material alcanza un estado estacionario, se puede definir el coeficiente de absorción por la relación:

$$\alpha_{FC} = \left(\frac{q^3 \lambda^2 N}{4\pi^2 c^3 \epsilon_0 n} \right) \left(\frac{1}{m_e^2 \mu_e} - \frac{1}{m_h^2 \mu_h} \right) \quad 2.2-2$$

donde α_{FC} es la absorción de portadores libres, q es la carga de los electrones, ϵ_0 es la permitividad en el vacío, c es la velocidad de la luz en el vacío, m_e/m_h es masa efectiva y μ_e/μ_h es la movilidad del portador libre; los subíndices e y h indican los electrones y huecos, respectivamente. De la ecuación 2.2-2 se puede observar que la absorción producida en las fibras de AsSe es directamente proporcional de la potencia del láser externo; de igual manera, esta atenuación depende directamente de la longitud de onda de la señal transmitida dentro de la fibra.

Dado que para la excitación del azopolímero empleado se utiliza un haz de luz láser verde (denominado láser de escritura), se caracterizaron los efectos que este tenía solamente en el microalambre de AsSe/PMMA. Para esto se empleó un láser Melles-Griot modelo 85 GHS 305 con una señal de salida linealmente polarizada en una longitud de onda de 532 nm, con un perfil de haz Gaussiano y cuya potencia de salida se podía controlar mediante software. Para llevar a cabo la caracterización, se buscó iluminar la mayor sección posible del microalambre, lo cual se logró utilizando una lente cilíndrica para obtener un haz de 28 X 1 mm sobre la fibra. Este haz de luz fue dirigido sobre la fibra empleando dos espejos planos (M1 y M2). La entrada de la fibra de AsSe/PMMA se conectó a una fuente ASE con un rango espectral de emisión de 1520 a 1570 nm. Posteriormente la señal de salida fue dividida con un acoplador 50% / 50% para monitorear la salida en un analizador de espectros óptico (OSA) y en un osciloscopio. Las variaciones temporales de la señal óptica a eléctrica se registraron con un foto detector con un ancho de banda de 11 GHz marca Agilent, modelo 11982A, visualizando la señal mediante un osciloscopio Agilent modelo 54621A, con ancho de banda de 600 MHz. El esquema del arreglo experimental es mostrado en la figura 2.6.

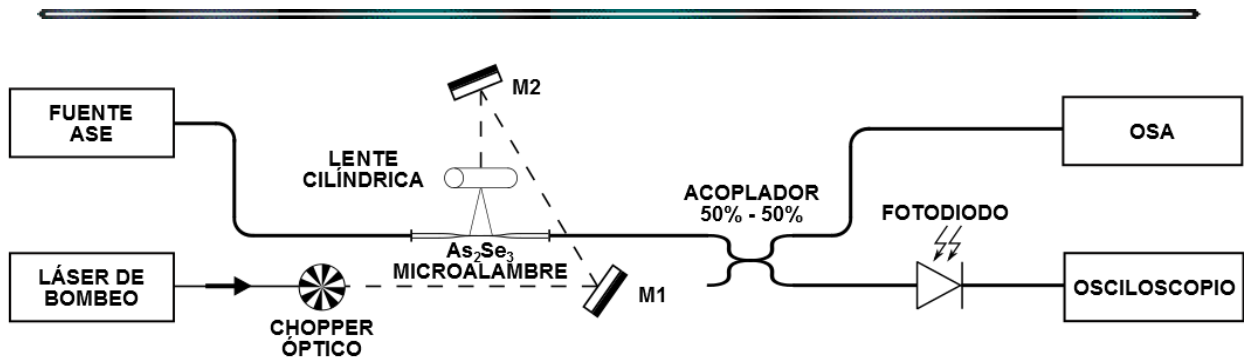


Figura 2.6. Arreglo experimental empleado para caracterizar absorción fotoinducida.

Los resultados obtenidos muestran que bajo los efectos de la radiación del láser de escritura se presenta una atenuación de la señal transmitida a través del microalambre. La atenuación observada se incrementa al aumentar la potencia de salida del láser verde, tal y como se observa en la figura 2.7, donde el espectro decae conforme la potencia radiada efectiva sobre la fibra es mayor. Esta atenuación presenta una dependencia tanto en longitud de onda como en potencia: para longitudes de onda mayores la atenuación es menor, conjuntamente al aumentar la potencia a longitudes de onda mayor la atenuación es menor (figura 2.8). La máxima atenuación registrada está al rededor de los 20 dB con una diferencia de 2.2 dB en el rango espectral observado. Esta diferencia es causada por el confinamiento modal presentado en el microalambre para las longitudes de onda manejadas. Dicho confinamiento del modo fundamental está dado por el número V , determinado por la expresión [12]:

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda_0} NA \quad 2.2-3$$

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad 2.2-4$$

siendo n_1 y n_2 los índices de refracción del núcleo y del revestimiento, respectivamente. Empleando una longitud de onda de 1520 nm el número V es de 7, y para 1565 nm es de 6.796.

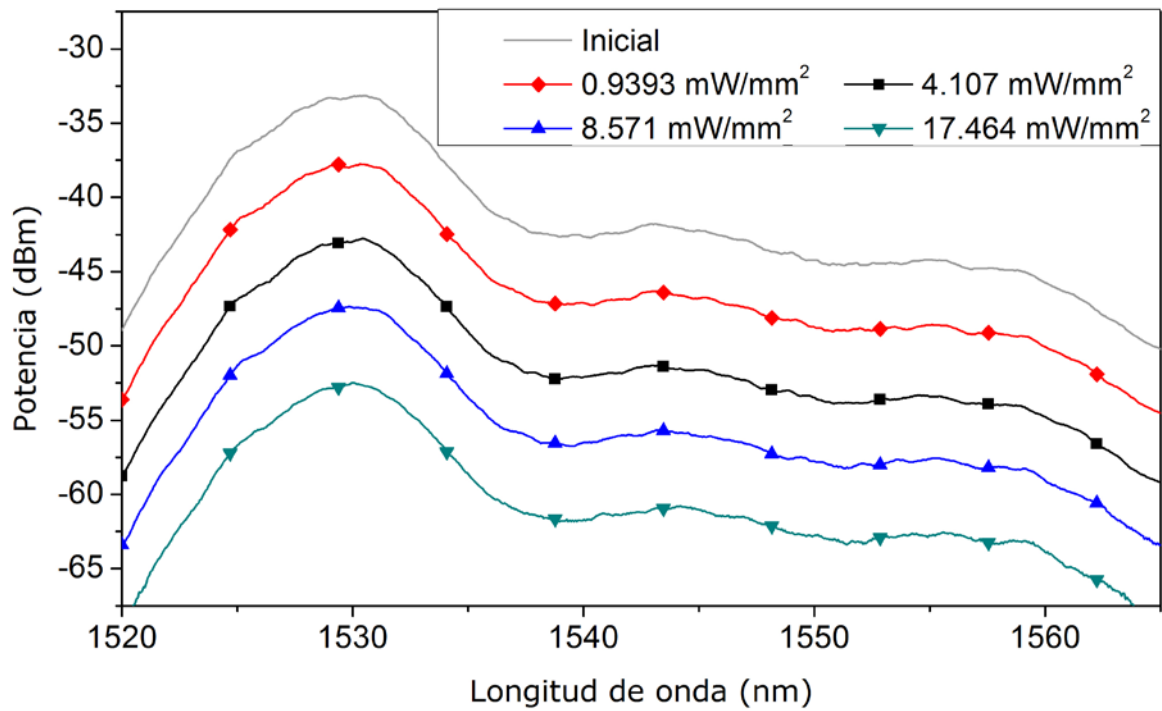


Figura 2.7. Atenuación presentada en el espectro de transmisión al radiar el microalambre de AsSe/PMMA.

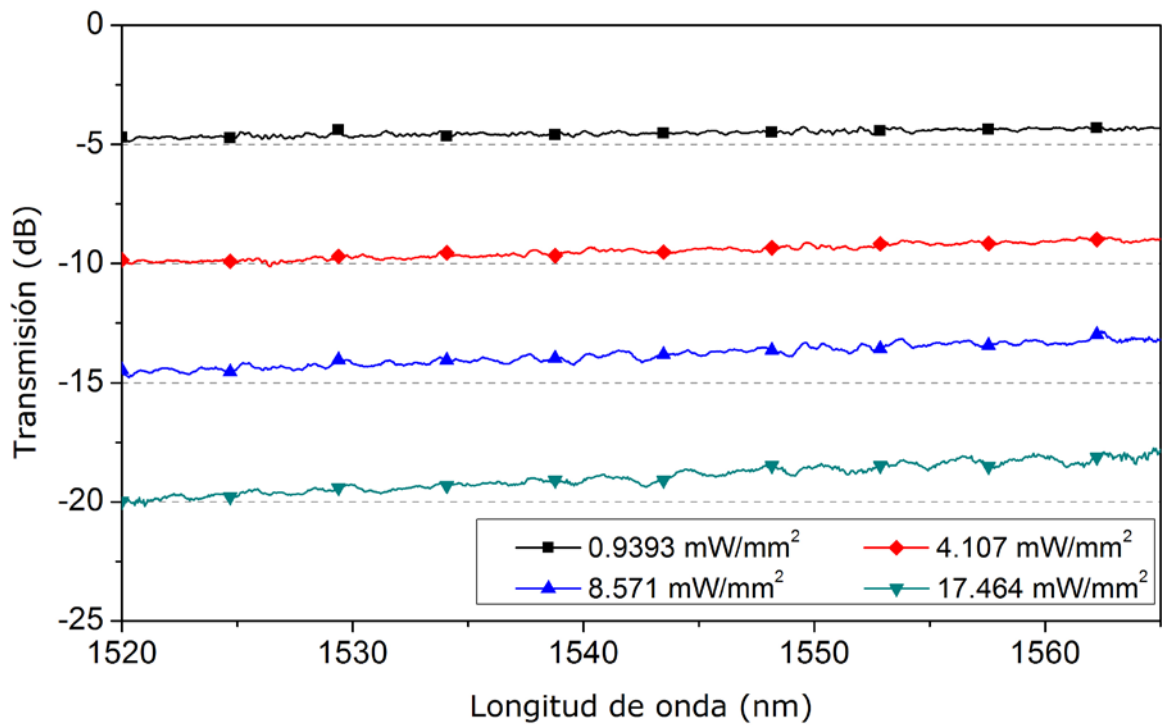


Figura 2.8. Espectro normalizado de atenuación al radiar el microalambre de AsSe/PMMA.

Otra característica analizada de la atenuación fotoinducida es el tiempo de respuesta. Para caracterizar esto se empleó un modulador espacial (*chopper*) óptico a la salida del láser de escritura empleando una frecuencia de 500 Hz con un ciclo de trabajo del 50%. Esta señal fue detectada mediante un fotodiodo y visualizada en el osciloscopio. Al radiar la muestra la señal se ve atenuada abruptamente, en ausencia de radiación externa la señal regresa a su valor original pero presentando una respuesta más lenta. La constante de tiempo de recuperación medida fue de $\tau_c=140 \mu s$, en el cual se alcanza un 63.21% del valor máximo de transmisión. En la figura 2.9 se muestra el comportamiento de la señal observada en el osciloscopio mostrando al mismo tiempo la duración de los pulsos de disparo del *chopper* como punto de comparación para los tiempos de respuesta. De esta manera se caracterizó la respuesta dinámica del efecto de atenuación fotoinducida.

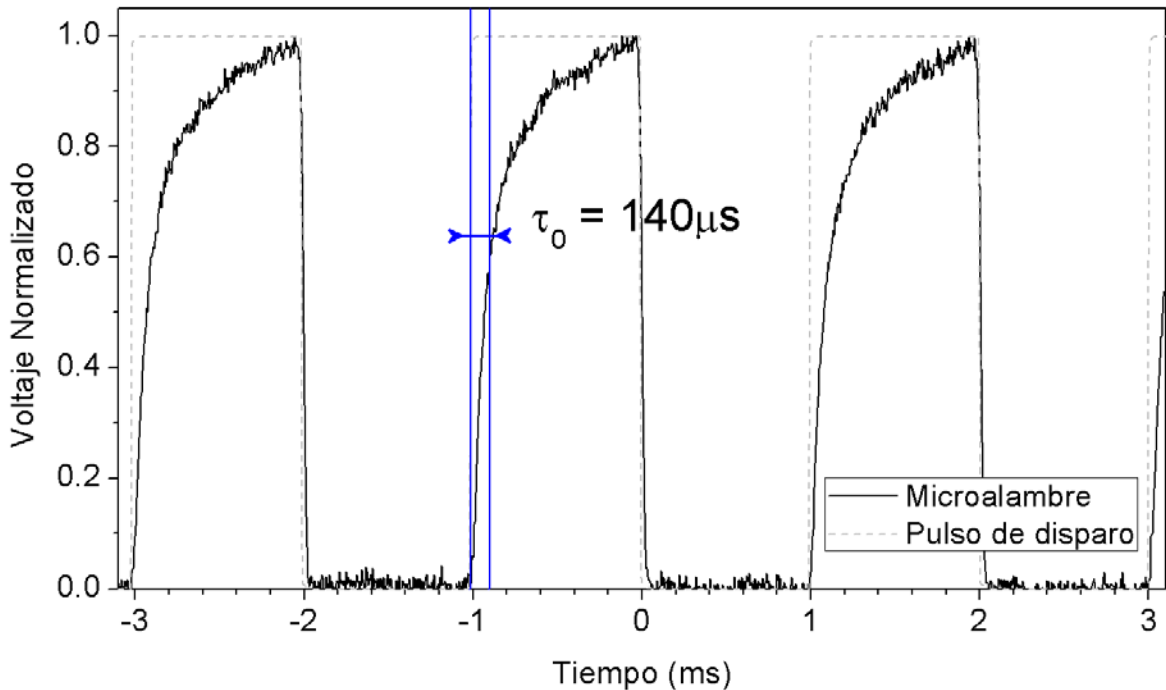


Figura 2.9. Respuesta dinámica de la atenuación fotoinducida.

Un último aspecto a mencionar acerca de los efectos causados en las fibras de AsSe al ser radiadas con el láser verde son las pérdidas inducidas. Dado que el

material presenta absorción en la longitud de onda de 532 nm, después de una larga exposición al láser de escritura el AsSe cambia su índice de refracción [55, 56]. Este efecto causa una atenuación remanente posterior a la radiación de la fibra con el láser de escritura, pudiéndose observar a lo largo de todo el rango espectral estudiado. Este efecto desaparece después de varias horas o días, teniendo una recuperación de la transmisión a su transmisión original.

Los efectos observados son sin duda relevantes para desarrollar dispositivos con azobencenos, pues la irradiación óptica requerida por estas moléculas podría generar pérdidas por *photodarkening*. En el siguiente capítulo se describirá el proceso de dopaje de estos dispositivos con moléculas de azobenceno y los efectos que estas causan en el espectro de transmisión al ser radiadas con el láser de escritura.

3. BIRREFRINGENCIA FOTOINDUCIDA EN DISPOSITIVOS DE FIBRA ÓPTICA DE VIDRIO CALCÓGENO RECUBIERTOS CON AZOPOLÍMERO

Los azopolímeros poseen la propiedad de generar birrefringencia bajo la influencia de una fuente de luz polarizada linealmente. El uso de este tipo de materiales para recubrir zonas adelgazadas de fibra óptica da paso a la creación de fibras ópticas con birrefringencia fotoinducida. Este efecto fotoinducido genera modificaciones en la estructura de la guía de onda, causando que la interacción de la onda evanescente de la fibra con la capa de azopolímero altere las propiedades de la señal transmitida. Este tipo de dispositivos son activados de manera óptica, brindando la alternativa de formar parte de sistemas controlados por medio de una señal luminosa externa.

En este capítulo se estudia el proceso de dopaje con azobenceno de los dispositivos fabricados con fibras ópticas de vidrio calcógeno recubiertas con PMMA. Se explica el mecanismo del método de dopaje y sus efectos sobre la matriz polimérica de PMMA. Así también, se estudia la respuesta de dichos dispositivos al ser radiados con una fuente de luz externa linealmente polarizada.

3.1 Dopaje del recubrimiento de PMMA

Para lograr la obtención de un recubrimiento azopolimérico sobre fibras de vidrio calcógeno, se utilizó el mismo recubrimiento de PMMA con el cual son fabricados los microalambres. La matriz polimérica de PMMA ha sido reportada anteriormente para contener moléculas de azobenceno y hacer películas delgadas

o preformas de azopolímero [8, 33]. Para este fin, la técnica empleada generalmente involucra usar un solvente para disolver pequeños cúmulos de PMMA, denominados *pellets*, junto con el azobenceno usando una relación de concentración deseada. El resultado de esto es una solución líquida que después es vaciada sobre moldes o depositada sobre un *spin coater*, evaporando mediante calor el solvente para posteriormente obtener el azopolímero en la forma deseada. Entre los solventes empleados comúnmente se encuentran el tetrahidrofurano (THF), tolueno y cloroformo.

La técnica descrita anteriormente no resulta compatible con el proceso de fabricación de los microalambres de AsSe/PMMA utilizados para este trabajo, debido a que los tubos de PMMA empleados como preformas se adquirirían ya fabricados. El empleo de la técnica de disolución de azobencenos con PMMA involucra un proceso de con muchas etapas, complicado y que requiere bastante tiempo de optimización. Aunado a esto, las altas temperaturas empleadas en la fabricación de los microalambres de AsSe/PMMA sobrepasan la temperatura de fusión de los azobencenos utilizados (160 – 162 °C para el DR1 y 122 - 129 °C para el DR13). El sobrepasar estas temperaturas trae como consecuencia una degradación de las moléculas de azobencenos, suprimiendo los efectos fotoinducidos deseados [57].

Como solución a este problema se estudió una manera alternativa para incorporar los azobencenos dentro del PMMA una vez fabricados los microalambres de AsSe/PMMA. La alternativa seleccionada consistió en introducir las moléculas de azobenceno dentro de los poros del PMMA, empleando un líquido como móvil para el azobenceno. Entre los requerimientos del líquido a emplear se necesitaba que este actuara como solvente para las moléculas de azobenceno, pero no para la matriz polimérica o en su defecto tener el menor impacto posible sobre el PMMA. El solvente empleado fue el metanol, que actúa como solvente para los azobencenos, pero presenta efectos mínimos de disolución en el PMMA requiriendo tiempos muy prolongados de exposición para disolverlo. Al sumergir PMMA en metanol el polímero lo absorbe y este se difunde dentro del material con velocidad

constante. Este proceso de difusión se mantiene hasta llegar a un límite en el cual el polímero se encuentra saturado completamente [58, 59]. Como consecuencia de la penetración del metanol dentro del PMMA, este presenta un hinchamiento incrementando sus dimensiones [60].

3.1.1 Solución metanol-azobenceno

La solución de metanol-azobenceno permite dopar la matriz polimérica con las moléculas de azobenceno. En azopolímeros formados bajo el sistema de huésped-anfitrión, la concentración de azobenceno requerida necesita ser muy elevada para lograr un efecto considerable, razón por la cual se empleó una solución saturada para el proceso de dopaje. Esta solución se obtuvo utilizando un volumen fijo de metanol al cual se agregó el polvo de azobenceno en cantidades pequeñas, revolviendo conjuntamente para disolver este último. La solución también se sometió por periodos de 15 minutos a un proceso de sonicación para asegurar la disolución completa de los polvos de azobenceno y que esta fuese uniforme. Este proceso se continuó hasta observar que había moléculas de azobenceno que ya no se disolvían. Se obtuvieron soluciones metanol-azobenceno en tres proporciones empleando los dos azobencenos con los que se contaba, Rojo Disperso 1 (DR1) y Rojo Disperso 13 (DR13):

- 2 mg/mL de metanol-DR1 (alta concentración)
- 5 mg/mL de metanol-DR1 (saturada)
- 10 mg/mL de metanol-DR13 (saturada)

Con la primera solución se realizó la caracterización completa del proceso de difusión dentro de muestras de PMMA y adicionalmente el dopaje de fibras de AsSe/PMMA. Con las dos soluciones restantes únicamente se observó que la difusión se presentara de manera similar, pero su principal utilización fue para el dopaje de las fibras. La razón de no usar las últimas dos soluciones para hacer una caracterización completa de la penetración de la solución dentro del PMMA, fue la gran similitud entre ambos compuestos azobenceicos. Al tener más

partículas de azobenceno se asegura que la concentración lograda debido a la penetración será al menos igual que en primer caso; esto porque hay una mayor cantidad de moléculas azobenceicas en un volumen fijo de metanol.

3.1.2 Caracterización del dopaje

Las características tales como la pureza, peso molecular y densidad de las muestras de PMMA con las que se contaba eran desconocidas. Por esta razón, se tuvo que realizar la caracterización de la difusión de la solución metanol-azobenceno dentro del PMMA. Para este fin se emplearon cilindros sólidos de 6.35 mm de diámetro del mismo PMMA con el cual se fabrican los tubos capilares utilizados para recubrir las fibras de AsSe.

El proceso de caracterización del dopaje consistió en introducir en varios recipientes cerrados un tramo de cada una de las muestras de PMMA (cilindros sólidos), agregándoles posteriormente un volumen igual de la solución metanol-DR1. Las muestras fueron cortadas procurando obtener dimensiones lo más cercanas posibles entre si, de 20.5 mm de longitud, para tener las mismas condiciones durante el experimento. Cada muestra se dejó en inmersión por distintos periodos de tiempo; después se cortaron y pulieron las puntas de las muestras para medir la distancia de penetración de la solución dentro de cada muestra. Los tiempos de inmersión fueron de 1, 2, 4, 8, 24 y 48 horas.

Para llevar a cabo la medición de la distancia de penetración, se tuvo que pulir cada punta de las muestras con lijas de distinto tamaño de grano, hasta lograr eliminar la mayor cantidad de imperfecciones y permitir una buena imagen. Para asegurar que las superficies de ambos extremos de las muestras fueran perpendiculares al eje longitudinal, los cilindros se montaron en un taladro de banco donde fueron lijados y pulidos; con este procedimiento se logró reducir el error de paralaje en la medición de penetración de la solución. Tanto los tubos adelgazados como los capilares presentaron dificultad para ser pulidos a causa de su diámetro reducido, los cuales eran de 2.47 mm y 1.84 mm en el exterior

respectivamente. Sin embargo, en ellos se pudo observar muy bien como la solución penetraba por la pared exterior, y en el caso de los capilares también por la pared interior. En la figura 3.1 se puede apreciar una foto de las muestras de PMMA dopadas y ya pulidas.



Figura 3.1. Cilindros sólidos de PMMA dopados con DR1: a) vista de cortes transversales de las muestras y b) vista de la sección longitudinal de las muestras.

La medición de la distancia de penetración se realizó visualizando en un microscopio óptico los cilindros de PMMA dopados y midiendo la distancia pintada de rojo debido al DR1. Para determinar la distancia de penetración se tomaron fotografías de las zonas de interés y después fueron analizadas mediante el software ImageJ, el cual brinda la posibilidad de realizar análisis de imágenes. Como referencia se empleó una escala que poseía el ocular del microscopio y se determinó la equivalencia de cada división empleando como patrón la foto de una fibra monomodo de dióxido de silicio, la cual posee $125 \mu\text{m}$ de diámetro como estándar de fabricación (figura 3.2). La medida resultante de cada división fue de $13 \mu\text{m}$, dato con lo cual se pudo medir cada una de las muestras en 4 puntos diferentes para determinar las penetraciones mínima y máxima. Los resultados de las mediciones realizadas se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Mediciones de propagación de metanol-DR1 dentro de PMMA.

Tiempo [horas]	Longitud mínima dopada [μm]	Longitud máxima dopada [μm]
1	11	14
2	24	28
4	44	45
8	96	101
24	300	315
48	570	607

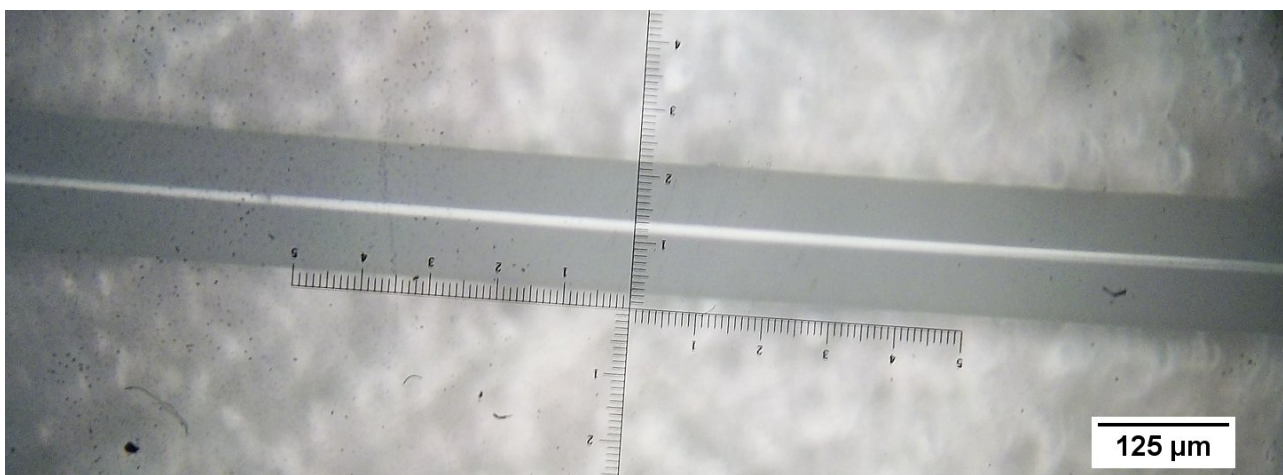


Figura 3.2. Fotografía de fibra monomodal de sílice (SiO_2) empleada como referencia.

Una consecuencia del método de dopaje utilizado es que las muestras presentaron un incremento en sus dimensiones. Es decir, se hinchan a causa de la penetración de la solución metanol-DR1. El diámetro original de las muestras era aproximadamente de 6.35 mm, pero debido a que el material presentaba características no uniformes, este hinchamiento no pudo ser medido de manera precisa. En todos los casos, los cilindros de PMMA presentaban elipticidad en su sección transversal; en algunos casos la diferencia de diámetros medida alcanzaba hasta 125 μm aproximadamente dentro de la misma muestra. De igual manera, a lo largo de la misma muestra cilíndrica se podían encontrar distintas medidas en el diámetro, variando hasta en 50 μm en una longitud de 1 cm. Sin embargo, al comparar las muestras antes y después de dopar, se puede estimar que del

diámetro dopado aproximadamente entre el 20% y 25% correspondían a un incremento de las dimensiones de la muestra, dato que concuerda con lo reportado en trabajos previos [58, 60].

Con las imágenes adquiridas pudo comprobarse que la difusión de la solución dentro de las muestras se realiza de manera constante. Las mediciones realizadas de profundidad de penetración de la solución en el caso de distintos tiempos de inmersión, permitieron calcular una velocidad de difusión promedio de $2.06 \mu\text{m/s}$ (figura 3.3). Esta velocidad fue constante para todas las muestras inmersas durante distintos tiempos, concordando con caracterizaciones realizadas anteriormente para determinar la propagación de metanol en una matriz polimérica de PMMA [58]. En la figura 3.4 se pueden apreciar fotos para las muestras dopadas sometidas durante varias horas al proceso de dopaje.

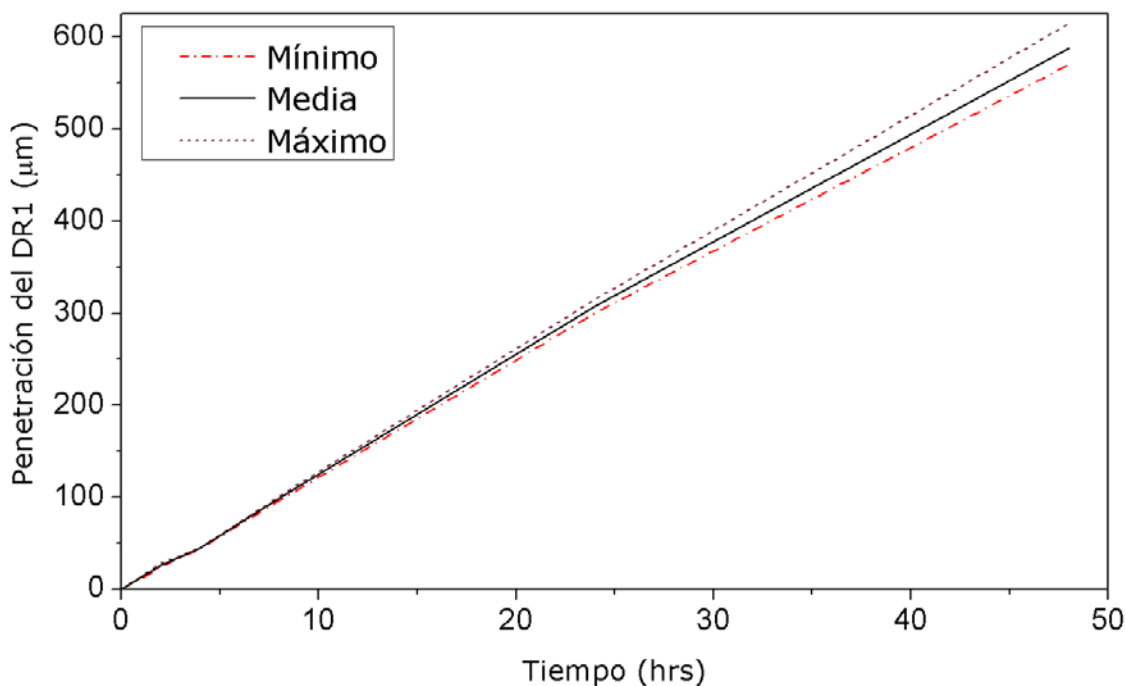


Figura 3.3. Velocidad de penetración de metanol-DR1 dentro del PMMA.

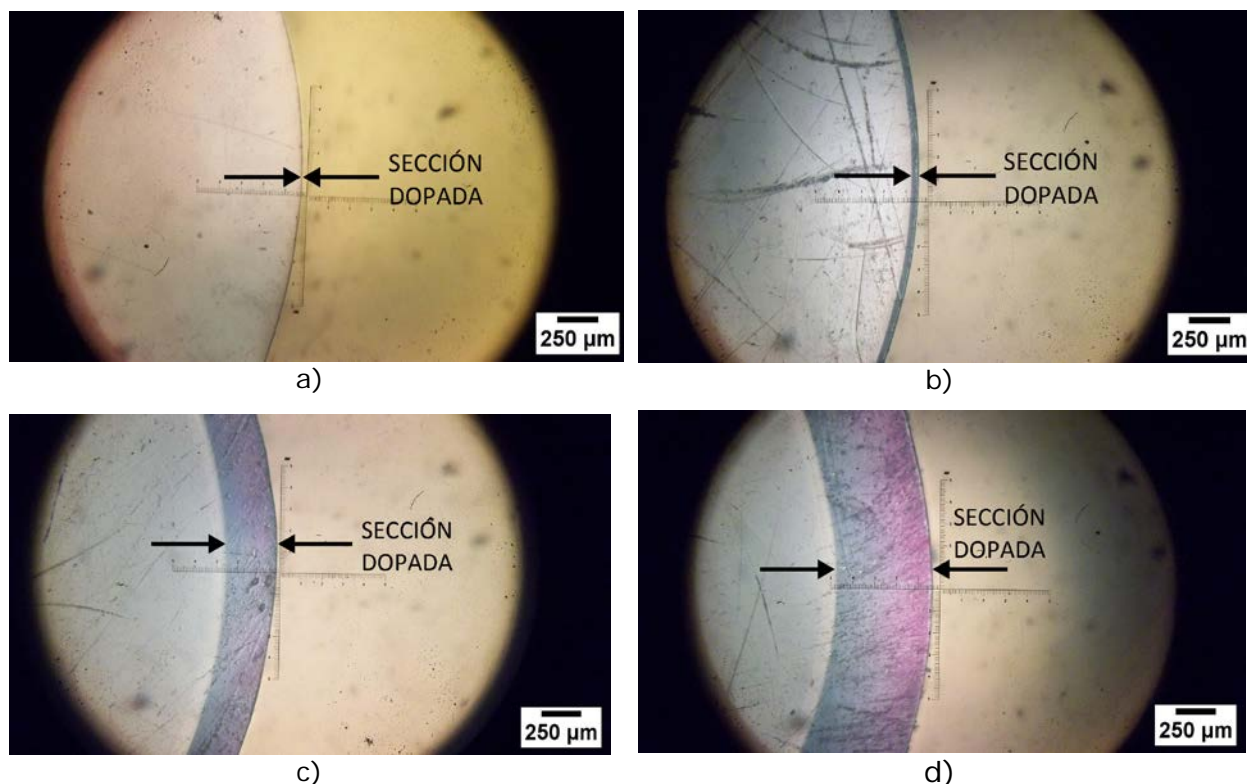


Figura 3.4. Fotografías del dopaje de PMMA a distintos tiempos: a) 1 hora, b) 4 horas, c) 24 horas y d) 48 horas.

Mediante la visualización de las imágenes obtenidas durante el proceso de dopaje, es posible también establecer que la concentración de la solución varía en función de la profundidad de penetración. Aunque no fue posible cuantificar la cantidad de azobenceno a lo largo del eje radial de las muestras, las imágenes muestran que la parte exterior contiene más moléculas de azobenceno, mientras que la región central del cilindro presenta una menor concentración. Esto no puede apreciarse de manera clara en las fotografías de la figura 3.4, pero al visualizar una muestra con menor longitud (esto es, una rebanada) se puede apreciar mejor esta distribución (figura 3.5). Esto concuerda con los resultados típicos de problemas de difusión y para lograr uniformidad del dopaje, se tiene que dejar el tiempo suficiente para lograr una penetración dentro de toda la muestra de PMMA. De esta manera, los resultados de esta visualización muestran que la concentración de azobenceno varía de manera gradual en la dirección radial de las muestras cilíndricas.

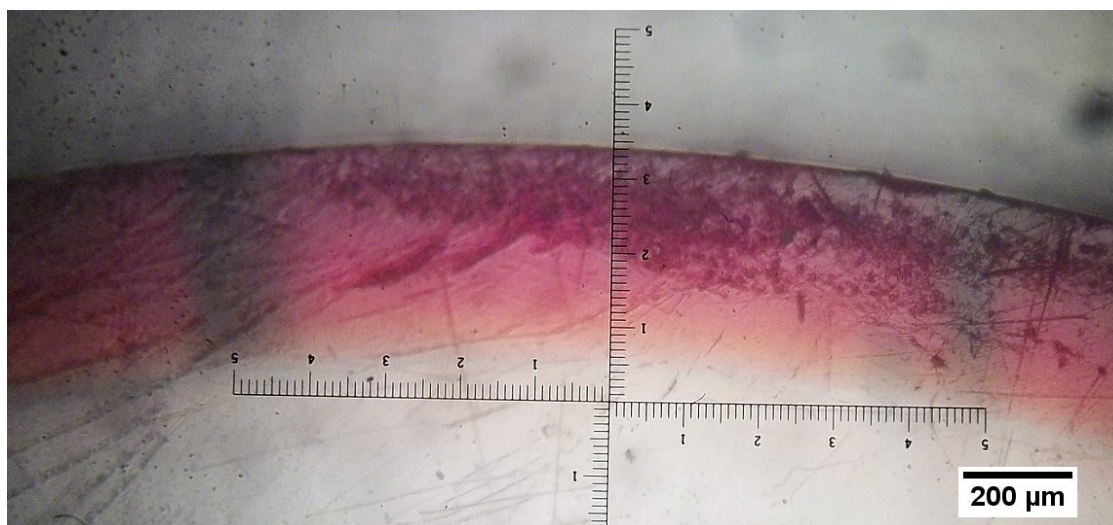


Figura 3.5. Frente de propagación del dopaje de solución metanol-DR1.

3.1.3 Dopaje de fibras

El dopaje de los microalambres de AsSe/PMMA se realizó sumergiéndolos en soluciones de metanol-DR1 y metanol-DR13. El uso de esta técnica representó un reto debido a la fragilidad de los microalambres, pues el simple hecho de removerlos de la máquina con la cual se fabrican involucra un riesgo elevado de ruptura. En el laboratorio donde eran fabricados estos microalambres, se empleaba un soporte ajustable en tres dimensiones (platina XYZ) para retirar los microlambres de la máquina; este soporte cuenta con dos brazos sobre los cuales reposa la fibra y se fija mediante presión utilizando unos imanes. Generalmente el microalambre es empleado montado sobre este soporte, pero esto no presentaba una opción viable para introducir la fibra en la solución y poder realizar el dopaje.

Para resolver este problema se fabricaron unos contenedores para las fibras, los cuales tuvieron doble función: servir de soportes y también como recipiente para sumergir la fibra adelgazada en la solución de metanol-azobenceno. Estos contenedores fueron fabricados con una placa de nylon negro de media pulgada de grueso. El maquinado de esta pieza consistió en remover el material para lograr una cavidad amplia y profunda donde se depositaría la

solución dopante, dejando de igual manera ranuras en los extremos para permitir el paso y fijación de la fibra. Para sellar los extremos se utilizó un pegamento epóxico depositándolo y rellenando las ranuras por donde pasaba la fibra. Finalmente, se obtenía la fibra empaquetada en una cavidad en la cual podía ser dopada, transportada y usada para experimentos con otro equipo (figura 3.6). Otra ventaja de estos contenedores es que la fibra quedaba completamente fija, tensa y sin deformarse después de fabricarla, lo cual es vital para minimizar deformaciones mecánicas y no alterar la polarización de la señal transmitida a través de los dispositivos. Los planos de los contenedores fabricados se encuentran en el apéndice F.



Figura 3.6. Contenedor para manejo y dopaje de microalambres de AsSe/PMMA.

Las cavidades de los contenedores contaban en una de sus paredes una pequeña cavidad adicional. La función de esta cavidad es brindar un fácil acceso para introducir una pipeta y poder hacer tanto la inserción como el retiro de la solución dopante, esto sin acercarse mucho a la fibra y reducir el riesgo de ruptura. Una vez fijada la fibra y que se introducía la solución para doparla, la superficie era cubierta con vidrio y cinta adhesiva. Esta última medida fue tomada para evitar la evaporación del metanol, mantener constante la concentración y procurar que la fibra siempre estuviera sumergida en la solución. Una vez transcurrido el tiempo de dopaje se retiraban los vidrios y se procedía a retirar la solución.

Una consecuencia del proceso de dopaje al emplear soluciones saturadas, fue la creación de cúmulos de azobenceno. Estos se manifestaron como formaciones cristalinas sobre la superficie de la fibra; es decir, se formaron agregados de las partículas de azobenceno (figura 3.7). Estos agregados formados sobre las fibras ópticas se producían aleatoriamente y de manera no uniforme, lo cual era un efecto no deseado. Para observar su comportamiento se realizó la iluminación de estos cúmulos con un el láser de escritura linealmente polarizado, efecto que se describe en la siguiente sección. Para remover los agregados se procedió a insertar de manera rápida metanol puro y así disolverlos; este proceso se realizó de la manera más rápida posible tardando de 5 a 10 segundos, para evitar disolver los azobencenos ya introducidos en el PMMA.

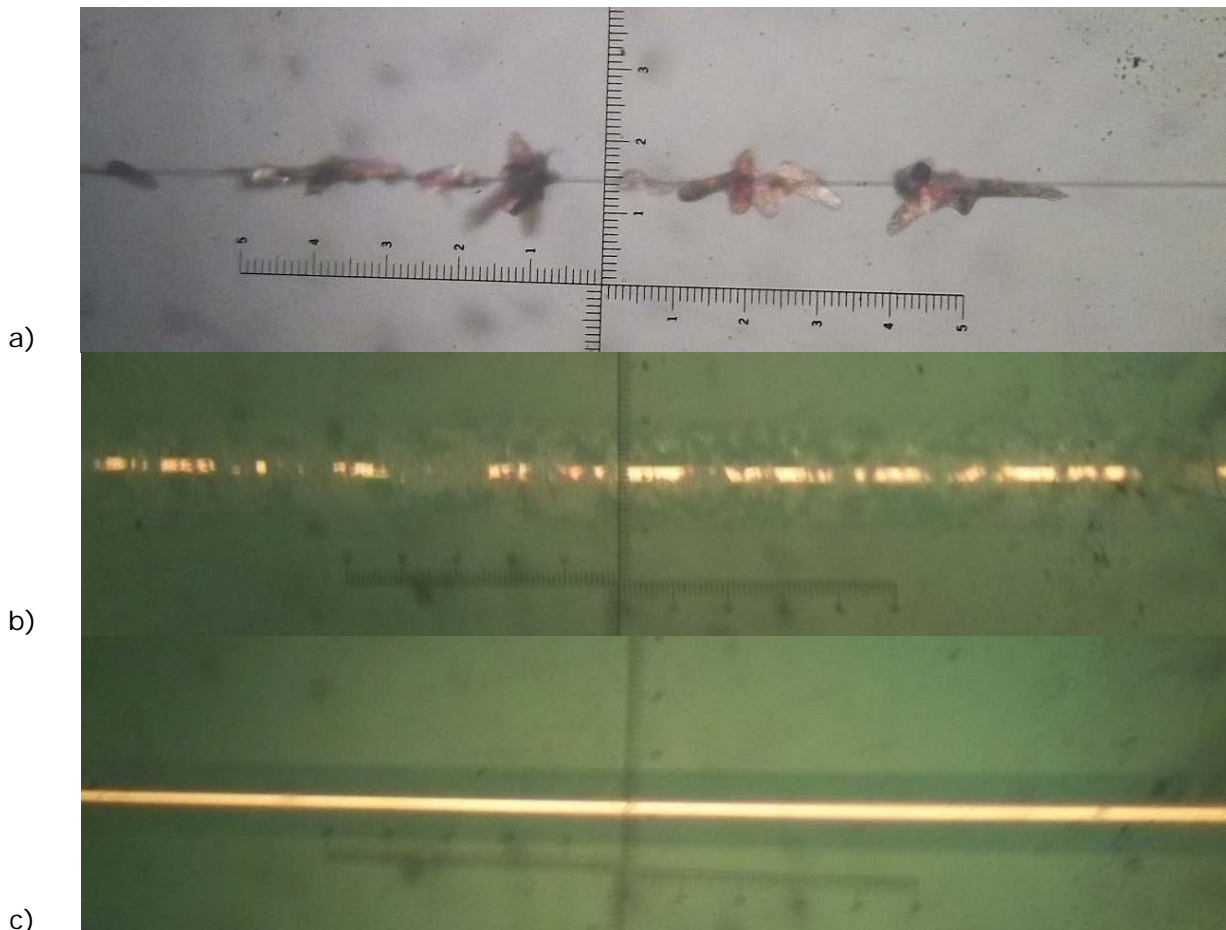


Figura 3.7. Formación de agregados azobenceicos sobre fibras ópticas: a) sobre la sección de microalambre, b) sobre la sección de transición y c) después de remover los agregados sobre la sección de transición.

Todo el proceso de dopaje se realizó sin mover o deformar la fibra, de tal manera que no se afectó la polarización de la señal óptica. Esto permitió monitorear la señal óptica transmitida a través de los dispositivos antes, durante y después del dopaje. Los tiempos de inmersión que se utilizaron fueron de a 1.5 a 2 veces mayores a los tiempos de difusión obtenidos durante la caracterización del proceso de dopaje (ver sección anterior). La razón de emplear una mayor cantidad de tiempo fue para asegurar un dopaje completo y uniforme del PMMA.

3.2. Análisis de la señal óptica, excitación y respuesta fotoinducida

La señal óptica transmitida a través de los dispositivos fue monitoreada antes, durante y después, tanto del proceso de dopaje, como del proceso de iluminación. Los cambios observados se registraron en el espectro de transmisión, utilizando también un arreglo de polarizadores cruzados para observar los cambios en birrefringencia. Para obtener una mejor comparación de los cambios en polarización generados durante los procesos de dopaje e iluminación, se analizaron en total ocho posiciones fijas para el controlador de polarización. El monitoreo de la señal óptica durante el proceso de dopaje permitió registrar las pérdidas y cambios en el espectro de transmisión debidos a la inserción de moléculas de azobenceno dentro de la matriz de PMMA. Los cambios observados durante el proceso de iluminación mediante el láser de escritura permitieron monitorear los cambios en birrefringencia (esto es, la birrefringencia fotoinducida). Estos aspectos serán analizados a detalle en las siguientes secciones.

3.2.1 Cambios en el espectro del proceso de dopaje

El proceso de dopaje en las fibras de AsSe/PMMA se realizó usando dos soluciones: metanol-DR1 y metanol-DR13. Ambas soluciones fueron empleadas para dopar los dispositivos de fibra de AsSe/PMMA y de esta manera comparar los efectos fotoinducidos de ambos tipos de azobenceno. En la literatura se reporta una mayor respuesta por parte de las moléculas de DR13 [40]. En esta sección se

analizarán los efectos en el espectro de transmisión de los dispositivos de fibra dopados con ambas soluciones.

En el caso del dopaje realizado con ambas soluciones, se observó que al momento de realizar el dopaje, el líquido provocaba pérdidas por atenuación en el espectro de transmisión debido al cambio de índice de refracción. Previamente a esto se obtuvieron los espectros de transmisión para las posiciones fijas del controlador de polarización, obteniendo distintos estados de polarización que representan el punto de partida (esto es, los espectros de referencia) para realizar comparaciones con los pasos subsecuentes. Al presentarse la formación de agregados sobre las fibras, la presión generada por estos cúmulos de azobenceno provocaba efectos de atenuación y birrefringencia en la fibra, tal como se puede observar en la figura 3.8.

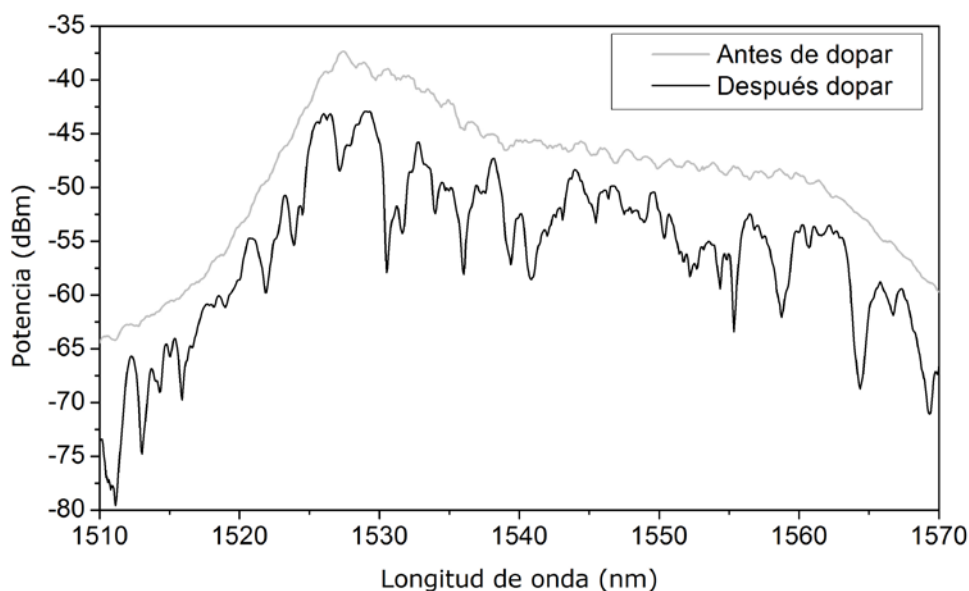
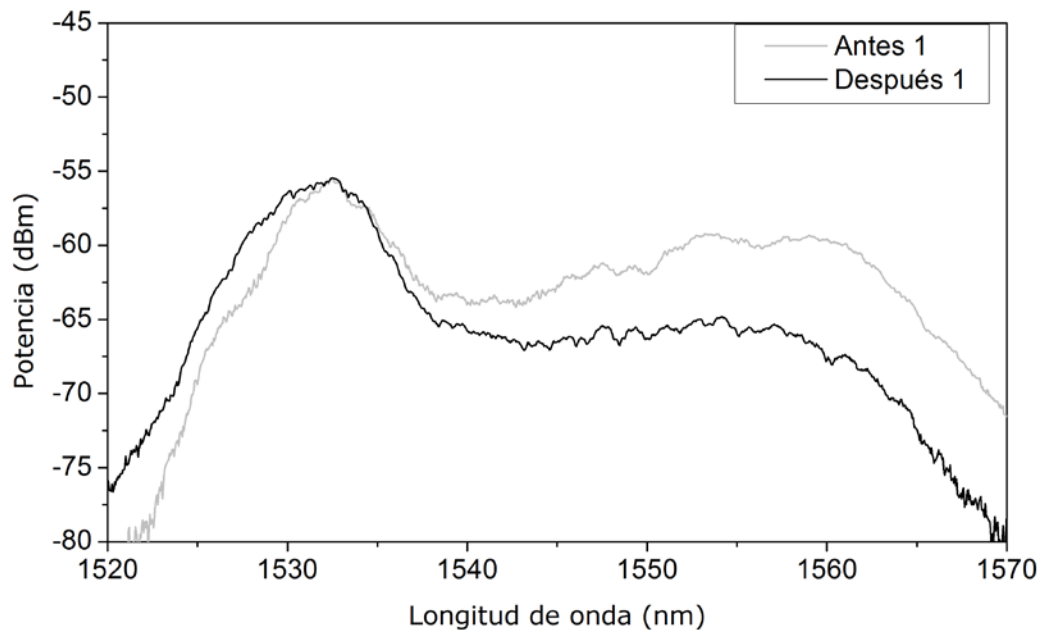


Figura 3.8. Atenuación generada en el proceso de dopaje durante la inmersión de la fibra en la solución metanol-azobenceno en presencia de cúmulos de azobenceno sobre la superficie de las fibras. La birrefringencia es generada por los cúmulos de azobenceno (ver figura 3.7).

Al realizar el proceso de dopaje y no obtener cúmulos de azobenceno en la superficie de las fibras, el espectro de transmisión mostró cierta atenuación

causada por el cambio del índice de refracción del PMMA (figura 3.9). La comparación de los espectros de transmisión obtenida para las diferentes posiciones del controlador de polarización permitió determinar que la atenuación generada por la inserción de moléculas de azobenceno es dependiente de la polarización. Las magnitudes de la atenuación generada debido al dopaje alcanzaron hasta 20 dB, sin embargo, para cada polarización este valor fue diferente. Los efectos de esta atenuación no fueron analizados fuera del arreglo experimental con polarizadores cruzados para no mover los dispositivos, evitando de esta manera alterar la polarización de la señal y perder las referencias con todos los pasos experimentales realizados. De igual manera se realizó un barrido por múltiples posiciones del controlador de polarización buscando en el espectro de transmisión la formación de lóbulos que indicasen birrefringencia. El resultado obtenido al analizar varios estados de polarización después del proceso dopaje fue que no se detectaron efectos de birrefringencia significativos adicionales a la birrefringencia propia del arreglo. Las respuestas y fenómenos observados hasta este punto mostraron el mismo comportamiento empleando soluciones con DR1 y DR13 para dopar el PMMA.



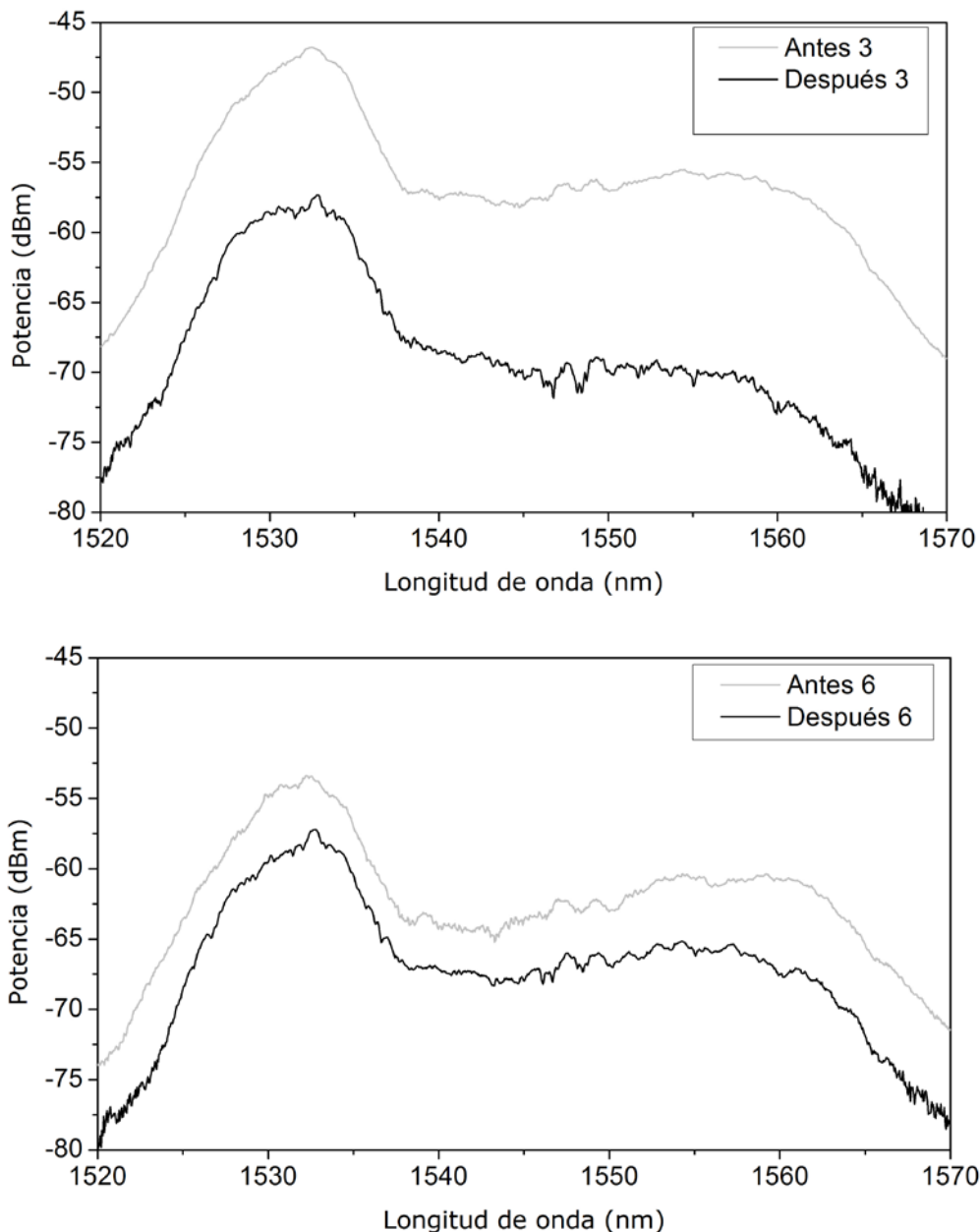


Figura 3.9. Cambios en el espectro de transmisión por dopaje con azobenceno para distintas posiciones del controlador de polarización. Las figuras muestran los espectros registrados antes y después del dopaje.

3.2.2 Cambios en el espectro mediante iluminación externa

Los efectos de la iluminación sobre los dispositivos de fibra óptica con el haz de escritura se registraron haciendo uso de un láser verde con una longitud de

onda de $\lambda=532$ nm, polarizado linealmente. El láser utilizado en este experimento fue el mismo empleado para la generación de la absorción fotoinducida, donde a diferencia del otro experimento, se emplearon potencias menores para evitar tanto el daño en el material de la fibra (AsSe) como la degradación de los azobencenos [57]. La iluminación del microalambre se inició con la mínima potencia de salida del láser de escritura, incrementándose hasta poder observar una respuesta en el espectro de transmisión. Este haz láser ya poseía una polarización lineal, razón por lo cual no fue necesario emplear un polarizador lineal a la salida del mismo. El haz de luz fue dirigido mediante espejos hacia la muestra y posteriormente se expandió utilizando una lente cilíndrica para abarcar una mayor región de la fibra.

En primer lugar, se probaron los dispositivos dopados con DR1 debido que en trabajos anteriores se ha demostrado su funcionamiento generando birrefringencia al iluminar con un haz de luz linealmente polarizado [36, 40]. La iluminación con el láser de escritura se realizó al tener los cúmulos de azobenceno sobre la fibra de AsSe/PMMA. En este caso, la potencia con la cual se registró un cambio fue de 115 mW. Además, el haz láser fue enfocado sobre una sección longitudinal de 3 cm de la fibra justo en la sección del microalambre. La respuesta generada se puede observar en la figura 3.10, donde se distingue claramente el cambio en la separación de los lóbulos registrados en el espectro. Como puede verse, la separación entre los picos (o equivalentemente, entre los lóbulos) del espectro es menor después de que el dispositivo se ilumina con el láser de escritura. Este fenómeno observado en el espectro de transmisión es debido a la birrefringencia causada por la reorientación de las moléculas de azobenceno. El tiempo de radiación fue de aproximadamente 5 minutos, pero la aparición de los lóbulos se presentó en un tiempo de 2 minutos aproximadamente.

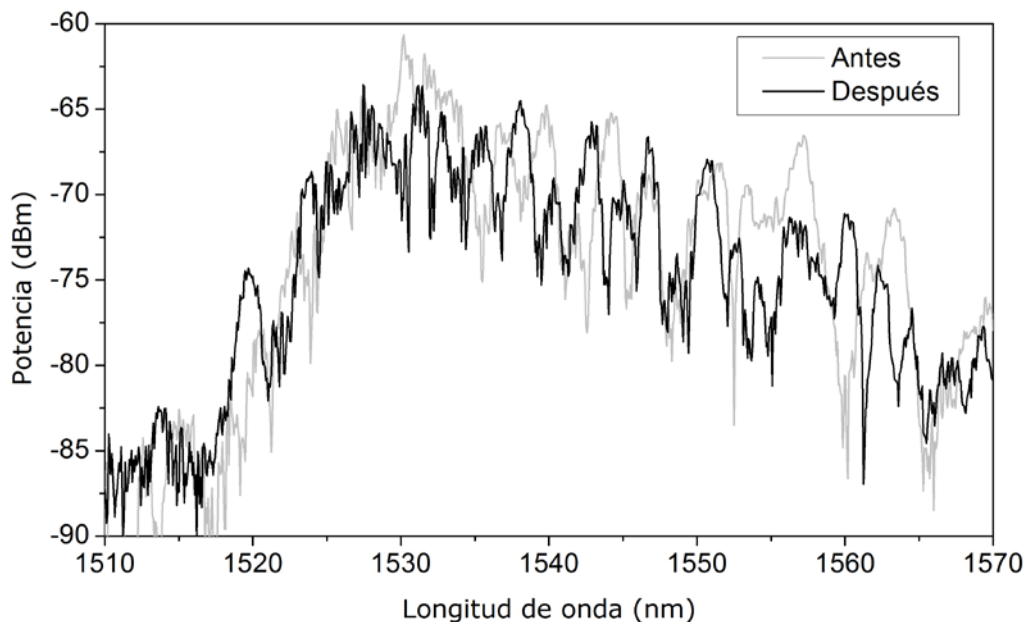


Figura 3.10. Birrefringencia generada en la fibra debido a la iluminación de los cúmulos de azobenceno formados sobre la fibra.

La birrefringencia fotoinducida registrada con estos dispositivos fue bastante evidente; sin embargo, la formación de los cúmulos no era controlada. Por esta razón, fue necesario buscar cuantificar solamente el efecto provocado por las moléculas de DR1 insertadas dentro de la matriz de PMMA. Aunque los efectos causados con los cúmulos no fueron controlados, lo que se logró con estos experimentos fue el observar que efectivamente había una respuesta de las moléculas de azobenceno al ser radiadas con el láser de escritura. Además, estos resultados permitieron determinar una potencia base para emplear el láser de escritura en los experimentos posteriores. Este efecto con los cúmulos también fue observado empleando la solución con DR13.

Para observar los efectos de la birrefringencia fotoinducida sin los cúmulos de azobenceno, el proceso de iluminación tuvo una duración de 10 minutos. En el caso de las fibras dopadas con el azobenceno DR1 nunca se presentó una birrefringencia significativa al ser radiadas; inclusive analizando varios estados de polarización de la señal de entrada no se pudo apreciar algún cambio significativo. Este resultado se adjudica a la baja magnitud de la respuesta de este azobenceno,

así como a la baja concentración usada con respecto a las altas concentraciones comúnmente empleadas para obtener una respuesta significativa con este tipo de azopolímeros [8, 37].

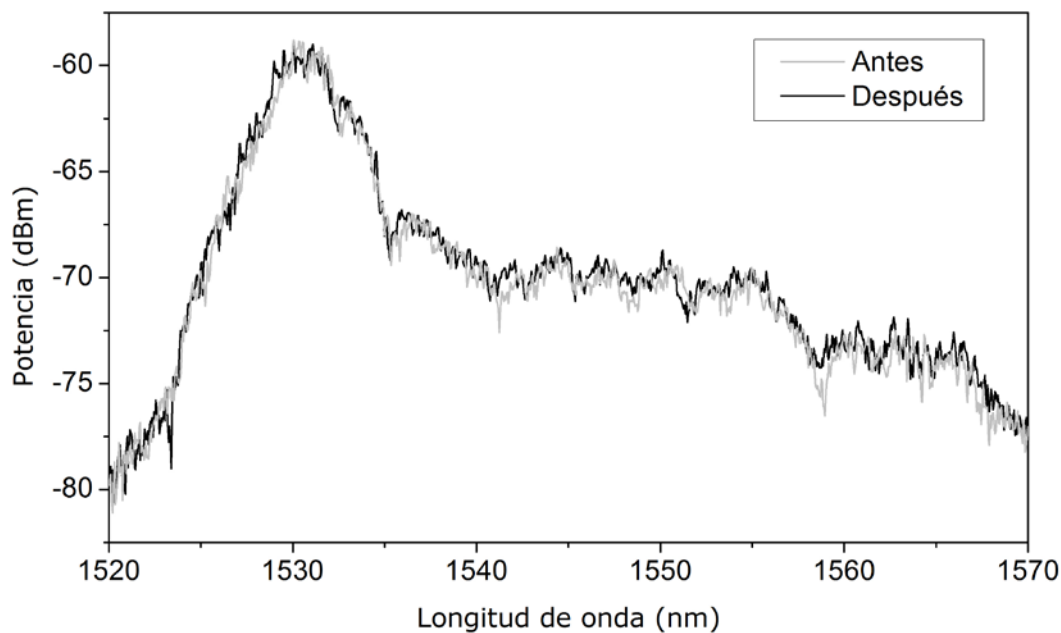


Figura 3.11. Birrefringencia generada en la fibra dopada con DR1. Los espectros muestran la transmisión antes y después de la iluminación del dispositivo con el láser de escritura.

Para las fibras dopadas con DR13 se procedió a iluminar la sección del microalambre de la misma manera que con las fibras dopadas con DR1. El resultado en este caso fue la aparición de lóbulos en el espectro de transmisión. El tiempo de iluminación sobre la fibra fue igualmente de 10 minutos, adquiriendo los espectros de transmisión a distintos instantes de tiempo para registrar la evolución de los cambios fotoinducidos. La aparición de los valles se comenzó a ver a los 10 segundos de iluminar la muestra, pero una definición mejor se observó hasta los 30 segundos del proceso de iluminación. Transcurridos los 10 minutos de iluminación, los valles observados poseían una mayor definición; estos cambios se ilustran en la figura 3.12. En la figura 3.12 se puede apreciar que la atenuación generada por la radiación del láser de escritura afecta el espectro de transmisión de forma más o menos uniforme, de tal manera que no pueden distinguirse fácilmente los lóbulos característicos de la birrefringencia fotoinducida.

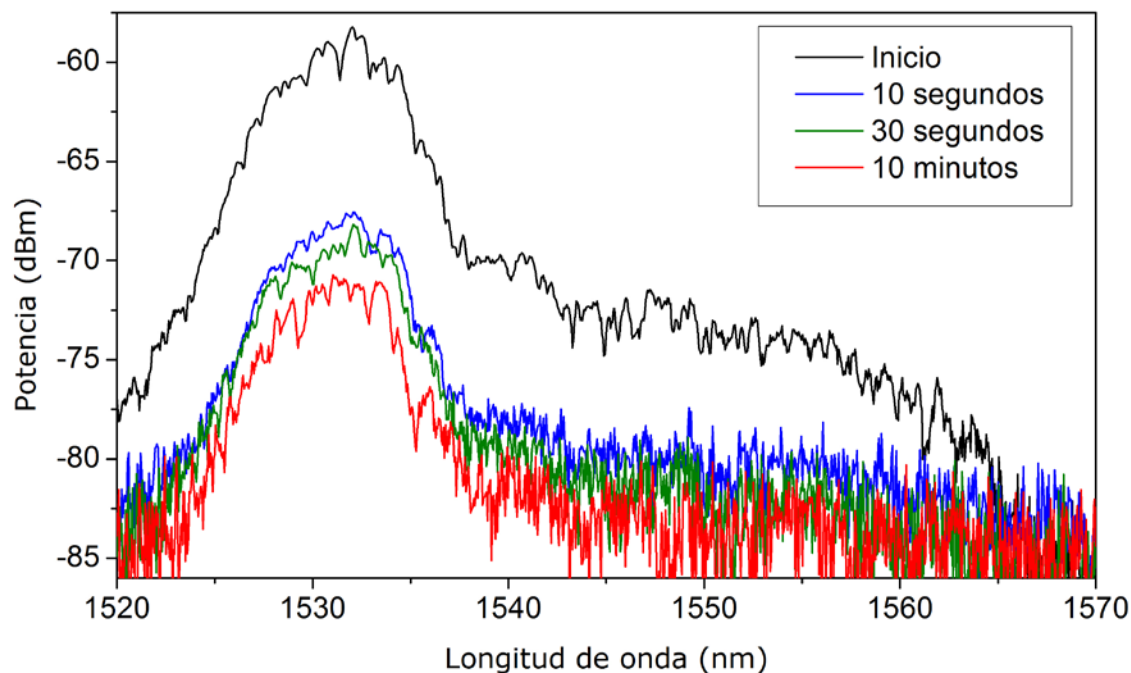


Figura 3.12. Evolución en el tiempo de la birrefringencia fotoinducida en la fibra dopada con DR13 al ser radiada con el láser de escritura.

Posteriormente, el láser de escritura fue apagado y el espectro de transmisión fue monitoreado por 10 minutos para observar su comportamiento después de haber radiado el dispositivo. Lo primero que puede destacarse de estas observaciones es que el espectro dejó de registrar pérdidas debido a la absorción fotoinducida, obteniendo un espectro de transmisión con amplitud similar a la inicial, pero con una mayor atenuación en ciertas regiones espectrales, manifestándose en la formación de lóbulos originados por la birrefringencia (Figura 3.13). En el transcurso de los 10 minutos posteriores a la iluminación externa, no se registró ningún cambio significativo en los lóbulos del espectro. De acuerdo con la descripción de la fotoisomerización, un pequeño porcentaje de las moléculas retornan a su estado original; sin embargo, en estos experimentos no se registraron cambios significativos después de apagar el láser de escritura.

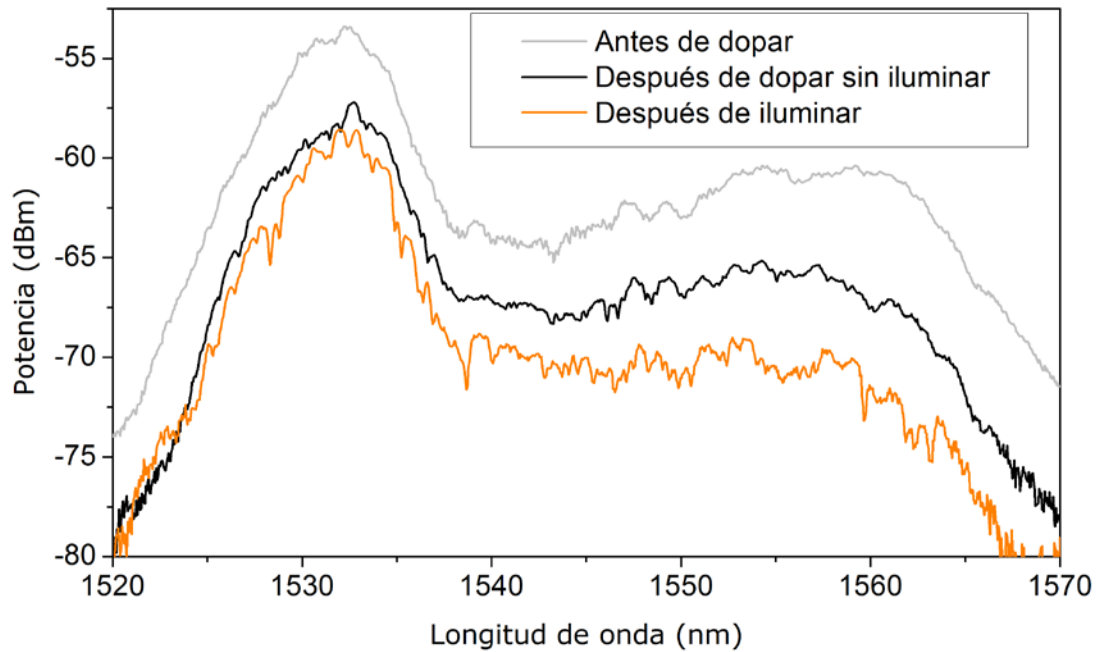
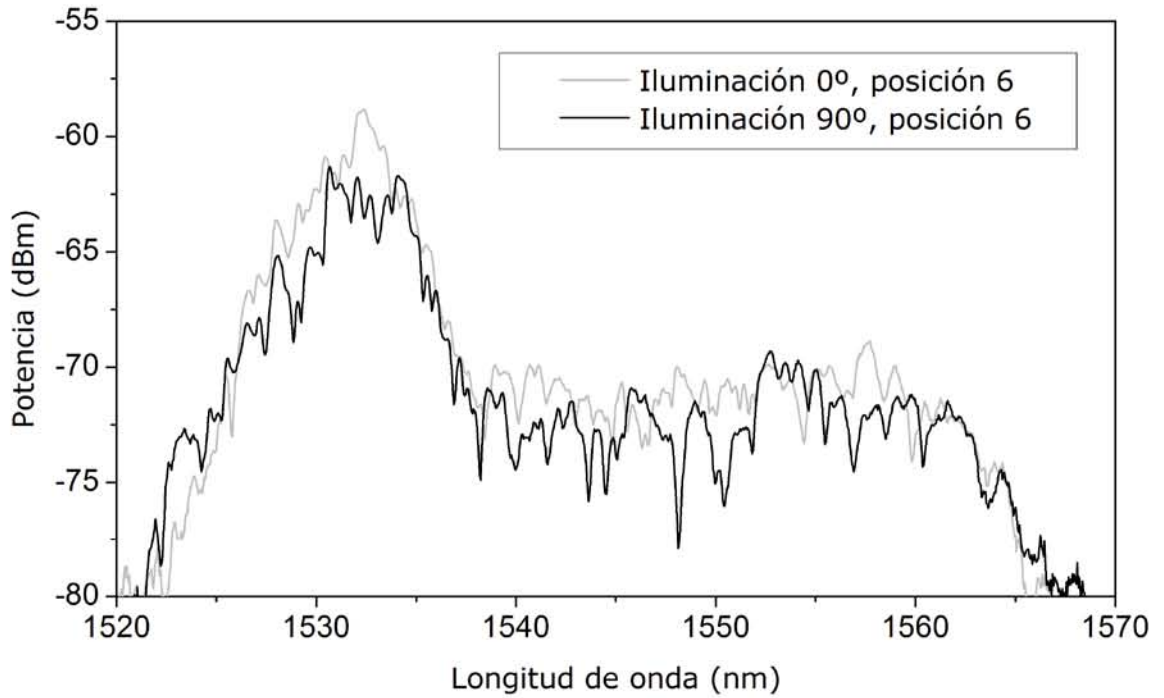
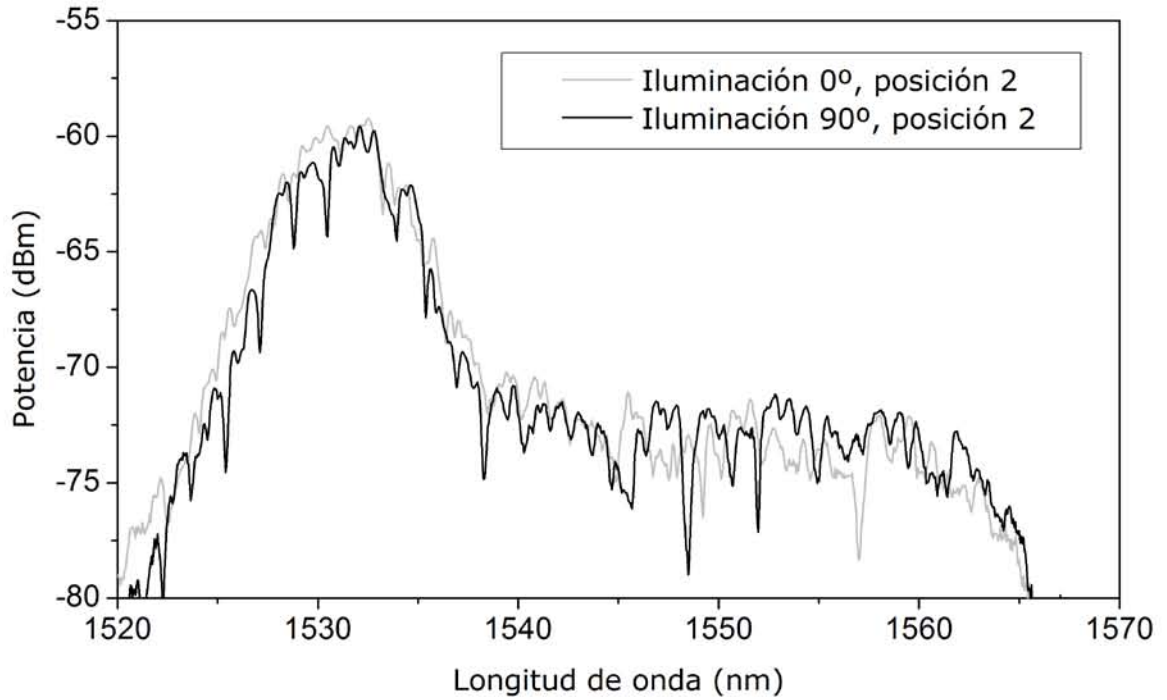


Figura 3.13. Birrefringencia fotoinducida en la fibra dopada con DR13.

Para observar los cambios en birrefringencia empleando otra polarización en el láser de escritura, este se rotó 90° . Posteriormente se volvió a iluminar la zona del microalambre bajo las mismas condiciones y durante el mismo tiempo de exposición. El resultado obtenido se muestra en la figura 3.14, en la cual pueden observarse los cambios fotoinducidos en la birrefringencia registrada en el espectro de transmisión para diferentes orientaciones del láser de escritura y en tres posiciones distintas del controlador de polarización.



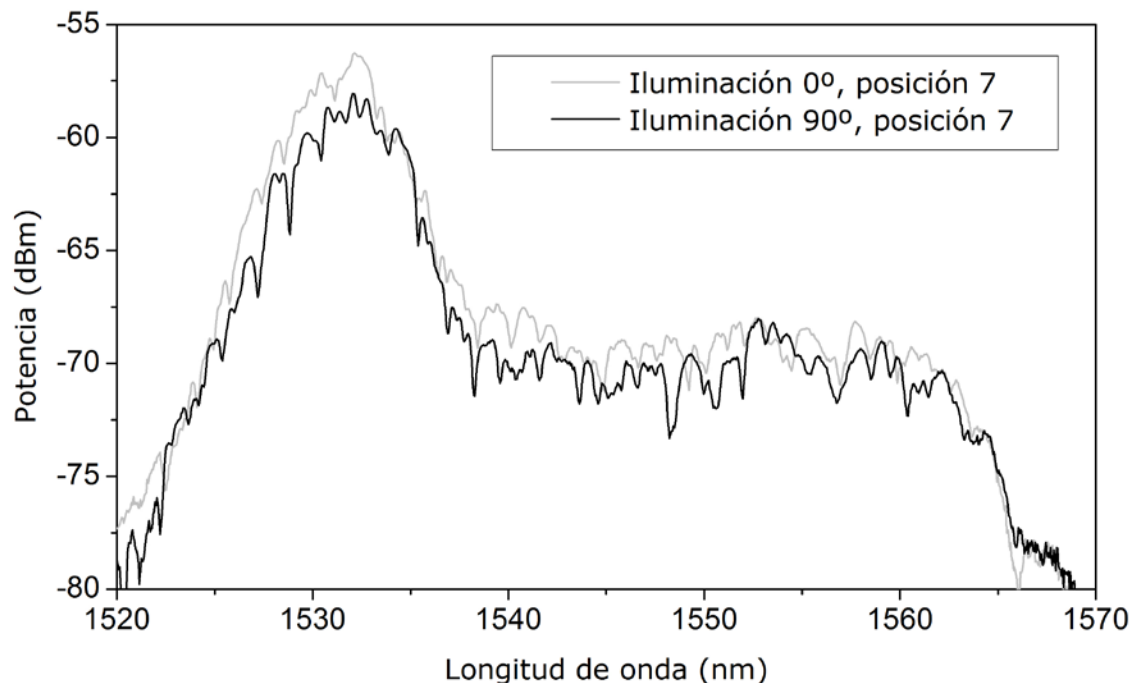


Figura 3.14. Birrefringencia fotoinducida en la fibra dopada con DR13 rotando el láser de escritura 90° en distintas posiciones del controlador de polarización.

Para cuantificar los cambios en birrefringencia, es necesario determinar la separación entre los lóbulos de los espectros mostrados en la figura 3.13. Con el fin de realizar un análisis con mejor precisión, la periodicidad de los lóbulos se determinó mediante la transformada rápida de Fourier (FFT) de los espectros. Al igual que en el análisis de señales convencionales, el empleo de la FFT proporciona la ubicación de las componentes espectrales de la señal, donde en este caso en particular, da información sobre la periodicidad de los lóbulos fotoinducidos en los espectros de transmisión. Para los resultados obtenidos (figura 3.13) la periodicidad de los lóbulos es prácticamente constante, pero la birrefringencia varía de acuerdo a la posición del controlador de polarización. La figura 3.15 muestra la FFT del espectro registrado para la posición 6 que es en la cual se apreció un mayor contraste. Como puede verse la FFT indica un pico en la posición correspondiente a 1.3 nm, indicando la periodicidad de los lóbulos en el espectro.

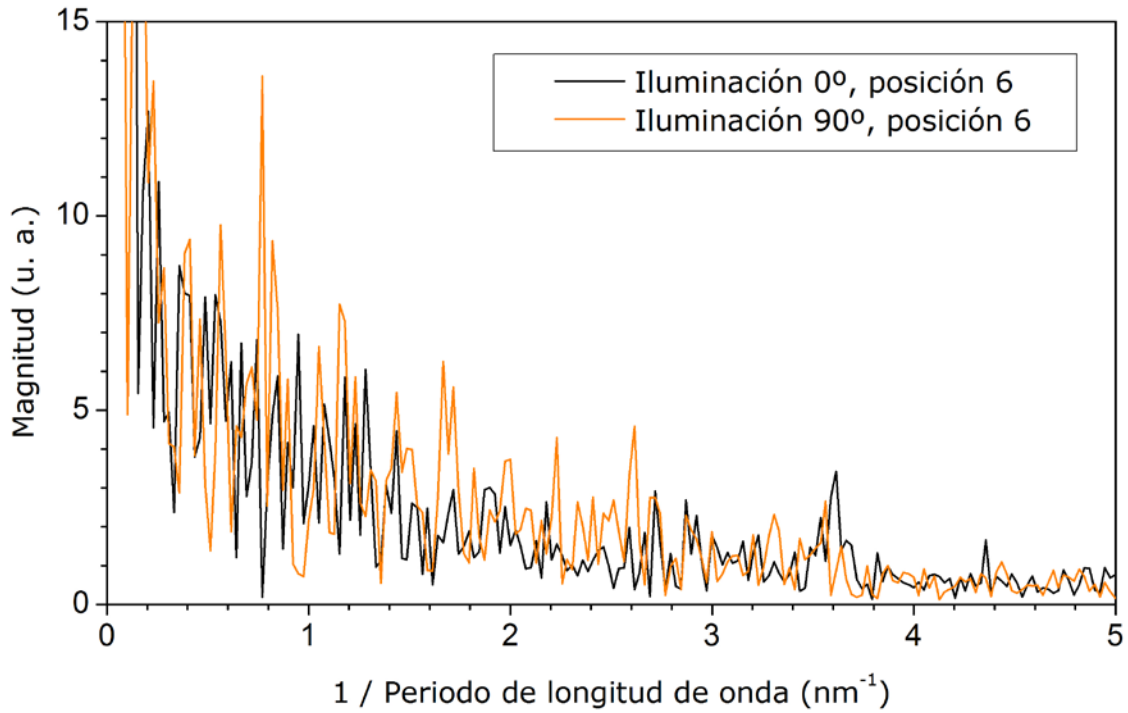


Figura 3.15. Transformada de Fourier para la birrefringencia fotoinducida.

Una vez obtenida la separación de los lóbulos en el espectro, es posible calcular la magnitud de la birrefringencia fotoinducida. Para esto se utiliza la teoría de medición de la dispersión de modos de polarización (PMD) empleando el método de polarizadores cruzados [61]. En particular, se utiliza el retardo diferencial de grupo (DGD, $\Delta\tau$) expresado por:

$$\Delta\tau = \frac{0.824\lambda^2}{c_0\Delta\lambda} = \frac{0.824(1550 \times 10^{-9} [m])^2}{(3 \times 10^8 [m/s])(1.3 \times 10^{-9} [m])} = 5.1 \times 10^{-12} [s] \quad 3.2-1$$

en donde λ es la longitud de onda central y $\Delta\lambda$ es la separación entre los lóbulos del espectro de transmisión. Con este valor, se puede determinar la birrefringencia por medio de la expresión:

$$B = \frac{\Delta\tau \cdot c_0}{L} = \frac{(5.1 \times 10^{-12} [s])(3 \times 10^8 [m/s])}{(30 \times 10^{-3} [m])} = 0.051 \quad 3.2-2$$

siendo L la longitud de fibra birrefringente, que en este caso es la sección iluminada. Finalmente el resultado de la birrefringencia generada es de 0.051.

La fabricación de dispositivos de fibra óptica de vidrio calcógeno con recubrimientos de azopolímero fue lograda fácilmente empleando la técnica de difusión, esta última con el fin de incorporar las moléculas de azobenceno dentro del PMMA. La respuesta de los dispositivos al ser irradiados mediante un láser externo, presentó una birrefringencia fotoinducida de un valor máximo de 0.051. Este valor obtenido concuerda con los valores reportados siendo de órdenes de magnitud de 1×10^{-2} [62]. La birrefringencia obtenida puede cambiar variando la concentración de azobenceno dentro de la matriz polimérica, cambiando la matriz polimérica, o bien, cambiando el espesor de la capa de azopolímero. De igual manera al variar el espesor del recubrimiento azopolimérico, se alteran las propiedades de transmisión de los dispositivos de fibra óptica. En el siguiente capítulo se discutirá una técnica para realizar recubrimientos poliméricos de manera controlada.

4. DEPOSITO DE CAPAS DELGADAS DE POLÍMERO SOBRE FIBRAS DE SÍLICE

Las fibras de vidrio de sílice actualmente son utilizadas en una gran variedad de aplicaciones debido a sus pérdidas mínimas y bajo costo. Por estas razones se han desarrollado un gran número de dispositivos útiles para una amplia gama de aplicaciones compatibles con esta tecnología. Algunos de los dispositivos de fibra óptica que se han desarrollado basan su funcionamiento en la interacción de la onda evanescente con el medio externo, efecto que les da capacidad de detectar cambios en el medio externo a la fibra.

La creación de películas poliméricas para su uso en óptica se enfoca principalmente en la realización de capas delgadas sobre sustratos planos que típicamente son de vidrio. Estas capas delgadas son comúnmente utilizadas para la construcción de guías de onda planas, donde de esta manera la onda guiada interactúa directamente con el medio de interés [63]. Para el depósito de estas capas se emplean métodos como el *spin coating* o el *dip coating*, aunque ninguno de estos es completamente compatible con las fibras ópticas.

En algunas aplicaciones los recubrimientos para fibras ópticas requieren ser realizados únicamente sobre las puntas de la fibra; para estos casos existen distintos métodos que están ampliamente caracterizados ya que se ajustan bien a esta necesidad. En el caso de la incorporación de capas poliméricas en fibras ópticas, generalmente se emplean moldes para recubrir la zona de interés en una sección intermedia, resultando en capas muy gruesas. Para algunas aplicaciones se requiere de capas delgadas y este es el caso con los azopolímeros, pues los efectos generados en estos materiales dependen del espesor de la capa polimérica

(la birrefringencia fotoinducida, por ejemplo, es inversamente proporcional al espesor de la película) [33, 35]. En este capítulo se desarrolla una técnica para realizar recubrimientos poliméricos delgados y uniformes en secciones adelgazadas de fibras ópticas de sílice, con el fin de lograr dispositivos de fibra óptica recubiertos con azopolímero. Este trabajo se realizó en el "Laboratorio de fibras láser y sensores de fibra óptica" ubicado en el Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM) de la UNAM, a cargo del Dr. Juan Hernández Cordero.

4.1 Fabricación de fibras adelgazadas de sílice y microalambres

Los dispositivos de fibra óptica de sílice que actúan por exposición de la onda evanescente incluyen a las fibras adelgazadas, los acopladores fusionados y los microalambres. La fabricación de estos dispositivos se realiza mediante una estación de trabajo Dowson 2010, la cual está diseñada para fabricar acopladores fusionados de 2 canales (2 fibras ópticas). Esta estación de trabajo también brinda la posibilidad de adelgazar fibras y fabricar microalambres.

La fabricación de las fibras adelgazadas se realiza calentando la fibra óptica mediante una antorcha de hidrógeno y estirándola simultáneamente. Los parámetros óptimos de fabricación se determinaron de manera experimental basándose en trabajos realizados anteriormente [64]. Los parámetros más relevantes para la fibra óptica usada en este trabajo, SMF-28e (apéndice B), son los siguientes:

- Velocidad de barrido de la antorcha: 1.052 mm/s
- Altura de la antorcha: 2.75 mm
- Distancia de barrido de la antorcha: 6 mm
- Flujo de hidrógeno: 250 scc
- Velocidad de jalado de la fibra: 0.02 mm/s
- Longitud de elongación total: 4 cm

Como resultado del proceso de elongación se obtienen fibras adelgazadas con una sección de cintura de $4\ \mu\text{m}$ aproximadamente. En estas fibras adelgazadas la sección de la cintura se mantiene constante a lo largo de 1.5 cm, donde en una longitud de 3.5 cm se registraron variaciones únicamente de $1.2\ \mu\text{m}$. Las pérdidas registradas durante el proceso de fabricación son de hasta 1.4 dB. La repetitibilidad lograda en la fabricación de estos dispositivos fue buena, registrándose variaciones de $0.3\ \mu\text{m}$ en la región más adelgazada. Las variaciones en las características de los dispositivos dependen de las condiciones del medio externo como la temperatura ambiente y ráfagas de aire, parámetros que no fueron controlados de manera específica. En la figura 4.1 se muestra la imagen de la sección de la cintura de una fibra adelgazada tomada mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés: *Scanning Electron Microscope*).

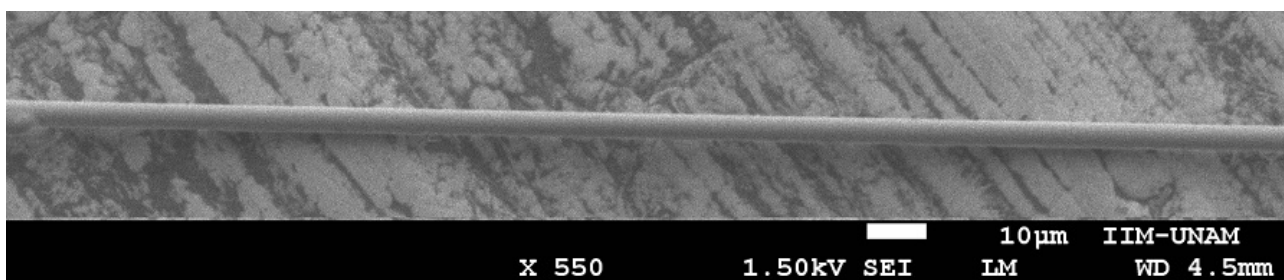


Figura 4.1. Fibra adelgazada en la sección de microalambre tomada mediante SEM.

4.2. Técnica de recubrimiento

El recubrimiento de secciones longitudinales de fibra óptica usualmente se realiza introduciendo esta misma en recipientes que contienen el material para que este se adhiera a la fibra y jalando la fibra a una velocidad controlada. En algunos casos se utilizan boquillas por las cuales se pasa la fibra recubierta, con el fin de limitar el espesor de la capa de material adherido. Sin embargo, al manejar fibras adelgazadas o microalambres, la tensión que se puede aplicar a estos dispositivos es muy limitada a causa de su fragilidad y poca rigidez. De igual manera, la región donde se ubican estos dispositivos suele ser a la mitad de la

longitud de una sección de fibra óptica, siendo una limitante más para realizar el recubrimiento. Por estas razones, es necesario explorar alternativas que permitan recubrir dispositivos basados en fibras ópticas adelgazadas.

En la técnica de *dip coating*, el dispositivo a recubrir es sumergido en la solución con que servirá de recubrimiento, donde mediante las propiedades de la esta solución y la velocidad a la cual se realiza el proceso, se controla el espesor de la capa depositada. Este proceso es compatible en ciertos aspectos para realizar el recubrimiento de secciones adelgazadas de fibra; sin embargo, la limitante para su aplicación se encuentra en la manera de introducir la fibra a la solución, ya que por la fragilidad de los dispositivos se puede generar ruptura debido a la tensión superficial de la solución. Adicionalmente, algunos dispositivos basados en fibras adelgazadas requieren también deformación mínima y que además se mantengan siempre en una posición y tensión óptima.

Como solución a estos problemas se modificó el método de *dip coating*, buscando mantener estática la fibra adelgazada y desplazar a lo largo de esta la solución utilizada como recubrimiento. Con esta consideración, el depósito de la solución se realiza mediante un barrido horizontal de esta sobre las fibras, proceso durante el cual la velocidad es controlada para lograr una capa uniforme y con un espesor determinado. Bajo estos criterios se diseñó y fabricó una máquina que realizara estas funciones, cuyo mecanismo básico de funcionamiento se muestran la figura 4.2. La estructura básica de la máquina se compone de dos soportes laterales donde la fibra a recubrir es sujeta y tensada; una platina para alojar al polímero a depositar y un mecanismo de engranes accionado mediante un motor eléctrico que se encarga de desplazar el polímero a una velocidad y longitud determinadas. El diseño y consideraciones de la máquina fabricada se tratan en la siguiente sección.

Las pruebas preliminares del mecanismo básico para recubrir fibras ópticas se llevaron a cabo utilizando PDMS como material de recubrimiento. Los resultados obtenidos mostraron que el mecanismo permite la formación de una

capa muy delgada sobre la fibra. La elección del PDMS para realizar las pruebas se basó en que es un polímero con un índice de refracción menor que el sílice. Por otro lado, el PDMS también ha sido empleado anteriormente como matriz polimérica para la fabricación de azopolímeros [36]. Para propósitos de visualización se empleó un colorante vegetal en la mezcla de PDMS, de tal manera que la capa depositada sobre la fibra pudiera ser observada en forma simple. En la figura 4.3 se muestran los resultados de una prueba de recubrimiento realizada a una velocidad de 1 mm/s.

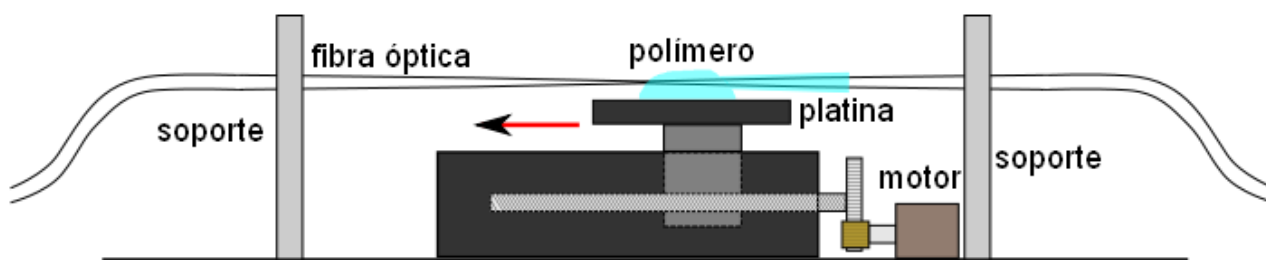


Figura 4.2. Esquema del mecanismo de máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica.

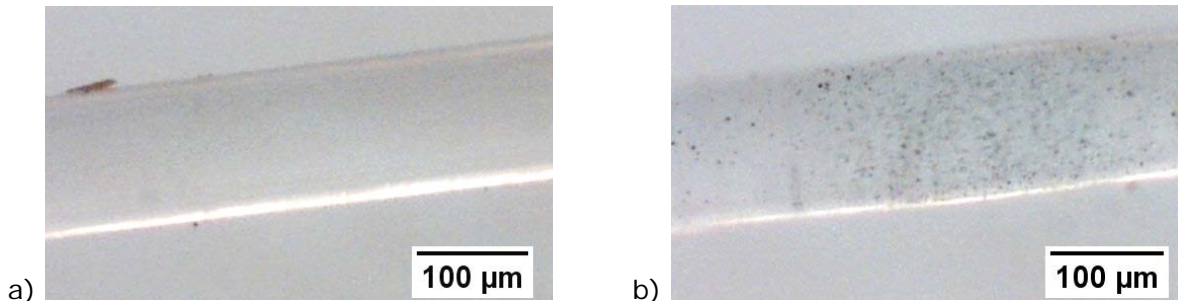


Figura 4.3. Prueba preliminar del recubrimiento de fibras ópticas usando la adaptación del proceso de dip coating: a) fibra óptica normal sin recubrimiento y b) fibra óptica recubierta con PDMS combinado con un colorante vegetal azul (puntos oscuros sobre la fibra).

Con las diversas pruebas que se realizaron utilizando el mecanismo diseñado, se determinaron los límites de velocidad de desplazamiento del proceso de recubrimiento. En particular, se estableció que el uso de una velocidad mayor a 3 mm/s generaba la formación de aglomeraciones de PDMS sobre la fibra (figura 4.4). Como se verá más adelante, estas aglomeraciones se deben al exceso de

material depositado a esta velocidad, de tal manera que las características de la fibra y del polímero limitan la velocidad de desplazamiento.



Figura 4.4. Imagen de una aglomeración de PDMS sobre la fibra óptica, debida al uso de velocidades altas del proceso de recubrimiento.

4.2.1 Diseño de la máquina

La máquina fabricada para recubrir fibras ópticas se basó en el esquema mostrado en la figura 4.2; tanto la estructura como el mecanismo de movimiento fueron diseñados y fabricados específicamente para este trabajo. La motivación para desarrollar esta máquina fue crear una estación independiente de los demás equipos empleados en el laboratorio, con la sola función de aplicar los recubrimientos requeridos para los diversos dispositivos fabricados dentro del laboratorio. De igual manera se pretendía que tuviera las características de ser compacta, portátil y que fuera controlada por computadora.

La sujeción de las fibras se realiza mediante un par de placas con diez ranuras, situadas en la parte superior de otras dos placas que actúan como soportes, una frente a la otra. Las ranuras sirven de guías para los dispositivos de fibra óptica, siendo fijados firmemente mediante grapas magnéticas; estas grapas poseen una guía adicional para permitir que cada una de ellas embone en una posición única, de tal manera que las fibras permanezcan alineadas en todo momento (figura 4.5). Para dar versatilidad a la distancia de trabajo, una de las placas ranuradas se encuentra fija sobre su soporte, mientras la otra tiene un mecanismo de corredera que le permite modificar la distancia de trabajo para la aplicación del recubrimiento. Con el uso de estas placas para sujetar las fibras se

logra la meta de poder recubrir dispositivos de distintas longitudes y adicionalmente, se brinda la opción de recubrir hasta diez dispositivos simultáneamente.



Figura 4.5. Placa ranurada y grapas para fijar los dispositivos de fibra óptica.

En cuanto al mecanismo de movimiento, este se centra en el desplazamiento de una plataforma en la cual se deposita la solución para recubrir las fibras. La plataforma se desplaza sobre un husillo movido por un sistema de engranes activado mediante un motor eléctrico. En el aspecto de la estructura mecánica, el requisito era la creación de soportes rígidos tanto para las fibras como para el mecanismo de movimiento; en la parte superior de estos soportes se fijarían los dispositivos de fibra óptica, quedando en medio la región a recubrir. Esta región queda determinada por la longitud de interés a recubrir, que a su vez depende del tipo de dispositivo de fibra óptica fabricado: fibras adelgazadas, microalambres o acopladores fusionados. Esta misma distancia es la que debe poder recorrer la plataforma móvil.

Para activar el movimiento mecánico se eligió utilizar un motor a pasos, con el cual se puede controlar la velocidad de avance de manera sencilla al regular el tiempo de activación de cada fase del motor. Este tipo de motor genera un movimiento discreto, pero al hacer uso de un sistema de engranes, los incrementos son muy pequeños (se estiman del orden de nanómetros) y para propósitos prácticos se puede considerar que se obtienen un movimiento continuo. Una limitante para la velocidad de avance de la plataforma es el tiempo de respuesta del motor a pasos, pues a menor tiempo entre cada paso, menor es el

torque. Típicamente se utiliza un intervalo mínimo de tiempo entre paso de 10 ms. El motor a pasos posee en su eje o flecha un engrane que se acopla a un segundo engrane, el cual al moverse hace girar el husillo y así lograr el avance de la plataforma con la solución para recubrir. Con el fin de tener un rango de velocidades amplio, se decidió usar dos motores con distintos acoplamientos mecánicos; uno con un engrane normal y otro con un engrane sin fin. La diferencia entre estos es que al emplear un sistema engrane-engrane, la relación de giro depende directamente de la cantidad de dientes de cada engrane; en el caso del sistema engrane-sin fin, por cada vuelta del sin fin sólo se avanza un diente del engrane normal, pudiendo generar desplazamientos muy pequeños.

Los motores utilizados son bipolares, de cuatro fases con cinco terminales y avanzan 7.5° por paso; además, el avance puede ser reducido a la mitad o a una cuarta parte usando distintas secuencias de activación [65]. En la figura 4.6 se muestran las fotografías de ambos motores y sus especificaciones pueden consultarse en el apéndice D. El diseño del engrane y husillo se realizó en base a los resultados de la velocidad obtenida en las pruebas preeliminares, buscando siempre que el avance por paso fuera el menor posible para lograr un avance lo más cercano posible a un movimiento continuo. Por esta razón se eligió fabricar un husillo con 22 hilos por pulgada y un engrane de 96 dientes.

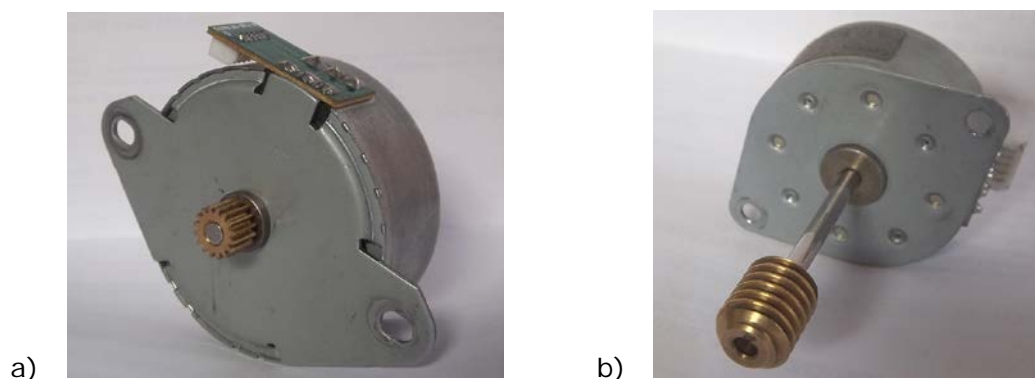


Figura 4.6. imágenes de los motores empleados para accionar la máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica. a) Motor con engrane de 16 dientes y b) motor con engrane sin fin.

Una vez elegidos los elementos mecánicos, el cálculo del desplazamiento (d) usando cada uno de los motores depende de los factores de multiplicación logrados con los engranes, denominado k_{EN} . A su vez, también intervienen el número de pasos por vuelta que realiza el motor (P_V) y los parámetros del husillo. El desplazamiento puede determinarse entonces de acuerdo a:

$$d = 1.154154 [mm/vuelta] \frac{1}{P_V k_{EN}} \quad 4.2-1$$

donde el factor de 1.154154 mm/vuelta es la distancia recorrida por cada hilo del husillo, es decir, por cada vuelta realizada por el husillo. Para el caso del motor con el engrane de 16 dientes $k_{EN}=6$ y en el caso del engrane con el engrane sin fin $k_{EN}=96$. El número de pasos por vuelta del motor se limitó a dos opciones: 48 y 96 pasos, correspondiendo a desplazamientos largo y corto respectivamente. La velocidad de recubrimiento se determina por el retardo entre pasos del motor (Δt_p), el cual es del orden de milisegundos, determinada por la expresión 4.2-2. Las velocidades bajas de trabajo consideradas para el diseño dependen de la viscosidad del polímero usado, en este caso PDMS [66]. Los desplazamientos logrados con el mecanismo y las velocidades máximas alcanzadas usando un tiempo de 10 ms entre paso se listan en la tabla 4.1.

$$V = 60,000 [m s/min] \frac{d [mm]}{\Delta t_p [ms]} \quad 4.2-2$$

Tabla 4.1. Desplazamientos de avance de la máquina para recubrir fibras.

	Engrane de 16 dientes	Engrane sin fin
Desplazamiento corto [μm]	2.00442	0.12527
Desplazamiento largo [μm]	4.00884	0.25055
Velocidad máxima [mm/min] (desplazamiento corto)	12.02652	0.75162
Velocidad máxima [mm/min] (desplazamiento largo)	24.05304	1.50324

La plataforma móvil que contiene la solución a depositar contiene una tira de teflón con ranuras para depositar la solución. Estas ranuras están alineadas con las placas donde son fijadas las fibras, logrando que la solución quede en las ranuras y el dispositivo de fibra pase por en medio de ella. La razón de utilizar teflón fue para evitar alguna reacción química con la solución y para una fácil limpieza (figura 4.7). La tira de teflón se encuentra sujeta en un extremo por un perno sobre el cual gira, de tal manera que puede bajarse y permitir retirar la solución a depositar para evitar el contacto con las fibras.

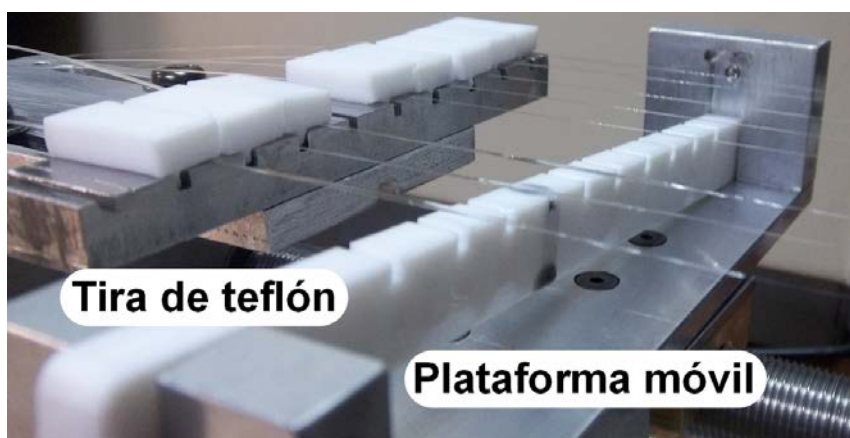


Figura 4.7. Tira de teflón ranurada sobre plataforma móvil para recubrir.

En la figura 4.8 se muestra una imagen de la máquina fabricada y los planos de esta pueden encontrarse en el apéndice F. El control de la máquina se realizó con LabVIEW, permitiendo crear una interfaz sencilla que brinda la posibilidad de seleccionar desplazamientos largos o cortos, la velocidad de recubrimiento y la distancia a recubrir (figura 4.9). La comunicación con la computadora y los motores a pasos se realizó mediante una tarjeta de adquisición de datos modelo PMD-1680FS, de la marca Measurement Computing (apéndice E). Esta tarjeta de adquisición cuenta con comunicación mediante el puerto USB y puede ser manipulada mediante LabVIEW enviando la secuencia de activación para las fases del motor a pasos. Esta señal de secuencia es una señal digital que se alimenta a un circuito integrado que incluye un arreglo de transistores darlington (ULN2803A) para suministrar la corriente adecuada al motor y aislar este suministro de energía de la tarjeta de adquisición de datos.

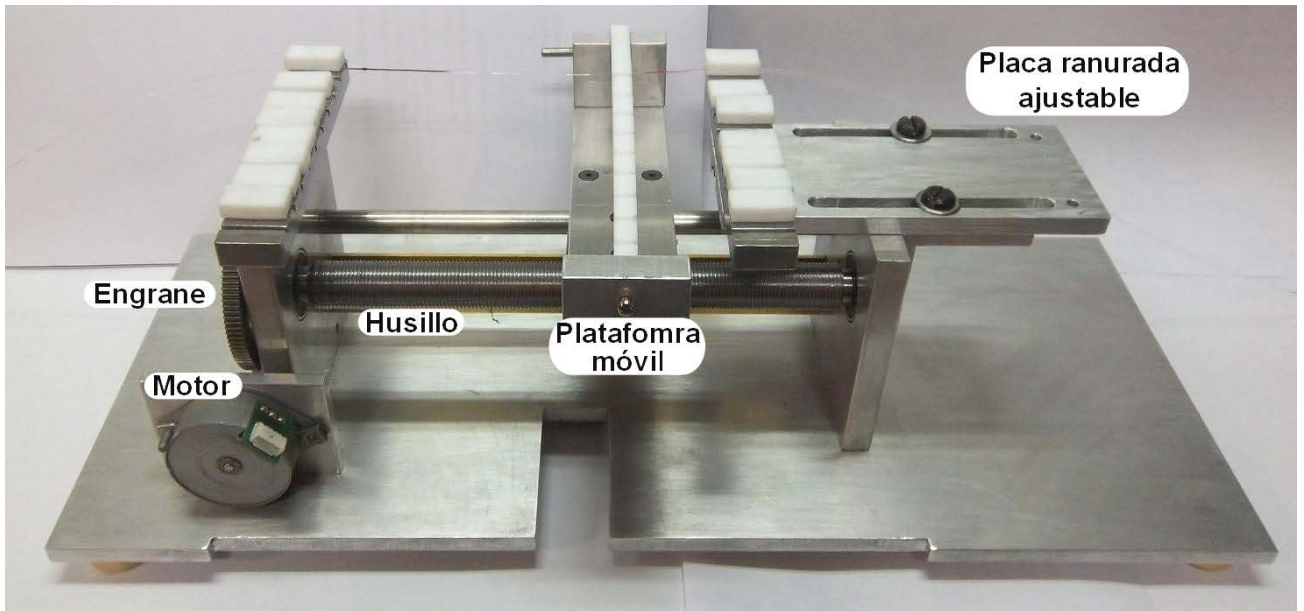


Figura 4.8. Máquina diseñada y construida para realizar recubrimientos poliméricos sobre dispositivos de fibra óptica.

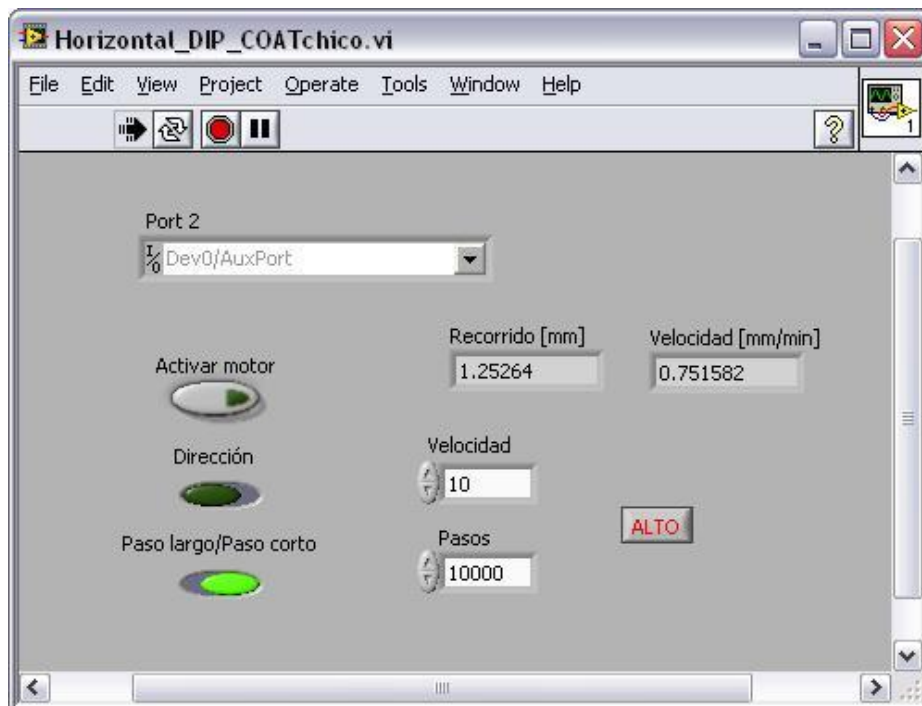


Figura 4.9. Interfaz de LABView creada para controlar la secuencia de activación de los motores a pasos y controlar la velocidad de los recubrimientos realizados en dispositivos de fibra óptica.

2.3 Recubrimiento de dispositivos de fibra óptica

Debido a que los dispositivos recubiertos con azopolímeros basan su funcionamiento en la interacción de la onda evanescente, el índice de refracción del polímero debe poseer un índice de refracción menor al del material de la fibra óptica (este caso SiO_2 , $n=1.458$). Otro aspecto a considerar al recubrir los dispositivos de fibra óptica, son las imperfecciones en la interfaz de la fibra óptica y el recubrimiento, las cuales causan degradación de la señal transmitida a través de la guía de onda. De esta manera, el espesor de las capas depositadas sobre secciones adelgazadas de fibra óptica es relevante debido a la distancia de interacción de la onda evanescente con el medio externo.

Al utilizar materiales con moléculas de azobenceno se pretende cambiar la orientación de dichas moléculas mediante iluminación externa en una longitud de onda específica. Para asegurar la excitación de las moléculas más cercanas de la interfaz entre el azopolímero y la fibra, el espesor de los recubrimientos debe ser delgado para permitir el paso de la luz externa hasta estas moléculas. Por otro lado, el recubrimiento debe poseer un espesor óptimo para una interacción con la onda evanescente y generar cambios en la polarización de la señal transmitida en la guía de onda. En trabajos previos con recubrimientos azopoliméricos el espesor de este material se ha reportado ser un factor determinante para obtener una respuesta óptima [26, 36, 67].

4.3.1 Caracterización de recubrimientos realizados con la máquina

El método escogido para recubrir las fibras ópticas utiliza el mismo principio que la técnica de *dip coating*, que consiste en sumergir un sustrato en una solución de interés. La diferencia entre la técnica de *dip coating* y el método empleado en este trabajo es que en nuestro caso el proceso se realiza de manera horizontal. Trabajos realizados anteriormente por Goucher y Ward describen los principios de este método para obtener recubrimientos en fibras y discos [68]; posteriormente, Landau y Levich modelaron con más detalle el caso del

recubrimiento de fibras al hacerlas pasar de manera vertical dentro de un contenedor con una solución deseada, tal como se ilustra en la figura 4.10 [69, 70].

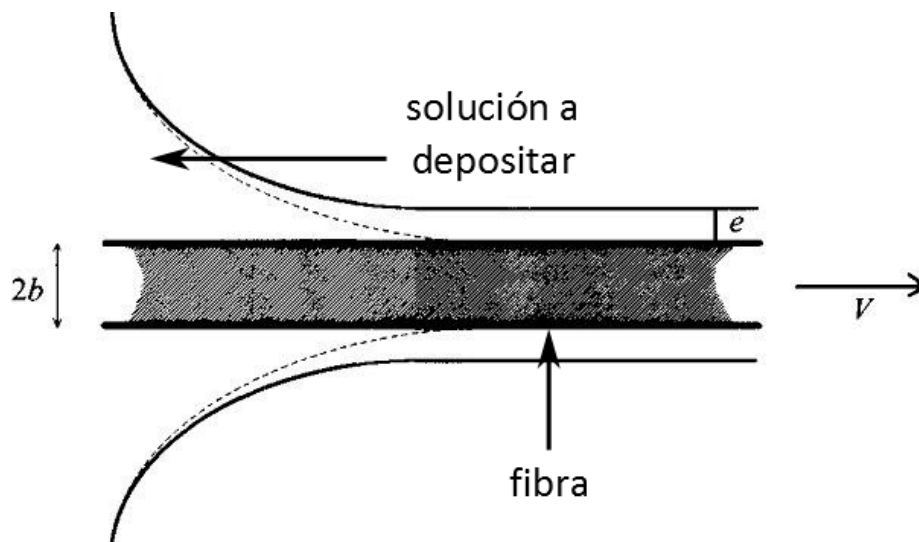


Figura 4.10. Esquema de recubrimiento de fibras delgadas [70].

De acuerdo a los reportes previos, el espesor del recubrimiento (e) depende de las propiedades del líquido, la velocidad de jalado de la fibra (V) y el radio de la fibra (b). Para el cálculo del espesor en este tipo de fenómeno se desprecian los efectos generados por la gravedad, con lo cual se obtiene la expresión [70]:

$$e = 1.34b(Ca)^{2/3} \quad 4.3-1$$

$$Ca = \frac{\eta V}{\gamma} \quad 4.3-2$$

donde Ca es el número de capilaridad, η es la viscosidad y γ es la tensión superficial del líquido o solución a depositar.

Para la caracterización de los recubrimientos obtenidos con la máquina construida, se realizaron recubrimientos de PDMS sobre fibras ópticas de sílice sin

adelgazar a distintas velocidades. El PDMS empleado para estas pruebas fue el Sylgard 184 de Dow Corning (apéndice C), el cual se polimeriza con un agente curante y mediante calentamiento. La relación de monómero y agente curante utilizada fue 8:1 en peso; esta relación proporciona una mayor rigidez al polimerizar y brinda una mayor resistencia mecánica a los dispositivos. Los recubrimientos se realizaron utilizando el motor con el engrane sin fin y en la modalidad de avance largo para las velocidades de 1.5, 1.25, 1 y 0.75 mm/min. En la figura 4.11 se puede observar que el grosor de los recubrimientos obtenidos depende de la velocidad con la que se realiza el proceso, obteniéndose un espesor mayor a velocidades mayores. Los espesores de los recubrimientos se midieron usando imágenes tomadas mediante SEM, obteniendo la diferencia en el diámetro de las fibras en secciones con y sin recubrimiento de PDMS. Los resultados de los espesores medidos se muestran en la tabla 4.2; estos se obtuvieron promediando las mediciones de varias muestras.

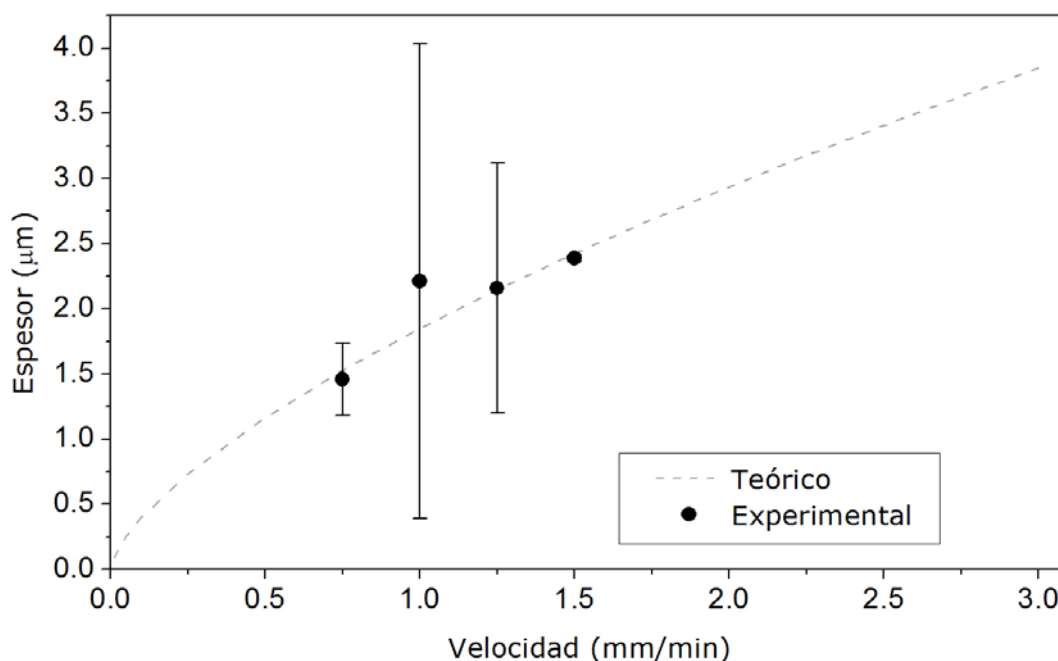


Figura 4.11. Dependencia del grosor de PDMS obtenido en función de la velocidad del proceso de recubrimiento de fibras ópticas.

Tabla 4.2. Datos obtenidos de la medición de los recubrimientos realizados experimentalmente.

Velocidad de recubrimiento [mm/min]	Promedio de espesor [μm]	Desviación estándar [μm]
0.75	1.4578	0.27632
1	2.21145	1.82045
1.25	2.19687	0.95968
1.5	2.38835	0.02722

Para comparar los resultados de las mediciones con los modelos reportados en trabajos previos, se obtuvieron curvas características utilizando la expresión 4.3-1 empleando los siguientes parámetros para el PDMS [71, 72]:

- Radio de la fibra óptica (b): 62.5 μm
- Viscosidad (η): 3.9 Pa/s
- Tensión superficial (γ): 0.0198 N/m

De la figura 4.11 y la tabla 4.2 se puede observar que hay tres puntos experimentales que presentan muy buena correlación con las predicciones teóricas. Por otro lado, el punto correspondiente a una velocidad de 1 mm/min se aparta del valor teórico, mostrando una desviación estándar considerable. El resultado para esta muestra en particular se adjudica a que el PDMS utilizado había sido mezclado con anterioridad y había sido también almacenado en el refrigerador, esta última medida fue tomada para evitar la polimerización debido al agente curante. Sin embargo, el tiempo transcurrido fue suficiente para generar un aumento importante en la viscosidad del PDMS. El incremento en este parámetro puede generar que las muestras recubiertas a esta velocidad (1 mm/min) se ubiquen en una curva característica diferente. Esto se ilustra en la figura 4.12, en donde se muestran una familia de curvas generada para distintos valores de viscosidad. Nótese que el punto correspondiente a la velocidad de 1 mm/s ajusta mejor a la curva con viscosidad de 5 Pa/s. Otro factor que también

pudo haber afectado es la contaminación del PDMS con humedad, ocasionando de igual manera una desviación estándar grande y un recubrimiento no uniforme.

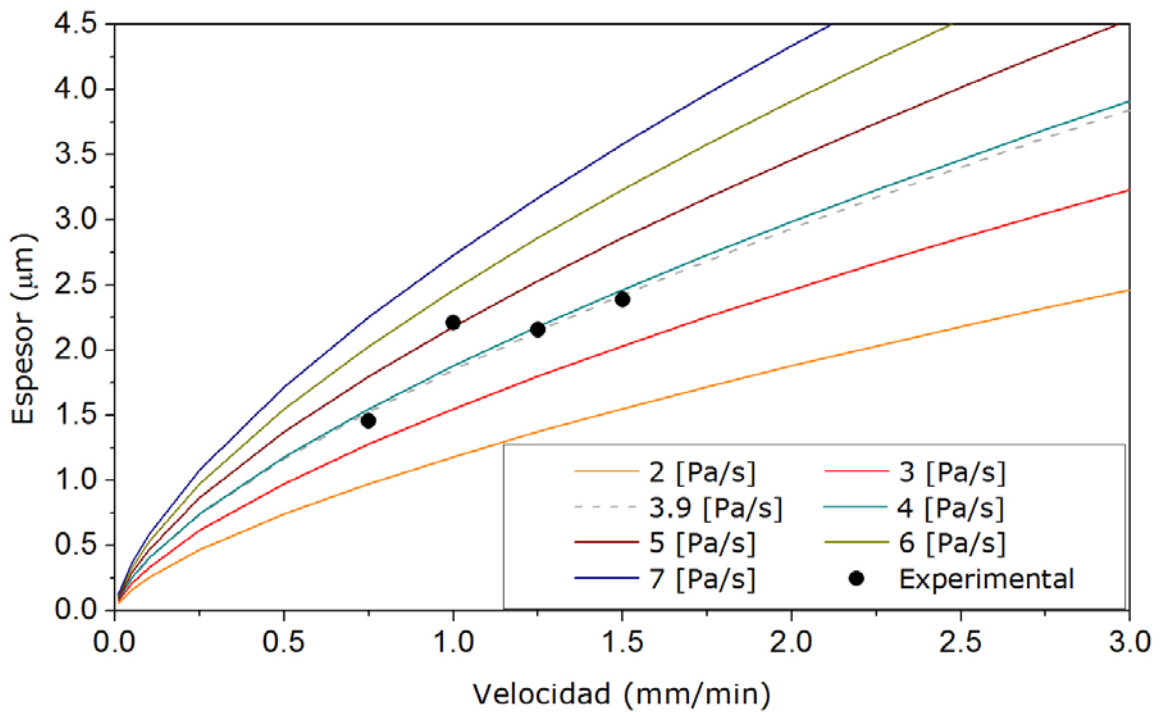


Figura 4.12. Dependencia del grosor de PDMS obtenido en función de la velocidad del proceso de recubrimiento de fibras ópticas para distintas viscosidades de la solución empleada.

Otro parámetro a tomar en consideración es el radio de las fibras ópticas a recubrir. En la ecuación 4.3-1 se aprecia que el espesor de las capas de recubrimiento en secciones de microalambre puede ser muy delgado. Esto se ilustra en la figura 4.13, obtenida para una velocidad de 1.5 mm/min y empleando una viscosidad de 3.9 Pa/s. Nótese, por ejemplo, que para una fibra adelgazada con un radio de 5 μm el recubrimiento tendrá un espesor menor a 0.25 μm . Estos espesores deben ser tomados en cuenta para la fabricación de dispositivos de fibra óptica recubiertos con polímeros funcionales, pues constituyen un aspecto importante para obtener un óptimo desempeño.

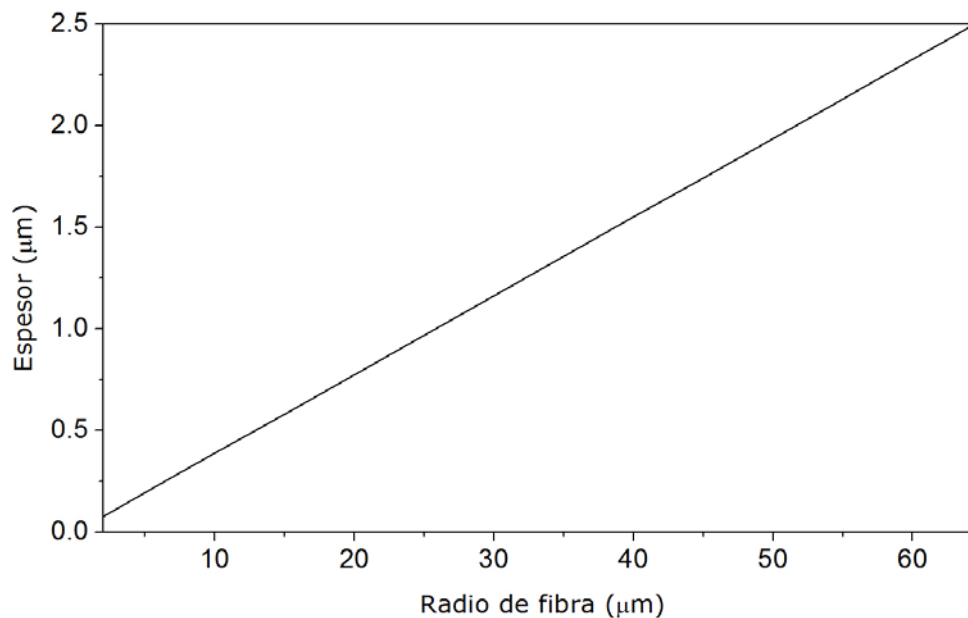


Figura 4.13. Dependencia del grosor de PDMS obtenido en función del radio de la fibra óptica recubierta.

Para observar los recubrimientos realizados con PDMS se empleó tanto microscopía óptica como microscopía electrónica de barrido (SEM). Utilizando las imágenes adquiridas se comprobó que el recubrimiento depositado sobre las fibras ópticas era de carácter uniforme en toda la sección recubierta (figura 4.14). Haciendo uso de las imágenes adquiridas mediante SEM fue que se pudo determinar el espesor del depósito de PDMS. Mediante la misma técnica se analizaron secciones adelgazadas de fibra óptica

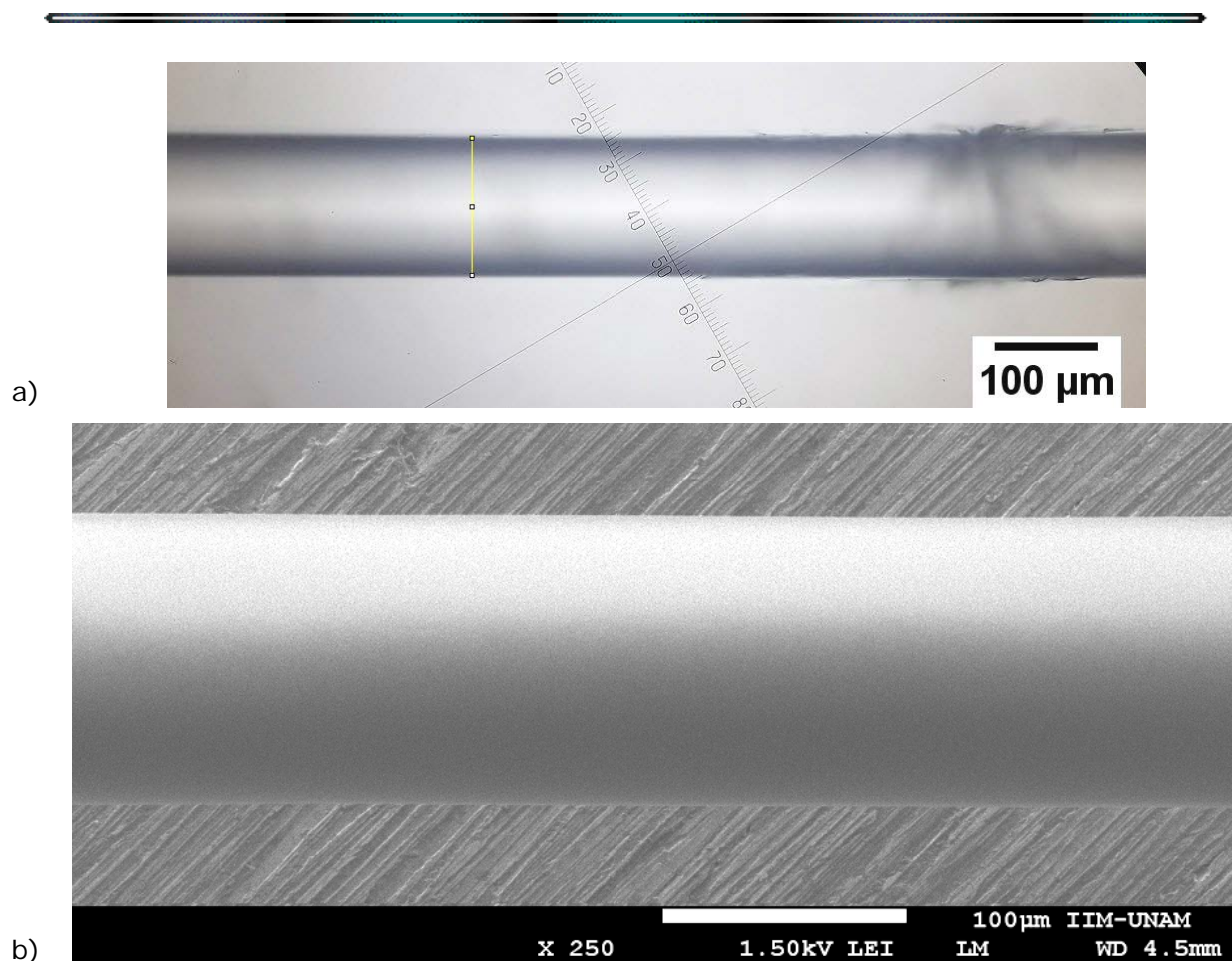


Figura 4.14. Fotografías de recubrimientos homogéneos de PDMS realizados sobre fibras ópticas: a) mediante microscopía óptica y b) mediante SEM.

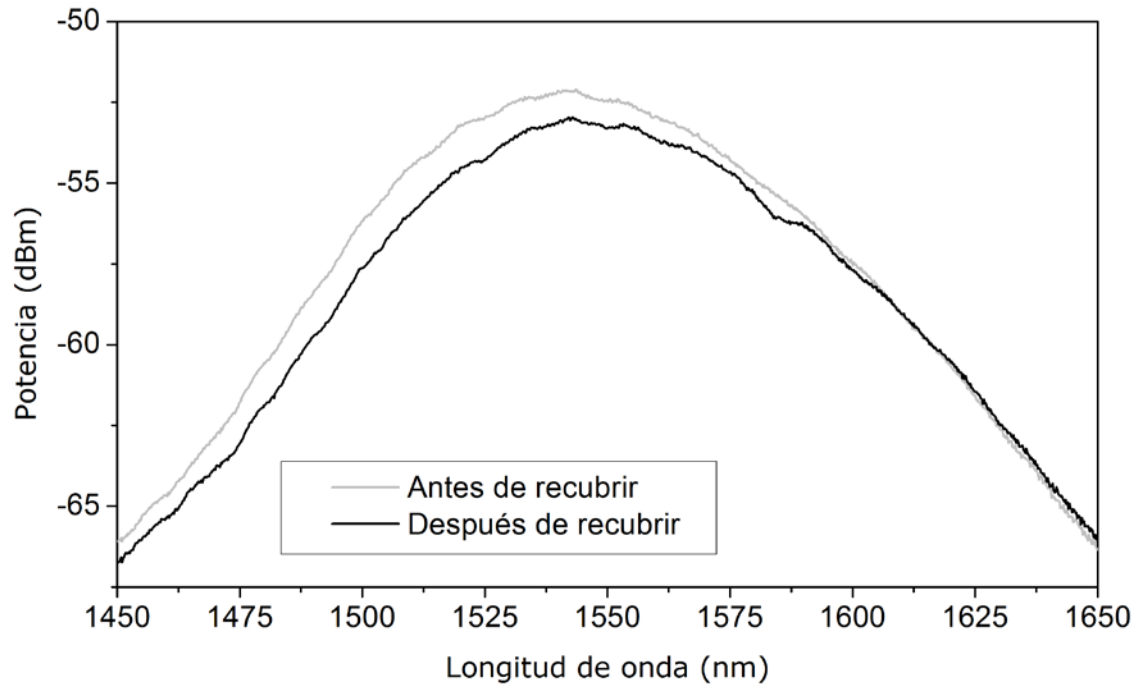
Dentro de los aspectos importantes observados durante el proceso de recubrimiento de fibras ópticas, cabe mencionar que el correcto posicionamiento de las fibras en la máquina es crucial para lograr una alineamiento e inmersión correctos en la solución de interés. Al no realizarse de forma correcta, la mala alineación origina recubrimientos no uniformes en los dispositivos de fibra óptica. Como ejemplo de esto, en la figura 4.15 se muestra la imagen de una fibra adelgazada que no fue colocada de manera adecuada en las ranuras de las placas de fijación de la máquina. Como consecuencia, el recubrimiento de PDMS no se realizó de manera uniforme en la fibra, generando a su vez perturbaciones en la transmisión de señales (estas se analizarán en la siguiente sección).



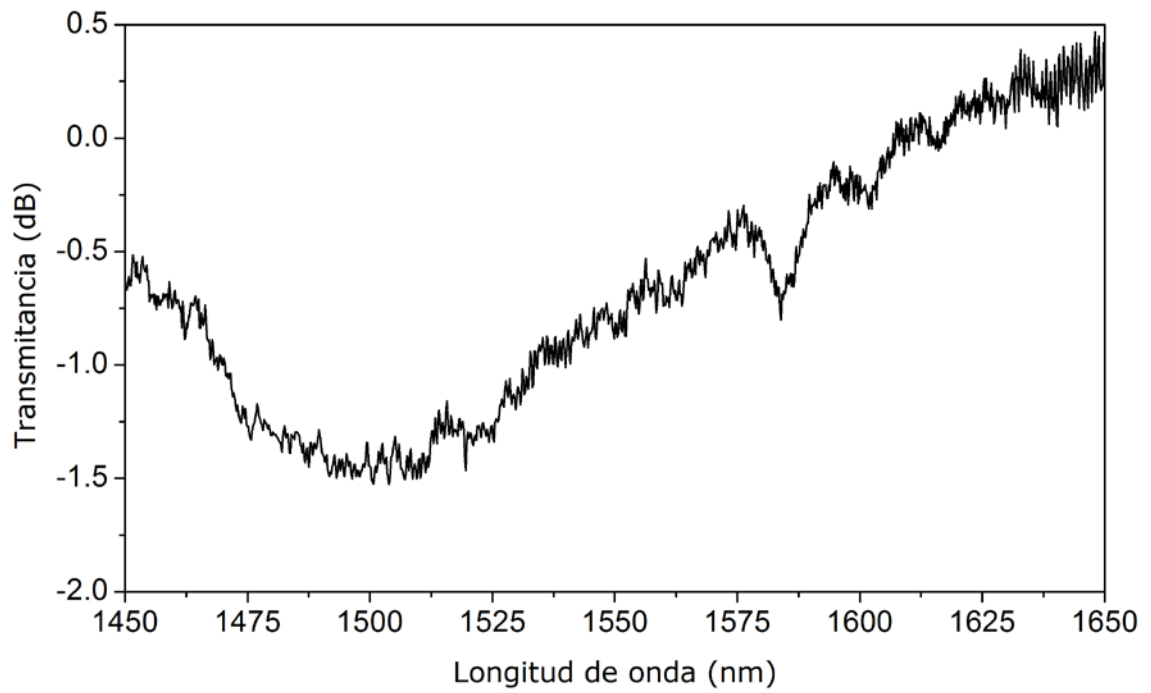
Figura 4.15. Fotografía del recubrimiento de PDMS no homogéneo realizado sobre una fibra óptica adelgazada causado por un mal alineamiento de la fibra.

4.3.2 Cambios espectrales causados por recubrimientos de PDMS

Al recubrir fibras ópticas adelgazadas con un nuevo material se modifica el índice de refracción del medio externo. Este cambio en el índice de refracción modifica los parámetros de la interfaz de la guía de onda con el medio, ocasionando un cambio en el confinamiento de la onda guiada [12]. El cambio en la señal transmitida se observó de manera experimental monitoreando el proceso de recubrimiento con PDMS de una fibra adelgazada, empleando una velocidad de 1.25 mm/min. La fibra adelgazada se realizó bajo los parámetros indicados en la sección 4.1, obteniendo un diámetro de la sección de microalambre de 4 μm . La figura 4.16 muestra el cambio registrado en el espectro de transmisión de la señal, pudiéndose apreciar que en algunas longitudes de onda se genera atenuación, mientras que en otras se logra un incremento en la transmisión de la señal. En este último caso, es claro que el confinamiento de la onda guiada mejora con el nuevo revestimiento. El ruido presentado en la señal se atribuye a impurezas atrapadas al momento de realizar el proceso de recubrimiento. Nótese que los cambios espectrales permiten obtener las pérdidas que se generan al recubrir la fibra adelgazada. En este caso, las pérdidas máximas son de 1.5 dB.



a)



b)

Figura 4.16. Cambio en la transmisión de una fibra adelgazada recubierta con PDMS.

a)Espectro de transmisión y b)espectro normalizado.

Cuando se realiza un recubrimiento no homogéneo como el expuesto en la figura 4.14, se genera una serie de cambios periódicos de índice de refracción a lo

largo del dispositivo de fibra óptica. Estos cambios en el índice de refracción causan perturbaciones en el espectro de transmisión del dispositivo, generando bandas de atenuación a ciertas longitudes de onda (figura 4.17).

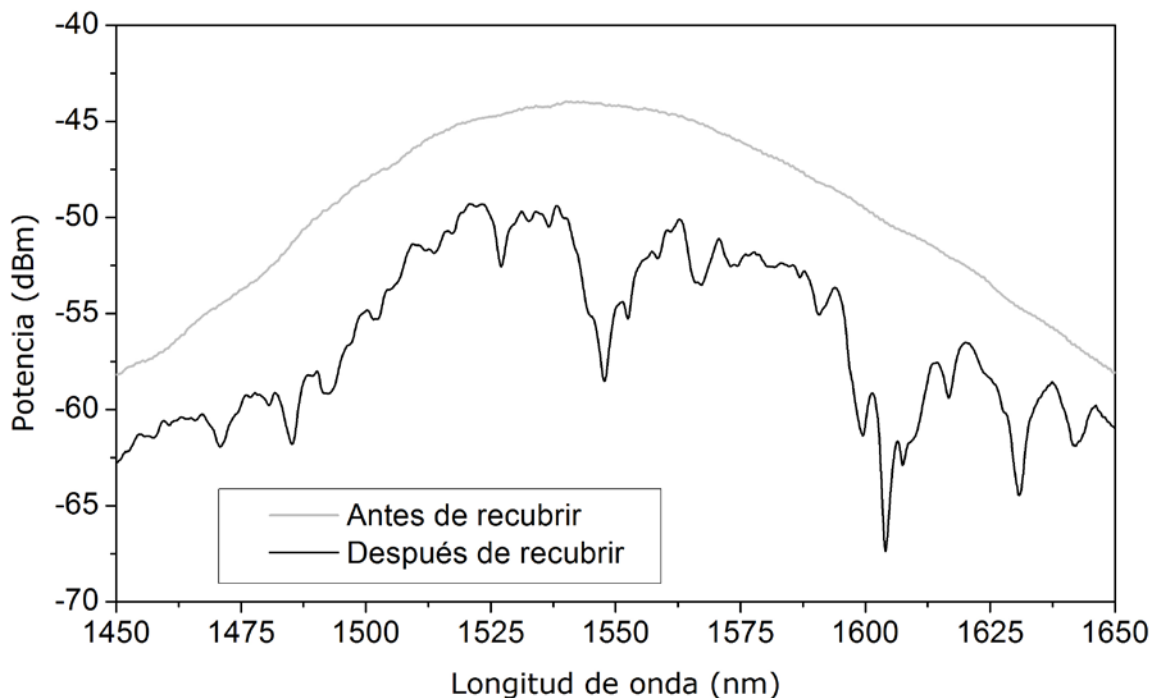


Figura 4.17. Cambio en la transmisión de una fibra adelgazada recubierta de manera no uniforme con PDMS.

4.3.3 Recubrimientos de PDMS-azobenceno sobre fibras adelgazadas

En este trabajo se realizó el recubrimiento de dispositivos de fibra óptica utilizando un azopolímero. Anteriormente, en la fabricación de dispositivos de fibra óptica de sílice con recubrimiento de azopolímero, se ha empleado la mezcla de PDMS con azobenceno [36]. Sin embargo, el espesor de estos recubrimientos es muy grueso, de varios cientos de micrómetros. Para evaluar la posibilidad de optimizar estos recubrimientos, se utilizó una mezcla de PDMS con azobenceno para recubrir las fibras adelgazadas.

La mezcla de PDMS con azobenceno se realizó utilizando una relación de peso de 92% / 8%, respectivamente. Los azobencenos usados para estos experimentos fueron el DR1 y el DR13. Posteriormente se procedió a recubrir los dispositivos de fibra óptica con el azopolímero empleando el mismo procedimiento con la máquina fabricada. Los recubrimientos realizados presentaron muchas irregularidades debido a la propia mezcla de PDMS-azobenceno, la cual no es una mezcla homogénea. Esta falta de homogeneidad se debe a que el azobenceno no es soluble en la solución de PDMS con el curante, razón que origina que las moléculas de azobenceno no queden distribuidas uniformemente en toda la mezcla (figura 4.18).

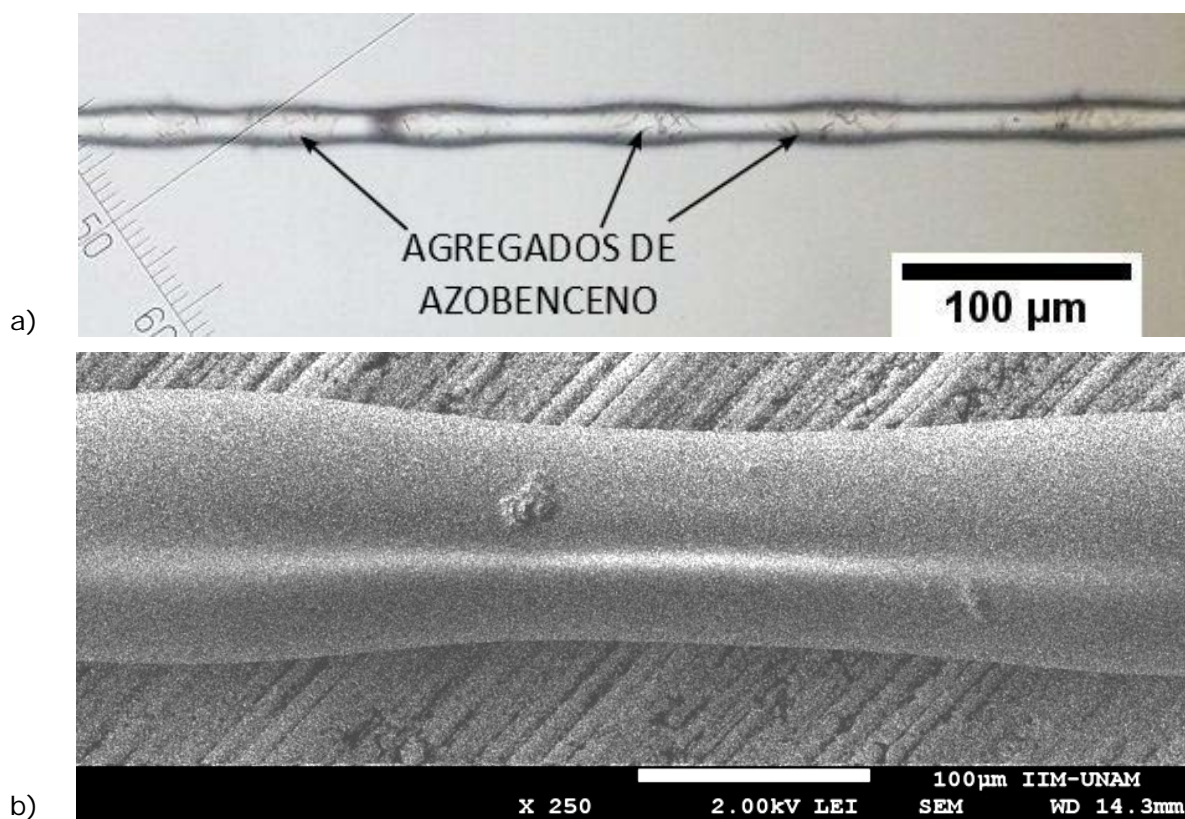


Figura 4.18. Depósitos de azopolímero (PDMS-azobenceno) sobre dispositivos de fibras ópticas: a) imagen tomada mediante microscopia óptica y b) imagen tomada mediante SEM.

Como se ilustra en las imágenes anteriores, la mezcla de azopolímero creada no es uniforme y por lo tanto, en secciones adelgazadas de fibra óptica se

deposita una menor cantidad de moléculas de azobenceno. Los dispositivos creados fueron situados dentro del arreglo experimental de polarizadores cruzados y sometidos a iluminación externa haciendo uso del láser de escritura, pero no se detectó ningún cambio en el espectro de transmisión o en el estado de polarización. Este resultado se atribuye a la poca eficiencia del azopolímero, sobre todo por la poca cantidad de azobenceno depositado en la región adelgazada. Una alternativa para esto es utilizar el método de difusión de las moléculas de azobenceno dentro de la matriz de PDMS, haciendo uso de algún solvente. El utilizar esta técnica representa un trabajo a futuro, para lo cual habrá que estudiar los efectos de distintos solventes en este polímero, tema en el cual no hay mucha información disponible [73].

A pesar de no haber obtenido efectos de birrefringencia fotoinducida en los dispositivos recubiertos con azopolímero, se demostró el recubrimiento de fibras adelgazadas con polímero de manera uniforme y homogénea. Esto da paso a una mejora en la creación de dispositivos con recubrimientos azopoliméricos utilizando el compuesto adecuado. De igual manera, la creación de esta máquina brinda la opción de realizar recubrimientos delgados sobre diversos dispositivos de fibra óptica empleando distintos materiales poliméricos.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrollaron dispositivos de fibra óptica con diferentes recubrimientos de azopolímero. Las técnicas y procesos para la creación de los dispositivos son de carácter novedoso, los cuales se enfocan a la creación de nuevas aplicaciones en fotónica. Se desarrollaron técnicas específicas para la creación de los dispositivos deseados, adaptándose a procesos ya establecidos dentro de los laboratorios que se trabajó. La fabricación de los dispositivos se buscó realizar de manera simplificada y de bajo costo.

En particular, se realizaron pruebas de birrefringencia fotoinducida en microalambres de fibra óptica. Para estos dispositivos se utilizaron dos tipos fibra óptica de distintos materiales: vidrio calcógeno (As_2Se_3) y dióxido de silicio o sílice (SiO_2). Para ambos casos, los microalambres se recubrieron con azopolímeros, materiales que están compuestos por una matriz polimérica y azobenceno. Posteriormente, con el fin de inducir birrefringencia por fotoisomerización, los microalambres recubiertos con azopolímero fueron radiados con un láser externo linealmente polarizado.

En el caso de las fibras ópticas de vidrio calcógeno se aprendió la técnica de fabricación de los microalambres, que involucra un proceso muy especial y metódico debido a las características del material. Dado que el vidrio calcógeno es en extremo frágil, se ideó una manera para empaquetar los microalambres y poder manipularlos durante diversas etapas de post-procesamiento. El empaquetado de estos dispositivos requirió de fabricar contenedores para lograr que el microalambre quedara fijo y dentro de una cavidad, de tal forma que esta también resultara útil para incorporar los compuestos azobencenicos. En el caso de las fibras de sílice, se caracterizó y mejoró el proceso de fabricación de

microalambres, obteniendo dispositivos con bajas pérdidas y altamente reproducibles.

Los microalambres de vidrio calcógeno fabricados para este trabajo incluyen en su recubrimiento un polímero (PMMA) y debido a las altas temperaturas utilizadas en el proceso de fabricación, fue necesario desarrollar una técnica alternativa para incorporar el azobenceno a la matriz polimérica. Este objetivo se logró mediante un proceso de difusión, usando como móvil una solución de azobenceno-metanol. El proceso de dopaje del PMMA con azobenceno fue caracterizado para determinar los tiempos necesarios de inmersión de los dispositivos de fibra dentro de la solución. El uso de esta técnica para incorporar moléculas de azobenceno a los recubrimientos poliméricos que ya poseían los dispositivos de fibra óptica, representó una manera fácil y sencilla de fabricar dispositivos ópticos con azopolímero.

La respuesta de estos dispositivos al ser sometidos a la luz proveniente de un láser externo originaron birrefringencia debido al alineamiento de las moléculas. Una vez inducido el alineamiento, la birrefringencia permanece incluso después de retirar el láser externo. La birrefringencia inducida depende de la polarización del láser de escritura, efecto que se comprobó al rotar esta fuente de luz. Para una posición óptima de la polarización del láser de escritura, la birrefringencia generada fue de una magnitud considerable. Este resultado indica que los dispositivos dopados con azobencenos podrían resultar útiles para ser incorporados en distintos sistemas de fibra para generar efectos tales como birrefringencia o no linealidades mediante la iluminación externa de estos microalambres.

Un efecto observado en las fibras de vidrio calcógeno al radiarlas con el láser de escritura fue el de la absorción fotoinducida. Este efecto ya se había reportado antes, pero al caracterizarlo con detalle se encontró que es posible crear atenuadores de fibra óptica controlados con luz. La atenuación inducida en los dispositivos empleados depende de la potencia de radiación y la longitud de onda,

donde el rango espectral de la atenuación es muy ancho. Por otro lado, los tiempos de respuesta son rápidos, del orden de microsegundos, característica que indica que pueden ser utilizados como switches en sistemas de sensado. Estas velocidades de respuesta resultarían muy lentas para aplicaciones en sistemas de comunicaciones.

Con el fin de optimizar el proceso de recubrimiento de fibras ópticas de sílice se diseñó y fabricó una máquina para recubrir fibras adelgazadas de manera homogénea y controlada. Esta máquina fue desarrollada para recubrir simultáneamente varios dispositivos de fibra óptica realizando un barrido con la solución a depositar a lo largo de la fibra. Los resultados mostraron que con la máquina es posible obtener recubrimientos uniformes y con espesores delgados, de tal manera que se cumplió el objetivo que se perseguía al construir la máquina. El proceso de recubrimiento y las capas depositadas sobre las fibras fueron caracterizados por técnicas de visualización y por microscopía electrónica. Se logró determinar que las pérdidas ocasionadas por este método para recubrir fibras adelgazadas son mínimas. De igual manera se hizo una comparación entre la teoría y los resultados obtenidos en la medición de los espesores de los recubrimientos, donde fue posible verificar que la metodología propuesta funciona de acuerdo a los modelados reportados en la literatura.

Se hizo un intento por recubrir microalambres ópticos de sílice con azopolímero haciendo uso de la máquina construida. Sin embargo, los resultados obtenidos no fueron satisfactorios, pues no se logró generar birrefringencia fotoinducida. Esto se atribuye a los problemas de uniformidad de las capas de azopolímero, en particular, la mezcla de PDMS y azobenceno genera depósitos no uniformes a lo largo de las regiones adelgazadas. Esto indica que el proceso la creación del azopolímero tiene que optimizarse. Algunas opciones que se explorarán en el futuro incluyen mejoras en el compuesto azopolimérico y evaluar la técnica de difusión de azobenceno en el PDMS utilizando varios solventes. De igual manera se deben estudiar los efectos de la aplicación de varias capas de

polímero y estudiar los efectos que esta estructura tendría en el desempeño de los dispositivos.

Aunque los recubrimientos de azopolímero realizados mediante la máquina fabricada no presentaron respuesta a los estímulos ópticos, el proceso de recubrimiento de las fibras empleando solamente PDMS fue exitoso. Por lo tanto, se logró realizar recubrimientos poliméricos con las características deseadas sobre los dispositivos de fibras óptica. Este proceso puede además utilizarse con distintos polímeros funcionalizados para diversas finalidades. Adicionalmente, la máquina brinda versatilidad en los aspectos de velocidad de operación, longitud de los dispositivos a recubrir y control computarizado, características que son también importantes para distintos materiales útiles para la creación de dispositivos de fibra óptica.

En resumen, en este trabajo se logró la fabricación de dispositivos de fibra óptica con recubrimientos de azopolímero. Se abarcaron los procesos de fabricación de los dispositivos de fibra óptica, el proceso de recubrimiento de los dispositivos con polímero, incorporación de las moléculas de azobenceno y excitación de los dispositivos creados. Se realizó también la caracterización detallada de todas estas etapas y la metodología de fabricación se estableció de tal manera que se obtuvieron procesos sencillos, repetibles y con posibilidad de ser utilizados para la fabricación de otros dispositivos.

Existen diversas líneas de investigación que se podrán explorar en el futuro tomando como punto de partida los resultados obtenidos. Por ejemplo, en este trabajo se utilizaron los azobencenos que han sido reportados más comúnmente en diversas aplicaciones. Sin embargo, hay una gran variedad de azopolímeros con distintos efectos fotoinducidos, los cuales pueden ser incorporados a los dispositivos propuestos en este trabajo haciendo uso de las metodologías descritas en los capítulos anteriores. También se debe mejorar el control de la máquina diseñada, el cual pueda brindar una mayor versatilidad en las velocidades de

CONCLUSIONES

operación, así como poder realizar un proceso de recubrimiento con velocidades variables para lograr espesores distintos a lo largo de la fibra.

REFERENCIAS

1. Sandra Pascual Vázquez y Juan Hernández Cordero; "Fibras ópticas láser: cómo cocinar vidrio para generar luz;" *Materiales Avanzados*; 2007; Núm. 9; 5-14.
2. Thomas G. Giallorenzi, Joseph A. Bucaro, Anthony Dandridge, G. H. Sigel, JR., James H. Cole, Scott C. Rashleigh y Richard G. Priest, "Optical Fiber Sensor Technology," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. Qe-18, No. 4, Abril, 1982.
3. Jürgen C. Schlesinger, "Optical Fibers Research Advances"; Nova Science Publishers, Inc.; 2008.
4. R. Ulrich and A. Simon, "Polarization optics of twisted single-mode fibers," *Appl. Opt.*, vol. 18, no. 13, pp. 2241–2251, 1979.
5. J. D. Bull, N. A. F. Jaeger, H. Kato, M. Fairburn, A. Reid y P. Gha-nipour, "40 GHz electro-optic polarization modulator for fiber optic communications systems," in *Proc. SPIE Photon. North 2004: Opt. Compon. Devices*, 2004, vol. 5577, pp. 133–143.
6. X. Chen, L. Yan y X. S. Yao, "Waveplate analyzer using binary magneto-optic rotators," *Opt. Exp.*, vol. 15, no. 20, pp. 12989–12994, 2007.
7. E. Rivera, T. García, R. Salazar y J. Dircio; "Los azopolímeros: materiales inteligentes con respuesta a la luz," *Bol. Soc. Quím. Méx.*, 24-34, 2008.
8. Arri Priimägi, "Polymer-azobenzene complexes: from supramolecular concepts to efficient photo responsive polymers" *Doctoral Dissertation*, Helsinki University of Technology, TKK-DISS-2648, HSE Print, 2009.
9. L. Brzozowski y E. H. Sargent, "Azobenzenes for photonic network applications: Third-order nonlinear optical properties," *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, vol. 12, pp. 483–489, 2001.
10. N. K. Viswanathan, D. Y. Kim, S. Bian, J. Williams, W. Liu, L. Li, L. Samuelson, J. Kumar y S. K. Tripathy, "Surface relief structures on azopolymer films," *J. Mater. Chemistry*, vol. 9, pp. 1941–1955, 1999.
11. E. Hetch, "Óptica," *Addisson Wesley*, 4ª edición, 2002.
12. B. Saleh y M. Teich; "Fundamentals of Photonics," *Wiley Interscience*, 2007.
13. Keigo Izuka, "Elements of photonics," *Wiley Interscience*, Vol. 2, 2002.

14. Joseba Zubia y Jon Arrue, "Plastic optical fibres. An introduction to their Tecjnological processes and aplications," Academic Press, Optical Fiber technology 7, pp. 101-140, España, 2001.
15. Govind P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics," Academic Press, 3^a edición, 2001.
16. Alexis Méndez y T. F. Morse, "Specialty Optical Fibers Handbook," Academic Press, 2007.
17. J. S. Sanghera y I. D. Aggarwal, "Active and passive chalcogenide glass optical fibers for IR applications: a review," Journal of Non-Crystalline Solids, 256 & 257, pp. 6-16, 1999.
18. Moh. Yasin, Sulaiman W. Harun y Hamzah Arof, "Recent progress in optical fiber research," InTech, 2012.
19. Moh. Yasin, Sulaiman W. Harun y Hamzah Arof, "Optical fiber communications and devices," InTech, 2012.
20. Terutoshi Kanamori, Yukio Terunuma, Shiro Takahashi y Tadashi Miyashita, "Chalcogenide Glass Fibers for Mid-Infrared Transmission," Journal of Lightwave Technology, Vol. LT-2, No. 5, 1984.
21. J. S. Sanghera. C. M. Florea, L. B. Shaw, P. Pureza, V. Q. Nguyen, M. Bashkansky, Z. Dutton y I. D. Aggarwal, "Non-linear properties of chalcogenide glasses and fibers," Journal of Non-Crystalline Solids, 354, pp. 462-467, 2008.
22. J. Nishii, S. Morimoto, I. Inagawa, R. Iizuka, T. Yamashita y T. Yamagishi, " Recent advances and trends in chalcogenide glass fiber technology: a review," Journal of Non-Crystalline Solids, 140, pp. 199-208, 1992.
23. A. M. Andriesh, V. V. Ponomar, V. L. Smirnov y A. V. Mironos, "Applications of chalcogenide glasses in integrated and fiber optics (review)," Sov. J. Quantum Electron, 16 (6), pp. 721-736, 1986.
24. A. Zakery y S. R. Elliott, "Optical properties and applications of chalcogenide glasses: a review, " Journal of Non-Crystalline Solids, 330, pp.1-12, 2003.
25. R. Rangel-Rojo, T. Kosa, E. Hajto, P. J. S. Ewen, A. E. Owen, A. K. Kar y B. S. Wherrett, "Near-infrared optical nonlinearities in amorphous chalcogenides," Optics Communications, Vol. 109, tomos 1-2, pp. 145-150, 1994.
26. Woong-Gyu Jung, Sang-Woo Kim, Kwang-Taek Kim, Eung-Soo Kim y Shin-Won Kang, "High-Sensitivity Temperature Sensor Using a Side-Polished Single-Mode Fiber Covered With the Polymer Planar Waveguide," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 13, No. 11, 2001.

-
27. Raoul Stöckle, Christian Fokas, Volker Deckert, Renato Zenobi, Beate Sick, Bert Hecht y Urs P. Wild, "High-quality near-field optical probes by tube etching," *Applied Physics Letters*, Vol. 75, No. 2, pp. 160-162, 1999.
 28. Pavel Polynkin, Alexander Polynkin, N. Peyghambarian y Masud Mansuripur. "Evanescent field-based optical fiber sensing device for measuring the refractive index of liquids in microfluidic channels," *Optics Letters*, Vol. 30, No. 11, 2005.
 29. Julie Keirsse, Catherine Boussard-Plédel, Olivier Loreal, Olivier Sire, Bruno Bureau, Bruno Turlin, Patricia Leroyer y Jacques Lucas, "Chalcogenide glass fibers used as biosensors," *Journal of Non-Crystalline Solids*, 326 & 327, pp. 430–43, 2003.
 30. Chams Baker y Martin Rochette, "Highly nonlinear hybrid AsSe-PMMA microtapers," *Optics Express*, Vol. 18, No. 12, 2010.
 31. Almeria Natansohn y Paul Rochon, "Photoinduced Motions in Azo-Containing Polymers," *Chem. Rev.* 102, pp. 4139 –4175, 2002.
 32. Alan E. Tonelli, C. Maurice Balik y Mohan Srinivasarao, "Improving Textiles with Cyclodextrins," NTC Project: M06-NS02, NCSU, 2008.
 33. C. R. Mendonça, L. Misoguti, A. A. Andrade, S. B. Yamaki, V. D. Dias, T. D. Z Atvars y O. N. Oliveira Jr., "Photoinduced birefringence in di-azo compounds in polystyrene and poly(methyl methacrylate) guest–host systems," *Optical Materials* 30, 216–221, 2007.
 34. Jeong Joon Park, "Photo-induced molecular reorientation and photothermal heating as mechanisms of the intensity-dependent refractive index in dye-doped polymers," Doctoral dissertation, Washington State University, Department of Physics and Astronomy, 2006.
 35. Osvaldo N. Oliveira Jr., David S. dos Santos Jr., Débora T. Balogh, Valtencir Zucolotto y Cleber R. Mendonça, "Optical storage and surface-relief gratings in azobenzene-containing nanostructured films," *Advances in Colloid and Interface Science* 116, pp. 179–192, 2005.
 36. Amado M. Velázquez-Benítez y Juan Hernández-Cordero, "Optically Driven All-Fiber Polarization Rotator," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 29, No. 11, pp. 1672-1677, 2011.
 37. A. Priimägi, F. J. Rodríguez, M. Kauranen y O. Ikkala, "Enhanced photoinduced birefringence in polymer–dye complexes: hydrogen bonding makes a difference," *Appl. Phys. Lett.* 90, 121103, 2007.

38. S. Choi, K. R. Kim, K. Oh C. M. Chun, M. J. Kim, S. J. Yoo y D. Y. Kim, "Interferometric inscription of surface relief gratings on optical fiber using azo polymer film," *Appl. Phys. Lett.* volumen 3, número 6, 2003.
39. Kenji Kitaoka, Jinhai Si, Tsuneo Mitsuyu y Kazuyuki Hirao, "Photoinduced Highly Efficient Second-Harmonic Generation in Azo-Dye-Doped Thick Films," *Jpn. J. Appl. Phys., Part2*, No. 4B, Vol. 39, pp. L 363–L 365, 2000.
40. B. Abbas y M. Alshikh Khalil, "Investigation of Dynamic Dichroism Properties of Disperse Orange 11 Molecules and Azo-Molecules Doped in Poly(Methyl Methacrylate) Thin Films: A Comparison," *Acta Physica Polonica A*, Vol.117, No. 6, 2010.
41. Iliana Ernestina Medina Ramírez, Luis Enrique Arámbula Miranda, Felipe Rizo Díaz y Alejandro Román Loera, "Diseño y fabricación de un aparato para el depósito de películas delgadas por el método de rotación," *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, No. 45, pp. 44-49, 2009.
42. Kyoungjin Kim, "Analysis of Capillary Coating Die Flow in an Optical Fiber Coating Applicator," *World Academy of Science, Engineering and Technology* 79, pp. 384-389, 2011
43. L. E. Scriven, "Physics and applications of dip coating and spin coating", *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 121, pp. 717-729, 1988.
44. Steven J. Weinstein y Kenneth J. Ruschak, "Coating Flows," *Annu. Rev. Fluid Mech.* 36, pp. 29–53, 2005.
45. L. J. Crawford y N. R. Edmonds, "Calculation of film thickness for dip coated antireflective films," *Thin Solid Films* 515, pp. 907 – 910, 2005.
46. Steven J. Weinstein y Kenneth J. Ruschak, "Dip coating on a planar non-vertical substrate in the limit of negligible surface tension," *Chemical Engineering Science* 56, pp. 4957–4969, 2001.
47. Andrea Galtarossa y Curtis R. Menyuk, "Polarization Mode Dispersion," Springer Science+Business Media Inc., E. U., 2005.
48. A. R. Boyain y Goitia, A. N. Starodumov, D. Monzon-Hernandez, V. N. Filippov, y P. Gavrilovic, "Birefringence measurement in double-clad fiber lasers with large cross section," *Applied Optics*, Vol. 39, No. 14, pp. 2259-2263, 2000.
49. J. P. F. Wooler, "Fiberpaedia," Fibercore Limited, UK, 2009.
50. Jay Dlutowski, Andres M. Cardenas-Valencia, David Fries y Larry Langebrake, "Refractive Index Determination of Transparent Polymers: Experimental Setup for Multi-Wavelength Determination and Calculation at Specific Frequencies Using Group

-
- Contribution Theory," *Journal of Chemical Education*, Vol. 83, No. 12, pp. 1867-1870, 2006.
51. Chams Baker y Martin Rochette, "A generalized heat-brush approach for precise control of the waist profile in fiber tapers," *Optical Materials Express*, Vol. 1, No. 6, pp. 1065-1076, 2011.
 52. L. Tichy, H. Ticha, P. Nagels, R. Callaerts, R. Mertens y" M. Vlcek, "Optical properties of amorphous As–Se and Ge–As–Se thin films," *Materials Letters* 39, pp. 122–128, 1999.
 53. A Zakery, Low loss waveguides in pulsed laser deposited arsenic sulfide chalcogenide films," *J. Phys. D: Appl. Phys.* 35, pp. 2909–2913, 2002.
 54. A. Ganjoo y K. Shimakawa, "Dynamics of photodarkening in amorphous chalcogenides," *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, Vol. 4, No. 3, pp. 595 - 604, 2002.
 55. V. Lyubin y M. Klebanov, "Photoinduced generation and reorientation of linear dichroism in AsSe glassy film," *Physical Review B*, Vol. 53, No. 18, 1996.
 56. Raja Ahmad, Martin Rochette y Chams Baker, "Fabrication of Bragg gratings in sub-wavelength diameter As_2Se_3 chalcogenide wires," *Optics Letters*, Vol.36, No. 15, pp. 2886-2888, 2011.
 57. S. Ahmadi Kandjani, R. Barille, S. Dabos-Seignon, J.-M. Nunzi, E. Ortyl y S. Kucharski, "Multistate polarization addressing using a single beam in an azo polymer film," *Optics Letters*, Vol. 30, No. 15, pp. 1986-1988, 2005.
 58. Noreen Thomas y A. H. Windle, "Transport of methanol in poly(methyl methacrylate)," *Polymer*, Vol. 19, pp. 255-265, 1977.
 59. J. C. Arnold, "The effects of diffusion on environmental stress crack initiation in PMMA," *Journal of Materials Science* 33, pp. 5193-5204, 1998.
 60. Ping I. Lee y Cherng-Ju Kim, "Effect of geometry on solvent front penetration in glassy polymers," *Journal of Membrane Science* 65, pp. 77-92, 1992.
 61. Craig D. Poole y David L. Favin, "Polarization-Mode Dispersion Measurements Based on Transmission Spectra Through a Polarizer," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 12, No. 6, pp. 917-929, 1994.
 62. C. R. Mendonça, D. S. dos Santos Jr., D. T. Balogh y A. Dhanabalan, "Optical storage in mixed Langimur-Blodgett (LB) films of azopolymers and cadmium sterate," *Polymer* (42), pp. 6539-6544, 2001.
 63. Sang-Shin Lee, Sean Garner, Antao Chen, Vadim Chuyanov, William H. Steier, Lan Guo, Larry R. Dalton y Sang-Yung Shin, "Patterned birefringence by photoinduced

- depoling in electro-optic polymers and its application to a waveguide polarization splitter," *Applied Physics Letters*, Vol. 73, No. 21, pp. 3052-3054, 1998.
64. Jorge Alonso Soto Olmos, "Introducción de rejillas de periodo largo en fibras ópticas mediante la aplicación de dispositivos MEMS de polímero," Tesis de Maestría, Posgrado de Ingeniería, UNAM, 2011.
 65. Consulta: Industrial Circuits Application Note, "Stepper Motor Basics," <http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/StepperMicrostep.pdf>, 30 de mayo del 2011.
 66. M. Hautefeuille, J. G. Lopez Cortes, M. C. Ortega Alfaro, M. P. Carreon Castro y V. Velazquez, "Fabrication of a simple versatile micro-positioning setup for automated soft lithography," *Review Of Scientific Instruments* 82, 116104, 2011.
 67. Kyung-Rak Sohn, Kwang-Taek Kim y Jae-Won Song, "Optical fiber sensor for water detection using a side-polished fiber coupler with a planar glass-overlay-waveguide," *Sensors and Actuators A* 101, pp. 137-42, 2002.
 68. F. S. Goucher y H. Ward, The thickness of liquid films formed on solid surfaces under dynamic condition," *Phil. Mag.* 44, pp. 1002-1014, 1922.
 69. L. D. Landau y B. Levich, " Dragging of a liquid by a moving plate," *Acta Physicochim USSR* 17, pp. 42-54, 1942.
 70. Alain De Ryck y David Quere, "Inertial coating of a fibre," *J. Fluid Mech.*, Vol. 311, pp. 219-237, 1996.
 71. Consulta: Solid surface energy data (SFE) for common polymers, <http://www.surface-tension.de/solid-surface-energy.htm>, 28 de mayo del 2012.
 72. A. Santiago-Alvarado y S. Vázquez-Montiel, " Propiedades físico-químicas de membranas PDMS empleadas en lentes líquidas," *Superficies y Vacío* 22(3), pp. 61-66, 2009.
 73. Jessamine Ng Lee, Cheolmin Park y George M. Whitesides, "Solvent Compatibility of Poly(dimethylsiloxane)-Based Microfluidic Devices," *Analytical Chemistry*, Vol. 75, No. 23, pp. 6544-6554, 2003.

APÉNDICE A:

Especificaciones de las fibras de vidrio calcógeno
(AsSe) CoreActive

Infrared Fiber Products

PRODUCT DESCRIPTION

CorActive delivers a full range of Infrared Transmission (IRT) optical fibers to address beam delivery requirements in the mid-IR region. CorActive's IRT series of infrared fiber solutions have been specifically designed to provide ultra low loss optical transmission while offering excellent mechanical properties. CorActive's mid-IR fibers enable significant performance improvements in many applications that have relied on free space optics, low quality fiber or other beam delivery methods.

CorActive mid-IR transmission fiber is manufactured under an exclusive license agreement with the U.S. Naval Research Laboratory (NRL). NRL holds several key patents on infrared fiber manufacturing technologies and processes.

Two chalcogenide glass compositions are offered:

IRT-SU: Sulphide glass (As_2S_3) series offer the lowest absorption in the 2-6 μm region.

IRT-SE: Selenide glass (As_2Se_3) series features the broadest transmission range from 2 μm up to 9 μm .

ADVANTAGES

- Lowest optical losses on the market
- High power handling
- Wide operating range (up to 9 μm)
- Outstanding flexibility and strength
- Proof tested for increased long-term reliability
- Highly reliable and consistent manufacturing process allowing production runs in the km range

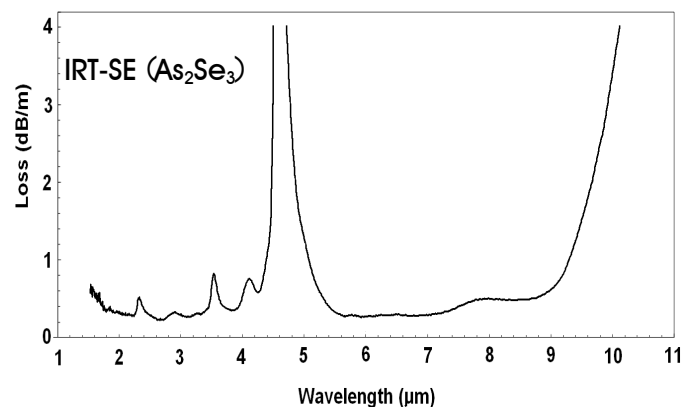
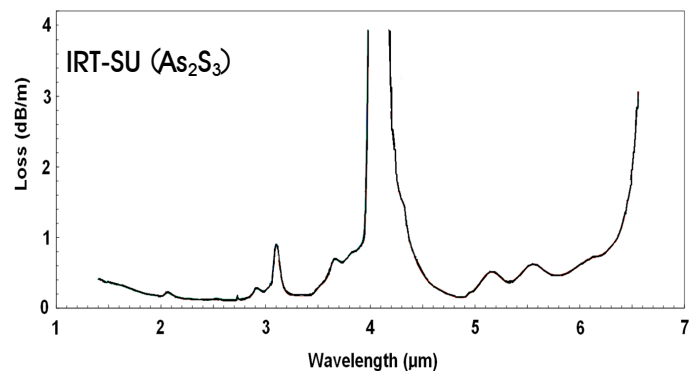
APPLICATIONS

- IR Countermeasures
- FT-IR Spectroscopy
- Mid-IR Laser Beam Delivery
- Sensing and Environmental
- Non-Linear Applications

SPECIFICATIONS

Optical	IRT-SU	IRT-SE
Transmission Range (μm)	2 to 6	2 to 9
Typical Core Refractive Index	2.4	2.7
Typical Attenuation (dB/m)	0.15 @ 2.7 μm	0.35 @ 7 μm
Geometrical&Mechanical		
Core Non-Circularity (%)	< 1	< 1
Core/Clad Concentricity Error (μm)	< 5	< 5
Protective Coating Material	Single Coat Acrylate	Single Coat Acrylate
Tensile Proof Test (kpsi)	> 15	> 15
Environmental		
Chemical Resistance	Insoluble in water, concentrated hydrochloric acid, non-oxidizing acids, gasoline, toluol, alcohol and acetone	

TRANSMISSION SPECTRA



AVAILABLE MODELS

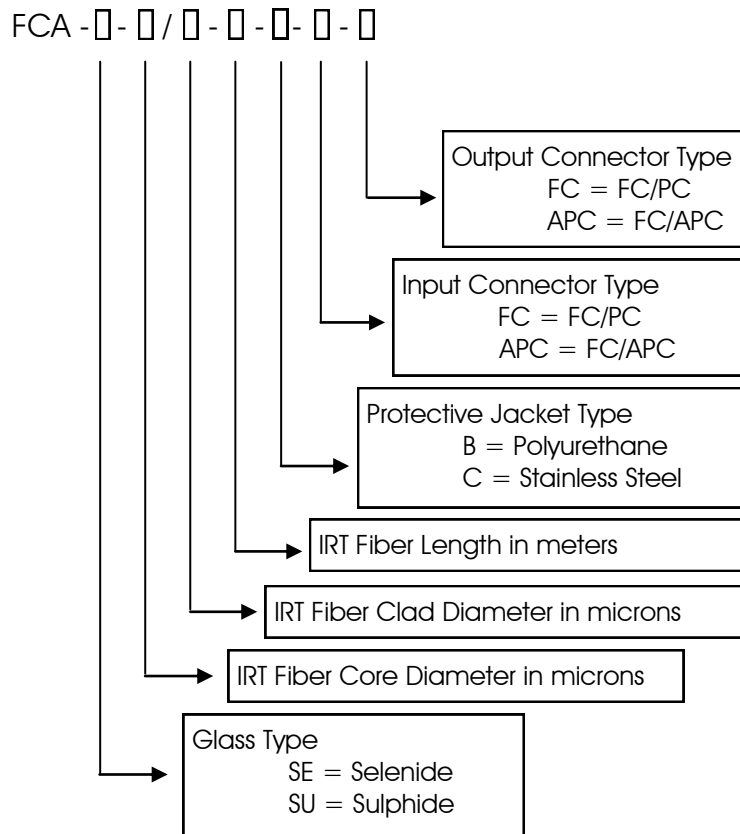
Model Number	Glass Composition	Core Diameter (μm)	Clad Diameter (μm)
IRT-SE-6/170	As ₂ Se ₃	6	170
IRT-SE-100/170	As ₂ Se ₃	100	170
IRT-SU-7/170	As ₂ S ₃	7	170
IRT-SU-70/170	As ₂ S ₃	70	170
IRT-SU-100/170	As ₂ S ₃	100	170

Other core/clad dimensions are available upon request.

FIBER CABLE ASSEMBLIES

Cable assemblies are offered in different configurations.

FIBER CABLE ORDERING INFORMATION



Other cable models are available upon request.

Important Notice: CorActive strongly recommends to use free-space coupling and does not recommend butt coupling to another optical fiber since it may damage the IRT fiber facet.

A proprietary optical fiber manufacturing method ensures that fiber impurities and optical defects are removed prior to fiber drawing. This ensures the lowest loss and highest quality optical transmission of mid-IR wavelengths in the 2 to 9 μm range.

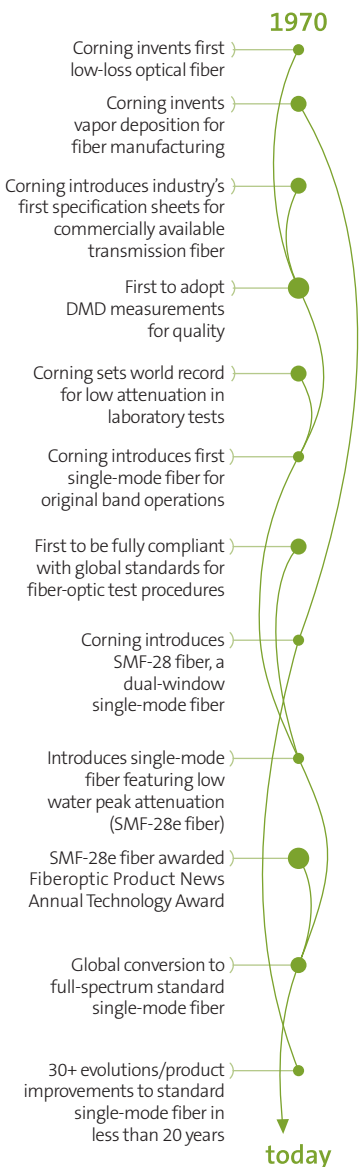
CorActive
Specialty Optical Fiber Manufacturer

CorActive High-Tech, Inc.
2700 Jean-Perrin, Suite 121
Quebec City, QC
Canada G2C 1S9
Phone : 1-866-845-2466
E-mail :
sales@coractive.com
www.coractive.com

APÉNDICE B:

Especificaciones de las fibras de vidrio de dióxido de silicio (SiO₂)

Corning® SMF-28e® Optical Fiber Product Information



Evolving Networks Now

At Corning Optical Fiber, we are continually pushing single-mode fiber to new performance levels. Building on our leadership position in the optical fiber industry, Corning is evolving our already formidable products to meet customer requirements like never before. As the first manufacturer to upgrade standard single-mode fiber worldwide, we're providing our customers with greater value today and in the future. Corning® SMF-28e® optical fiber is:

- * Corning's standard single-mode fiber offering, delivering optimized capability, network design flexibility and confidence in long-term performance
- * The world's most widely demanded full-spectrum fiber
- * In compliance with or exceeding the industry's most stringent requirements, including:
 - ITU-T G.652 (Categories A, B, C & D)
 - IEC Specifications 60793-2-50 Type B1.3
 - TIA/EIA 492-CAAB
 - Telcordia's GR-20
 - ISO 11801 OS2
- * The industry leader in comprehensive standard single-mode fiber specifications

As Corning's premier standard single-mode fiber, SMF-28e fiber is one in a long line of optical innovations. Corning SMF-28e, an ITU-T G.652.D-compliant optical fiber, is expanding the capability of the world's most dynamic metropolitan and access networks.

PI1344 | ISSUED: DECEMBER 2007
SUPERSEDES: MAY 2007

ISO 9001 REGISTERED



Building on a Solid Foundation

Corning SMF-28e fiber has the same reliability, splicing performance and easily strippable coating that customers have trusted in Corning® SMF-28® fiber, the long-standing industry benchmark for quality and performance. SMF-28e fiber offers enhanced capabilities and specifications, while providing full compatibility and interoperability with legacy standard single-mode networks.

Our 30 years of experience are reflected in this evolution of standard single-mode fiber, which not only meets and exceeds the highest industry standards, but also provides an excellent combination of optical, environmental, dimensional and mechanical specifications.

Confidence for Today and the Future

SMF-28e fiber is optimized for metropolitan and access networks that support all broadband applications. SMF-28e fiber has been a qualified product offering since 2001 and has been successfully deployed in communications networks worldwide, proving its performance capabilities in diverse applications.

As the ideal fiber choice for rapidly growing and dynamically changing metropolitan and access networks, SMF-28e fiber provides immediate value to the customer. It is one of the easiest fibers to handle and install because of its world-class geometry, CPC® coating technology and bending specifications. Additionally, its full-spectrum capability enables flexible network designs, increases fiber capacity and prepares network infrastructures for emerging technologies and architectures.

Corning® Optical Fiber – The Measure of Trust

Corning's Service Advantage

Corning Optical Fiber delivers the world's most comprehensive package of innovative products and services, including:

- * Worldwide sales support and door-to-door customer service
- * Full range of fibers and special order capabilities
- * Specialized support from technical experts
- * Extensive fiber delivery capabilities with proven success rates
- * Real-time, Web-based customer information
- * Dedicated account support for our long-term supply customers
- * Fiber support services and technical information for end-customers

At Corning Optical Fiber, we strive to provide the best possible customer service and technical support – before, during and after the sale. As a customer, you'll benefit from our established and extensive support infrastructure that's ready to meet your specific needs.

Corning's Product Advantage

Our enhanced, dual acrylate CPC® coatings provide excellent protection. Designed to be mechanically stripped, with an outside diameter of 245 µm, they are optimized for many single- and multi-fiber cable designs, including loose tube, ribbon, slotted core and tight buffer cables.

Corning is committed to product excellence and meeting the evolving needs of our customers. As updates to fiber characteristics or performance specifications become available, they will be posted on the Corning Optical Fiber website at www.corning.com/opticalfiber

Optical Specifications

Fiber Attenuation

Maximum Attenuation

Wavelength (nm)	Maximum Value* (dB/km)
1310	0.33 – 0.35
1383**	0.31 – 0.35
1550	0.19 – 0.20
1625	0.20 – 0.23

*Maximum specified attenuation value available within the stated ranges.

**Attenuation values at this wavelength represent post-hydrogen aging performance.

Alternate attenuation offerings available upon request.

Attenuation vs. Wavelength

Range (nm)	Ref. λ (nm)	Max. α Difference (dB/km)
1285 – 1330	1310	0.03
1525 – 1575	1550	0.02

The attenuation in a given wavelength range does not exceed the attenuation of the reference wavelength (λ) by more than the value α .

Macrobend Loss

Mandrel Diameter (mm)	Number of Turns	Wavelength (nm)	Induced Attenuation* (dB)
32	1	1550	≤ 0.05
50	100	1310	≤ 0.05
50	100	1550	≤ 0.05
60	100	1625	≤ 0.05

*The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified diameter.

Point Discontinuity

Wavelength (nm)	Point Discontinuity (dB)
1310	≤ 0.05
1550	≤ 0.05

Cable Cutoff Wavelength (λ_{ccf})

$$\lambda_{ccf} \leq 1260 \text{ nm}$$

Mode-Field Diameter

Wavelength (nm)	MFD (μm)
1310	9.2 ± 0.4
1550	10.4 ± 0.5

Dispersion

Wavelength (nm)	Dispersion Value [ps/(nm \cdot km)]
1550	≤ 18.0
1625	≤ 22.0

Zero Dispersion Wavelength (λ_0): $1302 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1322 \text{ nm}$

Zero Dispersion Slope (S_0): $\leq 0.089 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$

Polarization Mode Dispersion (PMD)

	Value (ps/ $\sqrt{\text{km}}$)
PMD Link Design Value	$\leq 0.06^*$
Maximum Individual Fiber	≤ 0.2

*Complies with IEC 60794-3: 2001, Section 5.5, Method 1, (m = 20, Q = 0.01%), September 2001.

The PMD link design value is a term used to describe the PMD of concatenated lengths of fiber (also known as PMD_Q). This value represents a statistical upper limit for total link PMD. Individual PMD values may change when fiber is cabled. Corning's fiber specification supports network design requirements for a 0.20 ps/ $\sqrt{\text{km}}$ maximum PMD.

Dimensional Specifications

Glass Geometry

Fiber Curl	$\geq 4.0 \text{ m}$ radius of curvature
Cladding Diameter	$125.0 \pm 0.7 \mu\text{m}$
Core-Clad Concentricity	$\leq 0.5 \mu\text{m}$
Cladding Non-Circularity	$\leq 0.7\%$

Coating Geometry

Coating Diameter	$245 \pm 5 \mu\text{m}$
Coating-Cladding Concentricity	$< 12 \mu\text{m}$

Environmental Specifications

Environmental Test	Test Condition	Induced Attenuation 1310 nm, 1550 nm & 1625 nm (dB/km)
Temperature Dependence	-60°C to $+85^\circ\text{C}^*$	≤ 0.05
Temperature Humidity Cycling	-10°C to $+85^\circ\text{C}^*$ up to 98% RH	≤ 0.05
Water Immersion	$23^\circ \pm 2^\circ\text{C}$	≤ 0.05
Heat Aging	$85^\circ \pm 2^\circ\text{C}^*$	≤ 0.05
Damp Heat	85°C at 85% RH	≤ 0.05

*Reference temperature = $+23^\circ\text{C}$

Operating Temperature Range: -60°C to $+85^\circ\text{C}$

How to Order

Contact your sales representative,
or call the Optical Fiber Customer
Service Department:
Ph: 607-248-2000 (U.S. and Canada)
+44-1244-287-437 (Europe)
Email: opticalfibres@corning.com
Please specify the fiber type, attenuation
and quantity when ordering.

Mechanical Specifications

Proof Test

The entire fiber length is subjected to a tensile stress ≥ 100 kpsi (0.7 GPa)*.

*Higher proof test levels available.

Length

Fiber lengths available up to 50.4* km/spool.

*Longer spliced lengths available.

Performance Characterizations

Characterized parameters are typical values.

Core Diameter	8.2 μm
Numerical Aperture	0.14 <i>NA is measured at the one percent power level of a one-dimensional far-field scan at 1310 nm.</i>
Zero Dispersion Wavelength (λ_0)	1313 nm
Zero Dispersion Slope (S_0)	0.086 ps/(nm ² •km)
Refractive Index Difference	0.36%
Effective Group Index of Refraction (N_{eff})	1310 nm: 1.4677 1550 nm: 1.4682
Fatigue Resistance Parameter (N_d)	20
Coating Strip Force	Dry: 0.6 lbs. (3N) Wet, 14-day room temperature: 0.6 lbs. (3N)
Rayleigh Backscatter Coefficient (for 1 ns Pulse Width)	1310 nm: -77 dB 1550 nm: -82 dB
Individual Fiber Polarization Mode Dispersion	0.02 ps/ $\sqrt{\text{km}}$

Formulas

Dispersion

$$\text{Dispersion} = D(\lambda) \approx \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \text{ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}),$$

for 1200 nm \leq λ \leq 1625 nm

λ = Operating Wavelength

Cladding Non-Circularity

$$\text{Cladding Non-Circularity} = \left[1 - \frac{\text{Min. Cladding Diameter}}{\text{Max. Cladding Diameter}} \right] \times 100$$

Corning Incorporated
www.corning.com/opticalfiber

One Riverfront Plaza
Corning, NY 14831
U.S.A.

Ph: 607-248-2000

Email: cofic@corning.com

Corning, SMF-28, SMF-28e and CPC are registered trademarks of Corning Incorporated, Corning, N.Y.

Any warranty of any nature relating to any Corning optical fiber is only contained in the written agreement between Corning Incorporated and the direct purchaser of such fiber.

©2007, Corning Incorporated

APÉNDICE C:

Especificaciones del PDMS Sylgard 184, Dow
Corning

Información sobre los Encapsulantes de Silicona

Dow Corning[®]

Las Siliconas y la Electrónica

La protección segura y a largo plazo de circuitos y componentes electrónicos sensibles se ha vuelto muy importante en muchas de las aplicaciones electrónicas delicadas y especializadas de hoy en día. Las siliconas funcionan como aislantes dieléctricos duraderos, barreras contra contaminantes ambientales y como protección contra el impacto y la absorción de la vibración en un amplio rango de temperaturas y humedad.

Además de mantener sus propiedades físicas y eléctricas sobre un amplio rango de condiciones, las siliconas son resistentes a la degradación con ozono y radiación ultravioleta, poseen buena estabilidad química y están disponibles en una gran variedad de formas útiles como recubrimientos conformables, encapsulantes y adhesivos. Con su amplio rango de productos de uso general y especializados, Dow Corning le ofrece una selección de materiales para todas sus necesidades.

DESCRIPCIÓN

Los encapsulantes de silicona *Dow Corning*[®] se presentan en kits de dos componentes líquidos compuestos de:

Proporción de la mezcla (en peso o volumen)	Componentes (presentación)
1:1	Parte A/Parte B
10:1	Base/Agente de curado

Cuando los componentes líquidos se mezclan completamente, la mezcla se cura a un elastómero flexible adecuado para su uso en la protección de elementos electrónicos y eléctricos. Los encapsulantes de silicona *Dow Corning* se curan sin reacción exotérmica a una velocidad constante independiente del grosor de la sección o del grado de confinamiento. Los elastómeros de silicona *Dow Corning* no necesitan proceso de pos-curado y pueden ser utilizados inmediatamente después de la terminación del programa de curado en un rango de temperatura -45 a 200°C (-49 a 392°F). Algunos materiales han sido clasificados por Underwriters Laboratories y cumplen con especificaciones militares. Los encapsulantes de silicona estándares requieren un tratamiento de la superficie con imprimación además de una limpieza a fondo para adherirse, mientras que los encapsulantes de silicona sin imprimación sólo necesitan una limpieza de la superficie.

Encapsulantes de silicona
<p>Tipo Elastómero de silicona bicomponente</p>
<p>Estado físico Líquido fluido que cura a un elastómero flexible</p>
<p>Propiedades especiales Velocidad de curado constante, independiente del grosor de la sección o del grado de confinamiento; el rango de uso es de -45 a 200°C (-49 a 392°F) y no requiere proceso de pos-curado.</p>
<p>Usos principales Protección de dispositivos electrónicos y eléctricos</p>

Producto	Descripción	Características
Encapsulantes de silicona		
<i>Sylgard</i> [®] 160 Elastómero de silicona	Bajo costo; buena conductividad térmica	Dos componentes; proporción de mezcla 1:1, curado a temperatura ambiente o curado rápido por calor; encogimiento mínimo; curado no exotérmico; sin solventes o subproductos de curado; reparable; buenas propiedades dieléctricas; curado en profundidad; elastómero flexible.
<i>Sylgard</i> [®] 165 Elastómero de silicona	Curado rápido; bajo costo; buena conductividad térmica	
<i>Sylgard</i> [®] 170 Elastómero de silicona	Baja viscosidad	
<i>Sylgard</i> [®] 170 Elastómero de silicona de curado rápido	Curado rápido; baja viscosidad	
<i>Dow Corning</i> [®] 96-082 A y B Encapsulante	Muy baja viscosidad; de combustión lenta; no se funde; autoextinguible; vida prolongada de la mezcla; útil en amplio rango de temperaturas	
<i>Sylgard</i> [®] 182 Elastómero de silicona	Transparente; vida prolongada de la mezcla; curado por calor	Dos componentes; proporción de mezcla 10:1; encogimiento mínimo; curado no exotérmico; sin solventes o subproductos de curado; curado en profundidad; reparable; buenas propiedades dieléctricas; elastómero flexible.
<i>Sylgard</i> [®] 184 Elastómero de silicona	Transparente; curado a temperatura ambiente o curado rápido por calor	
<i>Sylgard</i> [®] 186 Elastómero de silicona	Transparente; curado a temperatura ambiente o curado rápido por calor; alta resistencia al desgarre	
<i>Dow Corning</i> [®] 3-6121 Elastómero encapsulante	Desempeño a temperaturas por debajo de -65°C (-85°F); transparente; alta resistencia al desgarre y a la tracción; curado a temperatura ambiente y curado rápido por calor; alto índice de refracción	
Encapsulantes de silicona sin imprimación		
<i>Sylgard</i> [®] 275 Elastómero de silicona	Excelente adhesión sin imprimación; curado por calor; elastomérico	Dos componentes; proporción de mezcla 1:1, encogimiento mínimo; curado no exotérmico; sin solventes o subproductos de curado; reparable; buenas propiedades dieléctricas.
<i>Dow Corning</i> [®] 3-6642 Adhesivo termoconductor	Excelente conductividad térmica; autoimprimado; líquido de baja viscosidad; elastomérico	
<i>Dow Corning</i> [®] 3-8264 Adhesivo de silicona sin imprimación	Excelente adhesión sin imprimación; curado por calor; elastomérico	
<i>Dow Corning</i> [®] 567 Encapsulante de silicona sin imprimación	Curado por calor; adhesión sin imprimación; elastomérico	

Producto	Usos Principales	Métodos de aplicación	Curado ^{1,2}
Encapsulantes de silicona			
<i>Sylgard</i> [®] 160 Elastómero de silicona	Aplicaciones aislantes generales: generadores, conexiones, sensores, controles industriales, transformadores, amplificadores resistencias de alto voltaje, interruptores	Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 1:1 en peso o volumen; mezcla y aplicación automatizada; mezclado manual.	24 horas a 25°C (77°F) 10 minutos a 100°C (212°F) 5 minutos a 150°C (302°F)
<i>Sylgard</i> [®] 165 Elastómero de silicona		Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 1:1 en peso o volumen; mezcla y aplicación automatizada.	5 minutos a 25°C (77°F)
<i>Sylgard</i> [®] 170 Elastómero de silicona		Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 1:1 en peso o volumen; mezcla y aplicación automatizada; mezclado manual.	24 horas a 25°C (77°F) 20 minutos a 70°C (158°F) 15 minutos a 85°C (185°F) 10 minutos a 100°C (212°F)
<i>Sylgard</i> [®] 170 Elastómero de silicona de curado rápido		Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 1:1 en peso o volumen; mezcla y aplicación automatizada.	10 minutos a 25°C (77°F)
<i>Dow Corning</i> [®] 96-082 A y B Encapsulante	Aplicaciones que requieren una impregnación a fondo que sólo es posible con una resina de muy baja viscosidad.	Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 1:1 en peso o volumen; mezcla y aplicación automatizada; mezclado manual.	30 minutos a 150°C (302°F)
<i>Sylgard</i> [®] 182 Elastómero de silicona	Aplicaciones generales de aislantes: generadores, conexiones, sensores, controles industriales, transformadores, amplificadores resistencias eléctricas de alto voltaje, interruptores; adhesivos y encapsulantes para células solares; adhesivos para el proceso de circuitos integrados guiado por rayos.	Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 10:1 en peso o volumen; mezcla y aplicación automatizada; mezclado manual.	45 minutos a 100°C (212°F) 20 minutos a 125°C (257°F) 10 minutos a 150°C (302°F)
<i>Sylgard</i> [®] 184 Elastómero de silicona			~48 horas a temperatura ambiente 45 minutos a 100°C (212°F) 20 minutos a 125°C (257°F) 10 minutos a 150°C (302°F)
<i>Sylgard</i> [®] 186 Elastómero de silicona			~48 horas a temperatura ambiente 30 minutos a 100°C (212°F) 15 minutos a 150°C (302°F)
<i>Dow Corning</i> [®] 3-6121 Elastómero encapsulante			~48 horas a temperatura ambiente 20 minutos a 100°C (212°F) 10 minutos a 150°C (302°F)
Encapsulantes de silicona sin imprimación			
<i>Sylgard</i> [®] 275 Elastómero de silicona	Para aplicaciones que requieren encapsulantes con buena adhesión sin imprimación y bajas temperaturas de curado.	Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 1:1 en peso o volumen; se puede usar mezcla y aplicación automatizada o manual.	45 minutos a temperatura ambiente <5 minutos a 80°C (176°F)
<i>Dow Corning</i> [®] 3-6642 Adhesivo termoconductor	Para aplicaciones que requieren encapsulantes de alta conductividad térmica y buena adhesión sin imprimación.	Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 1:1 en peso o volumen; se puede usar mezcla y aplicación automatizada o manual. Nota: Refrigerar este producto para garantizar su vida útil.	20 minutos a 100°C (212°F) 5 minutos a 150°C (302°F)
<i>Dow Corning</i> [®] 3-8264 Adhesivo de silicona sin imprimación	Para aplicaciones que requieren encapsulantes con buena adhesión sin imprimación y bajas temperaturas de curado.	Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 1:1 en peso o volumen; se puede usar mezcla y aplicación automatizada o manual.	150 minutos a 70°C (158°F) 30 minutos a 115°C (239°F)
<i>Dow Corning</i> [®] 567 Encapsulante de silicona sin imprimación	Para aplicaciones de encapsulación con adhesión sin imprimación de bajo costo.	Se presenta en kits de dos componentes líquidos compuestos de Parte A/ Parte B para ser mezclados en una proporción 1:1 en peso o volumen; se puede usar mezcla y aplicación automatizada o manual.	90 minutos a 100°C (212°F) 60 minutos a 125°C (257°F) 15 minutos a 150°C (302°F)

¹ Estos datos fueron obtenidos con muestras de 50-100 gramos de un lote típico y pueden ser usados para la estimación inicial de los tiempos de curado. El tiempo de curado puede variar levemente entre lotes y puede variar según la masa térmica de sus componentes y de su curva de calentamiento. Se recomienda efectuar una prueba preliminar para confirmar el curado adecuado para su aplicación.

² Para los productos de adhesión sin imprimación, el tiempo de curado está basado en el tiempo necesario para alcanzar la dureza. Para alcanzar la adhesión completa puede ser necesario mantener la temperatura de curado por un período más prolongado.

PROPIEDADES TÍPICAS

Estos valores no sirven para preparar especificaciones

Producto	Proporción de la mezcla	Color	Viscosidad en centipoise o mPa*s	Dureza Shore A	Peso Especifico	Tiempo de trabajo a temperatura ambiente	Adhesión sin imprimación, cizallamiento			Conductividad térmica		Coeficiente lineal de expansión térmica, $\mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ o ppm	Vida útil a partir de la fecha de fabricación a temperatura ambiente, en meses
							psi	MPa	kgf/cm ²	Vatio-metro- $^\circ\text{K}$	cal/cm • segundo $^\circ\text{C}$		
Encapsulantes de silicona													
Sylgard™ 160 Elastómero de silicona	1:1	Gris	8775	60	1,57	30 min	NA	NA	NA	0,58	$1,4 \times 10^{-3}$	240	18
Sylgard™ 165 Elastómero de silicona	1:1	Gris	5000	52	1,57	<2 min	NA	NA	NA	0,58	$1,4 \times 10^{-3}$	230	18
Sylgard™ 170 Elastómero de silicona	1:1	Gris oscuro a negro	2900	40	1,37	15 min	NA	NA	NA	0,40	$9,6 \times 10^{-4}$	270	24
Sylgard™ 170 Elastómero de silicona de rápido curado	1:1	Gris oscuro a negro	2850	42	1,37	<5 min	NA	NA	NA	0,40	$9,6 \times 10^{-4}$	-	18
Dow Corning® 96-082 A y B Encapsulante	1:1	Negro	1100	31	1,21	14 días	NA	NA	NA	0,30	$7,2 \times 10^{-4}$	285	12
Sylgard™ 182 Elastómero de silicona	10:1	Transparente	3900	50	1,03	>8 horas	NA	NA	NA	0,18	$4,3 \times 10^{-4}$	310	24
Sylgard™ 184 Elastómero de silicona	10:1	Transparente	3900	50	1,03	>2 horas	NA	NA	NA	0,18	$4,3 \times 10^{-4}$	310	24
Sylgard™ 186 Elastómero de silicona	10:1	Traslúcido	65.000	24	1,12	2 horas	NA	NA	NA	0,2	$4,8 \times 10^{-4}$	330	12
Dow Corning® 3-6121 Elastómero encapsulante	10:1	Traslúcido	25.000	30	1,13	2 horas	NA	NA	NA	0,18	$4,3 \times 10^{-4}$	290	18
Encapsulantes de silicona sin imprimación													
Sylgard™ 275 Elastómero de silicona	1:1	Gris	2100	40	1,37	<15 min	230	1,6	16,2	0,45	$1,1 \times 10^{-3}$	NA	6
Dow Corning® 3-6642 Adhesivo termoconductor	1:1	Gris	5100	82	2,21	0,5 horas	470	3,2	33,0	1,00	$2,4 \times 10^{-3}$	180	8 a <5 $^\circ\text{C}$ (41 $^\circ\text{F}$)
Dow Corning® 3-8264 Adhesivo de silicona sin imprimación	1:1	Negro	2900	45	1,32	5 horas	385	2,6	27,0	0,35	$8,4 \times 10^{-4}$	290	9
Dow Corning® 567 Encapsulante de silicona sin imprimación	1:1	Negro	1500	45	1,24	>3 días	140	1,0	9,8	0,30	$7,2 \times 10^{-4}$	300	24

Para los autores de especificaciones: obtenga copias de las Especificaciones de Ventas de Dow Corning para estos productos y utilícelas como base de sus especificaciones. Las especificaciones de ventas se pueden obtener en las Oficinas de Ventas o de Servicio al Cliente de Dow Corning.

Producto	Certificación UL		Especificación militar		Rigidez dieléctrica		Constante dieléctrica a 100 Hz	Constante dieléctrica a 100 kHz	Resistividad volumétrica, ohm-cm	Factor de disipación a 100 Hz	Factor de disipación a 100 kHz
	Clasificación por inflamabilidad	Índice de temperatura UL, Eléctrica / mecánica, °C	Especificación	Tipo, Clase, Grupo	voltio/ mil	kV/ mm					
<i>Sylgard</i> TM 160 Elastómero de silicona	94 V-0	105/105	NA	NA	530	20,9	3,30	3,20	1,0x10 ¹⁵	0,01	0,002
<i>Sylgard</i> TM 165 Elastómero de silicona	94 V-0	105/105	NA	NA	530	20,9	3,30	3,20	1,0x10 ¹⁵	0,01	0,002
<i>Sylgard</i> TM 170 Elastómero de silicona	94 V-0	170/170	MIL-PRF-23586F (Grado B2)	Tipo I, Clase II, QPL	480	18,9	3,17	3,16	3,1x10 ¹³	0,003	<0,001
<i>Sylgard</i> TM 170 Elastómero de silicona de curado rápido	94 V-0	170/170	NA	NA	530	20,9	2,97	2,90	1,4x10 ¹⁵	0,005	<0,001
<i>Dow Corning</i> [®] 96-082 A y B Encapsulantes	94 V-0	170/170	NA	NA	500	19,7	3,14	3,12	9,5x10 ¹⁴	0,0055	<0,001
<i>Sylgard</i> TM 182 Elastómero de silicona	94 V-1	130/130	MIL-I-81550C	Tipo II, QPL	540	21,2	2,65	2,65	1,2x10 ¹⁴	0,0005	<0,001
<i>Sylgard</i> TM 184 Elastómero de silicona	94 V-1	130/130	MIL-I-81550C	Tipo I, QPL	540	21,2	2,65	2,65	1,2x10 ¹⁴	0,0005	<0,001
<i>Sylgard</i> TM 186 Elastómero de silicona	94 HB	140/140	NA	NA	450	17,7	2,93	2,87	1,1x10 ¹⁴	0,0012	<0,001
<i>Dow Corning</i> [®] 3-6121 Elastómero encapsulante	NA	NA	NA	NA	415	16,3	2,92	2,92	1,4x10 ¹⁴	0,01	<0,001
<i>Sylgard</i> TM 275 Elastómero de silicona	94 V-0	105/105	NA	NA	480	18,9	3,31	3,00	6,4x10 ¹⁴	0,087	0,006
<i>Dow Corning</i> [®] 3-6642 Adhesivo termoconductor	94 V-0	105/105	NA	NA	440	17,3	-	4,20	1,1x10 ¹³	-	0,0013
<i>Dow Corning</i> [®] 3-8264 Adhesivo de silicona sin imprimación	NA	NA	NA	NA	545	21,4	3,11	3,05	3,5x10 ¹⁴	0,007	<0,001
<i>Dow Corning</i> [®] 567 Encapsulante de silicona sin imprimación	94 V-0	105/105	MIL-PRF-23586F (Grado B2)	Tipo I, Clase IV, QPL	520	20,5	2,85	2,79	1,0x10 ¹⁴	0,008	0,002

MODO DE EMPLEO

Mezcla – 1:1 / Parte A:Parte B

Los encapsulantes de silicona 1:1 *Dow Corning* se presentan en dos componentes que no requieren que sean del mismo lote. La proporción de la mezcla 1:1 en peso o volumen simplifica el proceso. Para asegurarse de que la distribución del filler es uniforme, los componentes A y B deben ser homogenizados completamente antes de ser combinados en una mezcla 1:1. Cuando están completamente mezclados, la mezcla de los líquidos de parte A y B debe tener una apariencia uniforme. La presencia de estrías de color más claro o de marmolado indica una mezcla incompleta que puede resultar en un curado incompleto.

Debido a las características de curado rápido de algunos encapsulantes incluidos en esta hoja de datos, se debe usar equipo automatizado para mezcla y aplicación. En aplicaciones sensibles al atrapado de aire, se debe efectuar la extracción de aire al vacío a una presión de 710 a 760mm Hg.

Mezcla –10:1/Base:Agente de curado

Los encapsulantes de siliconas 10:1 *Dow Corning* se presentan en dos componentes, la base y el agente de curado de lotes iguales, que son mezclados en una proporción en peso de 10 partes de base a una parte de agente de curado. Luego de mezclar completamente la base y el agente de curado, se agita ligeramente la mezcla para disminuir la introducción de aire. Se deja asentar la mezcla durante 30 minutos antes de verterla para eliminar el aire que se pueda haber incorporado durante el mezclado. Si aún se encuentran burbujas de aire presente, se recomienda la extracción de aire al vacío. Desgasifique en un envase que sea por lo menos cuatro veces el volumen de líquido para permitir la expansión del material. El aire atrapado en la mezcla se puede extraer al vacío a una presión de 710 a 760mm Hg.

GUÍA DE SELECCIÓN DE LA IMPRIMACIÓN

Estos valores no se deben utilizar en la preparación de especificaciones.

Imprimación o Promotor de adhesión de <i>Dow Corning</i> [®]	Punto de inflamación, °C (°F)	Contenido de volátiles orgánicos (VOC) gramos/litro ⁴	Propiedades especiales	Para ser usado sobre	Para ser usado con	Ejemplos de productos de silicona
P5200 Transparente ¹	32 (90)	110/705		Mayoría de los metales, vidrio, cerámicas y algunos plásticos	Curado por adición de dos componentes pigmentados	160, 165, 170
1200 Transparente	17 (63)	748				
1200 Rojo	17 (63)	774	Coloreado para fácil identificación			
P5200 Rojo ²	32 (90)	110/705				
1204	15 (59)	774		Mayoría de los metales, vidrio y cerámicas	Todos los de un solo componente con curados en alcohol	3140, 3145, 838, 3-1753
P5204 ³	18 (64)	205/591				
1205	5 (41)	861	Forma película	Mayoría de los plásticos	Todos	
3-6060	37 (99)	780	Mejora la resistencia a la inhibición	Mayoría de los plásticos y metales	Todos los de dos componentes, curados por adición	182, 184, 186
92-023	-4 (25)	678				
<i>Sylgard</i> [®] Prime Coat Recubrimiento de imprimación	-3 (27)	687				

¹ P5200 Transparente es una alternativa de bajo VOC al 1200 Transparente.

² P5200 Rojo es una alternativa de bajo VOC al 1200 Rojo.

³ P5204 es una alternativa de bajo VOC a 1204.

⁴ El valor más bajo de VOC es para estados y distritos donde la administración de la calidad del aire ha reconocido la ausencia de VOC en metilsiloxanos volátiles.

Continúe la aplicación de presión hasta que el líquido se expanda, se asiente a su volumen original y deje de burbujear. Esto puede llevar de 15 minutos a dos horas dependiendo de la cantidad de aire introducido durante el mezclado. Para obtener los mejores resultados en el curado, se debe usar equipo de vidrio o metal durante el mezclado. Durante la mezcla, la agitación debe ser suave para evitar la introducción de aire en exceso.

Vida de la mezcla/ Tiempo de trabajo

La reacción de curado comienza con el proceso de mezclado. Inicialmente, el curado es evidente por el incremento gradual de la viscosidad, seguido por la gelificación y la conversión a un elastómero sólido. La vida de la mezcla se define como el tiempo necesario para que la viscosidad se duplique después de que las partes A y B (la base y el agente de curado) se mezclan. Refiérase a la vida útil de la mezcla para cada encapsulante de silicona.

Proceso y curado

Los encapsulantes de silicona *Dow Corning* que están bien mezclados se puede verter o aplicar directamente al recipiente donde van a ser curados. Se debe tomar precauciones para minimizar la incorporación de aire. Cuando sea práctico se debe verter o aplicar el encapsulante al vacío, especialmente si los componentes siendo encapsulados poseen espacios. Si no se puede usar esta técnica, la unidad debe ser extraída al vacío después de que el encapsulante de silicona es vertido o aplicado.

Los encapsulantes de silicona *Dow Corning* pueden ser curados a temperatura ambiente (25°C/77°F) o por calor. El curado de los encapsulantes que se curan a temperatura ambiente se puede acelerar con calor para obtener un curado rápido. Las condiciones ideales de curación para cada producto se encuentran en la Tabla de Selección de Productos.

PREPARACIÓN DE SUPERFICIES

En aplicaciones donde se requiere adhesión, es necesario el uso de imprimación para los encapsulantes de silicona. Vea la Guía de selección de imprimación para elegir la imprimación adecuada para cada producto. Para obtener los mejores resultados, la imprimación debe ser aplicada en una capa muy fina y uniforme y seguida de una limpieza. Después de la aplicación debe dejarse secar bien al aire antes de aplicar el elastómero de silicona. Instrucciones adicionales para el uso de la imprimación se puede encontrar en la literatura de *Dow Corning* “Como usar las Imprimaciones y Promotores de adhesión de *Dow Corning*” (“How To Use *Dow Corning* Primers and Adhesion Promoters”) (Forma No. 10-366) y en las hojas de información específicas de cada imprimador.

RANGO ÚTIL DE TEMPERATURAS

Para la mayoría de las aplicaciones, los elastómeros de siliconas se pueden utilizar en el rango de temperaturas de -45 a 200°C (-49 a 392°F) por períodos prolongados de tiempo. Sin embargo, a ambos extremos del espectro de temperaturas, el comportamiento de los materiales y su desempeño en algunas aplicaciones puede tornarse compleja y requerir otras consideraciones.

Para el desempeño a bajas temperaturas, el ciclo térmico a condiciones como -55°C (-67°F) puede ser posible pero el desempeño debe ser verificado para todas sus piezas y el armado. Los factores que pueden tener influencia en el desempeño son la configuración y la sensibilidad de los componentes, la velocidad de enfriamiento y los períodos de detención y la historia de temperaturas previa. Existen productos especializados que incluyen *Dow Corning*® 3-6121 Elastómero encapsulante que puede desempeñarse a temperaturas por debajo de -65°C (-85°F).

En el extremo de temperaturas altas, la durabilidad del elastómero de silicona curado es dependiente del tiempo y la temperatura. Como es de esperarse, a medida que sube la temperatura, se acorta la vida útil que le queda al material.

COMPATIBILIDAD

Ciertos materiales, productos químicos, agentes de curado y plastificantes pueden inhibir el curado de los encapsulantes de silicona *Dow Corning*. Los más comunes son:

- Organoestaño y otros compuestos organometálicos
- Caucho de silicona con catalizador de organoestaño
- Azufre, polisulfuros, polisulfonas u otros materiales con azufre
- Aminas, uretanos u otros materiales con aminas
- Plastificantes de hidrocarburos no saturados
- Algunos residuos de flujo de soldadura

Si existe una duda con respecto a que un sustrato o material pueda causar la inhibición del curado, se recomienda efectuar una prueba de compatibilidad a menor escala para verificar si es apropiado para el uso deseado. La presencia de un líquido o de producto sin curar en la interfase entre el material en cuestión y el gel curado indica la incompatibilidad y la inhibición del curado.

FACILIDAD DE REPARACIÓN

Durante la fabricación de elementos electrónicos y eléctricos es frecuente el deseo de rescatar o reclamar unidades dañadas o defectuosas. Para la mayoría de los materiales aislantes y encapsulantes rígidos que no son de silicona, el retiro o el acceso es difícil o imposible sin causar un daño excesivo a los circuitos internos. Los encapsulantes de silicona *Dow Corning* pueden ser removidos selectivamente con relativa facilidad, sin necesidad de reparos o cambios y el área reparada es encapsulada de nuevo con más producto.

Para remover los elastómeros de silicona simplemente recórtelos con una cuchilla afilada y remueva el material no deseado del área a ser reparada. Es mejor quitar los pedazos de elastómero que se encuentran adheridos a sustratos y circuitos raspando mecánicamente y este proceso puede ser facilitado con la aplicación de Fluidos OS *Dow Corning*®.

Antes de aplicar más material encapsulante a un elemento en reparación, raspe la superficie del encapsulante curado con papel abrasivo y enjuague con un solvente adecuado. Esto mejorará la adherencia y le permite al material reparado integrarse a la matriz del encapsulante existente. No se recomienda el uso de la imprimación de silicona Prime Coat para la adherencia entre productos de silicona.

ALMACENAMIENTO Y VIDA ÚTIL

La vida útil está indicada en la etiqueta del producto como la fecha de vencimiento (“Use By”).

Para obtener los mejores resultados, los encapsulantes de silicona *Dow Corning* deben ser almacenados a temperaturas por debajo de 25°C (77°F). Se deben tomar precauciones especiales para evitar que estos productos entren en contacto con la humedad. Los envases deben mantenerse cerrados herméticamente con un mínimo de aire. Los envases que estén parcialmente llenos deben ser purgados con aire seco u otros gases inertes como el nitrógeno.

Información adicional sobre almacenamiento especial o instrucciones de manipulación estarán impresas en los envases del producto.

LIMITACIONES

Estos productos no se prueban ni se califican como adecuados para uso médico o farmacéutico.

ENVASES

En general, los encapsulantes de silicona en mezclas de proporción 1:1 de *Dow Corning* se presentan en envases de peso neto de 0,45 kg, 3,6 kg, 18 kg y 200 kg (1, 8, 40 y 440 libras). Los encapsulantes de silicona en mezclas de proporción 10:1 de *Dow Corning* se presentan en envases de peso neto de 0,5 kg, 5 kg, 25 kg y 225 kg (1,1, 11, 55 y 495 libras). Las opciones de envases pueden variar con el producto. Por más detalles sobre opciones en los envases, usted puede consultar el Servicio a Clientes de *Dow Corning*.

APÉNDICE D:

Especificaciones de motores a pasos

Stepping Motors

M55SP-1

OUTLINE

A high-precision stepping motor "M55SP-1", 55mm in outer diameter.

Despite such compact body size as 23mm in thickness, it has acquired high output characteristic, excellent running quietness and stability.



FEATURES

- 1.High output torque.
- 2.Superior running quietness and stability.
- 3.Step angle : 7.5°.
- 4.Excellent responsiveness acquired.

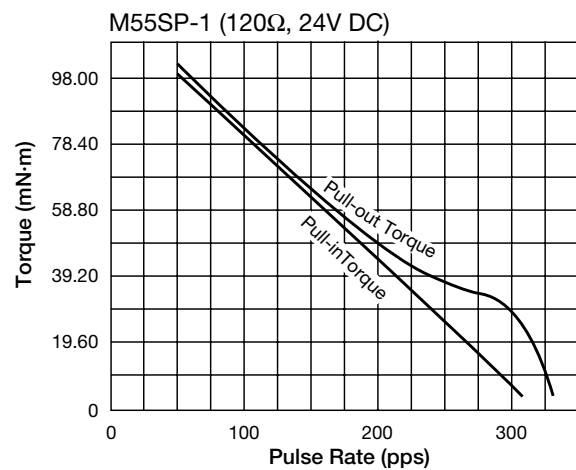
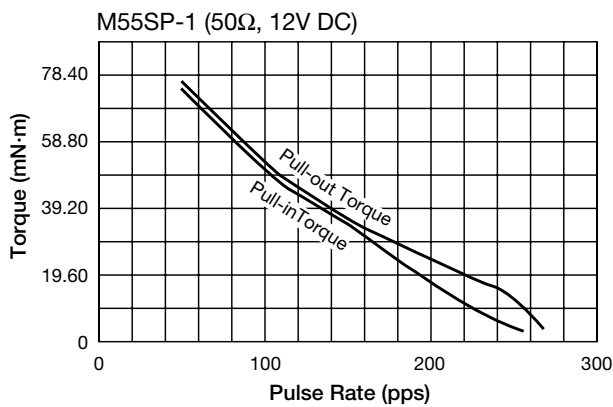
USES

Printers, multifunction machines, copy machines, FAX, and such.

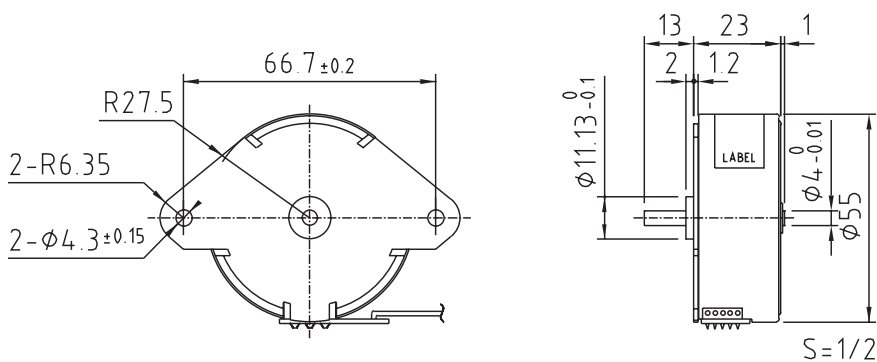
SPECIFICATIONS

Items	M55SP-1	
Rated Voltage	DC 12V	DC 24V
Working Voltage	DC 10.8~13.2V	DC 21.6~26.4V
Rated Current/Phase	259mA	216mA
No. of Phase	4 Phase	4 Phase
Coil DC Resistance	50Ω/phase±7%	120Ω/phase±7%
Step Angle	7.5°/step	7.5°/step
Excitation Method	2-2 Phase excitation (Unipolar driving)	
Insulation Class	Class E insulation	Class E insulation
Holding Torque	107.8mN·m	127.4mN·m
Pull-out Torque	24.5mN·m/200pps	48.0mN·m/200pps
Pull-in Torque	16.7mN·m/200pps	43.6mN·m/200pps
Max. Pull-out Pulse Rate	270pps	330pps
Max. Pull-in Pulse Rate	265pps	315pps

CHARACTERISTICS



DIMENSIONS





Stepping Motors



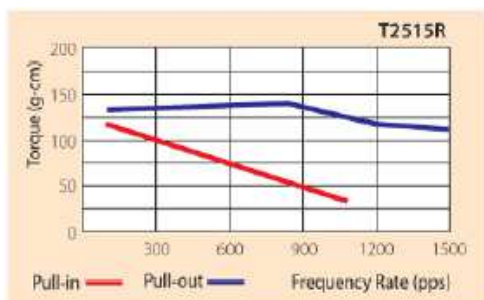
Product: T25 Series



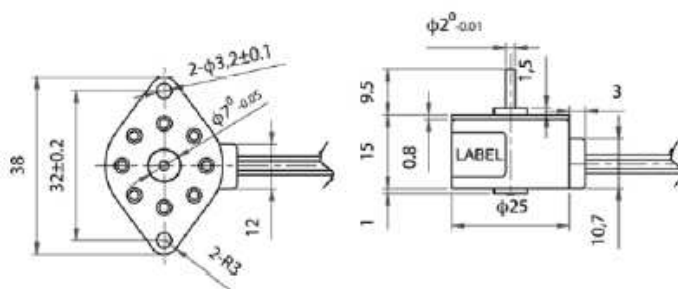
Specification

Model No.	Diameter (mm)	Height (mm)	Step angle (deg)	Drive voltage (V)	Rated Current/ Phase (mA)	Winding resistance (Ohm)	Drive mode	Holding torque (g-cm)	Max.pull-out pulse rate (pps)	Pitch (mm)	Complete thread (mm)
T2515R	25	15	7.5	24	200	29	2-2 bipolar	190	1700	1.5	48
T2515J	25	15	15	24	250	20	2-2 bipolar	170	2100	1.5	48

Characteristics



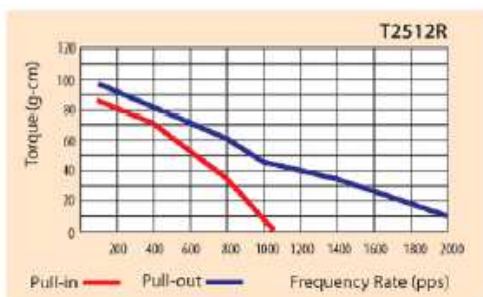
Dimensions



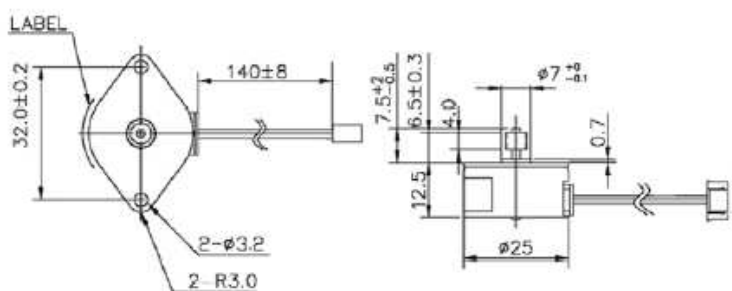
Specification

Model No.	Diameter (mm)	Height (mm)	Step angle (deg)	Drive voltage (V)	Rated Current/ Phase (mA)	Winding resistance (Ohm)	Drive mode	Holding torque (g-cm)	Max.pull-out pulse rate (pps)
T2512F	25	12	3.75	12	300	16.5	2-2 bipolar	60	2500
T2512R	25	12	7.5	12	240	49	2-2 unipolar	90	2000
T2512J	25	12	15	12	300	16.5	2-2bipolar	70	2000

Characteristics



Dimensions



APÉNDICE E:

Especificaciones de la tarjeta de adquisición
Measurement Computing, PMD-1608FS

Introducing the PMD-1608FS

This user's guide contains all of the information you need to connect the PMD-1608FS to your computer and to the signals you want to measure. The PMD-1608FS is part of the Personal Measurement Device™ brand of USB-based data acquisition products.

The PMD-1608FS is a USB 2.0 full-speed device supported under Microsoft® Windows® 98 (2nd edition), Windows ME, Windows 2000, and Window XP.

The PMD-1608FS offers true simultaneous sampling of up to 8 channels of 16-bit single-ended analog input. This is accomplished through the use of one A/D converter per channel. The range of each channel is independently configurable via software. Eight digital IO lines are independently selectable as input or output. A 32-bit counter is capable of counting TTL pulses. The PMD-1608FS is powered by the +5 volt USB supply from your computer. No external power is required.

A SYNC (synchronization) control line allows you to synchronize two PMD-1608FS modules together to acquire data synchronously from 16 analog inputs.

The PMD-1608FS is shown in Figure 1-1. I/O connections are made to the screw terminals located along each side of the PMD-1608FS.



Figure 1-1. PMD-1608FS

PMD-1608FS block diagram

PMD-1608FS functions are illustrated in the block diagram shown here.

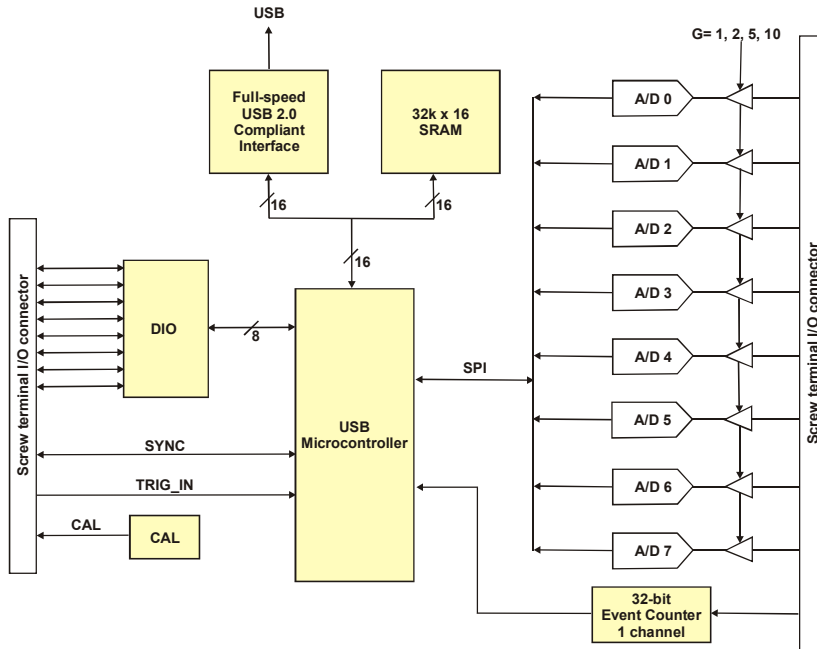


Figure 1-2. PMD-1608FS Functional Block Diagram

Software features

The following software ships with the PMD-1608FS free of charge.

- *InstaCal* installation, calibration, and test utility
- TracerDAQ™ suite of virtual instruments
- SoftWIRE® for Visual Studio® .NET graphical programming
- MCC DAQ Components for VS .NET (installed with SoftWIRE® for VS .NET)

For information on the features of *InstaCal*, TracerDAQ, and SoftWIRE, refer to the *DAQ Software Quick Start* booklet that shipped with the PMD-1608FS.

Connecting a PMD-1608FS to your computer is easy

Installing a data acquisition device has never been easier.

- The PMD-1608FS relies upon the Microsoft Human Interface Device (HID) class drivers. The HID class drivers ship with every copy of Windows that is designed to work with USB ports. We use the Microsoft HID because it is a standard, and its performance delivers full control and maximizes data transfer rates for your PMD-1608FS. No third-party device driver is required.
- The PMD-1608FS is plug-and-play. There are no jumpers to position, DIP switches to set, or interrupts to configure.
- You can connect the PMD-1608FS before or after you install the software, and without powering down your computer first. When you connect an HID to your system, your computer automatically detects it and configures the necessary software. You can connect and power multiple HID peripherals to your system using a USB hub.
- You can connect your system to various devices using a standard four-wire cable. The USB connector replaces the serial and parallel port connectors with one standardized plug and port combination.
- You do not need a separate power supply module. The USB automatically delivers the electrical power required by each peripheral connected to your system.
- Data can flow two ways between a computer and peripheral over USB connections.

Make sure that you have the latest Windows Updates installed for your USB driver, particularly "XP Hotfix KB822603." Refer to the *DAQ Software Quick Start* for more information (available in PDF at www.mccdaq.com/PDFmanuals/DAQ-Software-Quick-Start.pdf).

Specifications

Typical for 25 °C unless otherwise specified.

Specifications in *italic text* are guaranteed by design.

Analog input section

Table 4-3. Analog input specifications

Parameter	Conditions	Specification
A/D converter type		16-bit successive Approximation type
Number of channels		8 single-ended
Input configuration		Individual A/D per channel
Sampling method		Simultaneous
<i>Absolute maximum input voltage</i>	<i>CHx IN to GND.</i>	<i>±15 V max</i>
Input impedance		100 MOhm, min
Input ranges	Software selectable	±10 V, ±5 V, ±2 V, ±1 V
Sampling rate	Scan to PC memory	0.6 S/s to 50 kS/s, software programmable
	Burst scan to 32 k sample FIFO	20 S/s to 50 kS/s, software programmable
Throughput	Software paced	500 S/s all channels
	Scan to PC memory (Note 1)	= (100 kS/s) / (# of channels), max of 50 kS/s for any channel
	Burst scan to 32 k sample FIFO	= (200 kS/s) / (# of channels), max of 50 kS/s for any channel
Gain queue		Software configurable. Eight elements, one gain element per channel.
Resolution		16 bits
<i>No missing codes</i>		<i>15 bits</i>
Crosstalk	Signal DC-25 KHz	-80 dB
CAL output	User calibration source	0.625 V, 1.25 V, 2.5 V, 5.0 V, software selectable
CAL output accuracy (Note 2)		±0.5% typ, ±1.0% max
CAL current		±5 mA max
Trigger source	Software selectable	External digital: TRIG_IN

Note 1: Maximum throughput scanning to PC memory is machine dependent. While the majority of XP equipped PC's we tested allowed acquisition at the maximum rates, a few would not. The lowest maximum rate we observed on an XP equipped PC during multi-channel testing was 95 kS/s, aggregate. The rates specified are for Windows XP only. Maximum rates on operating systems that predate XP may be less and must be determined through testing on your machine.

Note 2: Actual values used for calibration are measured and stored in EEPROM.

Table 4-4. Calibrated absolute accuracy

Range	Accuracy (mV)
±10 V	5.66
±5 V	2.98
±2 V	1.31
±1 V	0.68

Table 4-5. Accuracy components - All values are (±)

Range	% of Reading	Gain error at FS (mV)	Offset (mV)
±10 V	0.04	4.00	1.66
±5 V	0.04	2.00	0.98
±2 V	0.04	0.80	0.51
±1 V	0.04	0.40	0.28

Table 4-6 summarizes the noise performance for the PMD-1608FS. Noise distribution is determined by gathering 50 K samples with inputs tied to ground at the user connector. Samples are gathered at the maximum specified sampling rate of 50 kS/s.

Table 4-6. Noise performance

Range	Typical counts	LSB _{rms}
±10 V	10	1.52
±5 V	10	1.52
±2 V	11	1.67
±1 V	14	2.12

Digital input/output

Table 4-7. Digital I/O specifications

Digital type	CMOS
Number of I/O	8 (DIO0 through DIO7)
Configuration	Independently configured for input or output
Pull-up/pull-down configuration	All pins pulled up to V _S via 47 K resistors (default). Positions available for pull down to ground. Hardware selectable via zero ohm resistors as a factory option.
Input high voltage	2.0 V min, 5.5 V absolute max
Input low voltage	0.8 V max, -0.5 V absolute min
Output high voltage (IOH = -2.5 mA)	3.8 V min
Output low voltage (IOL = 2.5 mA)	0.7 V max
Power on and reset state	Input

External trigger

Table 4-8. External trigger specifications

Parameter	Conditions	Specification
Trigger source (Note 3)	External digital	TRIG_IN
Trigger mode	Software selectable	Edge sensitive: user configurable for CMOS compatible rising or falling edge.
Trigger latency		10 μ s max
Trigger pulse width		1 μ s min
Input high voltage		4.0 V min, 5.5 V absolute max
Input low voltage		1.0 V max, -0.5 V absolute min
Input leakage current		$\pm 1.0 \mu A$

Note 3: TRIG_IN is a Schmitt trigger input protected with a 1.5K Ohm series resistor.

External clock input/output

Table 4-9. External clock I/O specifications

Parameter	Conditions	Specification
Pin name		SYNC
Pin type		Bidirectional
Software selectable direction	Output	Outputs internal A/D pacer clock.
	Input	Receives A/D pacer clock from external source.
Input clock rate		50 kHz, maximum
Clock pulse width	Input	1 μ s min
	Output	5 μ s min
<i>Input leakage current</i>		$\pm 1.0 \mu A$
Input high voltage		4.0 V min, 5.5 V absolute max
Input low voltage		1.0 V max, -0.5 V absolute min
Output high voltage (Note 4)	IOH = -2.5 mA	3.3 V min
	No load	3.8 V min
Output low voltage (Note 4)	IOL = 2.5 mA	1.1 V max
	No Load	0.6 V max

Note 4: SYNC is a Schmitt trigger input and is over-current protected with a 200 Ohm series resistor.

Counter section

Table 4-10. Counter specifications

Pin name (Note 5)	CTR
Counter type	Event counter
Number of channels	1
Input source	CTR screw terminal
Resolution	32 bits
<i>Schmitt trigger hysteresis</i>	20 mV to 100 mV
<i>Input leakage current</i>	$\pm 1 \mu A$
Maximum input frequency	1 MHz
<i>High pulse width</i>	500 ns min
<i>Low pulse width</i>	500 ns min
Input high voltage	4.0 V min, 5.5 V absolute max
Input low voltage	1.0 V max, -0.5 V absolute min

Note 5: CTR is a Schmitt trigger input protected with a 1.5K Ohm series resistor.

Memory

Table 4-11. Memory specifications

Data FIFO	32,768 samples, 65,536 bytes		
EEPROM	1,024 bytes		
EEPROM configuration	Address range	Access	Description
	0x000-0x07F	Reserved	128 bytes system data
	0x080-0x1FF	Read/write	384 bytes cal data
	0x200-0x3FF	Read/write	512 bytes user area

Microcontroller

Table 4-12. Microcontroller specifications

<i>Type</i>	<i>High performance 8-bit RISC microcontroller</i>
<i>Program memory</i>	<i>16,384 words</i>
<i>Data memory</i>	<i>2,048 bytes</i>

Power

Parameter	Conditions	Specification
Supply current	USB enumeration	< 100 mA
Supply current (Note 6)	Continuous mode	150 mA
+5 V USB power available (Note 7)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Connected to self-powered hub ▪ Connected to externally-powered root port hub 	4.5 V min, 5.25 V max
Output current (Note 8)		350 mA max

Note 6: This is the total current requirement for the PMD-1608FS which includes up to 10 mA for the status LED.

Note 7: "Self-powered hub" refers to a USB hub with an external power supply. Self-powered hubs allow a connected USB device to draw up to 500 mA. "Root port hubs" reside in the PC's USB host Controller. The USB port(s) on your PC are root port hubs. All externally-powered root port hubs (desktop PC's) provide up to 500 mA of current for a USB device. Battery-powered root port hubs provide 100 mA or 500 mA, depending upon the manufacturer. A laptop PC that is not connected to an external power adapter is an example of a battery-powered root port hub. If your laptop PC is constrained to the 100 mA maximum, you need to purchase a self-powered hub.

Note 8: This refers to the total amount of current that can be sourced from the USB +5 V and digital outputs.

General

Device type	USB 2.0 (full-speed)
Device compatibility	USB 1.1, USB 2.0

Environmental

Operating temperature range	0 to 70 °C
Storage temperature range	-40 to 85 °C
Humidity	0 to 90% non-condensing

Mechanical

Dimensions	79 mm (L) x 82 mm (W) x 25 mm (H)
USB cable length	3 meters max
User connection length	3 meters max

Main connector and pin out

Connector type	Screw terminal
Wire gauge range	16 AWG to 30 AWG

Pin	Signal Name	Pin	Signal Name
1	CH0 IN	21	DIO0
2	AGND	22	GND
3	CH1 IN	23	DIO1
4	AGND	24	GND
5	CH2 IN	25	DIO2
6	AGND	26	GND
7	CH3 IN	27	DIO3
8	AGND	28	GND
9	CH4 IN	29	DIO4
10	AGND	30	GND
11	CH5 IN	31	DIO5
12	AGND	32	GND
13	CH6 IN	33	DIO6
14	AGND	34	GND
15	CH7 IN	35	DIO7
16	AGND	36	SYNC
17	CAL	37	TRIG_IN
18	AGND	38	CTR
19	AGND	39	PC +5V
20	AGND	40	GND

APÉNDICE F:

Planos

Tabla F1. Lista de piezas compradas.

PIEZA	CANTIDAD
Imán de neodimio con recubrimiento de níquel, diámetro de 3 mm y altura de 2 mm.	20
Balero 608-2RS, con $d_{\text{ext}} = 22$ mm y $d_{\text{int}} = 8$ mm	2
Tornillo allen de cabeza plana #10-24 X 0.5 UNC	12
Tornillo allen de cabeza plana #5-40 X 0.5 UNC	4
Tornillo cabeza de estufa #5-40 X 0.5 UNC	1
Tornillo allen de cabeza plana #10-32 X 0.5 UNF	2
Tornillo allen de cabeza plana #5-40 X 0.4375 UNC	2
Tornillo cabeza de estufa #10-24 X 0.5 UNC	2

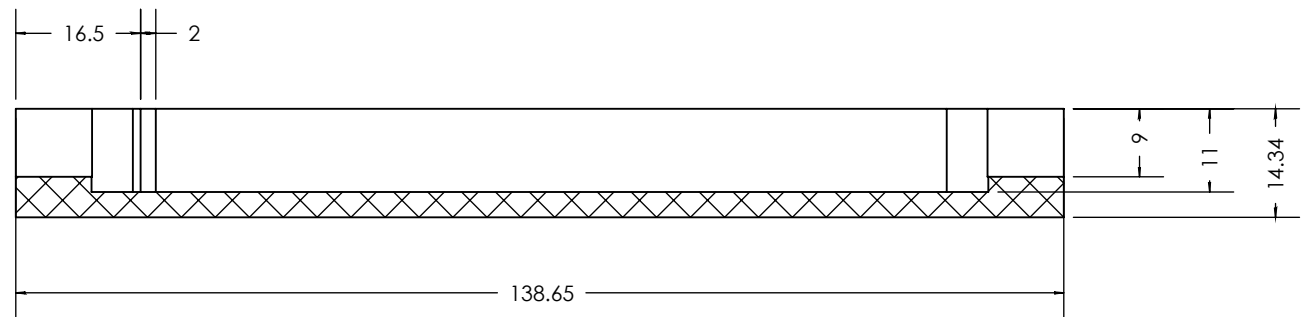
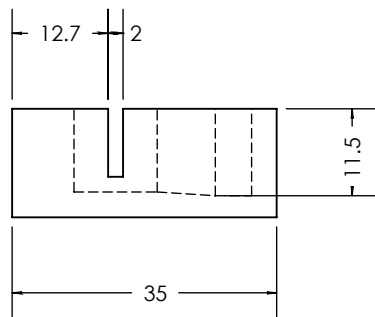
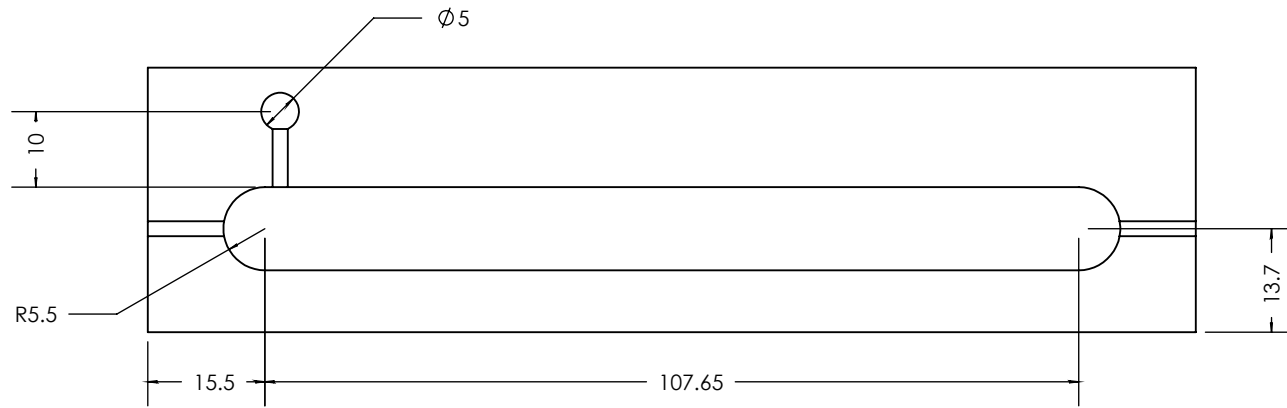
Tabla F2. Lista de partes y planos.



PARTE	PLANO
Contenedor para dopaje de fibras	A
Base de plataforma móvil	B1
Soporte 1 para tira de teflón	B2
Soporte 2 para tira de teflón	B3
Tira de teflón ranurada	B4
Tuerca	B5
Bloque guía de plataforma móvil	B6
Pivote	B7
Base de máquina	C1
Soporte lateral 1	C2
Soporte lateral 2	C3
Barra guía y buje	C4
Husillo	C5
Engrane y sinfín	C6
Barra para levantamiento	D1
Manivela	D2
Soporte corredera	E1
Corredera	E2
Placas ranuradas para fibras	E3
Grapa de sujeción	E4
Pernos y cuña	F1
Soporte para motor	G1
Ensamble de plataforma móvil	H1
Ensamble de armazón principal	H2
Ensamble de máquina completa	H3

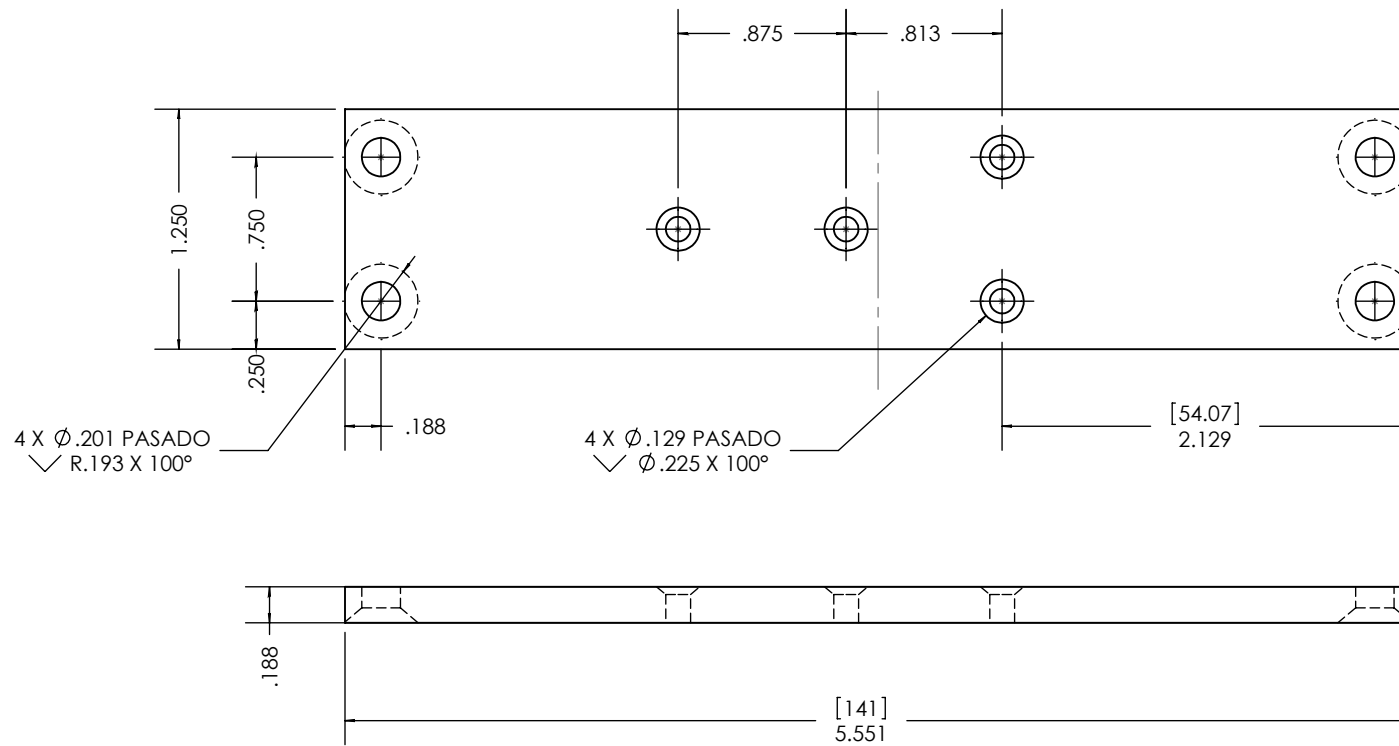
Tabla F3. Partes de plano H3.

Número	Parte	Cantidad
1	Base de máquina	1
2	Soporte lateral 2	1
3	Soporte lateral 1	1
4	Rodamiento #608 22,8,7	2
5	Perno para barra de levantamiento	2
6	Barra para levantamiento	1
7	Manivela	1
8	Husillo	1
9	Soporte 1 para teflón	1
10	Base de plataforma móvil	1
11	Soporte 2 para teflón	1
12	Perno para teflón	1
13	Bloque guía de plataforma móvil	1
14	Tuerca	1
15	Tira de teflón ranurada	1
16	Tornillo allen #10-24 X 0.5 UNC	12
17	Pivote	1
18	Buje	2
19	Tornillo allen #5-40 X 0.5 UNC	4
20	Tornillo c. estufa #5-40 X 0.5 UNC	1
21	Engrane 96D	1
22	Tornillo allen #10-32 X 0.5 UNF	2

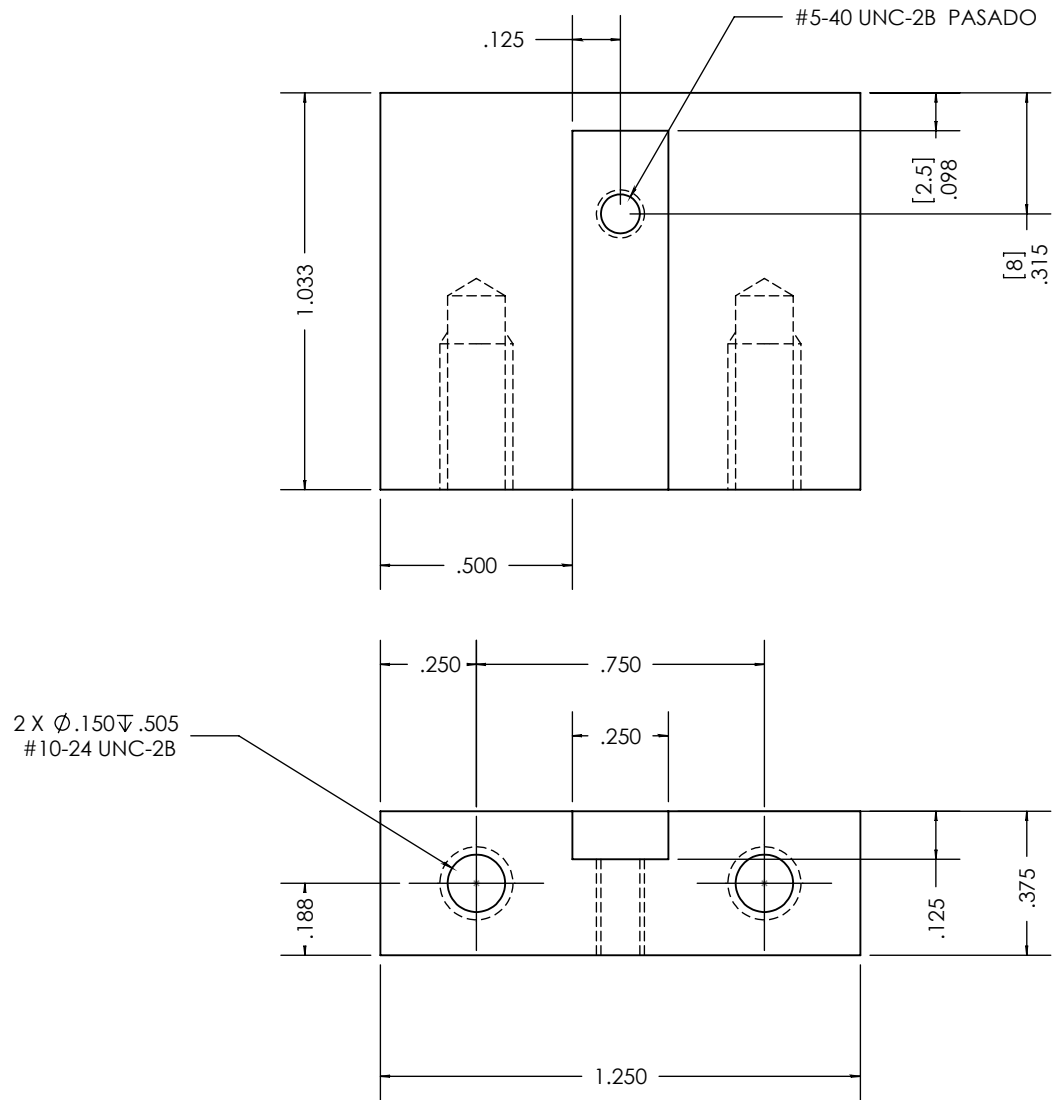
23	Barra guía	1
24	Soporte corredera	1
25	Corredera	1
26	Placa ranurada para fibra (móvil)	1
27	Cuña	1
28	Tornillo c. estufa #10-24 X 0.5 UNC	2
29	Perno para ensamblar placa ranurada para fibra	2
30	Placa ranurada para fibra (fija)	1
31	Motor	1
32	Sinfin	1
33	Soporte para motor	1
34	Grapa	6
35	Imán	6
36	Tornillo allen #5-40 X 0.4375 UNC	2

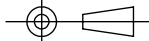


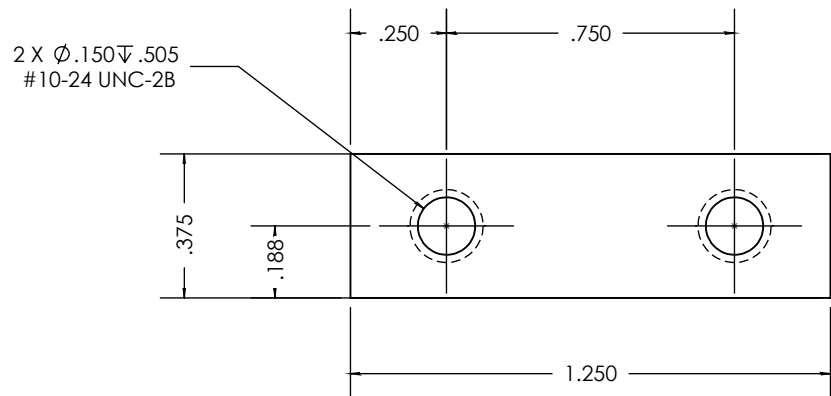
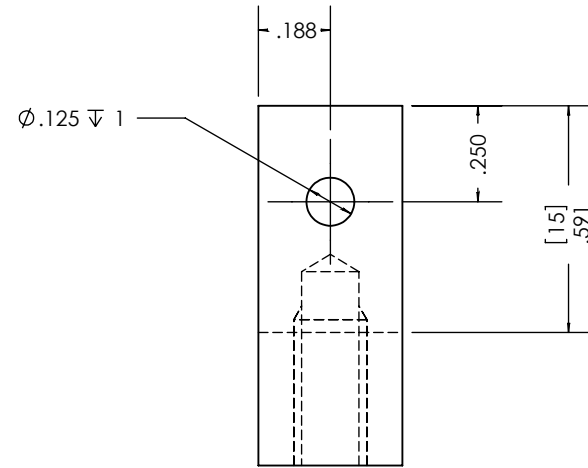
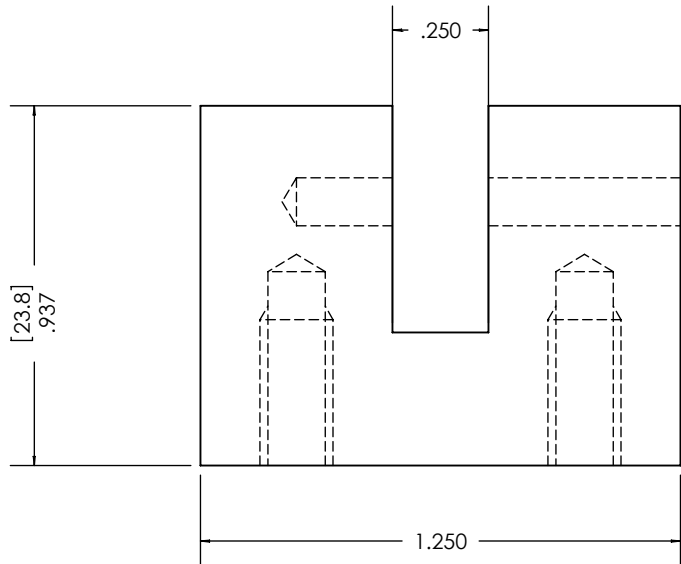
Material: Nylon		Dibujó: Amado Manuel Velázquez Benítez		Fecha Junio 2012	
Acot.: mm		Acot. Aux.: in		Contenedor Cant.: 1 Revisó: JHC Tamaño: Carta Escala: 1:1	
 		Contenedor para dopaje de fibras			
PLANO A					



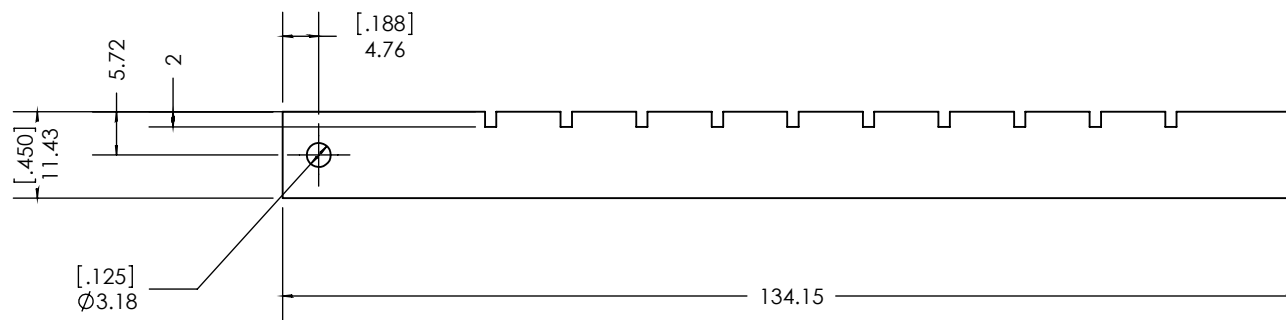
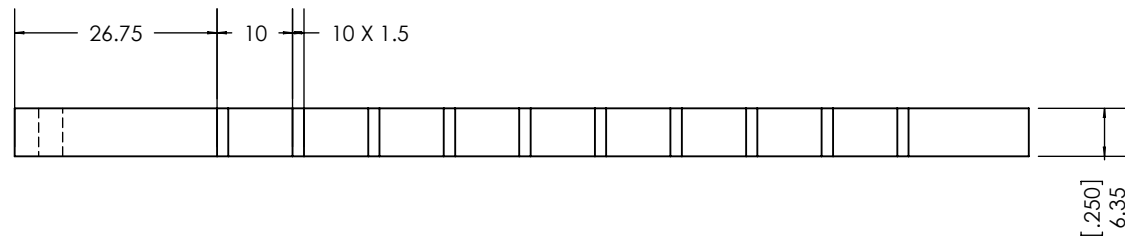
Material:		Dibujó:		Fecha	
Aluminio 6063-T5		Amado Manuel Velázquez Benítez		Junio 2012	
Acot.: in		Acot. Aux.: mm		Base de plataforma móvil	
		Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica		Cant.: 1	Revisó: JHC
				Tamaño: Carta	Escala: 1:1
				PLANO B1	

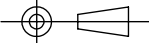


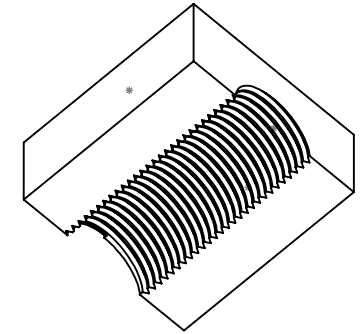
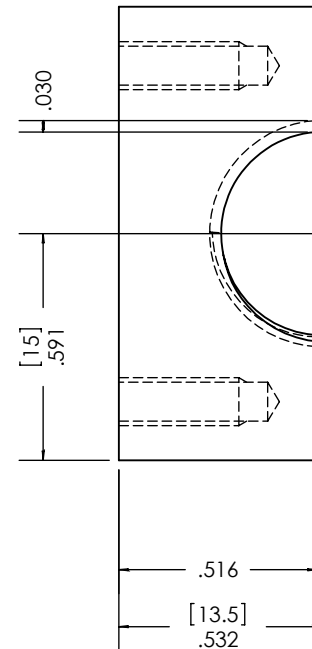
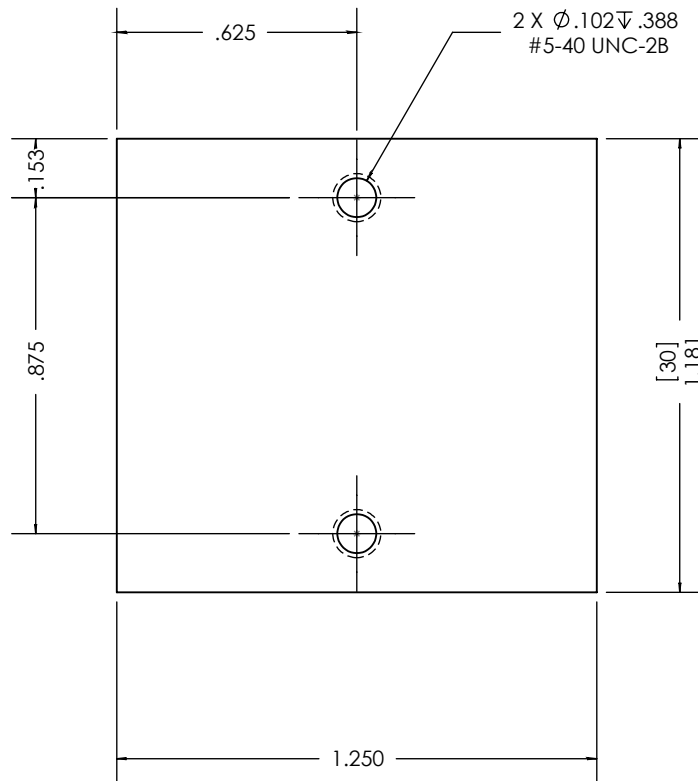
Material:		Dibujó:		Fecha	
Aluminio 6063-T5		Amado Manuel Velázquez Benítez		Junio 2012	
Acot.: in		Soporte 1 para tira de teflón		Cant.:	Revisó:
Acot. Aux.: mm				1	JHC
		Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica		Tamaño:	Escala:
		Carta		2:1	PLANO B2



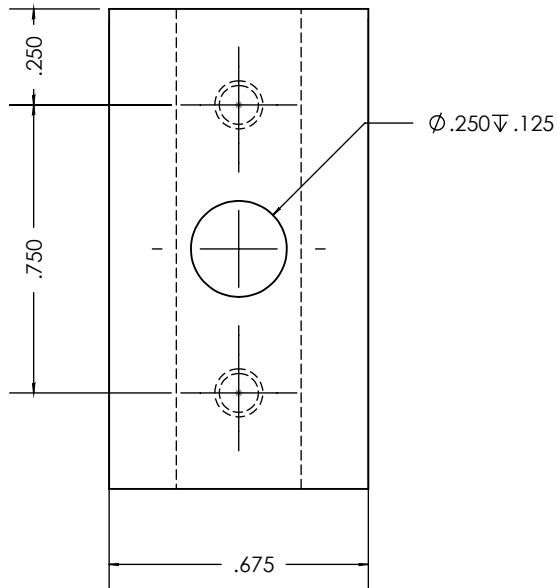
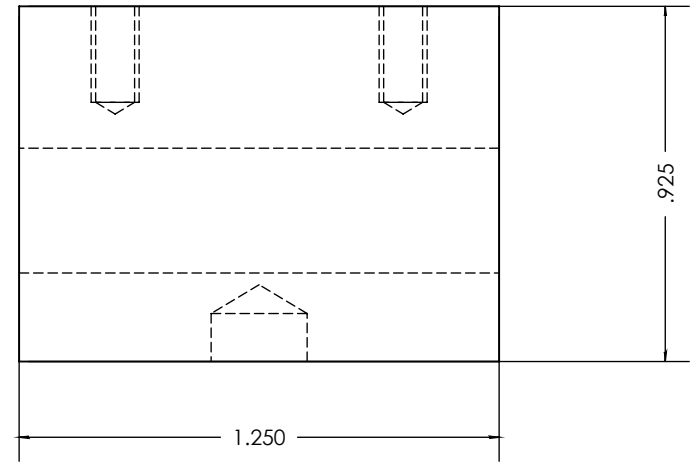
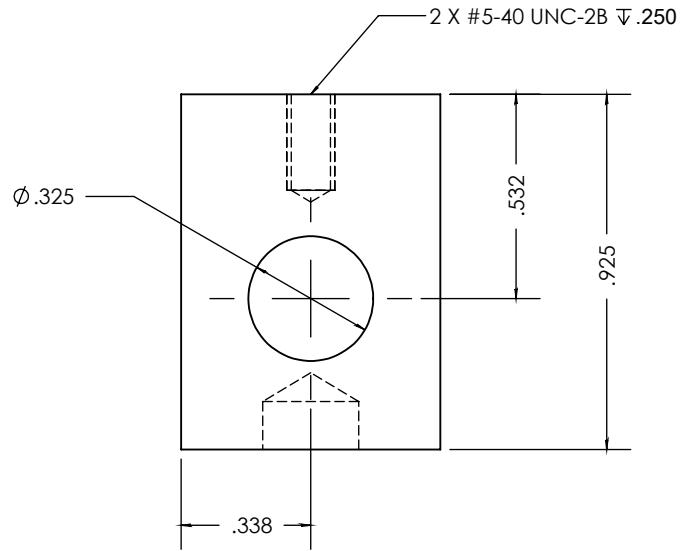
Material:		Dibujó:		Fecha	
Aluminio 6063-T5		Amado Manuel Velázquez Benítez		Junio 2012	
		Soporte 2 para tira de teflón		Cant.:	Revisó:
Acot.:	Acot. Aux.:			1	JHC
in	mm	Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica		Tamaño:	Escala:
				Carta	2:1
				PLANO B3	



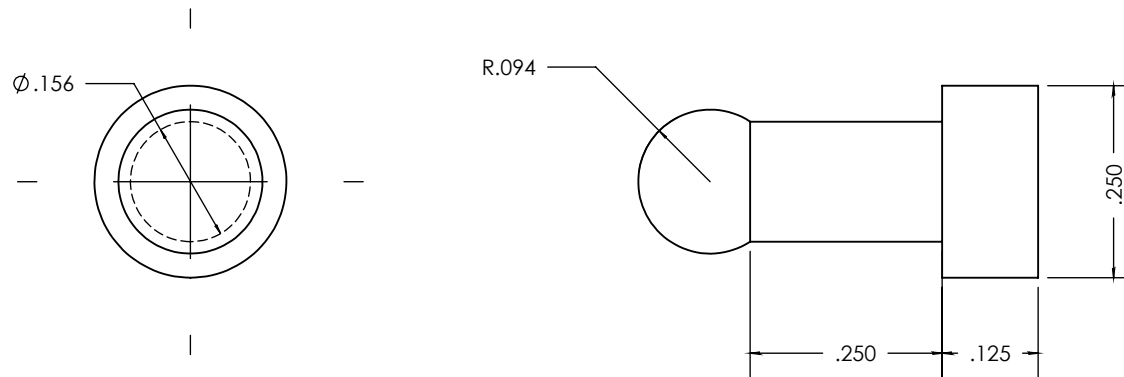
Material: PTFE		Dibujó: Amado Manuel Velázquez Benítez		Fecha Junio 2012	
Acot.: mm		Acot. Aux.: in		Cant.: 1	Revisó: JHC
		Tira de teflón ranurada Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica		Tamaño: Carta	Escala: 1:1
				PLANO B4	



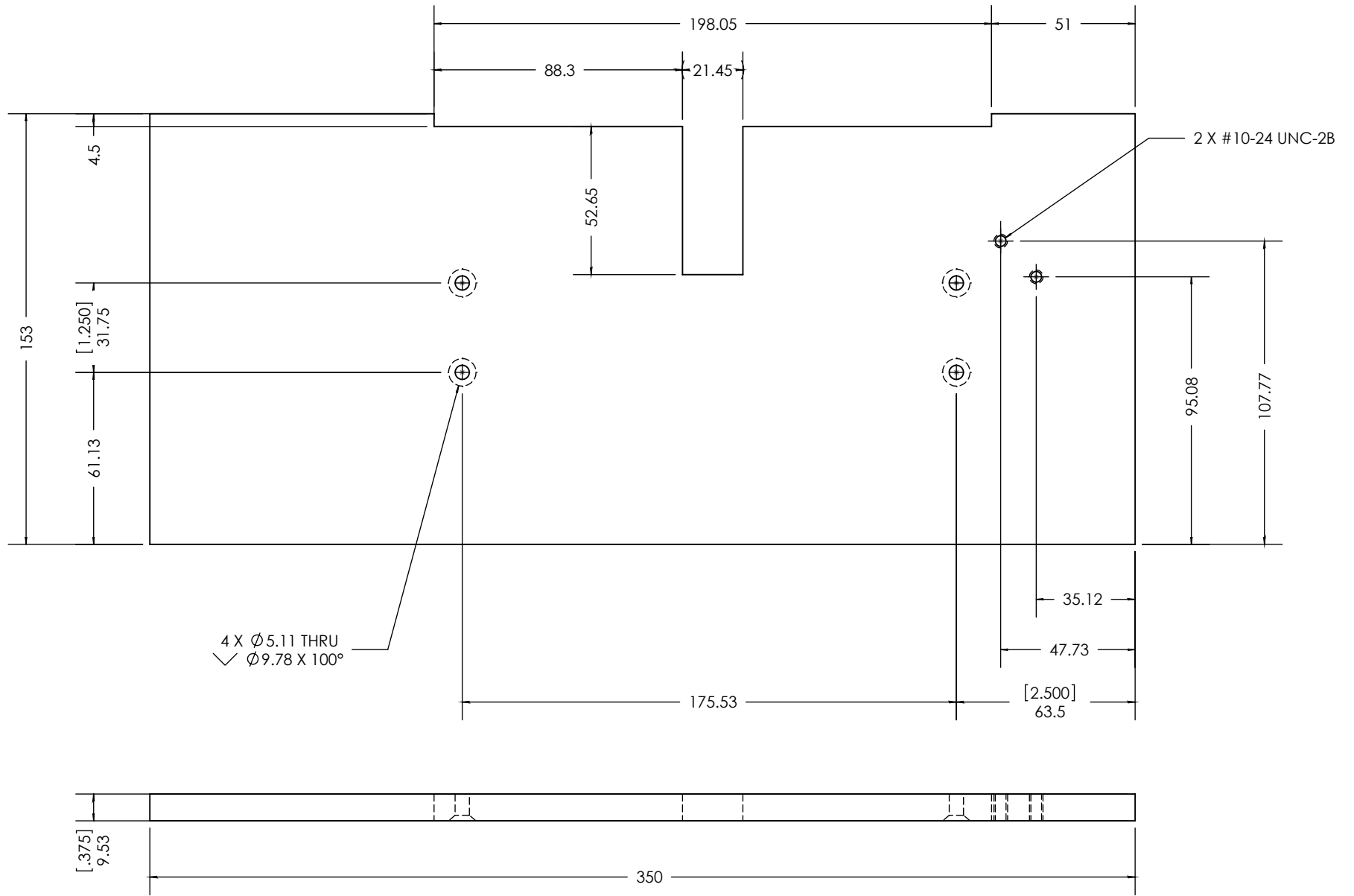
Material: Latón		Dibujó: Amado Manuel Velázquez Benítez		Fecha Junio 2012	
Acot.: in		Acot. Aux.: mm		Tuerca	
		Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica		Cant.: 1	Revisó: JHC
				Tamaño: Carta	Escala: 2:1
				PLANO B5	



Material:		Dibujó:		Fecha	
Aluminio 6063-T5		Amado Manuel Velázquez Benítez		Junio 2012	
		Bloque guía de plataforma móvil		Cant.:	Revisó:
				1	JHC
Acot.:	Acot. Aux.:			Tamaño:	Escala:
in	mm			Carta	2:1
		Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica		PLANO B6	



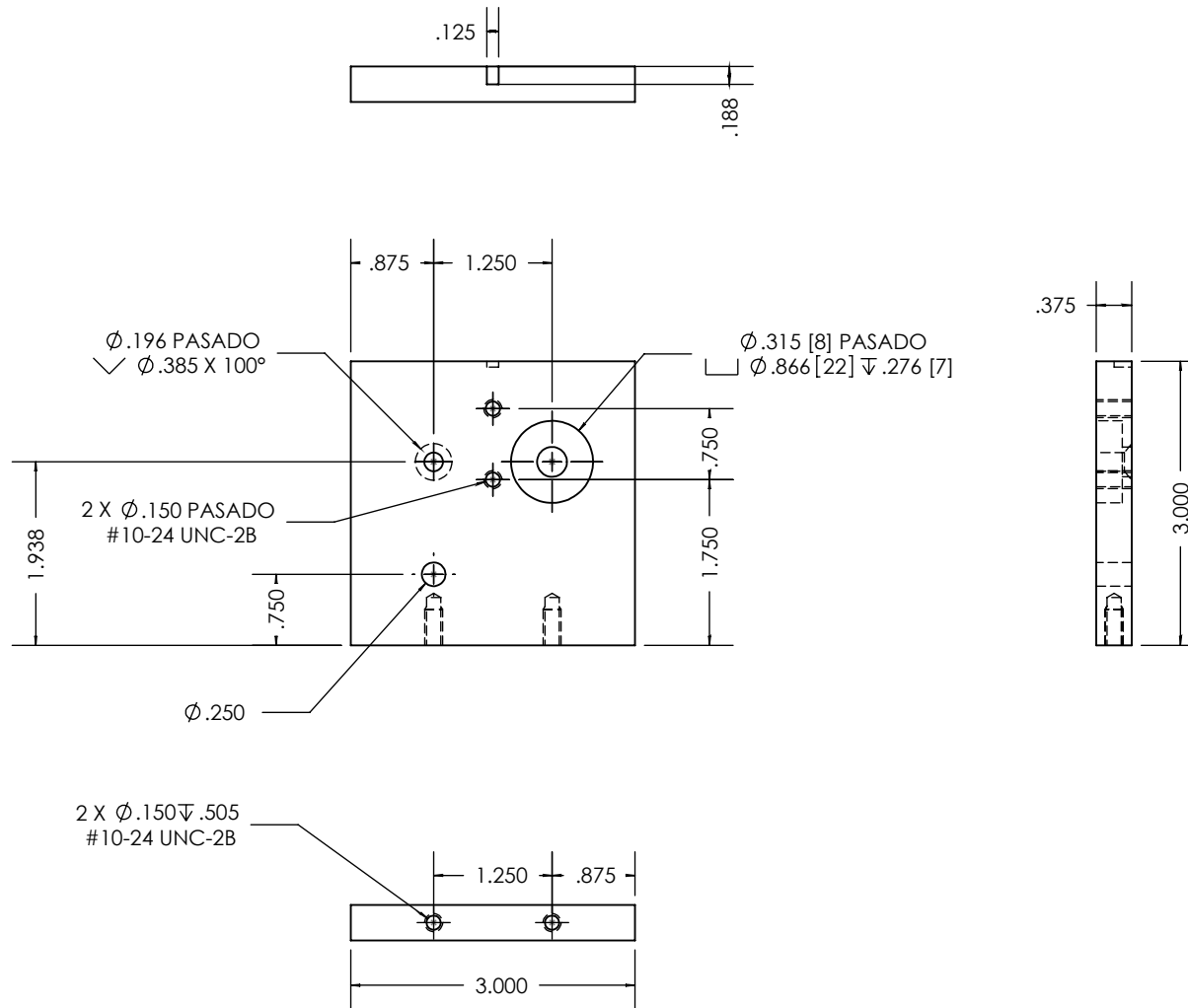
Material:		Dibujó:		Fecha	
Acero 1018		Amado Manuel Velázquez Benítez		Junio 2012	
		Pivote		Cant.:	Revisó:
Acot.:	Acot. Aux.:			1	JHC
in	mm			Tamaño:	Escala:
		Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica		Carta	4:1
				PLANO B7	

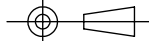


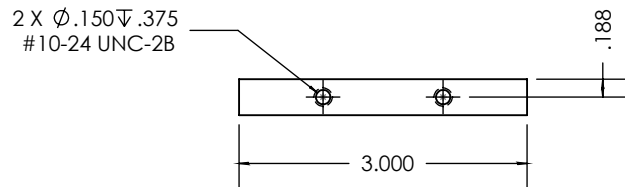
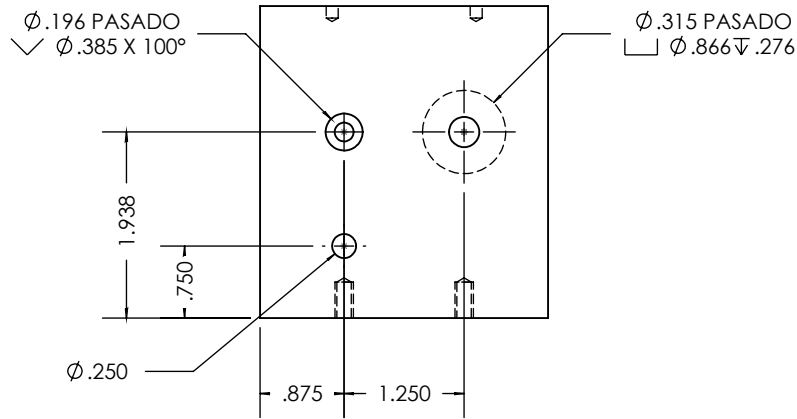
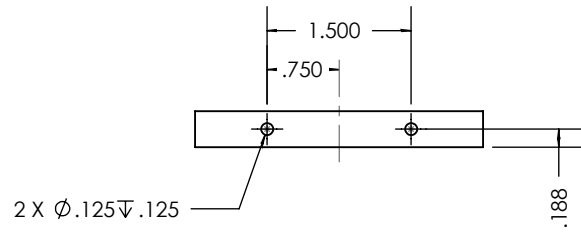
4 X Ø5.11 THRU
 ✓ Ø9.78 X 100°

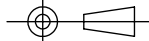
2 X #10-24 UNC-2B

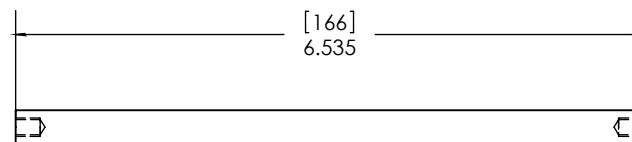
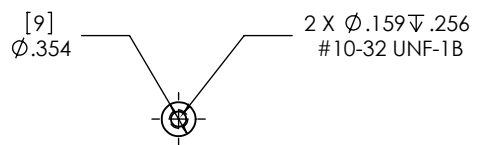
Material:		Dibujó:		Fecha	
Aluminio 6063-T5		Amado Manuel Velázquez Benítez		Junio 2012	
Acot.: mm		Acot. Aux.: in		Base de Máquina	
		Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica		Cant.: 1	Revisó: JHC
				Tamaño: Carta	Escala: 1:2
				PLANO C1	



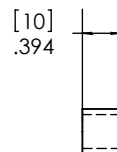
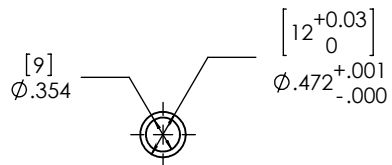
Material:		Dibujó:		Fecha	
Aluminio 6063-T5		Amado Manuel Velázquez Benítez		Junio 2012	
Acot.: in		Acot. Aux.: mm		Soporte lateral 1 Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica	
				Tamaño: Carta	Escala: 1:2
				PLANO C2	



Material:		Dibujó:		Fecha	
Aluminio 6063-T5		Amado Manuel Velázquez Benítez		Junio 2012	
Acot.: in		Acot. Aux.: mm		Soporte lateral 2 Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica	
				Cant.: 1	Revisó: JHC
				Tamaño: Carta	Escala: 1:2
				PLANO C3	

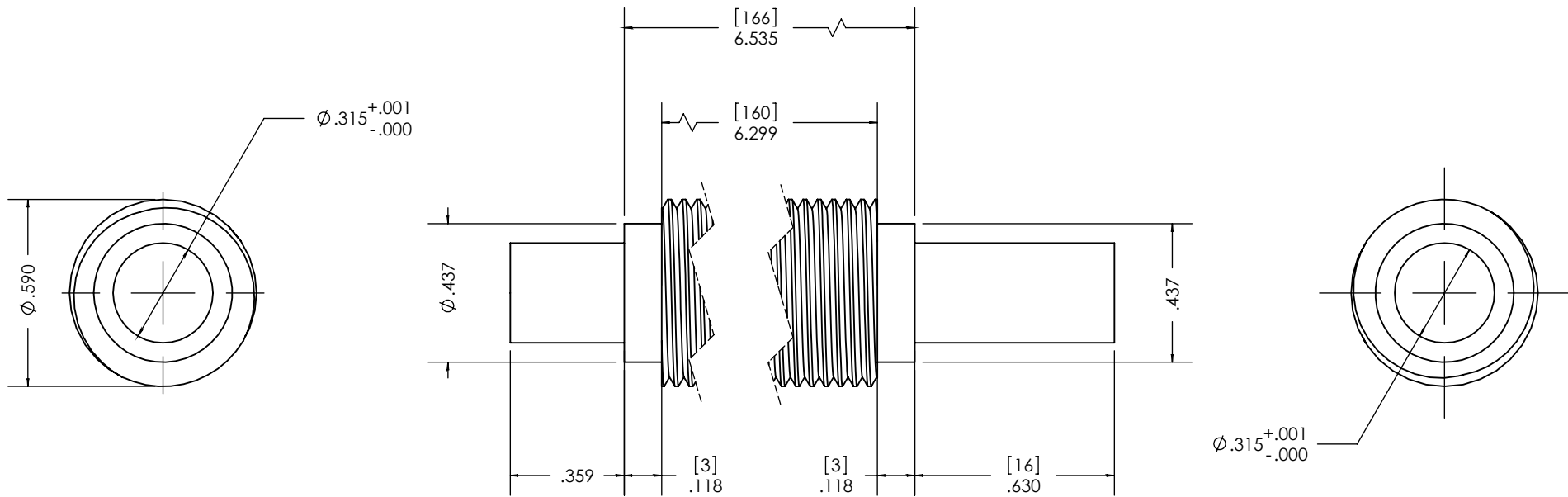


Barra guía

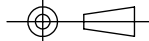


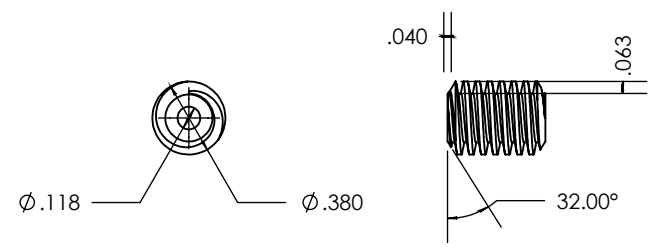
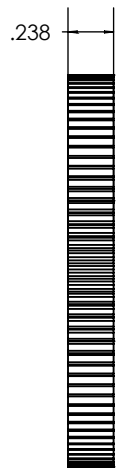
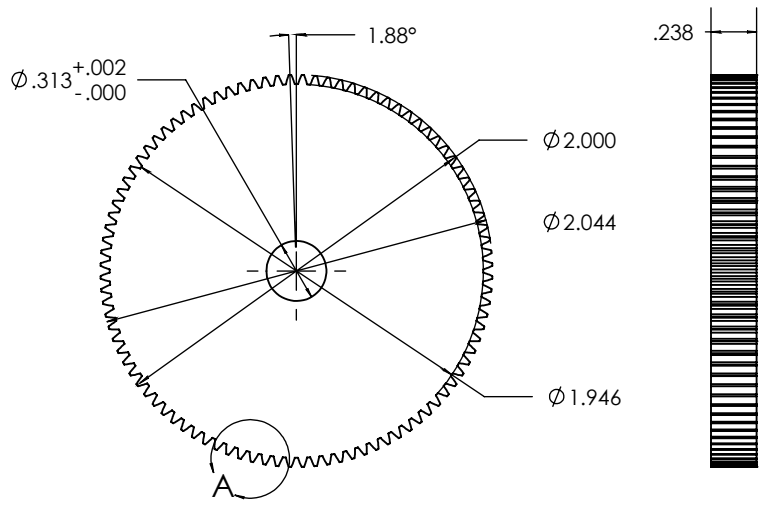
Buje para la barra guía

Material: Acero 1018 Bronce		Dibujó: Amado Manuel Velázquez Benítez		Fecha Junio 2012	
Acot.: in		Acot. Aux.: mm		Barra guía y buje	
		Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica		Cant.: 1	Revisó: JHC
				Tamaño: Carta	Escala: 2:1
PLANO C4					

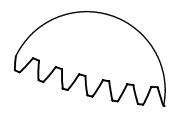


Diámetro exterior 0.590
 Perfil a 60°
 22 hilos por pulgada
 0.030 de profundidad

Material:		Dibujó:		Fecha	
Acero 12L14		Amado Manuel Velázquez Benítez		Junio 2012	
Acot.: in		Acot. Aux.: mm		Husillo Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica	
		Cant.: 1			
				Tamaño: Carta	
				Escala: 2:1	
				PLANO C5	

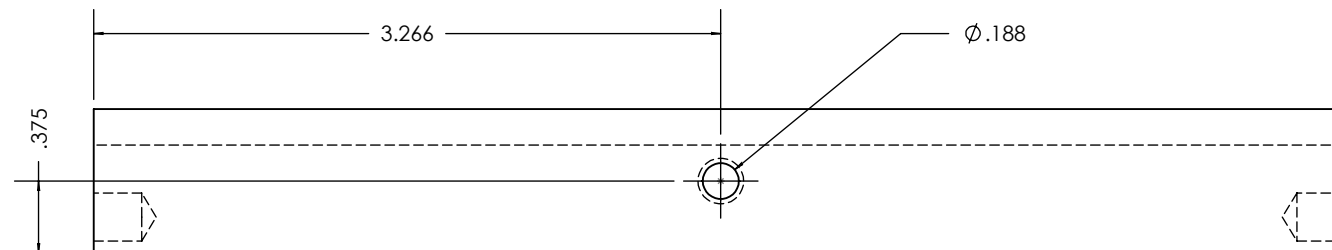
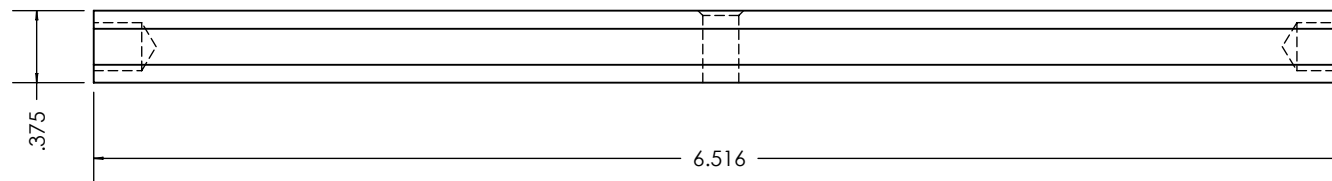
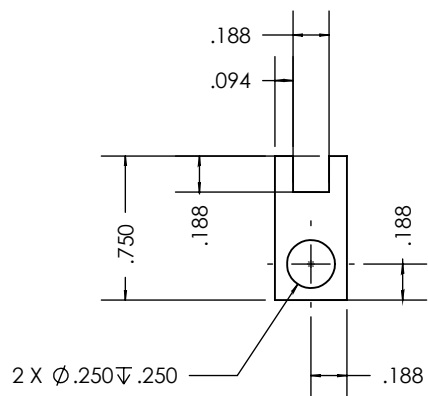


Perfil de rosca cuadrado
 22 hilos por pulgada
 0.63 de profundidad
 1 pza

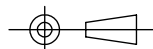


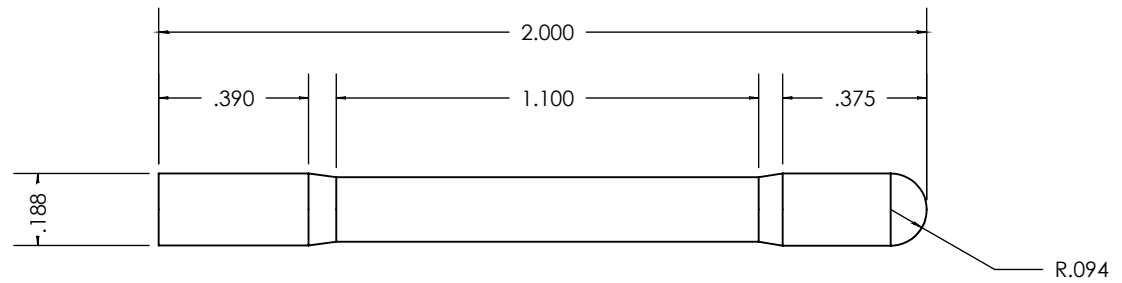
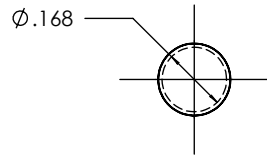
DETALLE A
 ESCALA 2:1
 96 DIENTES
 1 pza

Material: Acero 1020 Bronce		Dibujó: Amado Manuel Velázquez Benítez		Fecha Junio 2012	
Acot.: in		Acot. Aux.: mm		Cant.: 2	
		<p align="center">Engrane y sinfín</p> <p>Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica</p>		Revisó: JHC	
				Escala: 1:1	
				Tamaño: Carta	
				PLANO C6	

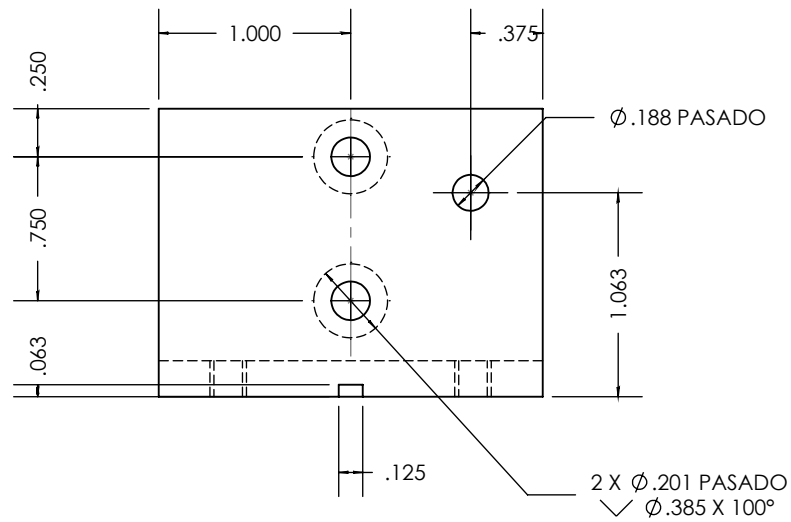
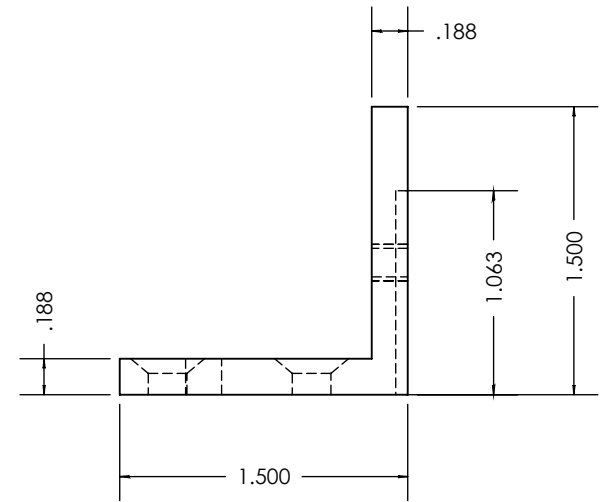
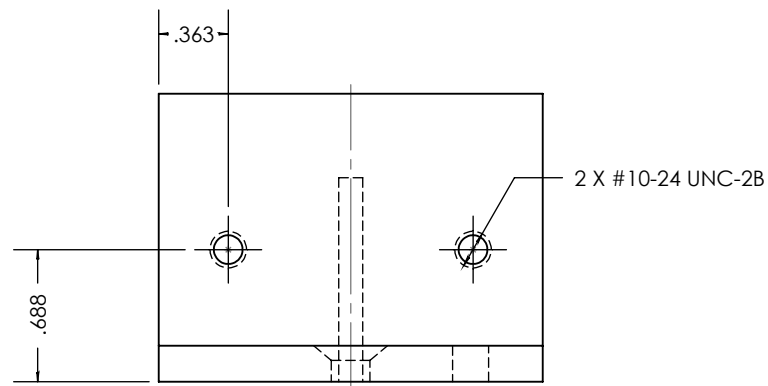


Material:		Dibujó:		Fecha	
Bronce		Amado Manuel Velázquez Benítez		Junio 2012	
Acot.: in		Acot. Aux.: mm		Cant.:	Revisó:
		Barra para levantamiento		1	JHC
		Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica		Tamaño:	Escala:
				Carta	1:1
				PLANO D1	

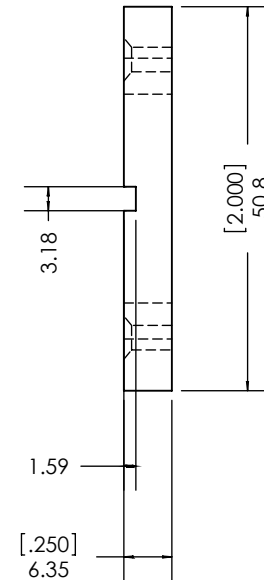
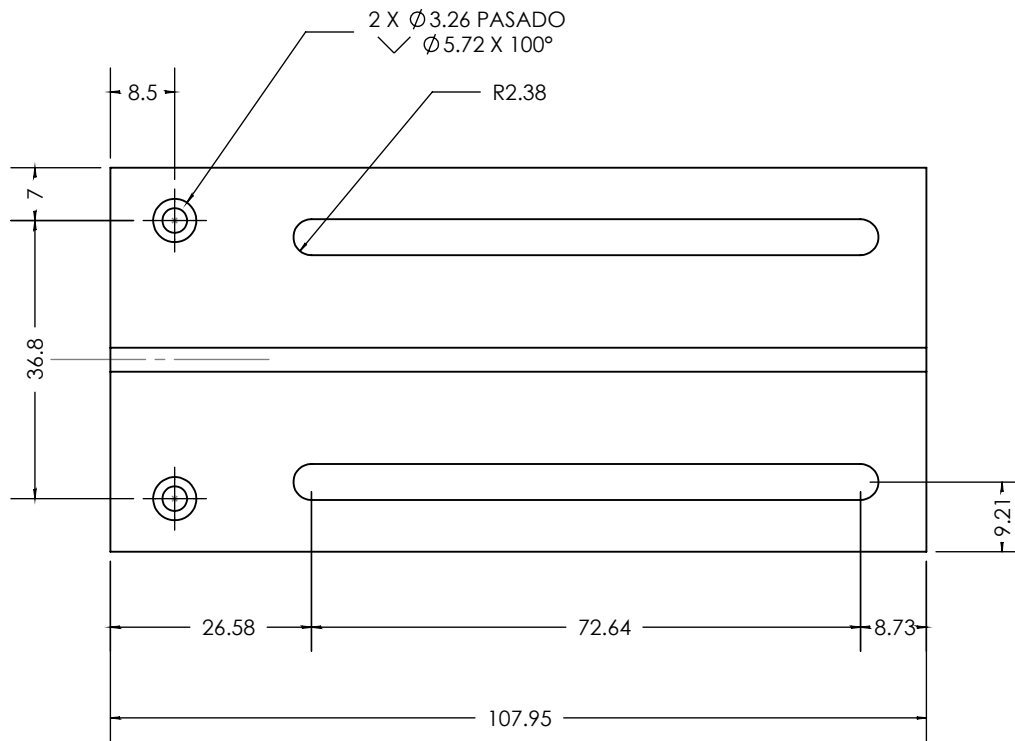




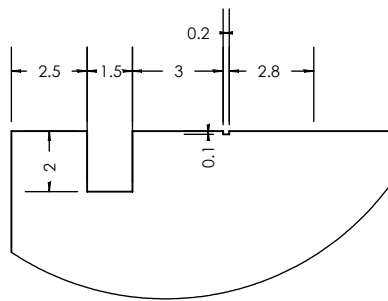
Material: Acero 1018		Dibujó: Amado Manuel Velázquez Benítez		Fecha Junio 2012	
		Manivela		Cant.: 1	Revisó: JHC
Acot.: in	Acot. Aux.: mm	Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica		Tamaño: Carta	Escala: 2:1
				PLANO D2	



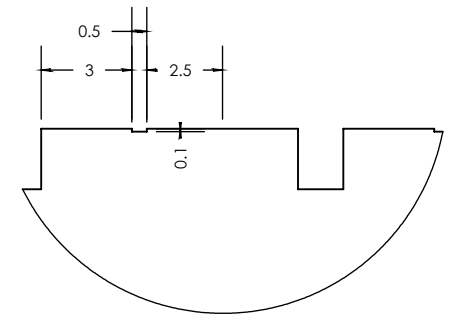
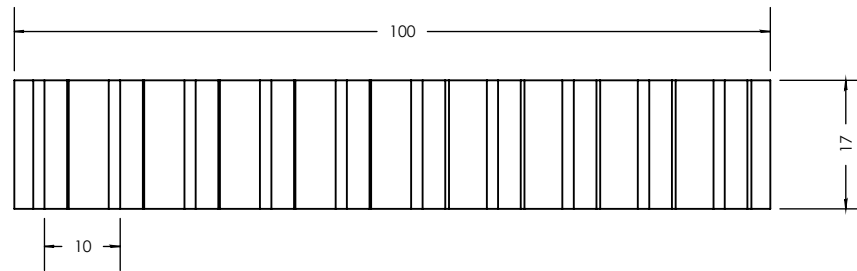
Material:		Dibujó:		Fecha	
Aluminio 6063-T5		Amado Manuel Velázquez Benítez		Junio 2012	
Acot.: in		Acot. Aux.: mm		Cant.: 1	
		Soporte corredera Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica		Revisó: JHC	
				Escala: 1:1	
				PLANO E1	



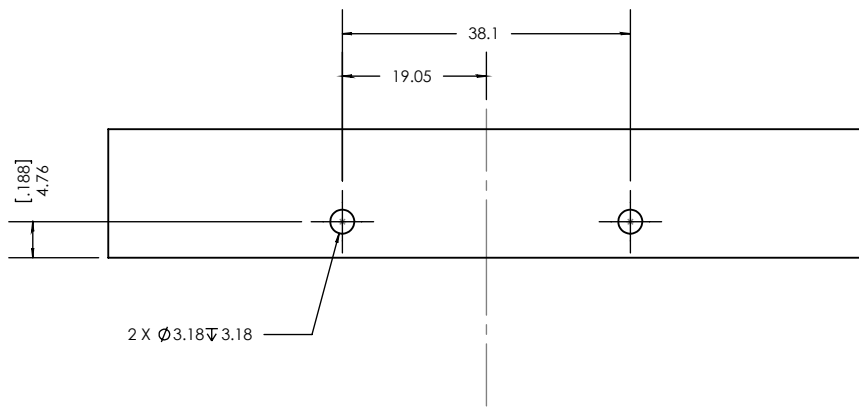
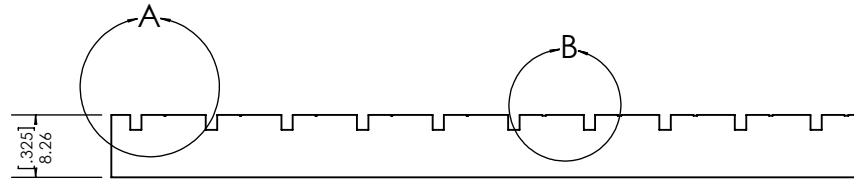
Material:		Dibujó:		Fecha	
Aluminio 6063-T5		Amado Manuel Velázquez Benítez		Junio 2012	
		Corredera		Cant.:	Revisó:
				1	JHC
Acot.:	Acot. Aux.:			Tamaño:	Escala:
mm	in			Carta	1:1
				Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica	
				PLANO E2	



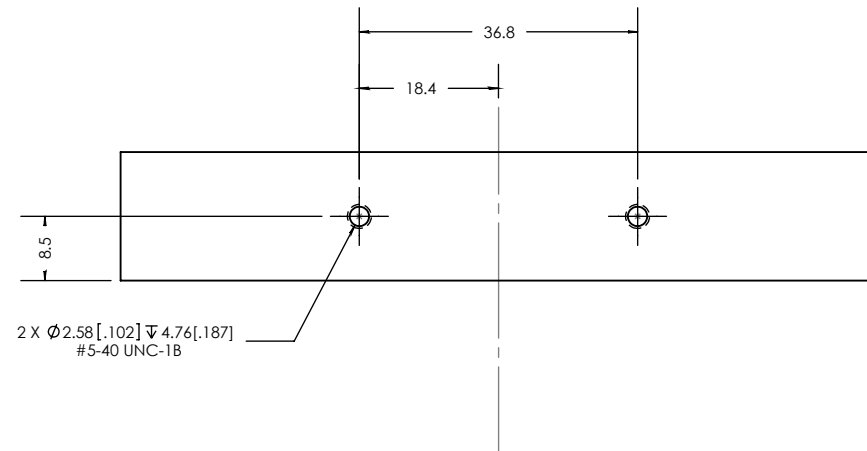
DETALLE A
ESCALA 4:1



DETALLE B
ESCALA 4:1



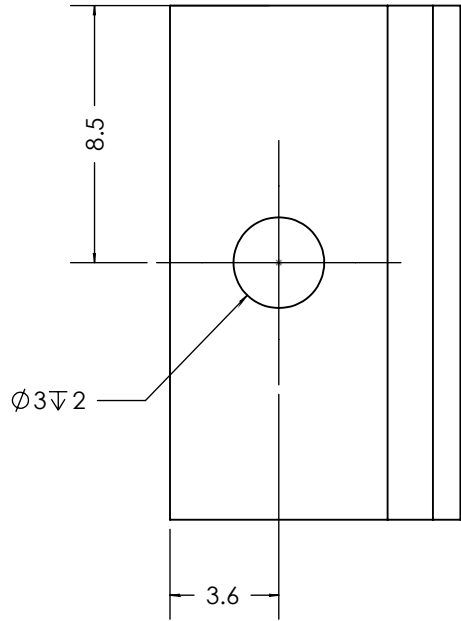
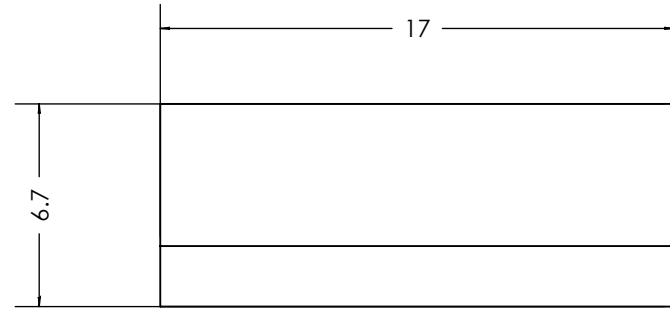
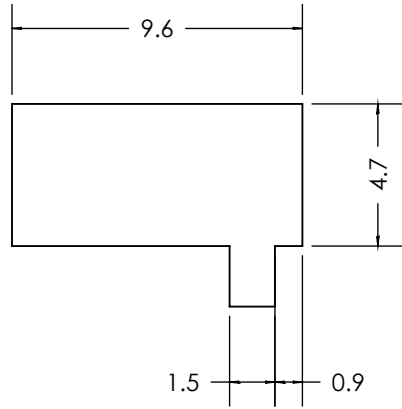
Ensamble con soporte lateral 2



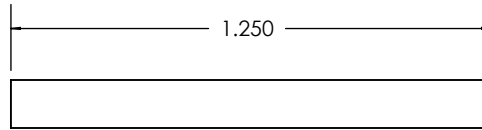
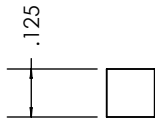
Ensamble con soporte lateral 1

NOTA: Cuidar que al ensamblar las placas, las ranuras pequeñas en donde se colocan las fibras queden alineadas

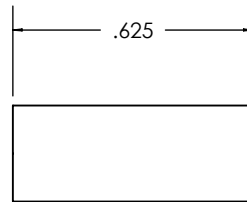
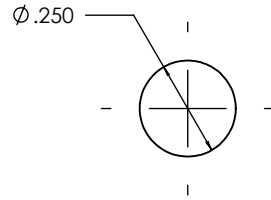
Material: Acero 1018		Dibujó: Amado Manuel Velázquez Benítez		Fecha Junio 2012	
Acot.: mm		Acot. Aux.: in		Cant.: 2	Revisó: JHC
		Placas ranuradas para fibras Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica		Tamaño: Carta	Escala: 1:1
				PLANO E3	



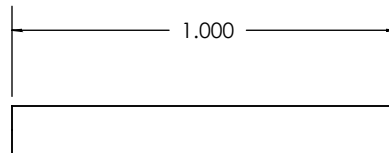
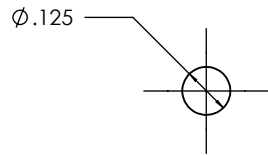
Material: PTFE		Dibujó: Amado Manuel Velázquez Benítez		Fecha Junio 2012	
Acot.: mm		Acot. Aux.: in		Cant.: 20	
		Grapa de sujeción Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica		Revisó: JHC	
				Escala: 4:1	
				PLANO E4	



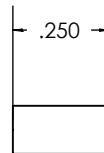
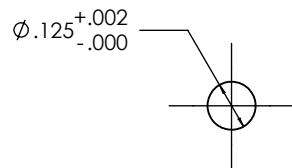
Cuña guía para la corredera
1 pza.



Perno para fijar la barra de
levantamiento
2 pzas.

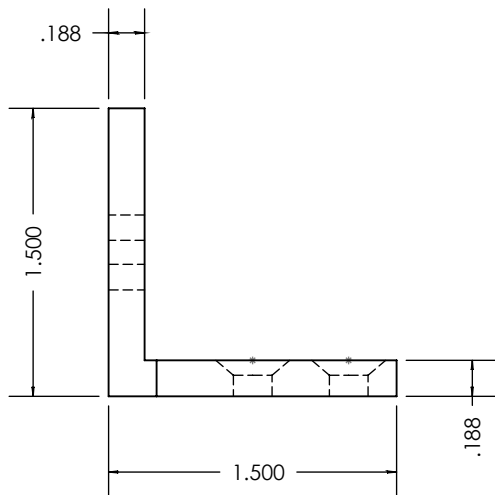
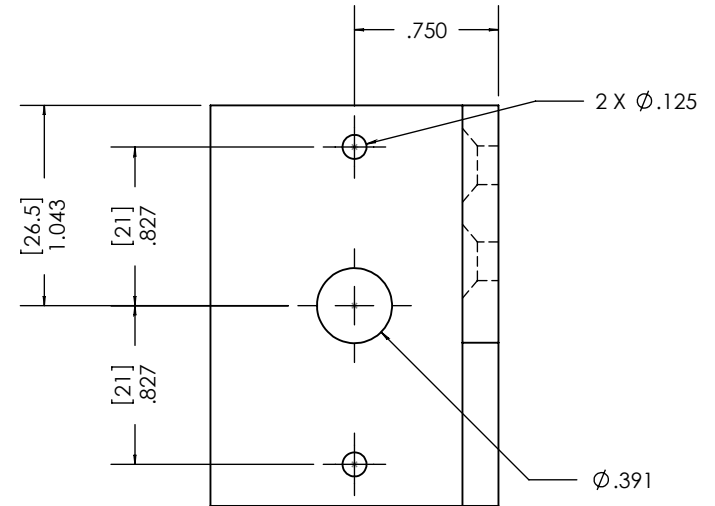
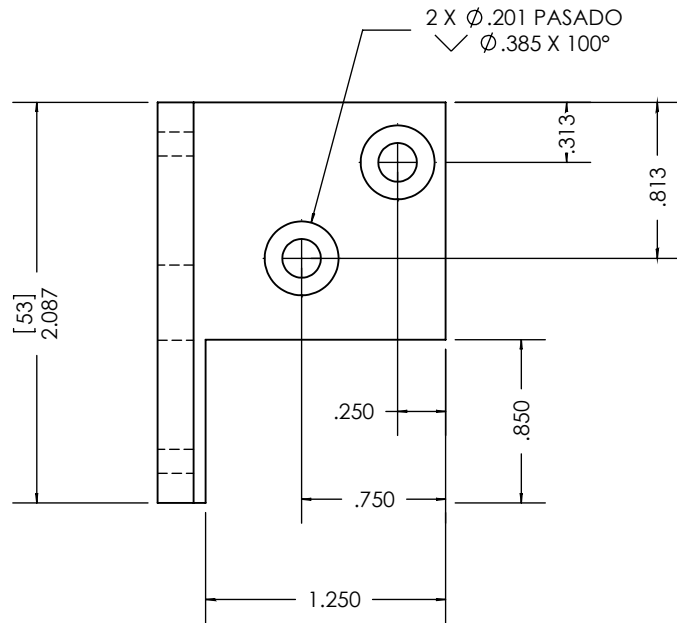


Perno para sujetar la
barra de teflón
1 pza.

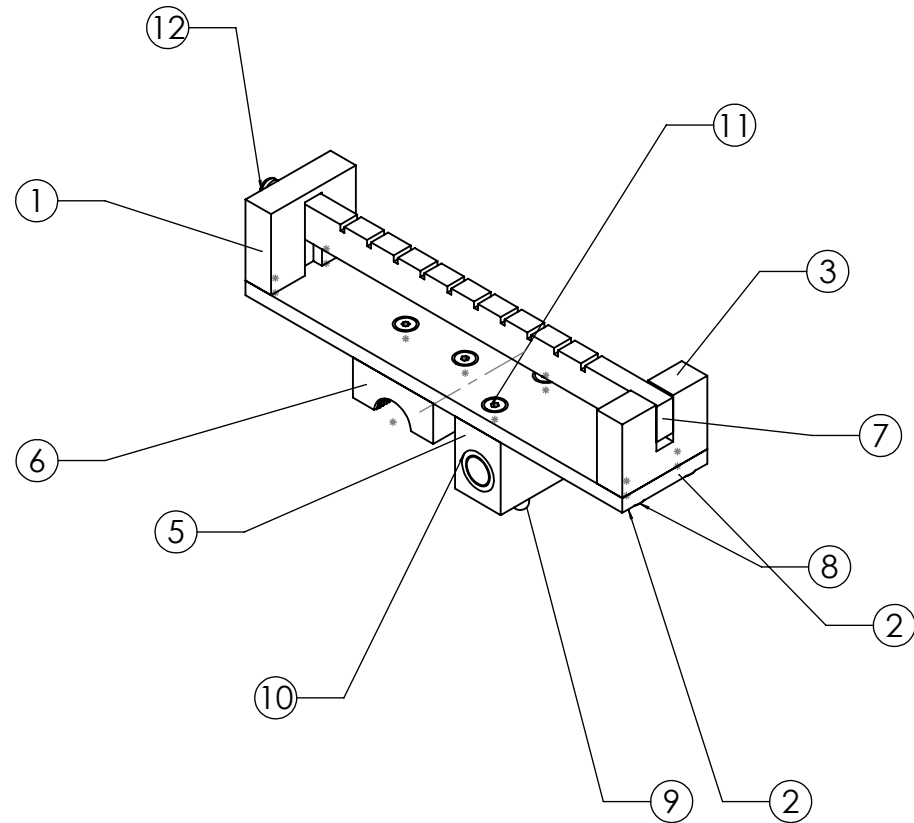
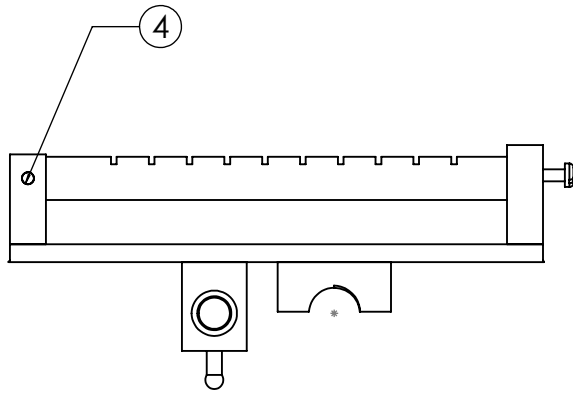


Perno para ensamblar la placa ranurada
para fibras con el soporte lateral 2
2 pzas.

Material: Acero 1018		Dibujó: Amado Manuel Velázquez Benítez		Fecha Junio 2012	
Acot.: in		Acot. Aux.: mm		Pernos y cuña Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica	
				Tamaño: Carta	Escala: 2:1
				PLANO F1	

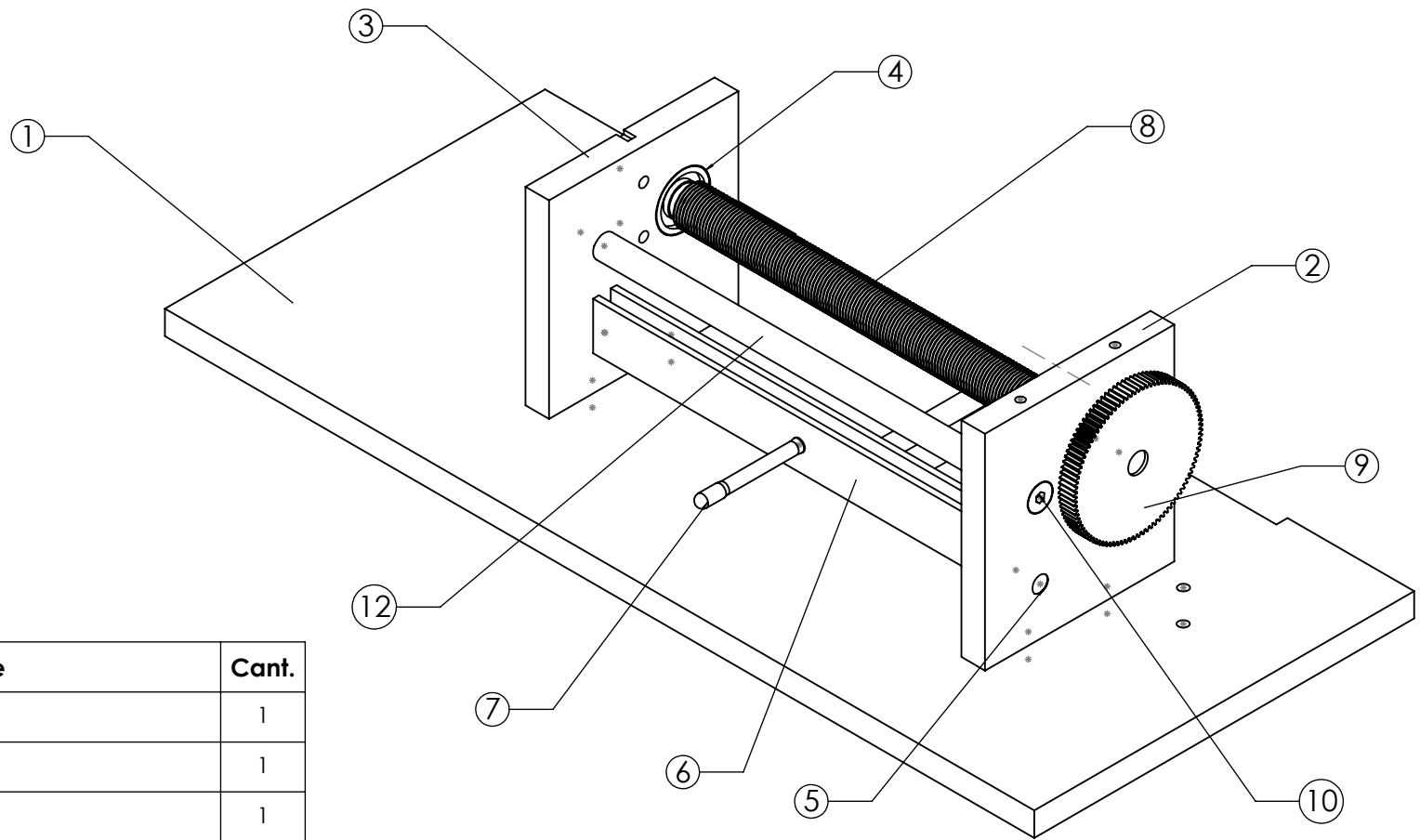


Material: Aluminio 6063-T5		Dibujó: Amado Manuel Velázquez Benítez		Fecha Junio 2012	
Acot.: in		Acot. Aux.: mm		Soporte para motor Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica	
				Tamaño: Carta	Escala: 1:1
		PLANO G1			



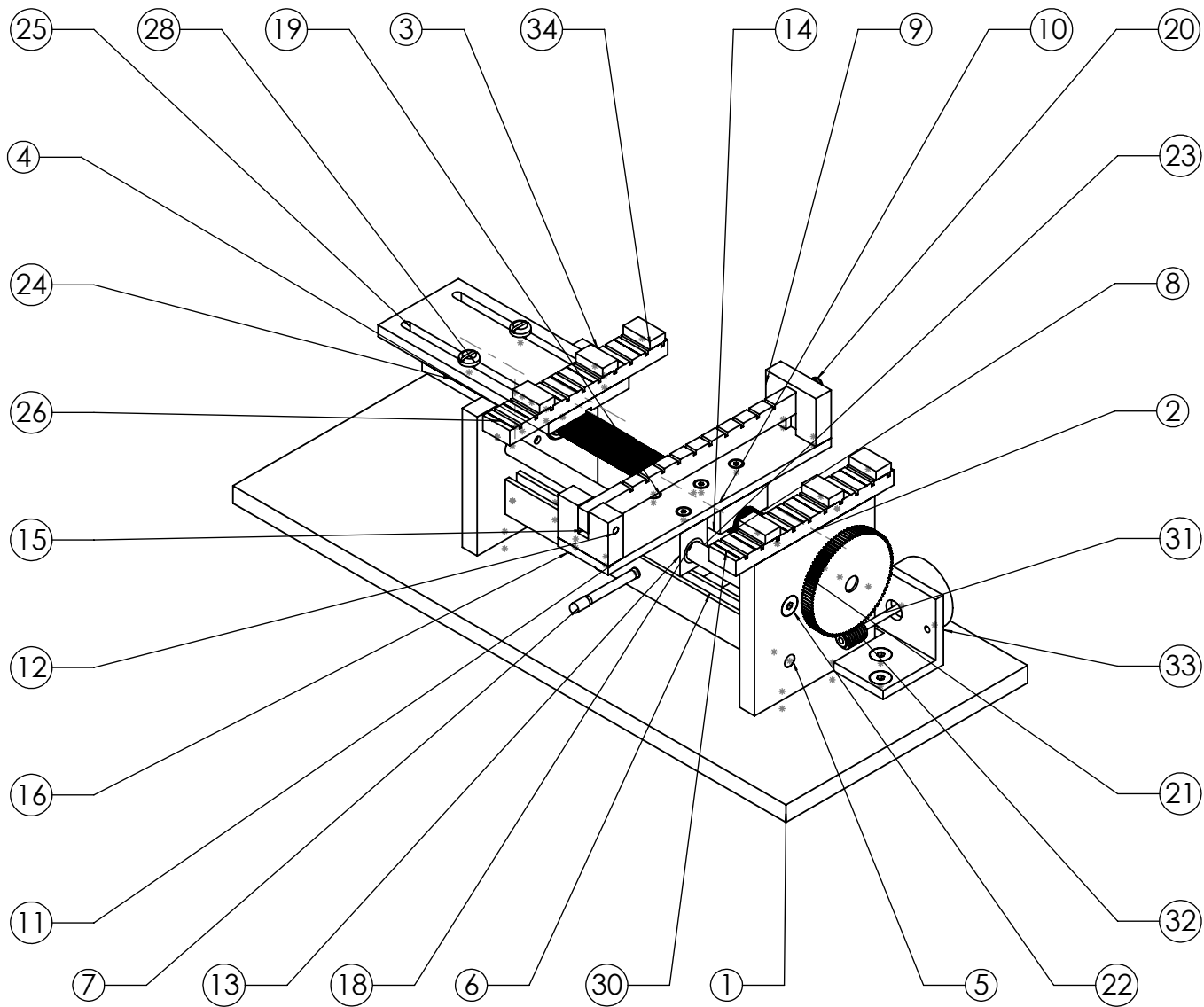
No.	Parte	Cant.
1	Soporte 1 para teflón	1
2	Base de plataforma móvil	1
3	Soporte 2 para teflón	1
4	Perno para teflón	1
5	Bloque guía de plataforma móvil	1
6	Tuerca	1
7	Tira de teflón ranurada	1
8	Tornillo allen #10-24 X 0.5 UNC	4
9	Pivote	1
10	Buje	2
11	Tornillo allen #5-40 X 0.5 UNC	4
12	Tornillo c. estufa #5-40 X 0.5 UNC	1

Material: Varios	Dibujó: Amado Manuel Velázquez Benítez	Fecha Junio 2012	
	Isométrico	Plataforma móvil	Cant.: 1
Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica		Tamaño: Carta	Escala: 1:2
PLANO H1			



No.	Parte	Cant.
1	Base de Máquina	1
2	Soporte lateral 2	1
3	Soporte lateral 1	1
4	Rodamiento #608 22,8,7	2
5	Perno para barra de levantamiento	2
6	Barra para levantamiento	1
7	Manivela	1
8	Husillo	1
9	Engrane 96D	1
10	Tornillo allen #10-32 X 0.5 UNF	2
11	Toenillo allen #10-24 X 0.5 UNC	4
12	Barra guía	1

Material:	Dibujó:	Fecha	
Varios	Amado Manuel Velázquez Benítez	Junio 2012	
	Armazón principal	Cant.:	Revisó:
		1	JHC
		Tamaño:	Escala:
		Carta	1:2
Isométrico	Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica	PLANO H2	



NOTA: Ver tabla F3 para identificación de partes

Material:	Dibujó:	Fecha	
Varios	Amado Manuel Velázquez Benítez	Junio 2012	
	Máquina completa	Cant.: 1	Revisó: JHC
	Máquina para recubrir dispositivos de fibra óptica	Tamaño: Carta	Escala: 1:3
Isométrico		PLANO H3	