



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

FABRICACIÓN DE BOMBA OPTO-NEUMÁTICA A ESCALA MICROMÉTRICA.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO ELÉCTRICO ELECTRÓNICO.

PRESENTA:

MISAEI GIOVANI PÉREZ ZÚÑIGA.

ASESOR DE TESIS:

DR. JUAN ARNALDO HERNÁNDEZ CORDERO.



2014

龍

*Heme aquí...
tratando de retener tontamente el tiempo,
y a quienes me rodean,
porque todo lo que conozco ahora
es la felicidad.*

Misael Giovani

UN BREVE AGRADECIMIENTO

El placer de compartir el reconocimiento que nos coloca más cerca de convertirnos en profesionales de nuestro oficio humano, nos hace conscientes del lugar que ocupamos dentro de la familia, con los amigos, con la persona amada, con los compañeros de trabajo. Es mi gusto decir, que no soy otra cosa sino una representación de los anhelos y sueños de mis amados padres, los consejos y buenos sentimientos de mis dos hermanas, el apoyo de mis familiares, la sincera unidad de mis amigos, y la creciente confianza de aquellas personas que ven algo en mí. Soy tiempo vivido, fui pasado, ahora presente, y seré futuro; verdadero agradecimiento a todos aquellos que siguen contribuyendo con mi interminable formación moral, social e ingenieril.

Gracias a Martha Zúñiga López y Domingo Pérez Ortiz, padres excepcionales.

Gracias a Nancy y Yazmín, hermanas de sabiduría.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México por cobijarme con su conocimiento.

Gracias a la Facultad de Ingeniería por sembrar en mi la voluntad de seguir aprendiendo.

Gracias al Instituto de Investigaciones en Materiales por ampliar mi visión del mundo.

Gracias al Dr. Juan Rodrigo Vélez Cordero por el tiempo dedicado durante el desarrollo de este trabajo.

Gracias al Dr. Juan Hernández Cordero por orientarme en mi primer trabajo profesional.

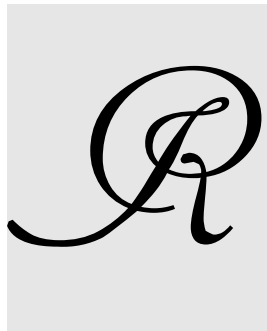
Agradezco también al Conacyt por la beca otorgada para realizar este trabajo como parte del proyecto “Interacción de luz láser con micro y nanoestructuras,” con clave 154464.

Gracias...

Con atención y respeto

Misael Giovani Pérez Zúñiga

Septiembre, 2014



ESUMEN

El presente trabajo demuestra la utilidad del fenómeno de expansión térmica para diseñar un actuador opto-neumático a microescala, esto es, un dispositivo que simula a un pistón neumático fabricado a partir de un capilar vítreo y revestido con un compuesto fotosensible. Los resultados obtenidos servirán para poner a prueba la capacidad de mover líquidos por medios ópticos a través de microcanales. El experimento consiste en utilizar luz láser (con una longitud de onda conocida, $\lambda = 975 \text{ nm}$) guiada por fibra óptica monomodal (SMF-28), y una potencia óptica de aproximadamente 185 mW (para desplazamiento óptimo), que interactúa con el revestimiento del capilar. El recubrimiento permitirá potenciar el efecto térmico para originar, en primer lugar, el mecanismo de expansión-compresión del aire, y en segundo lugar, el desplazamiento del líquido de interés. Como una primera aplicación se pone a prueba un mecanismo de cierre y apertura conformado por una red de microcanales y una membrana hecha de un polímero elástico. En una segunda aplicación, el dispositivo se prueba uniéndolo a un arreglo de microcanales que funcionan como válvula unidireccional, de tal manera que se puede bloquear el flujo de líquido una vez que se ha expulsado cierto volumen del mismo.

La propuesta de fabricación del dispositivo pretende medir la viabilidad de un sistema de inyección para microfluídica utilizando señales ópticas. El desarrollo de un sistema para generar movimiento a escala micrométrica permitirá no sólo suministrar líquido dentro de pequeñas vías, sino también desarrollar sistemas similares mucho más reducidos en un futuro.



SOBRE EL ORIGEN DE ESTE TRABAJO

El principio de funcionamiento del micropistón óptico se desprende como una aplicación relacionada con las investigaciones sobre flujo termocapilar que antecedieron a este proyecto. Es entonces parte del trabajo que se ha desarrollado en el Laboratorio de Sensores de Fibra óptica y Fibras Láser, del Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM. La aportación de este trabajo resulta ser la aplicación del conocimiento, empeño, convicción, y lo más importante, la imaginación que debe caracterizar a cualquier estudiante de ingeniería para materializar un proyecto.



CAPÍTULO I: Introducción.....	1
I.1 De los dispositivos pioneros en el campo de la microfluídica a la actualidad.....	3
I.2 Micro-bombas, una cuestión todavía por resolver.....	4
Referencias.....	6
CAPÍTULO II: Actuadores y sistemas de bombeo microfluídico.....	7
II.1 Mecanismos de acción directa para inducir movimiento en fluidos.....	7
II.2 Mecanismos de acción indirecta para inducir movimiento en fluidos.....	8
II.2.1 Tipos de actuadores utilizados para generar cambios en presión.....	9
II.3 Elementos integrados en sistemas de micro-bombeo.....	12
II.3.1 Microválvulas.....	12
II.3.2 Microdiodos.....	13
II.4 Otros tipos de bombas microfluídicas.....	14
Referencias.....	18
CAPÍTULO III:	
III.1 Principios básicos utilizados en el funcionamiento del actuador.....	19
III.1.1 Óptica.....	19
III.1.2 Termodinámica.....	22
III.1.3 Microfluídica.....	25

III.2 Conversión de energía.....	31
III.2.1 Ley de Estefan y radiación electromagnética.....	31
III.2.2 Trabajo en procesos termodinámicos.....	32
Referencias.....	34

CAPÍTULO IV:

IV.1 Pistón opto-neumático.....	35
IV.1.1 Descripción.....	35
IV.1.1.1 Fabricación del micro pistón.	
IV.1.2 Caracterización experimentales del pistón.....	40
IV.1.2.1 Metodología de las mediciones.	
IV.2 Dispositivo microfluídico de prueba.....	43
IV.2.1 Descripción.....	43
IV.2.1.1 Fabricación.	
Referencias.....	49

CAPÍTULO V:

V.1 Desplazamiento y potencia óptica.....	50
V.1.1 Cálculo del desplazamiento.....	50
V.1.2 Cálculo de volúmenes.....	53
V.2 Desplazamiento y variación de parámetros.....	54
V.2.1 Desplazamiento y variación de la capa fotosensible.....	58
V.3 Velocidad máxima del pistón y eficiencia.....	66
V.3.1 Cálculo de la eficiencia del pistón.....	68
V.4 Fabricación rápida de canales microfluídicos de prueba.....	69

V.4.1 Pruebas de empuje en ángulo de 45°	69
V.4.2 Sistema microdiodo-cubeta.....	72
Referencias.....	81
CAPÍTULO VI:	
VI.1 Conclusiones.....	82
APÉNDICES.....	86



INTRODUCCIÓN

Nos encontramos en pleno año 2014, y el concepto de miniaturización en el campo de la tecnología tiene ya un largo camino recorrido desde que se introdujo en los años 60 por personas como Richard P. Feynman (Premio Nobel de Física, 1965), como una mera predicción de las ventajas de la micro y nanoescala [1]. Feynman aseguraba que la posibilidad de manipular las cosas átomo por átomo permitiría el control y disposición de estructuras complejas que a su vez, permitirían la reducción significativa de los sistemas conocidos, tales como una computadora, donde el manejo y control de información se daría de una forma mucho más eficiente. La limitante de este y otro tipo de ideas revolucionarias fue la incapacidad de disponer de los medios necesarios para poder ahondar en su investigación que se encontraba adelantada a su tiempo.

Durante 1975, Gordon Moore (co-fundador de la compañía Intel, 1968) afirmó que el número de transistores por centímetro cuadrado en un circuito integrado se duplicaba cada 18 meses, lo que se traducía en duplicar la capacidad de un microprocesador en una proyección exponencial; ésta es la llamada Ley de Moore [2].

Es precisamente en la alta escala de integración de los circuitos electrónicos dónde se da un claro ejemplo del avance en cuanto a reducción del espacio necesario para la fabricación de todo un sistema. En el caso de los circuitos, se busca transportar señales eléctricas y realizar, por ejemplo, procesos de acondicionamiento, medición, amplificación, y transducción a otro tipo de señal o energía. Este tipo de funcionalidad permite construir dispositivos altamente sofisticados que sustentan ahora una parte importante de la vida diaria en múltiples actividades.

En 1980, se dieron a conocer los MEMS (microelectro-mechanical systems) que ahora integran componentes eléctricos, electrónicos, ópticos, térmicos y mecánicos [3]. Más tarde en 1990 su dominio se diversificó en áreas químicas, biológicas, y de aplicaciones biomédicas. Se considera que los primeros dispositivos microfluídicos fueron los sistemas de circuitos micro electrónicos, por la analogía existente entre el flujo de electrones y el flujo de un fluido. Cuando estos pequeños dispositivos empezaron a emplear fluidos, operando bajo condiciones desconocidas, fue necesario la creación de una nueva

disciplina: la *microfluídica*, que puede ser definida como el estudio del flujo que circula a través de un sistema micrométrico artificial [4].

Anteriormente los MEMS comprendían un tamaño entre 1 y 300 micrómetros (utilizando el prefijo micro, μ), entendiéndose por micrómetro la longitud equivalente a la millonésima parte (10^{-6}) de un metro [5]; en la actualidad existen MEMS por debajo de 1 μm , pero también más grandes que 300 μm [4]. Los dispositivos microfluídicos comprenden un rango similar en tamaño, de acuerdo al fin para el que son fabricados, y pueden manipular volúmenes de fluido en el rango de 10^{-9} a 10^{-18} L [6], dentro de canales con dimensiones de decenas a cientos de micrómetros.

En la actualidad los dispositivos microfluídicos se han consolidado como herramientas analíticas en áreas tales como la industria alimentaria y farmacéutica, diagnóstico y análisis clínico, al igual que en monitoreo ambiental (ver Tabla 1); por su rapidez, portabilidad, alta resolución (por ejemplo, manejo y análisis de células), sensibilidad, y bajo requerimiento de cantidad de muestra y reactivos [7], son por mucho una herramienta indispensable en un futuro de tecnologías ahorrativas en tiempo, costo, y cantidad.

CAMPO TECNOLÓGICO	DISPOSITIVOS COMUNES/ APLICACIONES
<i>De medición inercial</i>	<i>Acelerómetros, sensores de velocidad, detectores de vibración.</i>
<i>Microfluidos y pruebas químicas/análisis</i>	<i>Chips genéticos (Gene-chip), Laboratorios integrados (Lab-on-a-chip), sensores químicos, controladores de flujo, micro-dosificadores, micro-válvulas.</i>
<i>MEMS ópticos (MOEMS)</i>	<i>Despliegue en pantalla (Display), Interruptores ópticos, óptica adaptativa.</i>
<i>Tecnología de radiofrecuencia (RF)</i>	<i>Interruptores, filtros, capacitores, inductores, antenas, acopladores de fase.</i>
<i>Otros</i>	<i>Actuadores, micro-relevadores, sensores de humedad, almacenamiento de datos, sensores de tensión, componentes micro-satelitales.</i>

Tabla1. *Microfluídica y MEMS [4].*

La Tabla 1 resume la clasificación general de los MEMS, así como sus principales aplicaciones. Podemos situar a los dispositivos microfluídicos dentro de la misma gama por estar estrechamente relacionadas ambas tecnologías.

I.1 De los dispositivos pioneros en el campo de la microfluídica a la actualidad.

Durante el período en el que los MEMS basados en silicio comenzaron a despegar, se presentó la oportunidad para comenzar a fabricar sistemas microfluídicos simples:

El primer dispositivo microfluídico registrado fue un sistema de cromatografía de gases en 1975. A partir de 1991, apareciendo casi cronológicamente, están los sistemas de separación por electroforesis, sistemas de bombeo electro-osmóticos, sistemas de separación por difusión, micromezcladores, amplificadores de ADN, como los más representativos [4]. La idea de construir micro fábricas a partir de los MEMS se hizo muy popular en los años 80, pero las dificultades para producir esta tecnología a partir de silicio eran enormes.

En 1994 se logró la fabricación de un sistema que integraba tres diferentes funciones: la mezcla de reactivos, reacciones enzimáticas, y separación. El dominio de los sistemas analíticos integrados ha sido designado como μ TAS (*micro-total-analysis systems*) o, ambos términos sinónimos, los cuales se utilizan para referirse a un dispositivo de análisis que enlaza diversos procesos en una sola pieza [4]. Estos dispositivos se volvieron comerciales rápidamente por las múltiples ventajas que ofrecen (ver Figura I.1 [4]).

Figura I.1 Chip Biosite. En sólo 15 minutos es posible saber si se presentará o no un ataque cardíaco en una persona.



La capacidad de estos pequeños dispositivos para manejar una cantidad minúscula de reactivo los hace ideales en el campo de la medicina, química, y biología cuando se trabaja con muestras altamente valiosas, así como para el análisis de sustancias peligrosas.

En 2008 se presentaron sistemas microfluídicos *in vitro* para mejorar el desarrollo embrionario bovino. También, en el mismo año, se pone a prueba un láser de pulsos de duración ultracorta (*femtosecond laser*) integrado en un sistema *lab-on-a-chip* para destruir nematodos [8].

En 2010 se utiliza un sistema microfluídico para solucionar problemas comunes en radiosondas al utilizar métodos convencionales con radiofármacos. El dispositivo, fabricado en polidimetilsiloxano (PDMS) y vidrio, se emplea para detectar biomoléculas y radio metales [9].

En días más recientes la microfluídica ha buscado simplificar aún más los procesos de fabricación de los dispositivos ya conocidos, logrando obtener técnicas de “prototipo rápido” y de fácil reproducibilidad, que requieren un par de horas para su fabricación y materiales comunes disponibles en cualquier región del mundo [10].

1.2 Micro-bombas, una cuestión todavía por resolver.

Muchos problemas han surgido cuando se trata de construir una micro-bomba, por ejemplo las válvulas miniaturizadas que tienden a adherirse irreversiblemente en el interior del dispositivo, haciendo necesario reducir el área de la superficie de contacto. En este aspecto, una de las preguntas más importantes es: ¿cómo hacer circular fluido dentro de micro canales?

Los principales retos al momento de fabricar un sistema microfluídico involucran indudablemente tres aspectos:

Interconexiones de fluido. La conexión entre dos sistemas microfluídicos, o entre un sistema microfluídico y el mundo exterior, debe ser de manera simple, de una forma estandarizada, y con bajas pérdidas [4].

-Bombas y válvulas. Elementos que anteriormente se fabricaban en silicio y que resultaban ser complicados de fabricar y casi imposibles de integrar en un chip ahora ofrecen la posibilidad de lograrlo. Con la llegada de las tecnologías basadas en elastómeros, a finales de 1998, se ofrecen elegantes posibilidades para la fabricación de válvulas y bombas [4].

-Inyección de fluido. La inyección de un fluido representa un trabajo que no siempre tiene una simple solución, especialmente cuando la muestra a insertar es muy pequeña y no es posible ampliarla (por ejemplo, proteínas extraídas de una célula) [4].

A pesar de los numerosos obstáculos presentes en el análisis de microsistemas, el manejo de pequeñas dimensiones permite desarrollar una serie de técnicas originales para el movimiento y control de fluidos, que no pueden ser implementadas, bajo las mismas condiciones, en el mundo a gran escala [4].

Objetivo del presente trabajo

Demostrar que es posible inducir movimiento de líquido a través de microconductos, utilizando para ello un dispositivo actuador, el denominado *pistón opto-neumático*, fabricado a pequeña escala que simula el principio de funcionamiento de un pistón mecánico común. Finalmente se medirá así el efecto de desplazamiento alcanzado al haber utilizado luz láser como fuente de excitación no convencional.

Objetivo secundario

Poner a prueba el micropistón obtenido mediante dos tipos de configuraciones que permiten ver su respuesta como válvula de cierre de un microconducto, y como sistema inyector para microcanales.

Referencias

- [1] Feynman, R. P. There's a plenty of room at the bottom. *Engineering and Science* 1960, Caltech.
- [2] Cheang Wong, J. C. Ley de Moore, nanotecnología y nanociencias: síntesis y modificación de nanopartículas mediante implantación de iones. *Revista Digital Universitaria* 2005, 6(7), ISSN: 1067-6079.
- [3] Herrera-May, A.; Aguilera-Cortés, L. A.; Manjarrez, E.; Gonzáles-Palacios, M. Sistemas nanoelectromecánicos: origen, aplicaciones y desafíos. *Interciencia* 2010, 35 (3).
- [4] Tabeling P. *Introduction to microfluidics*. Oxford, 2005.
- [5] Definición micrómetro. Disponible en URL: <http://lema.rae.es/drae/?val=microescala>
- [6] Abou-Hassan, A.; Sandre, O.; Cabuil, V. *Microfluidics in organic chemistry*. *Angewandte Chemie International Edition* 2010, 49, 6268-6286.
- [7] Sosól-Fernandez, R. E.; Marín-Lizárraga, V. M.; Rosales- Cruzaley, E.; Lapizco-Encinas, B.H. Análisis de células en dispositivos microfluídicos. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 2012, 11(2), 227-248.
- [8] Salieb-Beugelaar, G. B.; Simone, G.; Arora, A.; Philippi, A.; Manz, A. Latest developments in analysis systems, *Analytical Chemistry* 2010, 82 (12), 4848- 4864.
- [9] Wheeler, T. D.; Zeng, D.; Desai, A. V.; Onal, B.; Reichert, D. E.; Kenis, P. J. A. Microfluidic labeling of biomolecules with radiometals for use in medicine. *Lab Chip* 2010, 10, 3387-3396.
- [10] Cooksey, G. A.; Atencia, J. Pneumatic valves in folded 2D and 3D fluid devices made from plastic films and tapes. *Lab Chip* 2014, 14, 1665-1668.

A

CTUADORES Y SISTEMAS DE BOMBEO MICROFLUÍDICO

Como se vio en el primer capítulo, el avance tecnológico en el área de la microescala ha traído nuevos dispositivos microfluídicos. Los sistemas auxiliares, que cumplen con la función de bombeo y control de flujo que utilizan actuadores mecánicos, térmicos, magnéticos, eléctricos, químicos, y actualmente ópticos, y combinados en múltiples configuraciones con elementos de control de flujo (válvulas, diodos, canales) hacen posible el manejo y suministro de fluidos, principalmente de soluciones líquidas.

En este capítulo se describen aquellos componentes actuadores de amplio uso para inducir movimiento de líquido. Particularmente, y en relación al desarrollo de este trabajo, se hace énfasis en el uso de la transmisión de una diferencia de presión como mecanismo para generar movimiento de manera indirecta. Para concluir se mencionan ejemplos representativos, que incluyen otras técnicas de bombeo peculiares.

II.1 Mecanismos de acción directa para inducir movimiento en fluidos.

Son arreglos que utilizan una fuerza controlada para actuar sobre el fluido sin necesidad de una estructura intermedia para ocasionar movimiento. La mayoría son aplicadas hacia medios acuosos. Estos mecanismos se apoyan en principios físicos conocidos para generar movimiento en fluidos a lo largo de micro canales [1]. Los principales son:

-*Flujo por presión.* El fluido es impulsado a través del canal mediante instrumentos que generan presión positiva controlada, como las bombas de jeringa (Figura I.1).

Figura I.1 Bomba de jeringa [2].



-Acción de un campo eléctrico. Si el líquido contiene macromoléculas cargadas, éstas tienden a moverse por la presencia de un campo eléctrico, la fuerza de Coulomb actúa para mover el volumen de líquido (ver Figura II.2).

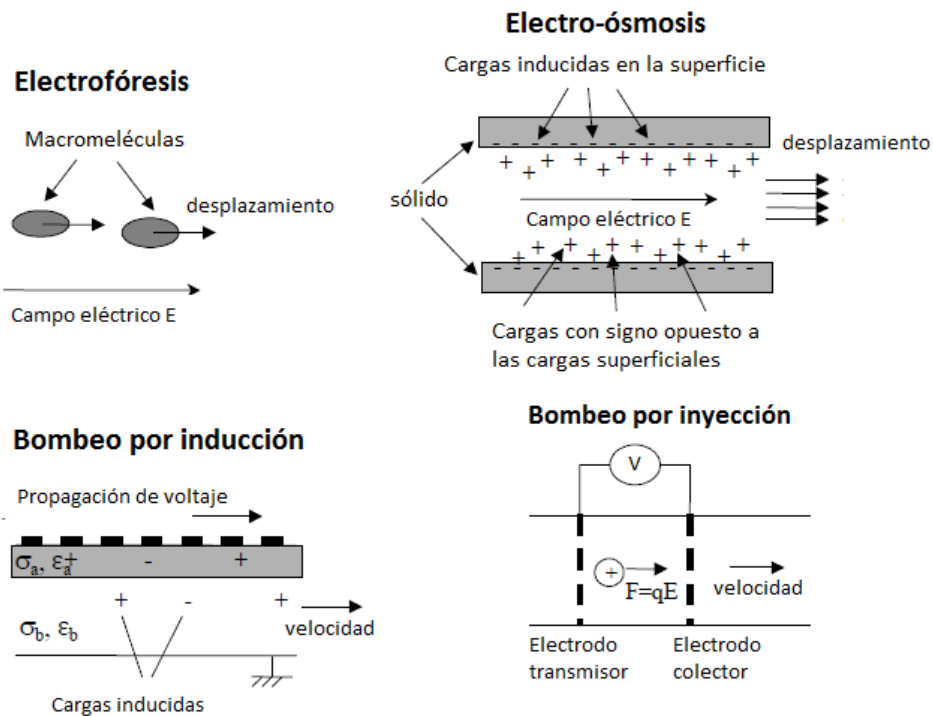


Figura II.2 Técnicas directas para generar movimiento por campo eléctrico [1]. Apparently the method by induction is similar to the injection pump, but the induction pump uses a dielectric liquid on which the movement of the electric charges, by means of an electromagnetic wave generated on the surface of the solid. The injection pump uses electrodes immersed in the liquid, where the Coulomb force acts to generate movement.

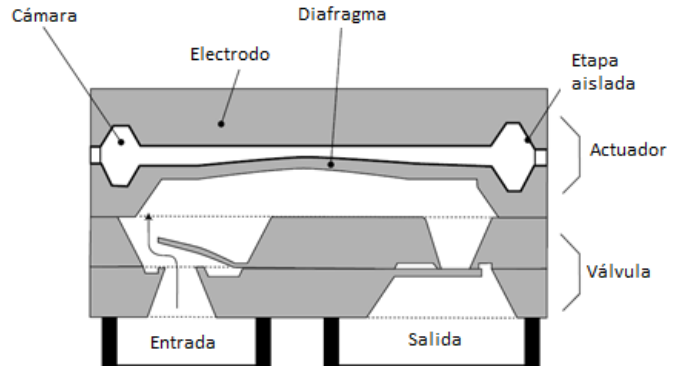
II.2 Mecanismos de acción indirecta para inducir movimiento en fluidos.

Los sistemas para generar movimiento de manera indirecta usualmente se refieren a las microbombas, que en su mayoría emplean mecanismos para el control de muy pequeñas dosis de un tipo de fluido utilizando una microestructura para realizar el proceso (siendo esta última la característica más extendida en estos dispositivos).

Para transmitir el movimiento por variación de presión, generalmente se hace uso de una membrana o diafragma que experimenta una deflexión, debida a un actuador específico, creando un cambio de volumen en forma de flujo acompañado de cierta velocidad (ver Figura II.3).

Los componentes comunes de estos microdispositivos pueden ser las micro válvulas mecánicas (poseen elementos móviles cuya función es impedir o controlar el flujo de fluido), micro diodos (elementos con una geometría determinada la cual funciona dependiendo de la dirección del flujo), y por supuesto los microcanales como elementos de conexión [1].

Figura II.3 Diseño de una microbomba integrada por dos etapas; el actuador (etapa superior) provoca la deflexión del diafragma. El movimiento es transferido a un sistema de válvulas de una sola dirección (etapa inferior) que conecta la salida y la entrada [1].



II.2.1 Tipos de actuadores utilizados para generar cambios en presión.

II.2.1.1 Deformación de materiales activos.

Hay tres tipos de materiales activos con diferentes propiedades:

-*Piezoelectricidad*. Aquellos materiales polarizados eléctricamente bajo presión mecánica, y que se deforman en presencia de una polarización eléctrica (ver Figura II.4) [1].

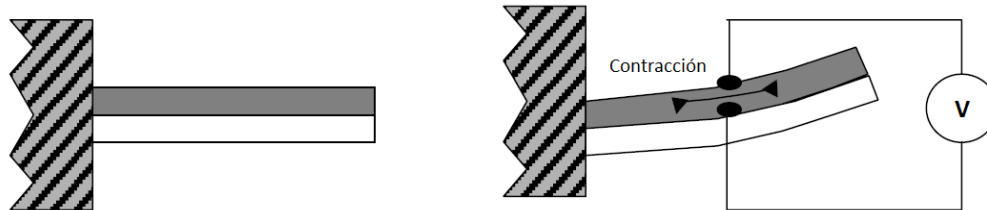
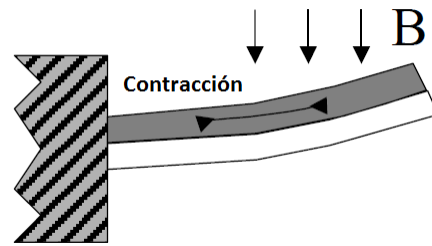


Figura II.4 Deformación por diferencia de potencial [1].

-*Magnetostricción*. Es similar al efecto de piezoelectricidad, pero en este caso la deformación mecánica es inducida por la presencia de un campo magnético (ver Figura II.5) [1].

Figura II.5 Deformación por campo magnético [1].



-Aleaciones con memoria de forma. Materiales que pueden someterse a deformaciones por arriba de los metales comunes. Después de ser tratados, estos materiales memorizan dos formas geométricas, pasando de una a otra por simple calentamiento o enfriamiento (ver Figura II.6) [1].

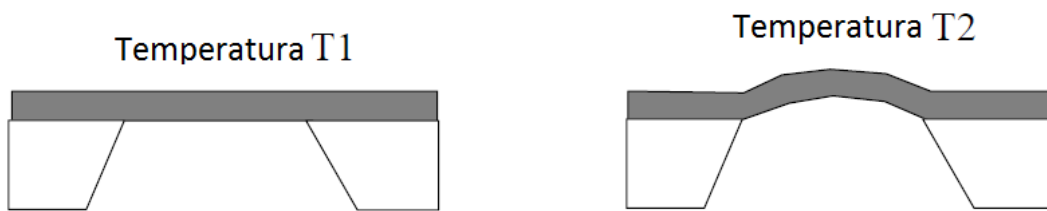


Figura II.6 Deformación por temperatura [1].

Deformación de materiales pasivos.

Los fenómenos usados con más frecuencia dentro de la microfluídica para lograr una deformación de manera pasiva [1] son:

- *Acción neumática.* Intuitivamente, la forma más simple de deformar una estructura es someterla a una diferencia de presión. Existe la posibilidad de lograr una diferencia de presión por métodos térmicos, electroquímicos y actualmente ópticos, que puede ser aprovechada para ocasionar movimiento.

- *Acción termoneumática.* Se basa en incrementar la temperatura de una estrecha cavidad que ocasiona una sobrepresión que hace posible deformar alguna pared flexible de la cavidad. El incremento en temperatura comúnmente es obtenido también por el *efecto Joule*, generado en un arreglo de conductores inmersos en la cámara (Figura II.7).

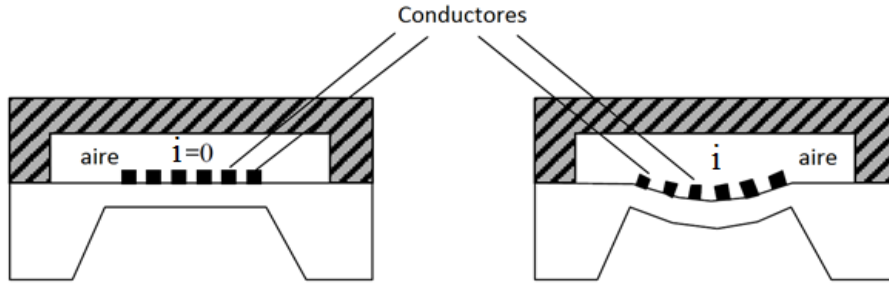


Figura II.7 Deformación termoneumática [1].

-Acción electroquímica. La acción electroquímica (por ejemplo, electrólisis del agua) dentro de una cámara cerrada hace posible generar una sobrepresión en una pared deformable (ver Figura II.8). El control de la presión puede ser manejado por un circuito electrónico con un micro sensor para determinar la presión actual.

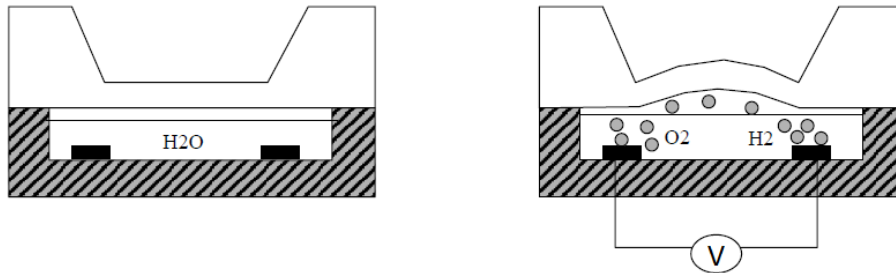


Figura II.8 Deformación por reacción química [1].

-Acción electromagnética. Interacción entre dos fuentes de campo magnético, que pueden ser de tres tipos de naturaleza: un material conductor en el cual circula una corriente (por ejemplo, un devanado); un material con una magnetización permanente (imán permanente); o un material con magnetización inducida (material ferromagnético). De acuerdo a esto, puede incluirse un material con corriente y un magneto, o bien, una corriente y un material ferromagnético (ver Figura II.9).

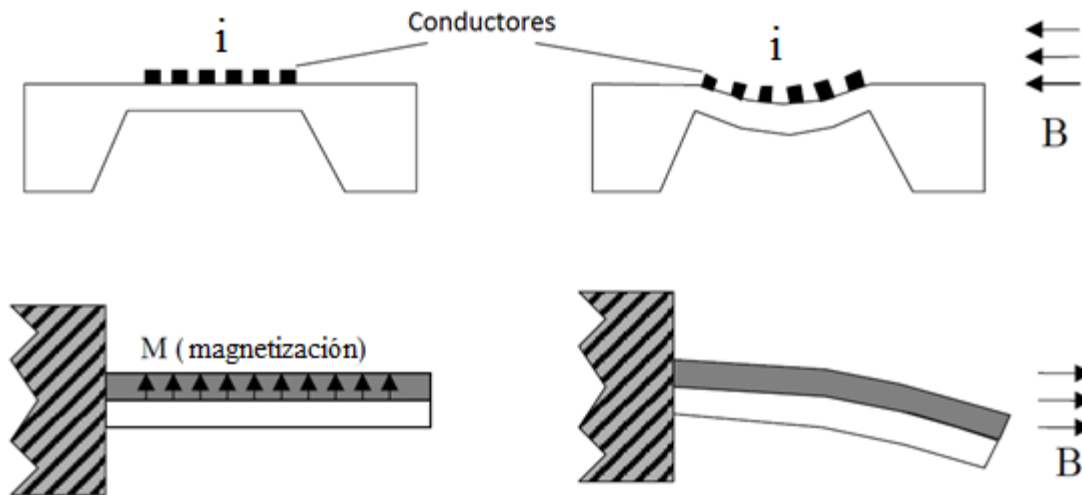
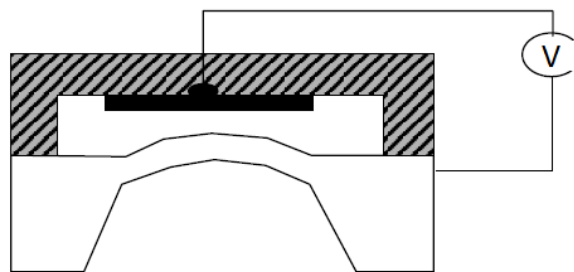


Figura II.9 Ejemplos de actuadores electromagnéticos. El campo magnético B es creado externamente [1].

-Acción electrostática. Surge debido a la interacción de dos fuentes de campo eléctrico que pueden tener tres tipos de naturaleza: un material conductor a través del cual se aplica una diferencia de potencial (electrodo); un material dieléctrico con polarización permanente (conocido como electret); o un material dieléctrico con polarización inducida (material dieléctrico). Las posibles interacciones se dan entre dos electrodos, entre un electrodo y un electret, o entre un electrodo y un material dieléctrico (ver Figura II.10).

Figura II.10 Ejemplo de actuador electrostático [1].



II.3 Elementos integrados en sistemas de micro-bombeo.

La asociación entre actuadores y microcanales que se unen a cámaras o depósitos cumplen con el funcionamiento parcial del micro dispositivo de bombeo. Dependiendo de la complejidad del proceso de bombeo que se realice es necesario agregar alguno o todos los elementos siguientes para complementar el funcionamiento [1].

II.3.1 Microválvulas.

II.3.1.1 Válvulas activas.

Por medio del uso de un sistema formado por un actuador y una geometría concebida por la deformación de un material (por ejemplo, paredes elásticas, membranas, ménsulas, etc.), se puede elegir el cierre o la apertura de un micro canal y obtener diversos arreglos que ejecuten el trabajo de una válvula (ver Figura II.11) [1].

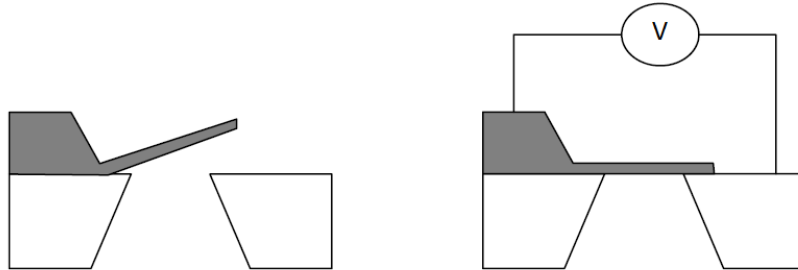


Figura II.11 Ejemplo de válvula activa, empleando un actuador electrostático para forzar el cierre del conducto [1].

II.3.1.2 Válvulas pasivas.

Es posible bloquear un flujo a través de un conducto sin usar un actuador, utilizando únicamente la diferencia de presión en un fluido presente en ambos lados de una estructura que contiene al elemento elástico (ver Figura II.12 [1]), como una ménsula flexible.

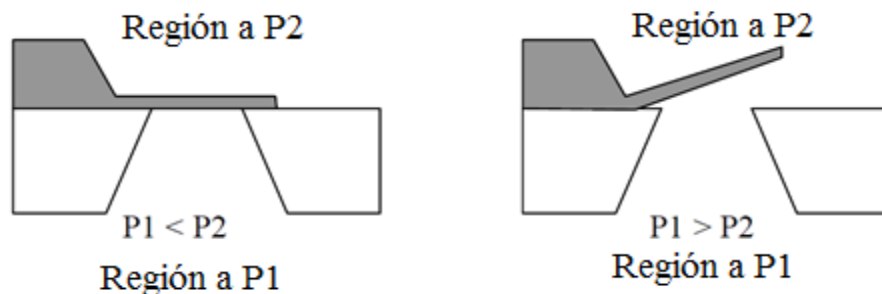
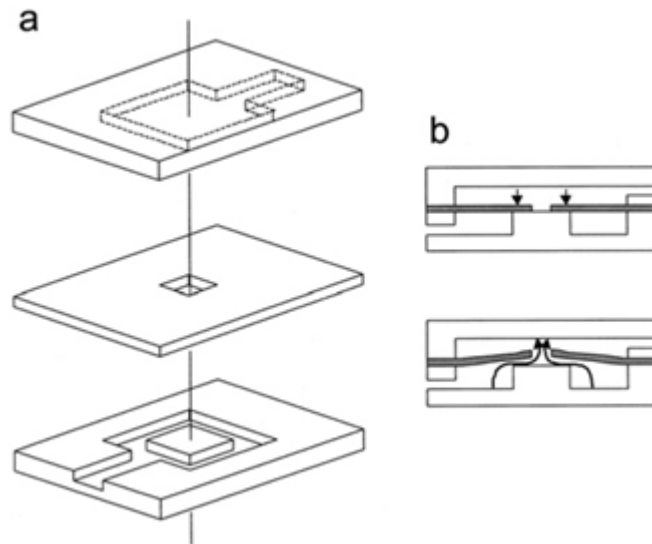


Figura II.12 Ejemplo de válvula pasiva, empleando una diferencia de presión (P) es posible forzar la apertura de una válvula normalmente cerrada.

Las ventajas de utilizar válvulas pasivas, además de la no dependencia de un actuador, se encuentra en el espacio mínimo requerido para incluirlas en un dispositivo completo de bombeo. Los sistemas de control de líquido pueden ser definidos totalmente utilizando sólo una válvula pasiva [3], dentro de una estructura que conforma el dispositivo con micro canales (ver figura II.13).

Figura II.13 Diseño de una válvula fabricada en PDMS: (a) representación simple de la construcción del dispositivo. La válvula se fabrica colocando una pieza encima de otra y uniendo dos piezas de PDMS con una membrana intermedia del mismo material. (b) Principio de operación de la válvula pasiva.



II.3.2 Microdiodos.

Para evitar tener partes móviles que puedan presentar daños con el tiempo o adherirse irreversiblemente durante el funcionamiento, se desarrollaron los microdiodos, estas estructuras pueden ser usadas para dar una dirección preferencial al flujo del fluido. En este caso, no existe un cierre completo al paso del fluido, pero se logra que la presión del flujo cambie de acuerdo a la dirección de movimiento a lo largo de la forma del canal. Las geometrías en dos y tres dimensiones comúnmente usadas son [1]:

-*Canales convergentes.* Favorecen la dirección del flujo y además incrementan el flujo conforme se estrecha la vía de transporte hacia la parte más cerrada de diodo (ver Figura II. 14)

-*Canales divergentes.* Favorecen la dirección del flujo y decremento en la presión conforme se amplía el área que forma el diodo (ver Figura II. 14)

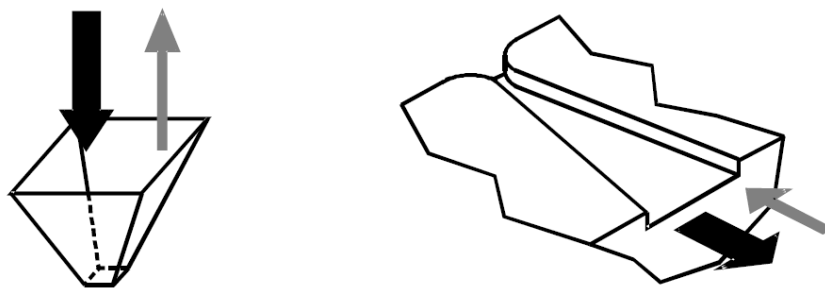


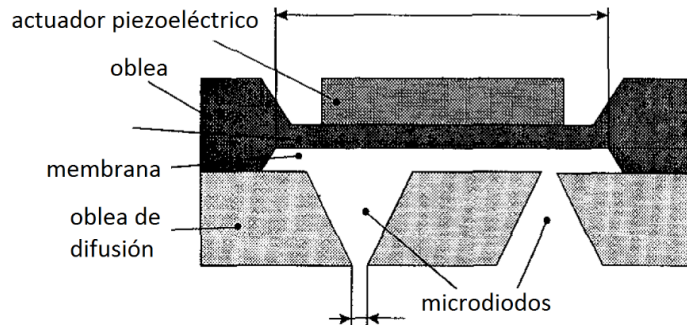
Figura II.14 Estructuras de microdiodos que pueden ser convergentes o divergentes de acuerdo al sentido del flujo con respecto al tamaño de la sección del canal. Las flechas indican el sentido y la magnitud del flujo (flecha negra más ancha) [1].

II.4 Otros tipos de bombas microfluídicas.

Los siguientes ejemplos de dispositivos para micro bombeo emplean actuadores muy peculiares, acorde con diferentes aplicaciones.

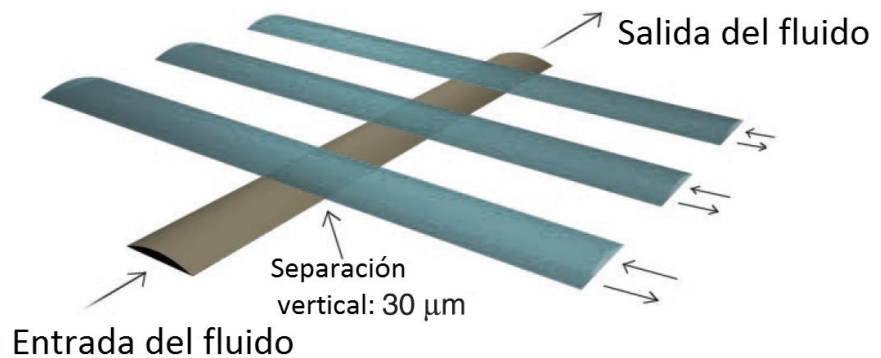
-*Micro bomba de silicio para gas.* Para bombear gases se utiliza una membrana que se curva piezoelectricamente y logra una compresión bastante alta dentro de la cámara de la bomba [4] (ver Figura II.17).

Figura II.17 Bomba de gas con micro diodos [1].



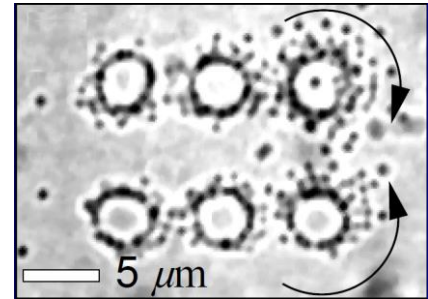
-*Bomba peristáltica.* Se crea una bomba a partir de un arreglo de tres válvulas cuyo accionamiento secuencial permite desplazar el líquido sobre un canal flexible (ver Figura II.18). La velocidad de bombeo se determina midiendo la distancia recorrida por una columna de líquido a través de un canal estrecho [5].

Figura II.18 Bomba peristáltica [5].



-*Bomba óptica.* Haces de luz pueden ser concentrados dentro de trampas ópticas, conocidas como vórtices ópticos. El momento angular orbital transportado por los fotones, puede ser transferido, y de este modo acoplarse al fluido que los rodea en una especie de bombeo. Los arreglos de vórtices ópticos creados con la técnica de pinzas ópticas holográficas pueden transformar esferas coloidales en bombas micro opto-mecánicas (Figura II.19) [6].

Figura II.19 Bombeo inducido por vórtices ópticos [6].



-*Bomba de engrane rotativo.* Típicamente estas bombas se mueven con un motor, logrando la rotación de un engrane dentado. El fluido es transportado por las cavidades que hay entre cada diente o paleta del engrane, transportando el fluido desde la entrada hasta la salida (ver Figura II.21).

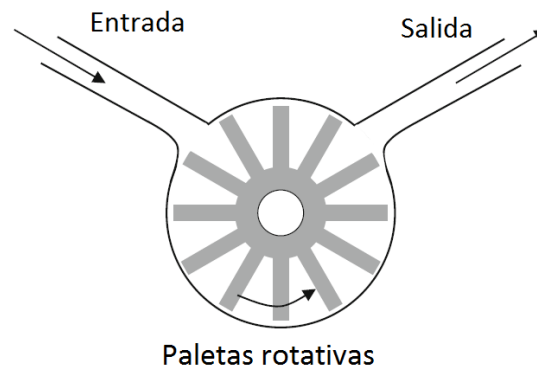
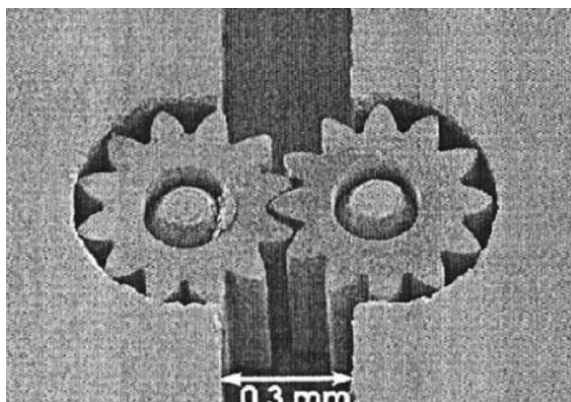
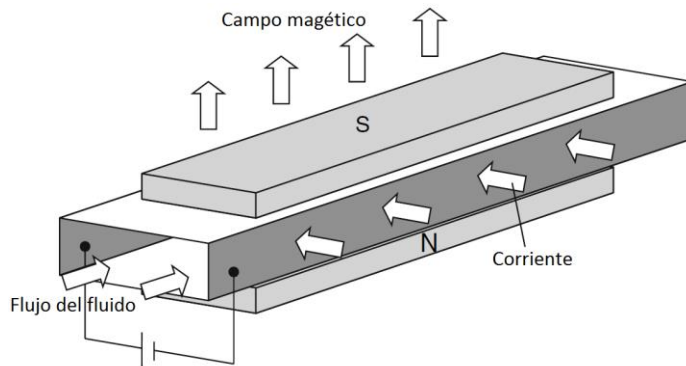


Figura II.20 Bombeo por engrane rotativo [7,8].

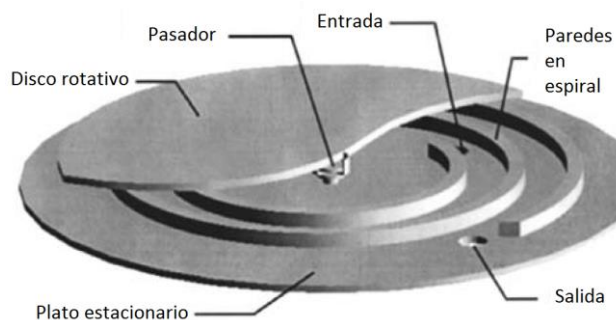
-*Bomba magneto-hidrodinámica.* El campo eléctrico es creado a partir de dos electrodos planos en ambos lados del conducto. El campo magnético es establecido utilizando imanes permanentes en las caras restantes del conducto. Como resultado el fluido electrolítico comienza a moverse (Figura II.22).

Figura II.21 Bombeo electromagnético [7].



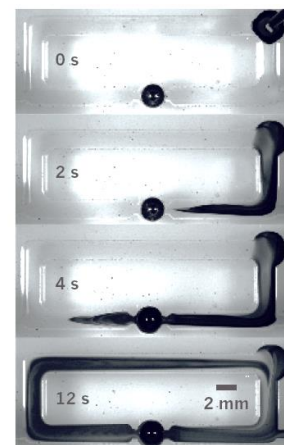
-*Bombas centrífugas.* Las fuerzas viscosas se transforman en grandes caídas de presión sobre pequeñas áreas longitudinales en un microcanal (Figura II.22). El movimiento rotativo del disco induce esfuerzos viscosos sobre el fluido desde la entrada hacia la salida [7, 8].

Figura II.22 Bombeo por rotación de disco [8].



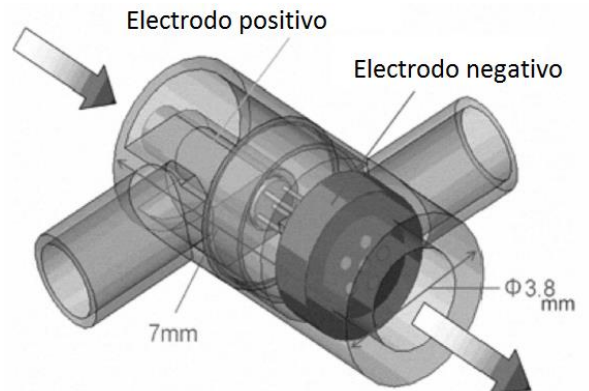
-*Bomba electroquímica.* Es un sistema de bombeo a alta velocidad a través de micro canales, sin partes móviles, que transportan una aleación líquida de metales hasta una cámara esférica dentro de un canal fabricado en Plexiglas. Una reacción química lenta en la gota metálica resulta en un proceso de difusión de aniones hacia la superficie de la micro gota (ver Figura II.23) [9].

Figura II.23 Bombeo por reacción química inducida por campo eléctrico [9].



- *Bomba electromagnética*. La presión obtenida por el fluido depende del número y forma de los electrodos empleados. El electrodo positivo es localizado en uno de los lados del microtubo; el electrodo negativo con orificios se deposita en la salida del tubo (Figura II.24). Así la cámara dentro del canal es llenada con fluido, y luego se aplica una diferencia de potencial entre los electrodos [10].

Figura II.24 Bombeo por interacciones magnéticas [10].



Referencias

- [1] Colin, S. *Microfluidics*. ISTE, 2010.
- [2] Lapizco-Encinas, B. H. Aplicaciones de microfluídica en bioseparaciones. *Revista Mexicana de Ingeniería Química* 2008, 7(3), 205-2014.
- [3] Jeon, N. L.; Chiu, D. T.; Wargo, C. J.; Wu, H.; Choi, I. S.; Anderson, J. R.; Whitesides, G. M. Design and fabrication of integrated passive valves and pumps for flexible polymer 3-dimensional microfluidic systems. *Biomedical Microdevices* 2002, 4(2), 117-121.
- [4] Gelach, T. Pumping gases by a silicon micro pump with dynamic passive valves. *IEEE*, 1997.
- [5] A, M.; Chou, H. P.; Thorsen, T.; Scherer, A.; Quake, S. R. Monolithic microfabricated valves and pumps by multilayer soft lithography. *Science* 2000, 288, 113-116.
- [6] Kosta, L.; Grier, D. G. Microoptomechanical pumps assembled and driven by holographic optical vortex arrays. *Optics Express* 2004, 12(6), 1144-1149.
- [7] Brian, D. I.; Garimella, S. V. Recent advances in microscale pumping technologies: a review and evaluation. *Microfluidic Nanofluidic* 2008, 5, 145-174.
- [8] Amirouche, F.; Zhou, Y.; Johnson, T. Current micropump technologies and their biomedical applications. *Microsyst Technol* 2009, 15, 647-666.
- [9] Khoshmanesh, K. Micro-pump with no moving parts. *Nature* 2014, 507, 277.
- [10] Tanaka, J.; Ishida, M.; Yokota, S.; Edamura, K. Miniaturized and high-powered micro pump using electro-conjugate fluid. *TSI Press* 2010.



RINCIPIOS TEÓRICOS PARA EL DESARROLLO DEL MICRO ACTUADOR OPTO- NEUMÁTICO

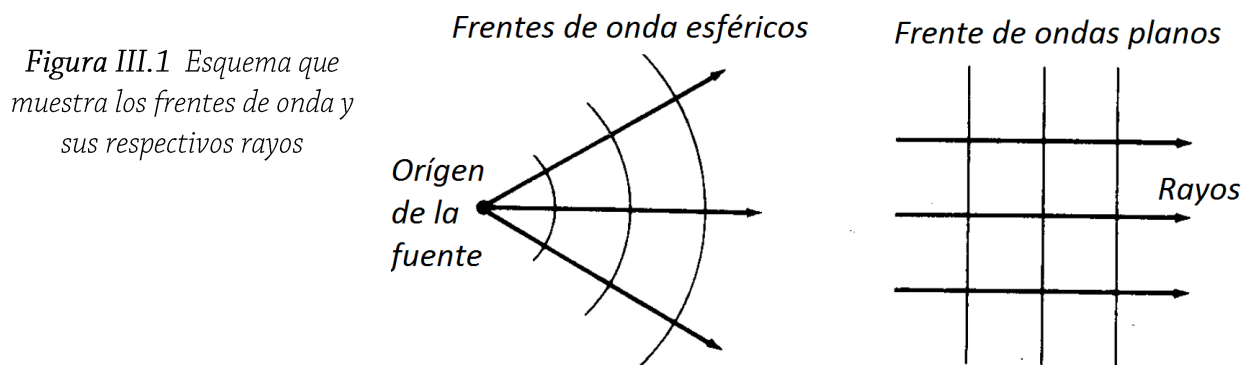
Una vez discutidas las técnicas para obtener movimiento de líquido de manera controlada, es necesario explicar diversos fenómenos relacionados al principio de funcionamiento del micro actuador planteado. El accionamiento del pistón opto-neumático involucra un proceso de intercambio de la energía, absorción, y transformación de la misma. Es conveniente mencionar brevemente algunos conceptos de cada área, no desarrollados todos en el apartado para resultados de este trabajo, pero que pueden ser útiles para entender las principales ventajas y los retos del diseño y fabricación de un prototipo de características similares.

III. 1 Principios básicos utilizados en el funcionamiento del actuador.

III.1.1 Óptica.

III.1.1.1 Luz y fibras ópticas.

Desde el punto de vista óptico las ondas electromagnéticas irradiadas por una pequeña fuente óptica pueden ser representadas por una serie de frentes de onda esféricos con la fuente puntual en su centro (ver figura III.1).

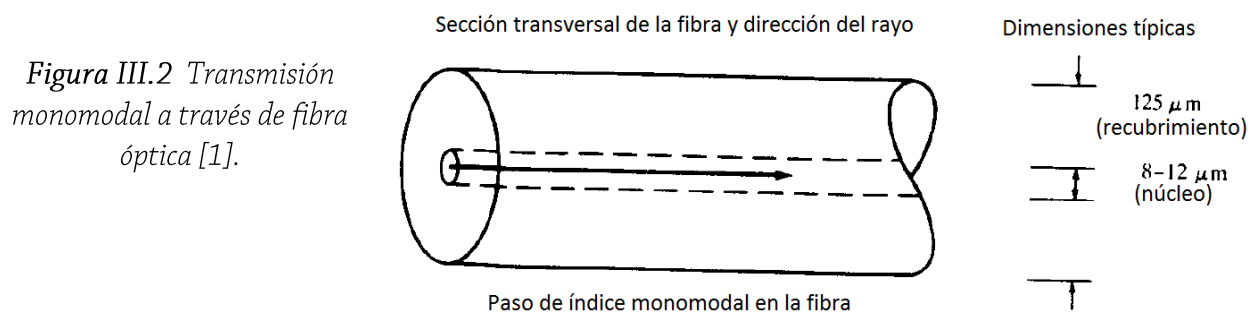


Un frente de onda está definido como el lugar en donde todos los puntos de la serie de ondas tienen la misma fase. Los frentes de onda (también llamados frentes de fase) son separados por una longitud de onda [1].

Cuando la longitud de onda de la luz es pequeña provoca que los frentes de onda parezcan líneas rectas. En este caso la onda de luz puede ser representada como una onda plana, y su dirección de transmisión puede ser indicada por un rayo de luz, el cual es perpendicular al frente de onda [1].

Una fibra óptica es una guía de onda dieléctrica que opera a frecuencias ópticas. Posee una forma cilíndrica, que confina la energía electromagnética en forma de luz, y la conduce en dirección paralela a su eje.

La propagación de la luz a lo largo de la guía de onda puede ser descrita en términos de un grupo de ondas electromagnéticas, llamadas modos. Estos se refieren a la manera en que son confinados dentro de la fibra óptica. Cuando el índice de refracción del núcleo de la fibra es uniforme y experimenta un cambio abrupto en el límite con el revestimiento, se dice que la guía de onda es de índice escalonado. Cuando las dimensiones del núcleo son pequeñas (menores a decenas de micras), la luz puede propagarse solamente en un modo. Este tipo de fibras ópticas se conocen como fibras de índice escalonado monomodales (ver Figura III.2) [1].



III.1.1.2 Luz láser por fibra óptica.

El medio a través del cual es posible emitir un haz láser puede ser gas, un líquido, un cristal aislado (estado sólido), o un semiconductor. Para sistemas de fibra óptica las fuentes de luz generalmente son diodos láser semiconductores.

A pesar de sus diferencias, el principio básico de operación es el mismo para cada tipo de láser. La acción láser es el resultado de tres procesos principales. Estos son absorción de fotones, emisión espontánea y emisión estimulada. Estos tres procesos son representados por diagramas sencillos en dos niveles de energía, donde E_1 es el estado base de energía, y E_2 representa el estado excitado de energía. De acuerdo a la ley de Planck, una transición entre esos dos estados de energía involucra la absorción o emisión de un fotón con energía $h\nu = E_2 - E_1$. De manera natural el sistema atómico se encuentra en el estado base, pero cuando un fotón de energía $h\nu$ incide sobre este, un electrón en el estado E_1 absorbe la energía del fotón y puede ser excitado al estado E_2 (ver figura III.3). Cuando el electrón decae de manera espontánea, la emisión se conoce como emisión espontánea. Sin embargo, el decaimiento del electrón puede también producirse si otro fotón con la energía adecuada interactúa con el sistema. La emisión generada con esta

interacción se conoce como emisión estimulada. En este caso, el fotón generado tiene como característica esencial que su fase es igual a la del fotón incidente. La luz láser se compone así de fotones que salen con la misma fase de un sistema atómico que permite generar emisión estimulada [1].

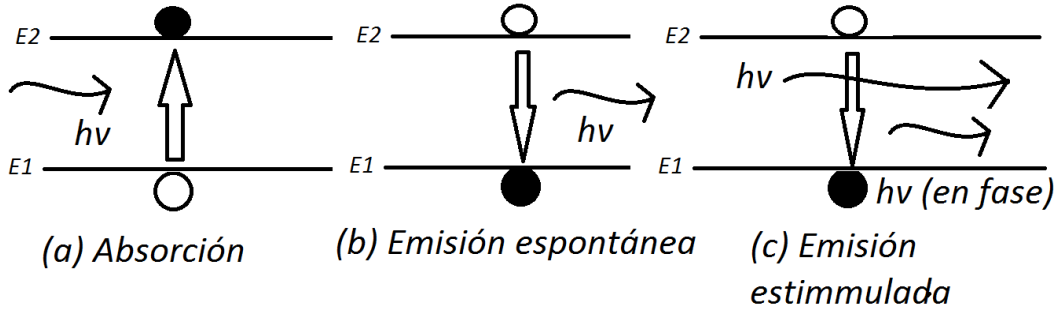


Figura III.3 Procesos para generar luz láser por fibra óptica [1].

III.1.1.3 Densidad óptica.

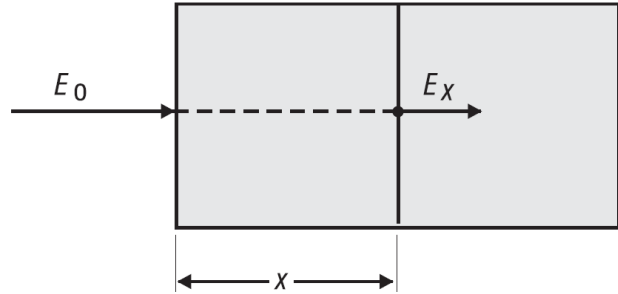
En general, cuando un haz láser es transmitido a través de un medio transparente, una cantidad de la energía de la luz es absorbida y la intensidad del haz decrece. La absorción puede ser muy pequeña como ocurre en el aire, o considerable como en una pieza oscura de vidrio. El proceso de absorción en ambos casos resta energía proveniente del haz láser, y la convierte en energía térmica del medio transparente (incrementando la energía cinética de los átomos y moléculas) [2].

Sí un haz de irradiancia E_0 (W/cm²) incide sobre un medio material (ver Figura III.4), la irradiancia del haz decrece hacia un valor E_x (W/cm²) después de atravesar un espesor x del medio transparente. El valor de irradiancia E_x está dado por la ley de Beer-Lambert:

$$E_x = E_0 e^{-\sigma_\lambda x \dots 1}$$

donde E_x es la irradiancia después de viajar a través del espesor x ; E_0 es la irradiancia incidente sobre el medio absorbente; σ_λ es el coeficiente de absorción; x es el espesor del medio absorbente.

Figura III.4 Absorción de luz en materiales transparentes [2].



Para un filtro, donde el coeficiente de absorción es conocido y el espesor es predeterminado, el producto $\sigma_{\lambda}x$ es reemplazado por una cantidad llamada densidad óptica. Tomando en cuenta lo anterior, y cambiando de base, la ley de Beer-Lambert toma la forma [2]:

$$E_x = E_0 10^{-OD} \dots 2)$$

Además, ya que la transmisión de luz a través de un medio absorbente puede definirse como el cociente de E_x/E_0 , es posible reescribir la ecuación anterior como:

$$T = 10^{-OD} \dots 3)$$

donde

T= transmisión

OD= Densidad óptica

III.1.2 Termodinámica.

III.1.2.1 Ecuación de estado para gas ideal.

Suponiendo que un gas ideal está confinado en un recipiente cilíndrico sin fugas (cuyo volumen se hace variar por medio de un émbolo), entonces primero cuando el gas se mantiene a temperatura constante, su presión es inversamente proporcional a su volumen (Ley de Boyle); en segundo lugar cuando la presión del gas se mantiene constante su volumen es directamente proporcional a su temperatura (ley de Charles); y en tercer lugar cuando el volumen se mantiene constante la presión es directamente proporcional a la temperatura (Ley de Gay-Lussac). Estas afirmaciones se pueden resumir con la siguiente ecuación de estado, conocida como *ley de un gas ideal* [3]:

$$PV = nRT \dots 4)$$

En la expresión anterior, R (8.31 J/mol K) es la constante universal de los gases.

III.1.2.2 Modelo molecular para la presión de un gas ideal

La presión en un gas es el resultado de colisiones entre sus moléculas y las paredes del recipiente. Durante su movimiento aleatorio las moléculas del gas chocan con las paredes del recipiente y experimentan un cambio de cantidad de movimiento. La presión de un gas ideal formado por N moléculas en un volumen cúbico V con lados de longitud d , posee una masa molecular m . Si se considera una partícula que colisiona con una velocidad igual a $-v_x$ hacia la cara izquierda del cubo (ver Figura III.5), entonces se moverá en la dirección positiva x con una velocidad $+v_x$; como la cantidad de movimiento de la molécula es $-mv_x$ antes de la colisión, y $+mv_x$ después de la colisión, entonces el cambio de cantidad de movimiento de la molécula es [3]:

$$\Delta p_x = mv_x - (-mv_x) = 2mv_x \dots 5)$$

Si F_1 es la magnitud del promedio de la fuerza ejercida sobre la pared en un tiempo Δt , la aplicación de la segunda ley de Newton a la pared queda como:

$$F_1 = \frac{\Delta p_x}{\Delta t} = \frac{2mv_x}{\Delta t} \dots 6)$$

Si el intervalo para repetir dos colisiones sobre la misma pared está determinado por:

$$\Delta t = \frac{2d}{v_x} \dots 7)$$

y la fuerza impartida por una sola partícula es:

$$F_1 = \frac{2mv_x}{2d/v_x} = \frac{mv_x^2}{d} \dots 8)$$

Entonces, la fuerza total ejercida por todas las moléculas sobre la pared se obtiene de la sumatoria de fuerzas individuales de cada partícula:

$$F = \frac{m}{d} (v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + \dots v_{xn}^2) \dots 9)$$

donde v_{xn} es la n -ésima componente x de la velocidad de la molécula.

Para continuar con este desarrollo, el promedio de valor cuadrado de la velocidad en la dirección x de N moléculas está dado por:

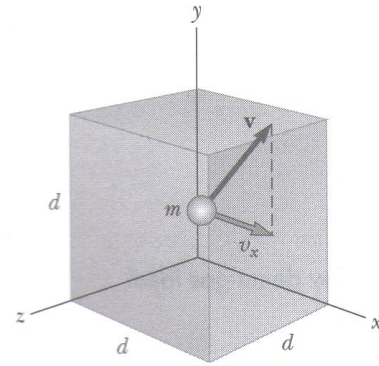


Figura III.5 Volumen cúbico que contiene un gas ideal. En su interior una molécula se mueve con velocidad v [3].

$$\overline{v_x^2} = \frac{v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + \dots + v_{xn}^2}{N} \dots 10)$$

Así, la fuerza total sobre la pared se puede escribir como:

$$F = \frac{N m}{d} \overline{v_x^2} \dots 11)$$

Luego del análisis previo, es necesario enfocarse en una molécula que se desplaza en alguna dirección arbitraria cuya velocidad es v , y cuyas componentes son v_x , v_y , y v_z . En este caso, se debe expresar la fuerza total sobre la pared en términos de la velocidad de las moléculas en lugar de una sola componente.

Como el movimiento contemplado es totalmente al azar, los valores promedio $\overline{v_x^2}$, $\overline{v_y^2}$, y $\overline{v_z^2}$ son iguales entre sí [3].

Relacionando el cuadrado de la velocidad con el cuadrado de sus componentes por medio del teorema de Pitágoras como:

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \dots 12)$$

tenemos que:

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2} \dots 13)$$

así, la fuerza total sobre la pared es:

$$F = \frac{N}{3} \left(\frac{m \overline{v^2}}{d} \right) \dots 14)$$

y la presión total ejercida por lo tanto puede expresarse como:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{F}{d^2} = \frac{1}{3} \left(\frac{N}{d^3} m \overline{v^2} \right) = \frac{1}{3} \left(\frac{N}{V} \right) \overline{mv^2} \dots 15)$$

$$P = \frac{2}{3} \left(\frac{N}{V} \right) \left(\frac{1}{2} \overline{mv^2} \right) \dots 16)$$

Este resultado (ver ecuación número 16) demuestra que la presión es proporcional al número de moléculas N por unidad de volumen (V) y al promedio de energía cinética de traslación de una molécula igual a $\frac{1}{2} \overline{mv^2}$ [3].

III.1.2.3 Temperatura en un gas ideal.

La ecuación número 4) también puede escribirse en términos del número total de moléculas como:

$$PV = Nk_B T \dots 17)$$

donde k_B (1.38×10^{-23} J/K) es la constante de Boltzman. Luego, reescribiendo la ecuación número 16:

$$PV = \frac{2}{3} N \left(\frac{1}{2} \overline{mv^2} \right) \dots 18)$$

e igualando con la ecuación número 17 para un gas ideal:

$$Nk_B T = \frac{2}{3} N \left(\frac{1}{2} \overline{mv^2} \right)$$
$$T = \frac{2}{3k_B} \left(\frac{1}{2} \overline{mv^2} \right) \dots 19)$$

La temperatura de una gas es una medida directa del promedio de energía cinética molecular, por lo tanto, cuando aumenta la temperatura de una gas, las moléculas se mueven con un promedio de energía cinética más alta.

Al reordenar la ecuación número 19, podemos relacionar la energía cinética molecular de traslación con la temperatura:

$$\frac{1}{2} \overline{mv^2} = \frac{3}{2} k_B T \dots 20)$$

A partir de la ecuación 20, el total de energía cinética (KE_{total}) de N moléculas de gas es simplemente el valor N por el promedio de energía por molécula [3]:

$$KE_{total} = N \left(\frac{1}{2} \overline{mv^2} \right) = \frac{3}{2} N k_B T = \frac{3}{2} nRT \dots 21)$$

donde N_A (6.02×10^{23} partículas/ mol) es el número de Avogadro, y $k_B = R/N$, y $n = N/N_A$.

III.1.3 Microfluídica.

Los fenómenos microscópicos que ocurren dentro de cualquier microsistema rigen el comportamiento de éste, interviniendo directamente sobre la física que regula un dispositivo microfluídico [4].

La presencia de fuerzas dominantes a microescala provoca a su vez la disminución de otras fuerzas a macroescala a tal grado que puedan considerarse despreciables (como es el caso de la fuerza gravitatoria, la cual en microescala es prácticamente nula). Por lo tanto en micro escala el equilibrio del sistema es conservado por fuerzas de tipo superficial como capilaridad, fuerzas de humectación y fuerzas de adhesión que toman el rol principal en el micro mundo [5].

III.1.3.1 Flujo incompresible, flujo laminar, y flujo turbulento.

Un flujo es incompresible si la densidad de cada partícula del fluido permanece relativamente constante conforme se desplaza [6].

Se dice que un flujo laminar es aquel donde el fluido fluye sin un mezclado significativo de sus partículas próximas entre sí. Por el contrario, un flujo turbulento es aquel donde los movimientos del fluido varían irregularmente de tal manera que la velocidad y la presión muestran una variación aleatoria con el tiempo y las coordenadas espaciales.

III.1.3.2 El número de Reynolds en microsistemas.

Los números adimensionales utilizados en mecánica de fluidos representan una herramienta conveniente para el análisis del flujo (régimen, estabilidad y efectos dominantes), simplificando así el número de variables desconocidas y resaltando su significado físico [4]. Esto quiere decir que deben expresarse todas las cantidades físicas, como longitud y velocidad, en unidades de escala características, por ejemplo L_0 para longitud y V_0 para velocidad [7].

El comportamiento de un fluido, en lo que se refiere a las pérdidas de energía, depende de que el flujo sea laminar o turbulento. El carácter del flujo en un tubo de sección circular depende de cuatro variables: la densidad del fluido (ρ), su viscosidad dinámica (μ), la longitud característica (L_0) y la velocidad característica (V_0) [4,8]. El número de Reynolds R_e , mide la importancia de la disipación de energía por efectos viscosos [9], y se puede expresar como:

$$R_e = \frac{\text{fuerzas de inercia}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{\rho V_0 L_0}{\mu} \dots 22)$$

Cuando se reduce la velocidad V_0 , y la longitud característica L_0 , el número de Reynolds R_e es considerablemente pequeño en un microsistema ($R_e < 2000$) [4].

Cuando el flujo está representado por un número de Reynolds grande ($R_e > 4000$) significa que los efectos de inercia dominan y son el mecanismo principal de disipación de energía [9].

III.1.3.3 Interfaz sólido-líquido-gas.

Desde un punto de vista molecular, una interfaz es una zona de transición donde las cantidades físicas principales sufren cambios en sus propiedades (por ejemplo, la densidad). El espesor de esta zona de transición depende de la temperatura. Para una interfaz líquido-vapor, este espesor incrementa a dimensiones macroscópicas cuando el fluido se acerca a una temperatura crítica. Sin embargo, lo usual es una interfaz que se encuentra en la escala de nanómetros [4].

III.1.3.4 Tensión superficial y sus efectos.

La tensión superficial depende de los dos materiales a cada lado de la superficie, y si éstos son sólidos, fluidos, o gases (ver Figura III.6) [7]. El valor de la tensión superficial, caracterizado por el coeficiente de tensión superficial (σ), entre un líquido y un gas depende de su naturaleza química, la temperatura, la presión, etc.

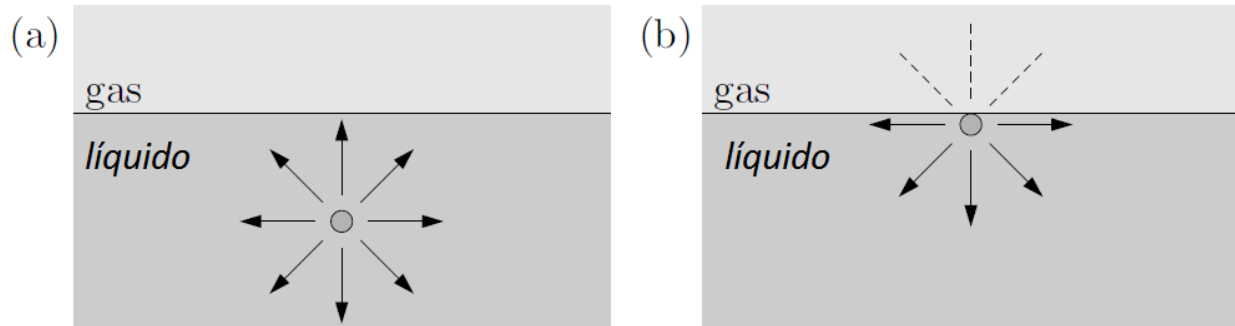


Figura III.6 El origen de la tensión superficial para una interfaz líquido-gas. (a) Una molécula en un volumen de líquido forma enlaces químicos (flechas) con las moléculas vecinas que la rodean. (b) Una molécula en la superficie del líquido pierde los enlaces químicos en la dirección de la superficie (líneas punteadas). En consecuencia, la energía de las moléculas superficiales es más alta que las moléculas dentro del volumen, y la formación de una interfaz tal cuesta energía [7].

III.1.3.5 Impactos de la tensión superficial en microflujos de dos fases.

La discontinuidad de la presión es el primer efecto debido a la tensión superficial. La presión aumenta dentro de una sección curva (por ejemplo, dentro de una burbuja o una gota) con respecto al exterior de la curvatura. El salto de presión a través de una interfaz curvada está dado por la relación de Young-Laplace:

$$P_{int} - P_{ext} = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \sigma (C_1 + C_2) \dots 23$$

En donde, R_1 y R_2 son los radios de curvatura de las respectivas curvaturas C_1 y C_2 . Cada radio es positivo cuando el centro de la curvatura está en el interior, y negativo cuando están en el exterior [4]. Para una

gota esférica o una burbuja de radio R en equilibrio con otro fluido, los dos radios de curvatura son iguales a R ; por lo tanto, la presión dentro de la burbuja supera al fluido que la rodea por una cantidad igual a:

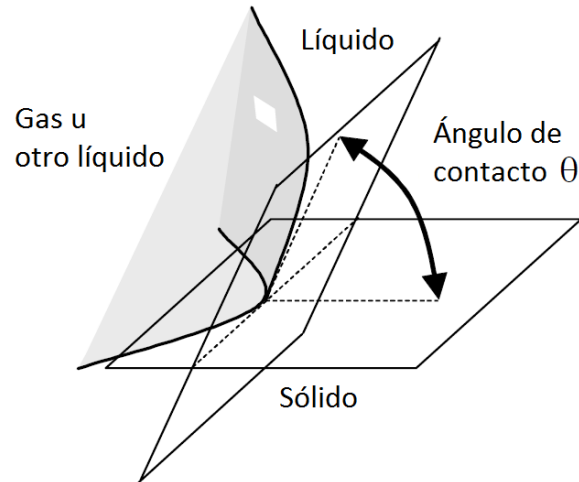
$$\frac{2\sigma}{R} \dots 24)$$

Existe otro efecto debido a la tensión superficial que recae sobre el flujo de un fluido, y que es un poco más sutil. Cuando el valor de la tensión superficial varía a lo largo de una interfaz, se induce también movimiento en un líquido: este es el llamado *efecto Marangoni* [4]. El flujo termocapilar asistido por fotoirradiación ha sido utilizado para mover burbujas y gotas a velocidades comparativamente grandes [10].

III.1.3.6 Ángulos de contacto.

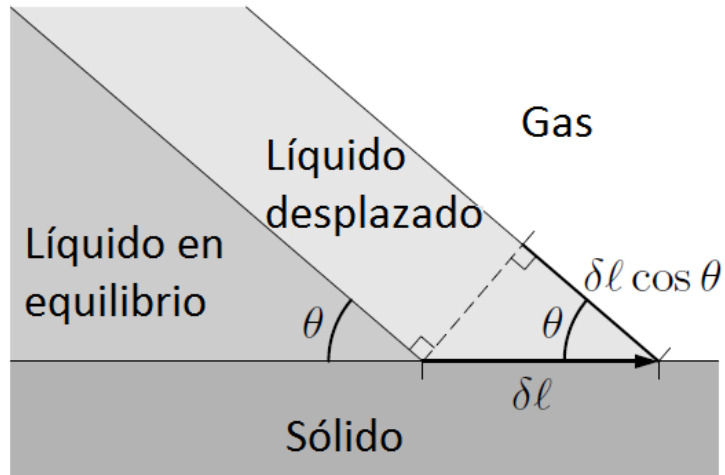
El ángulo de contacto θ es definido como el ángulo entre una interfaz sólido-líquido y una interfaz líquido-gas en la línea de contacto, donde convergen las tres fases (Figura III.7).

Figura III.7 Ángulo de contacto θ [4].



En equilibrio θ está determinado por tres tensiones superficiales ($\sigma_{sl}, \sigma_{lg}, \sigma_{sg}$), para las tres interfaces existentes: sólido-líquido, líquido gas, y sólido-gas, respectivamente. Cuando el ángulo de contacto está bien definido en equilibrio, este se modifica dependiendo de la complejidad del camino cuando entra en un estado dinámico de línea de contacto (ver figura III.8).

Figura III.8 Desplazamiento de la línea de contacto [7].



Considerando en equilibrio el sistema mostrado en la figura III.8, donde se forma el ángulo θ con la superficie de un sólido. Suponiendo ahora que la interfaz líquido-gas se desplaza sobre la superficie sólida, el resultado es un desplazamiento de la línea de contacto una distancia $\delta\ell$ manteniendo el mismo ángulo θ . Es fácil ver que el cambio en área es proporcional y viene dado por $+\delta\ell$, $\delta\ell\cos\theta$, y $-\delta\ell$ para la interfaz sólido-líquido, líquido-gas, y sólido-gas, respectivamente.

Podemos tomar en cuenta una relación denominada Young-Dupré, para el ángulo de contacto θ en función del coeficiente de tensión superficial [4]:

$$\sigma_{sl} + \sigma_{lg}\cos\theta = \sigma_{sg} \dots 25)$$

$$\cos\theta = \frac{\sigma_{sg} - \sigma_{sl}}{\sigma_{lg}} \dots 26)$$

III.1.3.7 Histéresis y ángulo dinámico de contacto.

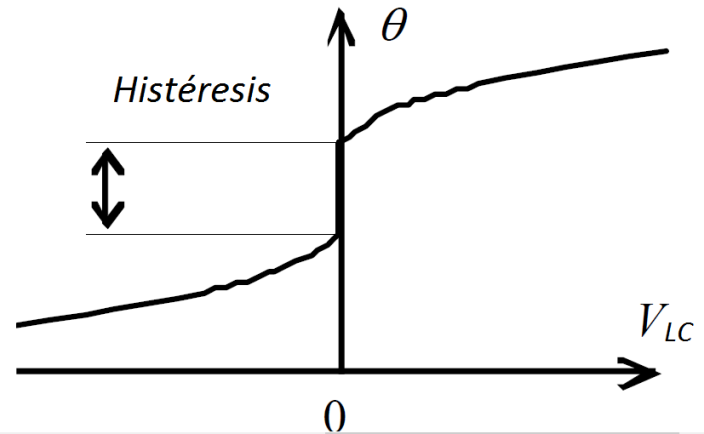
Se dice que existe un ángulo de contacto macroscópico que es el resultado de un promedio geométrico de las variaciones del ángulo de contacto microscópico, debido a las irregularidades presentes a micro escala [4].

Entre la micro escala y la meso o macro escala, se presentan por lo menos tres fenómenos que pueden afectar la interfaz y contribuyen al valor del aparente ángulo de contacto:

- El comportamiento de histéresis ligado a la irregularidad.
- El comportamiento dinámico asociado con la velocidad de deslizamiento de la línea de contacto.
- El cambio de fase cercano a su línea de contacto en situaciones donde los fluidos no intercambian calor con el entorno [4] (ver Figura III.9).

Figura III.9 Relación típica entre el ángulo de contacto θ y la velocidad V_{LC} de desplazamiento de la línea de contacto [4].

Por lo tanto, el comportamiento de histéresis se debe al establecimiento de una línea de contacto sobre la irregularidad de una pared o sólido que forma parte de la interfaz. Es posible reducir la histéresis reduciendo la irregularidad de la superficie que forma la línea de contacto, haciéndola lo más plana y homogénea posible [4].



III.1.3.8 Número de capilaridad.

El número de capilaridad (Ca) representa una velocidad adimensional del desplazamiento de la línea de contacto V_{LC} . Cuando alguna velocidad característica como V_{LC} es impuesta sobre el sistema, es necesario introducir el número de capilaridad [7], éste se define con la tensión superficial σ y la viscosidad dinámica μ :

$$Ca = \frac{\text{fuerza viscosa}}{\text{fuerza de tensión superficial}} = \frac{\mu V_{LC}}{\sigma} \dots 27)$$

Cuando $Ca = 1$, la velocidad impuesta es igual a la velocidad de la viscosidad superficial:

$$V_{LC} = \sigma/\mu \dots 28)$$

III.1.3.9 Efecto termocapilar.

La tensión superficial puede variar en una interfaz si la superficie contiene un gradiente de una concentración surfactante (sustancia que reduce la tensión superficial [11]), densidad de carga eléctrica entre fases, o temperatura. Los flujos generados por variaciones en tensión superficial son los flujos Marangoni, que para variaciones de tensión superficial térmica se llaman “flujo termocapilar” [12].

El flujo termocapilar representa una buena alternativa para inducir y controlar el movimiento de gotas y burbujas en microcanales. Los gradientes de temperatura son generalmente establecidos por calentadores metálicos implantados cerca del canal, o mediante la utilización de un material foto-responsivo capaz de

absorber energía radiante. El flujo superficial será inducido hacia regiones de alta tensión superficial (baja temperatura, ver Figura III.10) [10].

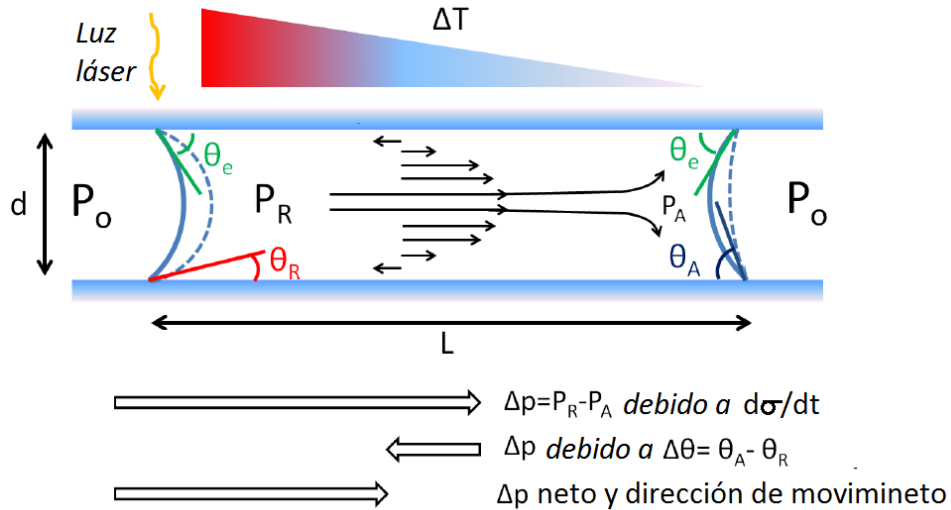


Figura III.10 Representación esquemática del movimiento de una gota, activado por el efecto termocapilar. Un gradiente de temperatura ΔT produce una diferencia de presión $\Delta P = P_R - P_A$ debido a la dependencia en temperatura $d\sigma/dT$ de la tensión superficial. Si en vez de considerar un ángulo idéntico de contacto θ_e en ambos meniscos, tomamos en cuenta un ángulo de contacto de histéresis $\Delta\theta = \theta_A - \theta_R$, donde θ_A y θ_R corresponden al ángulo de contacto de avance y retroceso respectivamente, una diferencia de presión es establecida en sentido opuesto a la establecida por el efecto termocapilar. Este último por lo general supera el efecto de histéresis y el flujo neto es observado hacia la región de baja temperatura (alta tensión superficial). Las líneas en la figura representan el flujo del fluido dentro de la gota, d , y L son el diámetro del tubo y la longitud de la gota, respectivamente, los subíndices A y R denotan el lado de 'avance' y 'retroceso' de la gota [10].

III.2 Conversión de energía.

III.2.1 Ley de Estefan y radiación electromagnética.

Todo movimiento ondulatorio tiene energía asociada a él. Al propagarse una onda, cada porción del medio ejerce una fuerza y realiza trabajo sobre la porción adyacente. De este modo, una onda puede transportar energía de una región del espacio a otra [13].

Se sabe que cualquier objeto, no importa cuál sea su temperatura, emite una radiación electromagnética debido a vibraciones térmicas de las moléculas, que a veces recibe el nombre de radiación térmica.

Las ondas infrarrojas que se producen por objetos y moléculas calientes, tienen longitudes de onda que van desde aproximadamente 1 mm, hasta la longitud de onda más larga de la luz visible ($7 \times 10^{-7} \text{m}$). La mayoría de los materiales las absorbe rápidamente.

La rapidez con la que un objeto irradia energía continuamente en la forma de ondas electromagnéticas es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta, lo cual se conoce como *ley de Stefan*, y cuya ecuación se expresa como:

$$\wp = \varphi A e T^4 \dots 29)$$

donde \wp (W o J/s) es la potencia irradiada por el objeto, φ es la constante de Stefan-Boltzman ($5.6696 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}$), A es el área superficial del objeto en metros cuadrados, e es la denominada constante de emisividad, y T es la temperatura en Kelvin del objeto. El valor de e puede variar entre cero y uno, donde uno es el valor tomado por aquellos cuerpos que absorben toda la energía que incide sobre ellos (cuerpo negro) [3].

III.2.2 Trabajo en procesos termodinámicos.

En un gas contenido en un cilindro equipado con un émbolo móvil, y en equilibrio, el gas ocupa un volumen V y ejerce una presión P uniforme sobre las paredes del cilindro y el émbolo. Si el gas se comprime con la suficiente lentitud para permitir mantener un equilibrio termodinámico, entonces, cuando el émbolo es empujado hacia abajo por una fuerza externa F una distancia Δy , el trabajo realizado sobre el gas se puede determinar con la siguiente expresión [3]:

$$W = -F\Delta y = -PA\Delta y \dots 30)$$

donde la magnitud de F es igual al producto de la presión por el área de acción PA , porque el émbolo siempre está en equilibrio. Si el émbolo es empujado hacia abajo, Δy es negativo. Como el producto $A\Delta y$ es el cambio de volumen del gas (esto es, $\Delta V = A\Delta y$), podemos expresar el trabajo sobre el gas como:

$$W = -P\Delta V \dots 31)$$

Si el gas se comprime ΔV es negativo y el trabajo realizado sobre el gas es positivo. Si el gas se expande, ΔV es positivo y el trabajo realizado sobre el gas es negativo. Si el volumen permanece constante, el trabajo realizado sobre el gas es cero.

III.2.2.1 Eficiencia en una máquina térmica.

En general una *máquina térmica* es un aparato que convierte energía interna en otras formas útiles, por ejemplo, energía eléctrica en mecánica. En una máquina térmica se somete cierta cantidad de sustancia que trabaja a procesos cíclicos durante los cuales se transfiere energía térmica (Q_t) a partir de una fuente

de alta temperatura, la máquina realiza el trabajo ($W_{máq}$), y luego la máquina cede energía por medio de calor (Q_c) a una fuente que está a menor temperatura [3].

Por lo anterior, para un proceso cíclico se cumple que:

$$Q_{neta} = -W = W_{máq} \dots 32$$

$$Q_{neta} = |Q_t| - |Q_c|$$

$$W_{máq} = |Q_t| - |Q_c| \dots 33$$

La eficiencia térmica η de una máquina térmica se define como la razón entre el trabajo realizado por el sistema y la energía absorbida a la temperatura más alta durante un ciclo:

$$\eta = \frac{W_{máq}}{|Q_h|} = \frac{|Q_h| - |Q_c|}{|Q_h|} = 1 - \frac{|Q_c|}{|Q_h|} \dots 34$$

De manera general podemos considerar la eficiencia como la razón entre lo que se gana (trabajo) y lo que se pierde (transferencia de energía a la temperatura más alta). La ecuación número 34 establece que una máquina térmica tiene 100% de eficiencia sólo si $|Q_c| = 0$, es decir si no se pierde, disipa o transfiere la energía suministrada. Se sabe que no es posible obtener en la realidad experimental una eficiencia del 100 %.

Referencias

- [1] Keiser, G. Optical Fiber Communications. McGraw-Hill, 1991.
- [2] Roychoudhuri, C. Fundamentals of Photonics. SPIE Press Book, 2008.
- [3] Serway, R. A.; Faughn, J. S. Física. Thomson, 2005.
- [4] Colin, S. Microfluidics. ISTE, 2010.
- [5] Tabeling, P. Introduction to microfluidics. Oxford, 2005.
- [6] Potter, M. C.; Wiggert, D. C. Mecánica de Fluidos. Thomson, 200
- [7] Bruus, H. Theoretical microfluidics. MIC-Department of Micro and Nanotechnology. Technical University of Denmark, 2004.
- [8] Mott, R. L. Mecánica de fluidos. Pearson Education, 2006.
- [9] Levenspiel, O. Flujo de fluidos e Intercambio de calor. Reverté, 1993.
- [10] Vélez-Cordero, J. R.; Velázquez-Benítez, A. M.; Hernández-Cordero, J. Thermocapillary flow in glass tubes coated with photoresponsive layers. Langmuir 2014, 30 (18), 5326–5336.
- [11] Diccionario RAE. Disponible en URL: <http://lema.rae.es/drae/?val=surfactante>
- [12] Kirby, B. J. Micro- and Nanoscale Fluid Mechanics, Transport in Microfluidic Devices. Cambridge University Press, 2010.
- [13] Young, H. D.; Freedman, R. A. Física Universitaria, decimosegunda edición, Addison-Wesley, Vol. 1, 2009.

Una vez delimitada la parte teórica que envuelve el desarrollo de un micropistón, como un sistema microfluídico con partes ópticas, mecánicas, y termodinámicas, es necesario comenzar a desarrollar la parte práctica o experimental.

En este capítulo se presenta el desarrollo experimental utilizado para caracterizar el sistema actuador opto-neumático. En las primeras secciones se describe la metodología utilizada y los experimentos realizados; finalmente, se describe también el diseño del sistema de prueba que contiene los microcanales.

IV. 1 Pistón opto-neumático.

IV.1.1 Descripción.

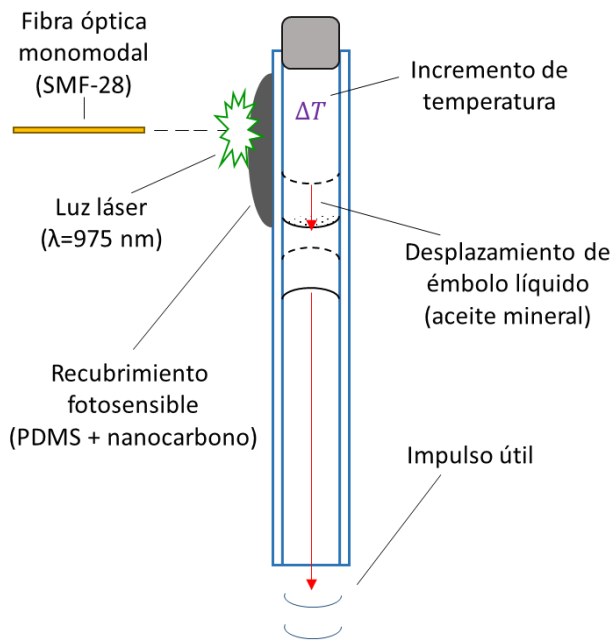


Figura IV.1 Esquema del pistón opto-neumático. La luz irradiada es absorbida por las partículas de carbono del recubrimiento, generando así un incremento de temperatura que se transfiere del exterior al interior del capilar. El gradiente de temperatura establecido ocasiona expansión térmica del aire que mueve el émbolo, que a su vez desplaza al aire contenido en el extremo inferior del capilar (impulso útil).

En este trabajo se denomina pistón opto-neumático al sistema mostrado en la figura IV.1. El sistema funciona como actuador que utiliza luz láser para incrementar la temperatura del aire confinado en un capilar de vidrio de dimensiones micrométricas. A su vez, el capilar contiene un émbolo líquido, de tal manera que la expansión térmica ocasiona un desplazamiento del émbolo, y del cual puede aprovecharse el impulso generado.

La figura IV.2 muestra el prototipo del pistón, que tiene como objetivo ser el elemento dinámico para accionar o desencadenar el movimiento dentro de un sistema que utiliza líquido en micro canales.

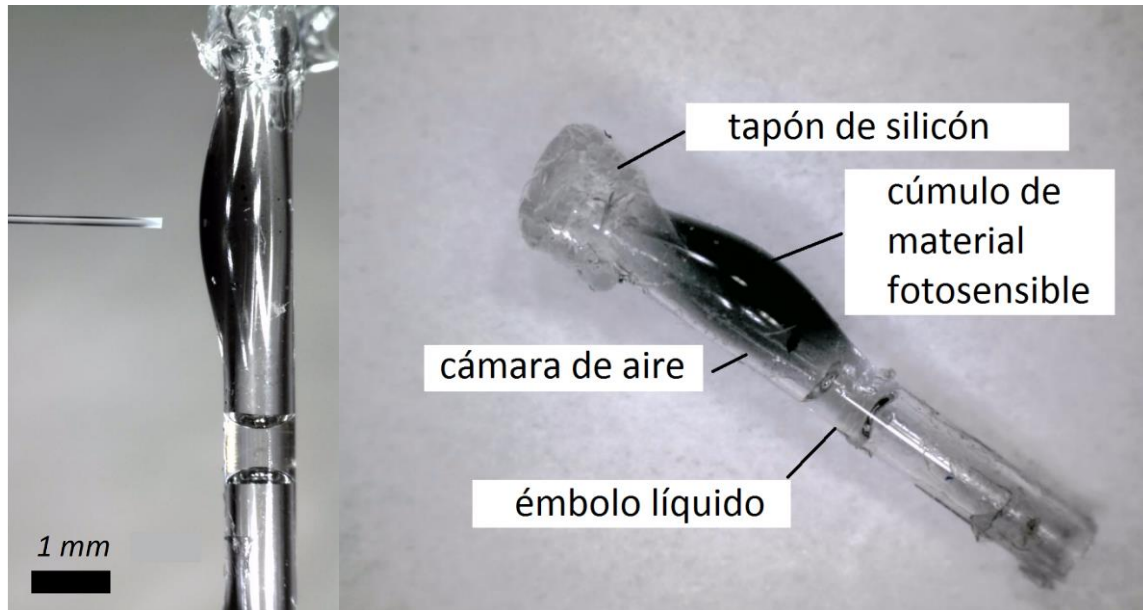


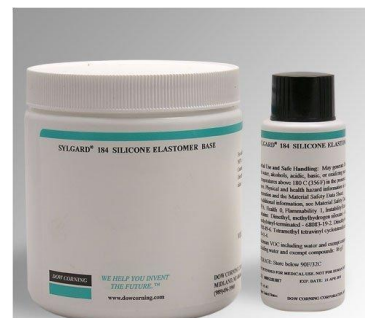
Figura IV.2 (izquierda) fotografía del pistón opto-neumático que muestra la punta de la fibra óptica frente al pistón; (derecha) vista del dispositivo mostrando sus partes principales.

IV.1.1.1 Fabricación del micro pistón.

-Etapa 1. Compuesto polimérico para recubrimiento.

El pistón utiliza un revestimiento a base de un compuesto polimérico que facilita el incremento de temperatura hacia el interior del capilar una vez que es irradiado por un haz láser. Este compuesto está integrado por partículas nanométricas de carbono, con dimensiones menores a 50 nm. Las partículas se conocen como “nano polvo de carbono”, y son comercializadas por Aldrich (número de parte 633100). El polímero es el polidimetilsiloxano-Sylgard 184 (PDMS) de la marca Dow Corning, y utiliza un agente curante para solidificación (ver Figura IV.3).

Figura IV.3 Kit de PDMS + agente curante (tapa negra) Sylgard 184.



Composición de la mezcla.

El compuesto fotosensible se obtiene al mezclar aproximadamente 1.6 g de PDMS con 3.5 mg de nano-polvo de carbono (< 50 nm, Adrich 633100); la relación entre el agente curante y el PDMS es de 1:10 (que corresponde al 10% de polímero ocupado), que es el estándar para este material. El orden de agregación puede ser importante ya que el agente curante posee una menor viscosidad que el polímero (semejante a la miel o jarabe de maíz), y por lo tanto, es un poco más difícil de controlar al momento de medir su masa. Para este trabajo se utilizó el siguiente proceso:

- a) Agregar agente curante en proporción de 1:10 con respecto al polímero.
- b) Agregar el polímero.
- c) Agregar las nanopartículas de carbono.

La cantidad de la mezcla necesaria puede variar en función del número de capilares a recubrir, pudiendo entonces obtenerse diferentes cantidades de la mezcla, respetando las proporciones mencionadas para cada elemento.

El mezclado del compuesto se realiza manualmente hasta obtener una apariencia uniforme, es decir, evitando tener cúmulos significativos de carbono en la mezcla, la cual debe tornarse oscura (ver Figura IV.4). Los instrumentos de medición utilizados fueron una balanza analítica, vaso de precipitado (de acuerdo a la cantidad a preparar), espátulas para el manejo de sustancias, así como acetona y alcohol isopropílico para la limpieza del instrumental después de su uso.

Figura IV.4 Mezcla de PDMS y nano-polvo de carbono para recubrir capilares.



-Etapa 2. Recubrimiento y curación del material fotosensible.

La mezcla fotosensible elaborada es depositada sobre la pared exterior de capilares de vidrio de la marca *Drummond microcaps* (ver Tabla IV.1). Para lograr depositar una película lo más uniforme posible sobre los capilares es necesario hacer uso de una máquina, que originalmente se destinó para recubrir fibras ópticas adelgazadas, pero que fácilmente se adaptó para recubrir capilares de distintos espesores.

Tabla IV.1. Especificaciones de capilares *Microcaps*.

CAPACIDAD (μL)	20
LONGITUD (mm)	64
DIÁMETRO INTERNO (mm)	0.9017
DIÁMETRO EXTERNO (mm)	0.0629

La máquina utilizada (ver Figura IV.5 [1]) emplea una platina móvil que contiene una barra ranurada, fabricada en teflón. Las ranuras permiten alojar el material que se depositará con el desplazamiento longitudinal de la platina a lo largo del capilar. El capilar se encuentra sujeto y fijo con silicio por los extremos a una fibra óptica que lo atraviesa (ver Figura IV.6 [2]), y a su vez esta también se sujeta y tensa a los extremos de la máquina mediante grapas magnéticas (ver Figura IV. 7 [1]). Las grapas poseen guías para alinear las fibras adecuadamente antes de ser fijadas, ya que es posible hacer hasta 10 recubrimientos a la vez [1].

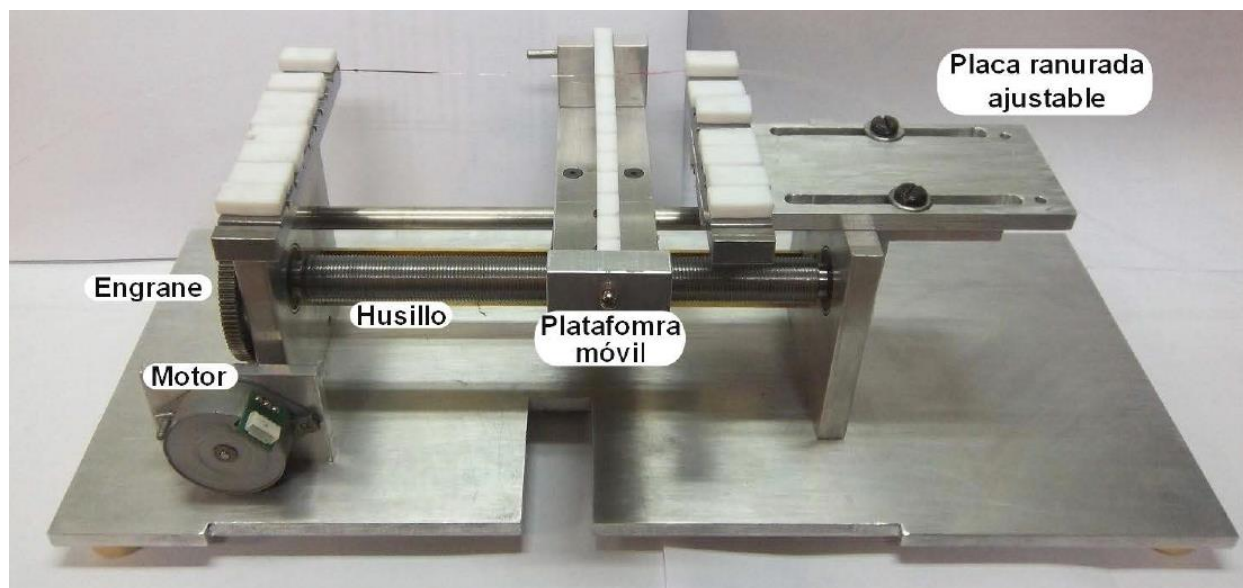


Figura IV.5 Máquina para hacer recubrimientos poliméricos sobre dispositivos de fibra óptica [1].

Figura IV.6 Arreglo para recubrir capilares con la máquina para recubrir fibras ópticas [2].

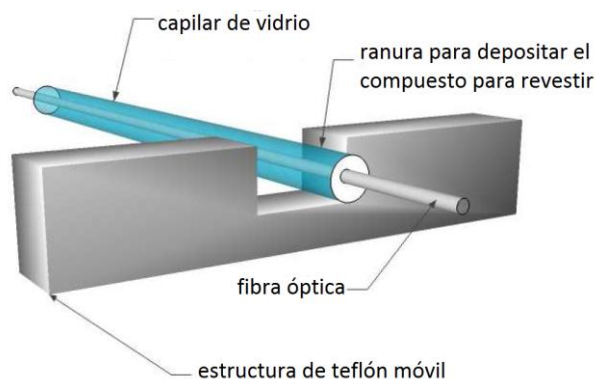
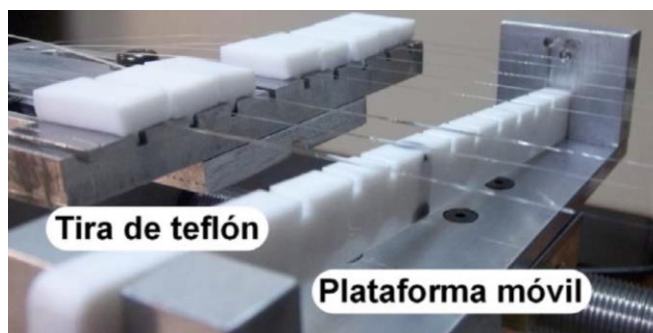


Figura IV.7 Placa ranurada y grapas para fijar fibras ópticas y capilares a recubrir [1].



Algunas de las características principales de la máquina para hacer recubrimientos es que posee una interfaz programada en *LabView* (ver apéndice A) que permite controlar la velocidad de recubrimiento (mm/minuto); además, es posible modificar el rango de velocidades mediante el empleo de dos tipos de motores a pasos: uno con engrane normal y uno con un tornillo sin fin acoplado a su flecha [1]. Particularmente para este trabajo se ocupó el motor con engrane normal de 16 dientes que consigue obtener una velocidad máxima de recubrimiento de hasta 24 mm/minuto. Es necesario utilizar el rango de velocidades mayores que permite esta máquina [1], ya que el uso de una velocidad mayor a 20 mm/minuto permite la formación de un patrón lobular o perlas del mismo compuesto fotosensible a lo largo del revestimiento del capilar (Ver Figura IV.8).

Estas inestabilidades formadas resultan adecuadas para ser utilizadas como una especie de combustible para el pistón opto-neumático (favoreciendo el intercambio de temperatura). Si el recubrimiento depositado en el capilar fuera completamente uniforme, sería necesario recubrir el capilar varias veces para incrementar el espesor de la película y evitar que el haz láser, al incidir sobre el recubrimiento, agote rápidamente la capa y dañe el capilar.

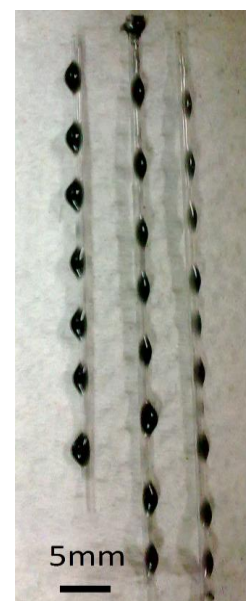


Figura IV.8 Capilares recubiertos. Es posible ver la formación del patrón lobular.

-Etapa 3. Inserción de émbolo líquido y cámara de aire.

La formación de una pequeña cámara de aire (ver figura IV.9) dentro del capilar recubierto se da de manera indirecta, al confinar dicho volumen de aire entre un extremo del capilar y una cantidad de aceite mineral (émbolo líquido). El émbolo de aceite mineral cumple dos funciones dentro del pistón: primero, servir de mecanismo para comprimir un segundo volumen de aire a la salida del pistón (salida originalmente abierta al ambiente, que se unirá al micro canal lleno de líquido, como se verá en secciones posteriores); y en segundo lugar, servir de marcador visual para medir el desplazamiento alcanzado por expansión térmica de la cámara de aire.

La metodología para el llenado y sellado de la cámara involucra el uso de herramientas adaptadas para el manejo y control de las cantidades de los fluidos que se utilizan. El apéndice B describe la construcción y forma de utilizar el sistema para inserción de aceite mineral para las pruebas experimentales.

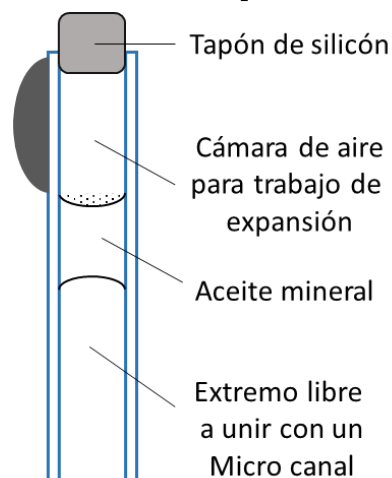


Figura IV.9 Cavidades y partes internas del pistón.

-Etapa 4. Curado del recubrimiento.

Se dice que el compuesto polimérico de PDMS más nano carbono se somete a un proceso de curado cuando el material es puesto cerca de una fuente de calor para su solidificación parcial. El calor irradiado permite cambiar las propiedades químicas del material líquido, transformando la mezcla líquida, a un sólido que puede ser manejado sin riesgo a ser removido por simple contacto con los dedos. El grado de solidificación del PDMS depende de la cantidad de agente curante agregado a la mezcla, ya que una mayor proporción utilizada puede cambiar la elasticidad del material a un sólido bastante rígido.

IV.1.2 Caracterización experimentales del pistón.

Con las pruebas experimentales realizadas se exploró una gama de posibilidades para encontrar las mejores condiciones para el funcionamiento del pistón opto-neumático. Las variables involucradas en la actividad experimental son las siguientes:

-Volumen de aire para el trabajo útil de expansión térmica, expresado en microlitros (μL).

-Espesor de la inestabilidad formada (cúmulo negro) de material fotosensible, expresado en micrómetros (μm).

-Distancia de separación entre la punta de la fibra óptica y el cúmulo de material fotosensible, expresado en (μm).

-Potencia óptica irradiada hacia el material fotosensible (mW).

-Longitud del émbolo de aceite mineral (medida entre meniscos), expresado en (μm).

El arreglo experimental comprende dos etapas. La primera de ellas corresponde al uso de instrumental del laboratorio. Para comenzar, se necesita del manejo y configuración de un controlador de corriente y temperatura conectado a un diodo láser para generar el haz a la salida de la fibra óptica con la potencia deseada. De forma predeterminada el dispositivo mencionado trabaja con una señal continua por lo que la luz láser emitida es desactivada manualmente con un botón en panel de control. Para fines prácticos en la implementación de éste trabajo, existe la posibilidad de contar con un modo de encendido y apagado semiautomático del láser, realizando una modulación externa de la señal de disparo (ver apéndice C). Esto permite modificar la frecuencia de la señal de salida y controlar el pistón sin la necesidad de recurrir continuamente a los botones del panel de control.

La segunda etapa del arreglo experimental es montada sobre una mesa óptica que permite fijar las piezas metálicas y elementos mecánicos por enrosque manual, para crear estructuras que doten de soporte, sujeción y movimiento al momento de alinear la fibra óptica con el pistón, y el pistón a su vez con el microscopio (ver Figura IV.10). Para mayor exactitud y comodidad al momento de manipular los elementos, se utilizó una platina con movimiento en 3 ejes para el microscopio, y una segunda platina para mover la fibra óptica.

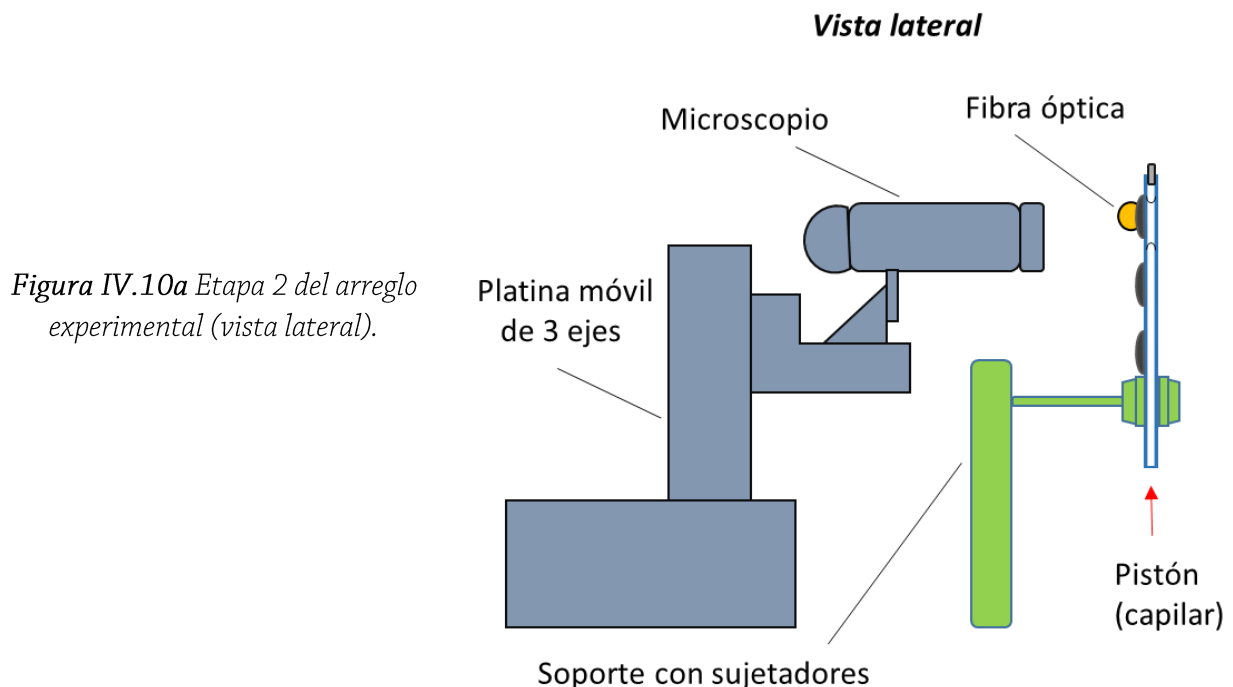
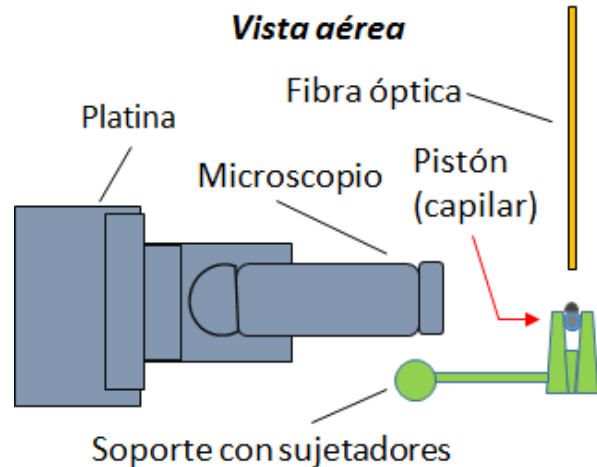


Figura IV.10a Etapa 2 del arreglo experimental (vista lateral).

Figura IV.10b Etapa 2 del arreglo experimental
(vista aérea)



Por medio del microscopio digital conectado mediante un puerto USB a una computadora, es posible visualizar la fibra óptica y el pistón, logrando determinar con mucha precisión distancias de trabajo, alineaciones, y detalles que pueden escaparse a simple vista. El uso del microscopio en los experimentos es muy importante, pues este permite tomar fotografías y videos bastante detallados, dependiendo de la magnificación utilizada, para registrar así el desplazamiento del émbolo líquido. Este desplazamiento es la característica más importante para determinar el desempeño del pistón.

IV.1.2.1 Metodología de las mediciones.

Se realizaron experimentos con grupos de dos a tres pistones modificando las variables mencionadas (ve sección IV.1.2), para crear un registro a través del cual se pueda consultar que tipo de características empleadas en la fabricación del pistón resultaron adecuadas, y cuales no aportaron ninguna mejora.

La metodología empleada para la obtención de los datos, de acuerdo a la modalidad de operación del láser, fue la siguiente:

1. Operación continua del láser.
 - a) Se procede a preparar la punta de la fibra óptica (consultar detalles en el apéndice D).
 - b) Se programa el láser con la potencia deseada, el cual permanece en un estado de espera para ser activado desde su panel de control.
 - c) Se verifica la alineación de los elementos en la mesa óptica.
 - d) Se sincroniza el inicio de la grabación de video por medio del microscopio al momento de activar el láser. El tiempo de grabación depende del número de ciclos de expansión-compresión que se desee visualizar (aproximadamente un video con duración de 2 minutos puede captar dos ciclos).
 - e) Se desactiva el láser para concluir con la observación, grabando el recorrido del émbolo hasta su posición original.

2. Operación modulada del láser.
 - a) Se procede a preparar la punta de la fibra óptica.
 - b) La modulación del láser permite establecer la frecuencia de operación del láser además de la forma de onda enviada a la salida (ver apéndice C). La configuración del láser es muy similar al modo continuo, y solo se agregan algunos pasos más para su correcta configuración.
 - c) Se verifica la alineación de los elementos en la mesa óptica.
 - d) La activación del láser no necesariamente se sincroniza con la grabación de video, ya que es posible comenzar a grabar a partir de cualquier semi-ciclo, ya sea de expansión o de compresión, los cuales se ejecutan de manera automática.
 - e) Se desactiva el láser para concluir con la observación, grabando el recorrido del émbolo hasta su posición original.

IV. 2 Dispositivo microfluídico de prueba.

IV.2.1 Descripción.

El diseño y la fabricación de una estructura que permitiera medir la capacidad del actuador optoneumático para poner en movimiento pequeños volúmenes de líquido dentro de microcanales fue uno de los principales retos de este proyecto.

Las técnicas de micro fabricación actuales emplean generalmente procesos de manufactura un poco más laboriosos, pero altamente efectivos, y de los cuales se obtienen productos de calidad (ver Figura IV.12). Tal es el caso de fabricación de micro canales y dispositivos microfluídicos por la técnica de fotolitografía, que utiliza un micro molde con base de silicio para la obtención de las estructuras en forma de capas que al ser unidas conforman el dispositivo final [3].

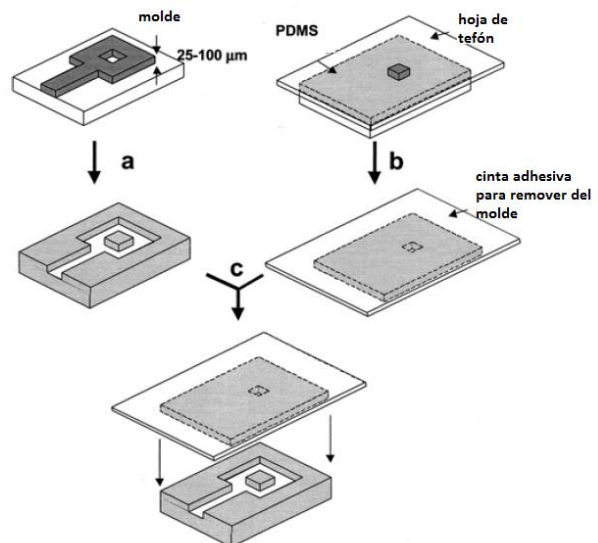


Figura IV.11 Micro-fabricación de válvulas por litografía. (a) La estructura obtenida fue moldeada contra un patrón negativo sobre una oblea de silicio. (b) Membrana de PDMS fabricada entre una hoja de teflón y el patrón, mientras se aplica una leve presión; la membrana es removida del molde mediante una cinta adhesiva. (c) Las piezas individuales son alineadas y unidas para formar el dispositivo final.

A diferencia de las técnicas de micro fabricación para obtener un prototipo de alta calidad, en éste trabajo se buscó obtener un prototipo mucho más simplificado pero efectivo para probar si el pistón actuador serviría para mover líquido. Se optó por recrear una estructura por capas o piezas similares a la constricción empleada en litografía, pero utilizando pequeñas piezas de acrílico.

Originalmente se planteó el diseño de una microestructura (ver figura IV.12) para observar la capacidad de inducir bombeo por medio del actuador. El sistema contaría con micro conductos de sección transversal rectangular formados por una pieza central que contiene el perfil de los canales y cavidades que servirían para alojar un par de membranas cuya función es hacer de válvulas pasivas unidireccionales (ver apéndice E, para consultar fabricación de membranas). La deflexión de estas membranas por el movimiento del flujo interno del líquido, permitiría la apertura de la membrana a la salida para expulsar el líquido, y al mismo tiempo el cierre del canal que alimenta al dispositivo hacia el contenedor, por medio de una segunda membrana opuesta al flujo. Todas estas acciones son realizadas durante la fase de activación del actuador opto-neumático. Inmediatamente, al comenzar el ciclo de desactivación (donde el émbolo retrocede por compresión hacia su posición de reposo) el pistón experimenta una succión de líquido debida a la unión con el microcanal del dispositivo de prueba, por lo tanto, en esta fase se llevaría a cabo el proceso contrario: la salida del dispositivo es sellada por la primera válvula elástica, mientras la vía de entrada de líquido que conecta con el reservorio se abriría al ambiente, por el mismo efecto de succión, y se trasladaría entonces el líquido contenido en el reservorio, hacia los canales que canales ya vacíos por el desalojo de su contenido líquido al momento del bombeo.

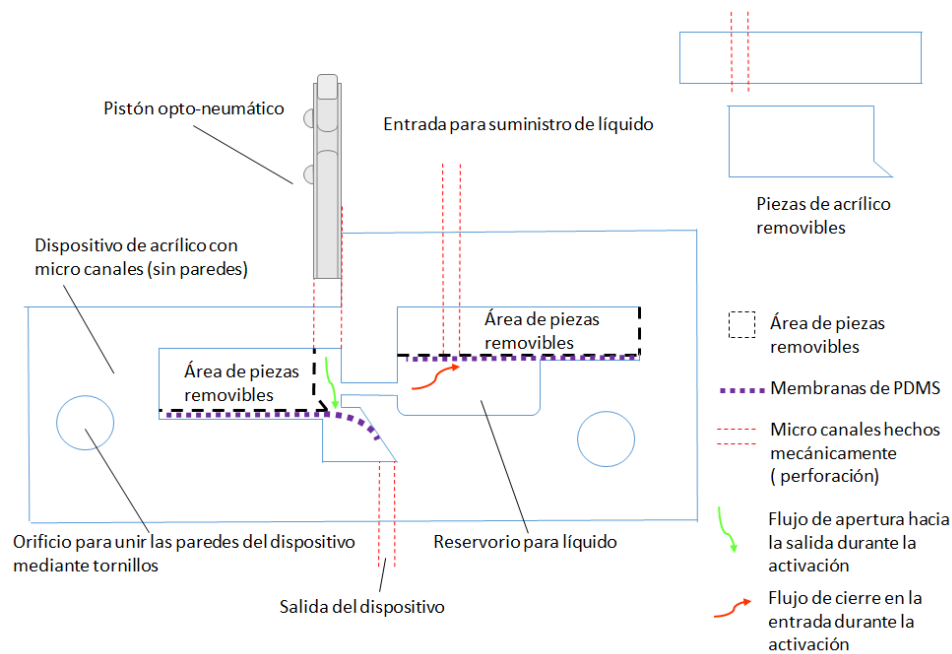


Figura IV.12 Diseño esquemático (vista frontal) para la construcción de un primer dispositivo microfluídico para el pistón opto-neumático. El esquema muestra las partes constitutivas centrales (a manera de sección) del sistema que utiliza líquido para llenar los conductos y el reservorio interno. Es necesario contar con dos paredes de las mismas dimensiones (no mostradas), colocadas a cada lado de la estructura mostrada para recrear los canales en el interior de la estructura acrílica.

A pesar de que este dispositivo representó una alternativa atractiva y rápida para la fabricación de dispositivos microfluídicos en piezas planas de acrílico, el ensamble e inserción de las membranas en las cavidades correspondientes, hizo de su practicidad inicial una tarea muy laboriosa y difícil durante el ensamble, sellado y armado de cada elemento para conformar el sistema completo. La fabricación del primer modelo de prueba y su funcionamiento deficiente reveló la incompatibilidad del sistema actuador con el modelo de sistema microfluídico diseñado.

La segunda generación del dispositivo se basó en un diseño altamente compacto y aún más sencillo. La estructura consistió en una única pieza sólida de acrílico dentro de la cual se crearían micro canales de sección circular conectados para lograr contar con las mismas características del modelo original (contar con una entrada para alimentación, y una membrana que bloqueará la salida a manera de válvula pasiva y un contenedor de líquido). La única diferencia es que en este segundo dispositivo no es posible colocar dentro de los canales una membrana, pero si puede colocarse en una cara exterior del dispositivo de acrílico (ver Figura IV.13).

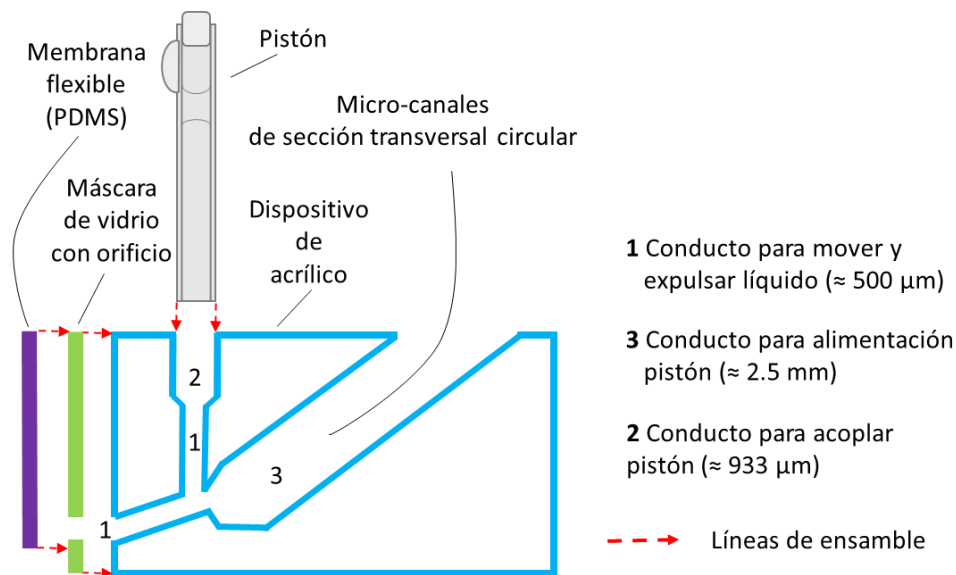


Figura IV.13 Diseño esquemático (vista lateral a manera de sección) del dispositivo microfluídico de segunda generación para probar el pistón opto-neumático. La geometría de los micro conductos permite la expulsión de líquido fuera del dispositivo y su realimentación a través del conducto de mayor diámetro, inclinado éste para aprovechar el contacto con el líquido, por medio del bisel formado por el contorno al término del canal; este se conecta a un reservorio de gran tamaño abierto al ambiente (no mostrado en la figura).

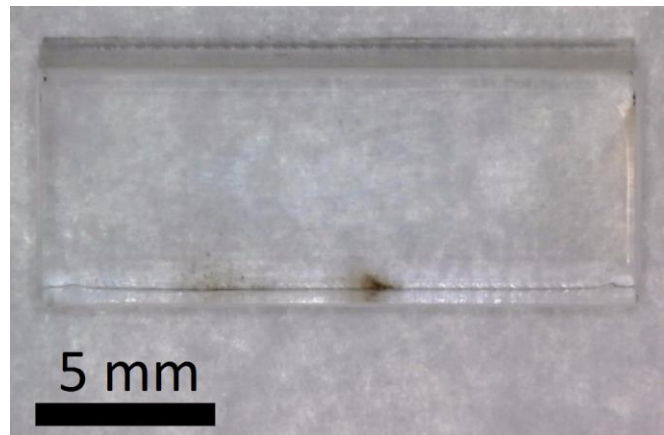
Ciertamente el nuevo modelo de sistema microfluídico conserva las características originales del primero, variando ligeramente en el uso de las válvulas elásticas pero logrando un funcionamiento adecuado, es decir logrando satisfactoriamente mover el líquido a través de los microconductos. La versatilidad del diseño evita unir, sellar y fijar piezas que pueden presentar fugas internas después de cierto tiempo de uso. Con el nuevo dispositivo únicamente es necesario unir y sellar el pistón a su canal de entrada, y sellar el reservorio con el canal de alimentación. La membrana es colocada de manera mucho más fácil que cuando era necesario insertarla y dejarla confinada en el interior de los microcanales.

IV.2.1.1 Fabricación.

-Pieza de acrílico.

El corte de las piezas para obtener pequeños prismas de base rectangular (aproximadamente 6 mm × 16.5 mm × 5 mm) se realizó mediante un servicio de corte láser (ver Figura IV.14). Fue requerido un archivo con formato CAD (*computer aided design*) enviado al equipo para realizar el corte de las piezas requeridas.

Figura IV.14 Vista aérea de un prisma acrílico de base rectangular antes de ser perforado para crear los microcanales en su interior.



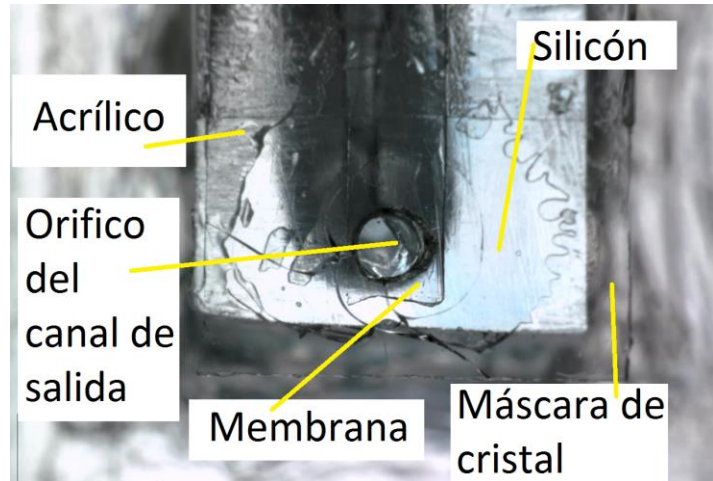
-Microcanales.

De manera general, se puede mencionar que se utilizaron brocas milimétricas de distintos diámetros, junto con un soporte improvisado para controlar el movimiento en tres ejes de un taladro de alta velocidad. Una vez obtenida la estructura de acrílico limpia de residuos, fue necesario unir el sistema microfluídico con el reservorio de líquido, el cual permitirá reabastecer cómodamente el líquido al sistema. Se utilizó una cubeta óptica (de dimensiones 12.5 mm × 12.5 mm × 45 mm) para el contenedor, a la cual se le hizo una abertura de sección rectangular con las dimensiones de la cara lateral del dispositivo acrílico.

-Accesorios.

Para realizar las pruebas finales se utilizó además una pequeña máscara de vidrio adherida con silicón a la salida, entre la membrana y el dispositivo (ver Figura IV.13). La máscara posee un orificio alineado con el orificio de la salida, y fue necesario utilizarla para vencer las fuerzas de tensión superficial, que ocasionan una fuerte adhesión del líquido expulsado del sistema microfluídico. A diferencia del acrílico, es posible volver hidrofóbica una superficie de vidrio fácilmente al adicionar un agente químico que reduce considerablemente la tensión superficial. Para esto se utilizó un impermeabilizante común para parabrisas de automóvil. Finalmente se colocó y fijó la membrana de PDMS rectangular alineada con el orificio de la máscara (ver Figura IV.15). El sistema actuador-dispositivo microfluídico queda entonces listo para probarse colocando el pistón dentro del conducto destinado para ello en la estructura acrílica. El sello con silicón evita fugas al momento de accionar el dispositivo. El arreglo experimental utilizado para la caracterización del pistón se muestra en la Figura IV.16.

Figura IV.15 Vista frontal de la estructura de acrílico que aloja los microcanales. Se puede ver el orificio de salida del dispositivo; enseguida la máscara de cristal vuelta hidrofóbica (y adherida con silicón); para finalmente, colocar una membrana ajustada que sobresale apenas del perímetro del orificio.



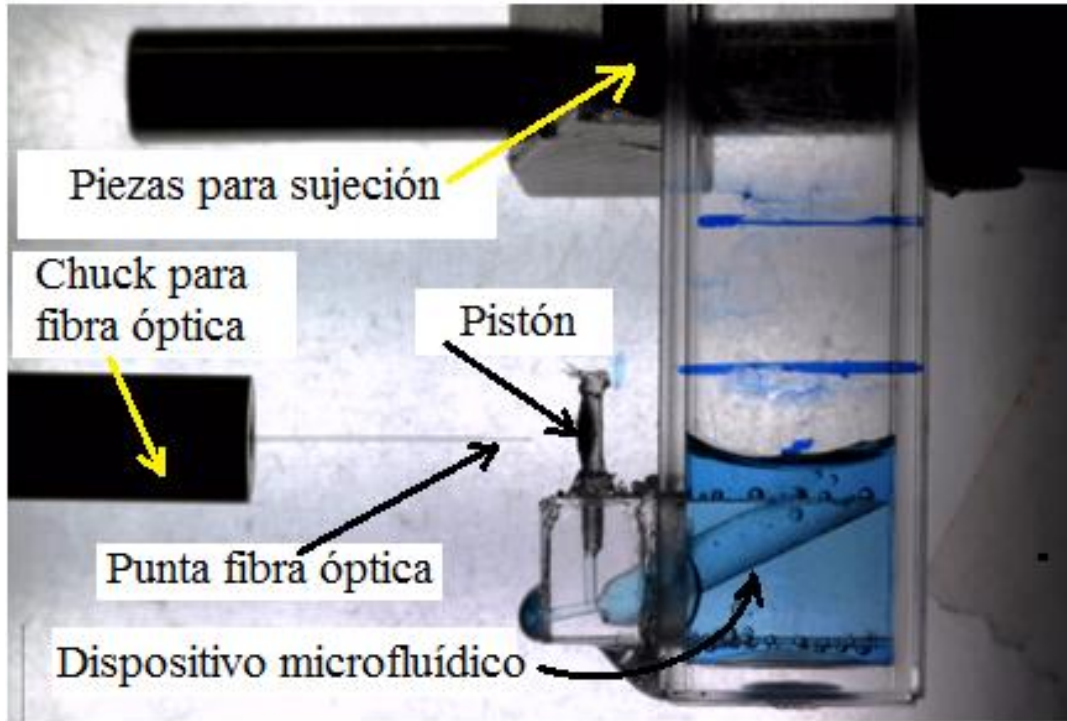


Figura IV.16 Fotografía panorámica que muestra el arreglo fibra óptica, el dispositivo opto-neumático microfluídico y las piezas de sujeción (color negro).

Referencias

- [1] Velázquez-Benítez, A. M. Acopladores de fibra óptica con recubrimientos de azopolímero. TESIUNAM, 2010.
- [2] Vélez-Cordero, J. R.; Velázquez-Benítez, A. M.; Hernández-Cordero, J. Thermocapillary flow in glass tubes coated with photoresponsive layers. *Langmuir* 2014, 30 (18), 5326–5336.
- [3] Jeon, N. L.; Chiu, D. T.; Wargo, C. J.; Wu, H.; Choi, I. S.; Anderson, J. R.; Whitesides, G. M. Design and fabrication of integrated passive valves and pumps for flexible polymer 3-dimensional microfluidic systems. *Biomedical Microdevices* 2002, 4(2), 117-121.



NÁLISIS DE RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.

Parte importante de los datos obtenidos a través de la caracterización del dispositivo se complementan con la interacción del pistón con una estructura de microcanales que pone a prueba su desempeño.

En este último capítulo se mencionarán los resultados obtenidos utilizando el pistón como dispositivo actuador para el sistema microfluídico.

V. 1 Desplazamiento y potencia óptica.

Los experimentos preliminares se realizaron con un pistón denominado PISTÓN A (Ver Tabla V.1). Estos se centraron en observar el efecto de la potencia óptica para generar el desplazamiento del émbolo en el pistón.

Tabla V.1 Parámetros de funcionamiento del pistón opto-neumático durante las primeras pruebas.

Espesor de la capa fotosensible [μm]	Longitud de émbolo líquido [μm]	Separación entre fibra óptica y material fotosensible [μm]	Volumen de aire inicial confinado [μL]
163.16	832.99	518	1.51

Para localizar el rango de potencia óptica dentro del cual el pistón tendría buen desempeño, se utilizó el intervalo de valores de 33.85 a 221.95 mW.

V. 1.1 Cálculo del desplazamiento.

La determinación del desplazamiento de una gota de aceite mineral es una forma de calcular indirectamente el desplazamiento neto logrado por el pistón. Se realizó un análisis de dos imágenes del video (cuadros) que corresponden a un tiempo inicial (t_i), justo antes de iniciarse el movimiento, y el

tiempo final (t_f) al cual se capturó el máximo recorrido de la gota a través del capilar, justo al detenerse (máxima expansión del aire, Figura V.1)

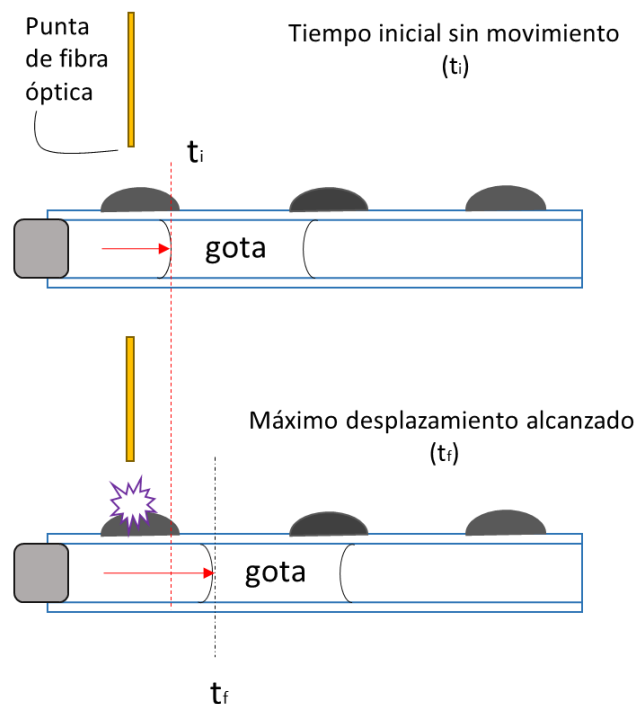


Figura V.1 Esquema para representar el método de medición para un tiempo inicial (t_i), y un tiempo final (t_f) para el pistón, donde se ilustra el desplazamiento máximo de la gota (émbolo).

El análisis gráfico se realizó mediante el software comercial *Camtasia Studio* versión 6.0, para obtener los cuadros específicos del video en donde se localizaba el t_i y el t_f . Luego, mediante el software libre *ImageJ* versión 1.47, se obtuvo el número de pixeles que representan la distancia, espesor y longitud de los parámetros de funcionamiento del pistón.

Para realizar un escalamiento de pixeles a milímetros existen dos posibilidades. La primera de ellas está relacionada al uso del software del microscopio *DinoLite* y su capacidad de hacer mediciones de la escena observada de acuerdo a una escala de calibración previa. El segundo método, que puede ser más confiable, se basa en realizar una regla de proporcionalidad a partir de los pixeles que representan el diámetro exterior del capilar (dato proporcionado por el fabricante de los capilares) en una imagen del pistón observado. Este valor se utiliza entonces para obtener un factor de conversión para cualquier longitud o dimensión en pixeles de las imágenes (cuadros, ver FiguraV.2).

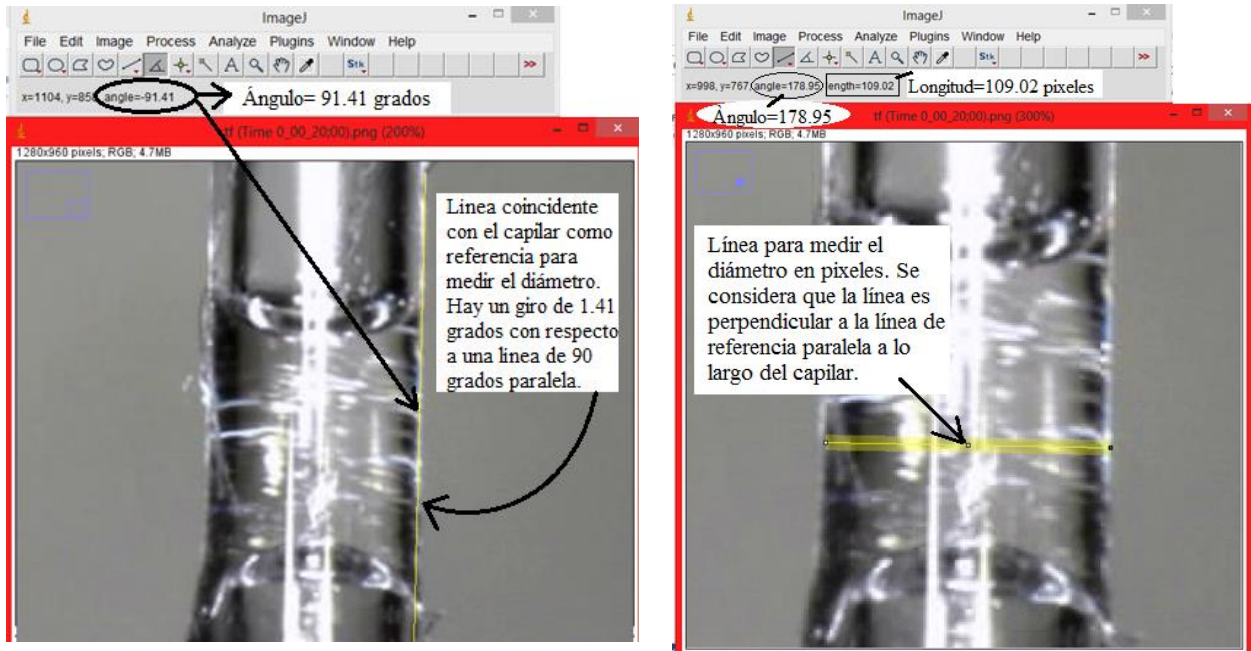


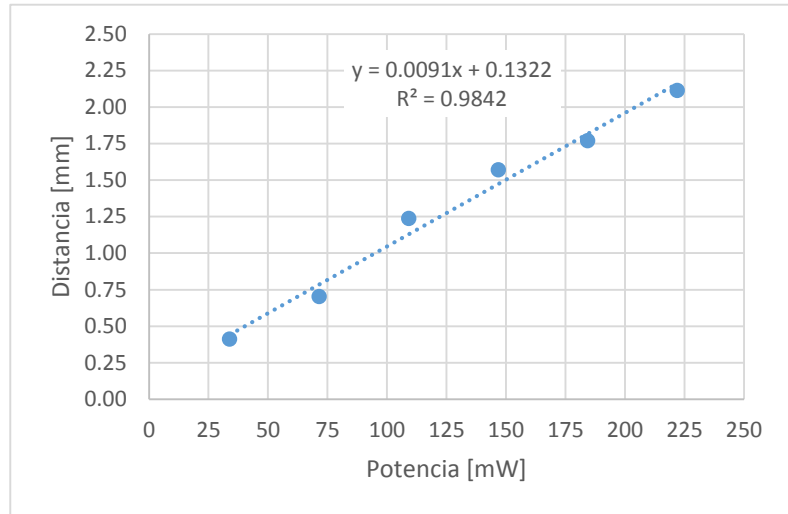
Figura V.2 Generación del factor de conversión pixeles a mm, por proporción entre el número de pixeles medido (≈ 109 pixeles) que representan el diámetro del capilar conocido (0.9017 mm).

El factor de conversión obtenido es el siguiente:

$$\left(\frac{0.9017 \text{ mm}}{109 \text{ pixeles}} \right) = \left(8.272477064 \times 10^{-3} \left[\frac{\text{mm}}{\text{pixeles}} \right] \right) (\text{distancia que se desea conocer [pixeles]})$$

Los resultados obtenidos para el PISTÓN A indican que el desplazamiento en función de la potencia óptica utilizada juega un papel importante, remarcando una mejor respuesta a partir de 146.71 mW (Ver Gráfico V.2)

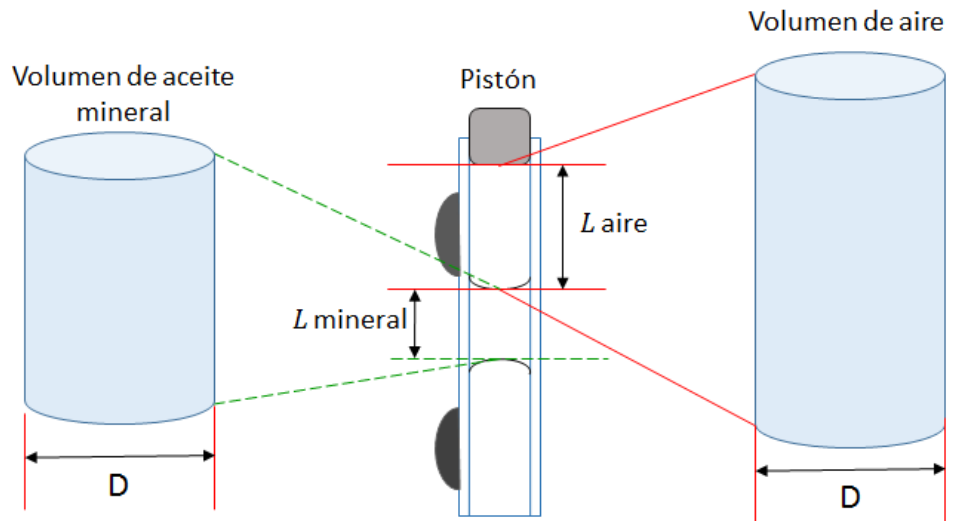
Gráfico V.2 Distancia en función de la potencia óptica para el PISTÓN A.



V. 1.2 Cálculo de volúmenes.

Para medir el volumen de aire contenido en el pistón, así como el tamaño del émbolo de aceite mineral utilizado, se consideró que los fluidos confinados poseen una forma cilíndrica, por lo que únicamente habría que medir la altura (L) de los cilindros y luego calcular el volumen para un cilindro con sección circular ($V = \pi r^2 L$). Se consideró también que el volumen ocupado por el tapón de silicón era despreciable, pues éste se coloca muy superficialmente en el extremo del capilar (penetrando realmente muy poco del adhesivo en el orificio); para el volumen de aceite mineral se consideró que la variación de forma presentada en los extremos debida a los meniscos del líquido no era significativa, ya que al no ser muy pronunciados, no se tomaron en cuenta para el cálculo de volumen (ver Figura V.3). Es de suma importancia conocer el volumen necesario de trabajo del pistón, ya que el trabajo de expansión de este otorgará también el mejor desplazamiento durante la activación del dispositivo.

Figura V.3 Medición de longitudes para la cámara de aire y el émbolo de aceite mineral en el pistón. El diámetro D , valor conocido, corresponde al valor proporcionado por el fabricante, $D=0.62992\text{ mm}$.



Al encontrar una dependencia entre la potencia irradiada del láser y la distancia recorrida, también puede obtenerse una relación entre la variación del volumen de trabajo del PISTÓN A, y la distancia lograda por el mismo. El Gráfico V.3 mantiene el mismo volumen de aire para cada prueba a distinta potencia.

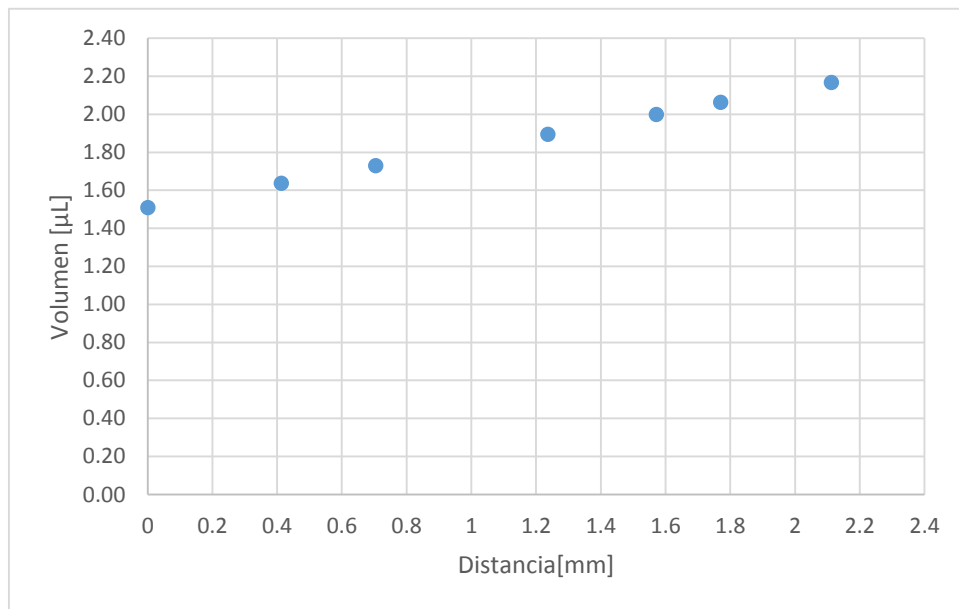


Gráfico V.3 Volumen de trabajo en función de la distancia para el PISTÓN A.

En estos experimentos, el láser genera un incremento en la temperatura en la región del recubrimiento fotosensible. De esta manera, el volumen del aire interno también aumenta por expansión térmica en función de la potencia del láser.

Los resultados obtenidos para el PISTÓN A sirvieron para orientar las pruebas siguientes al uso de potencias ópticas mayores a 140 mW (correspondiente a los tres últimos valores registrados en la gráfica con mejor desplazamiento). Asimismo, fueron útiles para adecuar las otras dimensiones características del pistón.

V. 2 Desplazamiento y variación parámetros.

La siguiente serie de pruebas se realizó con el fin de ajustar el volumen de trabajo óptimo para el pistón. El objetivo entonces era determinar si la cantidad de aire debería ser mayor o menor a la ocupada por el PISTÓN A. Los datos por evento del experimento se resumen en la Tabla V. 2.

Capilar revestido (pistón)	Espesor de la capa fotosensible [μm]	Tamaño de émbolo líquido (t_{emb}) [μm]	Separación entre fibra óptica y material fotosensible [μm]	Volumen de aire inicial confinado [μL]	Razón de tamaño $\left(\frac{\text{altura del aire contenido}}{t_{emb}} \right)$
1	344	816	609	0.60	$\frac{1.9 \text{ mm}}{0.816 \text{ mm}} = 2.3$
2	344	1160	678	1.62	$\frac{5.2 \text{ mm}}{1.160 \text{ mm}} = 4.48$

Tabla V.2 Determinación del volumen de aire efectivo.

Mediante la razón de tamaño entre la altura (L) del volumen de aire, y la longitud del émbolo de cada pistón, se puede obtener también una relación numérica que sirve como parámetro para clasificar la respuesta en desplazamiento del pistón de acuerdo a la magnitud obtenida del cociente de éstas.

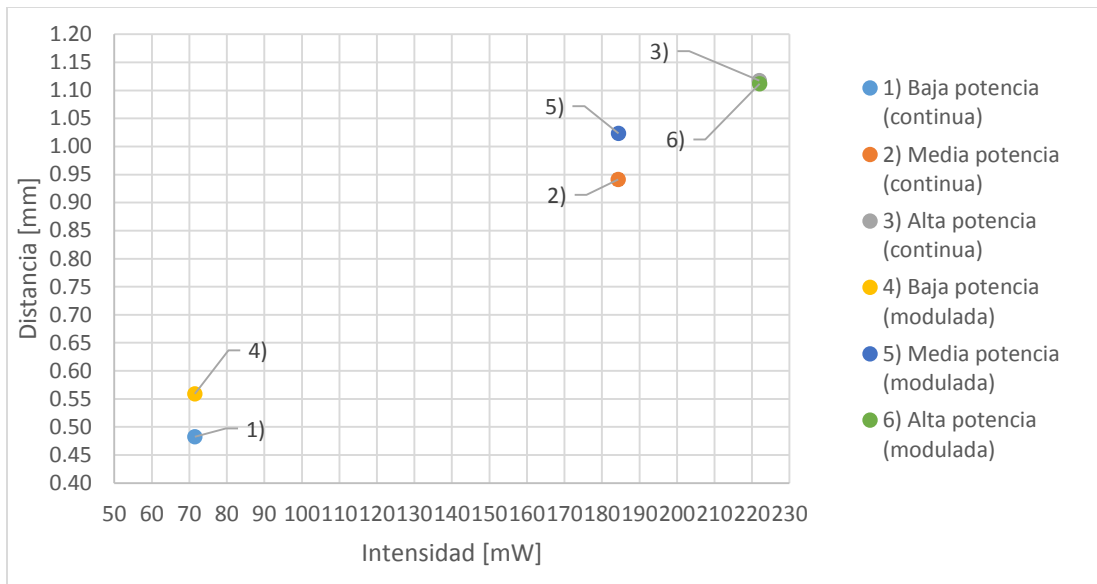


Gráfico V.4 Distancia recorrida por el émbolo líquido para un volumen de aire pequeño (pistón 1, Tabla V.2), utilizando un capilar con recubrimiento de un espesor reducido. Los mejores valores se obtienen sólo con potencias altas.

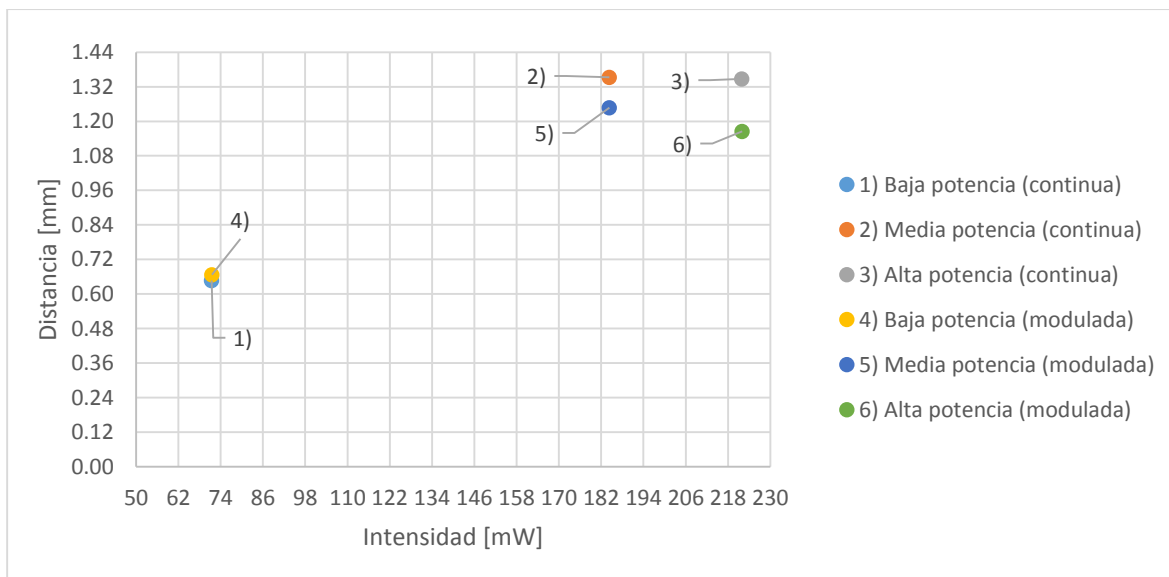


Gráfico V.5 Distancia recorrida por el émbolo líquido para un volumen de aire grande (pistón 2, Tabla V.2), utilizando un capilar con recubrimiento de un espesor. Los mejores valores se obtienen a partir de media potencia.

De acuerdo con el análisis anterior (ver Gráfico V.4, y Gráfico V.5), se concluye primero que al utilizar un volumen pequeño de aire ($0.6 \mu\text{L}$) es necesario emplear el valor máximo de potencia para lograr la mejor repuesta del pistón. En cambio, al utilizar un volumen de aire ($1.62 \mu\text{L}$) más cercano con valor de $1.51 \mu\text{L}$

(refiriéndose al PISTÓN A) es necesaria una menor potencia óptica (desde 184 mW) para lograr prácticamente el mismo desplazamiento (>1.1 mm).

El segundo hecho se relaciona con el funcionamiento del láser en un régimen modulado. El uso del láser a baja frecuencia (8 mHz) provoca prácticamente el mismo comportamiento en el pistón que en operación continua, teniendo una variación máxima que va de un valor de distancia de 0.08 mm para el pistón 1, y de 0.18 mm para el pistón 2, considerando de igual valor a los puntos casi coincidentes mostrados en ambos casos.

Al mismo tiempo, durante esta prueba, fue modificada la longitud del émbolo líquido utilizado en el pistón 2, esperando obtener algún tipo de variación significativa con respecto al caso del PISTÓN A. Tomando en cuenta los resultados del Gráfico V.5, es seguro decir que un émbolo más grande no sirve para lograr una mayor distancia.

Finalmente, la última variable analizada corresponde a la distancia de acción del láser (ver Figura V.4), que va de la punta de la fibra óptica hasta el punto medio del lóbulo formado por el material fotosensible. Los resultados no demuestran una ventaja en el recorrido del émbolo al aumentar la distancia de acción del láser, por lo que se mantuvo el valor original (cercano a $500 \mu m$). La única ventaja observada de aumentar esta distancia tiene que ver con la duración del material fotosensible, pues este se degrada más rápidamente cuando la fibra óptica está muy cerca (Ver Figura V.5).

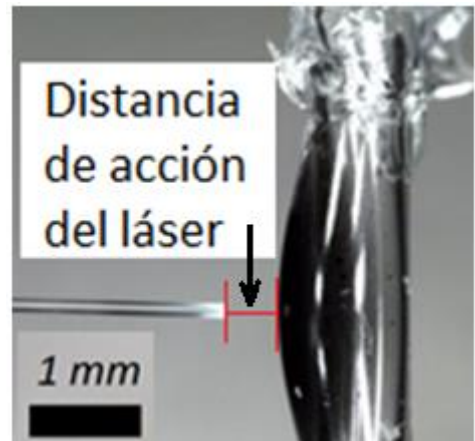


Figura V.4 Distancia de acción del láser.

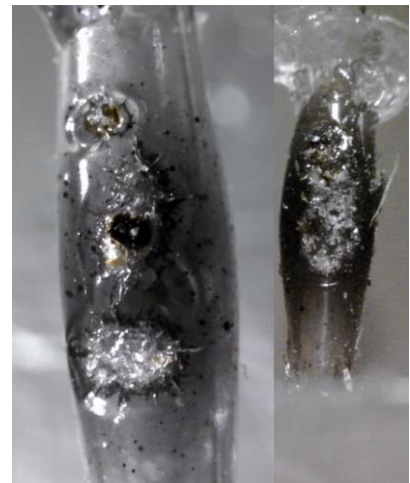


Figura V.5 Fotografías que muestran el daño en el recubrimiento del pistón cuando se usa alta potencia (> 184.33 mW).

Pistón	Espesor de la capa fotosensible [μm]	Tamaño de émbolo líquido (t_{emb}) [μm]	Separación entre fibra óptica y material fotosensible [μm]	Volumen de aire inicial confinado [μL]	Razón de tamaño $\left(\frac{\text{altura del aire contenido}}{t_{\text{emb}}} \right)$
1	266	490	486	1.56	$\frac{5.0 \text{ mm}}{0.413 \text{ mm}} = 12.00$
2	322	517	413	1.63	$\frac{5.2 \text{ mm}}{0.517 \text{ mm}} = 10.00$
3	402	448	402	1.50	$\frac{4.82 \text{ mm}}{0.448 \text{ mm}} = 10.75$
4	413	517	448	1.58	$\frac{5.06 \text{ mm}}{0.517 \text{ mm}} = 9.78$
5	505	471	413	1.44	$\frac{4.62 \text{ mm}}{0.471 \text{ mm}} = 9.80$
6	631	730	413	1.63	$\frac{5.2 \text{ mm}}{0.730 \text{ mm}} = 7.10$
7	701	632	413	1.54	$\frac{4.94 \text{ mm}}{0.632 \text{ mm}} = 7.81$
8	735	620	402	1.52	$\frac{4.87 \text{ mm}}{0.620 \text{ mm}} = 7.85$

Tabla V.3 Resumen de los eventos experimentales para probar el desempeño del pistón cuando se incrementa la cantidad de material fotosensible acumulado en el revestimiento del capilar.

V. 2.1 Desplazamiento y variación de la capa fotosensible.

Una vez que se determinaron los valores adecuados para el volumen del aire, la separación entre fibra óptica-superficie fotosensible, y el tamaño del émbolo, resta por determinar el espesor adecuado de material fotosensible. Para esta etapa fue necesario usar espesores mayores, por arriba del espesor del PISTÓN A, para comprobar si es posible obtener mejores desplazamientos. La Tabla V.3 resume la serie de pruebas realizadas.

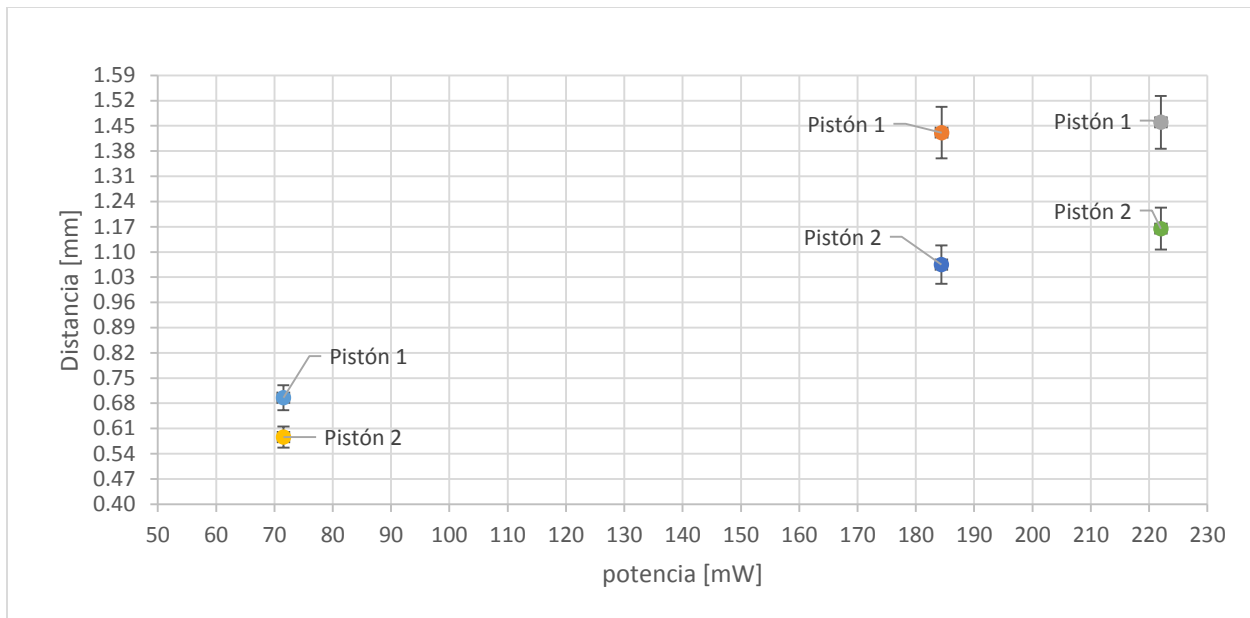


Gráfico V.6a Distancia recorrida por el émbolo líquido para el **pistón 1** y **pistón 2**, utilizando luz láser modulada a través de tres valores de potencias láser. El **pistón 1**, con menor espesor demuestra **mejor** respuesta.

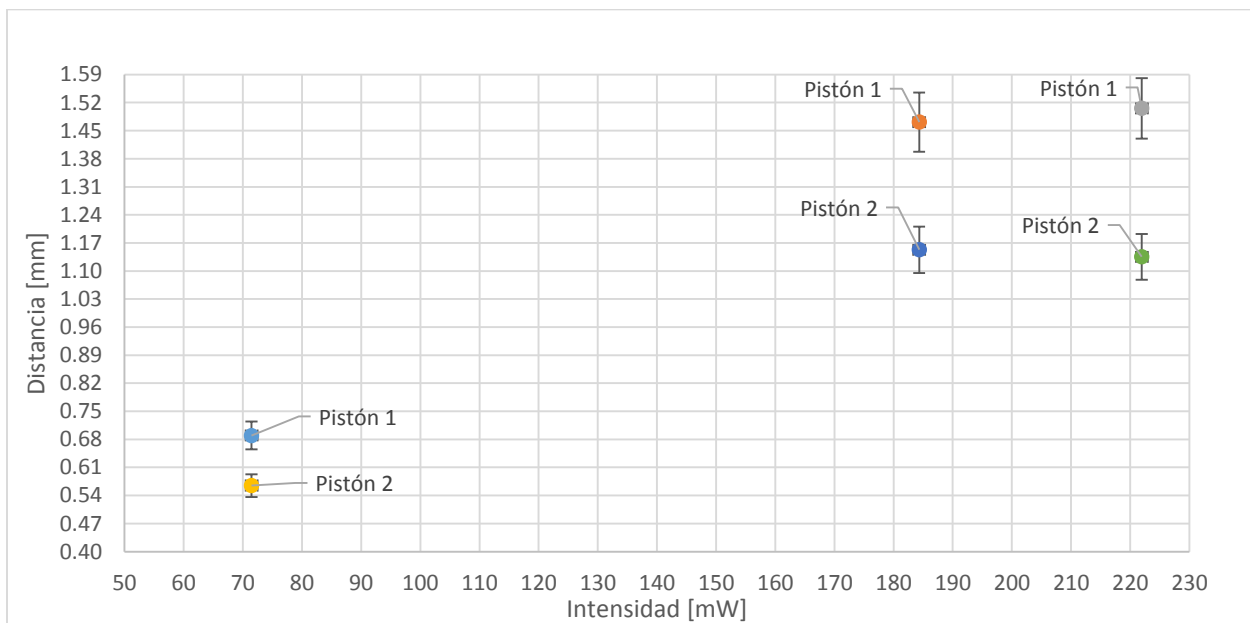


Gráfico V.6b Distancia recorrida por el émbolo líquido para el **pistón 1** y **pistón 2**, utilizando luz láser continua a través de tres valores de potencias láser. El **pistón 1**, con menor espesor demuestra **mejor** respuesta.

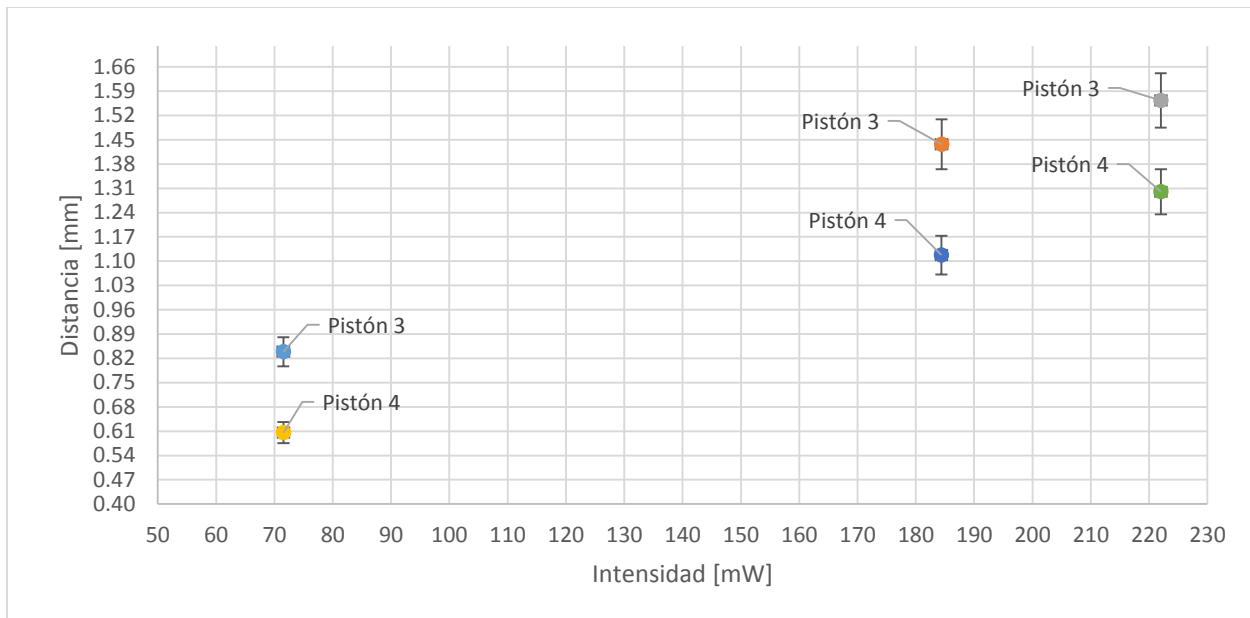


Gráfico V.7a Distancia recorrida por el émbolo líquido para el **pistón 3** y **pistón 4**, utilizando luz láser modulada a través de tres valores de potencias láser. El **pistón 3**, con menor espesor demuestra mejor respuesta.

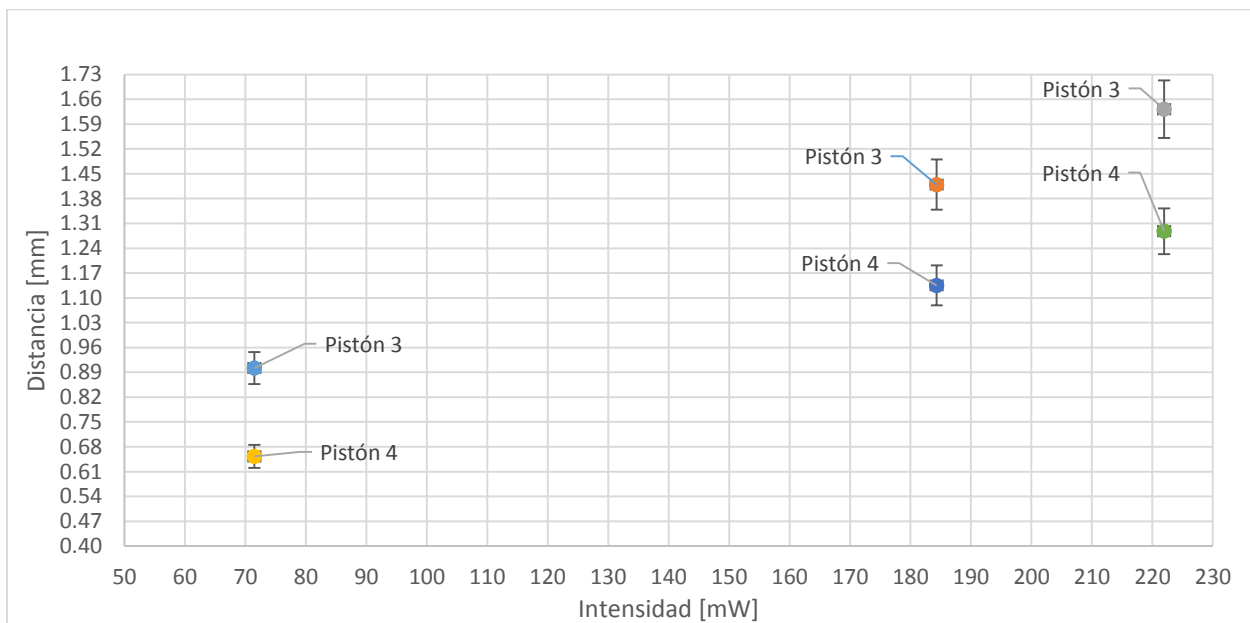


Gráfico V.7b Distancia recorrida por el émbolo líquido para el **pistón 3** y **pistón 4**, utilizando luz láser continua a través de tres valores de potencias láser. El **pistón 3**, con menor espesor demuestra mejor respuesta.

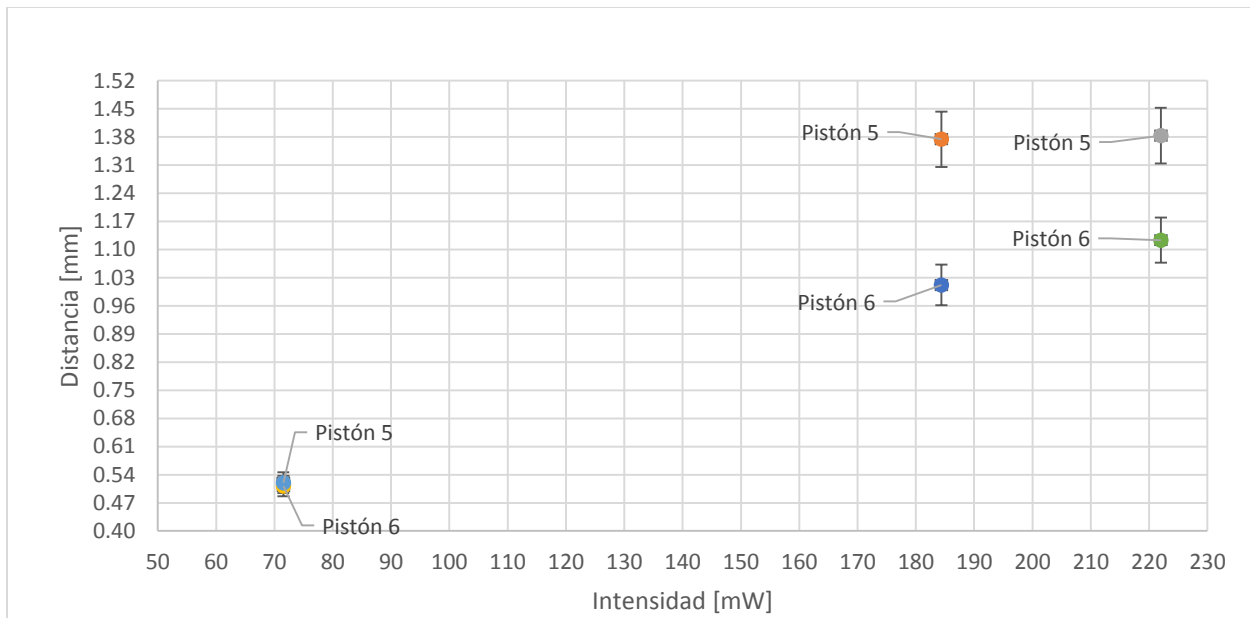


Gráfico V.8a Distancia recorrida por el émbolo líquido para el **pistón 5** y **pistón 6**, utilizando luz láser modulada a través de tres valores de potencias láser. El **pistón 5**, con menor espesor demuestra **mejor** respuesta.

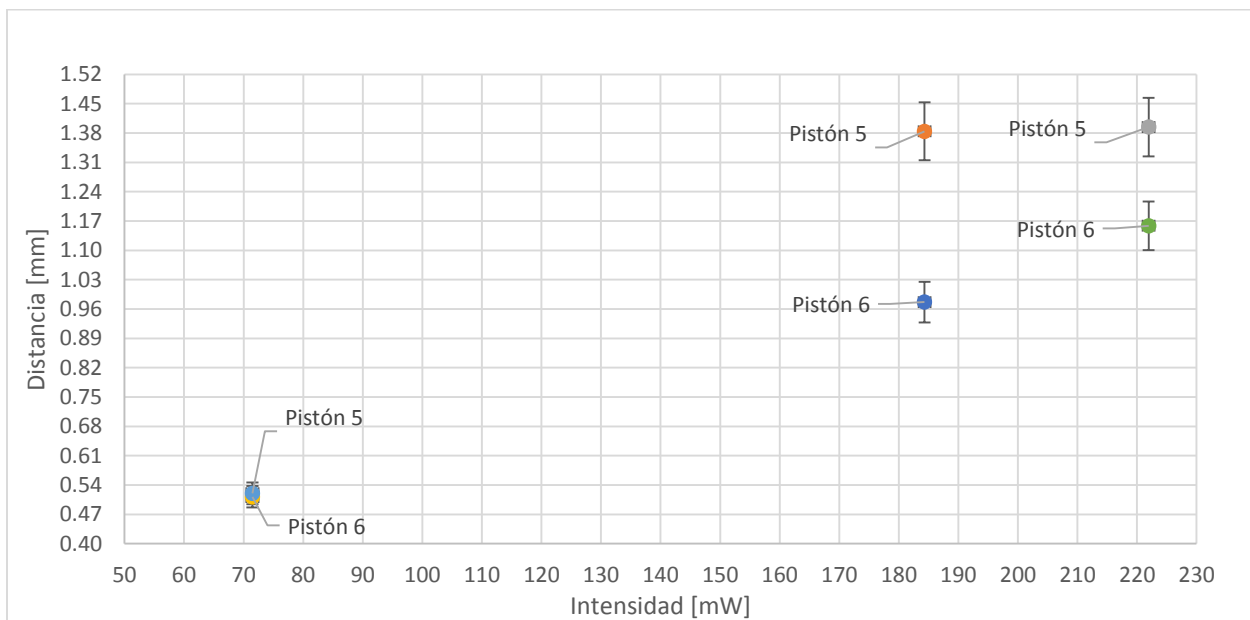


Gráfico V.8b Distancia recorrida por el émbolo líquido para el **pistón 5** y **pistón 6**, utilizando luz láser continua a través de tres valores de potencias láser. El **pistón 5**, con menor espesor demuestra **mejor** respuesta.

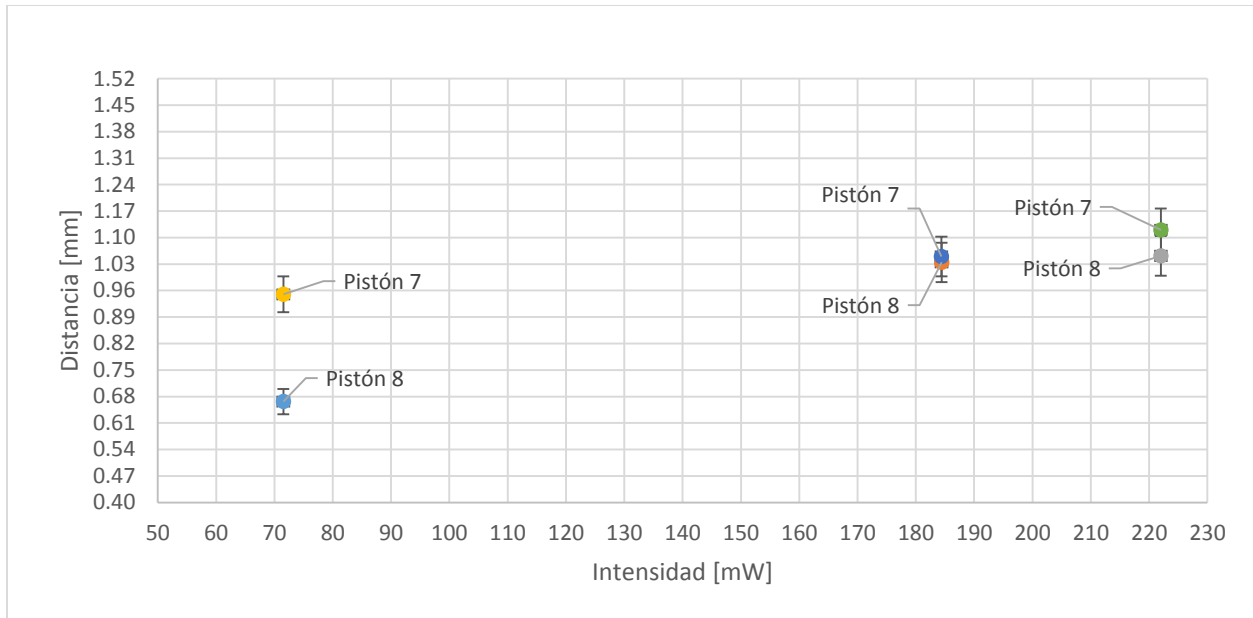


Gráfico V.9a Distancia recorrida por el émbolo líquido para el **pistón 7** y **pistón 8**, utilizando luz láser modulada a través de tres valores de potencias láser. El **pistón 7**, con menor espesor demuestra **mejor** respuesta.

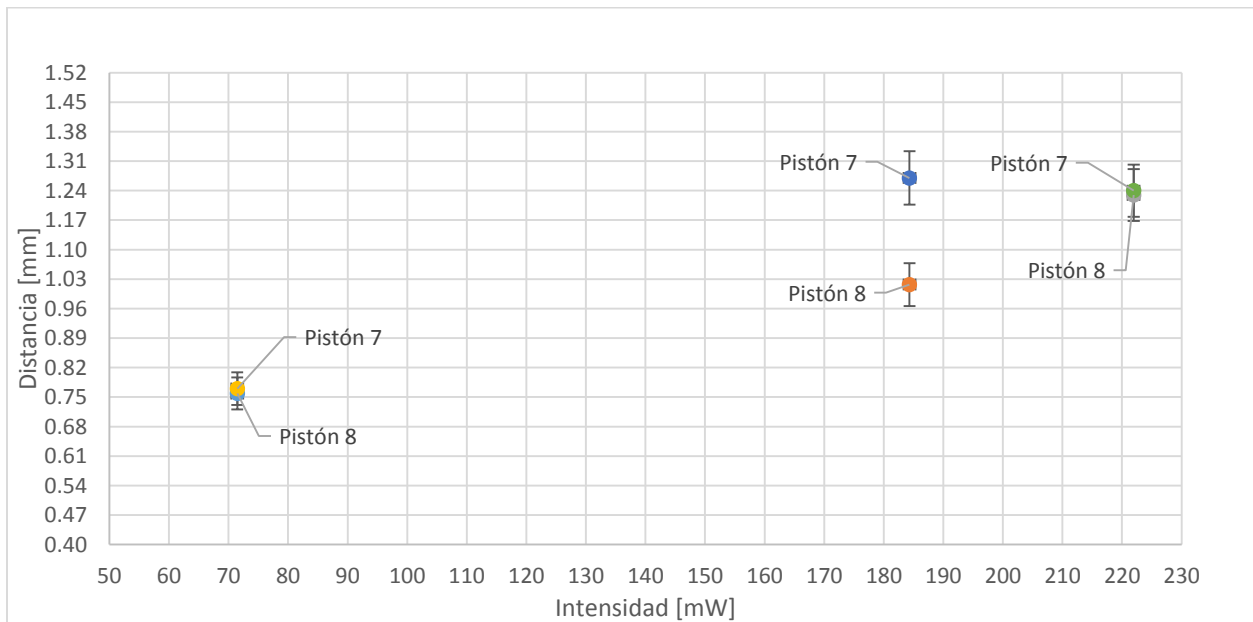


Gráfico V.9b Distancia recorrida por el émbolo líquido para el **pistón 7** y **pistón 8**, utilizando luz láser continua a través de tres valores de potencias láser. El **pistón 7**, con menor espesor demuestra **mejor** respuesta.

Los resultados mostrados en los gráficos (Gráfico V.6a a Gráfico V.9b) indican que, para una potencia de aproximadamente 70 mW, el incremento progresivo del espesor del material fotosensible provoca un desplazamiento irregular. En contraste, para una potencia de aproximadamente 184 mW, se observa que a menor espesor del material se obtiene una mayor distancia recorrida. Esto a su vez favorece también a la velocidad máxima con la que el ciclo de expansión-compresión se puede realizar con este tipo de pistón (ver Gráfico V.11). Estos resultados indican que el grosor del compuesto polimérico debe tener un valor óptimo; si este se sobrepasa, la transferencia del calor generado en el material a través del mismo y de la pared del capilar (delgada pero no despreciable), no es tan eficiente (ver Figura V.6). Aunque las propiedades foto-térmicas de este tipo de compuestos poliméricos están todavía bajo estudio, se puede mencionar que la existencia de un espesor óptimo para este tipo de membranas se ha previsto de manera teórica y experimental [1]. Sin embargo, aún resulta difícil establecer de manera precisa el espesor ideal para una aplicación específica.

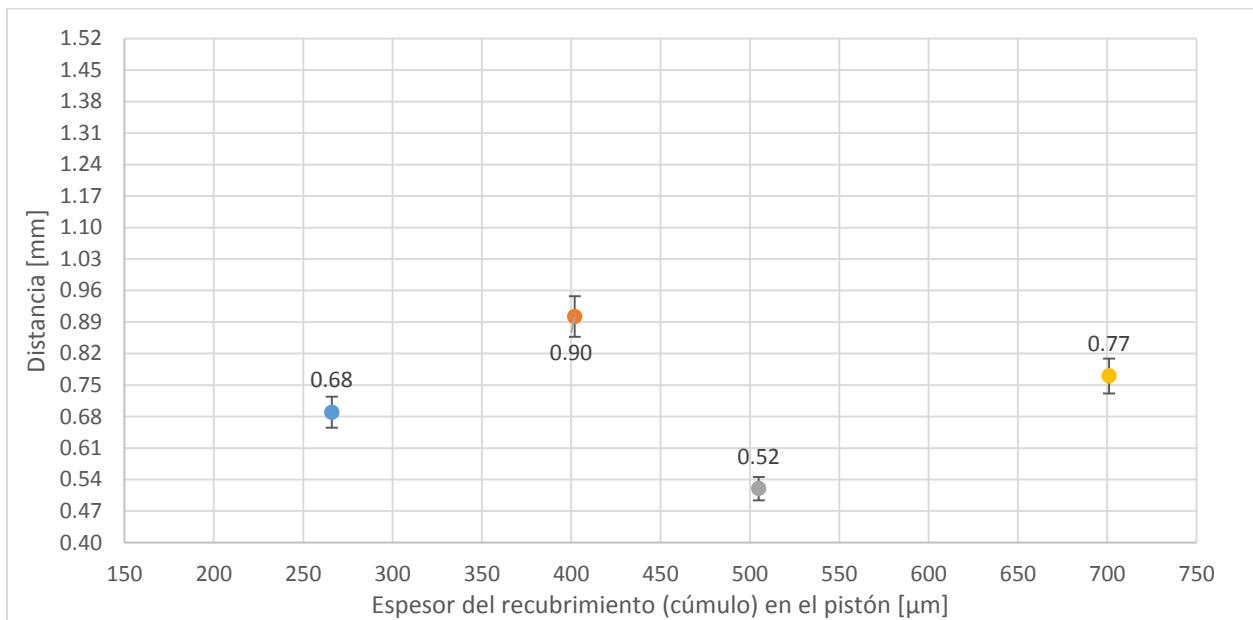


Gráfico V.10 Distancia recorrida (0.90 mm, como máximo valor) en función del espesor del lóbulo fotosensible. No existe una tendencia clara de la distancia recorrida por los pistones al utilizar potencia baja (71.47mW).

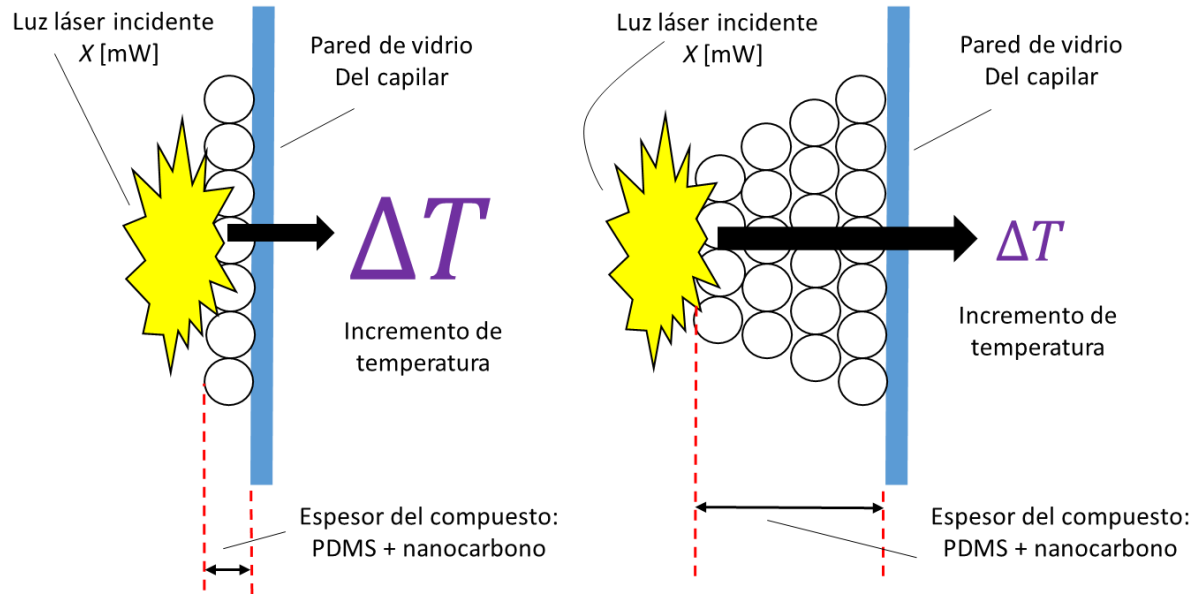


Figura V.6 Representación esquemática de la transferencia del calor por la irradiación del láser sobre el material polimérico con nano polvo de carbono utilizado en el exterior del pistón. Un mayor espesor de material fotosensible reduce la transferencia del calor el interior del capilar, generando un menor rendimiento del dispositivo. Cuando el espesor depositado es óptimo, el nano polvo absorbe la luz láser generando calor que se transfiere hacia el interior del capilar en un tiempo adecuado para establecer el gradiente de temperatura en el interior del pistón.

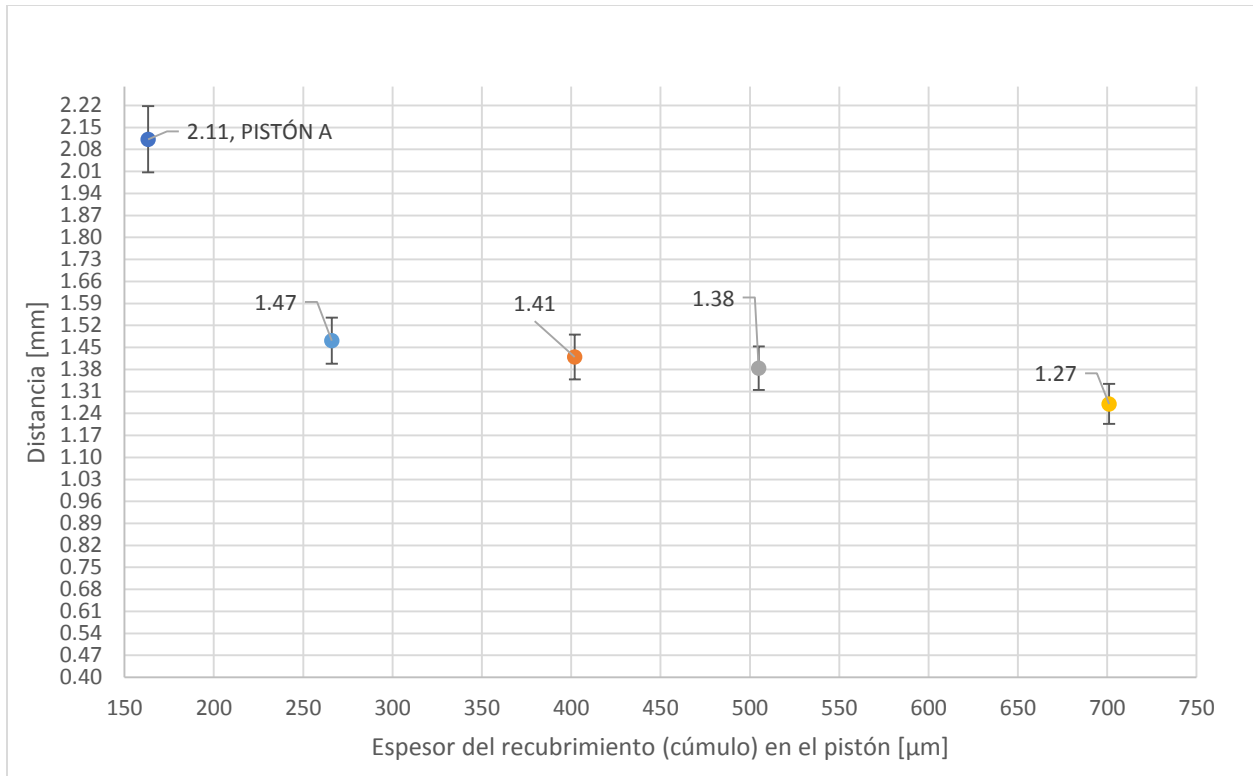


Gráfico V.11 Distancia recorrida (2.11 mm, como máximo valor) en función del espesor del lóbulo fotosensible. Para estas condiciones experimentales (184.33 mW) se observa que un menor espesor de material fotosensible produce un mayor desplazamiento en el émbolo.

Es claro que el uso de una potencia alta produce un poco más de desplazamiento, pero es necesario mencionar que la capacidad del pistón opto-neumático de resistir alta potencia es sumamente limitada debido al material polimérico. Para potencias del láser cercanas a 220 mW, el recubrimiento sufre daño por incandescencia y después de pocos ciclos de accionamiento el dispositivo se vuelve inservible (ver Figura V.5). Ésta es la razón principal por la cual se decidió aumentar la distancia de acción cerca de 1.5 mm, recordando que este cambio no afecta el desempeño del pistón.

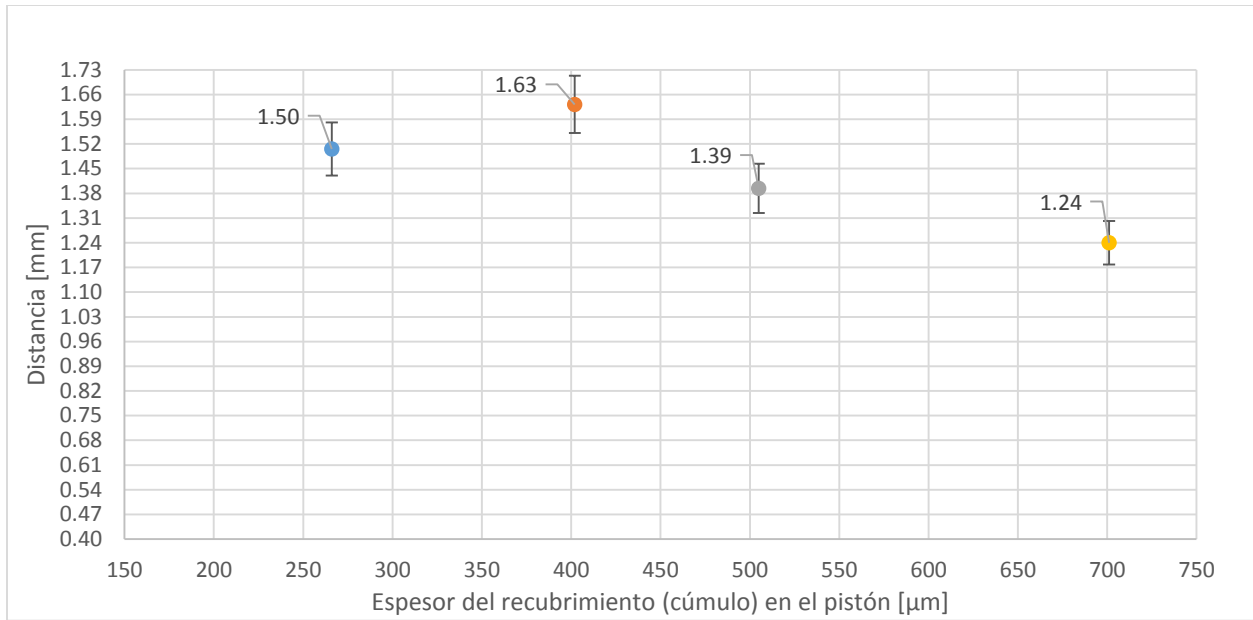


Gráfico V.13 Distancia recorrida (1.63 mm, como máximo valor) en función del espesor del material fotosensible. Al usar alta potencia (220 mW) se logra un poco más de desplazamiento a costa del desgaste del pistón.

Los resultados generales de estos experimentos indican que el mejor desempeño del micro pistón se obtiene con recubrimientos delgados de material fotosensible. Los rangos de los parámetros característicos del pistón que resultan en un funcionamiento adecuado para este trabajo se indican en la Tabla V.4.

Espesores útiles capa fotosensible [μm]	Tamaño de émbolo líquido (t_{emb}) [μm]	Volumen de aire inicial confinado [μL]
140 - 160	800 - 850	1.50 - 1.63

Tabla V.4 Datos de caracterización del pistón opto-neumático.

V. 3 Velocidad máxima del pistón y eficiencia.

Con las pruebas anteriores se determinaron los parámetros que suponen la mejor configuración del pistón (Tabla V.4). Para complementar el análisis del dispositivo se calculó la velocidad máxima alcanzada en el mejor caso, y otros dos casos más incluidos para contrastar resultados. La determinación de la velocidad se hizo mediante un ajuste lineal de los datos, es decir, obteniendo la mejor pendiente de la recta que describe el comportamiento de los puntos más representativos durante la fase de activación de cada pistón, sobre el gráfico de distancia contra tiempo (ver Tabla V.5 5 más adelante).

El ajuste lineal de los datos comprende una discriminación de puntos sobre la fase de activación (ver Gráfico V.14 y Gráfico V.15), tomando todo el semiciclo de activación, y recortando puntos para obtener el periodo más lineal, donde se alcanzó un valor en el coeficiente de correlación (r^2) mayor a 0.98, para garantizar así que la pendiente de la recta tangente a la curva sea lo más fiel posible a los datos reales.

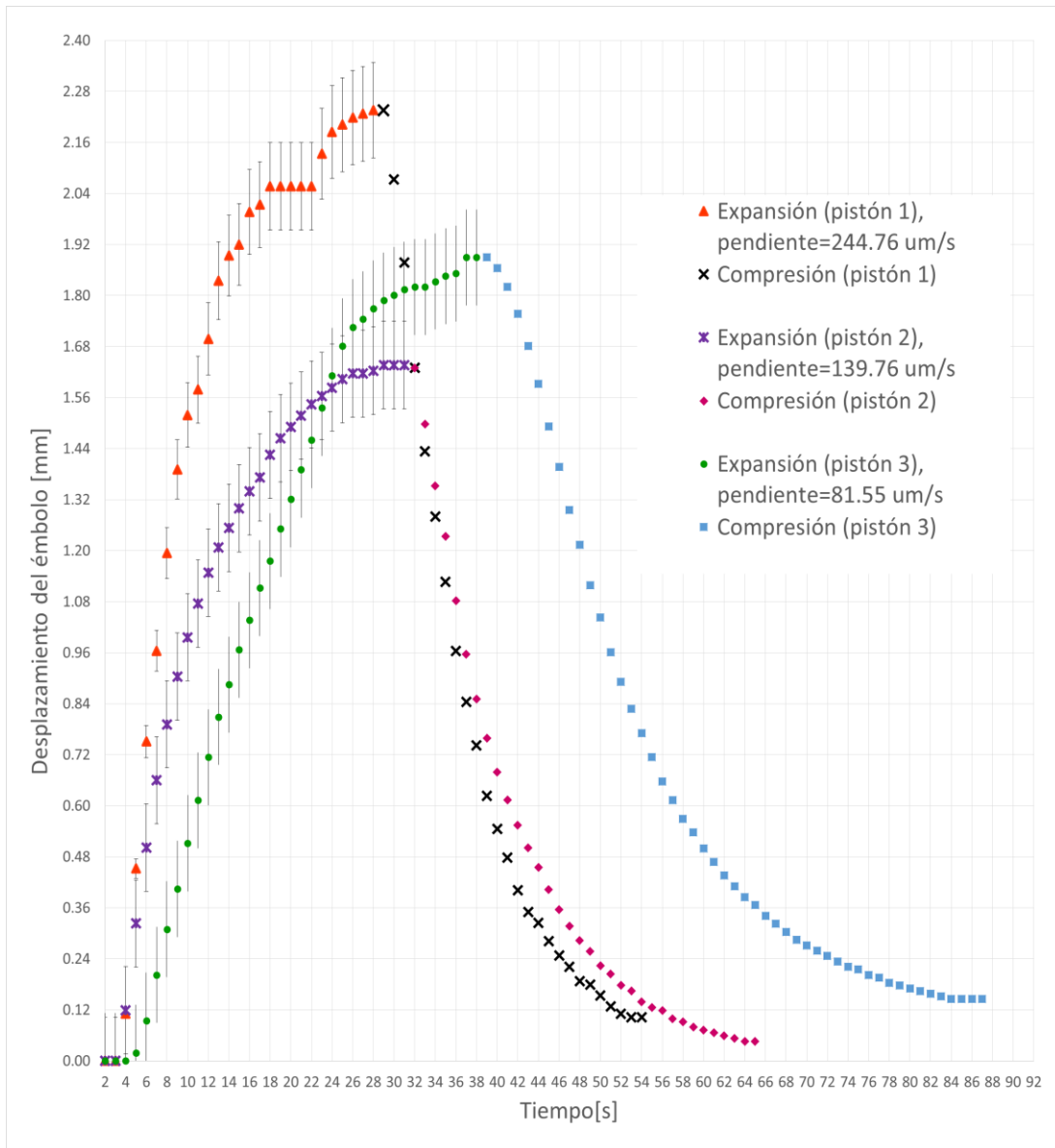


Gráfico V.14 Comparación del desempeño de tres tipos de pistones: pistón 1 (caso óptimo), pistón 2 (rendimiento por debajo del pistón 1), y pistón 3 (rendimiento por debajo del pistón 2). Se muestra un ciclo completo que comprende la fase de activación (incremento de la pendiente), más su fase de desactivación correspondiente, para cada uno de los pistones de la Tabla V.5. Es notorio que el pistón 1 posee una mayor pendiente en comparación de los otros dos, además el semiciclo del pistón 1 (activación) alcanza su máximo en menor tiempo, en comparación con los otros dos pistones de menor desempeño.

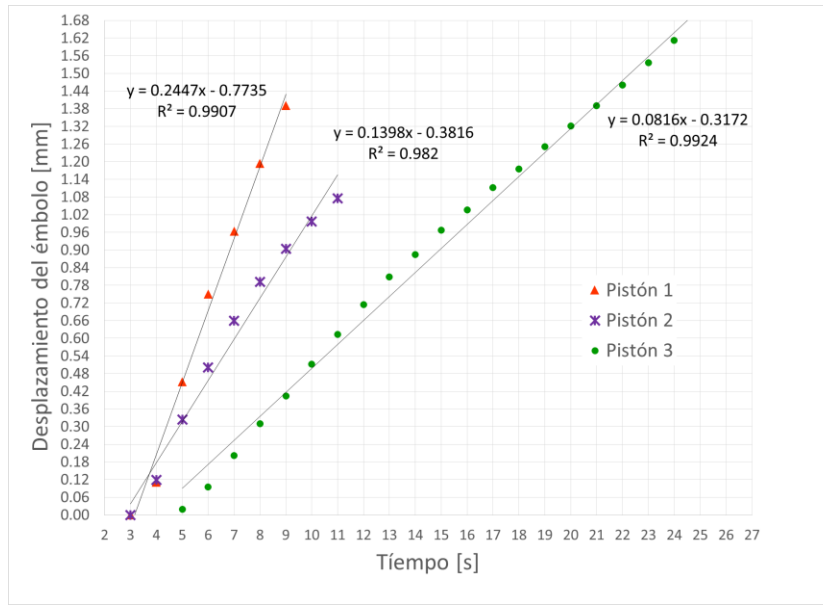


Gráfico V.15 Conjunto de puntos seleccionados para los tres tipos de curvas en el ciclo de expansión (ver Gráfico V.15) donde se cumple un comportamiento lineal. Se calculó las velocidades máximas de los tres pistones por medio de una regresión lineal (ver Tabla V).

Pistón	Espesor de la inestabilidad formada [μm]	Tamaño de émbolo líquido (t_{emb}) [μm]	Separación entre fibra óptica y material fotosensible [μm]	Volumen de aire inicial confinado [μL]	Velocidad máxima [μm/s] Estimación lineal ($r^2 > 0.98$)
1	147	853	1541	1.46	244.76
2	266	490	486	1.56	139.76
3	737	680	518	1.53	81.55

Tabla V.5 Velocidad máxima del émbolo para tres configuraciones del pistón.

V. 3.1 Cálculo de la eficiencia del pistón.

Para cerrar el análisis de resultados, se proporcionan a continuación algunas fórmulas útiles para obtener la eficiencia de cada uno de los pistones analizados. Tomando los resultados de la Tabla V.5 es posible estimar la eficiencia alcanzada en cada caso (ver Tabla V.6).

Partiendo de la ecuación número 4 (capítulo III, sección 1.2) podemos expresar la presión de un gas como:

$$P_o = \rho_{aire} \frac{R T_i}{M}$$

donde la densidad del aire $\rho_{aire} \left(\frac{g}{m^3}\right)$ queda en función de la masa (m) y el volumen (V), dejando en el denominador el término de la masa molar (M) proveniente del número de moles ($n = m/M$).

Tenemos que:

$$P_o = \left(1174.15 \frac{g}{m^3}\right) \frac{(8.314 J/mol K)(300.65 K)}{28.97 g/mol} = 101308.6004 Pa$$

Luego, para el cálculo de la eficiencia, es posible definir la potencia efectiva realizado como:

$$\mathcal{W}_{efectiva} = P_o A V_{max}$$

Cerciorándose de su validez a través del análisis dimensional:

$$\mathcal{W}_{obtenida} = [Pa][m^2] \left[\frac{m}{s}\right] = \left[\frac{N}{m^2}\right][m^2] \left[\frac{m}{s}\right] = \frac{N m}{s} = \frac{J}{s} = W$$

Sabemos que el concepto de eficiencia está dado por [2]:

$$\eta = \frac{\mathcal{W}_{obtenida}}{\mathcal{W}_{suministrada}} = \frac{P_o A V_{max}}{\mathcal{W}_{suministrada}} = \frac{P_o A V_{max}}{184.33 \times 10^{-3} W}$$
$$\eta = \frac{P_o A V_{max}}{\mathcal{W}_{suministrada}} \text{ [adimensional]}$$

Los resultados obtenidos para el cálculo de las eficiencias se incluyen en la Tabla V.6.

Cálculo	Eficiencia (η)	Porcentaje de eficiencia ($\% \eta$)
pistón 1	0.000041916	0.0041916
pistón 2	0.000023938	0.0023938
pistón 3	0.000013968	0.0013968

Tabla V.6 Eficiencias para los tres pistones analizados.

De acuerdo con éstos resultados, la eficiencia (η) es proporcional a la distancia y al tiempo necesario para lograr un máximo desplazamiento. La realidad de las cifras obtenidas es que estas son pequeñas, pero suficientes para el prototipo creado, ya que no hay que omitir el hecho de estar trabajando en el micromundo, es decir, la eficiencia de este tipo de dispositivo no se puede comparar con la eficiencia de una máquina térmica ordinaria como un motor, ya que la carga (elemento que demanda la potencia del sistema mecánico para realizar un trabajo) en cada uno de los caso es de naturaleza distinta, con lo cual, los requerimientos de potencia para realizar un trabajo son dimensionalmente iguales en unidades de medición pero de magnitudes mucho muy diferentes.

V. 4 Fabricación rápida de canales microfluídicos de prueba.

La funcionalidad del pistón opto-neumático únicamente sería reconocida mediante pruebas de empuje reales, ya que las pruebas realizadas durante la caracterización solamente confirmaban un buen comportamiento dinámico para desplazar un émbolo líquido por expansión térmica. Ahora, para visualizar su capacidad real de mover líquidos se construyeron micro conductos en acrílico para desplazar líquido a través de ellos.

V. 4.1 Pruebas de empuje en ángulo de 45°.

La primera prueba de empuje se realizó con un canal inclinado a 45° con respecto al conducto que funcionaría como salida (ver figura V.7). La geometría de este conducto busca incrementar la resistencia al empuje del pistón (unido por la parte superior del canal con mayor diámetro). Por sí sola, la disposición de los canales representa un caso complicado para mover fluidos, ya que conforme la trayectoria del flujo dentro del canal cambia de un ángulo de 180° (caso con menor resistencia, donde el flujo recorre una trayectoria recta hasta la salida) a un ángulo menor, el flujo choca contra el doblez del canal, restando energía cinética al movimiento. Esto además implica que es necesario incrementar la presión antes de retomar la nueva dirección del canal hacia la salida.

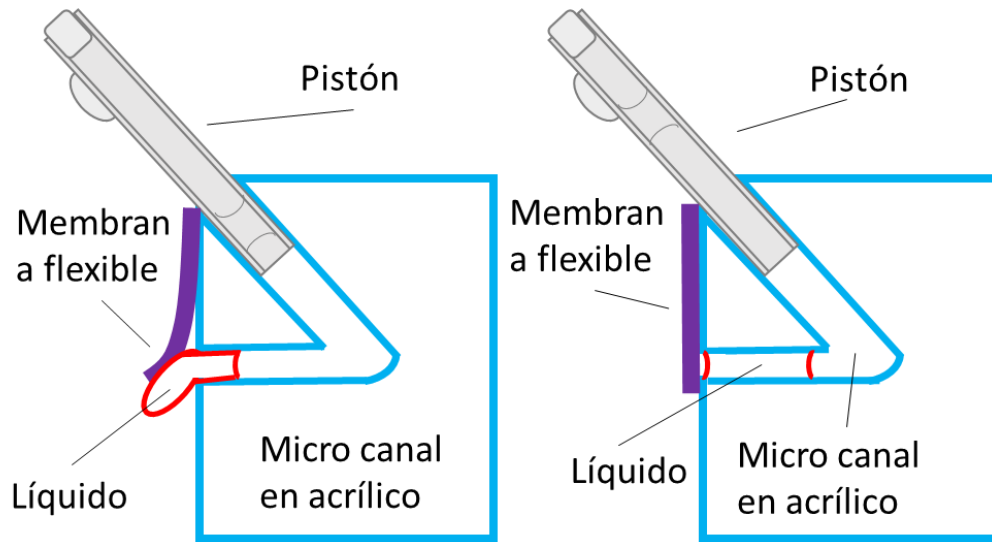


Figura V.7a Micro conducto en acrílico con un ángulo agudo para aumentar la resistencia al empuje a la salida del líquido.

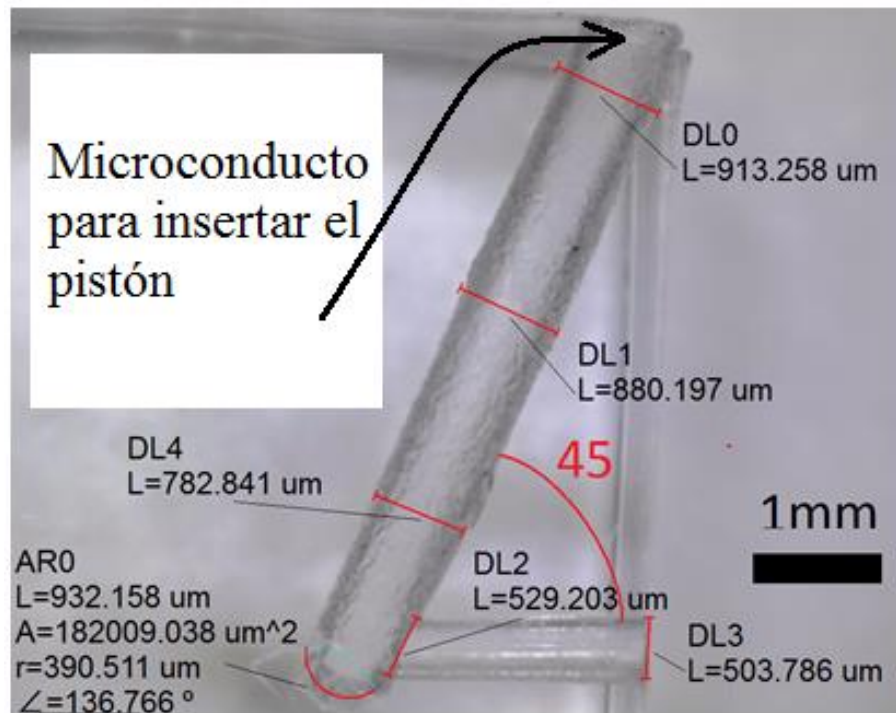


Figura V.7b Fotografía del micro conducto en acrílico con un ángulo agudo mostrando las dimensiones más importantes del canal.

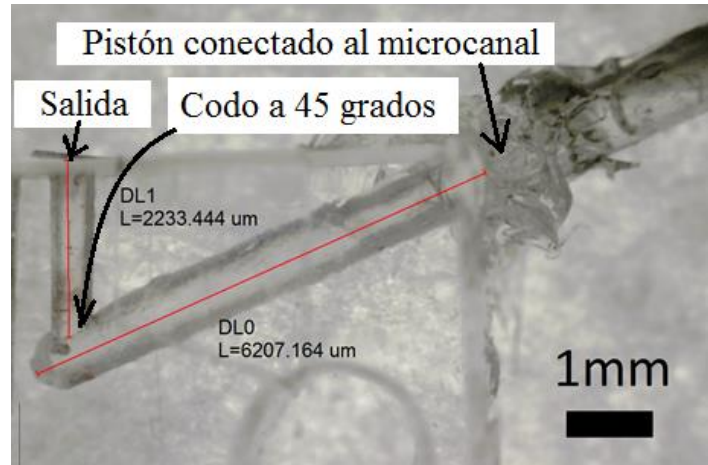


Figura V.7c Micro conducto en acrílico a 45°. Se coloca el pistón a la entrada del canal.

Ésta geometría representa la prueba de máximo esfuerzo diseñada para el pistón, ya que además se incluye a la salida una membrana de PDMS que bloquea el orificio de salida (ver Figura V.8). Con esto es posible verificar que el pistón posee la suficiente fuerza mecánica de empuje para vencer el ángulo del conducto, además de poder deflectar a la salida la membrana para expulsar el líquido fuera del conducto. Una serie de imágenes a distintos tiempos muestran el funcionamiento del sistema descrito (Figura V.9).

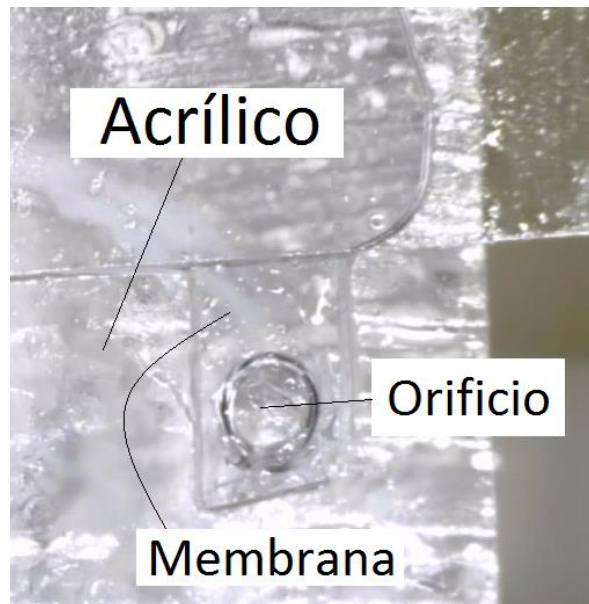


Figura V.8 Membrana de PDMS a la salida del micro conducto.

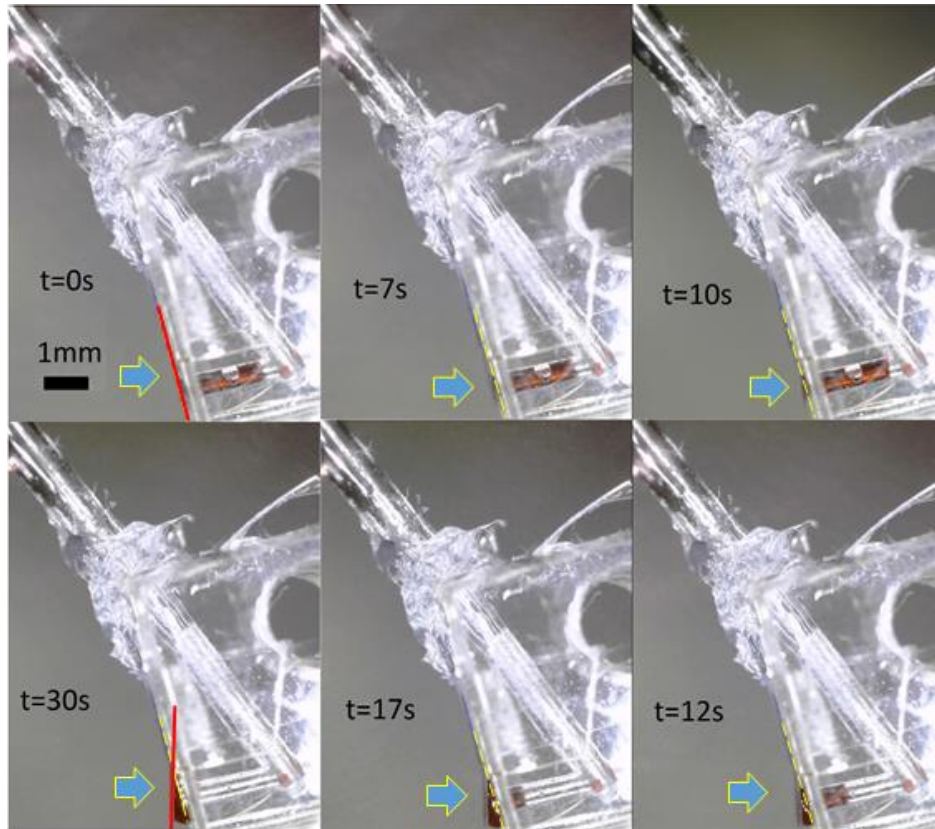


Figura V.9 Secuencia de fotografías que muestra el funcionamiento del pistón para una prueba de máximo empuje para el dispositivo. El líquido desalojado es agua destilada con tintura vegetal roja. El pistón logra expulsar el líquido ($t=30s$), curvando la membrana flexible colocada a la salida para bloquear el conducto.

El experimento logra exitosamente demostrar la capacidad del pistón de mover líquido a través de micro conductos, además de tener la fuerza suficiente para abrir la compuerta de salida. Claramente, el uso de un ángulo de 45° resulta poco práctico de implementar en un arreglo de micro canales, ya que para aplicaciones reales debe de facilitarse el movimiento con estructuras que tengan ángulos rectos como caso crítico. En este sentido, la prueba realizada puede entonces considerarse como una prueba extrema.

V.4.2 Sistema microdiodo-cubeta.

La capacidad del pistón para funcionar como un actuador opto-neumático para microfluídica se probó también en un diseño de micro conductos en acrílico más elaborado. En particular, se utilizó una red de micro canales que incluyó una entrada para la unión con el pistón, una salida para desalojar el líquido de interés, y una vía de alimentación para suministrar líquido al sistema.

Para favorecer el movimiento del líquido a través de los micro conductos se utilizaron dos micro diodos (ver capítulo II, sección 3.2). El primero de ellos se ubicó a la entrada del pistón, y uno más que conecta el canal del reservorio líquido con la intersección del canal actuador y el canal de salida (Figura V.10). Una imagen del dispositivo fabricado se muestra en la Figura V.11.

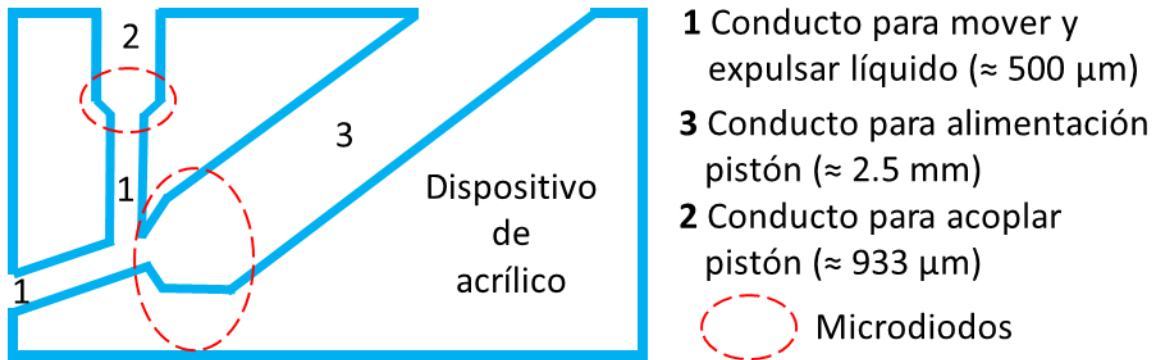
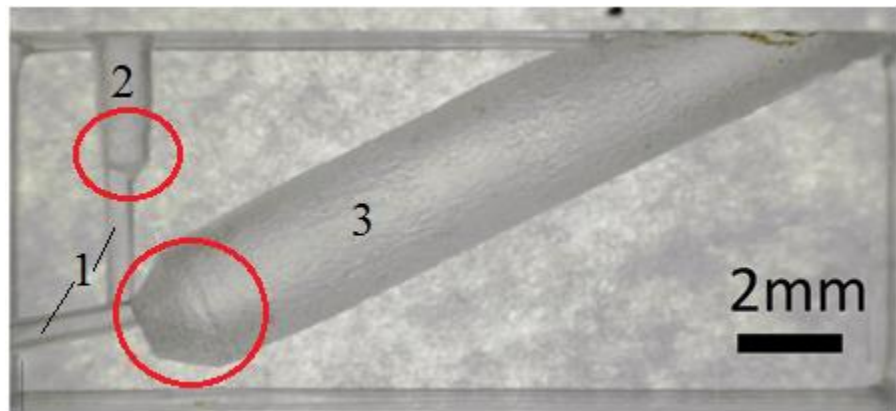


Figura V.10 Esquema que muestra la geometría de los micro conductos dentro del acrílico.

Gráfico V.11 Fotografía de la estructura en acrílico con canales inmersos. Comparación con la figura V.10.



La estructura acrílica necesita conectarse a un reservorio para mantener llenos los conductos, pero aún más importante, necesita contar con el peso de una columna de líquido que impida el flujo hacia el propio canal del reservorio, es decir, que el flujo únicamente vaya hacia el conducto de salida. Se utilizó una cubeta desechable para experimentos de espectroscopia, de sección cuadrada, a la cual se le recortó un área para alojar en su interior la estructura acrílica que contiene los micro canales.

Así, el funcionamiento del dispositivo es el siguiente (ver Figura V.12). El Pistón transmite movimiento por incremento de presión en el aire existente entre el extremo del capilar abierto y el conducto número 2 (ver figura V.10); luego, el líquido contenido en el micro canal número 1 comienza a desplazarse hacia abajo, llegando a la intersección de los tres conductos, donde el aire desplazado se concentra un momento (incremento de presión), para después comenzar a mover el líquido nuevamente y hacia la salida sobre el mismo canal número 1. La barrera impuesta por el canal número 3 funciona siempre y cuando la columna de agua se mantenga por arriba de su altura crítica. En la etapa de desactivación del pistón actuador, el

flujo unidireccional del depósito de líquido realimenta al micro conducto 1, retomando las características iniciales del dispositivo y preparándolo para una nueva etapa de activación.

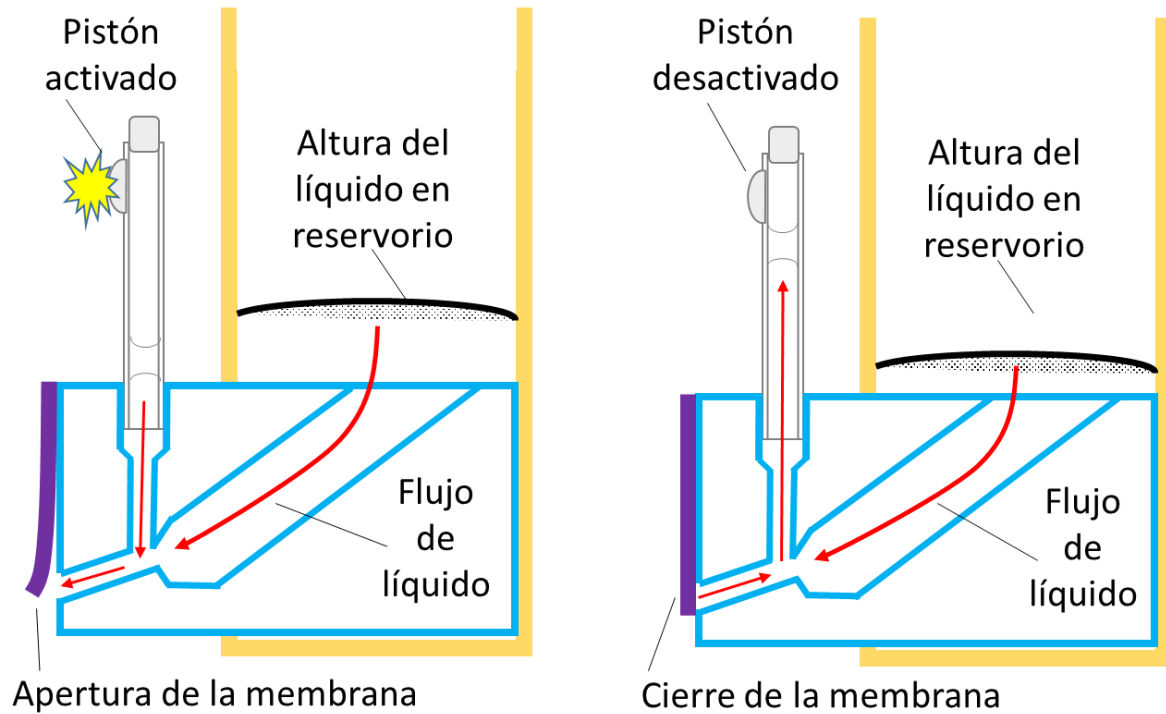


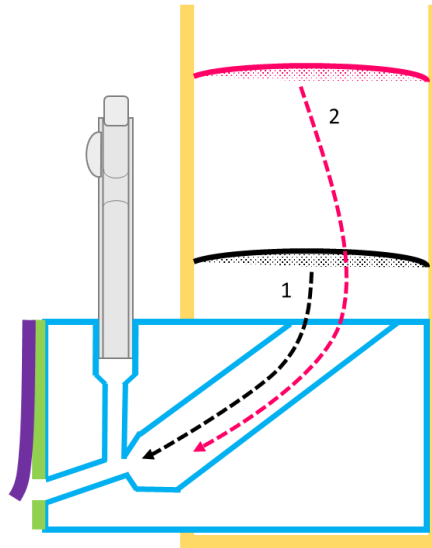
Figura V.12 Esquemas (vista lateral a manera de sección) que muestran el efecto del pistón sobre el sistema microfluídico. (Izquierda) durante la activación la geometría de canales favorece el movimiento hacia la salida, curvando la membrana que bloquea el exterior. (Derecha) la desactivación provoca el reabastecimiento de líquido en los micro conductos, devolviendo al sistema sus características de operación originales.



Figura V.13 Fotografía que muestra la estructura central del dispositivo opto-neumático microfluídico. En el lado izquierdo se puede apreciar la interconexión de los tres micro canales (triángulo punteado); dos de ellos con reducciones (microdiodos) para incrementar la presión y enfatizar el flujo del líquido en una única dirección. No es posible distinguir la membrana flexible de PDMS (rectángulo punteado), sumamente delgada, colocada en la cara frontal del cuerpo rectangular de acrílico a la salida. Del lado derecho (dentro de la cubeta) el canal de mayor diámetro se comunica con el depósito abierto al ambiente.

Se observó al experimentar sobre ésta estructura, que el dispositivo podía funcionar en dos maneras (Ver figura V.14). De acuerdo con el peso de la columna de líquido almacenada en el reservorio, el sistema era capaz de expulsar el líquido mediante el accionamiento del pistón, conduciendo el fluido hacia el canal de salida, y curvando la membrana para finalmente salir; la otra posibilidad de funcionamiento resultó ser más interesante, ya que el sistema funcionaba como una válvula neumática. Estos modos de funcionamiento se explican en las siguientes secciones.

Figura V.14 Esquema que indica las alturas necesarias para operar en modalidad de bomba opto-neumática, o como válvula opto-neumática.



- 1** Altura de la columna de agua para trabajar como bomba (≈ 14 mm)
- 2** Altura de la columna de agua para trabajar como válvula (≈ 38 mm)

V.4.2.1 Modalidad de bombeo.

El sistema funciona muy parecido al primer caso de desplazamiento sobre un micro canal a 45° hacia la salida. Durante la fase de activación, el pistón actúa para inyectar presión al sistema, transportar líquido dentro de las microvías, para luego deflectar la compuerta elástica, y finalmente salir al exterior (ver Figura V.15).

Desafortunadamente, la tensión superficial representó un problema difícil de resolver en este sistema, ya que la máscara de vidrio descrita en el capítulo anterior no pareció tener un efecto significativo para ayudar a desprender por sí mismo el líquido una vez que es expulsado fuera del micro canal (durante las pruebas de funcionamiento, la gota era removida manualmente). La existencia de este tipo de problemas y otros como la adherencia de la membrana a la superficie tienen su razón en la enorme fuerza que representa la tensión superficial cuando se trabaja a pequeña escala.

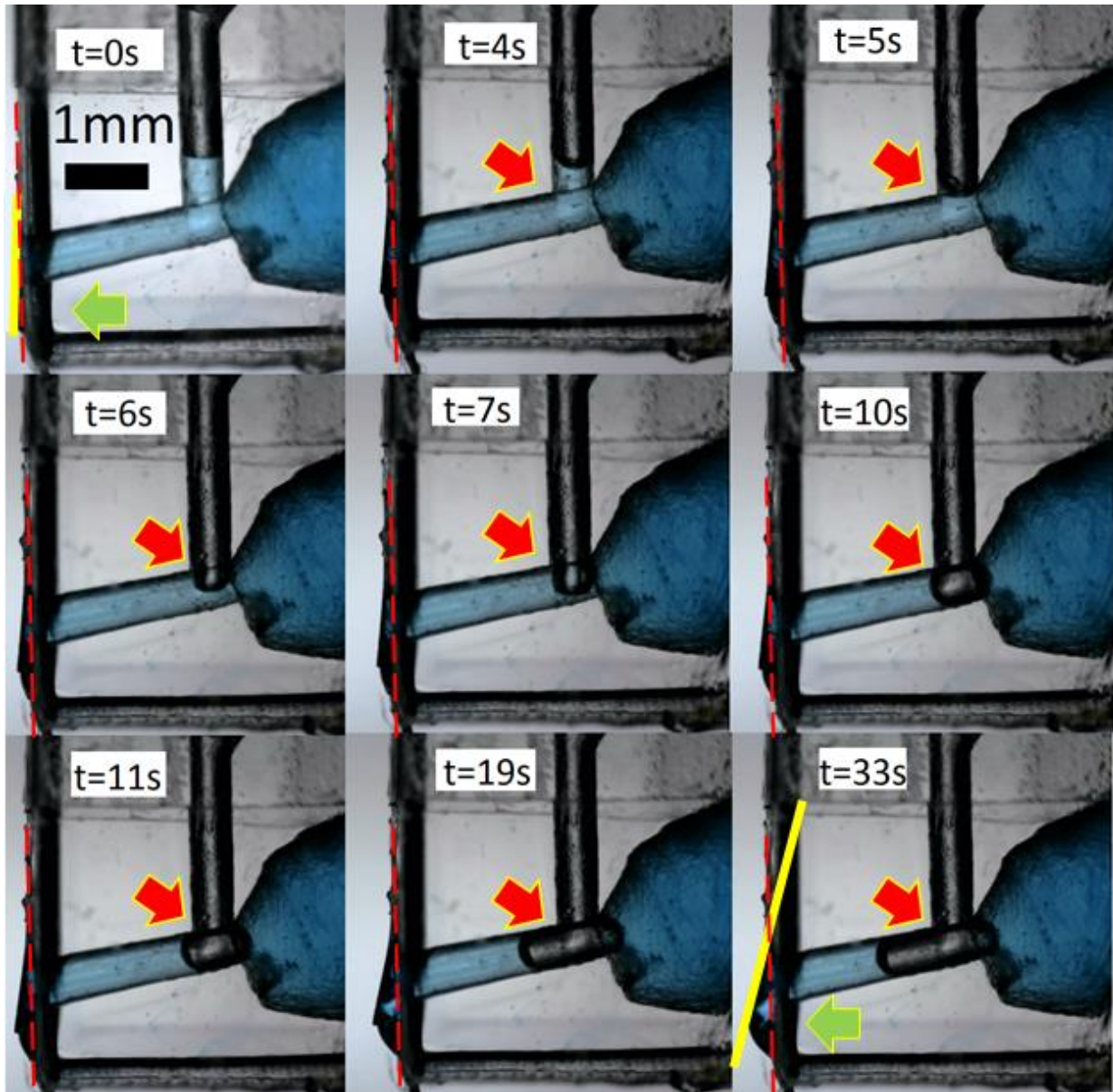


Figura V.15 Secuencia de fotografías que muestra la operación de bombeo a través de los micro conductos para distintos tiempos (t). Para este sistema no fue posible vencer la resistencia de la tensión superficial y el líquido se acumula a la salida del dispositivo ($t=33$ s). Una vez que comienza a acumularse el líquido en la salida, el pistón reduce su capacidad de bombeo (recuadros en cada imagen). En este caso, las fuerzas de adhesión son dominantes.

Aunque el dispositivo no pudo arrojar completamente el líquido para operar como una especie de dosificador, los resultados de ésta primera aplicación son bastante prometedores pues muestran que es posible desplazar líquido dentro de los canales. El problema de la tensión superficial en la capa externa queda por ser resuelto en un futuro, aunque hay que considerar que generalmente este pequeño sistema

de bombeo se podría conectar con alguna otra red microfluídica, de tal manera que no habría interacción con el medio ambiente.

V.4.2.2 Modalidad de válvula

Debido al gran potencial de pistón como actuador opto-neumático, el sistema posee la capacidad de contener el flujo inducido por el peso de la columna de líquido almacenado en el reservorio. Nótese que de manera espontánea, el peso de la columna del reservorio obliga al líquido a salir de la red de micro conductos como un goteo continuo, hasta alcanzar una altura de equilibrio donde el flujo cesa por completo. El modo de funcionamiento como válvula inicia con el llenando del volumen del contenedor, enseguida, el pistón puede ser accionado cuando existe ya un flujo continuo de líquido hacia la salida, bloqueando con aire la intersección de las 3 vías e impidiendo que siga derramándose líquido (ver Figura V.16). También, puede ser accionado desde un estado de equilibrio, es decir, donde no existe flujo debido al peso de la columna de líquido, y únicamente se tiene el suficiente líquido para mantener llenos los micro conductos, entonces, se activa la válvula de aire e inmediatamente se procede a llenar el depósito con una presión ejercida por jeringa, que permita expulsar un chorro continuo fuerte (ver Figura V.17).

Los resultados de esta segunda aplicación son importantes porque el pistón no sólo puede generar movimiento en micro vías, sino que también puede retener un flujo de líquido funcionando como una válvula unidireccional neumática de alta resistencia.



Figura V.16 Secuencia de fotografías que muestra la operación de la válvula de manera activa, cuando un flujo hacia la salida está presente (ver caída de las gotas adheridas en la base). A partir de $t=39$ s, el flujo es parado por la acción de la válvula opto-neumática.

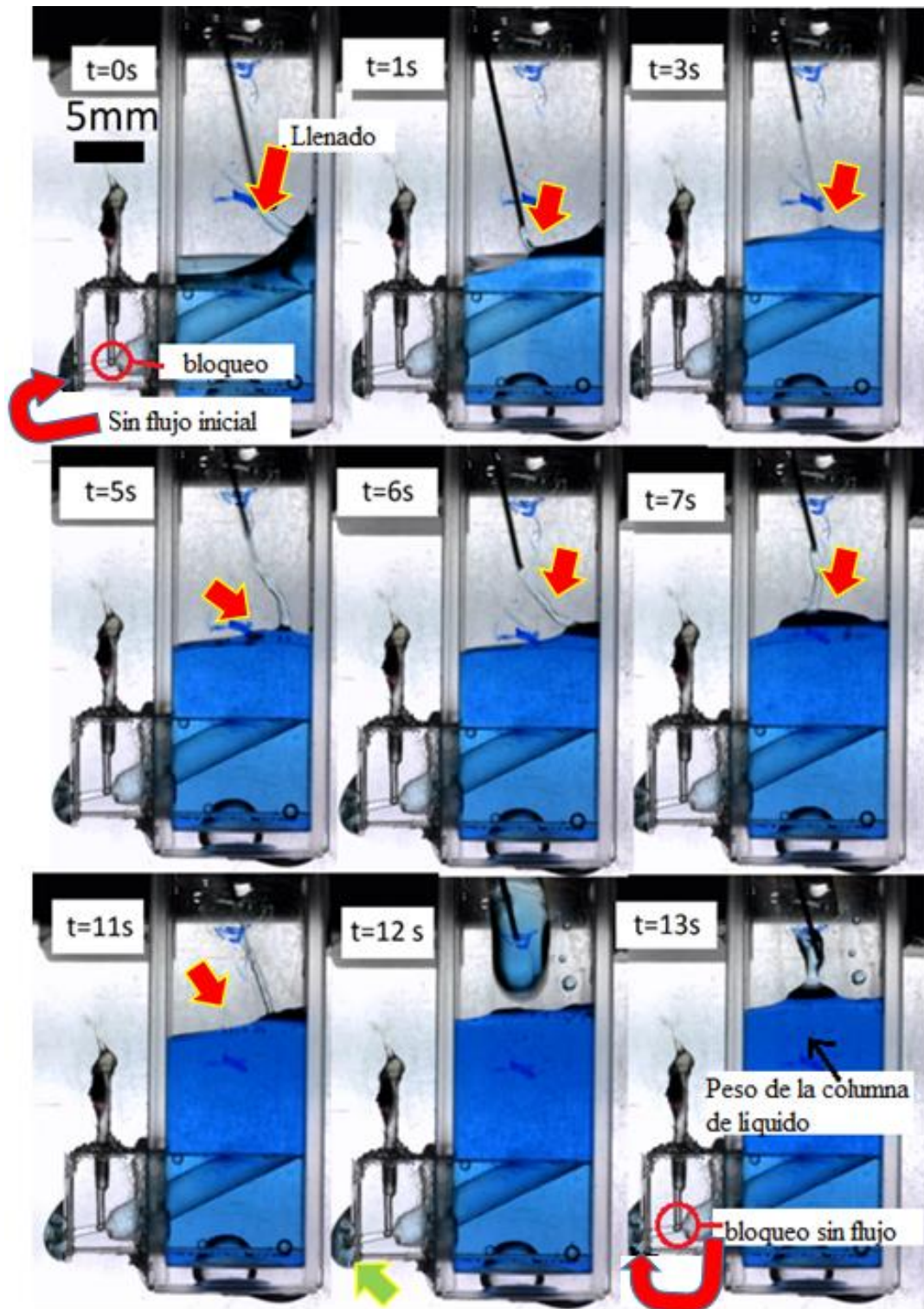
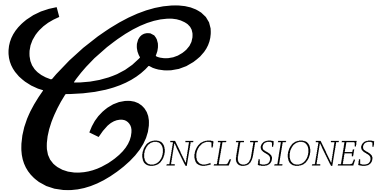


Figura V.17 Secuencia de fotografías que muestra la operación de la válvula opto-neumática, partiendo de un estado de reposo (sin salida de líquido del sistema), y activando la válvula para luego incrementar rápidamente el volumen del reservorio y probar la resistencia de la válvula debido al empuje del chorro en el llenado por jeringa, y sumando también el peso que va adquiriendo la columna de líquido.

Referencias

- [1] J. Rodrigo Vélez-Cordero, J. Hernández-Cordero, “Heat conduction in PDMS-carbon nanoparticle membranes irradiated with optical fibers,” enviado a International Journal of Thermal Sciences (2014).
- [2] J. Rodrigo Vélez-Cordero, M. Giovanni Pérez-Zúñiga, J. Hernández-Cordero, “An optopneumatic piston for microfluidics” en revisión.



Este trabajo representa un logro experimental, fruto de un año laborioso, que apostó por hallar un camino diferente a lo ya conocido dentro de las propuestas para microactuadores enfocados al área de la microfluídica. Puede asegurarse que la obtención de este tipo de microdispositivo termina con un período de estudio, pero claramente da paso a dar continuidad con una investigación enfocada al uso del pistón y sus aplicaciones, perfeccionamiento a su vez el proceso de manufactura del mismo, para poder incluso proponer una técnica de fabricación sistematizada.

La obtención de todo prototipo experimental requiere de un proceso bien estructurado, para garantizar que el producto final (como el mejor caso obtenido) sea lo bastante confiable y útil de acuerdo con su diseño, eficiencia y facilidad de duplicación, acorde con su propósito. En este trabajo la propuesta principal consistió en diseñar y caracterizar un dispositivo microfluídico excitado vía láser, cuyas propiedades físicas además, le confieren un papel dinámico como el elemento que desencadena movimiento. Es por tanto, una muy buena representación de un microactuador óptico-neumático.

El pistón, fue desarrollado y probado para determinar su capacidad como un elemento útil para sistemas encaminados a inducir movimiento en líquidos a través de micro conductos. Es necesario mencionar, que la mayoría de dispositivos microfluídicos actuales se ven asistidos por sistemas de bombeo de gran tamaño, generalmente de tipo electromecánico y/o neumático también; además, casi siempre poseen modos de operación automáticos o programados. Los prototipos de microbombeo y control de flujo que actualmente se estudian no buscan reemplazar completamente a los sistemas convencionales macro (estando estos últimos, aún por arriba de los microsistemas para desplazamiento controlado de líquido, debido a su grado de confianza adquirido a través de los años). De esta manera, el principal objetivo de los prototipos micrométricos, como es el caso del pistón opto-neumático, es ofrecer la posibilidad de recrear parcialmente procesos convencionales como el bombeo asistido por una máquina, pero en dimensiones reducidas, integrando funciones dentro de un mismo sistema, y aprovechando a la par las propiedades que se presentan únicamente a microescala.

Dentro de la microfluídica, el tamaño compacto de los sistemas los hace portables y casi independientes de herramientas externas e instalaciones específicas. En particular, para el pistón de este proyecto la portabilidad es una característica aproximada (en cuanto a tamaño del dispositivo, no existe duda de su portabilidad), pero ya que el pistón por sí sólo es el elemento más representativo del sistema actuador

también necesita de un arreglo óptico (instrumentos y accesorios) para accionarse. Por ahora, queda entonces destinado únicamente al ambiente experimental, donde puede seguir siendo utilizado adecuadamente.

En el presente trabajo se mostró el diseño, la fabricación a grandes rasgos y las pruebas de desempeño del pequeño actuador óptico, neumático y microfluídico. Como logros principales, se pueden mencionar la estructuración de un procedimiento y su respectivo método de fabricación para el pistón, así como el establecimiento de una metodología conveniente para la determinación de los parámetros de funcionamiento óptimo. Lo anterior puede servir de guía para trabajos futuros relacionados con procesos de manufactura mucho más controlados y precisos. Cabe mencionar que, para realizar un prototipo más reproducible se requiere de pruebas más exhaustivas, aunque es evidente que los resultados experimentales aquí reportados reafirman el potencial de este tipo de actuador para ser considerado una opción viable dentro de la microfluídica experimental.

Finalmente, la principal consecuencia de haber logrado un sistema experimental con buena respuesta, de manera general, es tratar de llevar a cabo pruebas futuras más cercanas a la microfluídica real. En perspectiva, se puede plantear la fabricación de una estructura que permita unir el pistón (visto como unidad independiente del sistema microfluídico donde actuará) por medio de una reducción, que consiga acoplar manualmente un verdadero chip microfluídico comercial para comenzar a medir los efectos del pistón de forma más interesante (ver Figura A).

Resulta entonces de importancia mencionar que este dispositivo actuador permite realizar toda clase de ajustes, en función de las necesidades del usuario, para adaptarse rápidamente a cualquier aplicación microfluídica que demande de un sistema o fuente de excitación para obtener movimiento periódico de líquido dentro de microcanales.

Es posible imaginar múltiples situaciones que envuelven el uso del pistón unido a dispositivos microfluídicos conocidos, y probar así la calidad de la interacción entre actuador y el sistema de micro canales (ver Figura B). De esta forma, el prototipo opto-neumático del pistón puede ser ciertamente adecuado de diversas formas y adaptado a diversas geometrías, aun en su estado experimental actual, por ejemplo, pudiendo iniciar con las pruebas sugeridas en las dos imágenes indicadas como punto de continuidad para este trabajo.

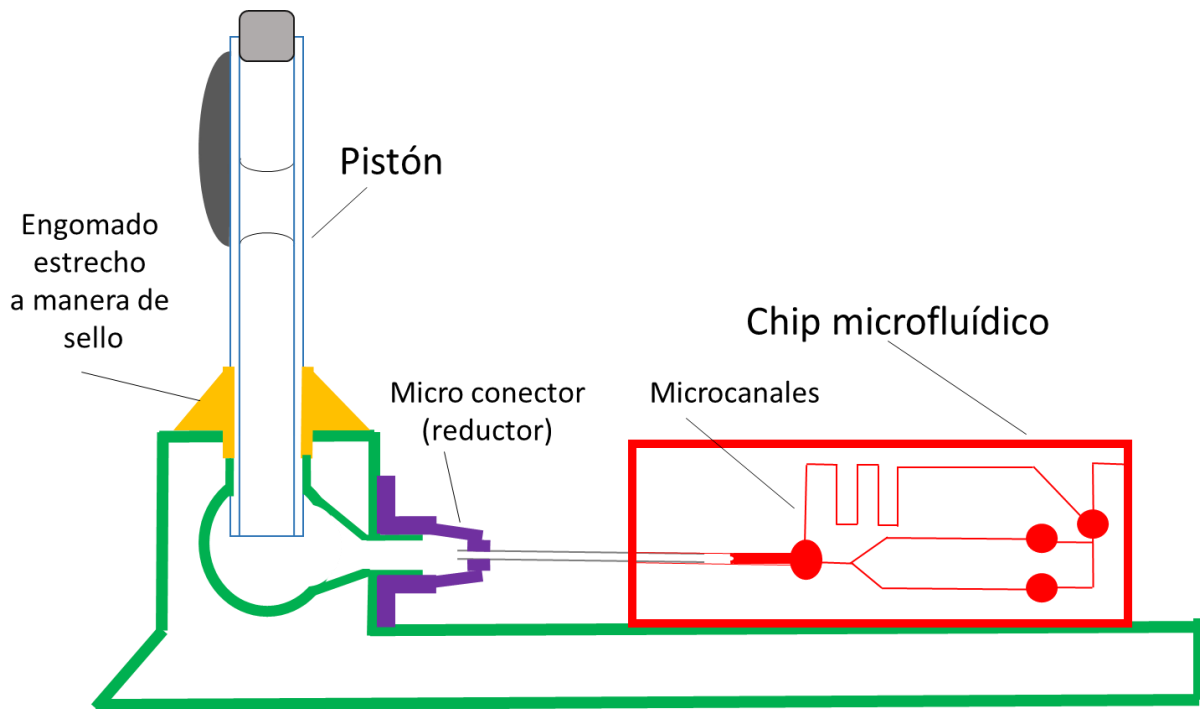


Figura A. Propuesta de diseño futuro para una base universal en la que el pistón se coloca verticalmente dentro de una estructura práctica, que integra un sello de goma ajustado con el cuerpo del capilar para facilitar su reposición. La estructura dispondría de un juego de micro conectores reductores intercambiables, que pudieran acoplarse al chip microfluídico fácilmente. Se sugiere, al interior de la estructura que conecta con el pistón, una esfera que contenga el volumen de aire a la salida del pistón, además de incluir un microdiodo para potenciar el bombeo a la salida de la estructura y hacia el chip microfluídico.

Observando que el micro pistón presenta características de operación que lo hacen amigable durante su uso, se puede garantizar que la actividad experimental se llevara a cabo sin ningún tipo de contratiempo, ni riesgo alguno. Únicamente es necesario no prolongar su implementación del mismo a potencias mayores a las aquí especificadas, y asegurarse que el láser que incide sobre el material se encuentre perfectamente alineado con el cúmulo de PDMS, destinado a recibir el haz.

Notoriamente, la información contenida en este escrito reúne los detalles esenciales para poder abordar el diseño y fabricación de sistemas similares, o incluso aquellos destinados únicamente a ocupar ciertas secciones como podría ser la parte óptica, la parte de recubrimientos poliméricos de PDMS, la parte de membranas elásticas de PDMS, la parte de fabricación de micro canales, o incluso la parte de propuestas aquí mencionadas.

Materializar proyectos permite generar nuevas propuestas similares a lo aquí realizado, y que están respaldadas por actividad de investigación y actividad experimental. Las propuestas innovadoras hacen del mundo un lugar más agradable donde vivir.

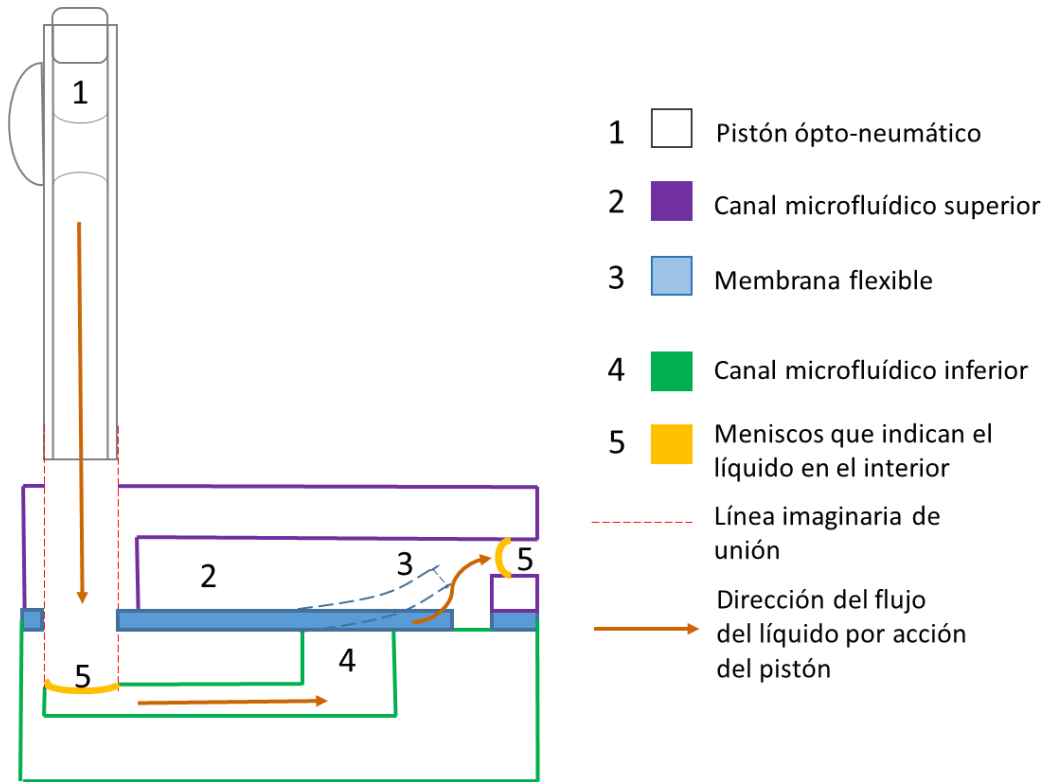


Figura B. Propuesta de diseño futuro para poner a prueba un sistema conformado por una válvula pasiva flexible. Debe emplearse un método de fabricación por litografía para reproducir dispositivo microfluídico (mucho más pequeño en comparación con el pistón) por apilamiento de capas para construir la estructura que aloja la membrana o compuerta flexible, así como micro canales con líquido en su interior.

APÉNDICE A.

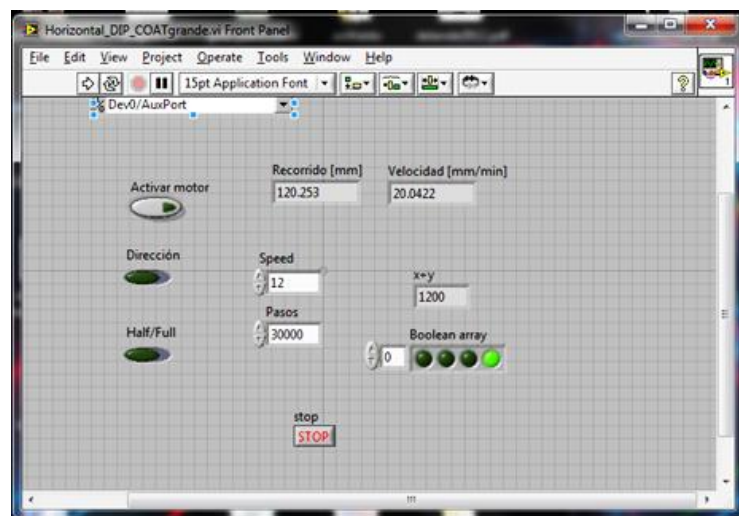
Operación de la interfaz de LabView para recubrir capilares

La operación de la máquina para recubrir capilares hace uso de una interfaz en LabView (ver Figura A.1) que enlaza la computadora con el circuito electrónico de control de la máquina para recubrimientos.

Los pasos para calibrar la interfaz son los siguientes:

- a) Colocar el interruptor “Dirección” a la izquierda, así el desplazamiento de la platina será de la placa ranurada ajustable hacia el motor a pasos en un extremo de la máquina. Claramente el sentido puede invertirse colocando el carro hacia el lado del motor para su avance en sentido contrario.
- b) Colocar el interruptor “Half/Full” a la izquierda para seleccionar el funcionamiento del motor con el desplazamiento entre pasos mayor ($4\ \mu\text{m}$ en cada paso), con lo cual se incrementa la velocidad en el avance de la platina a lo largo de su recorrido .
- c) Ingresar en la ventana “Speed” un valor mayor a 10, para incrementar el torque en el motor, y a su vez incrementar la velocidad de avance. Así el valor de la velocidad a la cual será recubierto el capilar se muestra entonces en la ventana “Velocidad (mm/min)”.
- d) Ingresar en la ventana “Pasos” un estimado del número de pasos a ejecutar por el motor para recorrer completamente la platina sobre el capilar. Recordando que hay un avance de aproximadamente $4\ \mu\text{m}$ por paso. El valor de la distancia a recorrer, en mm, aparecerá entonces en la ventana “Recorrido”. Es posible establecer una mayor distancia a la necesaria y detener la máquina una vez que haya finalizado su recorrido de acuerdo al tamaño del capilar.

Figura A.1 Captura de pantalla de la interfaz en LabView para controlar la máquina para recubrir



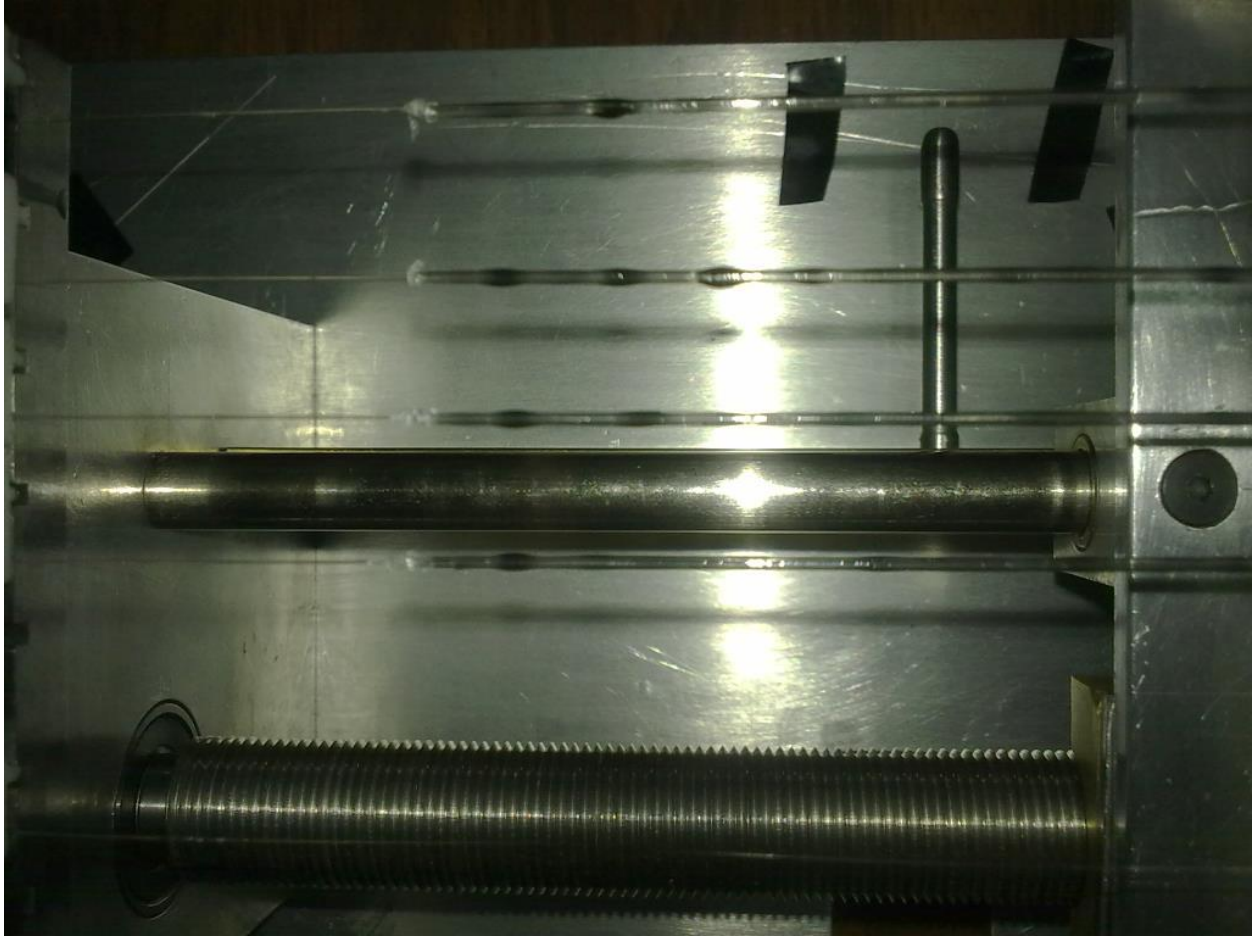


Figura A.2 Fotografía que muestra la disposición de los capilares recubiertos, colocados sobre la máquina para recubrir fibras ópticas.

APÉNDICE B.

Inserción y ajuste del tamaño del émbolo de a aceite mineral dentro del micro pistón.

Parte importante de la metodología empleada durante la fabricación del pistón se relaciona directamente con la inserción de manera manual de pequeñas cantidades de aceite mineral dentro del capilar, para simular un pistón, que pudiera servir como medio de análisis. El porqué del uso del aceite mineral como liquido seleccionado para el émbolo se debe tanto a sus características físicas conocidas (alto punto de ebullición, bajo riesgo para la salud, baja degradación, etc.), como también, y siendo éstas últimas más importantes, por sus características dinámicas que tienen que ver directamente con el ángulo de contacto presente entre la interfaz sólido-líquido-gas , y que demuestra la capacidad que tiene el aceite mineral de entrar en movimiento fácilmente como un líquido que se desliza sobre una base de vidrio.

-Materiales empleados:

- Una llave de 4 vías con tubo y aditamento de cierre Luer-Lock, de la marca Kortex.
- Cánula con rosca Luer-Lock (rosca estándar utilizada en jeringas).
- Conector de goma de una bolsa plástica de solución salina o suero.
- Una jeringa estándar de 3 mL.

-Armado del sistema para el control e inserción del aceite mineral.

La imposibilidad de llenar de forma controlada los capilares de aceite mineral hizo necesario la adaptación de un sistema conformado por una manguera médica, una llave de 4 vías utilizada para la administración de medicamentos, y una punta creada a partir de un conector de goma y la base de conector Luer-Lock sin aguja de la jeringa. A continuación se detalla el procedimiento.

- a) Se retira la aguja del conector Luer-Lock por medio de una pinza, desde la unión entre el plástico y la aguja.
- b) Se recorta la entrada del conector de goma (retirado de la bolsa de solución salina); a continuación se realiza la punción de la membrana del conector de goma con la aguja (lo anterior servirá para meter los capilares dentro del orificio ajustado).
- c) Se introduce a presión dentro del conector de goma la base Luer-Lock del inciso a).

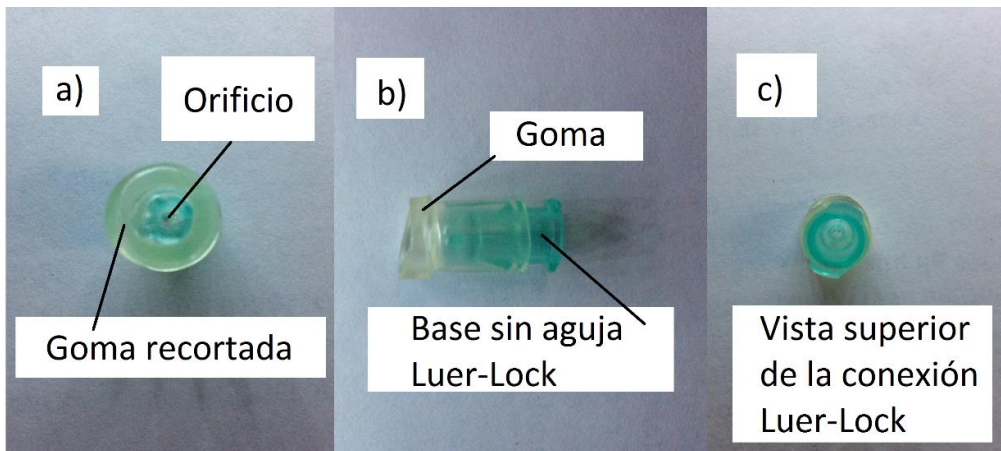
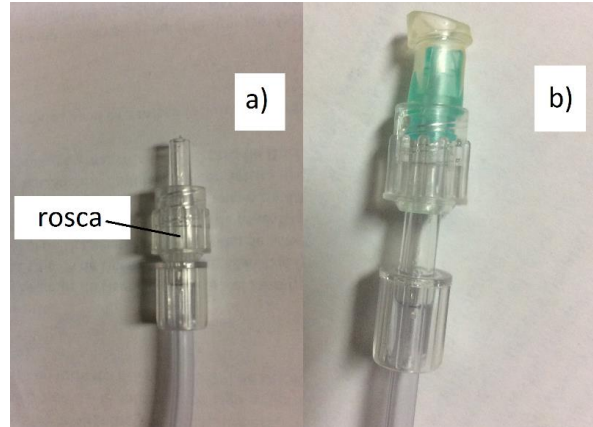


Figura B.1 a) Vista superior de la goma reutilizada de una bolsa de solución salina, se practica una incisión para introducir el extremo del capilar recubierto, para comenzar con el proceso de inserción del aceite mineral. b) Vista lateral que muestra la unión entre la goma transparente y la base sin aguja Luer-Lock color verde. c) Vista inferior de la base Luer-Lock a conectar con la manguera o tubo.

- d) Se conecta la punta adaptada en el inciso a), y se ajusta con la rosca móvil incluida con el kit de 4 llaves.

Figura B.2 Extremo con seguro móvil roscado para sujetar la base Luer-Lock adaptada.



- e) Se conecta la jeringa de 3 mL en alguna de las entradas de la llave. La llave puede modificar el paso de aire de manera gradual.

El sistema permite regular la presión positiva y negativa ejercida por el manejo de la jeringa en función del grado de paso que se le dé mediante la llave, además de sumar la trayectoria a través de la manguera que resta presión al aire que se dirige desde la cámara de la jeringa hasta la punta adaptada del inciso c); lo anterior se traduce en un mayor control para ajustar con bastante precisión la longitud de la gota a medir mediante imagen por microscopio. El capilar revestido con la película fotosensible se inserta en el orificio estrecho de la membrana plástica unida a la punta adecuada Luer-Lock. La estructura de la Figura B.3, facilita el proceso de succionar una mínima cantidad de aceite mineral, así como de desplazar la gota a lo largo del interior del capilar, hasta situarla en la posición deseada, antes de sellar el capilar por el extremo cercano al aceite mineral insertado.

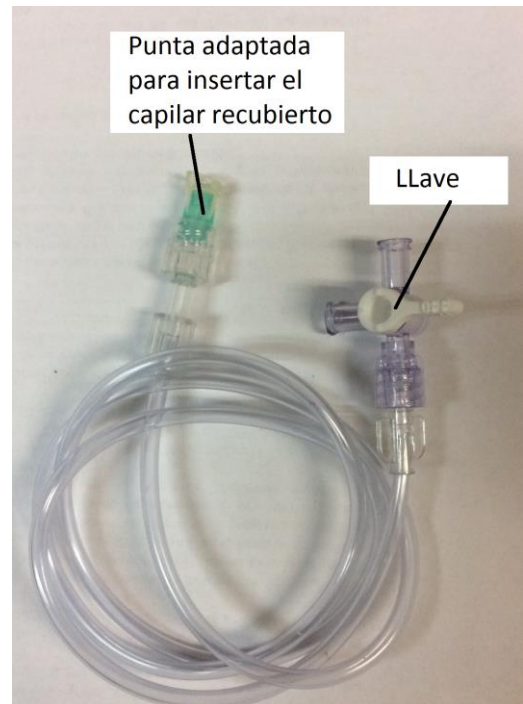


Figura B.3 Sistema empleado para el llenado de capilares.

-Armado del sistema para llenar y vaciar el contenedor de líquido del sistema microfluídico.

Como una herramienta opcional se puede elaborar una manguera para conectar a la misma llave por la vía desocupada. Es necesario perforar los tapones roscados de la válvula ligeramente, para poder pasar a través de ellos, de manera justa, una pequeña manguera con un diámetro de 2 mm. La manguera servirá para conectar por un extremo la cánula Luer-Lock, y por el otro la llave, y formar así una extensión, que

bien puede ser ocupada, para almacenar el líquido de prueba, e ir suministrándolo durante las pruebas experimentales sobre el sistema microfluídico más adelante.

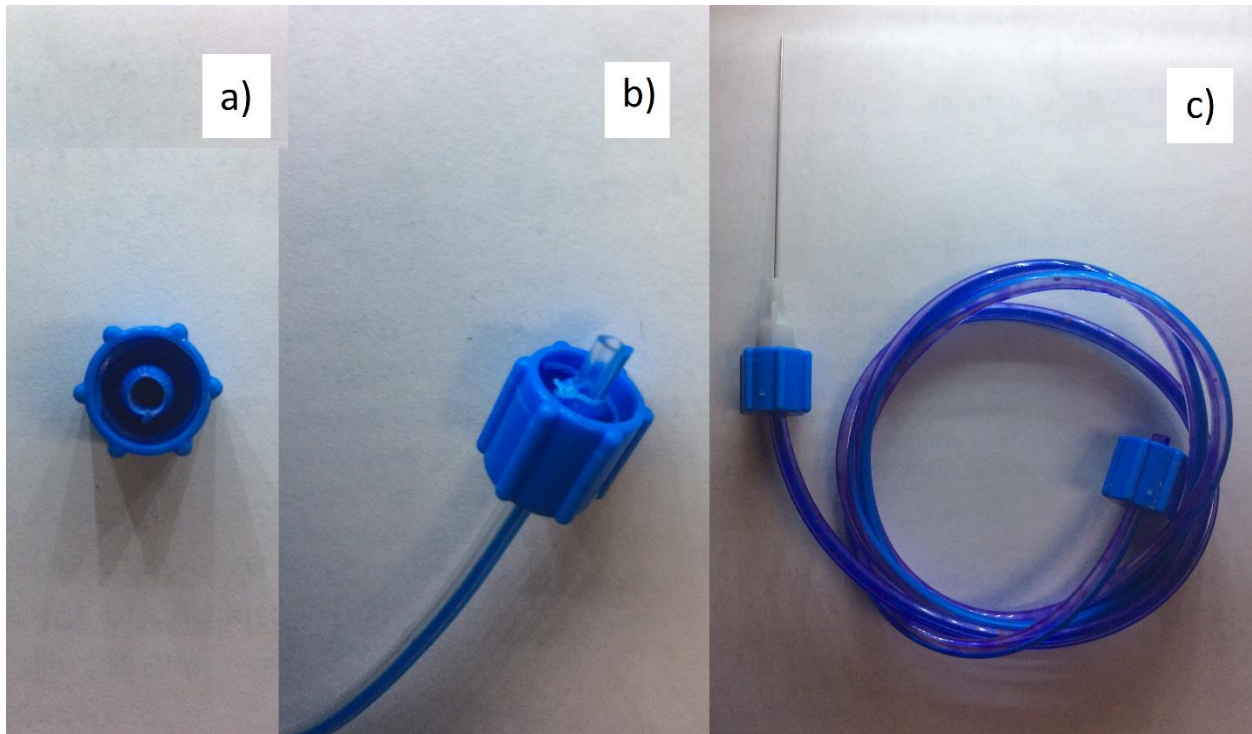


Figura B.4 a) Tapón roscado y perforado por su centro. b) Extremo que muestra la forma en la que la manguera debe sobresalir para ser conectada. c) Manguera completa con cánula en un extremo.

Figura B.5 Cánula con conexión Luer-Lock.

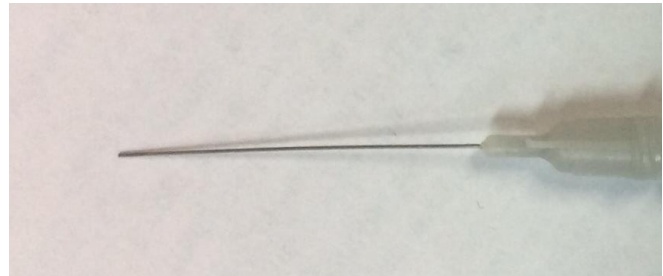


Figura B.6 Líquido teñido por colorante vegetal azul, utilizado como medio de contraste dentro de los microcanales del dispositivo microfluídico de prueba.



APÉNDICE C.

Los siguientes párrafos describen los parámetros más importantes a considerar dentro de la operación del sistema de modulación para un diodo láser (DL) durante la interconexión del mismo. Los instrumentos que intervienen en la modulación son:

1. Generador de funciones HP33120A
2. Acoplador de impedancias VT1
3. Controlador de corriente y temperatura LDC-3724B
4. Montura de diodo láser LDM-4980
5. Diodo láser PL980P330J

Tomando como referencia la guía de usuario del controlador de corriente^[0] como fuente principal de información debido al mayor número de configuraciones proporcionadas para la modulación, incluyendo las medidas de seguridad y protecciones eléctricas internas brindadas por el equipo, se considera además los rangos máximos de funcionamiento del propio equipo, así como de los instrumentos secundarios involucrados mediante manuales y hojas de datos técnicos.

-Generador de señales

Para emplear el generador de señales, en conjunto con el controlador de corriente del DL, se seleccionó una señal periódica tal como una senoide inicialmente, y una onda cuadrada como señal a utilizar finalmente. La diferencia fundamental entre cada una de ellas para la modulación es que la primera atraviesa por una serie de incrementos hasta llegar a su valor pico o valor máximo, en tanto que las señales cuadradas presentan cambios abruptos entre el valor máximo y un valor mínimo que una vez modulada y visualizada en el *display* del controlador de DL (Figura C.a) realmente respeta los parámetros enviados desde el generador de señales (Figura C.b). El valor mínimo para la señal cuadrada, no es completamente cero (0.02 mA), pero se encuentra muy por debajo de la **corriente de umbral** del controlador de corriente y temperatura LDC-3724B utilizado (66.01 mA^[1]).

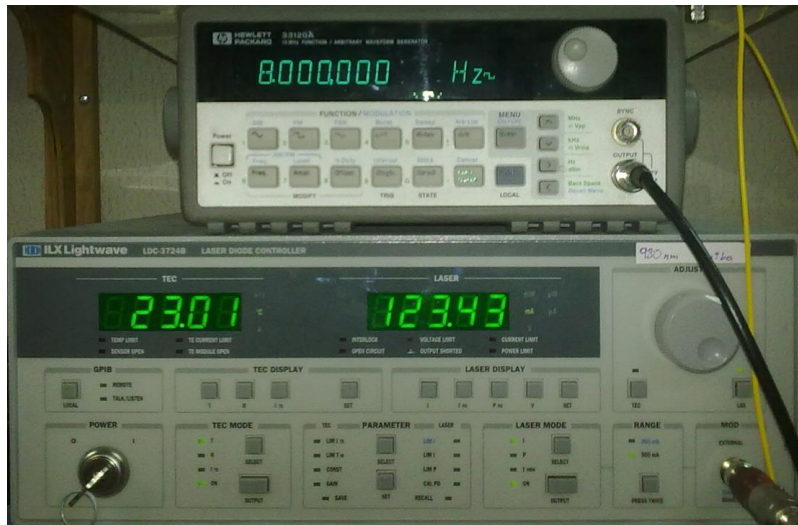


Figura C.a Amplitud máxima de la modulación en el controlador de DL y frecuencia mostrada en el generador de señal como parámetros a enviar durante una prueba.

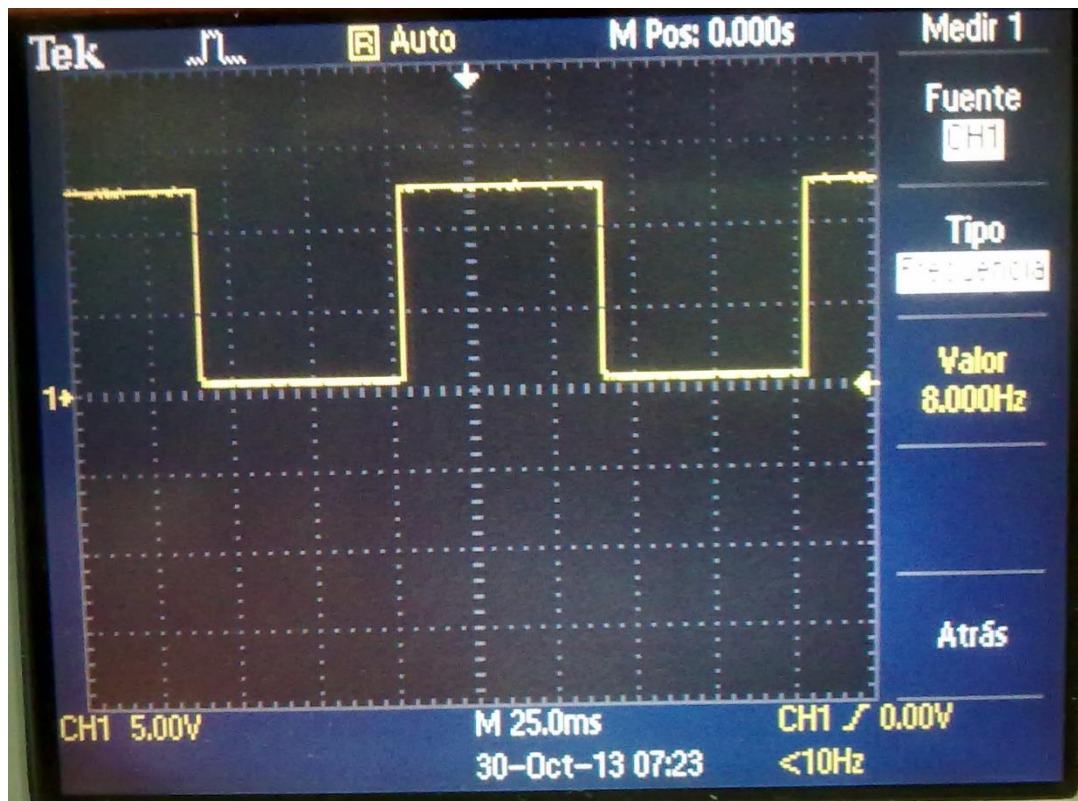


Figura C.b Comprobación de la señal modulada a la salida del DL mediante el acoplamiento de un fotodetector unido al osciloscopio. Los parámetros de frecuencia y amplitud se cumplen.

Para comenzar con la modulación se fija con una señal de **amplitud** $2 V_{pp}$ a una baja frecuencia dentro del rango de **0-10 Hz** (puede ser menor incluso para mejor visualización), manteniendo la señal centrada al origen (sin *offset*) y asegurándose finalmente de que el equipo se encuentre configurado con impedancia de salida de 50Ω . La secuencia a seguir es^[2]:

- a. Encender el equipo
- b. Pulsar la tecla *shift*
- c. Moverse a través del menú con la tecla de navegación \triangleright hasta *SYS MENU*
- d. Presionar la tecla de navegación ∇ hasta *50 OHM*
- e. Presionar la tecla *ENTER* para fijar la impedancia de salida

En el caso de haber seleccionado una onda cuadrada se sugiere mantener el **ciclo de trabajo** de la misma en un **50%**^[2].

Una vez realizado esto el equipo se encuentra calibrado y listo para enviar la señal de modulación. Es necesario aclarar que la amplitud del voltaje de salida condiciona la corriente que es capaz de suministrar el controlador de corriente laser, lo anterior se explica mejor mediante la siguiente tabla:

Amplitud de la señal de voltaje pico a pico del generador de señales V_{pp} [V]	Corriente que es capaz de suministrar el controlador de diodo láser I [mA]
2	180
4	360
5	420

Al dar una mayor amplitud a la señal de salida del generador de señales se logra alcanzar valores altos en corriente y además se mantiene el flanco bajada de la señal cuadrada alrededor de un valor cero.

-Acoplador VT1

El acoplador de impedancias VT1 permite que el generador de señales pueda tener la misma impedancia de salida que la impedancia de entrada en el puerto BNC para la modulación externa del controlador de corriente y temperatura LDC-3724B, la cual es de $10 k\Omega$ ^[1]. Para poder ajustar el dispositivo acoplador es necesario rotar el cuerpo el mismo hasta que la línea indicadora se alinee a la impedancia deseada. La *Figura C.1* muestra el esquema del acoplador de impedancias^[3].

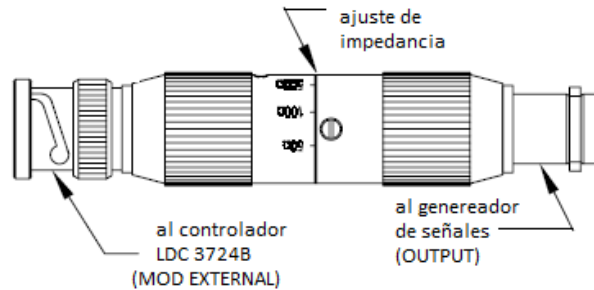


Figura C.1

La utilización de este acoplador de impedancias evita la pérdida en amplitud de la señal además de conservar el valor original de la señal enviada sin *offset* ^[2], desde el generador de señales hasta el controlador de corriente y temperatura.

-Controlador de diodo láser.

El equipo a modular mediante una señal externa es justo el controlador de corriente y temperatura, LDC-3724B. Este módulo puede ser configurado en dos modalidades para poder realizar su control mediante la señal proveniente del generador de funciones. Las configuraciones necesarias en **panel frontal** para una modulación óptima son las siguientes:

A. Equipo en **modalidad de corriente constante**^[1]:

1. En la sección de LASER MODE presionar el botón **SELECT** hasta iluminar el indicador I (Figura C.2).

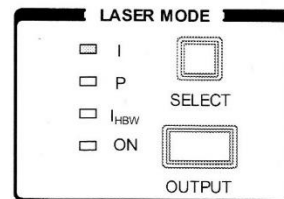


Figura C.2

2. En la sección de RANGE presionar rápidamente dos veces el botón **PRESS TWICE** hasta iluminar el indicador rotulado en negro **500 mA** (Figura C.3). De esta manera se selecciona la fuente de mayor corriente del dispositivo (Tabla1, adelante).

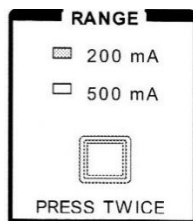


Figura C.3

3. En la sección de LASER DISPLAY presionar el botón **I** para visualizar en el *display* el valor en corriente a utilizar (Figura C.4).

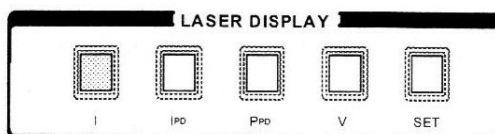


Figura C.4

4. En la sección de ADJUST presionar el botón **LAS** para habilitar la función de incrementar (sentido horario) o disminuir (sentido anti-horario) el valor de la corriente a suministrar mediante la perilla (Figura C.5). Para comenzar a fijar el valor de corriente deseado es necesario ir ajustando dicho valor a partir de un primera corriente predefinida (sugiriendo **80 mA** para no rebasar la *corriente límite de protección*). La magnitud máxima de la señal modulada sólo se podrá apreciar una vez que el equipo se ha puesto en marcha activando para ello el botón **OUTPUT** en la sección LASER MODE. A partir del valor máximo de la señal, visto en el display LASER, se harán los ajustes de corriente disminuyendo o incrementado el valor de corriente (**10 mA** como sugerencia) hasta obtener el valor requerido, asegurándose de haber desactivado la salida del DL con anterioridad. **¡IMPORTANTE!** El DL se debe activar únicamente cuando se hayan completado todas las configuraciones mencionadas en esta guía.

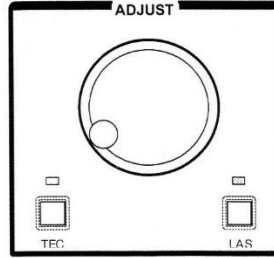


Figura C.5

5. **¡IMPORTANTE!** Es necesario verificar la **corriente límite de protección** del equipo correspondiente al rango utilizado (RANGE, Punto 2-A). En la sección PARAMETER presionar el botón **SELECT** hasta iluminar el segundo rótulo en negro LIM I. A continuación el display LASER deberá indicar la corriente límite establecida en el equipo (Figura C.6). En particular para el DL empleado en este documento, el valor es de **495 mA**. Cuando la corriente límite es alcanzada, el indicador **CURRENT LIMIT** destellará permitiendo conocer de antemano el rango aceptable de corriente.

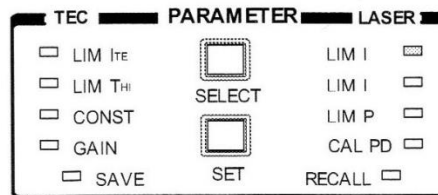


Figura C.6

B. Modulación de la fuente de corriente láser mediante una señal externa^[1]:

El controlador LDC-3724B posee dos modos en los cuales la señal de salida puede ser modulada mediante una fuente externa analógica (Tabla 1), los cuales son: pequeño ancho de banda (*Lo BW*) y gran ancho de banda (*Hi BW*). Ambas modalidades son posibles de configurar desde la sección LASER DISPLAY mediante las opciones I e I_{HBW} , respectivamente. El primer modo es ideal para un análisis con un ancho de banda limitado, en tanto que el segundo permite una respuesta en frecuencia de hasta 1 MHz^[4]. La configuración requerida es la siguiente.

1. El ancho de banda configurado en el equipo es **Lo BW**, y corresponde al modo de corriente I seleccionado previamente. Por otra parte, cuando el equipo deba trabajar

- en **Hi BW** basta con seleccionar el modo de corriente I_{HBW} (LASER MODE, Punto 1-A).
- Como medida de seguridad se configura el equipo para manejar hasta **495 mA** (RANGE, Punto 2-A)
 - Se procede a conectar el acoplador de impedancias **VT1** para interconectar el generador de señales y el controlador de corriente y temperatura.
 - En la sección **MOD** (Figura C.7) se especifica bajo rotulador negro la *función de transferencia utilizada para la modulación de manera automática al conectar el cable*; cambiara a razón de **50 mA por cada volt** suministrado (en el caso de haber seleccionado **RANGE** con fuente de corriente de 500mA), o en caso contrario cambiará a razón de **20 mA por cada volt** suministrado por el generador de funciones (en el caso de haber seleccionado la fuente de corriente de 200 mA). **¡IMPORTANTE!** El resultado de haber seleccionado cualquiera de los casos mencionados se traduce en una suma de corrientes, que involucra la suministrada mediante el controlador de corriente (**ADJUST**, Punto 4-A) y la corriente externa. A modo de ejemplo, con la función de transferencia de mayor valor de **50 mA** sí se suma con la corriente de **80 mA** predefinidos en la sección de **ADJUST**, el resultado será una señal modulada de amplitud pico igual a **180 mA**^[4].

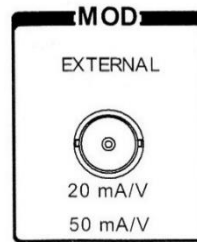


Figura C.7

Tabla 1. ^[5] Especificaciones generales del DL

Driver Output Current						
Output Current Range (mA)	0-50	0-100	0-200	0-500	0-2000	0-4000

External Analog Modulation						
Input Range (1k Ohm)	0-10 V					
Transfer Function (mA/V)	5	10	20	50	200	400
Bandwidth (3dB)						
External Modulation Bandwidth Hi BW	DC to 1 MHz			DC to 250 kHz		
External Modulation Bandwidth Lo BW	DC to 15 kHz			DC to 10 kHz		

Montura de diodo láser ldm-4980.

Una vez que se realizaron los pasos de calibración anteriores, ahora es necesario ver que sucederá con los siguientes dispositivos. Mediante la Tabla 2, se puede ver que la montura del diodo láser no se verá afectada por los parámetros que recibirá desde el controlador LDC-3724B, configurados previamente. Esto permite ocupar parcial o simultáneamente los parámetros de temperatura (23°C), y corriente (**80 mA**) predefinidos para la modulación. Tanto corriente como temperatura y ancho de banda se encuentran dentro de los rangos permitidos.

Tabla 2. ^[6] Especificaciones generales de la montura del DL

Operating Current	
Maximum Laser Diode Current	2.0 A
Laser Package Temperature Control Option ¹	
Temperature Control Range ^{2,3}	-5°C to 85°C
Sensor Type	10k Ω Thermistor
TE Module Ratings	$Q_{\text{max}} = 14 \text{ W}$, $\Delta T_{\text{max}} = 70^{\circ}\text{C}$ $I_{\text{max}} = 6.0 \text{ A}$, $V_{\text{max}} = 4.2 \text{ V}$
Bias-T Option RF Input Specifications ⁴	
Modulation Bandwidth	10MHz to 800MHz

Diodo láser PL980P330J.

El último punto dentro del procedimiento que garantiza una correcta modulación es verificar los parámetros de entrada al propio diodo láser. De acuerdo a la corriente límite de protección establecida en párrafos anteriores para el controlador de corriente y temperatura (PARAMETER, Punto 5-A), que es de **495 mA como máximo valor a suministrar**, podemos ver que esta corriente nunca sobrepasará el valor típico de operación del DL PL980P330J (Tabla 3), por lo que el dispositivo trabajará correctamente.

Tabla 3. ^[7] Especificaciones generales del diodo láser

Characteristics ($T_c = 25^\circ\text{C}$, $P = 330\text{ mW}$)				
	Symbol	Min	Typical	Max
Center Wavelength	λ_c	974 nm	975 nm	976 nm
Operating Current	I_{OP}	-	600 mA	720 mA
Output Power	P_{OUT}	330 mW	-	-
Spectral Bandwidth (FWHM)	$\Delta\lambda$	-	0.5 nm	1.0 nm
Spectral Bandwidth (at 95% Power)	$\Delta\lambda$	-	-	2.0 nm
Threshold Current	I_{TH}	-	75 mA	90 mA
Forward Voltage at I_{OP}	V_F	-	1.7 V	1.9 V

El siguiente esquema muestra el orden y las conexiones a realizar para la modulación analógica:

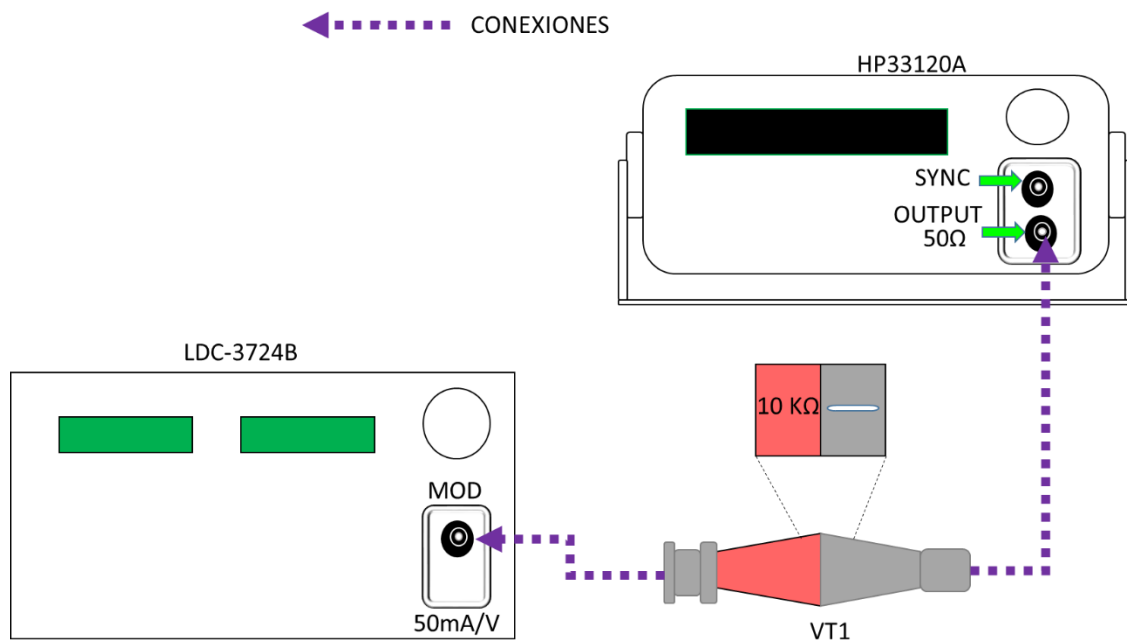


Figura C.8

Puesta en marcha:

Una vez habiendo conectado el arreglo experimental mostrado en la Figura 9, únicamente es necesario:

1. Encender el controlador de corriente y temperatura LDC-3724B.
2. Encender el generador de señales HP33120A.
3. En panel frontal del controlador de diodo láser, en la sección LASER MODE presionar el botón **OUTPUT** para activar la salida.
4. El indicador de ON se encenderá.

5. Una vez terminada la modulación basta con realizar en sentido inverso los pasos anteriores, del 3 al 1 para desactivar la salida del DL.

Referencias apéndice C.

- [0] ILX Lightwave. User's Guide LDC-3700B Series Laser Diode Controller.
- [1] Laboratorio de Fibras Ópticas del IIM .Curva de caracterización para el controlador de diodo láser de 975 nm: *Potencia contra Corriente.*
- [2] HEWLETT PACKARD. HP33120A Function Generator Service Guide.
- [3] THORLABS. VT1 - Variable Terminator.
- [4] ILX Lightwave. Modulating Laser Diodes, Application note #22.
- [5] ILX Lightwave. http://www.newport.com/LDC-3700C-Series-Combination-Laser-Diode-Driver-a/1009517/1033/info.aspx#tab_Specifications.
- [6] ILX Lightwave. User's Guide Laser Diode Mount LDM-4980.
- [7] THORLABS. 975 nm Pigtailed Laser Diode, Butterfly Package PL980P330J.

APÉNDICE D.

-Medidas para acondicionar y poner a punto la fibra óptica para emitir luz láser

Al tratarse de una guía de onda, la punta de la fibra óptica debe permanecer limpia de cualquier partícula de polvo que pudiera obstruir la trayectoria del haz láser a la salida, ya que pudiera afectar la coherencia del rayo, así como posibles transmisiones retrogradadas hacia la fuente de emisión (situación que podría dañar el equipo). La forma de limpiar una fibra óptica es la siguiente.

- a) Retirar por acción mecánica el revestimiento que da soporte mecánico al núcleo de la fibra óptica, dejando una distancia de aproximadamente 2 cm, partiendo desde la punta.
- b) Limpiar la fibra óptica con un poco de alcohol isopropílico, recorriendo desde el inicio de la parte sin recubrimiento hacia la punta, con un trozo de toalla KimWipes.
- c) Colocar, sin hacer contacto, el extremo lipio de la fibra óptica, sobre la cortadora de Fibra óptica (Figura x), colocando sobre el canal guía el cuerpo de la fibra recubierto, y llevando la punta de la fibra hasta rebasar el segundo apoyo de la máquina que inmoviliza la sección de corte.
- d) Colocar el seguro magnético para fijar la fibra óptica. La acción manual a manera de guillotina (sin cuchilla, solamente una cabeza ranurada) separa la punta de la fibra óptica sin hacer contacto con la sección o nueva punta de la fibra, lista para ser montada en el arreglo óptico.

Figura D.1
Imagen que muestra el tipo de
cortadora de fibra óptica
utilizada.



APÉNDICE E.

Fabricación de membranas delgadas.

La fabricación de películas planas de PDMS se enfocó en la obtención de una membrana elástica que pudiera ser recortada en pequeñas dimensiones (alrededor de $600 \mu\text{m} \times 5\text{mm}$) que pudieran ser utilizadas como válvulas pasivas de un solo sentido de apertura. El ancho de las membranas recortadas generalmente debería cubrir y sobresalir por muy poco el área circular del orificio a la salida de los conductos microfluídicos. El proceso de fabricación es el siguiente.

Material empleado:

- PDMS más agente curante
- Mica autoadherible y/o cinta adhesiva transparente estándar.
- Juego de pinzas para manipular membranas:

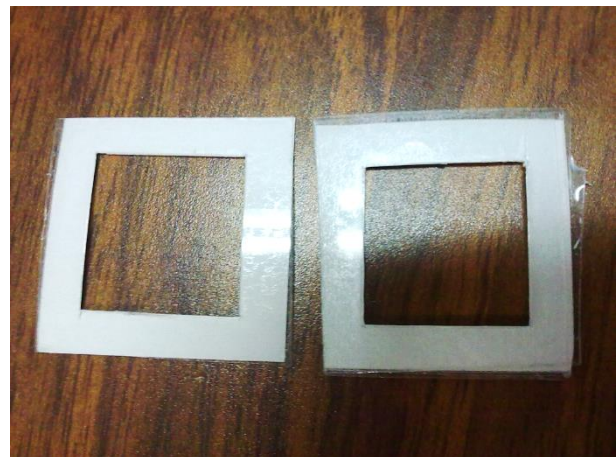


Figura E.1 Pinzas.

- a) Dependiendo del espesor requerido, las membranas pueden ser fabricadas a partir del espesor de una mica autoadherible ($\approx 100 \mu\text{m}$), disponible en cualquier papelería; también puede emplearse el espesor de una cinta adhesiva (masking tape), de espesor menor en comparación al anterior ($\approx 70 \mu\text{m}$). El efecto del espesor se refleja en una menor fuerza requerida para curvarlo al momento de ser empleado en el sistema microfluídico. El método empleado ofrece la posibilidad de construir membranas de mayor espesor a partir de agregar capas de mica, o de cinta adhesiva, una sobre otra.
- b) Para contener el PDMS líquido, se crea un molde al recortar un recuadro en el interior de la mica o de la cinta adhesiva y retirarlo para dejar la cavidad con el espesor deseado.

Figura E.2

Moldes en mica. Se realiza un recuadro en su interior para contener el PDMS líquido. La base y la tapa son porta objetos de vidrio (no mostrados)



- c) Se vierte dentro del contenedor, colocándose en el cetro, un poco del PDMS líquido, en pequeñas cantidades, permitiendo que se expanda a lo largo del recuadro contenedor. En caso de ser necesario, se puede colocar pequeñas gotas en cada esquina del molde para acelerar el esparcimiento del material, pero evitando desbordar el molde.
- d) Se recomienda dejar el molde dentro de un contenedor más grande, para evitar que las partículas de polvo se peguen en la superficie, pero también para dejar reposar el polímero durante 10 minutos para purgar las burbujas de aire que pudieran estar contenidas.
- e) Para continuar, se coloca rápidamente un porta objetos de vidrio, a manera de tapa, conteniendo al molde. Es posible hacer presión al momento de sellar para retirar el aire remanente. Se colocan un par de clips para asegurar el molde contra el porta objetos.
- f) El tiempo de curado de las membranas es de aproximadamente 20 minutos. Después de eso las membranas deben de haber solidificado. Se retira el porta objetos introduciendo una navaja de afeitar para separar el molde de la tapa.

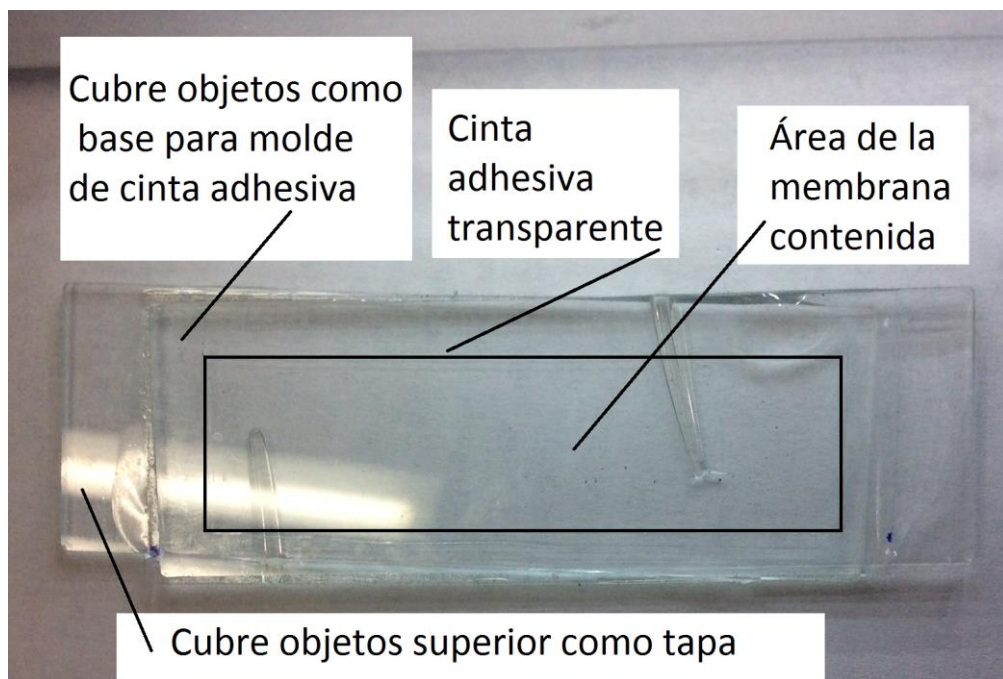


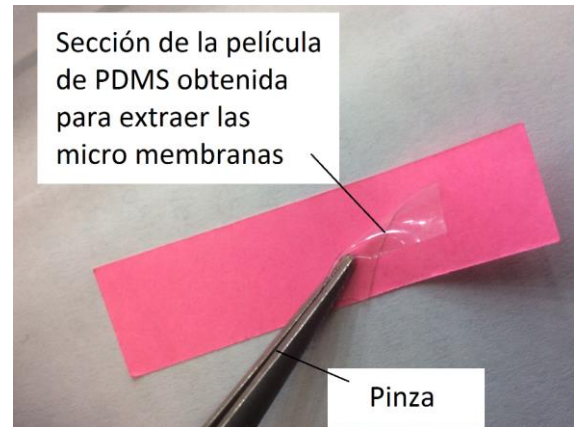
Figura E.3

Película de PDMS con un espesor de cinta adhesiva, el emparedado muestra la base y la tapa (porta objetos de vidrio). El recuadro interior contiene al PDMS.

- g) EL recorte de las membranas al tamaño deseado se puede realizar manualmente con la navaja de afeitar mediante el uso del microscopio. Una alternativa es el uso de una lupa con soporte de varios aumentos.

Figura E.4

El manejo de pequeñas secciones de PDMS extraídas de la película grande facilitan la obtención de las micro membranas utilizadas como válvulas pasivas. La película de PDMS puede limpiarse con alcohol isopropílico para remover la suciedad adquirida durante su manipulación.





Fabricación de bomba opto-neumática a escala micrométrica



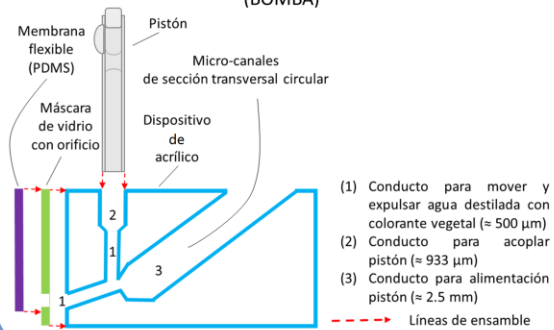
M.G. Pérez Zúñiga¹, J. R. Vélez-Cordero, J. Hernández-Cordero

Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n Ciudad Universitaria, Coyoacán D.F. 04510, México.
¹ingperezzu_misael@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

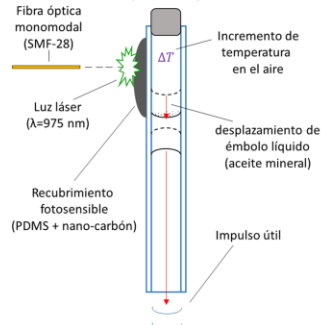
El presente trabajo busca demostrar, mediante la fabricación de un prototipo micrométrico, la capacidad de inducir movimiento en un volumen reducido de líquido dentro de micro-canales, así como también la posibilidad de impedir el flujo mediante una válvula neumática accionada por luz láser.

FABRICACIÓN DEL DISPOSITIVO OPTO-NEUMÁTICO (BOMBA)



EXPERIMENTO

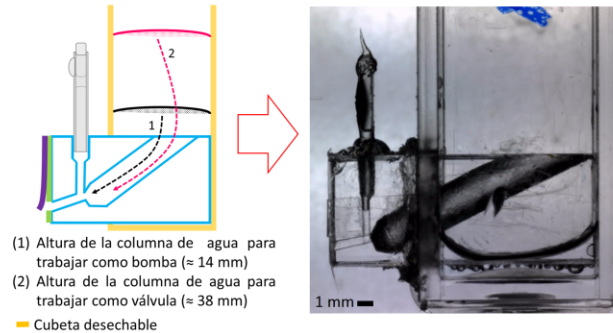
CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA NEUMÁTICO (PISTÓN)



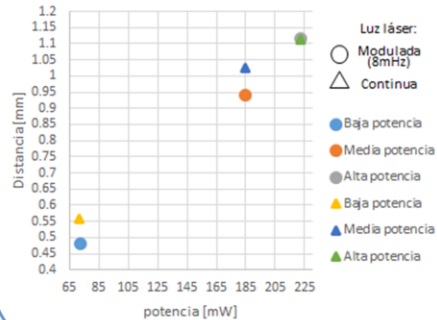
Máximo desplazamiento posible del émbolo en función de:

- Potencia óptica $\{[184.33, 221.95] \text{ mW}\}$
- Espesor del lóbulo fotosensible $\{[230-400] \mu\text{m}\}$
- Separación láser-recubrimiento ($\approx 2 \text{ mm}$)
- Volumen de aire expansión-compresión ($\approx 1.24 \mu\text{L}$)
- Modalidad de operación (continua o modulada)

RESULTADOS



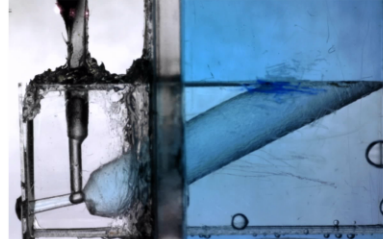
DISTANCIA RECORRIDA POR EL ÉMBOLO FRENTE A POTENCIA ÓPTICA



Funcionando como bomba



Funcionando como válvula neumática



CONCLUSIÓN

El dispositivo posee un gran empuje, lo que permite utilizarlo para apertura de membranas elásticas (PDMS), pero también cerrar conductos para impedir el paso al líquido, accionándolo como una válvula de aire. Es necesario realizar un análisis adecuado del mismo para aprovechar en lo posible los resultados obtenidos.

AGRADECIMIENTOS: Este trabajo fue financiado por CONACyT a través del proyecto 154464.

REFERENCIAS: Vélez-Cordero, J. R.; Velázquez-Benitez, A. M.; Hernández-Cordero, J. Thermocapillary flow in glass tubes coated with photoresponsive layers. Langmuir 2014, 30 (18), 5326–5336.



2do SIMPOSIO **DE IIM**
ESTUDIANTES
 Del 30 de julio al 1º de agosto del 2014.

Otorga la presente

Constancia

a.

Misael Giovanni Pérez Zúñiga

por obtener el primer lugar en la

Modalidad Póster

Sesión del 1 de Agosto

Ana Martínez Vázquez
 Dra. Ana María Martínez Vázquez

Directora del IIM

JPC

Dr. Juan A. Hernández Cordero
 Secretario Académico del IIM