



**Universidad Autónoma de San Luis Potosí**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Centro de Investigación y Estudios de Posgrado**

**Modelado matemático de una microbomba sin partes móviles  
actuada por burbujas de termocavitación**

**T E S I S**

Que para obtener el grado de:

Maestra en Metalurgia e Ingeniería de Materiales

Presenta:

Ing. Nancy Gabriela García Morales

Asesor:

Dr. Francisco Gerardo Pérez Gutiérrez

Co-asesora:

Dra. Beatriz Morales Cruzado

San Luis Potosí, S. L. P.

Febrero de 2018





Universidad Autónoma  
de San Luis Potosí

26 de octubre de 2017

**ING. NANCY GABRIELA GARCÍA MORALES  
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Francisco Gerardo Pérez Gutiérrez y Beatriz Morales Cruzado**, Asesor y Co-asesora de la Tesis que desarrollará Usted con el objeto de obtener el Grado de **Maestra en Metalurgia e Ingeniería de Materiales**, me es grato comunicarle que en la Sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 26 de octubre del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

**TEMARIO:**

**“Modelado matemático de una microbomba sin partes móviles actuada por burbujas de termocavitación”**

Introducción.

1. El desarrollo de bombas a escala micrométrica
  2. La Termocavitación como alternativa para inducir flujos a escala micrométrica y el uso de pinzas ópticas para medir las velocidades de flujo inducidas.
  3. Modelado matemático bidimensional y tridimensional del flujo inducido por la microbomba
  4. Evaluación del flujo inducido por la microbomba por medio del modelo matemático
- Conclusiones  
Referencias

Apéndice. Diseño y manufactura de microcanales

**“MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO”**

**A T E N T A M E N T E**

**M. I. JORGE ALBERTO PÉREZ GONZÁLEZ**  
**DIRECTOR**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DIRECCIÓN



FACULTAD DE  
**INGENIERÍA**

Av. Manuel Nava 8  
Zona Universitaria • CP 78290  
San Luis Potosí, S.L.P.  
tel. (444) 826 2330 al39  
fax (444) 826 2336  
www.uaslp.mx

Copia. Archivo.  
\*etn.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE INGENIERÍA

Área de Investigación y Estudios de Posgrado

### Aclaración

El presente trabajo que lleva por título:

“Modelado matemático de una microbomba sin partes móviles actuada por burbujas de termocavitación”

se realizó en el periodo de junio de 2016 a enero de 2018 bajo la dirección del Dr. Francisco Gerardo Pérez Gutiérrez y la Dra. Beatriz Morales Cruzado.

### Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este documento y asume la responsabilidad total del mismo.

Este documento no ha sido sometido como tesis a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento de Tesis para fines académicos.

Nombre y Firma del autor

---

## **Agradecimientos**

*Primero que nada quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de cumplir una meta más en mi vida.*

*También agradezco infinitamente a mis asesores, la Dra. Beatriz Morales y el Dr. Francisco Pérez. Gracias por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto, por brindarme su tiempo y dedicación en asesorías, revisiones y en algunos contratiempos que surgieron en el transcurso de la investigación. Gracias por tomar en cuenta mi punto de vista y opinión en todo momento. Agradezco muchísimo a la Dra. Beatriz por todo el tiempo y dedicación empleados en el trabajo de laboratorio. Su apoyo fue fundamental para mí.*

*Al M.I Pedro Almendarez Rangel. Por todas las sugerencias hechas al trabajo experimental, por su ayuda en la implementación del modelo matemático y sobre todo por el tiempo que invirtió en ayudarme siempre que lo necesite.*

*Agradezco al comité académico que dio seguimiento al trabajo, al Dr. Dirk Frederik De Lange, el Dr. Ricardo Romero Méndez y el Dr. José Luis Hernández Rivera. Sus comentarios y aportaciones me fueron de gran ayuda.*

*Al M.I Jorge Zaragoza Siqueiros. Gracias por la ayuda y facilidades recibidas de su parte para la fabricación de microcanales por medio de Control Numérico Computacional (CNC).*

*Al Sr. Juan Manuel Fraga, técnico académico del Laboratorio de Pétreos de la Facultad del Hábitat de la UASLP. Por las facilidades prestadas para la elaboración de microcanales por medio de chorro de arena.*

*A los Dres. Luis Felipe Devia Cruz y Santiago Camacho. Por su participación en el planteamiento de la idea inicial de este trabajo.*

*Al Dr. Víctor Ruiz Cortes, responsable del Laboratorio de Confinamiento Óptico y Medición de Frente de Onda del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Por el apoyo y facilidades recibidas, a través de su grupo de trabajo, para la elaboración de microcanales por medio de litografía suave usando películas fotosensibles.*

*A la Dra. María de los Ángeles Ramírez Saíto, técnico académico del Laboratorio de Fluidos Complejos del Instituto de Física de la UASLP. Por su ayuda en el manejo del equipo para la medición del potencial Z de partículas dieléctricas.*

*Al maestro Manuel Meza del laboratorio de biofísica y materia blanda del Instituto de Física de la UASLP. Por su ayuda en el tratamiento de la superficie de los cubreobjetos utilizados en la elaboración de microcanales.*

*Al Dr. Erick Sarmiento Gómez. Por todas las sugerencias hechas al trabajo experimental, las cuales me fueron siempre de gran ayuda para el mejor desarrollo de la investigación.*

*Finalmente, agradezco a la sociedad mexicana, quien por medio del CONACyT me otorgó la beca que me permitió realizar mis estudios de maestría.*

# Contenido

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I. El desarrollo de bombas a escala micrométrica</b> .....	<b>3</b>
1.1 Parámetros que rigen el comportamiento de las microbombas .....	3
1.2 Clasificación de las microbombas de acuerdo a su principio de funcionamiento .....	5
1.2.1 Microbombas mecánicas .....	5
a) Electroestáticas .....	5
b) Piezoeléctricas .....	6
c) Termoneumáticas .....	6
d) Electromagnéticas .....	7
1.2.2 Microbombas no mecánicas .....	7
a) Magnetohidrodinámicas .....	7
b) Electroosmóticas .....	8
c) De ultrasonido .....	9
d) Electroquímicas .....	9
e) De burbujas .....	9
f) De cavitación óptica con el uso de láser pulsado .....	11
g) De cavitación óptica con el uso de láser de onda continua .....	12
1.3 Microbomba actuada por burbujas de termocavitación como alternativa para los microsistemas .....	13
<b>CAPÍTULO II. La termocavitación como alternativa para inducir flujos a escala micrométrica y el uso de pinzas ópticas para medir las velocidades de flujo inducidas</b> .....	<b>15</b>
2.1 Termocavitación .....	15
2.1.1 Mecanismo físico de formación de burbujas de TC .....	16
a) Transformación de fase espinodal .....	17
b) Transformación de fase por nucleación homogénea de burbujas .....	18
2.1.2 Dinámica de burbujas de termocavitación .....	20
2.1.3 Funcionamiento de la microbomba propuesta .....	21
2.2 Pinzas ópticas .....	22
2.2.1 Fuerzas de atrapamiento ejercidas por una pinza óptica .....	22
2.2.2 Determinación de velocidades de flujo por medio de pinzas ópticas .....	24
2.2.3 Calibración del sistema de pinzas ópticas .....	26
2.2.4 Arreglo óptico experimental propuesto .....	27
<b>CAPÍTULO III. Modelado matemático bidimensional y tridimensional del flujo inducido por la microbomba</b> .....	<b>29</b>
<b>3.1</b> Modelado con el software de CFD ANSYS Fluent .....	<b>29</b>
3.1.1 Generalidades .....	29
3.1.2 Metodología general para un análisis de CFD con ANSYS Fluent .....	30
a) Determinación de las metas del modelo .....	30
b) Creación de la geometría y malla .....	30
c) Configuración del <i>solver</i> y modelos físicos .....	31
d) Computarización y monitoreo de la solución .....	32

e) Análisis de resultados .....	32
3.2 Desarrollo de modelos matemáticos que describen el comportamiento de válvulas Tesla .....	32
3.3 Metodología implementada en el modelado de la microbomba de termocavitación ..	34
3.3.1 Diseño de geometrías a modelar .....	34
3.3.2 Ecuaciones de gobierno .....	36
3.3.3 Mallado de la geometría .....	37
3.3.4 Condiciones de frontera .....	40
3.3.5 Configuración del <i>solver</i> utilizado .....	41
3.3.6 Procesamiento de datos .....	41
<b>CAPÍTULO IV. Evaluación del flujo inducido por la microbomba por medio del modelo matemático .....</b>	<b>43</b>
4.1 Determinación del mallado a utilizar en cada simulación .....	43
4.2 Evaluación del flujo para el microcanal de 8 y 8 ramas .....	45
4.3 Efecto del grosor del microcanal .....	51
4.4 Efecto del número de ramas en el flujo neto inducido .....	52
4.5 Efecto de la asimetría del microcanal en el flujo neto inducido .....	53
4.6 Efecto de la frecuencia y tamaño de la burbuja en la inducción de flujo para el microcanal de 8 y 8 ramas .....	55
4.7 Comparación del flujo neto total y eficiencia volumétrica de las geometrías simuladas .....	56
4.8 Análisis de la aceleración inducida sobre el flujo en cada geometría simulada .....	58
4.9 Comparación de la microbomba de termocavitación con las estudiadas en el capítulo I .....	61
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>65</b>
<b>APÉNDICE. Diseño y manufactura de microcanales .....</b>	<b>71</b>

## Lista de figuras

<b>Figura 1.1.</b> Elementos controladores de flujo en MBs no mecánicas .....	5
<b>Figura 2.1.</b> Formación de burbujas de TC .....	15
<b>Figura 2.2.</b> Diagrama de fases del agua .....	16
<b>Figura 2.3.</b> Energía libre de Gibbs como función del volumen específico para una sustancia pura .....	17
<b>Figura 2.4.</b> Energía de nucleación como función del radio de la burbuja .....	19
<b>Figura 2.5</b> Geometría del canal propuesto para la MB .....	22
<b>Figura 2.6.</b> Fuerzas ejercidas por una pinza óptica .....	23
<b>Figura 2.7.</b> Análisis cualitativo del atrapamiento de partículas dieléctricas por medio de óptica geométrica .....	24
<b>Figura 2.8.</b> Desplazamiento de la posición promedio de la partícula por efecto de flujo inducido en el medio de atrapamiento .....	25
<b>Figura 2.9</b> Arreglo óptico experimental .....	27
<b>Figura 3.1</b> Geometrías modeladas .....	35
<b>Figura 3.2.</b> Niveles de mallado para el microcanal de 8 y 8 ramas 2D .....	38
<b>Figura 3.3.</b> Niveles de mallado para el microcanal de 8 y 8 ramas 3D .....	39
<b>Figura 3.4</b> Aproximación a función senoidal de la velocidad de una burbuja a la entrada del canal .....	41
<b>Figura 4.1.</b> Resultados para los tres niveles de mallado utilizados para el microcanal de 8 y 8 ramas en 2D a) Flujo volumétrico como función del tiempo y b) flujo neto por ciclo .....	44
<b>Figura 4.2.</b> Resultados para los dos niveles de mallado utilizados para el microcanal de 8 y 8 ramas en 3D a) Flujo volumétrico como función del tiempo y b) flujo neto por ciclo .....	45
<b>Figura 4.3</b> Velocidad de flujo inducido por la microbomba de 8 y 8 ramas a diferentes tiempos con el modelo en 2D .....	46
<b>Figura 4.4.</b> Flujo volumétrico inducido como función del tiempo por la MB de 8 y 8 ramas a cada lado del microcanal .....	47
<b>Figura 4.5.</b> Flujo volumétrico neto por ciclo generado por la MB de 8 y 8 ramas .....	48
<b>Figura 4.6.</b> Eficiencia volumétrica para la geometría de 8 y 8 ramas en 3D .....	49
<b>Figura 4.7.</b> Porcentaje de energía de la burbuja que se convierte en energía cinética ( $%E_c$ ) para la geometría de 8 y 8 ramas en 3D .....	51
<b>Figura 4.8.</b> Flujo neto inducido como función del ciclo simulado para los diferentes diseños de microcanales de 16 y 16 ramas .....	52
<b>Figura 4.9.</b> Flujo neto inducido como función del ciclo simulado para los microcanales de 8 y 8, 16 y 16, y 12 y 12 ramas con canal recto del lado izquierdo en 2D y 3D .....	53
<b>Figura 4.10.</b> Flujo neto inducido como función del ciclo simulado para los microcanales de 8 y 8 y 12 y 4 ramas en 2D y 3D .....	54
<b>Figura 4.11.</b> Flujo neto inducido como función del periodo de tiempo para el microcanal de 8 y 8 ramas con burbuja de 600 $\mu$ m y 300 $\mu$ m de diámetro en 2D y 3D .....	56
<b>Figura 4.12.</b> Flujo neto inducido por ciclo para las geometrías modeladas .....	57
<b>Figura 4.13.</b> Eficiencia volumétrica para las geometrías modeladas a) 6 ciclos y b) 15 ciclos para las geometrías de 12 y 4 y 8 y 8 ramas .....	58

<b>Figura 4.14.</b> Aceleración como función del tiempo para las geometrías modeladas en el primer ciclo de expansión y colapso de la burbuja .....	59
<b>Figura 4.15.</b> Aceleración promedio por ciclo para las geometrías modeladas .....	61
<b>Figura A.1.</b> Fabricación de microcanal mediante microfresado con CNC .....	75
<b>Figura A.2.</b> Fabricación de microcanales por medio de chorro de arena .....	76
<b>Figura A.3.</b> Fabricación de microcanales por medio de litografía suave (generación del molde con película fotosensible) .....	78
<b>Figura A.4.</b> Fabricación de microcanales por medio de litografía suave (generación del molde con impresión en corte vinil) .....	79

## **Lista de tablas**

<b>Tabla 3.1.</b> Número de elementos y nodos para las diferentes geometrías .....	40
<b>Tabla 4.1.</b> Comparación de las MBs estudiadas en el capítulo I con la MB de TC .....	62



# INTRODUCCIÓN

El desarrollo de sistemas para manejo y control preciso de microfluidos ha ido en aumento en los últimos años gracias a la amplia gama de aplicaciones en las que se requiere su implementación. Algunos ejemplos de estas aplicaciones son 1) los dispositivos *lab on a chip* que integran todas las funciones de un laboratorio en un pequeño chip que consta de microdepósitos, microcanales, microfiltros y detectores precisos de movimiento de fluidos químicos y biológicos; y 2) suministro de fármacos, de combustibles para celdas de combustión micrométricas y de líquidos de refrigeración para el enfriamiento de sistemas de microelectrónica (Nisar *et al.* 2008, Afrasiab, Movahhedy y Assempour 2011).

Las microbombas (MBs) son un elemento clave en la implementación de sistemas de microfluidos, por tal motivo se han convertido en un tema central de investigación en microfluídica y áreas relacionadas. Las características deseables en estos componentes incluyen: tamaño compacto, facilidad de integración en un chip, estabilidad y reproducibilidad del flujo inducido, compatibilidad con los fluidos utilizados, insensibilidad a la contaminación, periodos de vida largos y capacidad de operar con varios fluidos (Zhang, Xing y Li 2007). Aunque se ha desarrollado una gran variedad de MBs, no existe una que provea todas las características requeridas, pues su diseño e implementación se basa en el campo de aplicación, además son pocas las que se llevan a desarrollo industrial y comercial debido a que son difíciles de implementar.

Las MBs que transforman cierto tipo de energía no mecánica en momento cinético, el cual permite al fluido moverse, han surgido recientemente como una alternativa atractiva para los dispositivos *lab on a chip*, (Nisar *et al.*, 2008) ya que no tienen partes móviles, por lo que su diseño y fabricación son sencillos. Existen varias técnicas para inducir flujo en este tipo de MBs, pero una especialmente atractiva y que ha mostrado gran potencial es la cavitación óptica, que consiste en la formación y colapso de burbujas con el uso de láser (Zwaan, Le Gac, Tsuji, y Ohl, 2007; Dijkink y Ohl, 2008). En la expansión de la burbuja se induce el flujo y al momento del colapso éste retorna, por lo que estas MBs tienen mecanismos reguladores de flujo que lo inducen en una dirección preferencial. Esta técnica ha sido ampliamente estudiada con láser pulsado. Algunos beneficios de usar láser pulsado son: 1) es un mecanismo de generación de burbujas no invasivo, 2) no se requieren alambres o actuadores y 3) la posición de la creación de las burbujas puede cambiarse moviendo el láser con espejos (Zwaan *et al.*, 2007). Sin embargo, tiene las desventajas de que no se puede integrar en un dispositivo pequeño y su costo es elevado debido a la óptica que utiliza.

En este contexto, la cavitación óptica con el uso de láser de onda de continua también podría ser una alternativa para la inducción de flujos con burbujas a escala micrométrica, ya que es una técnica fácil de implementar experimentalmente y además es más barata en comparación con el uso de láseres pulsados, sin embargo no ha sido ampliamente estudiada ( Padilla-Martinez *et al.*, 2014; Berrospe-Rodriguez *et al.*, 2016) y su implementación en microsistemas es limitada (Wang, Santiago, Mungal, y Young, 2004). Esta técnica también se conoce como termocavitación (TC) debido al mecanismo de formación de las burbujas, el cual difiere al del láser pulsado (estos

mecanismos se describen en los capítulos I y II). La generación de flujos por medio de TC brinda la posibilidad de desarrollar MB baratas y portables (Berrospe-Rodriguez *et al.* 2016).

Las velocidades de flujo inducidas por las burbujas de TC son descritas por medio de las ecuaciones de Navier-Stokes y su determinación tanto teórica como experimental son un factor muy importante en la evaluación del comportamiento del flujo inducido.

La resolución teórica de las ecuaciones por medio del uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es de gran utilidad en el área de mecánica de fluidos y se ha utilizado ampliamente para resolver una gran variedad de problemas, ya que proporciona muy buenas aproximaciones con la realidad y permite economizar tiempos y costos en el desarrollo experimental.

Por otro lado, las pinzas ópticas (POs) son una herramienta que usa la fuerza ejercida por un haz láser fuertemente enfocado para atrapar partículas embebidas en un fluido y pueden ser utilizadas para medir experimentalmente velocidades de flujo en microsistemas (Almendarez-Rangel, 2017). Ofrecen ventajas importantes como alta resolución espacial, que no interactúan mecánicamente con la materia y que eliminan la influencia del movimiento browniano, pues en la determinación de las velocidades de flujo a escala micrométrica esta influencia es significativa.

**En el trabajo que se presenta a continuación se utilizó el software de CFD ANSYS FLUENT para desarrollar un modelo matemático que describe el comportamiento de una MB sin partes móviles en la que el flujo es desplazado a partir de la formación de burbujas de TC a través de un microcanal, en forma de válvula Tesla, que lo dirige en una dirección preferencial. Con dicho modelo se caracterizó teóricamente el flujo generado en diferentes diseños de microcanales con la geometría de la válvula. De esta forma se obtuvo el diseño con el mejor desempeño para llevarlo a la práctica.**

El trabajo está organizado de la siguiente forma. En el capítulo I se detallan los antecedentes de la construcción de bombas a escala micrométrica. A continuación, en el capítulo II se describe la TC como mecanismo para inducir flujo en la MB propuesta, además se presentan las POs como posible alternativa para medir experimentalmente la velocidad del flujo inducido. La metodología empleada en el desarrollo del modelo matemático se muestra en el capítulo III y en el capítulo IV se presentan los resultados de dicho modelo. Finalmente se presentan las conclusiones de la investigación y trabajo a futuro.

Es importante mencionar que durante el desarrollo del trabajo de tesis que aquí se presenta, también se estuvo trabajando en la construcción y caracterización experimental de la MB propuesta, sin embargo no se consiguió inducir flujo en los microcanales fabricados, por lo que en el apéndice se describen las diferentes técnicas utilizadas para la construcción de los microcanales y los problemas que surgieron al momento de su implementación, así mismo se presenta un análisis sobre las posibles razones por las cuales no se pudo inducir flujo y se plantean posibles alternativas de solución para conseguir la construcción y caracterización experimental de dicha MB en un futuro.

# CAPÍTULO I. El desarrollo de bombas a escala micrométrica

El estudio e implementación de bombas a escala micrométrica comenzó con el trabajo pionero de Thomas y Bessman, quienes en 1975 patentaron una microbomba (MB) actuada por dos dobladores de disco piezoeléctricos opuestos. Esta MB se utilizó en un páncreas artificial para la dosificación de insulina. Sin embargo, no fue hasta 1990 cuando cobró auge el estudio de estos dispositivos por sus aplicaciones en el área biomédica, lo cual trajo consigo nuevas tecnologías de micromaquinado (Nisar *et al.*, 2008). Desde entonces, ha habido una gran cantidad de investigaciones sobre estos componentes.

El presente capítulo pretende dar una perspectiva general sobre el estudio y construcción de los diferentes tipos de MBs que han sido desarrolladas hasta ahora. Se describe su principio de funcionamiento y características principales, así como sus ventajas y desventajas de acuerdo a las características que los microsistemas requieren. Dicha descripción marca la pauta para establecer al final del capítulo la motivación para la construcción de una MB actuada por termocavitación (TC).

## 1.1. Parámetros que rigen el desempeño de las microbombas

Las MBs suelen caracterizarse por medio de algunos parámetros básicos. Uno de ellos es el flujo volumétrico (o caudal) generado, el cual se define como el volumen de fluido que circula a través de una superficie en un tiempo dado. En términos generales está dado por medio de la siguiente expresión (Bird, Stewart y Lightfoot, 2006):

$$Q(t) = \iint_S \mathbf{v}(t) \cdot d\mathbf{S}, \quad (1.1)$$

Donde  $Q(t)$  es el flujo volumétrico a determinado tiempo,  $\mathbf{v}$  es el vector de velocidad del fluido a dicho tiempo y  $d\mathbf{S}$  es el vector superficie que se define como  $d\mathbf{S} = \hat{n}dS$ , donde  $\hat{n}$  es el vector unitario normal a la superficie y  $dS$  un elemento diferencial de área.

Si el flujo volumétrico no es constante en el tiempo, un parámetro de mayor utilidad es el flujo neto  $Q_n$ , el cual se puede determinar a partir de la siguiente expresión:

$$Q_n = \int_{t_1}^{t_2} Q(t) dt, \quad (1.2)$$

donde  $Q(t)$  es el flujo volumétrico como función del tiempo integrado en el periodo de  $t_1$  a  $t_2$ .

La presión de operación o carga total es otro parámetro característico de una MB. Ésta se define como la energía transmitida al fluido por unidad de peso en su paso por la bomba. Comúnmente se representa como la altura de una columna de líquido a elevar. Se deriva a partir de la ecuación de conservación de energía para flujo estable, asumiendo flujo incompresible y despreciando el trabajo viscoso y la transferencia de calor:

$$h = \left( \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} + z \right)_{salida} - \left( \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} + z \right)_{entrada}, \quad (1.3)$$

donde  $h$  es la altura de la columna de líquido a elevar,  $p$  es la presión,  $u$  es la velocidad del fluido,  $z$  es la altura,  $\rho$  es la densidad del fluido y  $g$  es la aceleración debida a la gravedad.

El tamaño de la MB es un parámetro importante debido a que la mayoría de los microsistemas requieren elementos sumamente compactos. El voltaje suministrado y la frecuencia de operación también juegan un papel muy importante ya que éstos determinan parcialmente la electrónica y otros componentes necesarios para operar la MB (Laser y Santiago, 2004).

Finalmente, la potencia de operación y eficiencia son otros parámetros importantes al momento de evaluar el desempeño de la MB, sin embargo raramente son reportados (Laser y Santiago, 2004). La eficiencia está dada por la ecuación:

$$\eta = \frac{P_{mb}}{P_{act}}, \quad (1.4)$$

donde  $P_{mb}$  es la potencia entregada al fluido por la MB y  $P_{act}$  es la potencia requerida para accionar al actuador de la MB.

En una MB ideal  $P_{mb}$  y  $P_{act}$  son iguales y no existen pérdidas, sin embargo, en las MBs reales existen diferentes tipos de pérdidas, por lo que generalmente la eficiencia suele expresarse como función de los parámetros básicos de operación para cada MB específica, sin embargo, dichas expresiones de eficiencia no surgen de la teoría de bombas, por lo que no tienen ninguna utilidad predictiva (White, 2008).

Un ejemplo donde la eficiencia se define en función de los parámetros de operación es la bomba radial. Esta bomba está constituida por un rotor dentro de una carcasa. El fluido entra axialmente a través de un orificio en el eje de la carcasa, los alabes del rotor lo forzan a tomar un movimiento tangencial y radial hacia el exterior del rotor, donde es recogido por una carcasa que hace de difusor. El fluido aumenta su velocidad y presión cuando pasa a través del rotor. La parte de la carcasa, de forma toroidal, decelera el flujo y aumenta más la presión. Por definición, la eficiencia neta en esta bomba es el producto de tres eficiencias parciales, relacionadas con tres tipos de pérdidas: volumétricas, por fricción y por defectos de construcción de la MB, por lo que se escribe como:

$$\eta \equiv \eta_v \eta_m \eta_h, \quad (1.5)$$

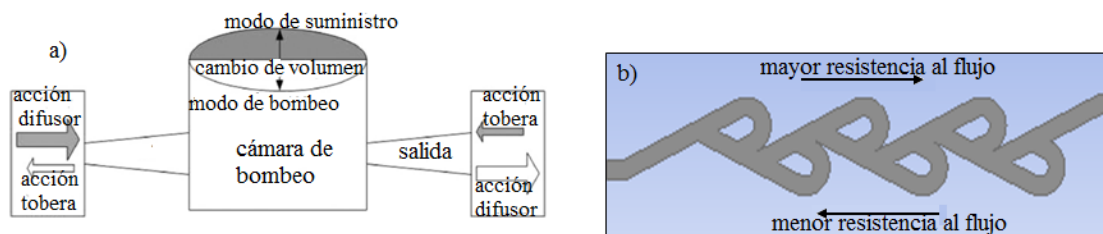
donde  $\eta_v$  es la eficiencia volumétrica,  $\eta_m$  es la eficiencia mecánica (pérdidas por fricción) y  $\eta_h$ , es la eficiencia hidráulica (pérdidas por una fabricación imperfecta de la MB). Estos tres tipos de eficiencia se definen en función de los parámetros de operación específicos de la MB. La eficiencia volumétrica se define como una relación entre el flujo volumétrico inducido por la bomba y el flujo volumétrico perdido debido a fugas externas e internas, la eficiencia hidráulica se define como una relación entre la carga a mover y las pérdidas de carga debidas a una mala construcción de la bomba y finalmente la eficiencia mecánica se define como una relación entre la potencia suministrada y la potencia perdida a causa de fricción mecánica (White, 2008).

Para calcular realmente la carga, potencia, rendimiento y caudal de una bomba se pueden usar dos aproximaciones teóricas diferentes: 1) simples fórmulas unidimensionales y 2) complejos modelos por ordenador que tienen en cuenta la viscosidad y tridimensionalidad del movimiento.

## 1.2. Clasificación de las microbombas de acuerdo a su principio de funcionamiento

Las MBs se pueden clasificar para su investigación y diseño en dos grandes grupos: mecánicas y no mecánicas (Nisar *et al.*, 2008). Aunque se debe mencionar que dicha clasificación no está completamente establecida y pueden existir otras.

Las MBs mecánicas son aquellas que tienen partes mecánicas móviles como diafragmas de bombeo y válvulas de chequeo. Estas MBs requieren un actuador físico o mecanismo para llevar a cabo la función de bombeo. Las MBs no mecánicas son aquellas que transforman cierto tipo de energía no mecánica en momento cinético, el cual permite al fluido moverse. Estas MBs no tienen partes móviles, utilizan elementos controladores de flujo conocidos como difusor/tobera (figura 1.1a) que dirigen el flujo de tal forma que durante la etapa de suministro entra más flujo a través de la tobera en comparación con el que sale por el difusor y en la etapa de bombeo ocurre lo contrario. También suelen utilizar válvulas Tesla, las cuales deben su nombre a su inventor, Nikola Tesla (figura 1.1b). Estas válvulas presentan mayor resistencia al flujo de un lado que de otro a causa del acomodo de las ramificaciones en el canal. Debido a esto, el diseño y fabricación de las MBs no mecánicas suele ser simple.



**Figura 1.1.** Elementos controladores de flujo en MBs no mecánicas a) elemento difusor/tobera y b) válvula Tesla.

### 1.2.1 Microbombas mecánicas

Las MBs mecánicas son quizás las más ampliamente estudiadas y utilizadas, sin embargo, esto no quiere decir que son las que presentan mejor desempeño. Su diseño suele ser complejo debido a que tienen partes mecánicas móviles. A continuación se describen y analizan algunas.

#### a) Electrostáticas

Estas MBs se basan en la fuerza de atracción de Coulomb entre placas de carga opuesta. Constan de una membrana que es obligada a deflectarse cuando se aplica el voltaje adecuado entre dos placas electrostáticas, la membrana regresa a su posición original cuando deja de aplicarse voltaje. De acuerdo a la cantidad de voltaje, varía el volumen de fluido desplazado en la MB. El líquido fluye debido a la diferencia de presión generada por la deflexión de la membrana. Las principales

ventajas de estas micrombombas son su bajo consumo de potencia, de aproximadamente 1mW y su rápido tiempo de respuesta. Su principal desventaja es que se requieren grandes voltajes (aproximadamente 200 V) para desplazar a la membrana distancias muy pequeñas (aproximadamente 5  $\mu\text{m}$ ) (Abhari, Jaafar y Yunus, 2012).

Dentro de este tipo de MBs, Zengerle *et al.* (1995) construyeron una que era actuada electrostáticamente cuyo atractivo principal residía en la bidireccionalidad del flujo. Ellos diseñaron una válvula plana que dependiendo de la frecuencia de accionamiento generaba resonancia de los componentes mecánicos (en mayor o menor medida), la cual influía en la direccionalidad del flujo. A bajas frecuencias la MB operaba en un sentido y a frecuencias más alta se cambiaba el sentido. Esto era debido al cambio de fase entre la respuesta de las válvulas y la diferencia de presión que inducía el flujo. Obtuvieron caudales de 250 y 850  $\mu\text{l}/\text{min}$  en una dirección y 400 y 200  $\mu\text{l}/\text{min}$  en la otra.

### **b) Piezoeléctricas**

Estas MBs son quizás las más ampliamente utilizadas. Su actuación consiste en la deformación inducida por un campo eléctrico en un cristal piezoeléctrico. Entre sus principales ventajas se encuentran que manejan grandes fuerzas de actuación, tiempos cortos de respuesta y estructura simple, sin embargo su fabricación es compleja ya que los materiales piezoeléctricos no son fácilmente procesados, además, el alto voltaje utilizado, comparado con la pequeña deformación inducida, es otra gran desventaja de estos dispositivos (Abhari *et al.*, 2012).

Dentro de este tipo de dispositivos, Geipel *et al.* (2006) desarrollaron un nuevo concepto de MB que, en el régimen laminar requerido para el suministro de fármacos especializados, permitió caudales independientes de la diferencia de presión a la entrada y salida de la MB. Su MB se basó en un diseño de dos membranas con actuadores piezoeléctricos que consiguieron un volumen sistólico constante con diferencias de presión entre la entrada y salida de hasta 20 kPa, por medio de control eléctrico, el cual permitió alta resolución en la dosificación volumétrica. El cálculo de los caudales inducidos por la MB fue realizado por medio de la medición experimental de presión con un sensor, a través de la pendiente  $dp/dt$ . Obtuvieron valores en el rango de 1-50  $\mu\text{l}/\text{min}$ .

Por otro lado, Hsu *et al.* (2008) desarrollaron una MB de silicio peristáltica biocompatible para el transporte de sangre. Con un voltaje de 140 V, obtuvieron un caudal de 50.2  $\mu\text{l}/\text{min}$  a frecuencias de 450 Hz, este caudal fue obtenido con el peso de la sangre bombeada a la salida del canal en función del tiempo. Esta MB presentó gran potencial en aplicaciones biomédicas, para la aplicación de fármacos, cuidado de la salud y control preciso de medicamentos para mejorar tratamientos clínicos convencionales.

### **c) Termoneumáticas**

Estas MBs tienen una cámara llena de aire que se expande y contrae periódicamente a medida que se calienta o enfría. El cambio periódico de volumen desplaza a la membrana, lo que genera el flujo en el canal.

Las principales ventajas de las MBs termoneumáticas son la alta presión que se genera, y el alto grado de desplazamiento de la membrana. Sin embargo, requieren altas potencias para ser actuadas y presentan alto tiempo de respuesta (Nisar *et al.*, 2008).

Jeon *et al.* (2005) desarrollaron una MBs peristáltica de silicio actuada por la fuerza termoneumática. Su diseño consistía de tres cámaras de actuadores de tipo peristáltico con microcalentadores en un sustrato de vidrio y un microcanal que conectaba las cámaras y los puertos de entrada y salida. El caudal fue medido por grabación del desplazamiento del menisco en tubos capilares conectados a los extremos del canal de flujo. El máximo caudal conseguido con esta MB fue de 21.6  $\mu\text{l}/\text{min}$  con un voltaje de 20 V.

#### **d) Electromagnéticas**

El efecto electromagnético se basa en la fuerza de Lorentz que experimenta un alambre en presencia de un campo magnético. Una MB electromagnética consta de una cámara con válvulas de entrada y salida, una membrana flexible, un imán permanente y un conjunto de bobinas de accionamiento. Cuando una corriente pasa a través de las bobinas, el campo magnético creado genera atracción o repulsión entre las bobinas y el imán permanente, lo cual provee la fuerza de actuación.

La actuación de las fuerzas electromagnéticas es mayor comparada con la de las fuerzas electrostáticas y además se requieren bajos voltajes. Sin embargo al llevar este principio a escala micrométrica las fuerzas de actuación se reducen considerablemente. Además son pocos los materiales magnéticos que son micromaquinados fácilmente. Estas MBs presentan altos consumos de potencia y disipación de calor (Abhari *et al.*, 2012).

Una MB de este tipo fue reportada por Pan *et al.* (2005). Dicha microbomba consistía de dos capas de polidimetil siloxano (PDMS), una sostenía dos válvulas antirretorno con forma de balón y la cámara de actuación y la otra cubría la cámara y sostenía un imán permanente en la parte superior para la actuación. Una capa adicional de PDMS se usó para encapsular el dispositivo completo. Esta MB fue actuada por una fuerza magnética externa generada a través de dos mecanismos: un imán permanente y una bobina integrada. Con el primer método se obtuvo un caudal de bombeo de 774  $\mu\text{l}/\text{min}$  con una potencia de 13 mW y con la bobina se obtuvo uno de 1000  $\mu\text{l}/\text{min}$ , sin embargo esta técnica presentó mayor consumo de potencia.

### **1.2.2 Microbombas no mecánicas**

Las MBs no mecánicas surgieron a principio de los noventa como una alternativa atractiva para los dispositivos micrométricos, ya que no tienen partes mecánicas móviles lo cual hace a su diseño y fabricación más simples. A continuación se describen algunas de estas MBs.

#### **a) Magnetohidrodinámicas**

Estas MBs consisten en el flujo de un fluido eléctricamente conductor en campos magnéticos y eléctricos. Constan de microcanales, y dos paredes unidas por electrodos para generar el campo eléctrico mientras que las otras dos paredes son unidas por imanes permanentes de polaridad

opuesta para generar el campo magnético. Son actuadas por la fuerza de Lorentz generada, la cual es perpendicular a ambos campos: eléctrico y magnético. La conductividad del fluido de trabajo debe ser mayor o igual a 1 S/m. La generación de burbujas debido a la ionización es la principal desventaja de estas MBs (Laser y Santiago, 2004).

Heng *et al.* (2000) reportaron el diseño y construcción de una MB magnetohidrodinámica. En esta MB se indujo flujo en un solo sentido con ayuda de un elemento difusor/tobera. La dependencia direccional de la resistencia al flujo del elemento difusor/tobera generó un flujo de salida neto en respuesta a la presión de oscilación generada por la corriente sinusoidal. Obtuvieron un caudal de 1900  $\mu\text{l}/\text{min}$ , a voltajes de 15 V, suministrados a 1 Hz de frecuencia y 75 mA de corriente.

### **b) Electrosmóticas**

Estas MBs son usadas para bombear soluciones de electrolitos. Funcionan de la siguiente forma. Cuando un electrolito se pone en contacto con una superficie sólida del canal de la MB, la superficie adquiere instantáneamente carga eléctrica, esta carga forma una capa y atrae a los iones de signo opuesto de la solución, lo que da lugar a la formación de una doble capa de iones, por ejemplo si la superficie se carga negativamente, atraerá a los iones positivos del electrolito. Al aplicar un campo eléctrico externo sobre toda la longitud del canal, la capa de iones adheridos a la superficie comenzará a moverse al ser atraída por el electrodo de signo opuesto a los iones. A continuación, se va a inducir flujo en todo el fluido por interacción viscosa con la capa en movimiento.

La dirección del flujo en estas MBs está determinada por la dirección del campo eléctrico aplicado, por lo que no requieren partes móviles o elementos que lo direccionen, además la inducción de flujo es relativamente rápida. Por otro lado sus principales desventajas son los altos voltajes utilizados y su limitación a flujos de soluciones electrolíticas (Laser y Santiago, 2004).

Takemori *et al.* (2005) desarrollaron una MB electrosmótica de plástico con partículas nanoesféricas de sílice distribuidas uniformemente en todo el canal para incrementar el efecto de la doble capa y mejorar el desempeño de la MB. Calcularon la velocidad lineal inducida por la MB por medio de grabación del menisco formado en un tubo conectado a la salida del canal y a partir de ahí calcularon el caudal. Obtuvieron un valor máximo de 0.42  $\mu\text{l}/\text{min}$  y una presión de 72 kPa con un voltaje aplicado de 3 kV.

Wang *et al.* (2006) presentaron el diseño de una MB electrosmótica cuyo atractivo se basó en que fue construida sobre una matriz monolítica de sílice, la cual presenta una distribución bimodal de poros, lo que propicia una alta densidad de carga y por tanto mejor desempeño de la MB. Para medir el caudal generado por la MB, midieron el número de gotas que caían en un recipiente, a continuación calcularon por métodos ópticos el volumen de una gota y consideraron que todas tenían el mismo volumen. El caudal máximo alcanzado fue de 2.9  $\mu\text{l}/\text{min}$  y 303.97 kPa de presión a un voltaje de 6 kV.

Recientemente Li *et al.* (2017) propusieron una MB electrosmótica para integrarla en un sensor químico. Esta MB fue asistida por una burbuja para mejorar su desempeño. Consistía en un



microcanal recto con una sección angosta en el centro, donde, con ayuda de un electrodo adicional a los usados para inducir flujo, crearon una burbuja de gas. Esta burbuja generó una hoja delgada de líquido entre ella y la superficie del canal, lo cual aumentó la relación superficie-volumen necesaria para incrementar la eficiencia de bombeo y generar flujos con voltajes menores o los normalmente usados para este tipo de MBs. La ventaja de usar una burbuja para aumentar la eficiencia de bombeo sobre el uso de materiales porosos, consiste en la facilidad para integrar la MB en un dispositivo pequeño. Obtuvieron flujos de hasta 0.03  $\mu\text{l}/\text{min}$  con un voltaje de 60 V aproximadamente. Adicional a esto, la MB se combinó con un sensor para medir el pH de una gota de 1nL de solución.

### c) De ultrasonido

Este tipo de MB utiliza un campo acústico de amplitud finita para inducir el flujo. El campo acústico se crea por medio de un arreglo de actuadores piezoeléctricos que generan ondas planares flexurales, las cuales se propagan a lo largo de una pared del canal de la MB. Hay transferencia de momento del canal al fluido. Estas MBs requieren bajos voltajes de operación y no requieren partes móviles o calentamiento, además no hay limitaciones en el tipo de fluido utilizado (Nisar *et al.*, 2008).

Meng *et al.* (2000) desarrollaron una MB acústica la cual inducía un campo acústico a lo largo de una membrana delgada en contacto con el fluido a bombear. Utilizaron velocimetría por imágenes de partículas (VIP) para analizar el flujo inducido por la MB. Con una combinación de transductores radiales y flujo de fluido en una sola dirección consiguieron caudales de hasta 69,000  $\mu\text{l}/\text{min}$ .

### d) Electroquímicas

Las MBs electroquímicas se basan en la electrólisis del agua. Cuando se aplica una corriente eléctrica al agua, esta se descompone en  $\text{H}_2$  y  $\text{O}_2$ . La fuerza generada por la reacción electroquímica que le ocurre al agua es utilizada para bombear fluidos. Estas MBs generalmente tienen una cámara donde se forman las burbujas con una membrana flexible que se expande para inducir el flujo de fluido que se encuentra fuera de la cámara de electrólisis.

El diseño de este tipo de MBs es relativamente simple, por lo que se pueden integrar fácilmente en sistemas de microfluidos. Su principal desventaja radica en que la generación de burbujas por esta técnica puede no ser controlada (Abhari *et al.*, 2012).

Una MB electroquímica para la inyección de insulina fue diseñada y construida por Kabata *et al.* (2005). Esta MB incorporó un diafragma de goma de silicio para separar el electrolito de la insulina. La cantidad de insulina inyectada fue regulada con el potencial suministrado al electrodo de trabajo. Lograron bombear aproximadamente hasta 27  $\mu\text{l}/\text{min}$  con 1.6 V.

### e) De burbujas

Estas MBs se basan en la expansión y colapso periódico de burbujas generadas en un microcanal. Al momento de la expansión las burbujas inducen un flujo en el canal y en el colapso, dicho flujo

retorna; suelen construirse con elementos como el difusor/tobera o la válvula Tesla que, dependiendo de la fase en la que se encuentre la burbuja, regulan la dirección de flujo, obteniéndose así un valor neto a la salida del microcanal.

La fabricación de estas MBs es simple debido a que no tienen partes móviles, además la bomba puede ser miniaturizada sin sacrificar la potencia de bombeo y eficiencia. La generación de las burbujas implica calentamiento, por lo que estas MBs no son adecuadas en sistemas donde esto no es deseado (Nisar *et al.*, 2008).

Tsai y Lin (2002) construyeron una MB de burbujas que dirigía el flujo por medio de un elemento difusor/tobera. El microcanal fue construido sobre vidrio por medio de la técnica de grabado profundo de iones reactivos, la cual se describe más a detalle en el apéndice. Las burbujas fueron generadas por ebullición en una cámara de bombeo de 1 mm de diámetro y 50  $\mu\text{m}$  de profundidad por medio de una resistencia de calentamiento a base de aluminio colocada sobre el vidrio. Se diseñaron resistencias de calentamiento con dos formas diferentes, una para generar un grupo de burbujas y otro para generar dos grupos. La velocidad de flujo en esta MB fue medida con velocimetría por seguimiento de partículas (VSP) y el caudal a partir de la velocidad promedio de una burbuja de aire colocada en el canal de bombeo. Con un grupo de burbujas se obtuvo un caudal máximo de 5  $\mu\text{l}/\text{min}$  con una potencia de aproximadamente 1 W, con los dos grupos de burbujas se obtuvo un caudal máximo de 4.5  $\mu\text{l}/\text{min}$  con una potencia de 0.5 W, esta MB se utilizó para el mezclado de fluidos.

Jung y Kwak (2007) también construyeron una MB de burbujas sobre una oblea de silicio, sin embargo ellos utilizaron como resistencias de calentamiento dos microlíneas de polisilicio (el cual presenta mayor resistencia que el aluminio) dopado con óxido de silicio ( $\text{Si}_2\text{O}$ ). Utilizaron dos formas para la cámara de bombeo: una circular de 1 mm de diámetro y otra cuadrada de un 1 mm de longitud. Los caudales obtenidos fueron medidos con el volumen de líquido que fluyó sobre un cilindro graduado y por la medición continua del peso de líquido en el cilindro. Obtuvieron un caudal máximo de bombeo de 6  $\mu\text{l}/\text{min}$  y 8  $\mu\text{l}/\text{min}$  respectivamente.

Zhang *et al.* (2011) desarrollaron una MB de burbujas térmicas generadas sobre una superficie de cromo con láser de onda continua. La MB se construyó sobre vidrio y se encapsuló con PDMS. Sobre el vidrio se depositó una capa de cromo en forma de gota por medio de litografía ultravioleta. Al enfocar el láser sobre el metal, éste se calentó, lo cual indujo la formación de una burbuja de vapor en el líquido en contacto con el metal. En la expansión de la burbuja se indujo un flujo preferentemente hacia la parte ancha de la gota y en el colapso, al apagar el láser, el flujo retornó. Jian *et al.* (2012) mostraron que una de las ventajas de la técnica es que se puede controlar la dirección de flujo en microcanales ramificados simplemente cambiando la posición del láser. Obtuvieron la velocidad de flujo en el microcanal por VSP y a partir de la geometría calcularon el caudal. Obtuvieron valores de 0.12 a 0.48  $\mu\text{l}/\text{min}$ .

Torniainen *et al.* (2012) construyeron y modelaron mediante un análisis por dinámica de fluidos computacional (CFD), una MB inercial actuada por burbujas generadas con una resistencia. El dispositivo para generar flujo consistía en un microcanal conectado en ambas salidas a dos

contenedores de altura considerable. El principio de funcionamiento se basa en el hecho de que cuando una burbuja es creada por ebullición por medio de una resistencia colocada cerca del final de un canal y se expande lo suficientemente rápido, se crea cierta no linealidad en el movimiento del fluido generado, lo que provoca un flujo neto desde el lado más corto del canal (con respecto a la posición de la burbuja) al más largo. El efecto de bombeo se atribuye a la diferencia en la inercia mecánica de las dos columnas de fluido. En el modelo variaron las dimensiones del dispositivo con la finalidad de determinar las de mejor desempeño, así como la viscosidad del fluido para evaluar el efecto de ésta en el caudal bombeado. Utilizaron VIP para caracterizar el flujo experimentalmente y los resultados concordaron de forma muy precisa con la simulación. Obtuvieron caudales de hasta  $1.8 \times 10^{-6}$   $\mu\text{l/pulso}$  de energía. El pulso de energía en este flujo fue de 0.8  $\mu\text{J}$  con duración de 2.5  $\mu\text{s}$

Por otro lado, Kanakaris, *et al.* (2015) presentaron una técnica nueva de bombeo cuyo principio se basó en la expansión de esferas activadas por láser. Utilizaron esferas expandibles formadas por una capa externa termoplástica que encapsulaba a un hidrocarburo líquido presurizado, debido a que estas microesferas tenían bajo coeficiente de absorción, agregaron un agente absorbente para activarlas con láser infrarrojo. Al enfocar el láser sobre la cámara de bombeo de la MB, construida sobre un sustrato de vidrio, las partículas se expandían debido a su presión inicial interna y a la presión adicional debida al calentamiento, lo cual indujo un flujo en el microcanal, al desactivar el láser retornaba una cantidad mínima de líquido. Para medir el caudal utilizaron un algoritmo de análisis de video que seguía nodos predeterminados de acuerdo a su color, a lo largo del canal microfluídico. Obtuvieron valores de hasta 137.4  $\mu\text{l/min}$ .

Liu *et al.* (2016) construyeron una MB actuada por burbujas generadas mediante calentamiento por inducción magnética. La energía era transferida de una bobina plana colocada al exterior de la MB a una placa metálica colocada al centro de la cámara de bombeo por medio del campo electromagnético creado, así, se inducía calentamiento joule por corrientes de Eddy en la placa, lo que generaba las burbujas. Utilizaron un elemento difusor/tobera para regular el flujo. Las ventajas de este sistema es que no había contacto físico entre la placa de calentamiento y el circuito de suministro de energía externo, lo que facilita su implementación en un chip, además obtuvieron caudales de hasta 102  $\mu\text{l/min}$ , un valor relativamente alto comparado con los obtenidos con otras MB de burbujas.

#### **f) De cavitación óptica con el uso de láser pulsado**

La formación y colapso de burbujas de cavitación óptica generadas con láser pulsado es una técnica que también se ha utilizado en los microsistemas de bombeo. El mecanismo de formación de burbujas por esta técnica difiere al de formación de burbujas térmicas. Se basa en la absorción no lineal de luz e ionización en cascada que produce un plasma que a su vez genera una burbuja que se expande, la cual genera en su colapso ondas de choque de algunos GPa de presión de amplitud. Al encontrarse en un ambiente confinado, el colapso de las burbujas trae consigo la formación de una columna de líquido de alta velocidad dirigido hacia la pared donde se genera, esta columna juega un papel importante en el bombeo del flujo. A pesar de que la cavitación óptica con láser pulsado ha sido ampliamente estudiada y se conoce el potencial que la técnica podría tener en los

microsistemas, existe poca investigación sobre su implementación en sistemas de bombeo a escala micrométrica.

Algunos beneficios de esta técnica son que es un mecanismo de generación no invasivo, no se requieren alambres o actuadores y la posición de la creación de las burbujas puede cambiarse moviendo el láser con espejos (Zwaan, 2007). Sin embargo, su costo es elevado debido a la óptica que utiliza.

Zwaan *et al.* (2007) estudiaron la dinámica de burbujas de cavitación con láser pulsado en un sistema microfluídico. Para generar las burbujas utilizaron un láser con pulsos de 6 ns y energía en el rango de 5-50 mJ. Demostraron que con esta técnica se pueden inducir flujos con números de Reynolds altos y en cuestión de milisegundos, lo cual no es común con otros sistemas de bombeo a escala micrométrica. La columna de líquido formada al momento del colapso de la burbuja creó dos vórtices en contrarrotación los cuales indujeron altas velocidades en el líquido. Calcularon la velocidad de flujo por medio de VIP y obtuvieron velocidades de hasta 7.4 m/s.

Dijkink y Ohl (2008) construyeron una MB con burbujas de cavitación óptica. La MB fue construida de PDMS con una cámara de bombeo y un canal a cada lado de la cámara, uno de 6 mm y otro de 0.6 mm. Utilizaron partículas para observar el comportamiento del flujo en los canales. Observaron que cuando la burbuja se expandía, las partículas en el canal superior se aceleraban hacia arriba y las del canal inferior hacia abajo, esto debido a la expansión radial de la burbuja, en cambio cuando la burbuja comenzó a colapsar la mayoría de las partículas en el canal se movieron hacia la cámara pero una distancia menor a la de la expansión de la burbuja. Después de la formación de la burbuja se observó una columna de líquido que dividió a ésta en dos. El movimiento de las partículas prevaleció 20  $\mu$ s después de que la burbuja había desaparecido, esto debido quizás al flujo inducido por la columna de líquido que aun prevalecía. Según el estudio, los parámetros claves para determinar el desempeño de la MB fueron la distancia entre el foco del láser y el canal, el tamaño máximo de la burbuja de cavitación y la geometría de la cámara. Utilizaron un algoritmo estándar de VIP para medir la velocidad de flujo, así como medición manual del desplazamiento de una partícula dentro del canal. Obtuvieron un valor de hasta 40 m/s en la expansión cerca de la burbuja durante el primer microsegundo, aunque el algoritmo de VIP no fue capaz de medir en interfaz de burbuja/líquido. Lograron bombear hasta  $3.2 \times 10^{12}$   $\mu$ l/min.

#### **g) De cavitación óptica con el uso de láser de onda continua**

Como ya se mencionó, la implementación de termocavitación (TC) en microsistemas es muy limitada, sin embargo, Wang *et al.* (2004) demostraron el efecto de bombeo basado en la interacción entre burbujas de cavitación óptica periódicamente generadas con láser de onda continua y un tubo de diámetro milimétrico. Las burbujas fueron generadas por la absorción de luz de un láser de 532 nm sobre una solución de colorante rojo #2. El efecto de bombeo se basó en una interacción sinérgica entre la transmisión constante resultante a partir de las burbujas inducidas por el láser y la dinámica de expansión y colapso periódico de las burbujas cerca del final del tubo. Obtuvieron flujos volumétricos de hasta 9000  $\mu$ l/min. Los resultados generaron validación experimental para realizar modelado matemático.

### **1.3 Microbomba actuada por burbujas de termocavitación como alternativa para los microsistemas**

Como se muestra en la sección 1.2, en las últimas décadas se ha fabricado una gran variedad de MBs, sin embargo aún es necesario continuar en la búsqueda de una que presente características superiores a las existentes, por ejemplo: simpleza, facilidad para integrar en un chip o un rango de los flujos generados más amplio y controlado. Como ya se mencionó anteriormente, la TC es una técnica que ofrece gran potencial para inducir flujos con burbujas a escala micrométrica.

Debido a lo anterior, en el presente trabajo se propone el uso de TC para inducir flujo en un microcanal con forma de una válvula Tesla, que lo dirige en una dirección preferencial. La ventaja del uso de este canal radica en que no se requieren válvulas mecánicas u otros mecanismos para regular el flujo por lo que el dispositivo construido es simple y fácil de integrar en un chip, además Forster *et al.* (1995) mostraron que las válvulas Tesla presentan mejor eficiencia volumétrica que los elementos difusor/tobera.

Como se observa en la sección 1.2, en lo que se refiere a la medición de las velocidades de flujo generadas, en la mayoría de las investigaciones sobre MB se reportan mediciones solo por medio de VIP o velocimetría por seguimiento de partículas (Raffel, 2007), sin embargo, a escala micrométrica la influencia del movimiento browniano es significativa, por lo que para que estas técnicas funcionen se deben adaptar de la escala macroscópica a la microscópica, lo cual implica el uso de altas concentraciones de partículas, las cuales ocasionan algunos problemas como distorsión del flujo generado, entre otros. (Sato, *et. al.* 2003).

Recientemente Almendarez-Rangel (2017) mostró que el uso de POs puede ser una opción atractiva para medir velocidades de flujo a escala micrométrica, pues no interactúan mecánicamente con la materia y presentan las ventajas de tener alta resolución y eliminar la influencia del movimiento browniano. Es por ello que este trabajo también se plantea la posibilidad de caracterizar el desempeño de la MB (perfil de velocidades) usando una metodología basada en POs.

Es importante hacer notar que en las investigaciones sobre MBs presentadas en la sección 1.2, el modelado matemático no era común sino hasta hace algunos años, no obstante reduce los riesgos asociados con la experimentación, pues podrían preverse diversas situaciones en la implementación. Es por ello que este trabajo se centra en el desarrollo de un modelo de simulación con el software de CFD ANSYS Fluent que describe el comportamiento de la MB propuesta.

El objetivo de dicho modelo es caracterizar teóricamente el campo de velocidades y el caudal generados en diferentes diseños de microcanales con la geometría de la válvula Tesla (usada para regular el flujo en una dirección preferencial). Además, utiliza como condición inicial datos experimentales de la velocidad de la pared de una burbuja de TC. De esta forma se obtiene el diseño con el mejor desempeño para llevarlo a la práctica.



## CAPÍTULO II. La termocavitación como alternativa para inducir flujos a escala micrométrica y el uso de pinzas ópticas para medir las velocidades de flujo inducidas

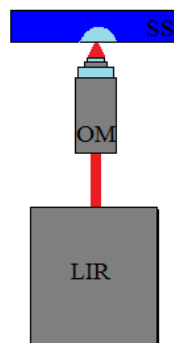
En este capítulo se describe el mecanismo de formación y colapso de burbujas por medio de termocavitación (TC), que se propone como alternativa para inducir flujo en la microbomba (MB) propuesta en el capítulo I, además se discuten algunos trabajos que han ayudado a entender mejor la dinámica de las burbujas generadas. Así mismo, se detalla el funcionamiento teórico de la MB. Además, se presenta la física detrás de un sistema de pinzas ópticas (PO), las cuales se sugieren como alternativa para caracterizar experimentalmente las velocidades de flujo generadas por la MB. Finalmente, se describe el arreglo experimental propuesto para la construcción y caracterización a futuro de la MB.

### 2.1 Termocavitación

La TC se define como la formación y colapso periódico de burbujas por medio del uso de láser de onda continua. Consiste en enfocar un haz láser de onda continua sobre un fluido que absorba fuertemente en la longitud de onda del láser. La luz absorbida sobrecalienta al líquido arriba de su temperatura de ebullición en un periodo de tiempo de microsegundos a milisegundos, dependiendo de la potencia del láser. Una vez que el líquido es sobrecalentado, se vuelve inestable con fluctuaciones de densidad aleatorias y tiene lugar una transición de fase explosiva a vapor, lo que ocasiona la formación de una burbuja de vapor que se expande rápidamente. Eventualmente la burbuja colapsa produciendo una fuerte onda de choque, que genera campos acústicos fuertes (Rastopov y Sukhodolsky, 1987)

En el esquema de la figura 2.1 se observa un arreglo experimental que muestra la formación de burbujas de TC sobre una solución saturada (SS) de nitrato de cobre,  $Cu(NO_3)_2$  por medio del uso de un láser infrarrojo (LIR). Se utiliza un objetivo de microscopio (OM) para enfocar la luz.

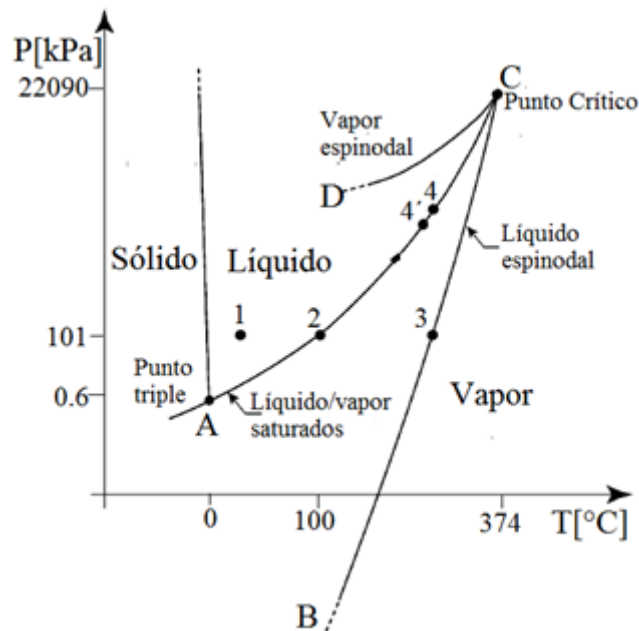
Rastopov et al. (1987) fueron quienes describieron por primera vez el fenómeno de TC, desde entonces ha habido algunos intentos por entenderlo mejor (Rastopov y Sukhodolsky, 1990; Korneev y Ramos-Garcia, 2010; Padilla-Martinez, et al., 2013; Padilla-Martínez *et al.*, 2014; Ramírez San Juan, *et al.*, 2015)



**Figura 2.1** Formación de burbujas de TC

### 2.1.1 Mecanismo físico de formación de burbujas de TC

Para entender el fenómeno de TC, es importante analizar lo que sucede cuando el agua se sobrecalienta, para esto es necesario recurrir al diagrama de fases del agua mostrado en la figura 2.2. En dicho diagrama se observa el comportamiento de la presión en función de la temperatura para un volumen específico de agua dado. La letra A, representa el punto triple en el cual coexisten los estados sólido, líquido y gaseoso. Corresponde a una temperatura  $T_c=374.14^\circ\text{C}$  y una presión  $P_c=22,090\text{ kPa}$ . La línea AC es la línea líquido/vapor saturados o también conocida como línea binodal. Termodinámicamente, los potenciales químicos de las dos fases coexistentes sobre esta línea son iguales. La curva BCD es la línea espinodal y representa el límite de estabilidad intrínseca de las fases líquido o vapor. La línea CD es la línea de vapor espinodal y representa el límite al cual el vapor metaestable puede ser subenfriado; la línea BC es la línea de líquido espinodal y representa el límite al cual el líquido metaestable puede ser sobrecalentado. Ambas líneas espinodales terminan en el punto crítico C, arriba del cual no es posible hacer distinción termodinámica entre las fases líquido y vapor (Vogel y Venugopalan, 2003).



**Figura 2.2.** Diagrama de fases del agua (tomada y adaptado de Vogel y Venugopalan, 2003)

En el diagrama también hay marcados varios puntos de interés. El punto 1 corresponde a un estado líquido bajo condiciones normales de presión y temperatura ( $T_1=25^\circ\text{C}$  y  $P_1=101\text{ kPa}$ ); el punto 2 es un estado de líquido saturado a presión atmosférica, es decir, el punto de ebullición del agua ( $T_2=100^\circ\text{C}$  y  $P_2=101\text{ kPa}$ ); el punto 3 corresponde a la localización de la línea espinodal a presión ambiente ( $T_3=305^\circ\text{C}$  y  $P_3=101\text{ kPa}$ ). Este último punto es de gran importancia para entender TC, ya que calentar arriba de la temperatura de ebullición sin que haya ebullición es lo que provoca el fenómeno de TC (Padilla-Martínez *et al.* 2014).

Si se enfoca un láser de onda continua sobre una solución que absorbe fuertemente en la longitud de onda del láser, la velocidad de deposición de energía volumétrica provista por la radiación láser

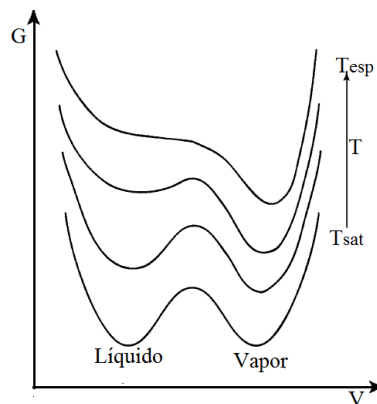


es más rápida que la velocidad de energía consumida por vaporización y ebullición normal, por lo que la solución es llevada a un estado metaestable de sobrecalentamiento. El líquido permanece en estado metaestable hasta que la temperatura espinodal es alcanzada en el punto 3.

La transformación del líquido sobrecalentado (metaestable) a un estado en equilibrio de una mezcla de fases (formación de burbujas de TC) puede involucrar dos tipos de transformación: nucleación homogénea de burbujas y descomposición espinodal. A estos procesos de transición de fase colectiva se les denomina “explosión de fase”.

### a) Transformación de fase espinodal

A la temperatura espinodal el límite de estabilidad es violado y el líquido se somete a descomposición espinodal, un proceso espontáneo por el cual un líquido termodinámicamente inestable regresa al equilibrio. La característica única de la temperatura espinodal se puede observar en la figura 2.3, que muestra la energía libre de Gibbs como función del volumen específico a presión ambiente. Para condiciones de saturación de equilibrio ( $T = T_{sat}$ ), la energía libre de Gibbs presenta dos mínimos de igual magnitud localizados en los volúmenes específicos correspondientes a los estados de líquido y vapor saturados. Para temperaturas mayores que  $T_{sat}$ , el estado vapor es favorecido, por lo que el mínimo local correspondiente al volumen específico del vapor está más abajo que el mínimo local correspondiente al estado líquido. La presencia del mínimo local correspondiente al estado líquido indica que éste, y no el estado global, permanece en un estado metaestable, por lo que, la transición del estado líquido al vapor requiere que se supere una barrera de energía libre. Cuanto más cerca se este de la  $T_{esp}$  y más lejos de  $T_{sat}$ , el mínimo local para el líquido será más tenue y por lo tanto habrá una barrera de energía libre menor a superar. A la temperatura espinodal, el mínimo de la energía de Gibbs correspondiente a la fase líquida desaparece, por lo que el líquido sobrecalentado se vuelve inestable y la transición a vapor por descomposición espinodal ocurre de forma espontánea.



**Figura 2.3.** Energía libre de Gibbs como función del volumen específico para una sustancia pura (tomada y adaptada de Vogel y Venugopalan, 2003)

De regreso al diagrama de la figura 2.2, la deposición de una cantidad de energía suficiente para producir descomposición espinodal primero va de 1→3. A continuación, comienza la etapa de descomposición espinodal con una transición isocórica del punto 3 al punto 4', el cual se ubica en

la región de mezcla de fases que poseen la misma entalpía. En esta etapa, el agua sobrecalentada se relaja espontáneamente separándose en una mezcla de fases en equilibrio de líquido y vapor (burbuja de vapor) saturados, a una presión muy cercana a la presión de saturación correspondiente a la temperatura espinodal (punto 4,  $T_4=305^\circ\text{C}$  y  $P_4=9200\text{kPa}$ ), por lo que este proceso de relajación involucra un incremento imprevisto de presión. Una vez que la burbuja de vapor alcanza una región más fría colapsa rápidamente creando una onda de choque hidráulico (Vogel y Venugopalan, 2003).

### b) Transformación de fase por nucleación homogénea de burbujas

El proceso de nucleación homogénea también es un mecanismo involucrado en la formación de burbujas de TC cuando el agua es sobrecalentada hasta el límite espinodal, y se refiere a la formación espontánea de burbujas de vapor dentro del líquido, únicamente a partir de fluctuaciones termodinámicas, es decir, no es catalizada por la presencia de impurezas o gas disuelto. Mientras que la formación de dichos núcleos de vapor es espontánea, su crecimiento no lo es, y depende fuertemente de la temperatura de sobrecalentamiento (Oxtoby, 1992).

La teoría de nucleación clásica predice la energía necesaria para la formación de un núcleo de radio  $r$ , que se genera espontáneamente en forma de una pequeña burbuja de vapor como resultado de fluctuaciones de densidad en la fase líquida metaestable. De acuerdo a esta teoría, la energía  $W$  necesaria para formar dicho núcleo está dada por:

$$W = \Delta G_v * V + \gamma * S = \Delta G_v * \frac{4}{3}\pi r^3 + \gamma * 4\pi r^2 \quad (2.1)$$

Esta ecuación consta de dos términos. El primer término representa el trabajo realizado sobre o por el sistema, donde,  $\Delta G_v = G_g - G_l$ , es el cambio en energía libre de Gibbs por unidad de volumen ( $G_v$ ) y  $V$  es el volumen de la burbuja.  $\Delta G_v$  corresponde a la diferencia entre la energía libre del vapor ( $G_g$ ) y la del líquido ( $G_l$ ). A la temperatura de ebullición,  $\Delta G_v = 0$  y las dos fases están en equilibrio ( $G_g = G_l$ ). Cuando la temperatura incrementa,  $\Delta G_v < 0$ , lo que ocasiona que la energía del sistema disminuya y ocurra una transformación de fase de líquido a vapor. Por esta razón, a elevadas temperaturas, la fase vapor es más estable y tiene la menor energía libre de Gibbs ( $G_v < G_l$ ). El segundo término indica la energía que se debe depositar y almacenar en la superficie de la burbuja, es decir la contribución de superficie, donde  $\gamma$  es la tensión superficial y  $S$  corresponde a la superficie de la burbuja.

La figura 2.4 muestra la variación en la energía de nucleación,  $W$ , como función del tamaño de la burbuja de radio,  $r$ .

Como ya se mencionó, dicha energía corresponde a la suma de dos términos: la energía de superficie absorbida (línea verde) y la energía de volumen liberada (línea azul). Como resultado, la energía de nucleación exhibe un valor máximo, que puede ser calculado bajo la siguiente condición:

$$\frac{\partial W}{\partial r} = 0, \quad (2.2)$$

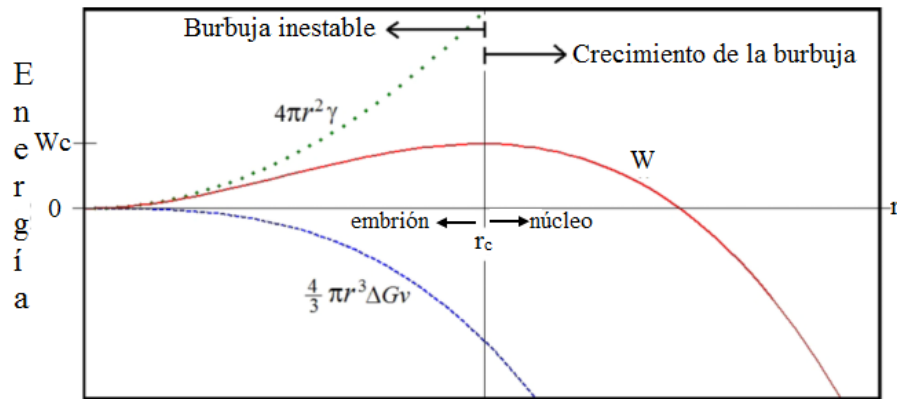
A partir de esta condición se puede obtener el valor máximo de energía requerida para formar una burbuja de radio crítico  $r_c$ :

$$r_c = -\frac{2\gamma}{\Delta G_v}, \quad (2.3)$$

$$W_c = \frac{16}{3}\pi \frac{\gamma^3}{\Delta s \Delta G_v^2}, \quad (2.4)$$

donde  $\Delta s$  es el cambio de entropía del sistema.

El pico de la curva es la barrera termodinámica de nucleación, y representa el trabajo reversible mínimo para formar una burbuja de radio crítico. Si el radio es menor al radio crítico, la burbuja será inestable y desaparecerá, pero si se alcanza el radio crítico, la burbuja será estable y crecerá.



**Figura 2.4.** Energía de nucleación como función del radio de la burbuja (tomada y adaptada de Padilla-Martinez et al. 2014)

La mayoría de las teorías de nucleación homogénea relacionan  $W_c$  con la energía cinética de las moléculas, es decir  $k_B T$ , donde  $k_B$  es la constante de Boltzmann. Esta relación está dada en términos del número de Gibbs,  $G_b = \frac{W_c}{k_B T}$ . La velocidad de nucleación,  $J$ , que es el número de núcleos formados en una unidad de volumen por unidad de tiempo, está relacionada con el número de Gibbs de la siguiente forma:

$$J = J_0 \exp[-G_b], \quad (2.5)$$

donde  $J_0$  es un factor que representa la velocidad de difusión (antes de cambiar de estado) de las moléculas a través de una distancia del orden de la separación entre las partículas del líquido y no depende del radio crítico. La teoría de nucleación clásica es representada por las ecuaciones 2.1 y 2.5 y predice el límite de sobrecalentamiento para líquidos, siendo 306°C para el agua a presión atmosférica.

Es importante hacer notar la principal diferencia entre la nucleación de burbujas y la descomposición espinodal: la descomposición espinodal no es un proceso activado y no está impedido por la presencia de una barrera de energía. Esto resulta en una transición de fase con un carácter fundamentalmente diferente. Mientras que la nucleación de burbujas resulta en la

formación de grandes fluctuaciones de densidad en una pequeña extensión espacial, la descomposición espinodal involucra el crecimiento espontáneo rápido de fluctuaciones de densidad pequeñas que se extienden sobre grandes escalas espaciales, siendo el resultado un proceso que engloba el volumen total de líquido inestable.

Los mecanismos de la transformación de fase explosiva a vapor que ocurren en TC, descritos arriba, es decir la descomposición espinodal y la nucleación homogénea, corresponden al caso extremo en el cual no hay núcleos de vapor presentes en el líquido, o el calentamiento ocurre extremadamente rápido. Sin embargo, puede ocurrir que haya núcleos heterogéneos presentes antes de la irradiación y/o un número significativo de núcleos homogéneos se forman y crecen durante el calentamiento con láser, de tal forma que la velocidad de energía consumida por la formación y crecimiento de los núcleos es comparable, pero no igual, a la velocidad de deposición de energía provista por la radiación láser. Esto da lugar a un proceso intermedio entre el camino del punto 1 al 4' descrito anteriormente y ebullición normal. La fase de calentamiento no ocurre de forma isobárica, sino que es acompañada por un incremento finito en la presión. Por lo que la condición espinodal es alcanzada en un punto entre el punto 3 y el punto crítico C. Esto ocasiona que la explosión de fase resultante ocurra a temperatura y presión más elevadas, lo que provoca que el salto de presión asociado con la separación de fases sea menos severa. A este proceso intermedio se le conoce como ebullición explosiva.

### **2.1.2 Dinámica de burbujas de termocavitación**

Desde que Rastopov *et al.* (1987) describieron por primera vez el fenómeno de TC, ha habido varios intentos por entender la dinámica de las burbujas creadas por medio de éste fenómeno. De la misma forma, hay algunos trabajos en áreas de física y medicina principalmente, que plantean la generación de dichas burbujas para aplicaciones novedosas (Ramirez-San-Juan *et al.*, 2011; Berrospe-Rodriguez *et al.*, 2016).

Después de observar por primera vez el fenómeno de TC, Rastopov *et al.* (1990), estudiaron los campos acústicos generados en soluciones binarias etanol-colorantes acuosos al someterlos a TC. Observaron que la eficiencia de transformación de luz en sonido está limitada por pérdidas térmicas, debidas por ejemplo, a la convección natural. A pesar de esto, también observaron que la TC es una fuente de fuertes campos acústicos.

Ramírez-San-Juan *et al.* (2010) también estudiaron la dinámica de burbujas de TC. Las burbujas fueron creadas con láser infrarrojo de 975nm de longitud de onda sobre una SS de  $Cu(NO_3)_2$  y encontraron lo siguiente: En sus experimentos las burbujas de TC siempre estuvieron adheridas a la superficie del contenedor del líquido donde se formaban, por lo que adquirirían forma semiesférica. Sugirieron que la formación de burbujas esféricas podría ocurrir mediante el uso de un láser de longitud de onda en el visible o con concentraciones diferentes de  $Cu(NO_3)_2$ .

Encontraron que la velocidad de la pared de las burbujas disminuía lentamente a partir de su valor inicial (17 m/s) cuando se encontraba en expansión. La expansión se detuvo a los 43  $\mu$ s aproximadamente y entonces comenzó el colapso, en esta fase hubo una aceleración alcanzándose velocidades de hasta 70 m/s. No se encontró indicativo de rebote de la burbuja. Una vez que la

burbuja colapsó una fuerte onda de choque se emitió. La amplitud máxima de presión de dicha onda alcanzó 0.7 Mpa.

Finalmente observaron que la velocidad de deposición de energía incrementaba con la intensidad del láser, es decir el tiempo que tomaba alcanzar la temperatura máxima disminuía, además la burbuja creada con la potencia más baja producía el radio más grande y por lo tanto las presiones de las ondas de choque eran las más altas.

Padilla-Martinez *et al.* (2013) realizaron un modelo de propagación de la presión emitida por la onda de choque después del colapso de la burbuja. Dicho modelo mostró que si se enfoca la onda de presión en la interfaz líquido-aire, se genera la evolución de columnas de líquido llamadas *jets* (chorros de agua). Controlaron la relación de aspecto de las columnas de líquido por medio de ajuste del tamaño de la burbuja y la posición del foco del haz.

Padilla-Martinez *et al.* (2014) estudiaron el volumen (SS de  $Cu(NO_3)_2$ ) sobrecalentado por irradiación de láser de onda continua a diferentes potencias, mediante simulación con el Método de los Elementos Finitos. En las simulaciones, el radio de la zona afectada por el calor no iba más allá de 50 y 25  $\mu m$  para potencias de 62 y 124 mW respectivamente. Mostraron que al controlar el volumen de líquido sobrecalentado se puede controlar el tamaño de la burbuja de TC.

Ramírez-San-Juan *et al.* (2015) también estudiaron la dinámica de burbujas de TC sobre solución saturada de  $Cu(NO_3)_2$ . Observaron que la amplitud de la onda de choque disminuía exponencialmente con la potencia del láser y que en la generación de multiburbujas, la frecuencia incrementaba directamente proporcional a la potencia del láser. El radio de una de las burbujas que generaron alcanzó hasta 340  $\mu m$  con potencia de 67 mW. El tiempo de expansión de dicha burbuja fue de 50  $\mu s$  y el de colapso de 37  $\mu s$ . Además también observaron que la velocidad de la pared de la burbuja era de 70 m/s aproximadamente para una potencia de 69 mW y de 47 m/s para una potencia de 119 mW, es decir a mayor potencia menor velocidad de la pared de la burbuja. No observaron rebote de la burbuja.

Finalmente, es importante mencionar que el estudio de TC ofrece gran potencial para diversas aplicaciones, por ejemplo, Rastopov *et al.* (1987) proponen el uso de los campos acústicos generados, para aplicaciones en aceleración de fluidos, J.C. Ramirez-San-Juan, *et al.* (2011) proponen la fabricación de microorificios por medio de TC para aplicaciones como fuentes de luz micrométricas, en interferómetros de difracción de punto o para filtros espaciales y Berrospe-Rodríguez *et al* (2016) proponen el uso de las columnas de líquido generadas con TC para aplicaciones en inyecciones sin aguja. Como ya se mencionó anteriormente, en este trabajo se propone utilizar la expansión y colapso periódico de las burbujas de TC como mecanismo de bombeo en una MB.

### **2.1.3 Funcionamiento de la microbomba propuesta**

El funcionamiento de la MB propuesta se plantea a partir de la expansión y colapso periódico de burbujas de TC en un canal con geometría de válvula Tesla, como el mostrado en la figura 2.5. Funciona de la siguiente forma: se llena el canal con una SS de  $Cu(NO_3)_2$ . A continuación se

enfoca un haz láser de 975 nm en la cámara de bombeo (CB) ubicada al centro del canal. El láser calienta a la solución y se generan y colapsan burbujas de TC.

En la expansión de las burbujas la resistencia al flujo en el canal es mayor en el lado derecho (S2), ya que en esta dirección hay corrientes que fluyen a lo largo de diferentes rutas (a través de las ramas) en diferentes direcciones, y esto provoca que se anulen entre sí, por lo que el flujo va preferentemente hacia la salida del lado izquierdo (S1), pues en esta dirección la posición de las ramas impide el flujo a través de ellas, lo que provoca que el flujo sea directo y vaya únicamente por el centro del canal. Por el contrario, en el colapso, cuando el flujo tiende a retornar a la cámara del canal, la resistencia al flujo ahora es mayor en el lado izquierdo, por lo que el flujo del lado derecho es el que retorna preferentemente. La expansión y colapso de las burbujas es un proceso cíclico que permanece mientras el láser se encuentre encendido, por lo que el comportamiento del canal permite que el flujo vaya siempre preferentemente en dirección hacia S1 y después de un periodo de tiempo se genere un flujo neto en esta dirección.



**Figura 2.5** Geometría del canal propuesto para la MB

Experimentalmente, los extremos de los canales deben contar con perforaciones que se acoplan con mangueras mediante conectores para que el flujo tenga libertad de fluir.

## 2.2 Pinzas ópticas

Las POs son una herramienta que utiliza las fuerzas ejercidas por un haz láser Gaussiano fuertemente enfocado para mantener atrapada una partícula dieléctrica con índice de refracción mayor al del medio en el que se encuentra embebida. Las fuerzas ejercidas sobre la partícula se generan a partir del cambio de momento que sufren los fotones que inciden sobre ella al estar situada cerca del punto de enfoque del láser. El tamaño de la partícula que se puede atrapar con una PO varía entre 25 nm y 10  $\mu\text{m}$  (Ashkin, Dziedzic, Bjorkholm y Chu, 1986).

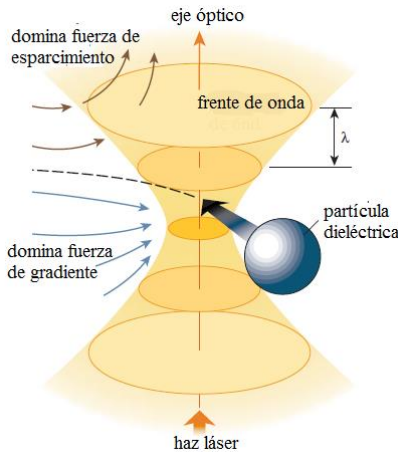
Ashkin *et al.* fueron quienes sentaron las bases de la manipulación óptica entre 1970 y 1980 (levitación, aceleración y atrapamiento de partículas con dos haces láser), para entonces el láser ya se había descubierto y era una herramienta bien establecida. Las altas intensidades producidas por el láser permitieron que las fuerzas ópticas fueran estudiadas más fácilmente. Sin embargo, fue hasta 1986 que demostraron el funcionamiento de las POs (atrapamiento con un solo haz láser). Desde su descubrimiento, las POs se han utilizado en una amplia gama de aplicaciones, sobre todo en el área de la biología y la física (Grier, 2003).

### 2.2.1 Fuerzas de atrapamiento ejercidas por una pinza óptica

Las fuerzas que ejerce una PO sobre la partícula atrapada se conocen como fuerza de esparcimiento y fuerza de gradiente. La fuerza de esparcimiento es proporcional a la intensidad del láser y apunta en dirección a la propagación de la luz incidente (dirección axial) y la fuerza de gradiente es

proporcional al gradiente de la intensidad del láser, apunta en dirección del gradiente de intensidad (dirección radial) (Ashkin *et al.*, 1986).

La fuerza de gradiente forma un potencial de atrapamiento para la partícula y la de esparcimiento la empuja fuera de la trampa, por lo que un atrapamiento estable requiere que la fuerza de gradiente domine sobre la fuerza de esparcimiento (figura 2.6).



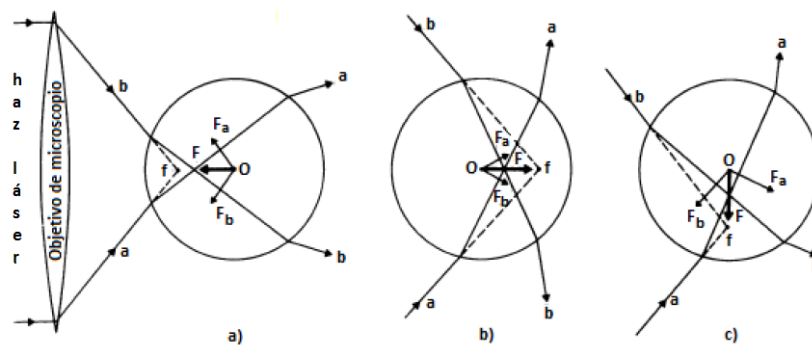
**Figura 2.6.** Fuerzas ejercidas por una pinza óptica (tomada y adaptada de Grier, 2003)

Para explicar y calcular teóricamente las fuerzas que ejerce una PO sobre una partícula atrapada existen tres regímenes. Si la partícula es mucho más grande que la longitud de onda del láser de atrapamiento, (usualmente  $R > 10\lambda_0$ , donde  $R$  es el radio de la partícula y  $\lambda_0$  es la longitud de onda del láser en el vacío) las fuerzas se pueden calcular por medio de la aproximación de rayos ópticos. Si la partícula es mucho más pequeña que la longitud de onda del láser de atrapamiento ( $R < \lambda_0/10$ ), ésta puede ser aproximada como un dipolo, por lo que las fuerzas ópticas sobre ella se pueden calcular analíticamente por medio de la teoría de esparcimiento de Rayleigh. Finalmente, si el tamaño de la partícula es comparable con la longitud de onda del láser ( $R \sim \lambda_0$ ), no es apropiado usar la aproximación de Rayleigh o rayos ópticos por lo que se debe que utilizar la teoría electromagnética de la luz. Para atrapamiento de partículas homogéneas e isotrópicas se puede utilizar la teoría generalizada de Lorenz-Mie, sin embargo dicha teoría es muy compleja (Li, 2013).

El régimen de rayos ópticos u óptica geométrica proporciona una forma simple de entender cualitativamente el fenómeno de atrapamiento. En este régimen el haz de luz total se descompone en rayos individuales, cada uno con intensidad, dirección y estado de polarización apropiados. Estos rayos se propagan en línea recta en un medio de índice de refracción uniforme. Cada rayo representa una onda electromagnética plana (Ashkin, 1992).

En la figura 2.7 se observa un esquema de dos rayos altamente enfocados (a y b) que inciden sobre una partícula con índice de refracción mayor al del medio en el que se encuentra. Si se desprecian las reflexiones en la superficie, la partícula estará atrapada en el punto focal del láser y la fuerza neta ejercida sobre ella será cero. Ahora bien, si la partícula (con centro en el punto O) se mueve

ligeramente adelante del punto focal (figura 2.7 a), cada rayo se refractará dos veces, al entrar y salir de la partícula, lo cual generará un cambio neto de dirección y con ello un cambio de momento (en dirección al movimiento de la partícula). Esto implica la generación de las fuerzas  $F_a$  y  $F_b$  cuyo vector suma  $F$  (conocido como fuerza de gradiente) es la fuerza de restauración de los desplazamientos axial y transversal de la partícula a partir del punto focal. La fuerza  $F$  producida sobre la partícula por la refracción de los rayos, tratará de moverla hacia el punto de enfoque del haz, que es la posición de la partícula donde la fuerza neta es cero. Algo similar sucede si la partícula se encuentra sobre el eje de propagación pero ligeramente atrás del punto de enfoque (figura 2.1b) o si se encuentra en el plano focal pero movida ligeramente en dirección transversal (figura 2.1c). Por lo tanto, un láser altamente enfocado forma una trampa estable en 3D.



**Figura 2.7.** Análisis cualitativo del atrapamiento de partículas dieléctricas por medio de óptica geométrica (tomada y adaptada de Ashkin, 1992)

En el análisis anterior las reflexiones en la superficie se desprecian, sin embargo éstas deben ser consideradas ya que juegan un papel importante. Los fotones reflejados por la superficie de la partícula, ejercen una fuerza en dirección a la propagación del láser, dicha fuerza se conoce como fuerza de esparcimiento y como ya se mencionó previamente, para que haya atrapamiento estable esta fuerza debe ser menor a la fuerza de gradiente (Li, 2013).

Cualitativamente la aproximación de Rayleigh y la teoría de Lorenz-Mie proporcionan los mismos resultados que la óptica geométrica, es decir existen dos fuerzas que actúan sobre una partícula atrapada con una PO, la fuerza de gradiente y la fuerza de esparcimiento. Sin embargo, existe una zona en la cual la fuerza neta cuantitativa ejercida por una PO sobre una partícula es la misma en los tres regímenes. Dicha fuerza es proporcional a la distancia entre la partícula y punto focal de la trampa, por lo que una PO se puede caracterizar dentro de un régimen de desplazamientos pequeños como un resorte con cierta constante de rigidez en cada una de las direcciones de desplazamiento de la partícula. Dicha constante de rigidez se representa como  $k_i$  con  $i = x, y, z$  (Almendarez-Rangel, 2017).

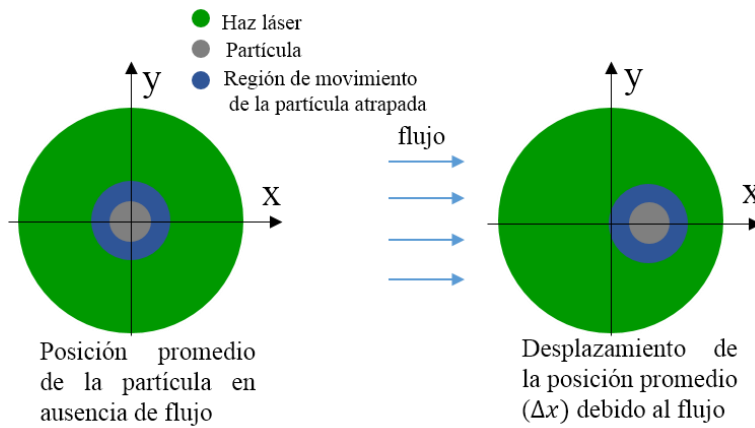
### 2.2.2 Determinación de velocidades de flujo por medio de pinzas ópticas

A continuación se describe brevemente la caracterización de velocidades de flujo a escala micrométrica por medio de una PO. Una caracterización así se plantea como posible alternativa para medir las velocidades de flujo experimentales de la MB de TC.



Una partícula atrapada en una PO presenta movimiento Browniano. Este movimiento se debe a las fluctuaciones en la energía térmica del sistema y se encuentra confinado en una región tridimensional cerca del centro del potencial de atrapamiento creado por la PO. La partícula sigue una distribución de posiciones Gaussiana debido al perfil del láser. Es posible considerar que bajo dicha distribución, la posición promedio de la partícula coincide con el centro del potencial si se considera un número suficientemente grande de datos (Almendarez-Rangel, 2017).

Cuando una partícula se encuentra inmersa en un flujo con número de Reynolds bajo, se ejerce una fuerza de arrastre sobre ella. Debido a esto, si dicha partícula es atrapada con una PO, su posición promedio en la dirección del flujo varía un poco con respecto a la posición de la partícula atrapada cuando no hay flujo (figura 2.8). La diferencia de las posiciones promedio de la partícula atrapada con y sin flujo  $\Delta x$  (si el flujo es en la dirección x) se puede utilizar para determinar la velocidad de flujo en la vecindad de la partícula.



**Figura 2.8.** Desplazamiento de la posición promedio de la partícula por efecto de flujo inducido en el medio de atrapamiento (tomada y adaptada de Almendarez-Rangel, 2017).

Si la fuerza que ejercen las POs sobre la partícula atrapada se modela como un resorte entonces se tiene que:

$$f_x = -k_x \Delta x, \quad (2.6)$$

donde  $f_x$  es la fuerza de atrapamiento en la dirección del flujo,  $k_x$  la constante de rigidez de la PO también en la dirección del flujo y  $\Delta x$  la diferencia de las posiciones promedio de la partícula con y sin flujo. A partir de la ecuación 2.6 y mediante la ley de Stokes que describe la fuerza de arrastre sobre una partícula inmersa en un flujo con Reynolds bajo:

$$f_{x \text{ arrastre}} = \gamma u, \quad (2.7)$$

donde  $\gamma$  es el coeficiente de arrastre y  $u$  la velocidad del flujo, es posible calcular la velocidad de una partícula inmersa en el medio igualando las ecuaciones 2.6 y 2.7 y despejando  $u$ :

$$u = \frac{k_x \Delta x}{\gamma} \quad (2.8)$$

La determinación experimental de las velocidades de flujo con POs implica la determinación de la constante de rigidez, la posición promedio de la partícula atrapada con y sin flujo y el coeficiente de arrastre, el cual está dado por:

$$\gamma = 6\pi\eta a\varepsilon, \quad (2.9)$$

donde  $\eta$  es la viscosidad del medio,  $a$  es el radio de la partícula y  $\varepsilon$  es un factor de corrección debido a la pared que se puede calcular fácilmente por medio de la ley de fάxen (Almendarez-Rangel, 2017).

La posición promedio de la partícula se determinar fácilmente por medio de videomicroscopía y la constante de rigidez se puede determinar por varios métodos, el que aquí se propone se describe en la sección siguiente.

Las ventajas del uso de POs para determinar velocidades de flujo a microescala son que no interactúan mecánicamente con la materia y eliminan la influencia el movimiento Browniano, siempre que las posiciones promedio de las partículas se obtengan a partir de muestras estadísticamente grandes.

### 2.2.3 Calibración del sistema de pinzas ópticas

La calibración de una PO consiste en el cálculo de su constante de rigidez, la cual depende de la longitud de onda, potencia del láser, tamaño e índice de refracción de la partícula atrapada e índice de refracción del medio circundante. Existen muchos métodos para determinar experimentalmente la constante de rigidez de una PO. El método que se propone en este trabajo es el método de equipartición, ya que es un método relativamente sencillo de implementar (Baek y Hwang, 2007).

En la determinación de la constante de rigidez por medio del método de equipartición se supone que la partícula se encuentra atrapada en un pozo de potencial armónico que depende de la potencia del láser:

$$U_{Pot} = \frac{1}{2}k_x \langle x^2 \rangle, \quad (2.10)$$

donde  $k_x$  es la rigidez de la trampa óptica en la dirección de interés y  $\langle x^2 \rangle$  es la varianza de la posición promedio. Además, se considera que la energía que permite a la partícula moverse dentro del pozo de potencial proviene de la energía térmica proporcionada por las moléculas del solvente que golpean a la partícula continuamente. Por el teorema de equipartición de la física estadística, dicha energía térmica equivale a

$$U_{Term} = \frac{1}{2} k_B T, \quad (2.11)$$

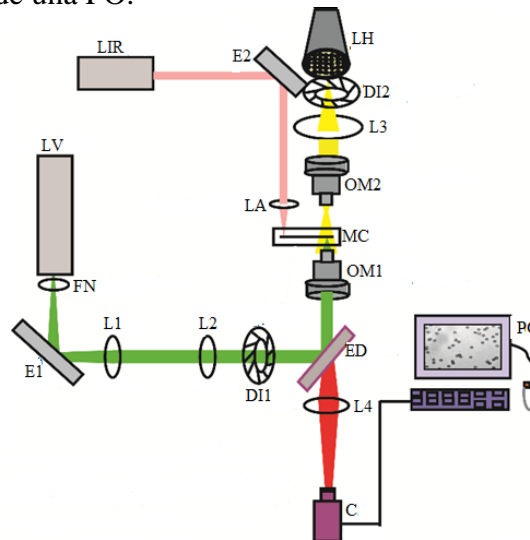
donde  $k_B$  es la constante de Boltzman y  $T$  la temperatura. Si se igualan las ecuaciones 1 y 2 se obtiene una expresión para  $k_x$ :

$$k_x = \frac{k_B T}{\langle x^2 \rangle}, \quad (2.12)$$

Para obtener experimentalmente la constante de rigidez a partir de la ecuación 2.12, es necesario obtener la posición promedio de la partícula atrapada, lo cual, como ya se mencionó previamente, se puede realizar por videomicroscopía.

### 2.2.4 Arreglo óptico experimental propuesto

Con base a lo expuesto en el presente capítulo, la figura 2.9 muestra el arreglo óptico experimental que se propone para la inducción de flujo en la MB de TC planteada previamente, así como su caracterización por medio de una PO.



**Figura 2.9** Arreglo óptico experimental propuesto

Este arreglo consta de tres caminos ópticos. El primer camino indica la trayectoria del haz de atrapamiento. Es generado por un láser (LV) con longitud de onda de 532 nm, el cual se enfoca en el microcanal (MC) usando un objetivo de microscopio 100X (OM1) de alta apertura numérica. El láser es dirigido hacia la muestra por medio del espejo E1. Se utilizan además dos lentes (L1 y L2) para formar un telescopio y aumentar el tamaño de mancha del láser, esto con la finalidad de sobrellenar la pupila de entrada del OM1 y mejorar el atrapamiento. El segundo camino óptico es el de formación de imágenes. Utiliza una lámpara de halógeno para iluminar al MC y formar imagen con el mismo objetivo de microscopio usado para el atrapamiento, la imagen final es capturada usando una cámara CCD (C) y una lente (L4). Este camino también utiliza una lente (L3) y un objetivo de microscopio 10X (OM2) para condensar la luz proveniente de la lámpara en el MC. Finalmente, el tercer camino óptico es el de formación de burbujas y utiliza un láser infrarrojo (LIR), con longitud de onda de 975 nm, el cual se enfoca en la cámara de bombeo del MC donde se forman las burbujas de TC. Este camino óptico utiliza un espejo para dirigir el haz (E2) y una lente asférica (LA) para enfocar la luz en el MC.

Este arreglo óptico también utiliza un filtro neutro (FN) que atenúa la luz del láser con un factor de 10 para asegurar su estabilidad y dos diafragmas de iris para regular la cantidad de luz incidente. Así mismo, utiliza un espejo dicróico con corte en 605 nm, que cumple la función de reflejar la luz proveniente del láser de atrapamiento y al mismo tiempo transmitir la componente roja de la fuente de iluminación.



## **CAPÍTULO III. Modelado matemático bidimensional y tridimensional del flujo inducido por la microbomba**

Actualmente el modelado matemático computacional es de gran importancia en el desarrollo de prácticamente cualquier área de las ciencias exactas y la tecnología, pues puede llegar a proporcionar la confiabilidad y rigor que la investigación científica exige, siempre que se adopten metodologías y herramientas que permitan obtener resultados eficientes y de calidad. La dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es por tanto, una herramienta de gran importancia en el área de mecánica de fluidos, ya que permite desarrollar modelos matemáticos que describen el comportamiento de fenómenos complejos relacionados con flujo de fluidos, a través de la solución numérica de las ecuaciones de conservación de materia, energía y cantidad de momento.

En este capítulo se describe brevemente la simulación de flujos por medio del uso de CFD ANSYS Fluent, así como algunos antecedentes sobre modelos de válvulas Tesla. Finalmente se expone la metodología implementada en el desarrollo del modelo de simulación de la microbomba (MB) actuada por burbujas de termocavitación (TC) descrita en el capítulo II. Para realizar este modelo se utilizó el software de CFD ANSYS Fluent.

### **3.1 Modelado con el software de CFD ANSYS Fluent**

ANSYS Fluent es una herramienta computacional muy poderosa para modelado de flujo de fluidos, transferencia de calor y reacciones químicas en geometrías complejas. Incluye amplias características bien validadas de modelado físico para proporcionar resultados rápidos y precisos sobre un amplio rango de aplicaciones de CFD y problemas multifísica que van desde el flujo de aire sobre el ala de una aeronave a la combustión de un horno, desde columnas de burbujas a plataformas petrolíferas, o desde el flujo de sangre a la fabricación de semiconductores. En esta sección se describe este software de acuerdo a la información contenida en el manual de ANSYS, *ANSYS help*.

#### **3.1.1. Generalidades**

ANSYS FLUENT está escrito en lenguaje C, es así que utiliza la flexibilidad y potencia que ofrece dicho lenguaje, por lo que es posible el manejo de la estructura de datos de forma eficiente.

Para todos los flujos, ANSYS Fluent resuelve las ecuaciones de conservación de masa y momento. Para los flujos que involucran transferencia de calor o compresibilidad, resuelve la ecuación de la conservación de la energía. Para los que involucran mezcla de especies o reacciones, resuelve una ecuación de conservación de especies. También resuelve ecuaciones adicionales de transporte cuando el flujo es turbulento. Estas ecuaciones no tienen solución analítica por lo que son discretizadas y resultas numéricamente.

Existen varios métodos de solución que se utilizan en los códigos de CFD. El que utiliza ANSYS Fluent se conoce como el método de volumen finito. En este método la región de interés es dividida por medio de una malla en pequeñas subregiones llamadas volúmenes de control. A continuación

se integran las ecuaciones que gobiernan el problema en los volúmenes de control individual, con el fin de construir ecuaciones algebraicas para las variables dependientes discretas (desconocidas) como velocidad, presión o temperatura. Finalmente se linealizan las ecuaciones discretizadas y se resuelve el sistema de ecuaciones lineales resultante para obtener valores actualizados de las variables dependientes. Se realizan iteraciones hasta que el valor de las variables converge. Así se obtiene una aproximación de los valores de cada variable en puntos específicos a través del dominio. De esta forma, se deriva una figura completa del comportamiento del flujo.

El desarrollo de modelos en ANSYS Fluent utiliza la interfaz de ANSYS llamada ANSYS Workbench, la cual combina el poder de las herramientas de simulación del núcleo con herramientas necesarias para manipular los proyectos.

### **3.1.2. Metodología general para un análisis de CFD con ANSYS Fluent**

Para desarrollar un buen modelo en Fluent, se deben determinar las características importantes del problema como punto de partida. A continuación, se deben seguir los pasos involucrados en el modelado: determinación de las metas del modelo, creación de la geometría y malla, configuración del *solver* y modelos físicos, computarización y monitoreo de la solución y análisis de resultados.

#### **a) Determinación de las metas del modelo**

Para determinar las metas del modelo es importante establecer los resultados que se buscan y como serán usados, el grado de precisión requerida, la rapidez con la que se desea obtener resultados, el dominio e información conocida y si es posible aproximar el problema a un modelo en 2D o axisimétrico.

#### **b) Creación de la geometría y malla**

Para crear la geometría y malla del problema, se requiere un programa de diseño de geometrías y uno de generación de mallas. El software de ANSYS cuenta con apartados para realizar estas actividades, las cuales se pueden implementar desde la interfaz de ANSYS workbench, sin embargo también es posible generar la geometría y malla del problema con programas independientes.

ANSYS Fluent usa mallas no estructuradas con la intención de reducir la cantidad de tiempo invertido en generarlas, simplificar el modelado de la geometría y el proceso de generación de malla y permitir el modelado de geometrías complejas. En los modelos en 2D es capaz de manejar elementos triangulares, cuadrilaterales, o una combinación de ambos y para modelos en 3D puede manejar elementos tetraédricos, hexaédricos, piramidales, prismáticos y poliédricos, o una combinación de estos.

Cuando se genera la malla del problema se debe considerar el tipo de elementos a utilizar de acuerdo a la complejidad de la geometría y el flujo, el grado de resolución que se requiere en cada región del dominio y la memoria computacional disponible.

### c) Configuración del *solver* y modelos físicos

El *solver* permite resolver las ecuaciones discretizadas del problema. Su configuración involucra importación de la malla, selección del *solver* numérico a utilizar, selección de modelos físicos apropiados, definición de las propiedades del material, de las condiciones de operación y de frontera, asignación de una solución inicial y configuración de los controles del *solver*.

ANSYS Fluent permite elegir entre dos *solvers*: 1) *solver* basado en presión y 2) *solver* basado en densidad. Inicialmente el *solver* basado en presión fue desarrollado para flujos incompresibles, mientras que el *solver* basado en densidad era utilizado para flujos compresibles a alta velocidad; sin embargo, estos *solvers* se han extendido y reformulado para resolver un amplio rango de condiciones de flujo más allá de las de su origen.

En ambos *solvers* el campo de velocidad se obtiene a partir de las ecuaciones de momento. En el enfoque basado en densidad las ecuaciones de continuidad, momento y energía o especies químicas (cuando es necesario) se resuelven simultáneamente. La ecuación de continuidad se utiliza para obtener el campo de densidades mientras que el campo de presión es determinado a partir de la ecuación de estado. Por otro lado, en el enfoque basado en presión, el campo de presión se extrae al resolver una ecuación de presión que se obtiene manipulando las ecuaciones de continuidad y momento. Debido a que las ecuaciones gobernantes son no lineales y están acopladas unas con otras, el proceso de solución con ambos *solvers* involucra iteraciones donde el conjunto completo de ecuaciones es resuelto repetidamente hasta que la solución converge.

Independientemente del método utilizado, ANSYS Fluent resuelve las ecuaciones de conservación de masa y momento que gobiernan el problema, y de energía, turbulencia o especies químicas cuando es necesario. Los dos *solvers* numéricos emplean un proceso de discretización basado en el método de volumen finito (descrito previamente), pero el método usado para linealizar y resolver las ecuaciones discretizadas es diferente.

El **modelo** físico define el tipo de simulación que se desea desarrollar. El modelo que se utiliza en este trabajo es el laminar. Este modelo es adecuado sólo si el flujo es laminar. La transferencia de energía en el fluido se realiza por interacción molecular, es decir, difusión. En el caso de flujos de alta velocidad, el trabajo de los esfuerzos viscosos también puede contribuir a la transferencia de energía.

En la configuración de *solver* de ANSYS Fluente se pueden crear y modificar las **propiedades de los materiales** tanto para sustancias puras como para mezclas. Las sustancias puras pueden ser sólidos, líquidos o gases. Los líquidos o gases se pueden utilizar en los dominios del fluido y los sólidos se pueden usar ya sea para modelos de transferencia de calor o seguimiento de partículas. **Las condiciones de operación y frontera**, también fijadas en la configuración del *solver* se determinan a partir de la información con la que se cuenta acerca del problema. En lo que concierne a la **solución inicial**, es necesario especificar valores iniciales para todas las variables a resolver, antes de que el *solver* comience a trabajar. Los resultados no son afectados por la inicialización. Si la simulación es en estado transitorio, los valores iniciales proveen el campo de flujo al tiempo

correspondiente al inicio de los cálculos de CFD. La configuración de los **controles del solver** permite fijar parámetros de solución común.

#### **d) Computarización y monitoreo de la solución**

Las ecuaciones de conservación discretizadas se resuelven iterativamente. Se requiere un número determinado de iteraciones para obtener la convergencia del problema. La convergencia se alcanza cuando los cambios en la solución de las variables entre dos iteraciones consecutivas son despreciables. La precisión de una solución que converge es dependiente de los modelos físicos usados, la resolución de la malla y la configuración del problema.

#### **e) Análisis de resultados**

El análisis de resultados también conocido como postprocesamiento involucra revisar la solución y extraer los datos útiles. Las herramientas de visualización de ANSYS permiten observar el patrón de flujo completo, así como características de flujo clave. Por otro lado las herramientas de reportes numéricos permiten calcular resultados cuantitativos como fuerzas y momentos, coeficientes de transferencia de calor, cantidades integradas sobre superficies o volúmenes y balances de flujo, entre otros.

El postprocesamiento de los resultados obtenidos en ANSYS Fluent se realiza en el programa general de ANSYS, CFD-Post.

### **3.2. Desarrollo de modelos matemáticos que describen el comportamiento de válvulas Tesla**

Con base en las características de tamaño compacto, fabricación simple y facilidad para integrarse en dispositivos como los *lab on a chip*, que se desean en las MBs, surge la necesidad de implementar en estos elementos, válvulas de estructura simple y de fácil adaptación y manejo.

En este sentido, las válvulas de geometría fija que no tienen partes mecánicas móviles y son capaces de inducir el flujo en una dirección preferencial han emergido en los últimos años como una alternativa atractiva (Abhari *et al.*, 2012; Laser y Santiago, 2004). Existen dos tipos principales de este tipo de válvulas, los elementos difusor/tobera y las válvulas Tesla. A pesar de que estas válvulas inhiben el flujo en cierta dirección, no lo eliminan por completo, por lo que su comportamiento (eficiencia volumétrica) depende fuertemente de la forma y dimensiones específicas de la válvula utilizada. El modelado matemático de este tipo de válvulas permite obtener la geometría óptima para asegurar el mejor desempeño posible para cada caso particular (Lin, Zhao, Guest, Weihs y Liu, 2015)

A diferencia de las válvulas Tesla, los elementos difusor/ tobera han sido ampliamente utilizados para inducir flujo a escala micrométrica (Heng *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2016; Tsai y Lin, 2002). Quizás esto se debe a la simplicidad de la geometría, sin embargo, existen algunas investigaciones donde se modela el comportamiento de diseños específicos de válvulas Tesla y elementos difusor/tobera, que muestran que las válvulas Tesla presentan mejor desempeño que dichos



elementos (Forster, Bardell, Afromowitz, Sharma y Blanchard, 1995; Forster y Williams, 2002; Lin *et al.*, 2015; Morganti y Pignatelli, 2005)

Forster *et al.* (1995) presentaron el modelado, construcción y caracterización de una válvula Tesla de dos ramas con dimensiones de 114  $\mu\text{m}$  de ancho del canal, 30  $\mu\text{m}$  de profundidad y 750  $\mu\text{m}$  de longitud total de cada rama y de dos elementos difusor/tobera con una longitud de los elementos difusor y tobera de 1300 y 350  $\mu\text{m}$  respectivamente, un ancho (en la parte más estrecha de estos elementos) de 142  $\mu\text{m}$  y profundidades de 60 y 30  $\mu\text{m}$ . En la parte experimental el flujo se indujo por medio de un disco piezoeléctrico. El modelo matemático se desarrolló en 2D y 3D (el modelo en 2D se utilizó solo para obtener resultados iniciales) en estado estacionario por medio del método de elemento finito. La válvula Tesla presentó la mejor eficiencia volumétrica.

Forster *et al.* (2002) realizaron un estudio paramétrico de dos diseños de válvulas Tesla, de un elemento difusor/tobera y de una válvula llamada válvula *Tesser*, que diseñaron combinando la geometría de la válvula Tesla con la del elemento difusor/tobera. El estudio lo realizaron en 2D por medio de optimización y el uso del método de elemento finito. La descripción paramétrica de las válvulas en la rutina de optimización sistemática permitió determinar el diseño propio cada válvula. La eficiencia de las válvulas estudiadas mostró dependencia con el número de Reynolds. Para valores de  $10 < \text{Re} < 100$  la válvula *Tesser* mostró la mejor eficiencia, sin embargo para  $100 < \text{Re} < 2000$  la válvula Tesla mostró un desempeño significativamente superior.

Morganti y Pignatelli (2005) investigaron el desempeño de diferentes tipos de MBs para su uso en el tratamiento de la hidrocefalia. La investigación se centró en la determinación del flujo neto máximo inducido con diferentes técnicas de bombeo así como en la eficiencia de las válvulas. En lo referente a las válvulas, describieron como posibles alternativas para implementarse, un elemento difusor/tobera y una válvula Tesla con dos ramas. La válvula Tesla presentó la mejor eficiencia volumétrica, de 0.65, comparada con la mejor eficiencia de los elementos difusor/tobera, que apenas alcanzó un valor de 0.4. La evaluación del desempeño de la válvula Tesla se realizó de acuerdo a un modelo con el método de elemento finito al aplicarse una diferencia de presión de 6 kPa.

Lin *et al.* (2015) desarrollaron un algoritmo de optimización topológica para diseñar válvulas de geometría fija con el método de elemento finito en 2D. El algoritmo fue capaz de recrear la geometría de la válvula Tesla, sin embargo también generaron nuevas topologías (más complejas) al eliminar las restricciones impuestas sobre la orientación de los canales del diseño original de la válvula Tesla. Estas geometrías presentaron eficiencias significativamente superiores a la de la válvula Tesla. Sin embargo, una de ellas se fabricó mediante impresión 3D, y al evaluar el flujo inducido, hubo cierta discrepancia entre la eficiencia teórica y la real, aunque la geometría si fue capaz de inducir flujo.

### 3.3. Metodología implementada en el modelado de la microbomba de termocavitación

En esta sección se desarrolla la metodología implementada en el modelado de diferentes diseños del microcanal de la figura 2.5 utilizado para dirigir el flujo en la MB de TC. Para realizar los modelos se utilizó una computadora Dell Vostro 410 con un procesador Intel® Core™ 2 Quad.

#### 3.3.1. Diseño de geometrías a modelar

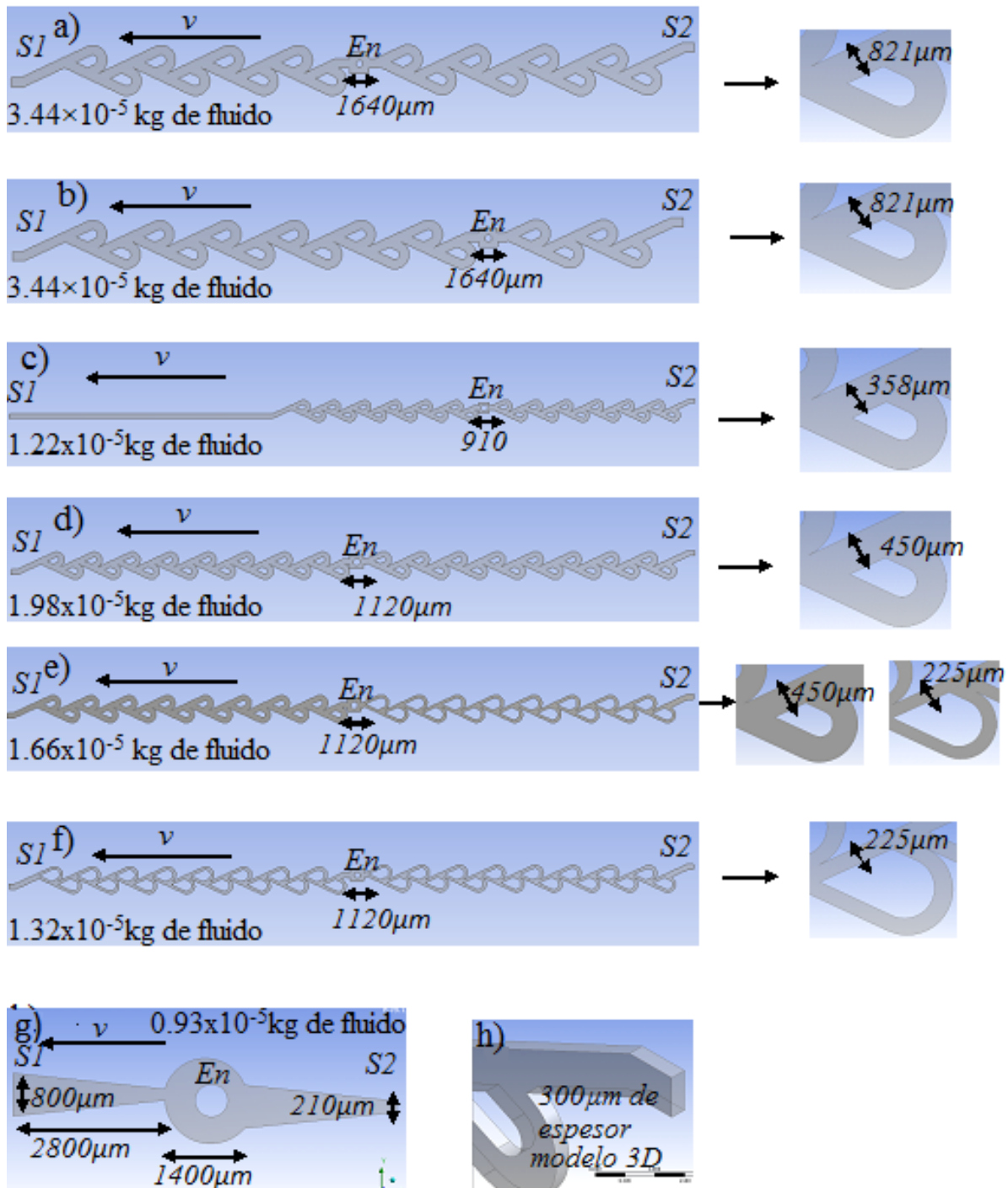
Se diseñaron 6 microcanales con la geometría de la válvula Tesla. La figura 3.1 muestra el diseño y dimensiones de estas geometrías. Tienen una longitud total de 58 mm, necesaria para la caracterización experimental, pues para medir la velocidad de flujo cerca de la salida,  $S_1$ , por medio de la pinza óptica de la figura 2.9, y al mismo tiempo generar burbujas de TC, es necesario que haya al menos 38 mm entre  $S_1$  y la cámara de bombeo, CB (debido al espacio utilizado por los elementos ópticos) y la longitud máxima que se puede obtener experimentalmente, considerando ambos lados del canal, es de 58 mm (ver apéndice). Las ramas de todas las geometrías guardan una relación de aspecto largo/ancho de 1.47 y presentan una inclinación de  $25^\circ$  con respecto a la horizontal.

Como punto de partida se diseñó la geometría de 8 y 8 ramas a cada lado de la CB, mostrada en la figura 3.1a. Esta geometría se utilizó para evaluar el funcionamiento general de la MB y la convergencia del modelo, de acuerdo a diferentes niveles de mallado (sección 3.3.3). A continuación se diseñó la geometría de 12 y 4 ramas a cada lado de la CB (figura 3.1b), con la menor cantidad de ramas del lado derecho del canal. Esta geometría se construyó con la finalidad de observar el efecto de la asimetría con respecto al canal simétrico de 8 y 8 ramas. Se modeló debido a la mayor distancia experimental requerida entre la CB y la salida  $S_1$  que entre la CB y la salida  $S_2$ . La tercer geometría diseñada (figura 3.1c) corresponde a un canal de 12 y 12 ramas a cada lado de la CB con un canal recto al final del lado izquierdo, esta geometría se diseñó con el objetivo de generar simetría en el número de ramas y al mismo tiempo obtener la distancia necesaria entre  $S_1$  y la CB (para la implementación experimental), así mismo permitió evaluar el efecto del número y tamaño de ramas, con respecto a las otras geometrías. Las últimas 3 geometrías de válvula Tesla diseñadas se muestran en las figuras 3.1d, 3.1e y 3.1f y corresponden a microcanales de 16 y 16 ramas a cada lado de la CB, estos canales se diseñaron con la intención de evaluar el efecto del grosor del canal (estas geometrías solo se modelaron en 3D) y el efecto del número de ramas (de la figura 3.1d) con respecto a las otras geometrías.

Además de las geometrías mencionadas, se diseñó la geometría de un elemento difusor/tobera (figura 3.1g). Se construyó con el propósito de comparar su desempeño con el de las válvulas Tesla. Las dimensiones de este elemento corresponden a las utilizadas por Liu *et al.* (2016) para inducir flujo con burbujas generadas por inducción magnética.

Al centro de los microcanales se colocó un círculo de  $600\ \mu\text{m}$  de diámetro que simula la geometría de la burbuja y éste se utilizó como entrada,  $E_n$  del microcanal. Para evaluar el efecto del tamaño de la burbuja también se diseñó la geometría de 8 y 8 ramas con un tamaño de burbuja de  $300\ \mu\text{m}$ .

Para los modelos en 3D se utilizó un espesor del canal de  $300\ \mu\text{m}$  (figura 3.1h). El diseño de las geometrías se realizó por medio del software Solid Works 2014.



**Figura 3.1** Geometrías modeladas. a) 8 y 8 ramas, b) 12 y 4 ramas, c) 12 y 12 ramas con canal recto, d) 16 y 16 ramas de grosor estándar, e) 16 y 16 ramas con ramas más delgadas del lado derecho, f) 16 y 16 ramas más delgadas, g) elemento difusor/tobera y h) espesor de canal para modelos 3D.

### 3.3.2. Ecuaciones de gobierno

Las ecuaciones a resolver en este modelo para describir el flujo a través de los microcanales son las siguientes. Para el modelo en 2D solo se utilizaron las componentes “x” y “y” de las ecuaciones.

Ecuación de continuidad para flujo incompresible:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

Ecuaciones de Navier-Stokes:

Componente en x:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.2)$$

Componente en y:

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3.3)$$

Componente en z:

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3.4)$$

Como se puede observar, no se incluyó la solución de la ecuación de energía para analizar el calor suministrado por el láser. Esto debido a que resolver esta ecuación implicaría la introducción de un cambio de fase de líquido a vapor (formación de las burbujas de TC), lo cual complicaría sumamente el modelo, y para el objetivo buscado, que es determinar el comportamiento del flujo en el canal, la transferencia de energía es muy puntual y sólo afecta la zona de formación de la burbuja y no a las ramificaciones, donde se desea conocer el flujo. Por tal motivo se decidió reemplazar el efecto de la irradiación láser con una ecuación analítica de la velocidad de la pared de la burbuja como función del tiempo. Dicha ecuación, que se describe más adelante, se determinó a partir de datos experimentales y se introdujo en el modelo como condición inicial en la entrada circular antes descrita.

Dos parámetros que podrían ser de mayor utilidad es la relación entre la energía necesaria para generar la burbuja de vapor y la energía suministrada por el láser, así como la relación entre la energía necesaria para generar la burbuja y la energía cinética transmitida al fluido para moverse (en la entrada  $En$ ). Estos parámetros se pueden estimar de forma relativamente simple, por lo que en el capítulo IV se presentan dichos cálculos para la MB de TC.

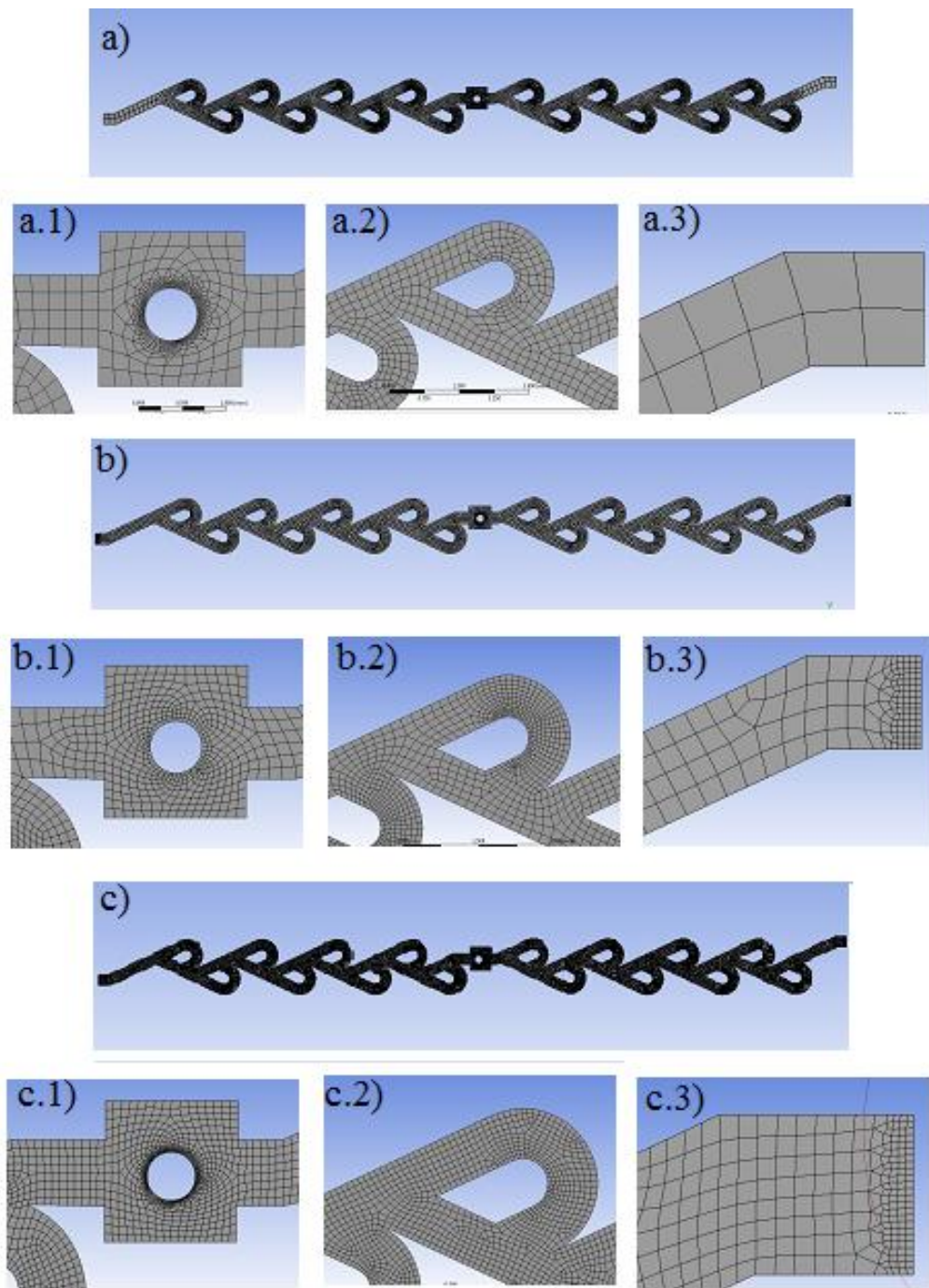
### 3.3.3. Mallado de las geometrías

El nivel de malla utilizado en las diferentes geometrías modeladas se determinó a partir de un análisis de convergencia del flujo volumétrico como función del tiempo inducido por la MB de 8 y 8 ramas para 3 niveles de malla en 2D y 2 niveles (debido a la limitación computacional) en 3D.

Es importante resaltar que el tipo de malla a utilizar en las simulaciones es de gran importancia, sobre todo para las simulaciones en 3D, ya que el tiempo estimado de cada simulación para el nivel de malla 1 fue de aproximadamente de 6 horas, en comparación con el nivel 2, donde se emplearon aproximadamente 16 horas. En contraste, los modelos en 2D emplearon aproximadamente 40 minutos.

En la figura 3.2 se muestran los tres niveles de malla para la geometría en 2D. El nivel 1 (figura 3.2a) corresponde al mallado más burdo y contiene 4,367 elementos, el nivel 2 (figura 3.2b) a un mallado medio y consta de 8,706 elementos y finalmente el nivel 3 corresponde a un mallado muy fino y contiene 15,137 elementos. Como se verá en el capítulo 4, el flujo neto como función del ciclo (periodo de expansión y colapso de la burbuja) que se indujo por la MB, muestra una variación del 24% entre el nivel de malla 1 con respecto al 3 y del 10% entre el nivel 2, también con respecto al 3, por lo que se decidió utilizar el nivel 2 para todas las simulaciones en 2D, ya que con este nivel se asegura una adecuada combinación entre convergencia en la solución y costo computacional.

Para todos los mallados en 2D se utilizó una combinación de elementos, con predominancia de elementos cuadrilaterales. También se utilizó refinamiento de la malla en la frontera a la entrada del microcanal,  $E_n$  (figuras 3.2-a.1, 3.2-b.1, y 3.2-c.1) en las curvaturas de la geometría,  $S_1$  y  $S_2$ , (figuras 3.2-a.2, 3.2-b.2, y 3.2-c.2) y en ambas salidas  $S1$  y  $S2$  (figuras 3.2-a.3, 3.2-b.3, y 3.2-c.3), esto con la intención de obtener resultados más exactos al momento de evaluar el flujo neto generado.

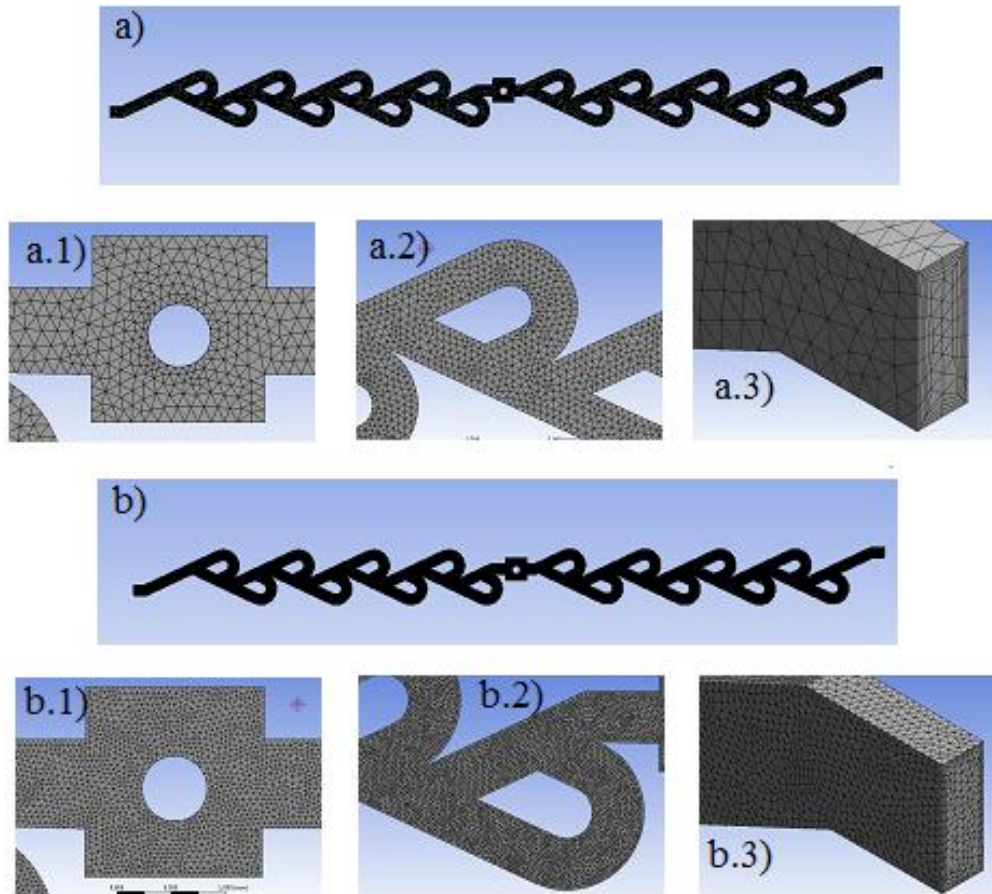


**Figura 3.2.** Niveles de mallado para el microcanal de 8 y 8 ramas 2D. a) nivel 1, b) nivel 2, c) nivel 3

Como ya se mencionó, para el mallado de las geometrías en 3D, únicamente se analizaron dos niveles de malla. En la figura 3.3 se muestran estos niveles. El primer nivel corresponde a una malla media (figura 3.3a) y contiene 129, 951 elementos y el segundo (figura 3.3b) a una malla fina y consta de 715,648 elementos. Como también se verá en el capítulo 4, el flujo neto como función del ciclo, inducido por la MB muestra una variación del 12% entre cada nivel de malla, por lo que se decidió utilizar el nivel 1 para todas las simulaciones en 2D, ya que el costo

computacional del nivel 2 es mucho mayor comparado con el aumento en el grado de convergencia que proporciona.

Para todos los mallados en 3D se utilizaron elementos tetraédricos. También se utilizó refinamiento en las fronteras del dominio y las curvaturas de la geometría (figuras 3.3-a.1, 3.3-b.1, 3.3-a.2, 3.3-b.2, 3.3-a.3 y 3.3-b.3). Así mismo se utilizó la herramienta de inflación, la cual permite mejorar la resolución de la capa límite por medio del refinamiento de algunas capas de mallado cerca de las paredes. Se utilizó un total de tres capas de inflación en los mallados en 3D implementados.



**Figura 3.3.** Niveles de mallado para el microcanal de 8 y 8 ramas 3D. a) nivel 1, b) nivel 2

Con base en lo anterior, en la tabla 3.1 se muestra el número de elementos y nodos para cada una de las geometrías modeladas, tanto en 2D como 3D.

**Tabla. 3.1** Número de elementos y nodos para las diferentes geometrías

Geometría	Modelos 2D		Modelos 3D	
	Número de elementos	Número de nodos	Número de elementos	Número de nodos
8 y 8 ramas	4,367	5,044	129,951	296,468
	8,706	9,598	715,648	2,370,774
	15,137	16,451	---	-----
8 y 8 ramas (burbuja de 300µm)	9,764	10,730	138,273	350,121
12 y 4 ramas	8,687	9,589	138,051	351,042
12 y 12 ramas con canal recto	12,328	13,620	106,296	292,141
16 y 16 ramas	16,204	17,870	146,251	406,127
16 y 16 ramas (más delgadas del lado derecho de CB)	11,310	12,916	---	---
16 y 16 ramas (delgadas a ambos lados de CB)	6,272	7,844	---	---
4 y 4 ramas	1,915	2,234	45,625	119,736
Elemento difusor/tobera	---	---	28,735	86,004

### 3.3.4. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera utilizadas fueron las siguientes.

**S1:**  $p=0$  Pa

**S2:**  $p=0$  Pa

**Paredes del canal:** condición de no deslizamiento

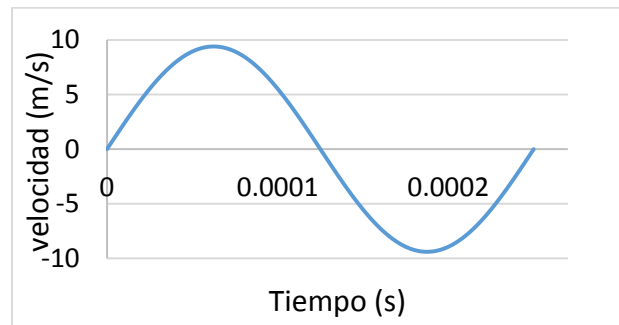
**Entrada del canal:** A la entrada circular del canal se colocó como condición de frontera una función senoidal (figura 3.4) que asemeja la velocidad de la pared de la burbuja como función del tiempo.

$$v(t) = 9.4 * \sin\left(2 * \pi * \frac{t}{T}\right) \quad (3.5)$$

Esta función se aproximó a partir de datos experimentales para burbujas inducidas por un láser de onda continua de 975nm de longitud de onda y potencia de 106mW, generadas entre dos placas planas paralelas con separación de 240 µm (Pérez-Gutiérrez et al., 2011). Se consideró que los datos experimentales podrían dar una buena aproximación. La ecuación se introdujo al modelo a través del apartado de funciones definidas por el usuario, (*UDF*, por sus siglas en inglés). En la ecuación analítica 3.5, T es el periodo de oscilación de la burbuja (cuando la velocidad es positiva se encuentra en periodo de expansión y cuando es negativa se encuentra en periodo de colapso) y corresponde a 260 µs, sin embargo para el modelo del microcanal con la burbuja de 300 µm se utilizó una frecuencia de 130 µs (tanto el tamaño de la burbuja como la frecuencia, se eligieron de



manera arbitraria, únicamente con base en el hecho de que al aumentar la frecuencia disminuye el tamaño).



**Figura 3.4** Aproximación a función senoidal de la velocidad de una burbuja a la entrada del canal

### 3.3.5 Configuración del *solver* utilizado

El modelo se resolvió en estado transitorio. Se utilizó el *solver* basado en presión, bajo el esquema del algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linearized Equations*), este algoritmo usa una relación entre las correcciones de velocidad y presión para cumplir con la ley de conservación de masa y para obtener el campo de presión. Además se utilizó el modelo laminar, seleccionado de acuerdo al tipo de flujo esperado por la MB. También se consideró que la única propiedad del agua que cambia al estar en solución con el nitrato de cobre es su absorbancia, por lo que se eligió como fluido de trabajo. El valor inicial que se utilizó para las variables a resolver, es decir presión y velocidad fue de 0.

Finalmente, para realizar el análisis de convergencia se utilizó un tiempo total de simulación de 0.0015 s para los modelos en 2D y 0.0017 s para los modelos en 3D, (se aumentaron 0.0002 s en los modelos 3D con la finalidad de completar un último ciclo de expansión y colapso que quedó inconcluso con 0.0015 s de tiempo de simulación en 2D). Para analizar el flujo generado, tanto de los modelos en 2D como 3D, se simularon 0.0017 s de tiempo (correspondiente a 6 ciclos de expansión y colapso), con excepción de las geometrías de 8 y 8 y 12 y 4 ramas, donde el tiempo de 0.0017 s no fue suficiente para analizar la estabilidad del flujo neto generado, por lo que se utilizó un tiempo de simulación de 0.0075 s en 2D para la geometría de 8 y 8 ramas y de 0.004 s en 3D (debido a limitaciones computacionales para simular 0.0075 s en 3D) y para la geometría de 12 y 4 ramas se utilizó un tiempo total tanto en 2D como 3D de 0.004 s (tiempo suficiente para observarla estabilidad). En todas las simulaciones se utilizó un tamaño de paso de tiempo de 10  $\mu$ s, con excepción del modelo para la geometría con una mayor frecuencia de expansión y colapso de la burbuja, donde se usaron pasos de tiempo de 5  $\mu$ s (para esta geometría se simularon sólo 0.0015 s). Se utilizó un número máximo de 20 iteraciones por paso de tiempo.

### 3.3.6 Procesamiento de datos

Los datos fueron procesados con el programa CFD-post de ANSYS. Se obtuvieron y procesaron datos del campo de velocidad y flujo volumétrico como función del tiempo para cada microcanal. Los resultados y análisis de las simulaciones se presentan en el siguiente capítulo.



## CAPÍTULO IV. Evaluación del flujo inducido por la microbomba por medio del modelo matemático

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones de los diferentes diseños del microcanal para la microbomba (MB) de termocavitación (TC).

### 4.1 Determinación del mallado a utilizar en cada simulación

La implementación de un buen modelo matemático involucra la obtención de una alta convergencia en la solución con el menor costo computacional, lo cual está directamente relacionado con la malla utilizada. Es por ello que en el desarrollo de los modelos matemáticos para las diferentes geometrías del microcanal para la MB de TC, se evaluaron distintos niveles de malla para la geometría de 8 y 8 ramas (3 niveles para el modelo en 2D y 2 niveles para el de 3D). A partir de la diferencia entre los resultados (de flujo volumétrico como función del tiempo y flujo neto como función del ciclo simulado) obtenidos con los diferentes niveles de malla, se determinó el mallado a utilizar para todas las geometrías, tanto en 2D como 3D. Es importante mencionar que en esta sección sólo se discute la convergencia de la solución, el comportamiento del flujo inducido se describe en la siguiente.

Para calcular el porcentaje de diferencia entre los datos se utilizó la siguiente expresión:

$$\%diferencia\ en\ los\ datos = \frac{|V_y - V_x|}{V_y} * 100 \quad (4.1)$$

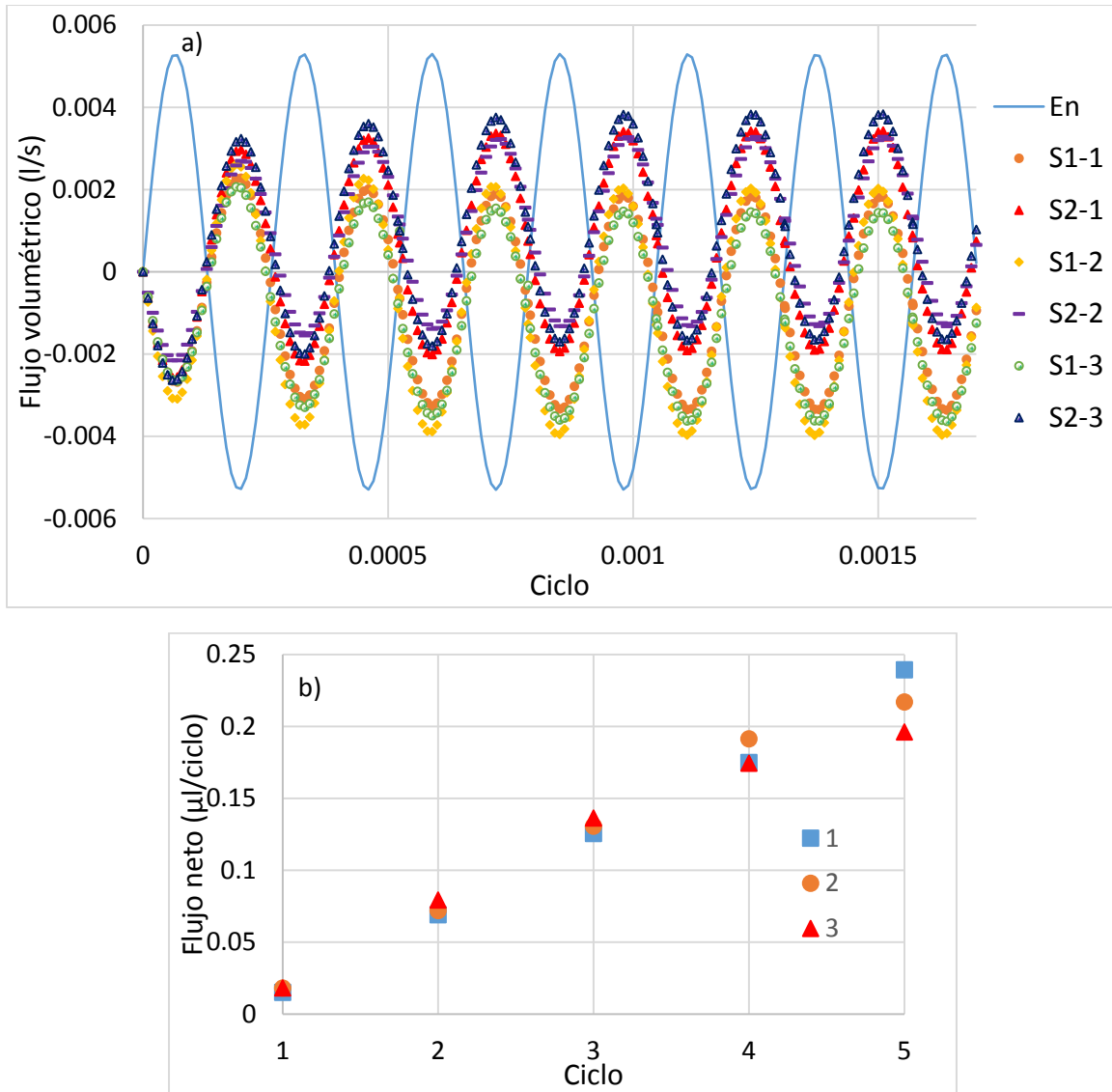
donde  $V_y$  corresponde al valor con respecto al cual se desea hacer la comparación (nivel de malla 3 para las simulaciones 2D y nivel 2 para las simulaciones en 3D) y  $V_x$  corresponde al valor que se compara (Nivel de malla 1 y 2 para las simulaciones en 2D y nivel 1 para las simulaciones en 3D).

En la figura 4.1 se muestra el flujo volumétrico (determinado a partir de la ecuación 1.1) inducido como función del tiempo (figura 4.1a) y el flujo neto (determinado a partir de la ecuación 1.2 para el intervalo de tiempo de cada periodo de expansión y colapso de la burbuja o ciclo, correspondiente a 260  $\mu$ s) como función del ciclo simulado (figura 4.1b) para el modelo en 2D con los tres niveles de malla simulados (150 pasos de tiempo para cada modelo).

Como se puede observar en la figura 4.1a, no hay una diferencia significativa entre los datos obtenidos con los 3 niveles de malla, de hecho, apenas se aproxima al 2 % para los datos de flujo volumétrico en las salidas 1 y 2 del microcanal ( $S1$  y  $S2$ ) para el nivel de malla 2 ( $S1-2$ ,  $S2-2$ ) con respecto a los del nivel 3 ( $S1-3$  y  $S2-3$ ) (correspondiente a la malla más fina) y al 4 % para los mismos datos pero ahora del nivel 1 ( $S1-1$  y  $S2-1$ ) con respecto a los del nivel 3 también.

En cuanto al flujo neto como función del ciclo, como se observa en la figura 4.1b, en el quinto ciclo, hay una diferencia del 24 % de los datos del modelo 1 con respecto al 3 y del 10 % del modelo 2 también con respecto al 3.

De acuerdo a estos datos se optó por utilizar el nivel de malla 2 para todas las simulaciones, pues el uso de esta malla implica una diferencia aceptable en los resultados obtenidos, tanto de flujo volumétrico como función del tiempo, como flujo neto como función del ciclo.



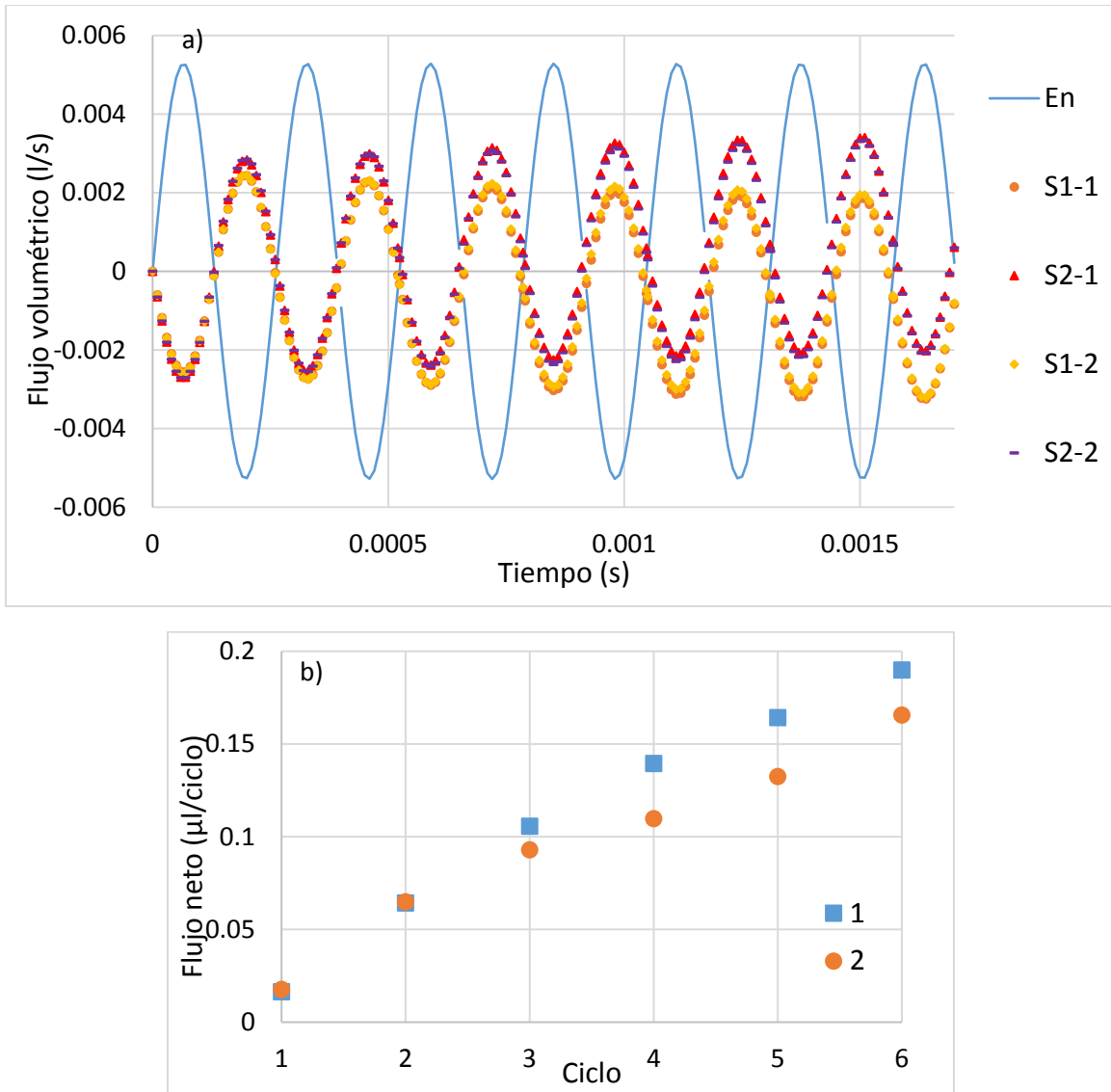
**Figura 4.1.** Resultados para los tres niveles de mallado utilizados para el microcanal de 8 y 8 ramas en 2D a) flujo volumétrico como función del tiempo y b) flujo neto por ciclo.

Ahora bien, en la figura 4.2 se muestra el flujo volumétrico como función del tiempo (figura 4.2a) y el flujo neto como función del ciclo (figura 4.2b) para el modelo en 3D con los dos niveles de malla utilizados (170 pasos de tiempo para cada modelo).

Como se puede apreciar la figura 4.2a, en este caso tampoco hay una diferencia marcada entre el nivel de malla 1 con respecto al 2, los datos en *S1* y *S2* del nivel 1 (*S1-1* y *S2-1*) difieren en un 4% aproximadamente con respecto a los datos del nivel 2 (*S1-2* y *S2-2*).

En cuanto al flujo neto, hay una diferencia del 12.5% entre los datos del nivel 1 con respecto a los del nivel 2 en el sexto ciclo.

De acuerdo a esto, se optó por el nivel 1, ya que en modelos tridimensionales el número de ecuaciones a resolver aumenta significativamente al aumentar el número de elementos, por lo que la diferencia en los datos se ve compensada con un menor costo computacional implicado.

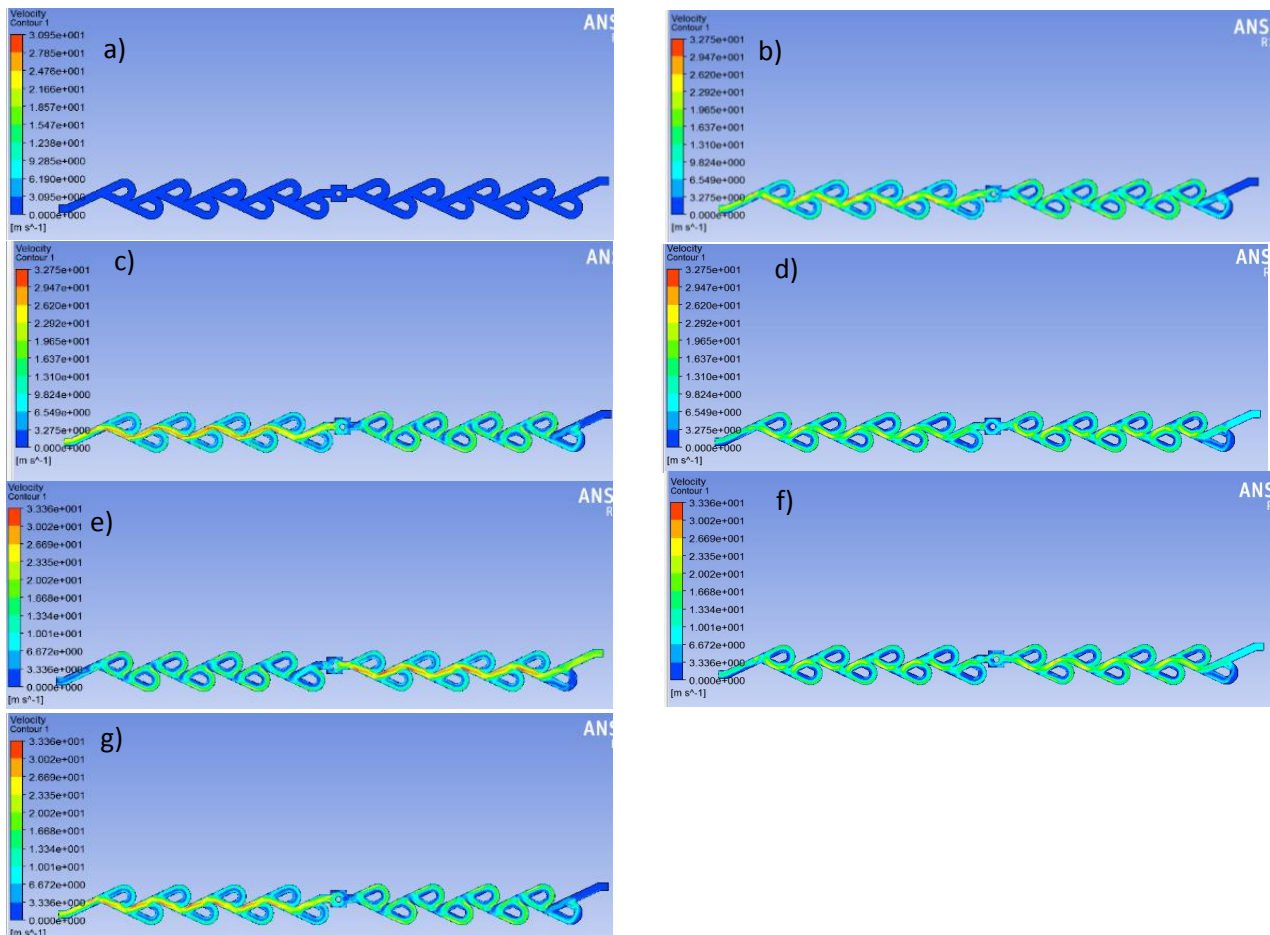


**Figura 4.2.** Resultados para los dos niveles de mallado utilizados para el microcanal de 8 y 8 ramas en 3D a) flujo volumétrico como función del tiempo y b) flujo neto por ciclo.

## 4.2 Evaluación del flujo para el microcanal de 8 y 8 ramas

En relación al comportamiento general del flujo inducido por la MB, en la figura 4.3 se observa una secuencia de imágenes del campo de velocidades inducidas en el microcanal de 8 y 8 ramas a diferentes tiempos para el modelo en 2D. Dicha secuencia corresponde al último ciclo simulado (como se mencionó en el capítulo III, para esta geometría se simuló 0.0075 s en 2D, correspondientes a 28 ciclos de expansión y colapso de la burbuja). Cabe mencionar que cualitativamente el comportamiento en 2D y 3D es el mismo por lo que no se muestran imágenes del modelo en 3D.

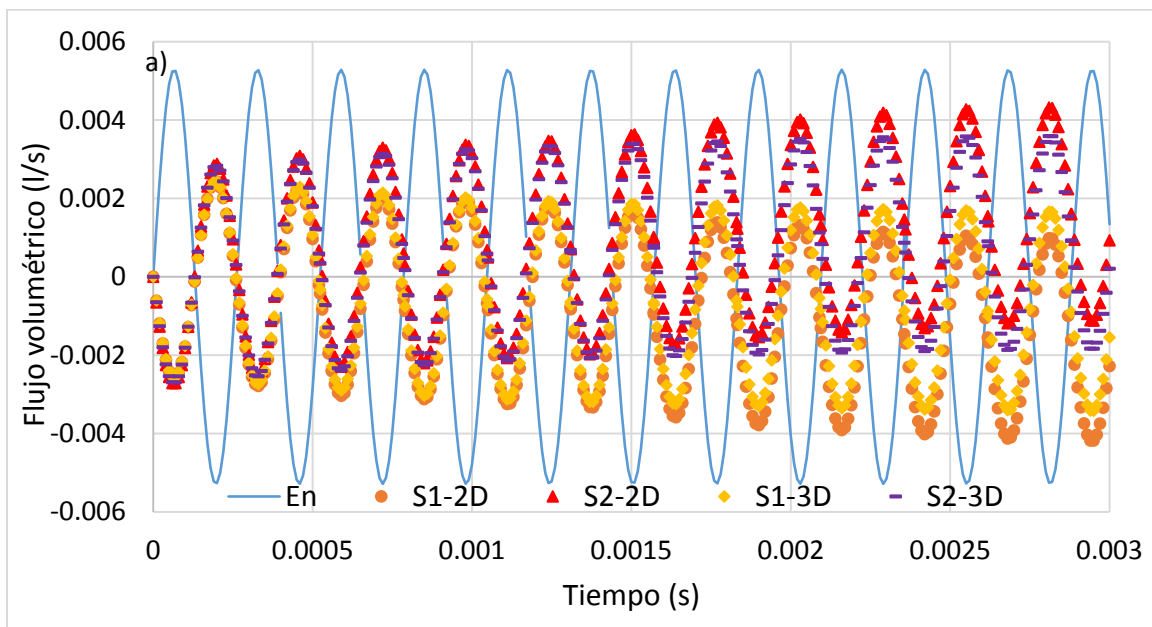
Como se observa en la figura 4.3, el flujo se induce de la forma esperada. Al tiempo 0 no hay flujo en el microcanal (figura 4.3a). En la expansión de la burbuja a los 0.0071 s y 0.00715 s (figura 4.3b y 4.3c, respectivamente), las mayores velocidades de flujo están del lado izquierdo del canal y se ubican al centro. En este caso el flujo va preferentemente de la cámara de bombeo (CB) a *S1* y en menor medida de la CB a *S2*. En el colapso de la burbuja, a los 0.0072s (figura 4.3d), las velocidades de flujo del lado izquierdo del canal disminuyen y comienzan a aumentar las del lado derecho. El flujo en este caso va desde *S1* y *S2* a la CB pero en mayor medida desde *S2*. A los 0.00726 s (figura 4.3e), cuando continúa el colapso de la burbuja, se observa claramente como las mayores velocidades de flujo están del lado derecho del canal y también se ubican al centro. A los 0.00733s (figura 4.3f), cuando termina de colapsar la burbuja y una nueva comienza a expandirse, se observa como nuevamente las velocidades de flujo del lado derecho comienzan a disminuir y a aumentar las del lado izquierdo. Finalmente, a los 0.00738s (figura 4.3g), cuando continúa la nueva expansión, se observa claramente un mayor flujo del lado izquierdo por el centro del canal. El comportamiento de la válvula se repite en cada ciclo de expansión y colapso. Esto genera un flujo neto en *S*.

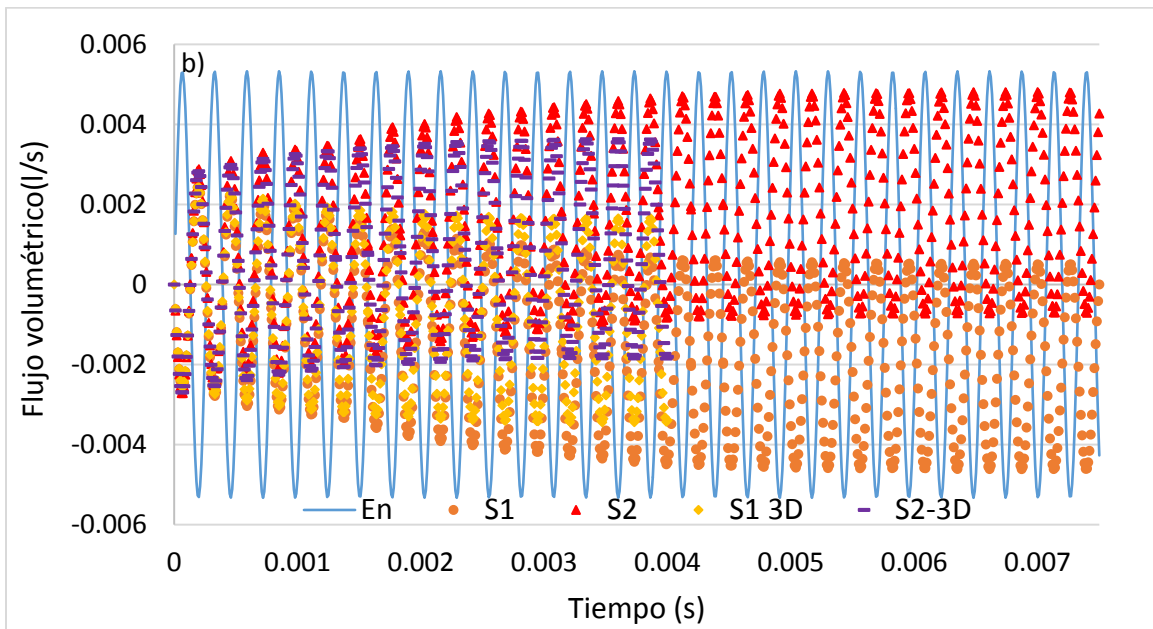


**Figura 4.3** Velocidad de flujo inducido por la microbomba de 8 y 8 ramas a diferentes tiempos con el modelo en 2D a)0, b) 0.0071 s, c) 0.00715 s, d) 0.0072 s, e) 0.00726 s, f)0.00733 s g) 0.00738 s

En la figura 4.4 se muestran las gráficas del flujo volumétrico (determinado a partir de la ecuación 1.1) inducido en el mismo microcanal como función del tiempo, tanto a la entrada como a las salidas  $S1$  y  $S2$ . En la figura 4.4a se observa dicha gráfica para un total de 0.003s (correspondiente a 11 ciclos de expansión y colapso) para los modelos en 2D y 3D. La figura 4.4b corresponde al tiempo de simulación de 0.0075 s para el modelo en 2D y 0.004 s para el 3D, pues como se mencionó en el capítulo III, se simularon dichos tiempos con la intención de observar la estabilidad del flujo después un número grande de ciclos de expansión y colapso.

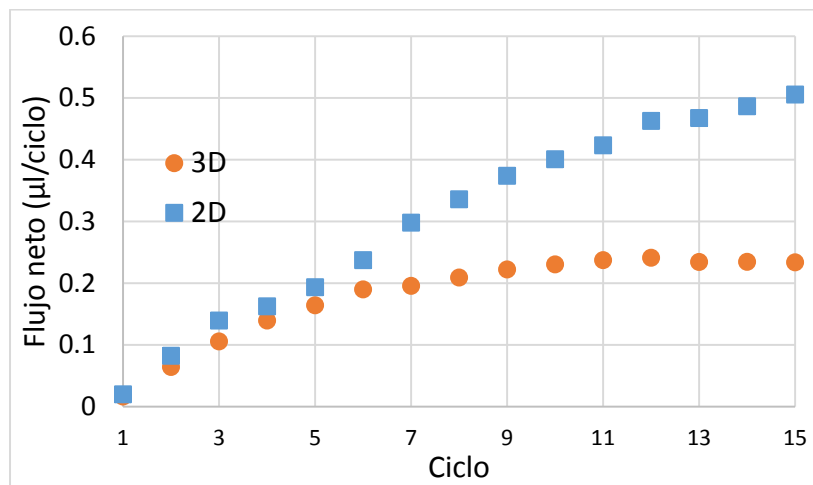
Como se puede ver en la figura 4.4a, cuando la burbuja se encuentra en expansión, el flujo volumétrico a la entrada es positivo y en cada una de las salidas es negativo, es decir, va de la cámara de bombeo a  $S1$  y  $S2$ . Se puede observar que para el primer ciclo simulado el flujo inducido en la expansión es muy similar, tanto en  $S1$  como  $S2$ . Al momento del colapso, el flujo a la entrada es negativo y ahora el flujo en ambas salidas es positivo ya que se dirige a la CB, en esta fase de bombeo para el primer ciclo, los flujos volumétricos en ambas salidas también son muy similares. Sin embargo, a medida que aumenta el número de ciclos se observa como en la expansión de la burbuja tiende a salir mayor flujo por  $S1$  que por  $S2$  y a regresar mayor flujo hacía la cámara de bombeo desde  $S2$  que desde  $S1$ , lo que crea un flujo neto en  $S1$ . Además, hay apenas una diferencia aproximada del 11% entre los flujos volumétricos como función del tiempo para el modelo en 2D con respecto al modelo en 3D (ecuación 4.1) para los primeros ciclos, sin embargo este valor incrementa hasta un 20% en el ciclo número 11 mostrado. Finalmente, como se observa en la figura 4.4b, para la simulación en 2D, a partir de 0.004 s (correspondiente al ciclo de expansión y colapso de la burbuja número 15) aproximadamente, el flujo volumétrico por ciclo en cada una de las salidas tiende a un valor estable, comparado con la simulación en 3D, donde desde los 0.00235 s (correspondiente al ciclo número 9) se observa que tiende a un flujo estable por ciclo.





**Figura 4.4.** Flujo volumétrico inducido como función del tiempo por la MB de 8 y 8 ramas a cada lado del microcanal a) 0.0030 s (11 ciclos) modelos en 2D y 3D y b) 0.0075 s modelo 2D (28 ciclos) y 0.004 s modelo 3D (15 ciclos)

A continuación se determinó el flujo volumétrico neto (ecuación 1.2) en *S1* para cada uno de los 15 primeros ciclos de expansión y colapso. En la figura 4.5 se muestran los resultados. En el ciclo 15 hay un flujo neto de 0.5  $\mu\text{l}$  para la simulación en 2D y de 0.23  $\mu\text{l}$  para la simulación en 3D, lo cual corresponde a una diferencia entre los datos de la simulación en 2D con respecto a los de la simulación en 3D de hasta un 117%, lo que indica una diferencia significativa entre ambos modelos y marca la importancia de realizar modelos en 3D.



**Figura 4.5.** Flujo volumétrico neto por ciclo generado por la MB de 8 y 8 ramas

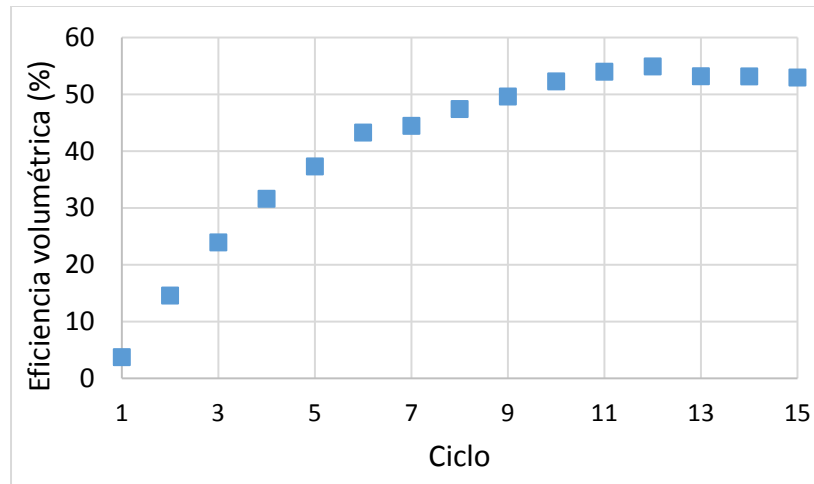
Otro parámetro que se evaluó fue el porcentaje de eficiencia volumétrica ( $\% \eta_v$ ) del microcanal como función del ciclo simulado, la cual se determinó a partir de la siguiente expresión:



$$\% \eta_v = \left| \frac{Q_{n-S1}}{Q_{n-En}} * 100 \right|, \quad (4.2)$$

donde  $Q_{n-S1}$  es el flujo neto en  $SI$  (ecuación 1.2) para el ciclo de interés y  $Q_{n-En}$  es el flujo neto desplazado por la burbuja en la etapa de expansión, para el ciclo de interés.

En la figura 4.6 se muestra la eficiencia volumétrica obtenida para los 15 ciclos simulados en 3D. Se alcanza una eficiencia volumétrica del 54%. Para realizar el análisis de la eficiencia volumétrica se consideraron únicamente los modelos en 3D, pues como ya se mencionó, los resultados de los modelos en 2D difieren significativamente con respecto a los de los modelos en 3D y se consideran menos aproximados a la situación real.



**Figura 4.6.** Eficiencia volumétrica para la geometría de 8 y 8 ramas en 3D

Finalmente, también se evaluó la relación entre la energía necesaria para generar la burbuja de vapor con respecto a la energía suministrada por el láser, así como la energía necesaria para generar la burbuja con respecto a la energía cinética suministrada al fluido para moverse en la entrada  $En$ .

Para determinar la energía necesaria para generar la burbuja se utilizó la siguiente expresión:

$$E_b = m_b * h_{fg} \quad (4.3)$$

donde  $E_b$  es la energía necesaria para generar la burbuja,  $m_b$  es la masa de vapor generado y  $h_{fg}$ , es la entalpía de evaporización cuando la presión saturación es igual a la presión del fluido cerca de la pared de la burbuja (en la entrada  $En$ ), es decir justo en el momento donde el tamaño de la burbuja es el máximo (600  $\mu\text{m}$  para las burbujas utilizadas en este trabajo) y por lo tanto la velocidad de la pared es igual a cero (a la mitad del periodo de expansión y colapso mostrado en la figura 3.2). Para la geometría de 8 y 8 ramas dicha presión a 0.00013s (mitad del primer periodo) es igual a 6.28 Mpa. A esta presión los parámetros de vapor saturado correspondientes al agua son los siguientes:

$$h_{fg} = 1571 \text{ kJ/kg}$$

$$V_v = 0.03244 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$T_s = 275^\circ C$$

donde  $V_v$  es el volumen específico del vapor y  $T_s$  la temperatura de saturación. A partir del volumen de la burbuja ( $V_b$ ) de diámetro de 600  $\mu m$ , correspondiente a  $8.48 \times 10^{-11} m^3$  y el volumen específico del vapor, se obtuvo la masa de vapor en la burbuja mediante la siguiente expresión:

$$m_b = \frac{V_b}{V_v} = \frac{8.4823 \times 10^{-11} m^3}{0.03244 m^3/kg} = 2.61 \times 10^{-9} kg, \quad (4.4)$$

sustituyendo  $h_{fg}$  y la ecuación 4.4 en la ecuación 4.3 se obtiene:

$$E_b = m_b * h_{fg} = (2.61 \times 10^{-9} kg) * (1571 kJ/kg) = 4.1 \times 10^{-6} kJ = 4.1 \times 10^{-3} J$$

La energía suministrada por el láser está dada por:

$$E_{laser} = P * t_c = \left( \frac{0.180 J}{s} \right) * (40 \times 10^{-3} s) = 7.2 \times 10^{-3} J, \quad (4.5)$$

donde  $P$  es la potencia suministrada por el láser y  $t_c$  se conoce como tiempo de cavitación y corresponde al tiempo necesario para que se alcance la temperatura espinodal y se genere la burbuja de TC. Para la burbuja utilizada en las simulaciones que se describen en este trabajo se utilizó una potencia de 0.180 J/s y un tiempo de cavitación de 40 ms.

La energía cinética suministrada al fluido en la entrada ( $E_n$ ) en cada ciclo se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$E_{En} = \int_0^{260 \times 10^{-6} s} Q(t) * p(t) dt, \quad (4.6)$$

donde  $Q(t)$  es el flujo volumétrico como función del tiempo a la entrada ( $E_n$ ) del microcanal y  $p(t)$  es la presión como función del tiempo, también a la entrada del microcanal. El tiempo total de integración corresponde a la duración de un periodo de expansión y colapso de la burbuja.

De acuerdo a los valores obtenidos, el porcentaje de energía suministrado por el láser ( $E_{laser}$ ) que se utiliza para formar la burbuja ( $E_b$ ) corresponde a:

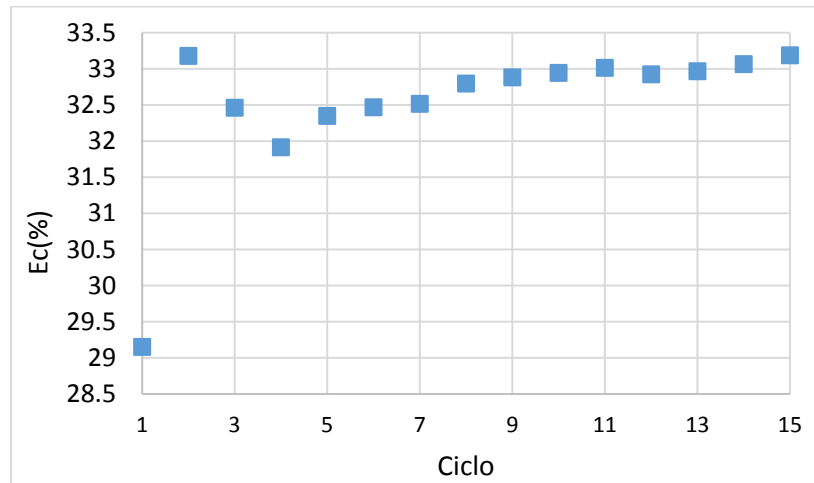
$$\%E_{cf} = \frac{E_b}{E_{laser}} * 100 = \frac{4.1 \times 10^{-3} J}{7.2 \times 10^{-3} J} * 100 = 57\%, \quad (4.7)$$

donde  $\%E_{cf}$  es el porcentaje de energía del láser que se utiliza para generar la burbuja, como se observa, más de la mitad de esta energía, el 57% se emplea en el cambio de fase, el 43% restante se atribuye a pérdidas por calor, entre otros. Ahora bien, el porcentaje de energía de la burbuja que se utiliza para mover al fluido corresponde a:

$$\%E_c = \frac{E_{En}}{E_b} * 100, \quad (4.8)$$

donde  $\%E_c$  es el porcentaje de energía de la burbuja que se convierte en energía cinética. En la gráfica de la figura 4.7 se observa dicho porcentaje como función del ciclo simulado para el

microcanal de 8 y 8 ramas, para el modelo en 3D. Como se observa, en la mayoría de los ciclos simulados el porcentaje de energía de la burbuja que se convierte en energía cinética es muy similar y oscila alrededor del 33 %, a excepción del primer ciclo donde corresponde a un valor de 29 % y de hecho en este ciclo el flujo neto es mínimo. Este bajo valor de energía de la burbuja que se convierte en energía cinética, se atribuye a que la mayor parte de la energía se pierde en la dinámica de la burbuja, por lo que el costo por obtener flujos tan pequeños (requeridos para los microsistemas) es esta pequeña conversión de energía. Debido a esto, este parámetro no juega un papel importante en el desempeño de la MB, comparado con el porcentaje de eficiencia volumétrica que sí es importante.



**Figura 4.7.** Porcentaje de energía de la burbuja que se convierte en energía cinética ( $\%E_c$ ) para la geometría de 8 y 8 ramas en 3D

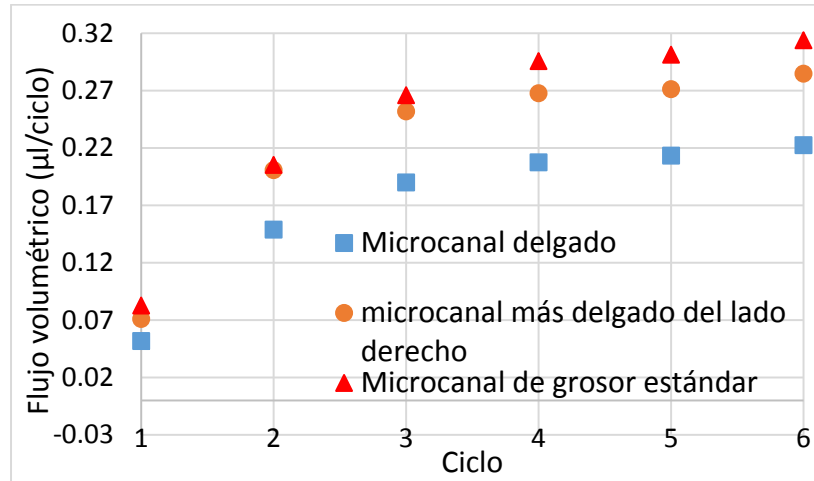
Es importante mencionar que el flujo volumétrico como función del tiempo, al igual que el campo de velocidades, presenta un comportamiento cualitativo similar en todos los modelos, tanto 2D como 3D; además como ya se mencionó, la eficiencia energética no juega un papel importante. Por estas razones en las siguientes secciones se presentan únicamente resultados ya sea del flujo neto inducido o de la eficiencia volumétrica, como función del número de ciclo simulado, según sea conveniente, pues estos son los parámetros de interés para evaluar el desempeño de los diferentes microcanales.

### 4.3 Efecto del grosor del microcanal

En la figura 4.8 se observa el flujo neto inducido para los tres diseños de microcanales con 16 y 16 ramas. Como se mencionó en el capítulo III, estos modelos únicamente se realizaron en 3D.

Como se observa, el microcanal con el cual se induce mayor flujo es con el de grosor estándar (definido así porque es el tipo de grosor que se utiliza para todas las geometrías modeladas), sin embargo la diferencia es más marcada a partir del tercer ciclo, punto a partir del cual el valor del flujo neto tiende a un valor estacionario para las tres geometrías. En el sexto ciclo se indujo un total de 0.31  $\mu\text{l}$  para el microcanal de grosor estándar, comparado con 0.28  $\mu\text{l}$  para el microcanal más delgado del lado derecho y 0.22  $\mu\text{l}$  para el microcanal delgado. Es por esto que en todos los modelos se utilizó el tipo de microcanal con grosor estándar.

En general hay una diferencia mayor entre el flujo neto inducido por la geometría de 16 y 16 ramas delgadas con respecto al de 16 y 16 ramas con ramas más delgadas del lado derecho que entre el flujo neto inducido por la geometría de 16 y 16 ramas de grosor estándar con respecto al de 16 y 16 ramas con ramas más delgadas del lado derecho, lo cual indica que el microcanal del lado izquierdo tiene mayor influencia en el flujo neto inducido.



**Figura 4.8.** Flujo neto inducido como función del ciclo simulado para los diferentes diseños de microcanales de 16 y 16 ramas.

#### 4.4 Efecto del número de ramas en el flujo neto inducido

Para evaluar el efecto del número de ramas y por consiguiente el tamaño, pues todas guardan la misma relación de aspecto, se comparó el flujo neto inducido por ciclo con las geometrías de 8 y 8, 16 y 16 ramas y la de 12 y 12 ramas con un canal recto del lado izquierdo. En la figura 4.9 se muestra el flujo neto inducido por ciclo para estas geometrías, tanto para los modelos en 2D como 3D.

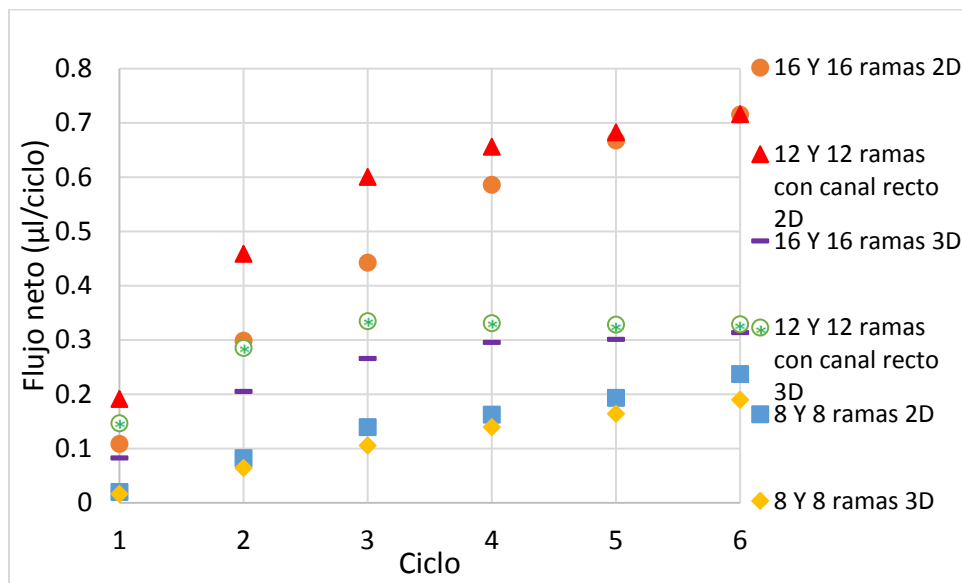
Con respecto a las simulaciones en 2D, el microcanal de 8 y 8 ramas es el que induce la menor cantidad de flujo, pues apenas alcanza un total de 0.50 µl en el ciclo número 15 (no se muestra dicho ciclo en la figura 4.9), momento en el cual, como se observó en la figura 4.4, alcanza un flujo neto estable por ciclo. El flujo neto inducido por los microcanales de 12 y 12 y 16 y 16 ramas es considerablemente mayor, con un total de 0.71 µl en el sexto ciclo para ambas geometrías, sin embargo, en los primeros ciclos es mayor para el de 12 y 12 ramas, con 0.45 µl contra 0.29 µl, en el segundo ciclo. La tendencia del flujo neto inducido por estos microcanales muestra que el de 12 y 12 ramas tiende a inducir un flujo neto estable por ciclo desde el tercero, comparado con el de 16 y 16 ramas que hasta el cuarto ciclo parece tender a inducir un flujo neto.

En cuanto a las simulaciones en 3D, también es el microcanal de 8 y 8 ramas el que induce menor cantidad de flujo con un total de 0.23 µl en el ciclo 15, (no mostrado en la figura 4.9), donde el flujo neto por ciclo se encuentra estable, le sigue el de 16 y 16 con 0.31 µl en el sexto ciclo y el que induce mayor cantidad de flujo es el de 12 y 12 ramas con 0.33 µl también en el sexto ciclo, donde el flujo es estable (la diferencia del flujo neto en todos los ciclos simulados para estas dos

últimas geometrías siempre guarda la misma tendencia y es mínima). En cuanto a la tendencia del flujo neto inducido por ciclo para estas dos últimas geometrías, desde el tercer ciclo parecen tender a un flujo neto estable por ciclo.

Al comparar los modelos en 2D con los 3D, como ya se mencionó, para el microcanal de 8 y 8 ramas el flujo neto por ciclo presenta una diferencia en los datos entre la simulación en 2D con respecto a la 3D del 117% (figura 4.5) correspondiente al ciclo número 15 en el cual el flujo neto se encuentra estable (no se muestra en la figura 4.9). Los microcanales de 12 y 12, y 16 y 16 ramas muestran una diferencia del 118% y 128% respectivamente. Esto marca la importancia de los modelos en 3D, pues los resultados difieren mucho.

De acuerdo a estos resultados y considerando sólo las simulaciones en 3D, se puede decir que además del número de ramas (ya que si aumenta el flujo del canal de 8 y 8 ramas con respecto al de 16 y 16), también es importante su tamaño, pues aunque la geometría de 12 y 12 ramas tiene menor cantidad de éstas, es la que tiene las ramas más pequeñas por la presencia del canal recto, de hecho un canal de la misma longitud con ramas así de pequeñas pero sin canal recto tendría un total de 36 ramas. Esto fue lo que ocasionó el flujo neto ligeramente mayor con esta geometría.



**Figura 4.9.** Flujo neto inducido como función del ciclo simulado para los microcanales de 8 y 8, 16 y 16, y 12 y 12 ramas con canal recto del lado izquierdo en 2D y 3D.

#### 4.5 Efecto de la asimetría del microcanal en el flujo neto inducido

Como se mencionó en el capítulo III, el arreglo experimental para la generación de flujo y medición de velocidades con pinzas ópticas (POs) para la MB de TC requiere una distancia de por lo menos 38 mm entre la CB y *SI* (debido a la distancia que existe entre las monturas ópticas) y la longitud total de los microcanales fabricados es de 58 mm (debido a la limitante del tamaño del cubreobjetos utilizado para sellar algunos microcanales, ver apéndice), por esta razón se evaluó el efecto del flujo neto inducido por dos microcanales con las mismas dimensiones y número de

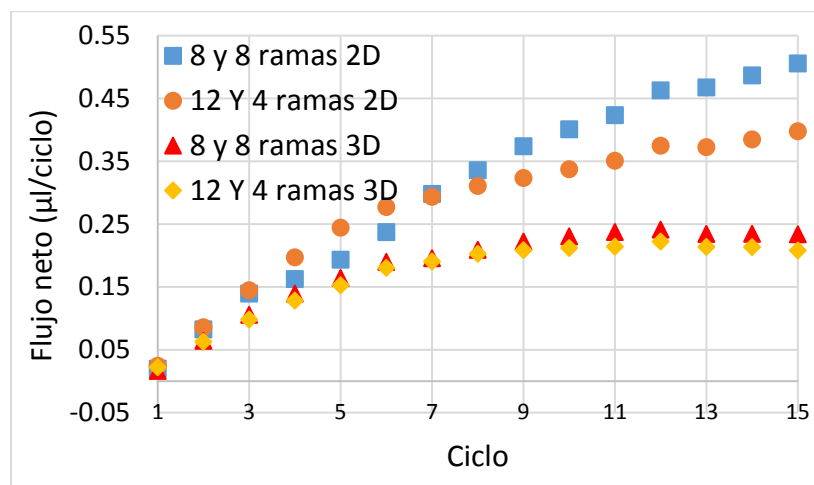
ramas totales, pero uno de ellos con un mayor número de ramas del lado izquierdo de la CB. Estos microcanales fueron los de 8 y 8 ramas y 12 y 4 ramas.

En la figura 4.10 se muestra el flujo neto por ciclo obtenido con cada uno de los microcanales, para 15 ciclos simulados en 2D y 3D.

Como se observa, el flujo neto inducido sí se ve afectado por la asimetría, pues en las simulaciones en 2D, se induce mayor flujo con la geometría de 8 y 8 ramas, con un total de  $0.50 \mu\text{l}$  en el ciclo 15, contra  $0.40 \mu\text{l}$  para la geometría de 12 y 4. En los primeros 3 ciclos el flujo neto es muy similar para ambas geometrías, aproximadamente  $0.085 \mu\text{l}$ , en el segundo ciclo. A continuación, a partir del cuarto ciclo y hasta el sexto, se induce un mayor flujo con la geometría de 12 y 4 ramas; sin embargo, la tendencia cambia nuevamente a partir del ciclo 7. En cuanto a la estabilidad del flujo inducido por ciclo, se observa que a partir de ciclo 15 comienza a haber una tendencia a estabilizarse para ambas geometrías.

En cuanto a los modelos en 3D, también se induce un mayor flujo con el microcanal de 8 y 8 ramas, sin embargo la diferencia es mínima con respecto al de 12 y 4 ramas, pues se induce un total de  $0.23 \mu\text{l}$  en el ciclo 15 con el de 8 y 8 ramas y  $0.21 \mu\text{l}$  con el de 12 y 4. En los primeros 4 ciclos no existe una diferencia entre los flujos netos inducidos.

Con respecto a la comparación entre las simulaciones en 2D y 3D, la geometría de 8 y 8 ramas muestra una diferencia de 117% en el flujo neto inducido en el quinto ciclo para el modelo 2D con respecto al 3D y la geometría de 12 y 4 ramas muestra una diferencia del 90%. Una vez más este valor muestra las deficiencias de los modelos en 2D.



**Figura 4.10.** Flujo neto inducido como función del ciclo simulado para los microcanales de 8 y 8 y 12 y 4 ramas en 2D y 3D.

## **4.6 Efecto de la frecuencia y tamaño de la burbuja en la inducción de flujo para el microcanal de 8 y 8 ramas**

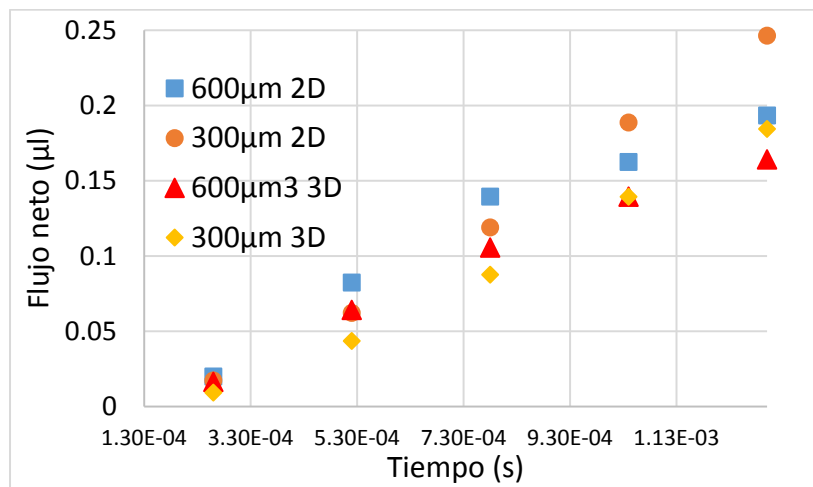
Como se mencionó en el capítulo III, a la geometría de 8 y 8 ramas se le realizó una pequeña modificación en la entrada del microcanal, pues de manera arbitraria se cambió el tamaño de la burbuja de  $600\ \mu\text{m}$  a  $300\ \mu\text{m}$  y se colocó como condición de frontera una frecuencia de oscilación mayor, correspondiente a  $130\ \mu\text{s}$  de tiempo total de expansión y colapso, equivalente a la mitad del tiempo de oscilación usado para los otros modelos. Esto se realizó para observar el efecto de estos parámetros en la inducción de flujo (los valores se determinaron únicamente basados en el hecho de que al aumentar la frecuencia de oscilación, disminuye el tamaño de la burbuja de TC).

En la figura 4.11 se observa el flujo neto como función del periodo de tiempo para la geometría de 8 y 8 ramas, con ambos tamaños de burbuja ( $600\ \mu\text{m}$  y  $300\ \mu\text{m}$ ), correspondientes a frecuencias de oscilación de  $260\ \mu\text{s}$  y  $130\ \mu\text{s}$ , respectivamente (modelos en 2D y 3D). Para realizar una adecuada comparación de los modelos, el flujo inducido por la geometría de  $300\ \mu\text{m}$  de tamaño de burbuja se multiplicó por un factor de 4, pues al disminuir el tamaño de la burbuja a la mitad, el volumen de la condición de frontera a la entrada disminuye cuatro veces y se deseaba comparar únicamente el efecto del flujo inducido por las ramificaciones sin efectos del volumen a la entrada. Además se simuló el flujo neto como función de cada determinado periodo de tiempo y no del ciclo, pues mientras que en la geometría de  $600\ \mu\text{m}$  hay un ciclo de expansión y colapso en la de  $300\ \mu\text{m}$  hay dos.

En cuanto a los modelos en 2D, se induce un mayor flujo en el último periodo de tiempo con la geometría de burbuja de  $300\ \mu\text{m}$ , correspondiente a  $0.24\ \mu\text{l}$  contra  $0.19\ \mu\text{l}$  para la geometría de burbuja de  $600\ \mu\text{m}$ , sin embargo, esta tendencia cambia después del tercer periodo, ya que en los primeros 3 se induce un mayor flujo con la geometría de burbuja de  $600\ \mu\text{m}$ .

Con respecto a los modelos en 3D, el comportamiento es similar, ya que en los 3 primeros periodos de tiempo se induce mayor flujo con la geometría de burbuja de  $600\ \mu\text{m}$ , pero justo en el cuarto periodo los flujos se igualan y en el quinto se induce un mayor flujo neto con la geometría de burbuja de  $300\ \mu\text{m}$ , correspondiente a un total de  $0.18\ \mu\text{l}$  contra  $0.16\ \mu\text{l}$  para la geometría de burbuja de  $600\ \mu\text{m}$ .

En referencia a la comparación de los modelos en 2D y 3D, para la geometría de burbuja de  $600\ \mu\text{m}$ , hay una diferencia en los datos del flujo en el quinto periodo del modelo en 2D con respecto al 3D del 17 % y para la geometría de  $300\ \mu\text{m}$  hay una diferencia del 33.5%. En estos casos la diferencia no es tan grande como en los anteriores pero sigue siendo importante.



**Figura 4.11.** Flujo neto inducido como función del periodo de tiempo para el microcanal de 8 y 8 ramas con burbuja de 600 µm y 300 µm de diámetro en 2D y 3D.

#### 4.7 Comparación del flujo neto total y eficiencia volumétrica de las geometrías simuladas

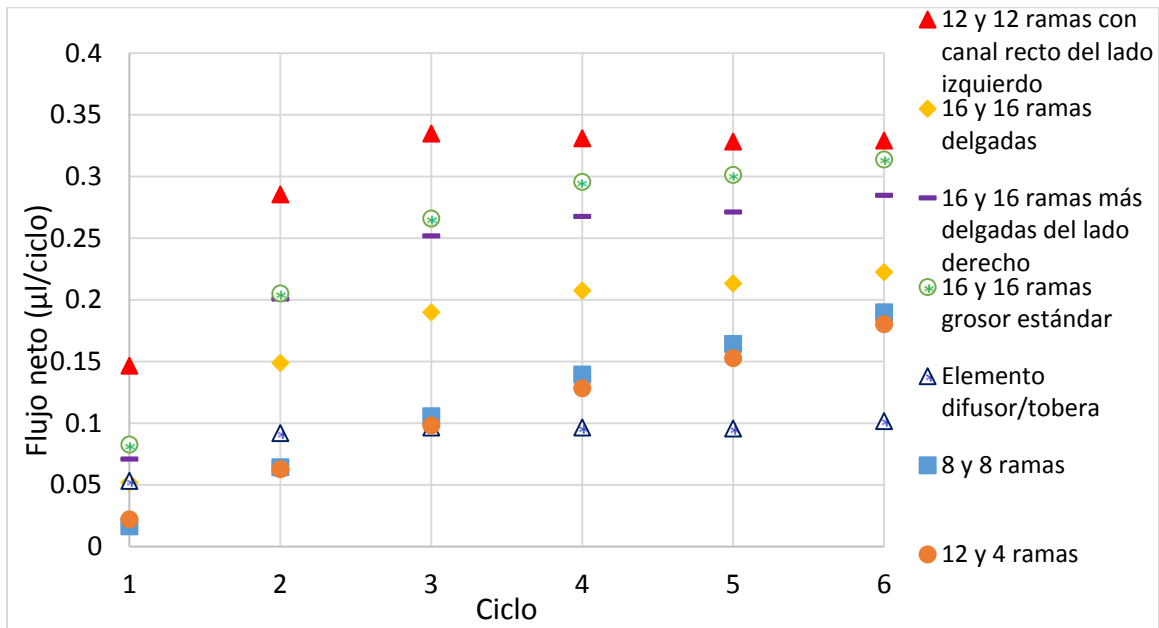
En la figura 4.12 se muestra un resumen del flujo neto inducido como función del ciclo para las diferentes geometrías simuladas. Como se vio en las secciones anteriores, existe una diferencia significativa entre los resultados de los modelos en 2D y 3D, por tal motivo en la figura solo se muestran los resultados de los modelos en 3D, ya que son los que presentan mejores aproximaciones al considerar el grosor total del canal.

En general la geometría de 12 y 12 ramas con un canal recto del lado izquierdo es la que presenta mejor desempeño, con un total de 0.33 µl en el sexto ciclo, donde el flujo neto por ciclo ya es estable para este diseño. Esta geometría además tiene la ventaja de presentar mayor longitud del lado izquierdo de la CB, lo cual como se mencionó anteriormente, se requiere de preferencia para la implementación experimental. Al desempeño de este microcanal le siguen el de 16 y 16 ramas de grosor estándar con un total de 0.31 µl y el de 16 y 16 ramas con ramas más delgadas del lado derecho, con 0.28 µl. A continuación sigue el microcanal de 8 y 8 ramas, sin embargo el flujo neto de este último microcanal en el sexto ciclo mostrado en la figura 4.12 aún no presenta un comportamiento estable por ciclo, es hasta el ciclo 9 que comienza a estabilizarse, llegando hasta 0.23 µl en el ciclo 15 (figura 4.10). Con un flujo neto por ciclo muy similar al de 8 y 8 ramas, sigue el microcanal de 16 y 16 ramas delgadas, con un total de 0.22µl en el sexto ciclo cuando el flujo neto por ciclo ya es estable. Finalmente, la geometría que induce menor cantidad de flujo (con un valor muy similar a los de 8 y 8 ramas y 16 y 16 ramas delgadas) es la de 12 y 4 ramas, sin embargo, al igual que con la geometría de 8 y 8 ramas, el flujo neto inducido por esta geometría comienza a estabilizarse hasta el ciclo 9, llegando a un total de 0.21 µl en el ciclo número 15 (figura 4.10).

En la figura 4.12 también se observa el flujo neto generado por un elemento difusor/tobera, el cual se modeló, para comparar su desempeño general con respecto a las válvulas Tesla. Los resultados muestran que este microcanal es el que presenta el peor comportamiento, comparado con todas las



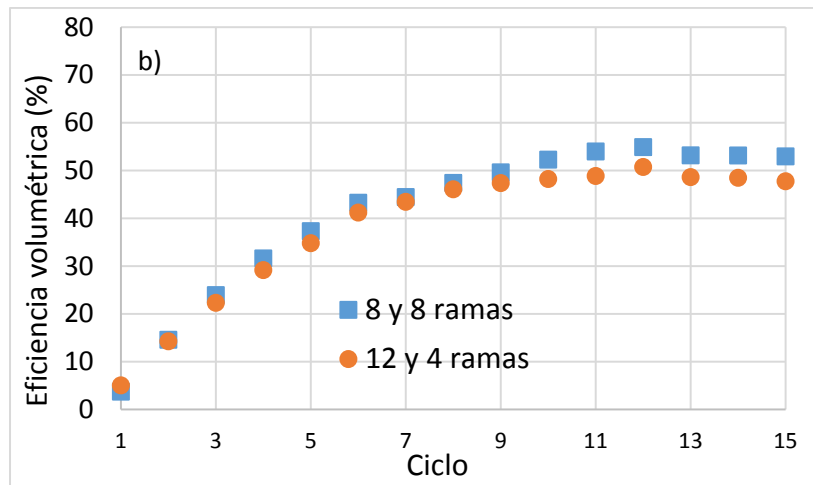
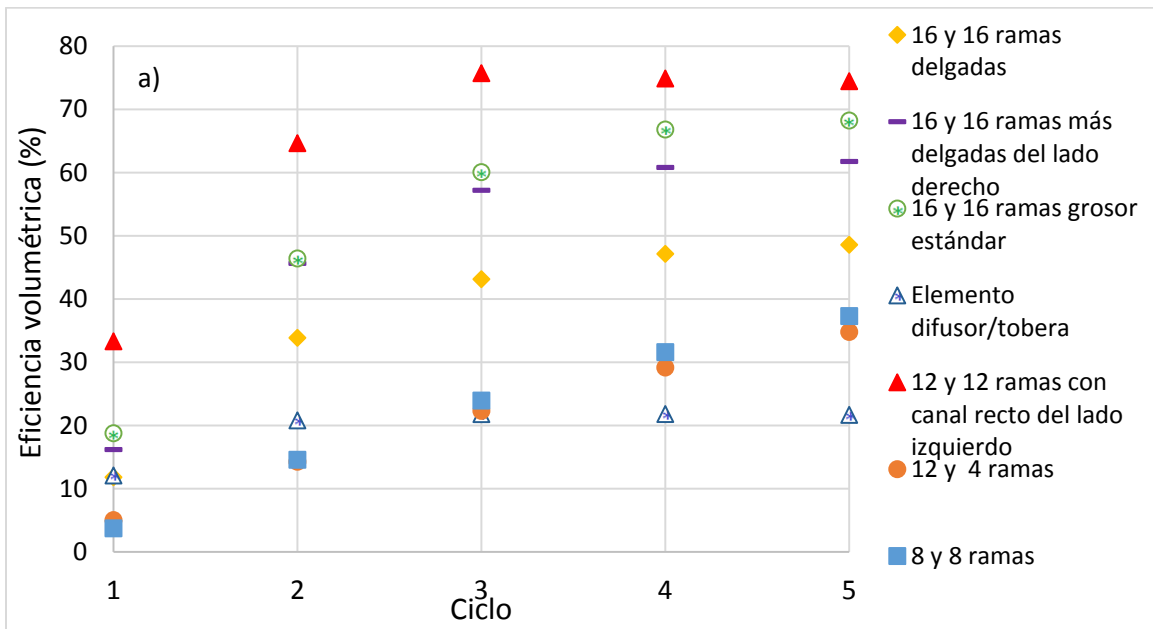
geometrías de válvula Tesla, pues se induce un total de 0.10  $\mu\text{l}$  en el sexto ciclo, donde el flujo neto ya es totalmente estable por ciclo.



**Figura 4.12.** Flujo neto inducido por ciclo para las geometrías modeladas

En la figura 4.13 se muestran las eficiencias volumétricas para las geometrías simuladas correspondiente a 6 ciclos de expansión y colapso de la burbuja (figura 4.13a) y 15 ciclos (para las geometrías de 8 y 8 y 12 y 4 ramas, figura 4.13b), como se observa, todas las geometrías guardan la misma proporción que el flujo neto como función del ciclo, ya que en todos los casos el flujo volumétrico a la entrada es el mismo.

Como es bien sabido, ni las válvulas Tesla ni los elementos difusor/tobera presentan eficiencias cercanas al 100 %, pues cuando el flujo retorna siempre hay pérdidas, sin embargo el canal de 12 y 12 ramas con canal recto del lado izquierdo, que es el que presentó mejor desempeño, llega hasta una eficiencia de 74.8 % en el sexto ciclo, mientras que el de 12 y 4 ramas que fue el de peor desempeño llega hasta un 48 %. Por otro lado, el elemento difusor tobera, presenta una eficiencia de apenas el 23 % también en el sexto ciclo.



**Figura 4.13.** Eficiencia volumétrica para las geometrías modeladas a) 6 ciclos y b) 15 ciclos para las geometrías de 12 y 4 y 8 y 8 ramas.

#### 4.8 Análisis de la aceleración inducida sobre el flujo en cada geometría simulada

Un parámetro que también jugó un papel importante en el desempeño de todos los diseños modelados fue el grado de aceleración que experimentaron en el primer ciclo, pues debido a que el tamaño de las ramas era diferente en todas las geometrías, la cantidad de masa a mover y el grado de resistencia al flujo también eran diferentes, lo que ocasionó que algunas se aceleraran más y por lo tanto se generaran gradientes de presión mayores entre la entrada  $En$  y la salida  $Sl$ .

Dicha aceleración se calculó por medio de la siguiente expresión:

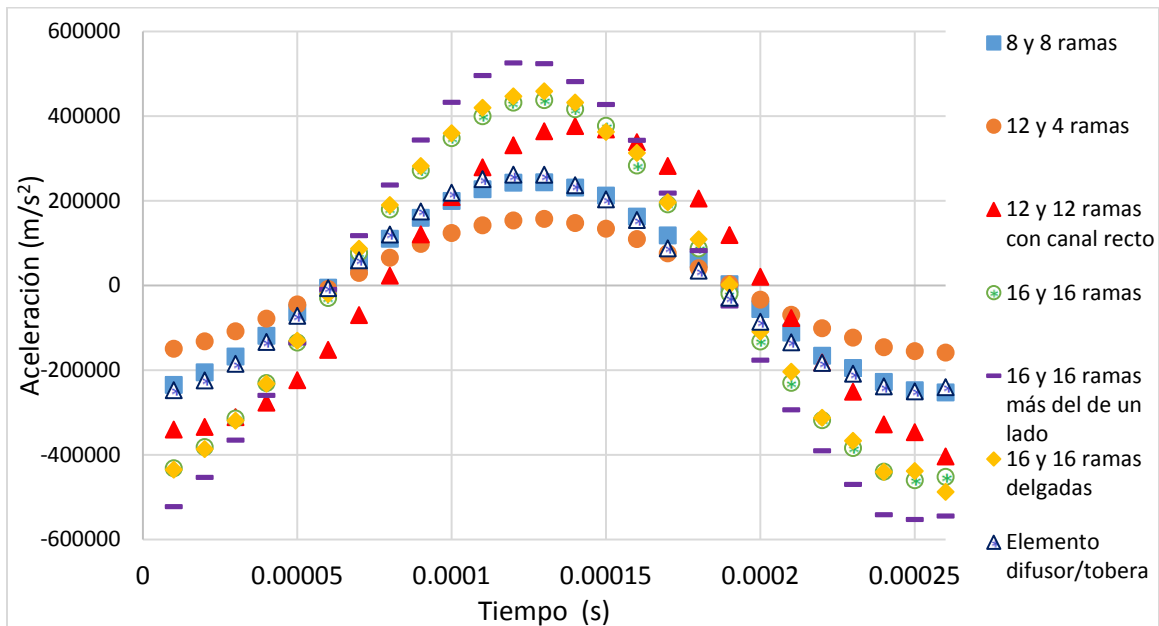
$$a(t) = \frac{d(v(t))}{dt}, \quad (4.9)$$

donde  $a(t)$  es la aceleración como función del tiempo y  $v(t)$  es la velocidad promediada espacialmente como función del tiempo en la salida  $SI$  y se obtuvo por medio de la ecuación:

$$v(t) = \frac{Q_{s1}(t)}{A}, \quad (4.10)$$

donde  $Q_{s1}(t)$  es el flujo volumétrico como función del tiempo en  $SI$  y  $A$  es el área de sección transversal en  $SI$ .

En la figura 4.14 se observa una gráfica de dicha aceleración como función del tiempo en el primer ciclo para las geometrías modeladas.



**Figura 4.14.** Aceleración como función del tiempo para las geometrías modeladas en el primer ciclo de expansión y colapso de la burbuja.

Como se observa la geometría que sufre una mayor aceleración es la de 16 y 16 ramas con ramas más delgadas del lado derecho, esto se debe quizás a que es una de las que tiene que mover menor cantidad de masa ( $1.66 \times 10^{-5}$  kg) y además en la fase de expansión de la burbuja, al ser más delgadas las ramas del lado derecho, hay una mayor resistencia en dicha zona, lo que hace que el flujo se acelere más del lado izquierdo. En comparación, los diseños de 16 y 16 ramas y 16 y 16 ramas delgadas se aceleran aproximadamente en la misma magnitud pero en menor medida que el de 16 y 16 ramas con ramas más delgadas del lado derecho, esto se debe quizás a que aunque en el de 16 y 16 ramas delgadas hay una menor cantidad de masa ( $1.32 \times 10^{-5}$  kg), también hay una mayor resistencia al flujo ambos lados de la cámara de bombeo, lo que hace que se acelere en la misma magnitud que la geometría de 16 y 16 ramas con grosor estándar y debido a que en esta última hay mayor cantidad de masa ( $1.98 \times 10^{-5}$  kg), entonces se induce mayor cantidad de flujo con esta geometría. Después de las geometrías de 16 y 16 ramas la siguiente que más se acelera es la de 12 y 12 ramas con un canal recto del lado izquierdo, esto es debido quizás a que a pesar de ser la que menor cantidad de masa ( $1.22 \times 10^{-5}$  kg) tiene que mover de todos los diseños de válvulas Tesla,

también tiene mayor resistencia por el tamaño de las ramas y la carga a vencer (el canal recto). A continuación, el elemento difusor/tobera y la geometría de 8 y 8 ramas, presentan una aceleración aproximadamente igual, esto debido quizás a que aunque el elemento difusor/tobera tiene que mover menor cantidad de masa ( $0.93 \times 10^{-5} \text{kg}$ ) también es la que presenta menor longitud, por lo que la diferencia de presión entre *CB* y *SI* que se genera es menor, por esta razón es la que induce menor cantidad de flujo. Finalmente, la geometría que presenta la menor aceleración como función del tiempo en el primer ciclo es la de 12 y 4 ramas, esto se debe exclusivamente a la asimetría del microcanal, pues tiene la misma cantidad de masa ( $3.44 \times 10^{-5} \text{kg}$ ) y el mismo tamaño y número de ramas que la geometría de 8 y 8 ramas. Debido a esta menor aceleración, esta geometría induce menor cantidad de flujo que la de 8 y 8 ramas.

Finalmente, también se evaluó la aceleración promedio para todos los microcanales en cada ciclo. Esta aceleración se obtuvo a partir de la velocidad promedio en cada ciclo y se obtuvo por medio de la siguiente expresión:

$$\overline{a_{S1}} = \frac{d(\bar{v})}{dt} \quad (4.11)$$

donde  $\overline{a_{S1}}$ , es la aceleración promedio,  $\bar{v}$  es la velocidad promediada espacial y temporalmente después de cada ciclo y se obtuvo de la siguiente forma:

$$\bar{v} = \frac{\overline{Q_{S1}}}{A} \quad (4.12)$$

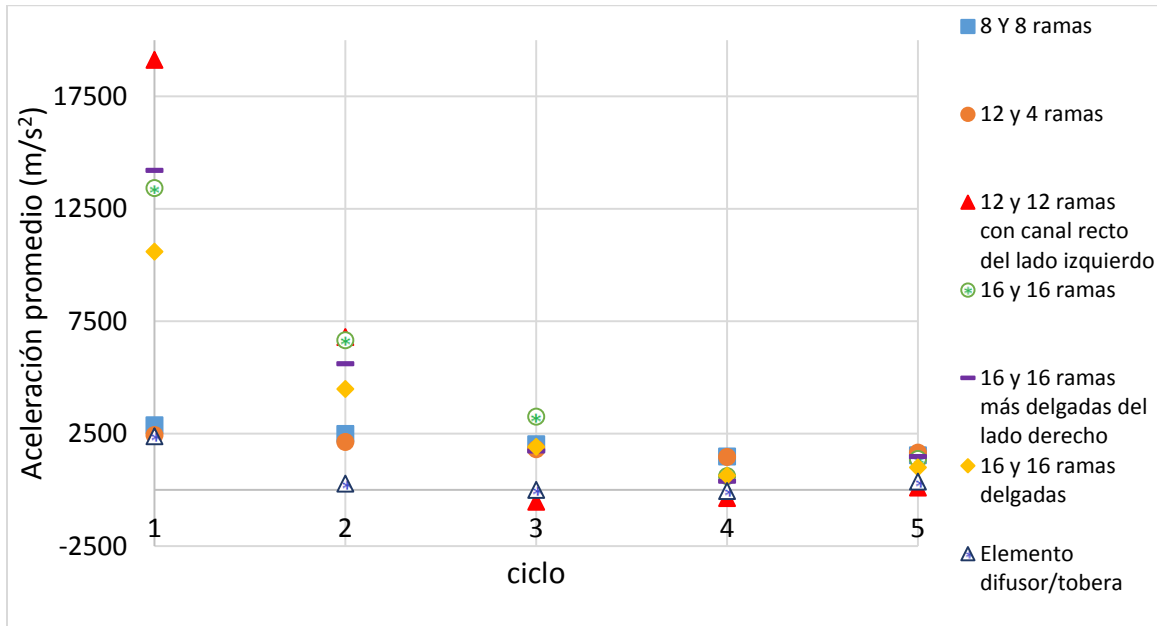
donde *A* es el área de sección transversal del canal en *SI* y  $\overline{Q_{S1}}$  es el flujo promedio por ciclo, obtenido por medio de la siguiente ecuación:

$$\overline{Q_{S1}} = \frac{Q_{n-S1}}{T} \quad (4.13)$$

donde  $Q_{n-S1}$  es el flujo neto por ciclo y *T* es el periodo de expansión y colapso de la burbuja ( $260 \mu\text{s}$ ).

En la figura 4.15 se muestra la aceleración promedio como función del ciclo. Como se observa, en promedio la geometría de 12 y 12 ramas con un canal recto del lado izquierdo es la que presenta una mayor aceleración en el primer ciclo, pues como ya se dijo, aunque presenta una resistencia al flujo relativamente grande por el tamaño de las ramas, es la que mueve menor cantidad de masa y además el gradiente de presión, el cual está directamente relacionado con esta aceleración, se genera en una longitud mayor que con los canales simétricos, lo que aumenta dicha aceleración. Seguidas de esta geometría, la de 16 y 16 ramas y 16 y 16 ramas con ramas más delgadas del lado derecho, son las que se aceleran más, pues también mueven una cantidad de masa relativamente pequeña. A continuación sigue la geometría de 16 y 16 ramas delgadas, la cual aunque debería acelerarse más por la menor cantidad de masa que mueve (con respecto a las otras geometrías de 16 y 16 ramas), también es la que presenta mayor resistencia al flujo en las ramas, lo que impide su aceleración. Las geometrías de 8 y 8 y 12 y 4 ramas son los diseños de válvula Tesla que sufren una menor aceleración promedio en el primer ciclo, pues a pesar de que por el tamaño de las ramas,

se presenta una resistencia menor, son las que mueven mayor cantidad de flujo. La geometría que en promedio se acelera menos es la del elemento difusor/tobera pues aunque es la que mueve menor cantidad de flujo, el gradiente de presión que se genera ocurre en una longitud menor (distancia entre la cámara de bombeo y S1), por lo que no es tan significativo y no se acelera mucho. Finalmente, como se observa, todas las geometrías tienden a una aceleración promedio de cero, pues a medida que aumenta el número de ciclos el flujo volumétrico promedio y por lo tanto la velocidad promedio tienden a un valor constante.



**Figura 4.15.** Aceleración promedio por ciclo para las geometrías modeladas

## 4.9 Comparación de la microbomba de termocavitación con las estudiadas en el capítulo I

En la tabla 4.1 se muestra un breve resumen sobre las principales características (ventajas y desventajas) y el flujo volumétrico máximo obtenido con las MBs descritas en el capítulo I y con la MB de TC propuesta en este trabajo.

Como se observa, son muy variadas las características de dichas MBs, pues como ya se mencionó antes, dependen de la aplicación a la cual están enfocadas. En cuanto al flujo volumétrico que se logró inducir con estas MBs, se observa que se encuentra en un rango bastante amplio, pues va desde los 2.9  $\mu\text{l}/\text{min}$  hasta los  $3.2 \times 10^{12}$   $\mu\text{l}/\text{min}$ . De acuerdo a este rango, la MB de TC, se encuentra dentro de las MBs que inducen un alto flujo volumétrico, superada solo por la MB de cavitación óptica con láser pulsado. Este valor de flujo debe ser determinado experimentalmente y comparado con el modelo matemático, pues si coincide, existe la posibilidad de que dicha MB no pueda ser caracterizada por medio de un sistema de PO como se planteó en el capítulo II; sin embargo, podría utilizarse otra técnica diferente a la de videomicroscopía para calibrar dicho sistema y utilizarlo en la medición de velocidades.

**Tabla 4.1.** Comparación de las MBs estudiadas en el capítulo I con la MB de TC

	<b>Tipo de microbomba</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>	<b>Flujo máximo (µl/min)</b>
<b>Mecánicas</b>	Electrostáticas	*Bajo consumo de potencia	*Altos voltajes	850 (Zengerle <i>et al.</i> , 1995)
	Piezoeléctricas	*Fuerzas de actuación grandes	*Procesamiento complicado *Altos voltajes	50 (Hsu <i>et al.</i> , 2008)
	Termoneumáticas	*Alta presión *Alto grado de desplazamiento de la membrana	*Alto consumo de potencia *Alto tiempo de respuesta	21.6 (Jeon <i>et al.</i> , 2005)
	Electromagnéticas	*Fuerzas de actuación grandes	*Dificultad para micromaquinar materiales magnéticos *Reducción de fuerzas de actuación a escala micrométrica	1,000 (Pan <i>et al.</i> , 2005)
<b>No mecánicas</b>	Magnetohidrodinámicas	*No tienen partes móviles	*Restringidas a fluidos conductores *Generación de burbujas	1,900 (Heng <i>et al.</i> , 2000)
	Electroosmóticas	*No tienen partes móviles *Bajo tiempo de respuesta	*Restringidas a soluciones electrolíticas *Altos voltajes	2.9 (Wang <i>et al.</i> , 2006)
	De ultrasonido	*No tienen partes móviles *Bajos voltajes	Procesamiento complejo de los materiales	69,000 (Meng <i>et al.</i> , 2000)
	Electroquímicas	*No tienen partes móviles	*Puede haber generación no controlada de burbujas	27 (Kabata <i>et al.</i> , 2005)
	De burbujas	*No tienen partes móviles *Se puede reducir su tamaño sin sacrificar la potencia de bombeo	*La generación de burbujas implica calentamiento	137 (Kanakaris <i>et al.</i> , 2015)
	De cavitación óptica con láser pulsado	*No tienen partes móviles *Mecanismo de bombeo no invasivo Calentamiento puntual en la generación de burbujas	*Costo elevado	3.2x10 <sup>12</sup> (Dijkink y Ohl, 2008)
	<b>De termocavitación</b>	<b>*No tienen partes móviles</b> <b>*Bajo costo</b> <b>*Calentamiento puntual</b> <b>*Mecanismo de bombeo no invasivo</b> <b>Bajo tiempo de respuesta</b>	<b>*Restringidas a soluciones que absorben en la longitud de onda del láser utilizado</b>	9,000 (G R Wang <i>et al.</i> , 2004) <b>75,692</b> <b>(Microbomba propuesta)</b>

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha implementado un modelo matemático tanto en 2D como 3D para evaluar el flujo generado por una microbomba (MB) de termocavitación (TC) que induce flujo en un microcanal con geometría de una válvula Tesla. Se diseñaron microcanales con diferente tamaño y número de ramas. En general, los diferentes diseños mostraron un comportamiento cualitativo similar entre sí, semejante al esperado, es decir que con todos se generó un flujo neto en la salida de interés,  $S1$ ; sin embargo, el valor cuantitativo de dicho flujo resultó ser dependiente tanto de la geometría específica de la válvula utilizada como del tamaño y frecuencia de oscilación de la burbuja de TC.

Los mallados utilizados tanto en 2D como 3D permitieron una adecuada combinación entre el nivel de convergencia de la solución y costo computacional.

Para los diferentes microcanales se simularon varios ciclos de expansión y colapso y se observó que en general, en los primeros ciclos, tanto en la fase de expansión como la de colapso, se indujo aproximadamente la misma cantidad de flujo en ambas salidas,  $S1$  y  $S2$ ; sin embargo, a medida que aumentaba el número de ciclos, en la fase de expansión había un mayor flujo en  $S1$  y en la fase de colapso el flujo que retornaba principalmente era el de  $S2$ . Este comportamiento generó el flujo neto en  $S1$ .

El flujo neto generado con las diferentes geometrías mostró que hay diferencias en los datos del flujo neto por ciclo de hasta 128% de los modelos en 2D con respecto a los 3D. Esto es debido a que el error para este parámetro es acumulativo. Dichos resultados muestran cómo a escala micrométrica el modelado en 2D puede llegar a proporcionar resultados erróneos si no se validan los datos con un modelo en 3D.

El flujo neto inducido por ciclo para las geometrías de 16 y 16 ramas y 12 y 12 ramas con canal recto del lado izquierdo, tendió a un valor estable por ciclo a partir del tercero, en cambio para la geometría de 12 y 4 y 8 y 8 ramas observó estabilidad del flujo a partir del ciclo número 9.

La evaluación del grosor del microcanal mostró que el de grosor estándar fue el que indujo mayor cantidad de flujo, seguido por el microcanal de mayor grosor del lado derecho.

En el análisis del tamaño y número de ramas se mostró que más que el número de ramas, su tamaño es el que influye de manera significativa en la cantidad de flujo inducido, pues aunque se indujo mayor flujo con la geometría de 16 y 16 que con la de 8 y 8 ramas, a su vez, también se indujo mayor flujo con la de 12 y 12 ramas con canal recto del lado izquierdo (cuyas ramas eran las más pequeñas de las geometrías comparadas) que con la de 16 y 16.

También se mostró que no hay un efecto significativo en el flujo inducido entre geometrías simétricas y asimétricas.

En el estudio del tamaño de la burbuja se encontró que en los últimos ciclos simulados se indujo una mayor cantidad de flujo con la burbuja de 300  $\mu\text{m}$  que con la de 600  $\mu\text{m}$ ; sin embargo, se requiere un estudio más profundo de este parámetro para dar conclusiones definitivas, pues con

el tiempo simulado no se mostró ninguna tendencia de la estabilidad del flujo por ciclo. Además, también es necesario analizar otros tamaños de burbuja para observar mejor el comportamiento de este parámetro.

En el modelado del elemento difusor/tobera, se mostró que su desempeño está muy por debajo de las válvulas Tesla, incluso comparado con el diseño que mostró el peor comportamiento, esto muestra las ventajas de utilizar estos componentes a pesar de que su geometría sea más compleja.

También se observó que en general las válvulas Tesla presentan mejores eficiencias volumétricas que los elementos difusor/tobera, siendo la geometría de 12 y 12 ramas con canal recto del lado izquierdo la que presentó el mejor desempeño con una eficiencia del 75%, un valor relativamente alto para este tipo de componentes reguladores de flujo, donde las eficiencias no llegan a ser cercanas al 100% debido a la fase de reversibilidad del flujo.

Finalmente, se observó que aunque la geometría de 12 y 12 ramas es la que induce mayor cantidad de flujo, esto se debe no solo a la geometría propia sino también a que en promedio es la que sufre una mayor aceleración promedio del fluido en el primer ciclo, debido principalmente a que es la que menor cantidad de fluido tiene que mover. Por el contrario, aunque las geometrías de 8 y 8 y 12 y 4 ramas son las que inducen menor cantidad de flujo de los diseños de válvula Tesla, también son las que al tener ramas más grandes deben mover mayor cantidad de fluido y por lo tanto se aceleran menos.

De acuerdo a lo anterior, el trabajo a futuro que se sugiere para continuar con esta línea de investigación es: 1) Realizar un análisis más detallado de la influencia del tamaño de burbuja en el flujo inducido, así como variar la relación de aspecto de las ramas en los microcanales para determinar su influencia. 2) Validar el modelado matemático realizado pero ahora con datos de burbujas de TC generadas en un ambiente confinado como el del microcanal propuesto, ya que como se vió en el capítulo III, los datos aquí utilizados corresponden a burbujas generadas entre dos placas planas paralelas y existe la posibilidad que hayan diferencias significativas entre las burbujas generadas en uno y otro caso. 3) realizar un estudio detallado del desempeño de las MBs estudiadas en este trabajo pero ahora bajo diferentes cargas de operación, esto con la finalidad de evaluar la diferencia de presión entre ambas salidas como función del flujo neto inducido y determinar el punto óptimo de operación. 4) También se propone llevar a implementación experimental los microcanales que presentaron mejor comportamiento, esto para evaluar su desempeño con respecto al mostrado en los modelos. Es importante mencionar que esto ya se ha tratado de hacer, sin embargo, hasta ahora los resultados no han sido satisfactorios, debido a diversos problemas relacionados con las técnicas de fabricación para los MC. 5) Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos en los puntos anteriores, podría plantearse la posibilidad de realizar un modelo matemático que evaluara la dinámica de la burbuja de TC y no sólo el comportamiento del flujo generado dentro del microcanal por medio un flujo volumétrico en la entrada como condición de frontera. Esto podría servir para determinar las posibles razones por las cuales hasta el momento no se ha logrado inducir flujo experimentalmente.



## REFERENCIAS

- Abhari, F., Jaafar, H., Yunus, N. A. (2012). A Comprehensive study of micropumps technologies. *International Journal of Electrochemical Science*, 7, 9765–9780.
- Afrasiab, H., Movahhedy, M. R., Assempour, A. (2011). Proposal of a new design for valveless micropumps. *Scientia Iranica B*, 18(16), 1261-1266.
- Almendarez-Rangel, P. (2017). Implementación de un sistema de medición de velocidad con aplicación en microfluidos basado en el uso de pinzas ópticas. *Tesis de maestría. Universidad Autónoma de San Luis Potosí*.
- Ashkin, A. (1970). Acceleration and trapping of particles by radiation pressure. *Physical Review Letters*, 24(4), 24–27.
- Ashkin, A. (1992). Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime. *Biophysical Journal*, 61(2), 569–582.
- Ashkin, A., Dziedzic, J. M., Bjorkholm, J. E., Chu, S. (1986). Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. *Optics Letters*, 11(5), 288–290.
- Baek, J-H., Hwang, S.U., Lee, Y.G. (2007). Trap stiffness in optical tweezers. *En Asian Symposium for Precision Engineering and Nanotechnology*.
- Berrospe-Rodriguez, C., Visser, C. W., Schlautmann, S., Ramos-Garcia, R., Rivas, D. F. (2016). Continuous-wave laser generated jets for needle free applications. *Biomicrofluidics*, 10, 1-9.
- Bird, R.B., Stewart, W. E., Lightfoot, E. N. (2006). Fenómenos de Transporte (2da edición). México: Limusa Wiley
- Cheng, H. (2012). Wet Etching. In *Handbook of Visual Display Technology*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, (p. 861–870).
- Darabi, J., Rada, M., Ohadi, M., Lawler, J. (2002). Design, fabrication, and testing of an electrohydrodynamic ion-drag micropump. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 11(6), 684–690.
- Dijkink, R., Ohl, C.-D. (2008). Laser-induced cavitation based micropump. *Lab on a Chip*, 8(10), 1676–81.
- Forster, F. K., Williams, B. E. (2002). Parametric design of fixed-geometry microvalves-the Tesser valve. *En Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (p. 431–437).

- Forster, F. K., Bardell, R. L., Afromowitz, M. A., Sharma, N. R., Blanchard, A. (1995). Design, fabrication and testing of fixed-valve micro-pumps. En Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division, (p. 39–44).
- Friedrich, C. R., Vasile, M. J. (1996). Development of the micromilling process for high-aspect-ratio microstructures. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 5(1), 5–10.
- Geipel, A., Doll, A., Goldschmidtboing, F., Jantscheff, P., Esser, N., Massing, U., Woias, P. (2006). Pressure-independent micropump with piezoelectric valves for low flow drug delivery systems. En 19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, (p. 786–789).
- Grier, D. G. (2003). A revolution in optical manipulation. *Nature*, 424, 810–816.
- Gross, B. C., Erkal, J. L., Lockwood, S. Y., Chen, C., Spence, D. M. (2014). Evaluation of 3D printing and its potential impact on biotechnology and the chemical sciences. *Analytical Chemistry*, 86, 3240–3253.
- Heng, K-H; Wang, W., Murphy, M.C., Lian, K.(2000) UV-LIGA microfabrication and test of an ac-type micropump based on the magnetohydrodynamic (MHD) principle. *En Proceedings of SPIE, Microfluidic Devices and Systems III*, 4177, (pp. 161-171).
- Hsu, Y. C., Lin, S. J., Hou, C. C. (2008). Development of peristaltic antithrombogenic micropumps for in vitro and ex vivo blood transportation tests. *Microsystem Technologies*, 14(1), 31–41.
- Jeong, O. C., Park, S. W., Yang, S. S., Pak, J. J. (2005). Fabrication of a peristaltic PDMS micropump. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 123–124, 453–458.
- Jian, A. Q., Zhang, K., Wang, Y., Lau, S. P., Tsang, Y. H., Zhang, X. M. (2012). Microfluidic flow direction control using continuous-wave laser. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 188, 329–334.
- Jung, J. Y., Kwak, H. Y. (2007). Fabrication and testing of bubble powered micropumps using embedded microheater. *Microfluidics and Nanofluidics*, 3, 161-169
- Kabata, A., Suzuki, H., Kishigami, Y., Haga, M. (2005). Micro system for injection of insulin and monitoring of glucose concentration. *En Proceedings of IEEE Sensors*, (p. 171–174).
- Kanakaris, G. P., Fatsis-Kavalopoulos, N., Alexopoulos, L. G. (2015). Laser activated single-use micropumps. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 220, 549-556.

- Kandlikar, S. G., Grande, W. J., Grande, W. J. (2017). Evolution of microchannel flow passages-thermohydraulic performance and fabrication technology. *Heat Transfer Engineering*, 24(1), 3-17
- Laser, D.J., Santiago, J.G. (2004). A review of micropumps. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14, 35-64.
- Li, T. (2013). Fundamental tests of physics with optically trapped microspheres. *Springer Thesis*.
- Li, X., Liu, S., Fan, P., Werner, C.F., Miyamoto, K., Yoshinobu, T. (2017). A bubble-assisted electroosmotic micropump for a delivery of a droplet in a microfluidic channel combined with a light-addressable potentiometric sensor. *Sensors and Actuators: B. Chemical*, 248, 993–997.
- Lin, S., Zhao, L., Guest, J. K., Weihs, T. P., Liu, Z. (2015). Topology Optimization of fixed-geometry fluid diodes. *Journal of Mechanical Design*, 137, 1–8.
- Liu, B., Sun, J., Li, D., Zhe, J., Oh, K. W. (2016). A high flow rate thermal bubble-driven micropump with induction heating. *Microfluidics and Nanofluidics*, 20(11), 1–9.
- Mack, C. (2007). Fundamental principles of optical lithography: the science of microfabrication. England: John Wiley and Sons, Ltd.
- Manual de ANSYS Fluent version 2016.
- Mcdonald, J. C., Duffy, D. C., Anderson, J. R., Chiu, D. T. (2000). Fabrication of microfluidic systems in polydimethylsiloxane. *Electrophoresis*, 21, 27–40.
- Meng, A. H., Nguyen, N. T., White, R. M. (2000). Focused flow micropump using ultrasonic flexural plate waves. *Biomedical Microdevices*, 2(3), 169–174.
- Morganti, E., Pignatelli, G. (2005). Microfluidics for the treatment of the hydrocephalus. *En 1st International Conference on Sensing Technology* (p. 483–487).
- Nisar, A., Afzulpurkar, N., Mahaisavariya, B., Tuantranont, A. (2008). MEMS-based micropumps in drug delivery and biomedical applications. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 130, 917-942.
- Oxtoby, D. W. (1992). Homogeneous nucleation: theory and experiment. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 4, 7627, 7650.
- Padilla-Martinez, J. P., Berrospe-Rodriguez, C., Aguilar, G., Ramirez-San-Juan, J. C., Ramos-Garcia, R. (2014). Optic cavitation with CW lasers: A review. *Physics of Fluids*. 26, 1-12.

- Padilla-Martinez, J.P, Ramirez-San-Juan, J.C., Korneev, N., Banks, D., Aguilar, G, Ramos-Garcia, R. (2013) Breaking the Rayleigh-plateau instability limit using thermocavitation within a droplet. *Atomization Sprays* 23(6), 487–503.
- Pan, T., McDonald, S. J., Kai, E. M., Ziaie, B. (2005). A magnetically driven PDMS micropump with ball check-valves. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 15(5), 1021–1026.
- Pang, J., Zou, Q., Tan, Z., Qian, X., Liu, L., Li, Z. (1998). The study of single-chip integrated microfluidic system. *En Proceedings of 15th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology*, (p. 895–898).
- Pawlowski, A., Belloy, E., Sayah, A., Gijs, M. A. M. (2003). Powder blasting patterning technology for microfabrication of complex suspended structures in glass. *Microelectronic Engineering*, 68, 557–565.
- Pérez-Gutiérrez, F. G., Campos-Cortez, E., Padilla-Martínez, Juan Pablo, Romero-Méndez, R., Aguilar, G. (2011). Estudio experimental de la dinámica de burbujas de cavitación inducidas por un láser de CW entre dos fronteras sólidas. En *Memorias del XVII Congreso Internacional Anual de la SOMIM* (p. 1180–1186).
- Prakash, S., Kumar, S. (2014). Fabrication of microchannels: A review. *En Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* (p. 1-16).
- Raffel, M. Particle image velocimetry: a practical guide. Springer, 2013.
- Ramirez-San-Juan, J., Padilla-Martinez, J., Zaca-Moran, P., Ramos-Garcia, R., Webb, C. E., Jones, J. D., Korneev, N. (2011). Micro-hole drilling in thin films with cw low power lasers. *Optical Materials Express*. 1(4), 598-604
- Ramirez-San-Juan, J.C., Rodriguez-Aboytes, E, Martinez-Canton, A.E, Baldovino-Pantaleon, O, Robledo-Martinez, A, Korneev, N, Ramos-Garcia, R. (2010). Time-resolved analysis of cavitation induced by CW lasers in absorbing liquids. *Optics Express*, 18(9), 8735-8742.
- Ramirez-San-Juan, J.C., Rodriguez-Aboytes, E., Martínez-Canton, A. E., Baldovino-Pantaleon, O., Torres-Hurtado, S., Robledo-Martinez, A., Ramos-Garcia, R. (2015). Cavitation induced by CW lasers in absorbing liquids. *En Proceedings of SPIE, Optical Interactions with Tissues and Cells XXI*, 7562, (p.1-5).
- Rastopov, S. F., Sukhodolsky, A. T. (1990). Sound generation by thermocavitation induced CW-laser in solutions. *SPIE. Optical Radiation Interaction with Matter*, 1440, 127-134.

- Rastopov, S.F Sukhodolsky; A.T. (1987). Self-organization of the heat cycle due to thermal cavitation during continuous laser heating of a liquid. *Sovietic Physics.Dokl*, 38(2), 671-673.
- Sato, Y., Inaba, S., Hishida, K., Maeda, M. (2003). Spatially averaged time-resolved particle-tracking velocimetry in microspace considering Brownian motion of submicron fluorescent particles. *Experiments in Fluids*, 35(2), 167–177.
- Sia, S. K., Whitesides, G. M. (2003). Microfluidic devices fabricated in poly (dimethylsiloxane) for biological studies. *Electrophoresis*, 24, 3563–3576.
- Takemori, Y., Horiike, S., Nishimoto, T., Nakanishi, H., Yoshida, T. (2005). High pressure electroosmotic pump packed with uniform silica nanospheres. *En the 13th International Conference on Solid State Sensors and Actuators and Microsystems*, (p. 1573–1576).
- Thomas, L.J., Bessman, S.P. (1975). Micropump powered by piezoelectric disk benders. Patent 3,963,380, USA.
- White, F.M. (2008). *Mecánica de Fluidos* (6ta edición). México: Ed. Mc Graw Hill.



## **APÉNDICE. Diseño y manufactura de microcanales**

El diseño y fabricación de microcanales son aspectos de gran importancia en el desarrollo de microbombas (MBs), pues de la simplicidad, costo, calidad y pertinencia del o los métodos empleados depende el costo total y adecuado funcionamiento de éstas.

Como se vio en el capítulo I, las aplicaciones a las cuales están destinadas las MBs son muy variadas, por tal motivo se ha implementado una gran variedad de técnicas para el diseño y fabricación de microcanales. Estas técnicas dependen de la aplicación a la cual están enfocados, pero algunas son muy costosas y difíciles de implementar, por lo que la selección de la técnica más adecuada involucra, además de la aplicación de interés, la selección de la tecnología que se desea usar y a la cual se puede acceder, determinación de la precisión requerida en el maquinado y selección de los materiales a utilizar de acuerdo a la técnica que se desea emplear, o en su caso, selección de la técnica a emplear de acuerdo a las propiedades de los materiales con los que se requiere trabajar.

El objetivo de este apéndice es presentar una descripción general de las técnicas más empleadas en la fabricación de microcanales, así como describir y analizar las técnicas de fabricación empleadas en la manufactura del microcanal empleado en la MB de termocavitación (TC) modelada en este trabajo.

### **A.1 Técnicas empleadas en la fabricación de microcanales**

Las técnicas más comúnmente empleadas en la fabricación de microcanales y que se describen a continuación incluyen microfresado, chorro de arena, grabado, litografía y corte láser. Estas técnicas se pueden combinar o implementar con algunas variantes, o más aún, se pueden utilizar otras técnicas menos comunes que también proporcionan ciertas ventajas ((Prakash y Kumar, 2014)). Esto da lugar a la amplia variedad en los procesos de microfabricación existentes.

#### **A.1.1 Microfresado**

La fabricación de herramientas con dimensiones en el orden los micrómetros o milímetros y el surgimiento de tecnologías como el control numérico computacional (CNC), han generado la implementación de procesos de corte mecánico, como el fresado, a escala micrométrica (Friedrich y Vasile, 1996). La fabricación de microcanales por microfresado se basa en la remoción del material de determinado sustrato, por medio de una máquina fresadora, para generar la geometría deseada. Algunas de las ventajas de esta técnica es que presenta alto nivel en la precisión del maquinado, adecuado acabado de la superficie, alta precisión en la forma deseada y alta velocidad de corte. Además, por medio de esta técnica se puede procesar una gran variedad de materiales, tales como metales, plásticos, polímeros o incluso vidrio. Entre sus desventajas se encuentra el desgaste de la herramienta de corte y generación de grietas (Prakash y Kumar, 2014)

#### **A.1.2) Chorro de arena**

La fabricación de microcanales por chorro de arena es una técnica de ataque mecánico (erosión) utilizada para la fabricación de microcanales sobre materiales frágiles, como vidrio, cerámicos y

silicio. Se basa en la remoción de material por medio de partículas abrasivas que son aceleradas a través de una boquilla y golpean al sustrato a una velocidad que va de 80 a 200 m/s. Antes del ataque, el sustrato es cubierto con una máscara que define la geometría deseada y protege la zona alrededor de ésta, de tal forma que solo la superficie sobre la cual se desea generar el microcanal es erosionada. Cuando el sustrato es impactado con las partículas, el área de contacto se deforma plásticamente debido al alto esfuerzo de compresión resultante. Esta deformación lleva a grandes esfuerzos de tensión que resultan en grietas laterales, las cuales provocan la remoción del material. La boquilla se escanea sobre el sustrato algunas veces hasta obtener la profundidad deseada (Wensink, Berenschot y Elwenspoek, 2000)

Es una técnica simple y rápida de implementar, sin embargo la resolución de la técnica esta entre los 50-100  $\mu\text{m}$  (cuando se usan partículas de arena de 30  $\mu\text{m}$ ) por lo que los retos de esta técnica involucran el uso de partículas cada vez más pequeñas en combinación con máscaras que permitan grabados muy finos y sean altamente resistentes a la erosión (Pawlowski, Belloy, Sayah y Gijs, 2003)

### **A.1.3 Grabado**

El grabado se define como la remoción de material no deseado y existen dos tipos: grabado en seco y grabado en húmedo.

#### **a) Grabado en húmedo o ataque químico**

El grabado en húmedo, también conocido como ataque químico es un proceso en el cual el material no deseado se elimina por medio de reacciones químicas con reactivos como los ácidos o las bases. Para generar los microcanales, el sustrato es cubierto con una máscara, resistente a los reactivos químicos utilizados, que define la geometría deseada y protege la zona alrededor de ésta, de tal forma que solo la superficie sobre la cual se desea generar el microcanal es atacada. Esta técnica es usada principalmente para sustratos metálicos por su bajo costo, alto rendimiento y simplicidad. Sin embargo, debido a la naturaleza isotrópica de las reacciones químicas, presenta ciertas limitaciones para su implementación en la fabricación de microcanales con dimensiones críticas (Cheng, 2012).

No obstante, esta técnica también se puede implementar de forma anisotrópica sobre silicio. Para atacarlo se utilizan reactivos como el hidróxido de potasio o el pirocatecol etilendiamina, aunque, en este caso el ataque químico depende de la orientación cristalográfica del silicio, por lo que solo se pueden generar diseños muy específicos de microcanales (Kandlikar, Grande y Grande, 2017).

#### **b) Grabado en seco**

El grabado en seco se basa en la remoción anisotrópica (unidireccional) del material no deseado por medio de procesos de plasma, para generar especies reactivas por medio de bombardeo de iones o el uso de ablación láser (Cheng, 2012). Una técnica de grabado en seco de particular interés es el grabado profundo por iones reactivos (DRIE, por sus siglas en inglés). El método más utilizado para fabricar microcanales por medio de DRIE se conoce como Bosch-etch (debe el nombre a la empresa que lo comercializó).



El método Bosch-etch se utiliza para fabricar microcanales sobre sustratos de silicio con alta relación de aspecto (hasta 30:1). Esto se consigue por medio de un esquema que alterna un paso de pasivación y un paso de ataque. El sistema consta de una fuente de potencia acoplada inductivamente para proporcionar plasma de alta densidad y de un polarizador de potencia independiente para generar bombardeo de iones direccionado durante la etapa de ataque. En la etapa de pasivación se deposita de manera conformacional una capa protectora de polímero por medio de deposición química de vapor mejorada con plasma. A continuación, en la etapa de ataque, el sustrato es bombardeado por iones direccionados, lo que genera que en el punto de ataque se perfora la capa de polímero y se comienza a formar el microcanal. Las paredes del microcanal están relativamente protegidas con la capa de polímero. La iteración de los ciclos de pasivación/ataque permite generar las características deseadas de anisotropía (Wasilik, Chen, n.d.)

#### **A.1.4 Litografía**

La litografía es una de las técnicas más ampliamente utilizadas en la fabricación de microcanales. Se define como la formación de imágenes en 3D sobre un sustrato por transferencia de un patrón con la geometría deseada (Mack, 2007). Existen diversas variantes de la litografía, una de las más utilizadas es la litografía suave, llamada así porque los microcanales se fabrican sobre materiales elastoméricos, como el polidimetil siloxano (PDMS). Una variante de esta técnica se conoce como moldeado de réplica (Sia y Whitesides, 2003)

El moldeado de réplica consiste en crear el diseño del microcanal en un software de computadora e imprimirlo sobre una fotomáscara (regularmente un negativo fotográfico). La impresión resultante consta de zonas claras y oscuras (las zonas claras corresponden a la geometría deseada). A continuación se adhiere una película fotosensible (esta película cambia sus propiedades al incidir luz sobre ella), por medio de aplicación de calor, sobre un sustrato, que puede ser vidrio o silicio. Sobre el sustrato con la película adherida se coloca la fotomáscara y se hace incidir luz (generalmente UV), de tal forma que la fotomáscara bloquea su paso hacia la película fotosensible en las zonas oscuras, por lo que solo se exponen las zonas correspondientes a la geometría deseada. Posteriormente se retira la fotomáscara y el sustrato se somete a revelado, etapa en la cual las partes no irradiadas de la película fotosensible adherida se disuelven con una solución química, quedando sobre el sustrato la geometría deseada en relieve, con un espesor correspondiente al espesor de la película fotosensible utilizada (1-300 $\mu$ m generalmente). El sustrato se somete a calentamiento fuerte para que la geometría se fije bien. De esta forma se obtiene el molde a replicar (Mcdonald, Duffy, Anderson y Chiu, 2000)

Para generar el microcanal, el molde se coloca sobre un contenedor y sobre dicho contenedor se vierte cierta cantidad de prepolímero líquido y se somete a calentamiento para que el polímero cure. A continuación, la placa de polímero se desprende del molde, quedando grabada una réplica del microcanal. Finalmente se sella permanentemente con otra capa de polímero pero sin geometría o con un vidrio, por medio de irradiación plasma, el cual cambia los enlaces del polímero en la superficie, haciéndolo adherible (Sia y Whitesides, 2003).

El uso de las fotomáscaras genera una resolución de hasta 20  $\mu\text{m}$ , por lo que para obtener mejores resoluciones es necesario usar máscaras de cromo, que son hasta 100 veces más caras y más lentas de procesar (McDonald *et al.*, 2000)

Para generar el molde se pueden utilizar otros métodos como electroformado de metales o grabado en silicio (McDonald *et al.*, 2000).

### **A.1.5 Corte láser**

La fabricación de microcanales mediante corte láser es una técnica muy simple con la capacidad de generar todo tipo de microestructuras. Consiste en la remoción de material por medio de un haz láser que golpea la superficie. Las características de corte dependen de la energía suministrada. Los fotones con longitud de onda menor contienen mayor cantidad de energía, mientras que los de longitud de onda mayor contienen menor energía. Debido a esto, los láseres con longitud de onda menor son mayormente utilizados, pues tienen la capacidad de cortar materiales transparentes como el vidrio o el cuarzo (Prakash y Kumar, 2014).

Con el surgimiento de los láseres de pulsos ultra cortos, las características cualitativas de los microcanales fabricados han mejorado significativamente. Cuando la intensidad del pulso que incide sobre un sustrato supera los  $10^3\text{W}/\text{cm}^2$ , el proceso de remoción entra en un régimen en el que la absorción no lineal en el material se vuelve importante, independientemente de que sea opaco o transparente a la longitud de onda del láser utilizado. La remoción del material depende de la longitud de onda utilizada, la duración del pulso y el número de pulsos utilizados (Prakash y Kumar, 2014).

### **A.1.6 Impresión 3D**

La impresión 3D, también conocida como manufactura aditiva, es otra técnica que ha surgido en los últimos años como una alternativa atractiva para la fabricación de microcanales. Consiste en la manufactura capa por capa, mediante seguimiento computacional, de cualquier geometría, ya sea muy simples o sumamente compleja (Vaezi, Seitz y Yang, 2013).

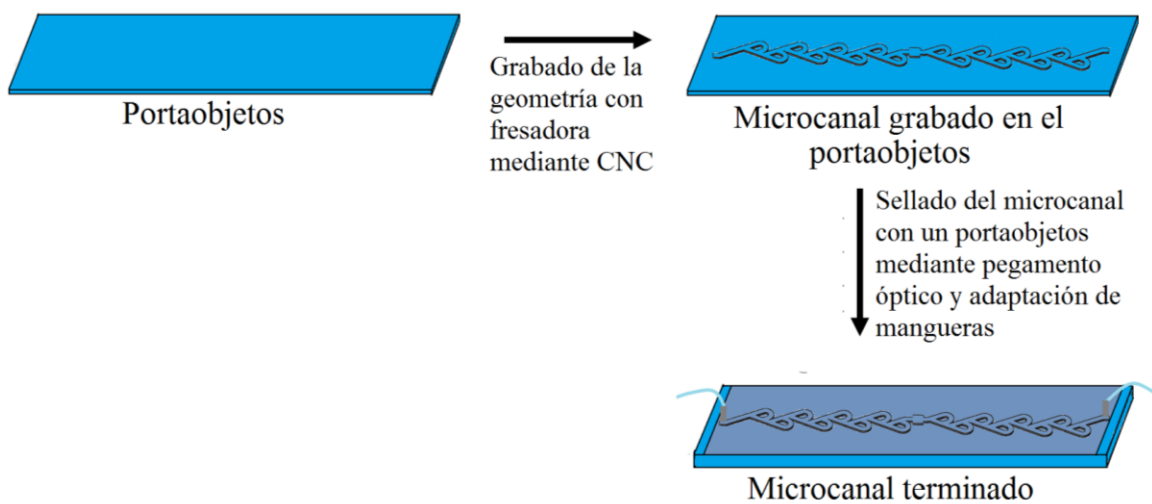
Esta técnica presenta resoluciones de hasta  $25\mu\text{m}$  y comparada con las técnicas de litografía, ofrece un proceso de fabricación mucho más simple, ya que elimina la necesidad de fabricación previa de moldes. Una de las grandes limitaciones de esta técnica es que solo se puede implementar con materiales basados en polvos o que tienen viscosidades suficientemente bajas como para ser extruidos a partir de la cabeza de impresión (Gross, Erkal, Lockwood, Chen y Spence, 2014).

## **A.2 Técnicas empleadas en la fabricación del microcanal para la microbomba de termocavitación**

En el desarrollo de este proyecto se fabricaron microcanales para la MB de TC por medio de microfresado, chorro de arena y litografía suave. En esta sección se describe la implementación de cada técnica. Así mismo se discuten las ventajas y desventajas de cada una, así como algunos problemas que surgieron al probarlos en la MB de TC.

### A.2.1 Fabricación por medio de microfresado con CNC

Inicialmente la fabricación de los microcanales se realizó por medio de la fresadora de CNC Roland MDX40A. La figura A.1 muestra un esquema general del proceso. Se utilizó un portaobjetos de vidrio como sustrato (75x24 mm y 1mm de grosor). El código para la generación de la geometría se realizó en lenguaje C. Las dimensiones del microcanal construido por esta técnica fueron 100  $\mu\text{m}$  de profundidad, 100  $\mu\text{m}$  de ancho de cada rama y 58 mm de largo. Se selló con un cubreobjetos (de 60x24 mm, grosor aproximado de 150  $\mu\text{m}$ ) por medio de pegamento óptico Norland 63 de Thorlabs, el cual cura por medio de luz UV, por lo que se sometió a este tipo de irradiación durante 30 minutos. Los extremos del microcanal se perforaron y se acoplaron con mangueras, de 1.5 mm de diámetro externo y 1.0 mm de diámetro interno, mediante conectores metálicos para que el flujo tuviera libertad de fluir.

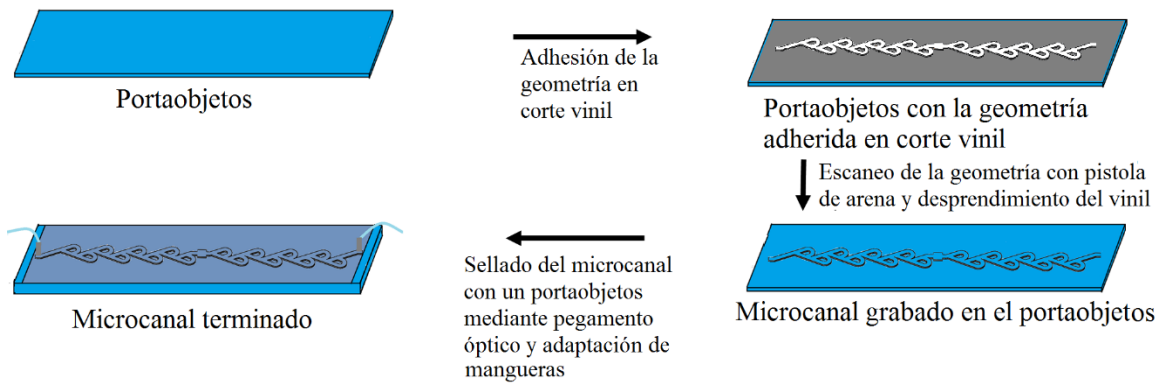


**Figura A.1.** Fabricación de microcanal mediante microfresado con CNC

El microcanal obtenido por esta técnica cumplía con los requerimientos necesarios en cuanto a calidad en la fabricación y control preciso de las dimensiones, sin embargo, a pesar de que el pegamento óptico se colocó a cierta distancia de la geometría grabada, se filtró hasta las ramas y canal principal, lo que ocasionó su obstrucción, por lo que no se pudieron realizar pruebas. Al intentar fabricar más canales se tuvieron problemas mayores con la herramienta de corte utilizada, lo que ocasionó que se descartara esta técnica como alternativa para la fabricación.

### A.2.2 Chorro de arena

Otra alternativa que se probó ampliamente fue la fabricación de los microcanales por medio de chorro de arena (figura A.2). Para implementar esta técnica también se utilizó un portaobjetos como sustrato. Además, se utilizó una impresión en corte vinil como máscara. El diseño de la geometría se realizó por medio del software Solid Works 2014. Para el grabado se usaron partículas abrasivas de sílice con un diámetro de 80  $\mu\text{m}$ . Se escaneo la pistola de arena sobre el sustrato durante 5 minutos aproximadamente. Estos microcanales también se sellaron con un cubreobjetos por medio de pegamento óptico. Así mismo, también se acoplaron con mangueras mediante conectores metálicos para que el flujo tuviera libertad de fluir.



**Figura A.2.** Fabricación de microcanales por medio de chorro de arena

Los microcanales obtenidos por esta técnica eran muy rugosos y más anchos de lo deseado, debido a que la resolución del corte vinil es únicamente hasta  $600\ \mu\text{m}$  (dependiendo de la velocidad y presión implementadas en el corte), además, la aplicación del chorro de arena de forma tan poco controlada generó poca uniformidad en la profundidad, la cual fue de aproximadamente  $300\ \mu\text{m}$ ; sin embargo, estos microcanales se pudieron sellar con relativa facilidad con pegamento óptico. Al probarlos, inicialmente si se logró inducir cierto flujo con uno estos microcanales, (se probó varias veces y siempre funcionó), sin embargo se despegó del cubreobjetos con el que estaba sellado y dejó de funcionar, ya que algunas partes estaban selladas y otras no, por lo que no se pudo caracterizar el flujo inducido. Debido a esto, se decidió continuar con su uso. Se fabricaron más canales con diferente número de ramas y del grosor más pequeño posible, pero debido a la falta de uniformidad y control del proceso, la inducción de flujo no llegó a ser reproducible, pues además, para que la zona marcada con la geometría en los microcanales más delgados no se obstruyera con pegamento al momento de unir el portaobjetos con el cubreobjetos, se tuvo que dejar un espacio entre el canal y una zona sin canal, lo que provocó que se generaran huecos que después ocasionaron problemas en la inducción del flujo pues el líquido entraba y salía de dichos huecos al generarse las burbujas de termocavitación. Debido a todo esto, se decidió cambiar de técnica.

### A.2.3 Litografía suave

Se optó por utilizar litografía suave basada en PDMS (moldeado de réplica) para fabricar canales de mejor calidad y con dimensiones más controladas. Se eligió este polímero porque que es transparente, inerte, inocuo y no tóxico, además, debido a sus características no se contamina fácilmente por microorganismos indeseables y en su forma líquida es capaz de rellenar huecos nanoscópicos.

En la figura A.3 se muestra un esquema de esta técnica, cuya metodología (incluyendo parámetros como la resolución del diseño para generar el negativo fotográfico y los tiempos de exposición UV y curado del PDMS) fue proporcionada por el Dr. Víctor Ruíz del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), después de varias pruebas realizadas por su grupo de investigación. Para la implementación de esta técnica también se utilizó un

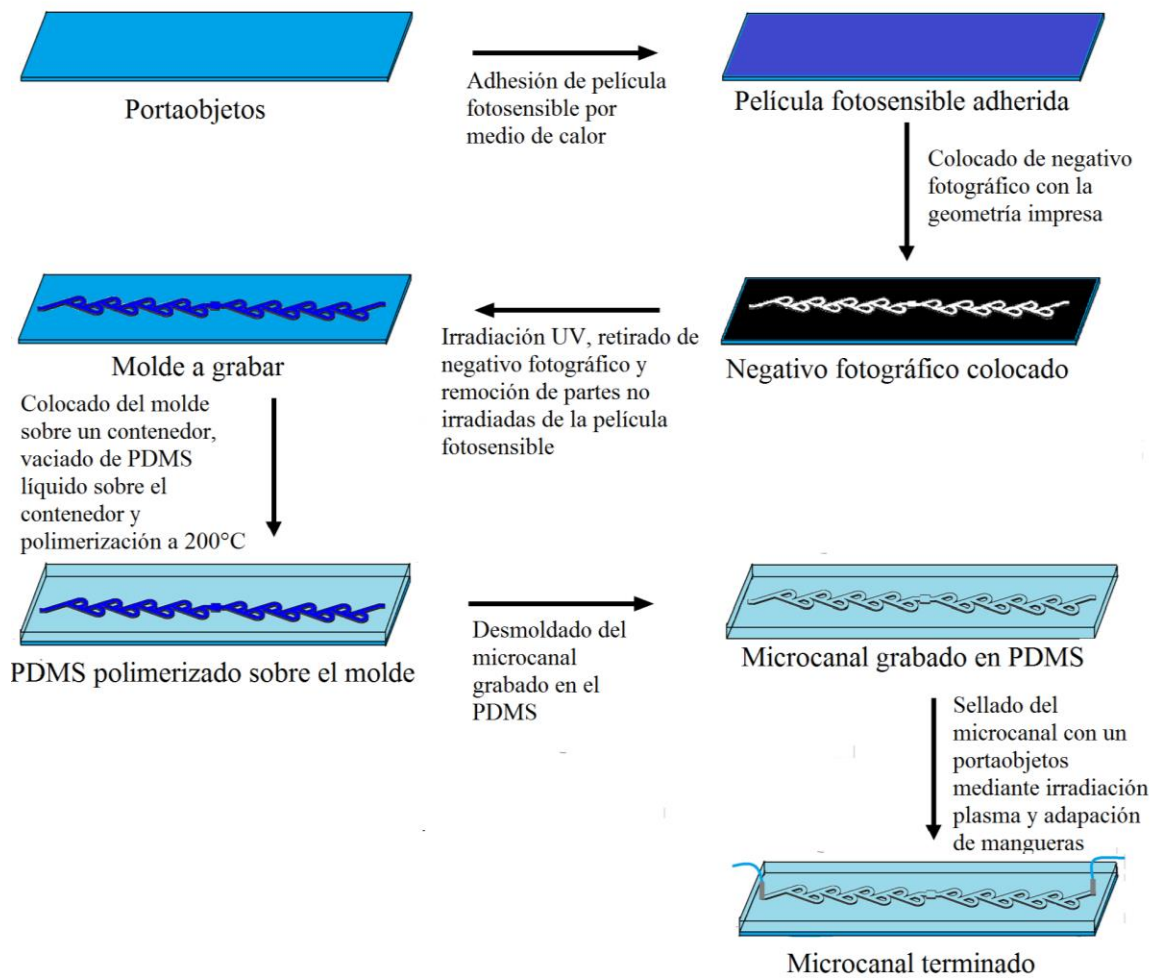
portaobjetos como sustrato para generar el molde, el cual primero se sometió a limpieza, para esto se introdujo en una solución de metanol durante una hora, a continuación se hirvió en un vaso de precipitados con agua milli-Q durante 4 horas y se secó con nitrógeno a presión. La metodología para generar el molde se basó en adherir sobre el sustrato, por medio de calor (con el uso de una enmicadora), una película de resina polimérica fotosensible de 30  $\mu\text{m}$  de espesor.

Al sustrato con la película fotosensible adherida se le hizo incidir luz UV proveniente de una lámpara de 30W durante 90 segundos, a través de un negativo fotográfico (revelado con fotografía tradicional para mejorar la resolución) que contenía el diseño del microcanal previamente realizado en Corel Draw XVI. Finalmente, se retiró el negativo y el sustrato se sumergió en revelador durante 5 minutos, para eliminar las partes de la película que no fueron irradiadas y dejar únicamente la geometría grabada en relieve. Para asegurar la adhesión al sustrato, el molde se sometió a una temperatura de 100°C durante 10 minutos.

El molde se introdujo en un contenedor de teflón con dimensiones similares a las del portaobjetos pero con altura de 5 cm aproximadamente. Se vertieron 7 ml de prepolímero líquido de PDMS (que consiste en una mezcla polímero base-agente polimerizador en una proporción en peso de 10:1) en el contenedor y se retiraron las burbujas generadas por medio de una bomba de vacío adaptada a un desecador. A continuación, el molde se sometió a polimerización en un horno a 200°C durante 15 minutos.

El PDMS ya polimerizado se retiró del horno y se desmoldó, obteniéndose así el microcanal (de 7mm de altura aproximadamente) con la geometría de la válvula grabada (con una profundidad aproximada de 30  $\mu\text{m}$ , correspondiente al grosor de la película fotosensible). Finalmente se selló. Para esto, se irradió su superficie y la de otro portaobjetos (y en algunos casos cubreobjetos) por medio de una fuente de plasma de ozono, con lo cual se adhirieron fácilmente las superficies de forma permanente y precisa. Al igual que con las otras técnicas, los extremos de los canales se perforaron y acoplaron con mangueras mediante conectores para que el flujo tuviera libertad de fluir.

Con esta técnica se obtuvieron microcanales muy finos con dimensiones sumamente controladas. Sin embargo, debido a que el espesor de la película fotosensible utilizada para implementar esta técnica era de apenas 30  $\mu\text{m}$ , al probarlos, no hubo generación de burbujas de TC, pues el volumen en la cámara de bombeo era muy pequeña. Para eliminar este problema, se intentó colocar dos y tres capas de la película fotosensible, sin embargo surgieron varios problemas, ya que o no se adherían bien, o se deformaban por exceso de calor, pues se necesitaba mayor calentamiento para que se adhirieran todas las capas. Debido a esto, se decidió utilizar otras técnicas para generar el molde.



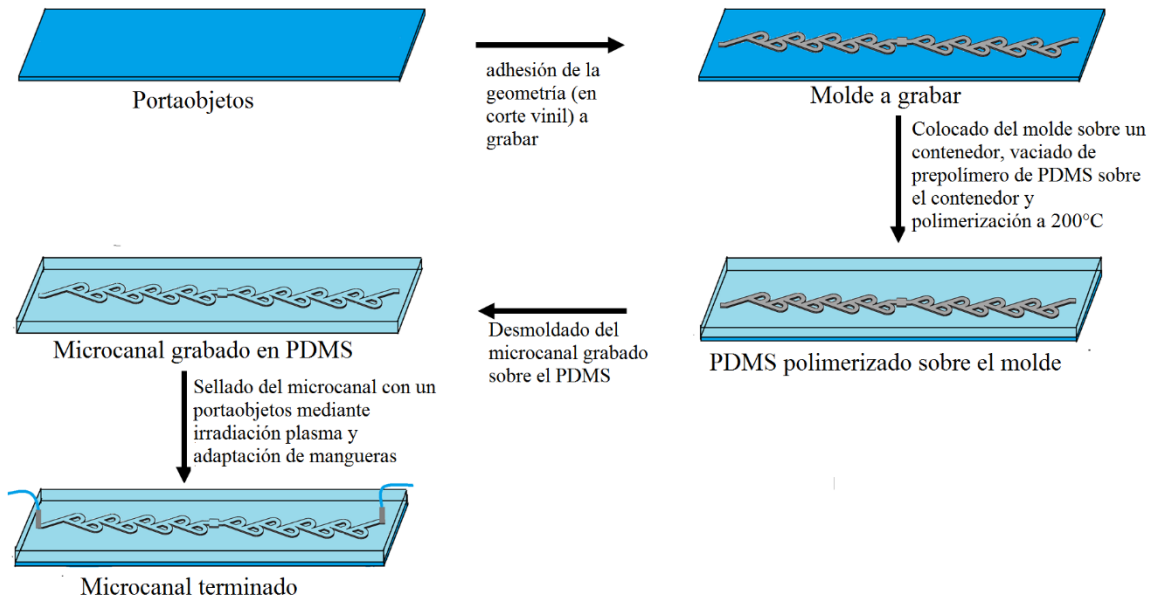
**Figura A.3.** Fabricación de microcanales por medio de litografía suave (generación del molde con película fotosensible)

Otra técnica que se probó para fabricar el molde, fue la impresión en 3D. Se utilizó la impresora 3D del CICESE, que deposita capas de resina polimérica de 25  $\mu\text{m}$  de espesor, las cuales solidifican por la incidencia de un láser UV. El molde que se imprimió fue de 100  $\mu\text{m}$  de espesor. Al terminar la impresión el molde fabricado se lavó con alcohol. Finalmente, para la generación del microcanal se siguieron los pasos previamente mencionados de litografía suave.

Con esta técnica también se obtuvieron microcanales finos y con dimensiones controladas, sin embargo, al probarlos, el espesor seguía siendo insuficiente para la generación de burbujas de TC y debido a la falta de disponibilidad de la impresora utilizada ya no se pudieron fabricar más moldes.

La última técnica de fabricación del molde que se utilizó se muestra en la figura A.4. Consistió en generarlo por medio de la impresión del diseño en corte vinil (de 260  $\mu\text{m}$  de espesor aproximadamente), el cual se adhirió a un portaobjetos utilizado como sustrato. A continuación,

para la generación del microcanal, también se siguieron los pasos previamente mencionados de litografía suave.



**Figura A.4.** Fabricación de microcanales por medio de litografía suave (generación del molde con impresión en corte vinil)

Esta técnica de fabricación fue la que proporcionó mejores resultados con respecto a las otras, ya que los microcanales resultaron ser de una alta calidad en la manufactura y aunque las dimensiones no tenían la resolución alcanzada con el molde de la película fotosensible o el de la impresión 3D, aún seguían siendo adecuadas (de acuerdo a los resultados del modelo matemático), además, la simpleza del método para generar el molde permitió una fabricación más fácil y rápida. A pesar de esto, al probarlos en la MC de TC, tampoco se consiguió inducir flujo con estos microcanales.

A continuación se describen razones adicionales, además de las ya mencionadas en la implementación de cada técnica, por las que se cree que no se logró inducir flujo en los microcanales fabricados con las diferentes técnicas.

**Geometría.** Un factor que pudo ocasionar la falta de repetitividad y estabilidad en los experimentos fue la cantidad de ramas usadas a cada lado de la cámara del canal. Esta cantidad, así como el grosor y tamaño de las ramas y profundidad y tamaño de la CB (en el moldeado de réplica con vinil e impresión 3D la CB se hizo más profunda que el microcanal colocando únicamente en esta zona varias capas de vinil superpuestas o una pequeña perla de aproximadamente 2 mm de espesor) se variaron sin éxito.

**Gravedad.** Otro factor que pudo ocasionar problemas fue la posición del canal, pues aunque estaba colocado en horizontal, los mangueras para introducir y expulsar el fluido estaban en posición vertical y aunque para comenzar a probar los canales, se fijaban ambas a la misma altura, algunas

veces se inducía el flujo solo hasta alcanzar 1 cm de diferencia en alturas y después dejaba de funcionar.

Después de probar con diferentes diseños, dimensiones y técnicas de fabricación del microcanal a utilizar, se determinó que quizás dos parámetros que podrían considerarse para realizar un estudio más detallado sobre las razones por las que no se logró inducir flujo son 1) la dinámica de las burbujas generadas, pues se tenía un control limitado sobre la frecuencia de generación, por lo que es probable que hubiesen periodos traslapados de expansión y colapso de dos burbujas diferentes que anulaban el efecto, y además no se tenía un sistema de visualización de las burbujas. 2) La calidad del spot del láser utilizado para generar las burbujas, ya que era muy baja por lo que también se cree que esto influyó significativamente (aunque si había generación de burbujas).

De acuerdo a esto, como trabajo a futuro se sugiere implementar un nuevo arreglo experimental que permita observar la dinámica de las burbujas para evaluar su desempeño y ajustar la posición del láser de forma más óptima, también se sugiere acoplar al láser un generador de retrasos para obtener burbujas con una frecuencia más controlada y no haya ningún efecto que cancele el bombeo. Además se recomienda que en la medida de lo posible se utilice un láser con una calidad de spot mejor. Otra alternativa podría ser cambiar el medio absorbente, por ejemplo se puede utilizar un colorante como el *direct red* #2 como fluido de trabajo, lo que implicaría que las burbujas de TC se generaran con un láser verde (longitud de onda en la que absorbe el *direct red*) y que el atrapamiento óptico se realizara con un láser infrarrojo de una calidad aceptable (longitud de onda a la que es transparente el *direct red*). Además también se sugiere probar con otros parámetros geométricos de los microcanales fabricados por medio de litografía suave (los cuales proporcionaron una fabricación de calidad y simpleza aceptables).