

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE TULANCINGO

MAESTRÍA EN COMPUTACIÓN ÓPTICA



**GENERACIÓN FOTOTÉRMICA DE MICROBURBUJAS Y SU
MANIPULACIÓN A TRAVÉS DE LA FUERZA DE MARANGONI**

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL
TÍTULO DE MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

ING. JULIO AURELIO SARABIA ALONSO

DIRECTOR DE TESIS

DR. JOSÉ GABRIEL ORTEGA MENDOZA (UPT)

DR. PLÁCIDO ZACA MORÁN (BUAP)

TULANCINGO, HIDALGO, MÉXICO.

OCTUBRE, 2017

DEDICATORIA

A mi maravillosa familia:

A mis inmejorables Papá y Mamá; gracias por estar presentes en cada día de mi vida apoyándome, gracias por educarme, quererme y ser una inspiración.

A mis tres super hermanos; cada momento junto a ustedes es invaluable, gracias por el apoyo y enseñanza.

A mi Sani; gracias por tu sincero apoyo y cariño, por ser mi mejor amiga, motor y cómplice en cada locura realizada ... y las que nos faltan !!

A mi Iktan.

Agradecimientos

Al Dr. José Gabriel Ortega Mendoza por su continua enseñanza, apoyo y dedicación para la realización de este trabajo.

Al Dr. Plácido Zaca Morán por su valiosa cátedra y apoyo en el desarrollo de este trabajo así como su agradable recibimiento durante mi estancia en la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Al Dr. Rubén Ramos García por su invaluable asesoría y amable hospitalidad ofrecida durante mi estancia en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica.

A los miembros del jurado: la Dra. Carina Toxqui Quitl, el Dr. Alfonso Padilla Vivanco y al Dr. José Alberto Delgado Atencio por su tiempo y contribuciones para la realización de este trabajo.

Al Dr. Juan Carlos Valdiviezo Navarro por su enseñanza, cordialidad y calidez humana.

A la Universidad Politécnica de Tulancingo por recibirme en sus instalaciones e instruirme a través de su Cuerpo Académico.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado.

Cada paso que he realizado, por muy pequeño que este sea, siempre ha estado acompañado y soportado por ustedes: mi familia, gracias por todo.

Resumen

La generación controlada de microburbujas de gas y vapor así como su manipulación presentan innumerables aplicaciones en la industria y la ciencia. El desarrollo de dispositivos MEMS (micro - electro - mechanical - system) ha impulsado la investigación en la dinámica de las microburbujas. Las principales técnicas para generar y manipular microburbujas están basadas en los fenómenos térmicos, acústicos y ópticos; la mayoría requiere el uso de una gran cantidad de energía, el desarrollo y construcción de microdispositivos o bien el uso de sustancias especiales. Dentro de las técnicas que emplean sustancias especiales están las técnicas fototérmicas; las cuales basan su funcionamiento en la absorción de energía fotónica por sustancias o coloides absorbentes, empleando una gran cantidad de energía y limitando su uso por las propias restricciones absorbentes.

En el presente trabajo de tesis, se investiga y presenta una técnica fototérmica de baja potencia para generar microburbujas e inducir su manipulación a través de la fuerza de Marangoni. La generación y manipulación de microburbujas se originan por la presencia de un gradiente de temperatura, él cual es producido por la interacción de una fuente de radiación coherente y nanopartículas metálicas inmovilizadas en el núcleo de fibra óptica.

Los estudios teórico-experimentales realizados muestran que la presencia de un gradiente de temperatura puede generar una microburbuja, la cual puede ser manipulada a través de la presencia y conmutación de dos o más gradientes de temperatura. Conmutando los gradientes es posible generar fuerzas en sentidos opuestos conduciendo a la manipulación de microburbujas de $115 \mu\text{m}$ de radio separadas una distancia de $798 \mu\text{m}$ del gradiente de temperatura, con una fuerza total de 400 nN , dominada principalmente por la fuerza de Marangoni. Bajo éstas condiciones las microburbujas alcanzan velocidades de 238 mm/seg . La generación y manipulación de microburbujas puede ser aplicada para generar movimiento rotativo en micro-motores, control y dirección de flujo en micro-dispositivos, desarrollo de sistemas de impresión, manipulación de micro-objetos, entre otros.

Abstract

The controlled generation of gas and vapor microbubbles as well as their manipulation presents innumerable applications in industry and science. The development of MEMS (micro - electro - mechanical - system) devices has boosted research in the dynamics of microbubbles. The main techniques for generating and manipulating microbubbles are based on thermal, acoustic and optical phenomena; most require the use of a large amount of energy, the development and construction of microdevices or the use of special substances. Among the techniques that employ special substances are photothermal techniques; which base their operation on the absorption of photon energy by the absorbent substances of the colloids, using a large amount of energy and limiting its use by the absorbent restrictions themselves.

In the present work, a low power photometric technique is investigated and presented to generate microbubbles and induce their manipulation through the Marangoni force. The generation and manipulation of microbubbles originates from the presence of a temperature gradient, which is produced by the interaction of a coherent radiation source and immobilized metal nanoparticles onto the core of an optical fiber.

The theoretical and experimental studies carried out show that the presence of a temperature gradient can generate a vapor microbubble. Which can be manipulated through the presence and switching of two or more temperature gradients. By switching these gradients it is possible to generate forces in opposite directions that lead to the manipulation of microbubbles of $115 \mu m$ radius, a distance of $798 \mu m$ from the temperature gradient, corresponds to a total force of 400 nN , dominated mainly by the force of Marangoni. Under these conditions microbubbles reach velocities up to 238 mm/sec . The generation and manipulation of microbubbles can be applied to generate rotary motion in micro-motors, control and direction of flow in micro-devices, development of printing systems, manipulation of micro-objects, among others.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes históricos	1
1.2. Generación de microburbujas	3
1.2.1. Acústica	3
1.2.2. Inyección de gas	4
1.2.3. Solubilidad del gas	5
1.2.4. Hidráulica	5
1.2.5. Electroquímica	6
1.2.6. Óptica	7
1.2.7. Térmica	8
1.3. Manipulación de microburbujas	9
1.3.1. Acústica	9
1.3.2. Eléctrica	10
1.3.3. Hidrodinámica	13
1.3.4. Química	13
1.3.5. Magnética	15
1.3.6. Óptica	15
1.3.7. Térmica	16
1.4. Planteamiento del problema	17
1.5. Objetivos	17
1.5.1. Objetivo general	17
1.5.2. Objetivos específicos	17
1.6. Justificación	18
1.7. Metodología	18
1.8. Estructura del trabajo de tesis	18
1.9. Referencias	20

2. Marco teórico	25
2.1. Introducción	25
2.2. Fuerza de radiación y sus efectos	27
2.2.1. Presión de radiación	27
2.2.2. Índice de refracción	27
2.2.3. Ley de refracción y reflexión	28
2.2.4. Fuerza de gradiente	29
2.2.5. Fuerza de esparcimiento	30
2.2.6. Absorción	30
2.2.7. Absorción electromagnética en metales	31
2.2.8. Coeficiente de absorción	32
2.2.9. Absorbancia	32
2.2.10. Atenuación	32
2.2.11. Fotodeposición	33
2.3. Transferencia de calor	34
2.3.1. Fenómenos que intervienen en la transferencia de calor	34
2.3.2. Radiación térmica	35
2.4. Ebullición	35
2.4.1. Punto de ebullición	35
2.4.2. Curva de ebullición	36
2.4.3. Ebullición nucleada	39
2.4.4. Convección natural	42
2.4.5. Convección de Termocapilar	42
2.5. Fuerzas presentes en la manipulación de microburbujas	43
2.5.1. Fuerza de Marangoni	43
2.5.2. Tensión superficial	44
2.5.3. Ley de Eötvös	45
2.5.4. Fuerza de arrastre o de Stokes	45
2.5.5. Número de Reynolds	45
2.5.6. Adhesión y Cohesión	46
2.5.7. Gradiente de temperatura	46
2.5.8. Fuerza de flotabilidad	46
2.5.9. Solución coloidal	47
2.6. Referencias	48
3. Desarrollo experimental	51
3.1. Fotodeposición	51
3.1.1. Absorbancia de nanopartículas de plata	51
3.1.2. Descripción experimental de fotodeposición	52
3.2. Generación de microburbujas	53
3.3. Manipulación de microburbujas	53

3.3.1. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente con emisión de radiación a diferente λ	55
3.3.2. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas horizontalmente con emisión de radiación a diferente λ	56
3.3.3. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente con emisión de radiación a la misma λ	57
3.3.4. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente fuera de eje con emisión de radiación a diferente λ	58
3.3.5. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente con emisión de radiación a la misma λ ; con y sin NPs	59
3.3.6. Arreglo horizontal de tres fibras ópticas con emisión de radiación a diferente λ	60
4. Resultados experimentales	62
4.1. Fotodeposición	62
4.1.1. Absorbancia de nanopartículas de plata	63
4.2. Generación de microburbuja	64
4.3. Manipulación de microburbujas	64
4.3.1. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente con emisión de radiación a diferente λ	65
4.3.2. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas horizontalmente con emisión de radiación a diferente λ	66
4.3.3. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente con emisión de radiación a la misma λ	66
4.3.4. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente y fuera de eje, con emisión de radiación a diferente λ	68
4.3.5. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente con emisión de radiación a la misma λ ; con y sin NPs	69
4.3.6. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente sin emisión de radiación; fuerza de flotabilidad	70
4.3.7. Arreglo horizontal de tres fibras ópticas con emisión de radiación a diferente λ	71
4.4. Termocavitación	72
5. Discusión	73
5.1. Generación de microburbujas	73
5.2. Gradiente de Temperatura	74
5.3. Interacción de fuerzas	77
5.3.1. Fuerzas hidrodinámicas	77
5.3.2. Fuerzas térmicas	77
5.3.3. Diagrama de fuerzas	77

5.4. Velocidad de desplazamiento	79
5.5. Potencias ópticas para la generación y manipulación de microburbujas	82
5.6. Referencias	83
6. Conclusiones	85

Índice de figuras

1.1. Generación acústica de microburbujas [23].	4
1.2. Generación de burbujas por inyección de gas.	5
1.3. Generación de burbujas mediante solubilidad.	5
1.4. Generación hidráulica de burbujas.	6
1.5. Generación de burbujas a través de electrólisis [26].	6
1.6. Generación óptica de microburbujas [28].	7
1.7. Generación térmica de burbujas.	8
1.8. Movimiento debido a dielectroforesis [38].	11
1.9. Arreglo EWOD [39].	12
1.10. Sistema electrocapilar sobre una burbuja [40].	12
1.11. Trampa hidrodinámica [42].	13
1.12. Movimiento de burbujas inmersas en medio electrolítico [46].	15
1.13. Haz Laguerre-Gauss. (a) Distribución espacial de la energía de un haz Laguerre-Gauss. (b) Confinamiento de una microburbuja en la zona libre de intensidad del haz Laguerre-Gauss.	16
2.1. Reflexión, absorción y transmisión de la luz [9].	28
2.2. Fuerza de gradiente de intensidad [5].	29
2.3. Fuerza de esparcimiento originada por la reflexión de la luz [5].	30
2.4. Proceso de fotodeposición de NPs metálicas.	33
2.5. Curva de ebullición de agua a la presión de 1 atm [15].	37
2.6. Regímenes de ebullición en estanque dentro de un recipiente con líquido [17].	40
2.7. Interacción entre una microburbuja y una superficie calefactora [17].	41
2.8. Mayor f_0 / f_1 reduce la energía necesaria para generar una burbuja.	41
2.9. Ley de tensión superficial de Young-Laplace.	42
2.10. Movimiento de una microburbuja debido a la fuerza de Marangoni [24].	44
3.1. Arreglo óptico para medición de absorbancia.	52

3.2. Proceso de fotodeposición de NPs metálicas sobre el núcleo de una fibra óptica.	52
3.3. Medidor de potencia (a). Esfera integradora (b).	53
3.4. Generación de microburbujas.	54
3.5. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente.	56
3.6. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas horizontalmente.	57
3.7. Arreglo de dos fibras ópticas con una misma λ	58
3.8. Arreglo vertical de dos fibras ópticas fuera de eje.	59
3.9. Terminal superior sin NPs de Ag, terminal inferior con NPs de Ag fotodepositadas.	60
3.10. Arreglo horizontal de tres fibras ópticas.	61
4.1. Núcleo de fibra óptica MM 105/125 μm sin NPs de Ag (a) y con NPs de Ag (b) fotodepositadas.	63
4.2. Absorbancia de NPs de Ag a $\lambda = 1064$ nm.	63
4.3. Secuencia de la generación de una microburbuja en la punta de una fibra óptica.	64
4.4. Secuencia del desplazamiento de una microburbuja en sentido $+z$ bajo diferente λ , atenuación y potencia.	65
4.5. Secuencia del desplazamiento de una microburbuja en sentido $-z$ bajo diferente λ , atenuación y potencia.	66
4.6. Secuencia del desplazamiento de una microburbuja en sentido $-z$ bajo diferente λ , atenuación y potencia.	66
4.7. Secuencia del desplazamiento de una microburbuja en sentido $+z$ con igual λ , atenuación y potencia.	67
4.8. Secuencia del desplazamiento de una microburbuja en sentido $-z$ con igual λ , atenuación y potencia.	67
4.9. Secuencia del desplazamiento vertical desalineado de una microburbuja en sentido $+z$ bajo diferente λ , atenuación y potencia.	68
4.10. Secuencia del desplazamiento vertical desalineado de una microburbuja en sentido $-z$ bajo diferente λ , atenuación y potencia.	69
4.11. Interacción entre una microburbuja y una fuente de radiación.	70
4.12. Desplazamiento de una microburbuja sin la emisión de radiación.	70
4.13. Secuencia del desplazamiento de una microburbuja entre tres fuentes de radiación con diferentes λ	71
4.14. Secuencia de la generación del fenómeno de termocavitación.	72
5.1. Configuración empleada para calcular la distribución espacial de la temperatura mediante el software COMSOL Multiphysics. La fibra es colocada dentro de la celda que contiene etanol.	75

5.2. Perfil de temperatura desde la fibra hasta el fondo de la celda, en este caso r coincide con el eje z	75
5.3. Radio de una microburbuja en función del tiempo de exposición. . .	76
5.4. Diagrama de fuerzas sobre una microburbuja en desplazamiento. . .	78
5.5. Fuerza de Marangoni sobre una microburbuja (con radio $R = 110 \mu m$, la fuente de calor está colocada a un $r = 0$) en función de la distancia r entre la fuente de calor y la microburbuja cuando la fuente de calor está colocada en la terminal de la fibra óptica inferior.	79
5.6. Velocidad de desplazamiento de una microburbuja en función de la distancia entre la fuente de calor y la microburbuja. Los puntos corresponden a las velocidades experimentales mientras que el ajuste está representado por las líneas continuas.	80
5.7. Los triángulos corresponden a la velocidad terminal y de Marangoni como resultado de la combinación de los resultados experimentales mientras las líneas continuas corresponden al ajuste las dichas velocidades.	81

Capítulo 1

Introducción

En este capítulo se presentan los antecedentes históricos y las técnicas para llevar a cabo la generación y manipulación de microburbujas de gas y vapor. En la sección 1.1, se brinda una breve reseña histórica sobre la evolución en las técnicas de generación y manipulación de microburbujas. En la sección 1.2, se exponen las técnicas o métodos para la generación de microburbujas. En la sección 1.3, se presentan las técnicas para realizar la manipulación de microburbujas. En la sección 1.4, se aborda el planteamiento del problema. En la sección 1.5, se formulan los objetivos de ésta investigación. En la sección 1.6, se plantea la justificación. En la sección 1.7, se establece la metodología a emplear para llevar a cabo la generación y manipulación de microburbujas. En la sección 1.8, se expone la estructura de este trabajo de tesis.

1.1. Antecedentes históricos

El desplazamiento o migración que realiza una microburbuja inmersa en una solución acuosa presenta sus primeros apuntes en 1855, dichos apuntes fueron realizados por James Thompson quien observó que un líquido con mayor tensión superficial tira con mayor intensidad sobre el medio circundante que un líquido con menor tensión. Esta diferencia de tensiones superficiales induce el desplazamiento del líquido, llamándolo “*tears of wine*”[1].

Posteriormente en 1871 el físico italiano Carlo Marangoni a través de su tesis doctoral descubrió que las diferencias de tensiones superficiales entre dos líquidos puede ser empleada para generar una fuerza de conducción de fluido, motivo por el cual éste fenómeno recibe su nombre [2]. Más tarde Allen V. Hershey en 1939

[3] determinó la dependencia de la tensión superficial de un líquido puro con la temperatura.

En 1958 Young *et al.* [4] mostraron experimentalmente que es posible el movimiento de microburbujas dentro de un gradiente de temperatura. Determinaron las primeras expresiones para el movimiento de una microburbuja inmersa en un líquido puro, derivadas de la ecuación que en 1911 Jacques Hadamard y Witold Rybczynski postularon. El ecuación de Hadamard-Rybczynski describe la velocidad del movimiento que realiza una burbuja inmersa en un fluido viscoso a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes, bajo la consideración de la fuerza de flotabilidad y de arrastre [5].

Diversas investigaciones han sido conducidas desde entonces, entre ellas: Fedosov [6] en 1956, Thopson *et al.* [7] en 1980, Wozniak *et al.* [8] en 1988, Subramanian *et al.* [9] en 1989, K. Takahashi *et al.* [10] 1999, y recientemente A. Miniewicz *et al.* [11] en 2016, entre otras; para determinar la velocidad de una microburbuja y a la fuerza a la que está sometida debido a la variación de la tensión superficial en función de la temperatura.

La generación y manipulación de microburbujas de gas o vapor dentro de soluciones acuosas presentan importantes aplicaciones en diversos campos de la ciencia y la industria. Dispositivos como: actuadores [12], microválvulas [13], desarrollo de micro-motores [14,15], impresoras de tinta [16,17] pueden ser desarrollados controlando la generación, desplazamiento de microburbujas dentro del MEMS (micro - electro - mechanical - system), manipulación de microobjetos [18], entre otras.

El estudio de los gradientes térmicos para la generación y manipulación de microburbujas ha sido propuesto empleando dispositivos eléctricos [19]. X. Qu *et al.* [20] llevaron a cabo una investigación sobre la dinámica de microburbujas empleando un arreglo horizontal de micro-calentadores eléctricos, los cuales están basados en procesos de deposición de capas de Si, SiO₂, y Poly-Si (poli-silicio). La capa de Poly-Si es grabada en frío para plasmar pistas conductoras, las cuales son cargadas eléctricamente a través de implantación iónica de fósforo. El voltaje aplicado al arreglo de micro-calentadores es modulado por un generador de señales y amplificado para la generación de un gradiente térmico en el medio acuoso. Los resultados muestran que el fenómeno de cavitación esta presente con cada microburbuja generada, las cuales pueden ser controladas con radios menores a 30 μm , y pueden recorrer una distancia de 10 μm en 0.7 ms.

En los últimos años las fuentes de radiación coherente han sido empleadas para

la generación fototérmica de gradientes de temperatura en soluciones absorbentes así como para controlar el desplazamiento de microburbujas, como el reportado por Ivanova *et al.* [21]. En sus experimentos realizaron una investigación acerca del atrapamiento térmico de una microburbuja inmersa en etanol. En su arreglo experimental, generaron un gradiente de temperatura empleando una fuente de radiación coherente a 659 nm con una potencia de 20 mW en una solución absorbente para desplazar horizontalmente a una microburbuja hacia zonas de mayor intensidad de radiación. Bajo estas condiciones experimentales, la absorción del medio acuoso utilizado no permitió la generación de microburbujas debido a la baja potencia de la fuente y a la baja absorción del medio a la longitud de onda empleada.

Recientemente Angelsky *et al.* [22] han reportado la generación y manipulación fototérmica de microburbujas utilizando una solución coloidal y una fuente de radiación de onda continua a 980 nm y 2 W de potencia. Las nanopartículas dispersas en agua absorben la radiación de la fuente para generar un gradiente de temperatura de $\sim 2 \times 10^5 \text{ K} \cdot \text{m}^{-1}$. En el arreglo experimental mostraron que el gradiente de temperatura producido por la absorción de las nanopartículas es capaz de generar microburbujas con radios de hasta $\sim 130 \mu\text{m}$. Los resultados muestran que la generación y desplazamiento de microburbujas es dependiente de las propiedades de la solución coloidal (coeficiente de absorción) así como de la fuente de radiación empleada.

1.2. Generación de microburbujas

La generación de microburbujas dentro de soluciones acuosas se puede realizar a través de diversas técnicas o métodos, su elección depende de la aplicación final y de los recursos con los que se cuente. Cada técnica o método ofrece ventajas y limitaciones para su implementación.

La generación de microburbujas se puede clasificar en siete clases: i) acústica, ii) inyección de aire, iii) solubilidad, iv) hidráulica, v) electroquímica, vi) óptica y vii) térmica.

1.2.1. Acústica

Se basa en el principio de que el sonido posee energía y la propaga en forma de ondas elásticas independientemente de si las ondas sonoras son audibles al oído humano [23]. El sonido se puede clasificar en:

- Infrasonido (frecuencias $< 20 \text{ Hz}$).

- Audible (frecuencias $20\text{Hz} - 20\text{kHz}$).
- Ultrasonido (frecuencias $> 20\text{kHz}$).

La onda sonora tiene ciclos de expansión y de compresión, el ciclo de expansión ocurre en la amplitud negativa de la onda sonora, mientras el ciclo de compresión surge en la amplitud positiva. La amplitud negativa de la onda sonora debe ser lo suficientemente grande para inducir una intensa presión negativa y con ello provocar variaciones de presión en el líquido, el cual posee un punto de tensión de vapor; debajo de éste punto el líquido cambiara de fase líquida a gaseosa generando microburbujas. La microburbuja se contrae en el ciclo de compresión de la onda sonora hasta llegar a un tamaño crítico que origine su implosión, como se observa en la Fig. 1.1. Éste método conduce al fenómeno de cavitación.

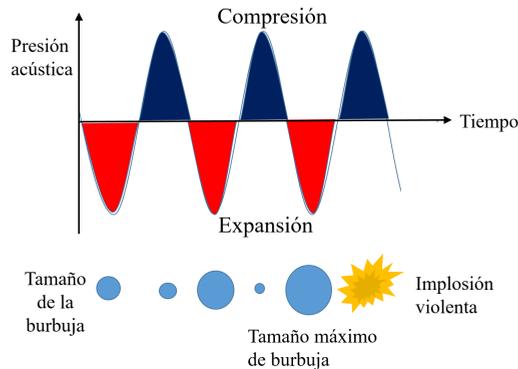


Figura 1.1: Generación acústica de microburbujas [23].

1.2.2. Inyección de gas

Las moléculas de un líquido ejercen una fuerza intermolecular capaz de oponer resistencia al flujo de un gas. Las microburbujas son generadas al ingresar gas comprimido al medio acuoso a través de un mecanismo inyector o difusor, las fuerzas intermoleculares ofrecen resistencia al libre paso del gas comprimido generando microburbujas de gas que ascienden hasta la superficie, como se muestra en la Fig. 1.2.

El tamaño de las microburbujas está en función de las dimensiones del mecanismo inyector [24].

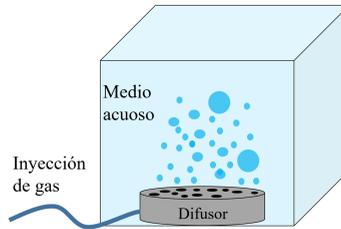


Figura 1.2: Generación de burbujas por inyección de gas.

1.2.3. Solubilidad del gas

La solubilidad está en función de la temperatura. Los gases se disuelven con mayor facilidad en líquidos con baja temperatura. Al aumentar la temperatura del líquido, se incrementa la energía cinética (movimiento) de sus moléculas; generando con ello el decremento de sus fuerzas intermoleculares. La disminución de las fuerzas intermoleculares produce la liberación de las moléculas de gas que estaban contenidas por el líquido.

Con el aumento de la temperatura en un líquido, disminuye la solubilidad del gas en el líquido. Los gases disueltos (O_2 y N_2) en el agua son los generadores de la creación de burbujas en el líquido cuando éste se calienta sin llegar a su punto de ebullición, las moléculas van adquiriendo energía cinética suficiente para que las moléculas escapen del líquido que las contenía, como se muestra en la Fig. 1.3.



Figura 1.3: Generación de burbujas mediante solubilidad.

1.2.4. Hidráulica

Se basa en el principio de que las oscilaciones mecánicas se comportan como onda. La oscilación o vibración mecánica inducida por un mecanismo como turbina o impelente, genera ondas dentro del líquido, como se observa en la Fig. 1.4. Las ondas poseen amplitud positiva y negativa, las cuales generan ciclos de compre-

sión y expansión del líquido respectivamente. El proceso de generación de microburbujas es similar al descrito en la sección 1.2.1 [25].



Figura 1.4: Generación hidráulica de burbujas.

1.2.5. Electroquímica

La generación electroquímica de burbujas se basa en el proceso de electrólisis. La solución acuosa (agua) es dividida en hidrógeno y oxígeno a través de la aplicación de una corriente eléctrica por medio de dos electrodos. El paso de corriente eléctrica por los electrodos genera el desprendimiento de los átomos de hidrógeno de la molécula de agua. Al unirse dos átomos de hidrógeno H_2 y dos átomos de O_2 se generan burbujas de hidrógeno y oxígeno que ascienden por la solución [26], como se muestra en la Fig. 1.5.

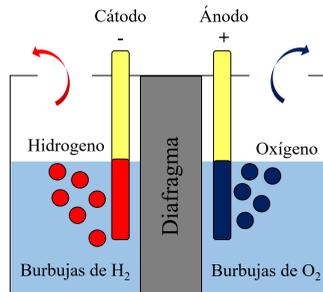


Figura 1.5: Generación de burbujas a través de electrólisis [26].

1.2.6. Óptica

Se basa en el principio de la absorción de la luz por la materia. Un haz coherente se hace incidir sobre una sustancia altamente absorbente o sobre una solución con coloides absorbentes a la longitud de onda del haz. La energía del haz coherente es absorbida por la sustancia y/o coloide generando un gradiente de temperatura dentro de la solución capaz de iniciar el proceso de nucleación, como se muestra en la Fig. 1.6 [21,22,27,28].

La generación de microburbujas está en función del coeficiente de absorción de la sustancia o coloide, de la intensidad del haz coherente y del tiempo de exposición. Ésta técnica permite la generación de microburbujas con radios controlados.

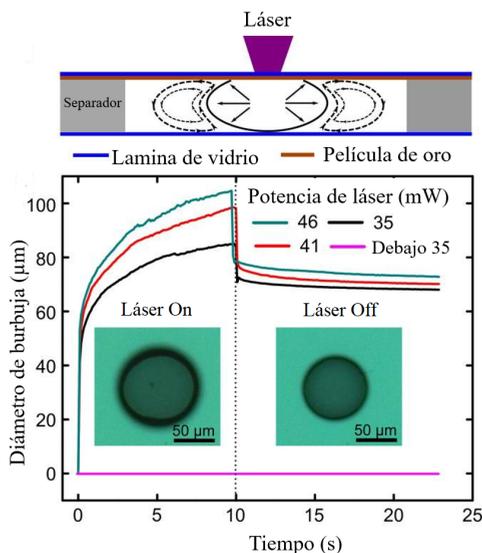


Figura 1.6: Generación óptica de microburbujas [28].

En la Fig. 1.6 Xie *et al.* [28] muestran la generación óptica de microburbujas dentro de una celda de vidrio que contiene agua como medio acuoso. Una fuente de radiación coherente (láser) es enfocada sobre la capa superior de la celda, a la cual previamente se depositó una película de $50 \mu\text{m}$ de oro. Él cual absorbe parte de la energía de los fotones de la fuente y la transmite en forma de calor al medio circundante, generando microburbujas de vapor de agua. De acuerdo a los resultados obtenidos la potencia mínima para generar una microburbuja es de 35 mW.

1.2.7. Térmica

Se basa en el proceso físico de ebullición. La ebullición conlleva a una transición entre la fase líquida y gaseosa del medio acuoso. El calentamiento de una solución proporciona la energía necesaria a las moléculas de la solución para que adquieran mayor libertad de movimiento, el cual está en función de la energía cinética de la solución. La formación de burbujas se origina cuando la solución es calentada hasta llegar a la temperatura donde la presión de vapor es mayor a la presión del líquido, como se muestra en la Fig. 1.7. La temperatura necesaria para generar la presión de vapor se denomina punto de ebullición [29,30].



Figura 1.7: Generación térmica de burbujas.

1.3. Manipulación de microburbujas

Una vez que la microburbuja es generada procede a desprenderse de su punto de creación para recorrer un camino aleatorio dentro del medio acuoso hasta llegar a un punto arbitrario en la superficie donde termina por extinguirse.

Se han desarrollado diversas técnicas o métodos para llevar a cabo la manipulación de microburbujas dentro de un medio acuoso. La clasificación de las técnicas depende del origen de la fuerza que es empleada para llevar a cabo la manipulación, dentro de las fuerzas empleadas destacan: i) acústica, ii) eléctrica, iii) hidrodinámica, iv) química, v) magnética, vi) óptica y vii) térmica.

1.3.1. Acústica

Éstas técnicas emplean ondas acústicas de altas frecuencias. Los sistemas para generar las ondas acústicas están fabricados sobre un resonador de capas, la parte medular del resonador de capas es un micromaterial piezoléctrico. Éstos micromateriales piezoléctricos producen ondas acústicas dentro del medio acuoso cuyas frecuencias son del rango ultrasónico (20 kHz a 10 GHz). Las ondas acústicas producen las fuerzas de radiación acústica, las cuales reciben el nombre de fuerzas de Bjerknes debido a sus descubridores C. A. Bjerknes y V. F. K. Bejerknæs. Éstas fuerzas son no lineales y resultan de la longitud de onda finita de las ondas acústicas dentro del líquido. La longitud finita de la onda acústica implica un gradiente de presión instantáneo en el líquido. Las fuerzas de radiación se clasifican en dos tipos, fuerza primaria de Bjerknes que ocurre sobre una única burbuja y la fuerza secundaria de Bejerknæs presente entre dos burbujas [31-33].

Fuerza primaria de Bjerknes

Una microburbuja inmersa en una solución que esta sometida a una de presión acústica experimentará pulsaciones en su volumen. Sí el gradiente de presión acústica no es cero, entonces puede acoplarse con las oscilaciones de la microburbuja para producir una fuerza de traslación sobre la microburbuja. Las microburbujas de menor tamaño que el resonante del campo acústico viajan por encima del gradiente de presión mientras las burbujas de menor tamaño viajan debajo del gradiente de presión [34-36].

$$F_{Bj} = f_{Bj} r, \quad (1.1)$$

$$f_{Bj} = -\frac{4}{3}\pi \langle R^3(t) P_{ac}(r, t) \rangle, \quad (1.2)$$

donde r es la coordenada radial, $R(t)$ es la variación del radio de la microburbuja en el tiempo, $P_{ac} = A(r)\exp(-i\omega t)$ es la presión de excitación acústica con amplitud $A(r)$ y frecuencia angular ω . Por otra parte, $\langle \dots \rangle$ representa el promedio del tiempo durante un ciclo de oscilación.

Cerca de los alrededores del antinodo de presión, la F_{Bj} actúa como un resorte lineal, su rigidez representada por f_{Bj} puede cambiar de signo. Si la cantidad $\langle R^3(t)P_e(t) \rangle$ es negativa, entonces $f_{Bj} < 0$, dirigiendo a la fuerza de Bjerknes al centro del resonador, atrapando la microburbuja en el centro. Si $\langle R^3(t)P_e(t) \rangle$ es positiva, entonces f_{Bj} provoca que la microburbuja sea repelida, generando que su posición en el antinodo de presión sea inestable.

Fuerza secundaria de Bjerknes

Ésta fuerza explica la atracción o repulsión de entre dos microburujas bajo la influencia de un campo acústico. Se determina

$$F_{Bj2} = -\frac{\rho}{4\pi} \langle V_1 V_2 \rangle \frac{x_2 - x_1}{|x_2 - x_1|}, \quad (1.3)$$

donde ρ indica la densidad del medio donde están inmersas las microburujas, V_1 y V_2 representan el volumen de cada microburbuja, x_1 y x_2 denotan las posiciones espaciales de las microburujas. Las microburujas se atraen cuando el radio de ambas es menor al radio de resonancia. Las microburujas experimentan una fuerza de repulsión cuando el radio entre ellas difiere; una microburbuja de radio menor al radio de resonancia y la otra burbuja con radio mayor al de resonancia [36].

1.3.2. Eléctrica

Los métodos eléctricos abarcan diversas técnicas que van desde los que utilizan el campo eléctrico para generar un desequilibrio en las fuerzas electrostáticas internas de la microburbuja hasta los que emplean el campo eléctrico para modificar la permeabilidad de los materiales.

Dielectroforesis

Esta técnica emplea campos eléctricos no uniformes sobre soluciones acuosas que contienen partículas dieléctricas o microburujas. Los campos eléctricos no uniformes generan un desequilibrio en las fuerzas electrostáticas internas de la partícula dieléctrica o microburbuja. El desequilibrio de las fuerzas electrostáticas genera el movimiento de la partícula o microburbuja [37,38], como se muestra en la Fig. 1.8. La dielectroforesis se puede presentar en dos tipos:

- **Dielectroforesis positiva:** se presenta cuando la partícula se polariza en mayor medida que el líquido que la contiene, produciendo que la partícula o microburbuja sea atraída a las regiones de mayor intensidad del campo eléctrico.
- **Dielectroforesis negativa:** se origina cuando la partícula se polariza en menor medida que el líquido que la contiene, generando que la partícula o microburbuja sea repelida de las zonas de mayor intensidad de campo eléctrico.

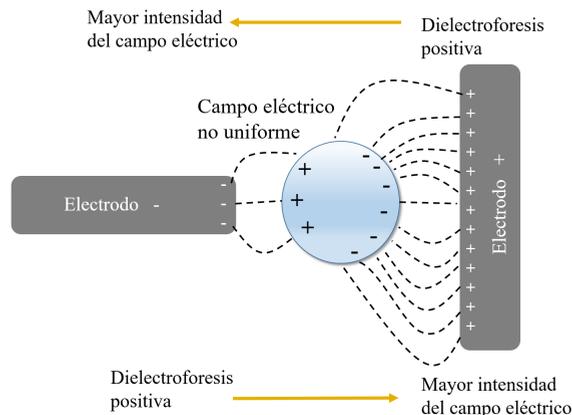


Figura 1.8: Movimiento debido a dielectroforesis [38].

Electrohumectación en dieléctricos

Electrowetting on dielectric, EWOD por sus siglas en inglés. Basa su funcionamiento en la manipulación de la permeabilidad de materiales hidrófobos a través de la aplicación de un campo eléctrico. Una gota o microburbuja es colocada sobre capas dieléctricas hidrófobas conectadas en serie a un electrodo por el cual se aplica un voltaje como se muestra en la Fig. 1.9. Al aplicar voltaje entre las capas hidrófobas se produce que la gota o microburbuja se extienda sobre la superficie dieléctrica, modulando el voltaje en la superficie se produce la variación de la permeabilidad dirigiendo la trayectoria de la gota o microburbuja [39].

La Fig. 1.9 muestra el movimiento de una gota líquida situada entre dos placas paralelas. (a) Ambos electrodos de la placa inferior están aislados. (b) Se aplica un

voltaje en el electrodo de la derecha, el ángulo de contacto disminuye lo que produce un gradiente de presión a través de la gota de líquido. (c) La gota de líquido se desplazó al electrodo de la derecha, los dos electrodos son aislados.

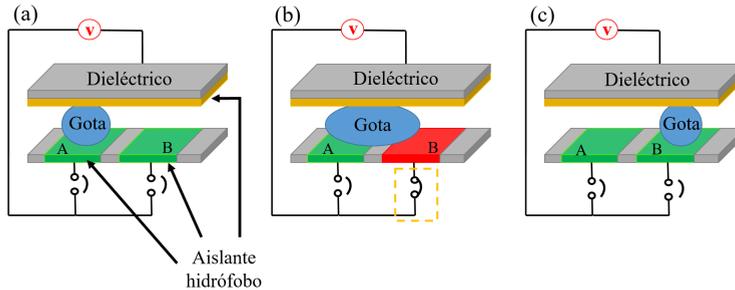


Figura 1.9: Arreglo EWOD [39].

Electrocapilaridad

Ésta técnica utiliza la aplicación de cargas eléctricas en un medio acuoso electrolítico a través de electrodos. Las primeras investigaciones se llevaron a cabo en 1875 por Lippman. Las cargas eléctricas provocan un incremento de la temperatura del medio acuoso que se traduce en una disminución en la tensión superficial del medio, generando un estrés tangencial en la superficie de la microburbuja. El estrés tangencial induce el movimiento de la microburbuja hacia la zona donde la tensión superficial es menor [40].

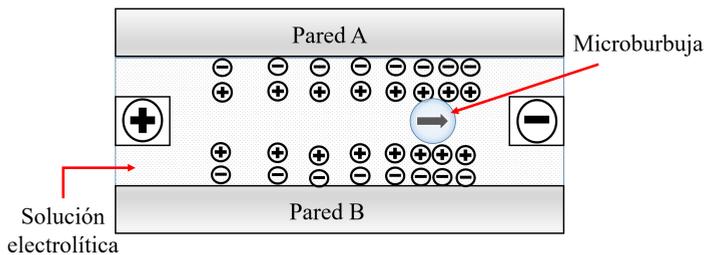


Figura 1.10: Sistema electrocapilar sobre una burbuja [40].

En la Fig. 1.10 se muestra el movimiento de una microburbuja inmersa en una solución electrolítica, la solución electrolítica está contenida dentro de las paredes

A y B de un microcanal. Un voltaje es aplicado en las terminales del microcanal generando una disminución de la tensión superficial del medio electrolítico.

1.3.3. Hidrodinámica

Los métodos hidrodinámicos emplean soluciones acuosas de baja viscosidad, basan su funcionamiento en la fabricación de microdispositivos con puntos de estancamiento para producir un flujo de inmovilidad. Las microburbujas son dirigidas al punto de referencia dentro de la trampa a través del control del flujo de estancamiento [41,42], como se muestra en la Fig. 1.11. La manipulación de microburbujas está en función de la geometría de la trampa de estancamiento y del caudal de flujo empleado.

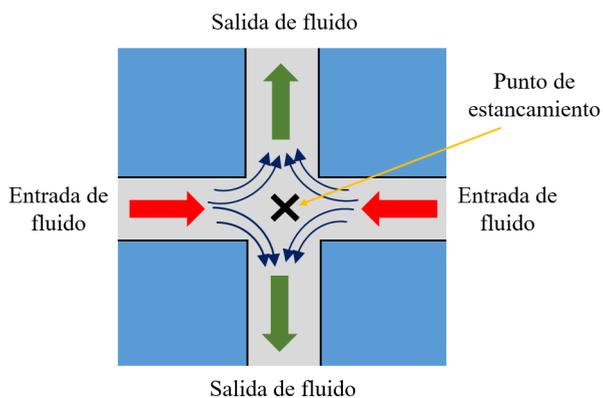


Figura 1.11: Trampa hidrodinámica [42].

1.3.4. Química

Las técnicas químicas se basan en la modificación de la tensión superficial a través de la adición de tensoactivos o surfactantes.

Movimiento soluto capilar

También llamado efecto Marangoni soluto. El movimiento es impulsado por un gradiente de tensión superficial ocasionado por la concentración de un soluto. La tensión superficial disminuye con la concentración de un soluto. En algunos líquidos multicompuestos, la dirección del gradiente de tensión superficial tangente a

la interfaz puede alterarse modificando la concentración de los solutos en el líquido multicompuesto o añadiendo tensioactivos. Puede producirse un movimiento convectivo bastante fuerte dependiendo del fluido empleado [43].

Tensoactivos

Los tensioactivos también llamados surfactantes son sustancias que inducen un movimiento a través de la tensión superficial en la superficie de contacto entre dos líquidos insolubles. Los surfactantes presentan una menor fuerza de tensión superficial que un medio acuoso puro. El tensioactivo rompe las fuerzas intermoleculares del medio acuoso, las cuales no se reforman espontáneamente [44].

Los surfactantes tienen diferentes dimensiones y composiciones, pero tienen en común la afinidad por la superficie de un líquido, lo que indica que la energía libre del fluido decrece cuando una molécula de surfactante emigra hacia la superficie en comparación cuando está en la mayor parte del volumen del fluido. A medida que la concentración (mol/m^2) de surfactante aumenta, la interfase original da paso a dos nuevas interfaces con menor tensión superficial (N/m);

- Disolvente-surfactante.
- Surfactante-aire.

Las moléculas de surfactante generalmente están compuestas en dos partes: una cabeza hidrófila y hidrófoba. Pese a que las moléculas de los surfactantes tienden a posicionarse en la interfase líquido-surfactante también son solubles en el volumen del líquido. Un ejemplo de surfactantes son los jabones o detergentes domésticos.

En 1920 I. Langmuir postuló el primer modelo que relaciona la tensión superficial con la concentración de surfactante, obteniendo una concentración de superficie de equilibrio [44]:

$$\Gamma = \Gamma_{\alpha} \left(\frac{K_L c}{1 + K_L c} \right), \quad (1.4)$$

donde c es la concentración en volumen de las moléculas de surfactante, Γ_{α} representa la concentración superficial máxima de surfactante, K_L es constante de equilibrio que relaciona la tasa de absorción versus la tasa de desorción. La fuerza de tensión superficial en función de la concentración de surfactantes está dada por la ecuación 1.5.

$$\sigma = \sigma_0 + RT\Gamma_{\alpha} \ln \left(1 - \frac{\Gamma}{\Gamma_{\alpha}} \right), \quad (1.5)$$

donde σ_0 es la tensión superficial del líquido.

1.3.5. Magnética

Las técnicas magnéticas basan su funcionamiento en la aplicación de un campo magnético sobre un medio acuoso electrolítico, la fuerza generada por el campo magnético induce un movimiento del líquido electrolítico. Las microburbujas son conducidas por el movimiento del líquido a través de la fuerza de arrastre [45,46]. En la Fig. 1.12 se muestra el desplazamiento de la microburbuja inmersa en una solución electrolítica.

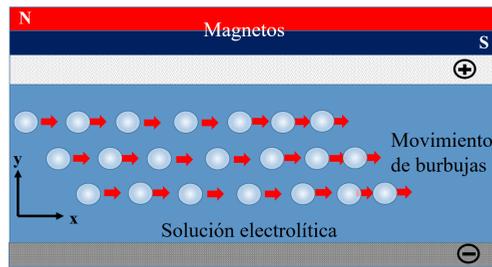


Figura 1.12: Movimiento de burbujas inmersas en medio electrolítico [46].

1.3.6. Óptica

Las técnicas ópticas basan su funcionamiento en la transferencia de momento lineal de una fuente de radiación coherente que incide sobre la superficie de una microburbuja. Dicha superficie posee un menor índice de refracción que el medio circundante; originando que la microburbuja se aleje de la zona donde se presenta una mayor intensidad de la fuente de radiación coherente. El atrapamiento y manipulación de la microburbuja se logra a través del uso de un haz con perfil Laguerre-Gauss de orden 01.

En la Fig.1.13a se muestra la distribución espacial del haz Laguerre-Gauss, las zonas oscuras representan la presencia de intensidad del haz, mientras la zona blanca indica la ausencia de intensidad. La microburbuja es confinada en la zona libre de intensidad del haz [47,48] como se observa en la Fig.1.13b, manipulando el haz Laguerre-Gauss se logra la manipulación de la microburbuja.

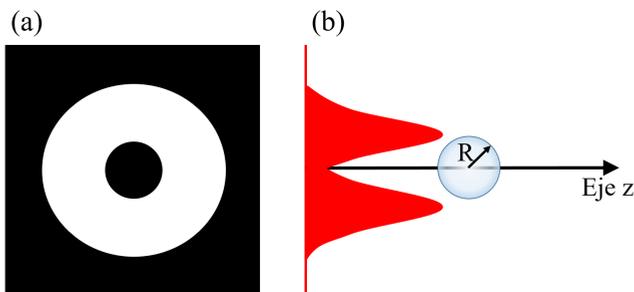


Figura 1.13: Haz Laguerre-Gauss. (a) Distribución espacial de la energía de un haz Laguerre-Gauss. (b) Confinamiento de una microburbuja en la zona libre de intensidad del haz Laguerre-Gauss.

1.3.7. Térmica

Los métodos térmicos basan su funcionamiento en la disminución de la tensión superficial en función de la temperatura. De acuerdo a la ley de Eötvös la tensión superficial de la mayoría de los líquidos decrece proporcionalmente con la temperatura [49,50].

$$\sigma \propto \frac{1}{T}, \quad (1.6)$$

donde σ representa la tensión superficial del medio acuoso y T la temperatura aplicada.

Una microburbuja inmersa en una solución acuosa y bajo la presencia de un gradiente de temperatura está sometida a la fuerza de Marangoni. Ésta fuerza conduce el desplazamiento de una microburbuja en sentido opuesto a las corrientes de convección [4,9,10,18,50].

En este trabajo de tesis se presenta la generación y manipulación de microburbujas a través de una técnica fototérmica. Dicha técnica emplea la interacción de los fotones de una fuente de radiación coherente con nanopartículas de plata fotodepositadas en el núcleo de fibra óptica para generar gradientes de temperatura. Los cuales son empleados para producir la nucleación del medio acuoso y generar microburbujas, posteriormente los gradientes de temperatura inducen la fuerza de Marangoni para llevar a cabo la manipulación de las microburbujas.

1.4. Planteamiento del problema

Las técnicas existentes para generar y manipular microburbujas presentan desafíos de implementación o limitaciones; algunas de ellas requieren la fabricación de micro-materiales piezoeléctricos [23,31], otras limitan su distancia de trabajo al estar en función de las intensidades del campo magnético y voltaje [20], algunas más funcionan adecuadamente en soluciones de baja viscosidad o electrolíticas [41,42,45,46], mientras el resto emplea soluciones absorbentes o coloidales cuyas propiedades están en función de la longitud de onda empleada [21,22,28].

El control espacial de estas técnicas para generar microburbujas es limitado y deficiente para manipular las microburbujas con exactitud.

La velocidad y el sentido de desplazamiento de las microburbujas permitidos por las técnicas actuales reduce el tiempo de respuesta de los sistemas donde se emplean.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Generar microburbujas de vapor de etanol inducidas fototérmicamente y manipular su desplazamiento a través de la fuerza de Marangoni.

1.5.2. Objetivos específicos

- Realizar una revisión literaria del estado del arte sobre la generación de microburbujas y la manipulación del desplazamiento dentro de medios acuosos.
- Efectuar un estudio experimental sobre la generación fototérmica de gradientes térmicos en medios acuosos.
- Desarrollar un arreglo experimental que permita la generación y la manipulación del desplazamiento de microburbujas.
- Elaborar un análisis teórico-experimental sobre las fuerzas que interactúan en la manipulación del desplazamiento de microburbujas.

1.6. Justificación

El constante e incesante avance científico y tecnológico demanda continuar desarrollando sistemas y dispositivos donde su funcionalidad sea inversamente proporcional a sus dimensiones. Controlar la generación y manipulación de microburbujas a través de dispositivos funcionales, que brinden una respuesta rápida y de bajo costo permite continuar desarrollando aplicaciones en sectores de la ciencia y de la industria; incrementar la eficiencia de micro-motores, mejorar el tiempo de respuesta en el control de flujo, aumentar la exactitud de las técnicas de micro-manipulación, entre otras.

1.7. Metodología

Se inicia con el proceso de fotodeposición para inmovilizar nanopartículas de plata sobre el núcleo de una terminal de fibra óptica. La potencia y el tiempo de emisión de radiación son controlados para obtener una adecuada atenuación de transmisión de la potencia a la salida de la fibra óptica. Una vez que las nanopartículas de plata son inmovilizadas en el núcleo de la fibra óptica se procede a introducir la terminal de la fibra óptica dentro de una celda que contiene etanol. Se repite el proceso para una segunda fibra y tercer fibra óptica.

Con las terminales de fibra óptica dentro de la celda con etanol se inicia la emisión de radiación de la fuente coherente. Dentro del etanol se genera un gradiente de temperatura que es proporcional a la intensidad de la fuente de radiación y que es suficiente para generar microburbujas sobre la terminal de la fibra óptica.

La manipulación de la microburbuja se llevó a cabo conmutando el paso de radiación entre las fibras ópticas. La conmutación de la radiación produce el cambio en la posición del gradiente de temperatura, el cual se generó a través de una menor potencia a la requerida para la generación de microburbujas.

1.8. Estructura del trabajo de tesis

La organización de éste trabajo de tesis está planteada de la siguiente manera:

Capítulo 1

Se describen los antecedentes históricos en las técnicas de generación y manipulación de microburbujas, se establece el objetivo general, objetivos particulares y se define la metodología de investigación.

Capítulo 2

Se abordan los fundamentos teóricos que conducen a la generación y manipulación de microburbujas dentro de un medio acuoso así como las fuerzas que se presentan debido al medio acuoso, la radiación de la fuente así como la convección y la fuerza de Marangoni.

Capítulo 3

En Se describe el desarrollo experimental empleado para llevar a cabo la fotodeposición de nanopartículas, la generación y manipulación de microburbujas. Se detallan las configuraciones empleadas en el arreglo óptico para la manipulación de microbubrujas.

Capítulo 4

En Se exponen los resultados obtenidos en la sección experimental sobre la generación y la manipulación de microburbujas en los diversos arreglos ópticos.

Capítulo 5

Se presenta el análisis del crecimiento, gradiente de temperatura, fuerzas involucradas en la manipulación y la velocidad de desplazamiento de las microburbujas.

Capítulo 6

Se plantean las conclusiones obtenidas derivadas de este trabajo de tesis.

1.9. Referencias

- [1] J. Thomson, "On certain curious Motions observable at the Surfaces of Wine and other Alcoholic Liquors," *Philos. Mag.* **10**(67), 330-333 (1855).
- [2] C. Marangoni, "On the expansion of a droplet of a liquid floating on the surface of another liquid," *Tipographia dei fratelli Fusi, Pavia* (1865).
- [3] A. V. Hershey, "Ridges in a Liquid Surface Due to the Temperature Dependence of Surface Tension," *Phys. Rev.* **56**(2), 204 (1939).
- [4] N. O. Young, J. S. Goldstein and, M. J. Block. "The motion of bubbles in a vertical temperature gradient," *Cambridge University Press* **6**(3), 350-356 (1979).
- [5] J. I. Ramos, "Lumped models of gas bubbles in thermal gradients," *Appl. Math. Modelling* **21**(6), 371-386 (1997).
- [6] A. I. Fedosov, "Thermocapillary motion," *Zhurnal Fizicheskoi Khimii* **30**(2), 366-373 (1956).
- [7] R. L. Thompson, K. J. DeWitt and, T. L. Labus, "Marangoni bubble motion phenomenon in zero gravity," *Chem. Eng. Commun.* **5**(5,6), 299-314 (1980).
- [8] G. Wozniak, J. Siekmann and, J. Srulijes, "Thermocapillary bubble and drop dynamics under reduced gravity-survey and prospects," *Z.Flugwiss Weltraumforsch* **12**, 137-144 (1988).
- [9] N. Rashidnia and R. Balasubramaniam. "Thermocapillary Migration of Liquid Droplets in a Temperature Gradient in a Density Matched System," *NASA Contractor Report* 185178, (1989).
- [10] K. Takahashi, J.-G. Weng and, C.-Lin Tien. "Marangoni effect in microbubble systems," *Microscale Thermophys. Eng.* **3**(3), 169-182 (1999).
- [11] A. Miniewicz, S. Bartkiewicz, H. Orlikowska and, K. Dradrach, "Marangoni effect visualized in two-dimensions Optical tweezers for gas bubbles," *Sci. Rep.* **6**, 34787 (2016).
- [12] A. Hashmi, G. Yu, M. Reilly-Collette, G. Heiman and, J. Xu, "Oscillating bubbles: a versatile tool for lab on a chip applications," *Lab. Chip* **12**, 4216-4227 (2012).

- [13] J. H. Shin, J. Seo, J. Hong and, S. Kuh, "Hybrid optothermal and acoustic manipulations of microbubbles for precise and on-demand handling of micro-objects," *Sens. Actuators B* **246**, 415-420 (2017).
- [14] J. Kao, X. Wang, J. Warren, J. Xu and, D. Attinger, "A bubble-powered micro-rotor: conception, manufacturing, assembly and characterization," *J. Micromech. Microeng.* **17**(12), 2454-2460 (2007).
- [15] K. Khoshmanesh, A. Almansouri, H. Albloushi, P. Yi, R. Soffe and, K. Kalantar-Zadeh, "A multi-functional bubble-based microfluidic system," *Sci. Rep.* **5**, 9942 (2015).
- [16] K. Takahashi, K. Yoshino, S. Hatano, K. Nagayama and, T. Asano, "Novel applications of thermally controlled microbubble driving system," in Proceedings of IEEE Conference on Micro Electro Mechanical Systems (IEEE, 2001), pp. 286-289.
- [17] L. Lin, X. Peng, Z. Mao, W. Li, M. N. Yogeesh, B. B. Rajeeva, E. P. Perillo, A. K. Dunn, D. Akinwande and, Y. Zheng, "Bubble-pen lithography," *Nano Lett.* **16**(1), 701-708 (2016).
- [18] Z. Bing Wu and W. Rui Hu. "Thermocapillary migration of a planar droplet at moderate and large Marangoni numbers," *Springer-Ver.* **223**(3), 609-626 (2011).
- [19] S. Chakraborty. "Electrocapillary," in *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*, L. Dongqing, ed.(Springer New York, 2015).
- [20] X. Qu and H. Qiu, "Bubbles dynamics under a horizontal micro heater array," *J. Micromech. Microeng.* **19**(9), 095008 (2009).
- [21] N. A. Ivanova and B. A. Bezuglyi, "Optical thermocapillary bubble trap," *Tech. Phys. Lett.* **32**(10), 854-856 (2006).
- [22] O. V. Angelsky, A. Ya. Bekshaev, P. P. Maksimyak, A. P. Maksimyak, S. G. Hanson and, S. M. Kontush, "Controllable generation and manipulation of microbubbles in water with absorptive colloid particles by CW laser radiation," *Opt. Express* **25**(5), 5232-5243 (2017).
- [23] J. Friend and L. Yeo. "Microscale acoustofluidics: Microfluidics driven via acoustics and ultrasonics," *Rev. Mod. Phys.* **83**(2), 647-687 (2011).
- [24] C. Wu, K. Nasset, J. Masliyah and, Z. Xu, "Generation and characterization

of submicron size bubbles," *Adv. Colloid Interface Sci.* 179, 123-132 (2012).

[25] M. Sadatomi, A. Kawahara, K. Kano and, A. Ohtomo, "Performance of a new micro-bubble generator with a spherical body in a flowing water tube," *Exp. Therm Fluid Sci.* **29**(5), 615-623 (2005).

[26] S. R. German, M. A. Edwards, Q. Chen, Y. Liu, L. Luo and, H. S. Huite, "Electrochemistry of single nanobubbles. Estimating the critical size of bubbleforming nuclei for gas-evolving electrode reactions," *Faraday Discuss.* **193**, 223-240(2016).

[27] R. Pimentel-Domínguez, J. Hernández-Cordero and, R. Zenit, "Microbubble generation using fiber optic tips coated with nanoparticles," *Opt. Express* **20**(8), 8732-8740 (2012).

[28] Y. Xie and C. Zhao, "Optothermally generated surface bubble and its applications," *Nanoscale* **9**, 6622-6631 (2017).

[29] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, "Ebullición y Condensación," in *Transferencia de calor y masa*, P. E. Roig, ed. (Mc Graw Hill, 2011).

[30] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera and, D. P. DeWitt, "Boiling and Condensation," in *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, ed. (John Wiley and Sons, 2011).

[31] W. Xi, F. B. Cegla, M. Lowe, A. Thiemann, T. Nowak, R. Mettin, F. Holsteyns and, A. Lippert, "Study on the bubble transport mechanism in an acoustic standing wave field (Report)," *Ultrasonics* **51**(8), 1014-1025 (2011).

[32] W. Lauterborn and T. Kurz, "Physics of bubbles oscillations," *Rep. Prog. Phys.* **73**(10), 1-88 (2010).

[33] C. E. Brennen, "Dynamics of oscillating bubbles," in *Cavitation and Bubble Dynamics*, ed. (Oxford University Press, New York, 1999).

[34] V. F. Bjerknes, *Fields of force* (Columbia University Press, New York, 1906).

[35] N. A. Pelekasis, A. Gaki, A. Doinikov and, J. A. Tsamopoulos, "Secondary Bjerknes forces between two bubbles and the phenomenon of acoustic streamers," *J. Fluid Mech.* 500, 313-347 (204).

[36] V. R. Salinas Barrera, "Fluidos bajo cavitación acústica en recintos finitos:

experimentos y modelación,” Chile, (2014).

[37] R. C. Gallo and B. H. Lapizco, “Dielectroforesis para sistemas micro-escala,” *Ciencia Ergo Sum.* **20**(3), 227-230 (2013).

[38] S. Williams, “AC Dielectrophoresis Lab-on-Chip Devices,” in *Encyclopedia of microfluidics and nanofluidics*, L. Dongqing, ed. (Springer New York, 2015).

[39] W. C. Nelson and CJC. Kim, “Droplet actuation by electrowetting-on-dielectric (EWOD): A review,” *J. Adhes. Sci. Technol.* **26**(12-17), 1747-1771 (2012).

[40] S. Chakraborty, “Electrocapillary,” in *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*, L. Dongqing, ed. (Springer New York, 2015).

[41] M. Tanyeri, E. M. Johnson-Chavarria and, C. M. Schroeder, “Hydrodynamic trap for single particles and cells,” *Appl. Phys. Lett.* **96**(22), 224101 (2010).

[42] V. H. Lieu, T. A. House and, D. T. Schwartz, “Hydrodynamic Tweezers: Impact of Design Geometry on Flow and Microparticle Trapping,” *Anal. Chem.* **84**(4), 1963-1968 (2012).

[43] C. L. Chan and C. F. Chen, “Salt-finger convection generated by thermal and solutal capillary motion in a stratified fluid,” *Int. J. Heat Mass Transfer* **42**, 2143-2159 (1999).

[44] C. H. Baroud, “Marangoni convection,” in *Encyclopedia of Microfluidics and Nanofluidics*, L. Dongqing, ed. (Springer New York, 2015).

[45] A. Aliabadi and A. Taklifi, “The effect of magnetic field on dynamics of gas bubbles in visco-elastic fluids,” *Appl. Math. Modell.* **36**(6), 2567-2577 (2012).

[46] K. Wang, P. Pei, Y. Pei, Z. Ma, H. Xu and, D. Chen. “Magnetic field induced motion behavior of gas bubbles in liquid,” *Sci. Rep.* **6**, 1-6 (2016).

[47] P. A. Prentice, M. P. MacDonald, T. G. Frank, A. Cuschieri, G. C. Spalding, W. Sibbett, P. A. Campbell and, K. Dholakia, “Manipulation and filtration of low index particles with holographic Laguerre-Gaussian optical trap arrays,” *Opt. Express* **12**(4), 593-600 (2004).

[48] V. Garbin, D. Cojoc, E. Ferrari, R. Z. Proietti, S. Cabrini and, E. Di Fabrizio, “Optical Micro-Manipulation Using Laguerre-Gaussian Beams,” *Jpn. J. Appl. Phys.*

44(7B), 5773-5776 (2005).

[49] S. R. Palit, "Thermodynamic interpretation of the Eötvös constant," *Nature* **177**, 11880 (1956).

[50] R. B. Subramaniam and R. S. Subramanian, "Thermocapillary Migration of a Drop: An Exact Solution with Newtonian Interfacial Rheology and Stretching/Shrinkage of Interfacial Area Elements for Small Marangoni Numbers," *Ann. N.Y. Acad. Sci.* (1027), 303-310 (2004).

Capítulo 2

Marco teórico

En este capítulo se abordan los fundamentos teóricos para generar y manipular microburbujas. En la sección 2.1, se brinda una introducción de la interacción de la luz con la materia. En la sección 2.2, se expone la fuerza de radiación que ejerce la luz sobre la materia, así como su absorción. En la sección 2.3, se presentan los fundamentos de la transferencia de calor. En la sección 2.4, se detalla el proceso de ebullición, el cual es el responsable de la generación de microburbujas. En la sección 2.5, se exponen las fuerzas involucradas en la manipulación de microburbujas.

2.1. Introducción

Capítulo 1

La interacción de la luz con la materia se estudia a través de la óptica, brindando innumerables aplicaciones. La materia dependiendo de su composición molecular puede absorber, transmitir o reflejar la luz [1]. Esta ejerce una fuerza sobre la materia a la cual incide, llamada presión de radiación que es independiente del comportamiento ondulatorio o corpuscular de la luz. En los años 70's el científico norteamericano A. Ashkin *et al.* [2] llevaron a cabo un experimento para cuantificar la presión de radiación; incidiendo una fuente de radiación coherente de perfil gaussiano sobre microesferas transparentes de látex (material dieléctrico). En sus resultados observaron que la luz empujaba a las microesferas en el sentido de propagación del haz, sorpresivamente también encontraron que la luz era capaz de atraer a las partículas hacía el centro del haz, dando origen a lo que más tarde se denominó pinzas ópticas, las cuales han sido empleadas en la micromanipulación de partículas, materia biológica y átomos [3-5].

La absorción de la luz por la materia genera efectos térmicos sobre las pinzas ópticas que usualmente no son deseados. Estos efectos pueden dañar el material bajo análisis o bien aumentar la energía cinética de las moléculas de la solución acuosa generando corrientes de convección, desestabilizando las pinzas ópticas.

Los metales usualmente presentan una mayor absorción de luz que el resto de la materia, transmitiendo la energía absorbida en forma térmica al medio circundante generando un gradiente de temperatura. Este gradiente en función de su magnitud puede originar corrientes de convección y la nucleación del medio acuoso. La nucleación se refiere a la formación de una nueva fase termodinámica debido a fluctuaciones térmicas como lo mostró J. Willard Gibbs, considerado el antecesor en el estudio de la nucleación. Posteriormente J. W. Christian clasificó la nucleación en homogénea y heterogénea. La formación de burbujas que ocurre debido al contacto del líquido con una superficie calefactora se denomina ebullición nucleada [6].

Las microburbujas forman parte cotidiana de nuestro entorno, se forman en el vaso de agua que ingerimos, en el hervor del agua y hasta en alguna solución jabonosa. Las microburbujas generadas durante el hervor de alguna solución se deben a la transferencia de calor en la interface sólido-líquido o en el interior del líquido.

La generación de microburbujas tiene implícito la presencia de corrientes de convección, las cuales ejercen una fuerza hidrodinámica sobre las burbujas, llamada fuerza de arrastre. Una microburbuja inmersa en una solución experimenta la fuerza de flotabilidad; demostrada y descrita por Arquímedes (287 A. C. a 212 A. C.) en su libro "*On floating Bodies*", la cual ejerce una fuerza vertical que origina que los cuerpos asciendan por el medio acuoso hasta llegar a la superficie.

Las microburbujas migran desde el punto de formación hasta la superficie del líquido. Aunado a la formación de microburbujas por transferencia de calor, existen trabajos documentados que reportan la formación de microburbujas en soluciones acuosas debido a la incidencia de una alta potencia óptica o de radiación coherente [7,8]. Dicha potencia genera un calentamiento puntual de la solución acuosa formando microburbujas, las cuales pueden generarse en distintos medios; dentro de una solución coloidal (utilizando partículas absorbentes) o en una solución acuosa absorbente a la longitud de onda de la fuente de radiación empleada. Las microburbujas han recibido especial atención en los últimos años ya sea por sus aplicaciones como agente removedor de impurezas, impresoras de tinta, entre otras, y por los daños que originan durante su generación en turbinas de bombas y barcos debido a la cavitación.

2.2. Fuerza de radiación y sus efectos

La luz ejerce fuerza y presión sobre la materia que incide, como lo explicó el físico británico James C. Maxwell en el siglo XVIII [1,2].

No solo se ha demostrado que la luz es capaz de ejercer presión sobre objetos macroscópicos y empujarlos [1,2], como quedó demostrado a través de la misión espacial de la NASA, en la cual se puso en órbita un velero solar denominado Nansail-D. Sino también se ha logrado demostrar que la luz con perfil gaussiano es capaz de atrapar objetos en las regiones de mayor intensidad como lo observó el físico estadounidense A. Ashkin, mediante las denominadas pinzas ópticas [2-4].

2.2.1. Presión de radiación

La luz, independientemente de su comportamiento ondulatorio o corpuscular, es portadora de energía y de momento lineal (producto de la masa por la velocidad de un cuerpo, de acuerdo a la teoría de la relatividad aún una partícula sin masa como lo es el fotón puede tener momento lineal), ambas cantidades se conservan en cualquier proceso de interacción entre radiación y materia. Por lo que, al tener un flujo de fotones incidiendo sobre materia, éstos ejercen una presión sobre la materia, la presión de radiación es muy pequeña comparada con la presión atmosférica.

La luz que incide sobre una partícula se refleja, refracta y absorbe. La magnitud de cada una de ellas depende de las propiedades de la partícula. La refracción y reflexión de la luz que incide sobre una partícula dan origen a las fuerzas de gradiente y esparcimiento; responsables de la atracción y dirección de la misma partícula [2-5].

2.2.2. Índice de refracción

La interacción de la luz con la materia se puede caracterizar a través de una relación de velocidades, llamada índice de refracción n .

$$n = c/v, \quad (2.1)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y v es la velocidad de la luz para una determinada longitud de onda λ en el medio material de interés.

2.2.3. Ley de refracción y reflexión

El paso de un haz a través de una interfase compuesta por dos medios homogéneos e isotrópicos con índice de refracción n y n' está determinado por la *ley de refracción de Snell-Descartes*, la cual establece que:

$$n \operatorname{sen}(\theta_i) = n' \operatorname{sen}(\theta_t), \quad (2.2)$$

donde θ_i es el ángulo de que forma el rayo incidente con respecto a la normal del plano de la interfase, θ_t es el ángulo que forma el rayo refractado con respecto a la normal, como se observa en la Fig.2.1.

Los fenómenos de refracción y reflexión ocurren en un mismo plano. Partiendo de esta aseveración, parte de un haz que incide sobre una interfase será refractado y otra parte será reflejado. Si consideramos la reflexión de un haz como refracción en el mismo medio material; donde $n = n'$, entonces la Ec. 2.2 se reduce a:

$$\operatorname{sen}(\theta_i) = \operatorname{sen}(\theta_r), \quad (2.3)$$

por consecuencia $|\theta_i| = |\theta_r|$, la Ec. 2.3 recibe el nombre de ley de reflexión.

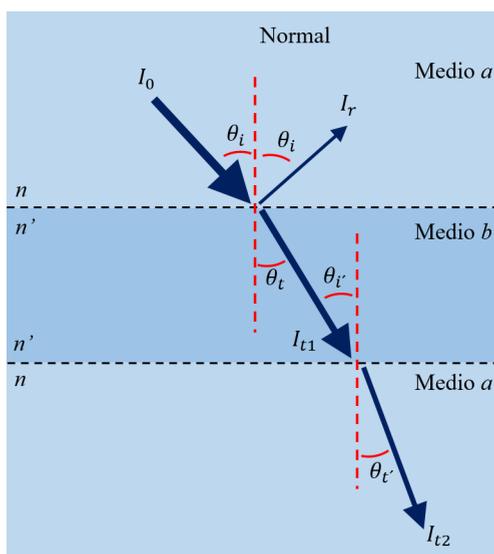


Figura 2.1: Reflexión, absorción y transmisión de la luz [9].

2.2.4. Fuerza de gradiente

La fuerza de gradiente se basa en el hecho de que existe un gradiente de intensidad en la sección transversal del haz de perfil Gaussiano con el que se incide (la intensidad es mayor en el centro del haz) y la refracción de luz que ocurre en la partícula [5], como se observa en la Fig. 2.2. Tomando dos rayos del haz incidente, a y b , el primero cerca del gradiente de intensidad y el segundo alejado del gradiente de intensidad, el rayo a presenta una mayor intensidad que el rayo b por su cercanía con el gradiente de intensidad, el rayo a con momento lineal inicial Pa_i se refracta produciendo un cambio en su momento lineal. Este rayo a se refracta nuevamente al emerger de la partícula con un momento lineal final Pa_f . Con base en un análisis vectorial es posible determinar el cambio total en el momento lineal ΔPa . Ocurre una transferencia del momento lineal de la luz a la partícula; por ende una fuerza de reacción actúa sobre la partícula en sentido opuesto debido a la conservación del momento lineal. La fuerza F_a presenta un sentido contrario a ΔPa . Lo mismo ocurre con el rayo b que genera F_b , dado que el rayo a tiene mayor intensidad; F_a es mayor que F_b dando paso a la fuerza resultante F , la componentes vertical de dicha fuerza F conduce a la partícula hacia la zona donde se presenta el gradiente de intensidad y la componente horizontal empuja la partícula hacia adelante en dirección de propagación del haz incidente [2-5].

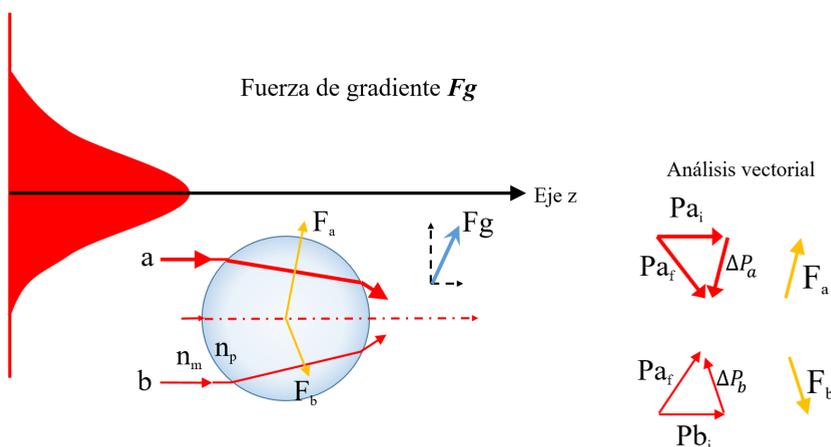


Figura 2.2: Fuerza de gradiente de intensidad [5].

2.2.5. Fuerza de esparcimiento

Tiene su origen en la ley de reflexión de la luz [5]. La fuerza ejercida en cada punto de la superficie de la partícula es siempre perpendicular a la superficie, por lo que la fuerza resultante F es la responsable de empujar la partícula en la dirección de propagación del haz con el que se incide [2-5], como se observa en la Fig. 2.3.

Tomando dos rayos del haz incidente con perfil Gaussiano; a y b se realiza el análisis vectorial similar al realizado en la fuerza de gradiente. El rayo a con momento lineal inicial Pa_i incide sobre la partícula dieléctrica y es reflejado con momento lineal final Pa_f , el cambio final del momento lineal está indicado por ΔP_a . Ocurre una transferencia de momento lineal de la luz hacia la partícula, debido a la conservación del momento se genera una fuerza F_b en sentido contrario a ΔP_a .

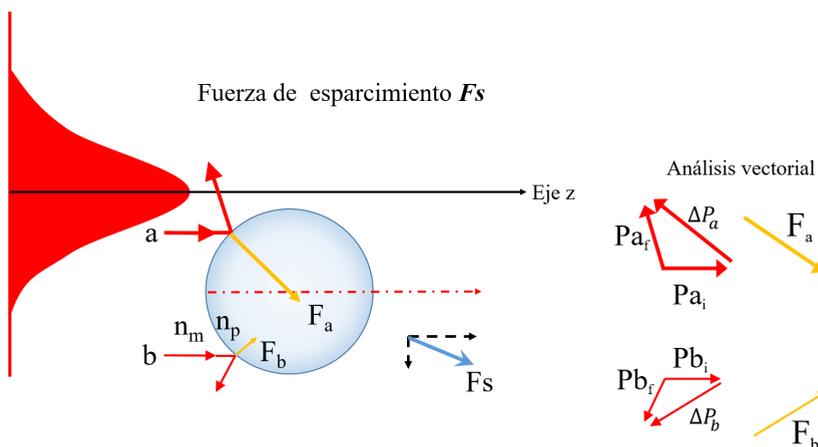


Figura 2.3: Fuerza de esparcimiento originada por la reflexión de la luz [5].

2.2.6. Absorción

Se refiere a la captación de cualquier tipo de energía por la materia, en éste caso abordamos la absorción óptica. La absorción de la radiación electromagnética es el proceso por el cual la radiación es captada por la materia. La mayoría de los materiales absorbe radiación electromagnética en algún rango del espectro electromagnético.

La interacción de la luz con la materia se presenta de tres formas que dependen de la frecuencia del haz incidente o energía del fotón [9];

$$\varepsilon = hv = \frac{hc}{\lambda}, \quad (2.4)$$

donde ε indica la energía de un fotón, h es la constante universal de Planck que equivale a $6,62606957 \times 10^{-34} \text{ j} \cdot \text{s}$, la constante de Planck comúnmente se denomina cuanto elemental de acción, ν representa la frecuencia de la onda electromagnética asociada, c indica la velocidad de la luz en el vacío equivalente a $3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$ y λ es la longitud de la onda electromagnética asociada.

A continuación se describen las tres formas de interacción de la luz con la materia de acuerdo con la Fig. 2.2:

- **Transmisión:** Es la fracción del haz incidente que al llegar a los átomos de la materia a una longitud de onda específica atraviesan la materia, los fotones incidentes pueden ser transmitidos en la misma dirección de propagación del haz incidente.
- **Absorción:** Si la energía del fotón equivale a la energía de los estados excitados, el átomo absorberá la energía del fotón incidente provocando un salto cuántico hasta el nivel más alto de energía. La energía absorbida por el átomo será transmitida al medio como energía térmica.
- **Reflexión:** De acuerdo a la ley de reflexión, un haz incidente sobre una interfase será reflejado con el mismo ángulo de incidencia.

2.2.7. Absorción electromagnética en metales

Los materiales conductores presentan un gran número de cargas libres, es decir; cargas que pueden circular por todas partes dentro del material, para el caso de los metales, la cargas son representadas por los electrones y el movimiento de los electrones implica una corriente eléctrica. Los materiales dieléctricos no poseen electrones libres. Si idealizamos un conductor perfecto, su conductividad sería infinita, traducándose en que los electrones impulsados a oscilar por una onda armónica simplemente seguirían las alteraciones del campo [10].

En los metales reales, sus electrones sufren choques con la red agitada térmicamente o con imperfecciones, al colisionar transforman la energía electromagnética en energía térmica, por ende; la absorción de energía electromagnética por un material es una función de la conductividad de éste. El fenómeno de absorción trae consigo la atenuación de la amplitud de la onda incidente, lo que indica que el medio posee un índice de refracción complejo;

$$\tilde{n} = n_R - i n_I, \quad (2.5)$$

donde n_R representa el índice de refracción real y n_I indica el índice de refracción imaginario, ambos números son reales. La parte real de \tilde{n} indica la velocidad de fase mientras que la parte imaginaria de \tilde{n} representa la absorción durante la propagación de la onda electromagnética a través del material.

Los materiales dieléctricos no poseen cargas libres o de conducción, por lo que la absorción será nula.

2.2.8. Coeficiente de absorción

Determina hasta qué punto la luz de una determinada longitud de onda puede penetrar la materia antes de ser absorbida. El coeficiente de absorción α depende de la longitud de onda y del material que se emplean, está dado por la siguiente expresión [11]:

$$\alpha_\lambda = \frac{4\pi\kappa_\lambda}{\lambda} = \frac{A_\lambda}{l}, \quad (2.6)$$

donde κ_λ representa el coeficiente de extinción a la longitud de onda empleada, A_λ indica la absorbancia mientras l representa el espesor de la materia que es atravesada por la onda de luz.

2.2.9. Absorbancia

Se define como la relación entre la intensidad de la luz incidente a una λ en una muestra y la intensidad de la luz transmitida a la misma λ que atraviesa la muestra, la absorbancia está dada por la siguiente expresión [11]:

$$A_\lambda = -\ln \frac{I}{I_0}, \quad (2.7)$$

donde I representa la intensidad del haz incidente mientras que I_0 indica la intensidad del haz transmitido.

2.2.10. Atenuación

La disminución en la intensidad de una onda de luz que se propaga a través de un medio que absorbe parte de los fotones de la onda de luz se denomina atenuación.

La concentración de nanopartículas metálicas inmovilizadas en el núcleo de la terminal de la fibra óptica se realiza mediante la cuantificación de la atenuación de

la potencia óptica ya que no existe un método confiable para determinar la cantidad de nanopartículas inmovilizadas a la fibra óptica.

El proceso se basa en la medición de la atenuación de la potencia óptica; se registra la medición inicial de la potencia óptica y se mide posterior al proceso de fotodeposición, la atenuación está dada por la siguiente expresión [11]:

$$a = 10 \text{Log} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right), \quad (2.8)$$

donde a es la atenuación de la potencia óptica (dB), P_{out} representa la potencia óptica posterior a la fotodeposición de nanopartículas y P_{in} indica la potencia óptica inicial. A mayor atenuación se infiere mayor cantidad de nanopartículas fotodepositadas en el núcleo de la terminal de la fibra óptica.

2.2.11. Fotodeposición

Un haz de una fuente de radiación coherente se hace incidir a través de una fibra óptica en una solución coloidal, la cual consiste en alcohol etílico y nanopartículas de plata (NPs de Ag), como se muestra en la Fig. 2.4.

Las NPs de Ag poseen una alta absorción de los fotones del haz incidente, transformando la energía absorbida de los fotones en energía térmica, la cual provoca corrientes de convección en el líquido que junto a la fuerza de Stoke, termoforesis y a la fuerza de gradiente logran adherir o inmovilizar las NPs metálicas en la cara de la punta de la fibra óptica [12-14].

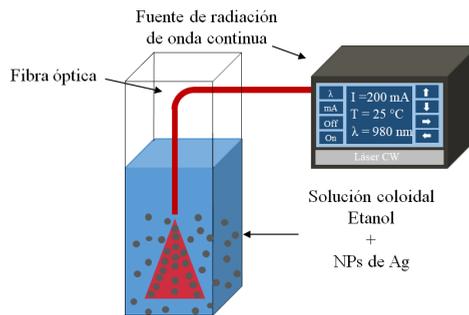


Figura 2.4: Proceso de fotodeposición de NPs metálicas.

2.3. Transferencia de calor

Se define como la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas; por ende siempre que exista una diferencia de temperatura entre dos cuerpos debe estar presente la transferencia de calor. Dicha transferencia está presente en medios sólidos, líquidos y gaseosos, se clasifica en tres tipos [15-17];

a. Conducción

Consiste en la propagación de calor entre dos cuerpos o partes de un mismo cuerpo que están a diferente temperatura provocado por la agitación térmica de las moléculas pero sin existir un desplazamiento real de las moléculas.

b. Convección

La transmisión de calor es ocasionada por el movimiento real de las moléculas de una sustancia. Éste fenómeno está presente sólo en fluidos donde exista un movimiento real de las moléculas ya sea natural o forzado debido a que las moléculas pueden desplazarse y con ello transmitir el calor sin interrumpir la continuidad física del cuerpo.

c. Radiación

Se debe a la transmisión de calor entre dos cuerpos los cuales en un instante de tiempo poseen diferentes temperaturas sin que entre ellos exista una conexión o contacto físico. Se trata de una transferencia de calor mediante la emisión de ondas electromagnéticas emitidas por el cuerpo que se encuentra a mayor temperatura.

2.3.1. Fenómenos que intervienen en la transferencia de calor

La tasa de transferencia de calor se puede ver afectada positiva o negativamente dependiendo del impacto de los siguientes fenómenos [15,16]:

- a. Transporte de calor latente.
- b. Microconvección.
- c. Intercambio vapor-líquido.
- d. Succión.
- e. Convección natural aumentada.
- f. Flujos termocapilares

2.3.2. Radiación térmica

La radiación térmica posee tres propiedades que están en función de la composición de la materia que incide [1];

- **Radiación absorbida:** es la porción del total de la cantidad de radiación que incide sobre un cuerpo y que permanece retenida dentro del mismo como energía interna, a los cuerpos que absorben toda la radiación incidente se denominan *cuerpos negros*.
- **Radiación reflejada:** es la fracción del total de la cantidad de radiación que incide sobre un cuerpo gris y que es reemitida por éste.
- **Radiación transmitida:** es la porción del total de la cantidad de radiación que incide sobre un cuerpo y que logra traspasar por él.

Se conoce como *intercambio de energía radiante* a la conjugación de los procesos de emisión, absorción, reflexión y transmisión de energía radiante por diferentes sistemas de cuerpos.

2.4. Ebullición

La ebullición es un proceso físico que denota el cambio de fase de un líquido a fase gaseosa. Un cambio de fase líquida a gaseosa se da cuando la temperatura del líquido se iguala al punto de ebullición del líquido a la presión correspondiente. Por ejemplo, es bien conocido que el agua tiene su punto de ebullición a los 100° C, dado que ésta temperatura es la temperatura a la cual la presión de vapor del agua es de 1 atm, es decir; bajo condiciones normales de presión. La ebullición se origina en la interfase sólida-líquida aunado el líquido se pone en contacto con una superficie calefactora [15,18].

2.4.1. Punto de ebullición

El calentamiento de un líquido por una fuente de calor externa provocará que el líquido eventualmente alcance la temperatura donde la presión de vapor es lo suficientemente grande y ocurrirá dentro del medio acuoso la formación de microburbujas. Estas microburbujas iniciarán su camino desde el punto de generación hasta llegar a la superficie impulsadas por la fuerza de flotabilidad F_F . Una vez que el medio líquido inicia a hervir, manteniendo la fuente externa de calor; la temperatura del medio líquido permanecerá constante hasta que todo el líquido cambie a fase gaseosa.

La tensión superficial del líquido disminuye a medida que la temperatura se incrementa hasta llegar a cero cuando se alcanzan temperaturas y presiones muy elevadas. A estas temperaturas y presiones elevadas no es posible generar microburbujas; la formación de microburbujas se presenta cuando la fuerza de tensión superficial σ existe. Las microburbujas existen como consecuencia de la tensión superficial en la interfase líquido-vapor producida por la fuerza de atracción sobre las moléculas que se encuentran en la fase gaseosa hacia la fase líquida [15,16].

Dentro de una microburbuja la presión interna es mayor que la del medio acuoso; lo que conducirá a que la microburbuja continúe existiendo. Si la temperatura del líquido se incrementa hasta el punto crítico, la σ tenderá a desaparecer provocando la extinción de la microburbuja. La cual no está en equilibrio térmico con su entorno ocasionado que exista una transferencia de calor en la interfase líquido-vapor. Dicha transferencia está presente a través de la convección; el calor fluye del punto más caliente al más frío. Cuando el líquido presenta una mayor temperatura que la microburbuja la transferencia de calor ocurre hacia la microburbuja, produciendo el crecimiento de ésta hasta llegar a una dimensión significativa donde la fuerza de flotabilidad F_F presente un mayor impacto sobre la microburbuja ocasionando su ascenso hasta la superficie. Si la microburbuja se encuentra a una mayor temperatura que el líquido que la contiene se presenta la condición contraria; la microburbuja transmite su calor al medio líquido ocasionado la condensación del vapor dentro de la microburbuja y con ello la reducción de sus dimensiones hasta llegar el momento de la desaparición de la burbuja. La ebullición se clasifica en dos tipos [16,17]:

- **Ebullición en estanque o en alberca:** ocurre cuando no se tiene flujo masivo del fluido; el fluido está en reposo y el movimiento del fluido es sólo generado por las corrientes de convección y por las microburbujas que ascienden hasta la superficie.
- **Ebullición en convección forzada:** durante la ebullición del líquido se induce un movimiento del fluido mediante mecanismos externos que producen una convección forzada.

Ésta investigación está basada en ebullición en reposo, el movimiento del líquido está dado por convección libre donde las microburbujas ascienden por efecto de la fuerza de flotabilidad.

2.4.2. Curva de ebullición

El trabajo que inició la investigación de la ebullición fue realizado por Shiro Nukiyama en 1934 a través de su artículo "*The maximum and minimum values of the*

heat Q transmitted for metal to boiling water under atmospheric pressure”, en español: Valores máximos y mínimos de calor transmitidos desde un metal a agua en ebullición a presión constante. Dicho trabajo sentó las bases de la transferencia de calor por ebullición [19]. Shiro Nukiyama mediante el uso de alambres de nicromo y de platino calentados vía eléctrica y sumergidos en medios líquidos advirtió que la ebullición toma formas diferentes dependiendo del valor de la temperatura en exceso ΔT_{exceso} , la cual representa el exceso de la temperatura de la superficie T_s por encima de la temperatura de saturación T_{sat} del fluido, como se muestra en la Fig. 2.5. Nukiyama establece cuatro tipos o regímenes de ebullición:

1. Ebullición en convección natural.
2. Ebullición nucleada.
3. Ebullición de transición.
4. Ebullición de película.

El proceso de ebullición es sumamente complejo, sin embargo la ebullición ha mostrado ser la forma más efectiva de extraer calor de una superficie.

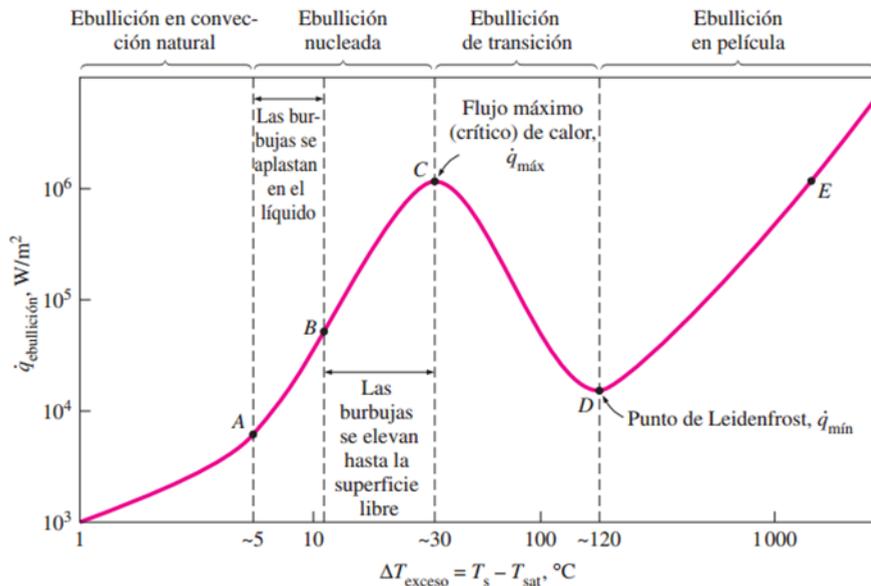


Figura 2.5: Curva de ebullición de agua a la presión de 1 atm [15].

2.2.2.1 Ebullición en convección natural

Región A, es la primera sección del proceso de ebullición como se observa en la Fig. 2.5, el líquido se encuentra ligeramente sobrecalentado que es una condición metaestable, se evapora al llegar a la superficie libre. La convección libre rige el movimiento del fluido así como también rige la transferencia de calor desde la superficie calefactora al fluido [17].

2.2.2.2 Ebullición nucleada

Se divide en dos regiones como se muestra en la Fig. 2.5; la primera es la región A – B ($5^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{exceso} \leq 30^{\circ}\text{C}$) que se caracteriza por la generación de microburbujas en sitios de nucleación preferenciales sobre la superficie calefactora. Las microburbujas se generan de forma aislada y se desprenden a medida en que se generan debido al arrastre del propio líquido. Los vacíos en la superficie calefactora que dejan las microburbujas al ascender son repuestos por el líquido circundante, el proceso se repite mientras la fuente externa continúe aportando energía. La agitación causada por el arrastre de las microburbujas y el movimiento del líquido son la razón del alto coeficiente de calor así como del flujo de calor más alto en esta región.

En la segunda región B – C ($10^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_{exceso} \leq 30^{\circ}\text{C}$) la temperatura se incrementa aún más, las microburbujas se generan a mayor velocidad y se originan numerosas columnas de vapor en el líquido. Las microburbujas se mueven a lo largo del líquido hasta llegar a la superficie libre donde terminan por reventarse produciendo una liberación de vapor. El flujo de calor es causado por el arrastre de las numerosas microburbujas y por la evaporación.

A medida que aumenta la ΔT_{exceso} el flujo de calor se incrementa con una menor rapidez hasta alcanzar el punto C; la velocidad del flujo de calor disminuye a causa porque a valores grandes de ΔT_{exceso} se genera una alta evaporación que actúa como aislante entre la superficie calefactora y el líquido, imposibilitando que el líquido tenga contacto directo con la superficie y con ello continuar generando microburbujas.

El punto C es denominado *flujo crítico de calor*. Éste es el régimen de ebullición que ofrece la ventaja de tener altas tasas de transferencia de calor con pequeños valores de ΔT_{exceso} [17].

2.2.2.3 Ebullición de transición

Una vez que la temperatura de la superficie calefactora y de ΔT_{exceso} sobrepasan el punto *C*, como se muestra en la Fig. 2.5, el flujo de calor disminuye como consecuencia de la generación de una película de vapor en la superficie calefactora. La ebullición nucleada que se tiene en el punto *C* es sustituida por la ebullición en película al llegar al punto *D*. También se conoce a este régimen como régimen inestable de ebullición en película, razón por la cual no es una ebullición deseada [17].

2.2.2.4 Ebullición en película

Se presenta más allá del punto *D* como se observa en la Fig. 2.5, en ésta región se forma una película estable de vapor que cubre la superficie calefactora. La película de vapor actúa como aislante térmico, lo que produce una baja tasa de transferencia de calor. Dicha tasa sólo puede incrementarse por la radiación al momento de incrementar la ΔT_{exceso} , la radiación sólo es significativa a altas temperaturas. En el punto *D* el flujo de calor alcanza su mínimo, mismo que recibe el nombre de *punto de Leidenfrost*. El punto *E* corresponde a temperaturas superficiales muy elevadas y sobrepasa el punto de fisión de los materiales con los que está hecho la superficie calefactora produciendo la fusión [17]. La transferencia de calor que ocurre desde la superficie calefactora hasta el líquido está gobernada por la ley de enfriamiento de Newton [19], quien experimentalmente determinó que la tasa de pérdida de calor de un cuerpo caliente es proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo caliente T_s y el medio circundante T_{sat} .

$$q_{ebullición} = h(T_s - T_{sat}) = h\Delta T_{exceso} (W/m^2), \quad (2.9)$$

donde ΔT_{exceso} representa el exceso de la temperatura superficial T_s por encima de la temperatura de saturación T_{sat} y h representa el calor latente de vaporización. Los cuatro regímenes de ebullición en función de la temperatura de la superficie calefactora se muestran en la 2.6 (a) Ebullición por convección natural, (b) Ebullición nucleada, (c) Ebullición en transición y (d) ebullición en película.

2.4.3. Ebullición nucleada

En éste tipo de ebullición la mayor parte del calor es transmitido a través de la fase líquida debido que ésta fase ofrece una mayor transferencia de calor que el vapor en forma de microburbujas. En la superficie calefactora se crea una capa límite que es alterada con el ascenso de las burbujas, este ascenso trae consigo la eliminación temporal de la capa límite que reduce la principal resistencia térmica derivando en un incremento en el coeficiente transferencia de calor superiores a los ofrecidos

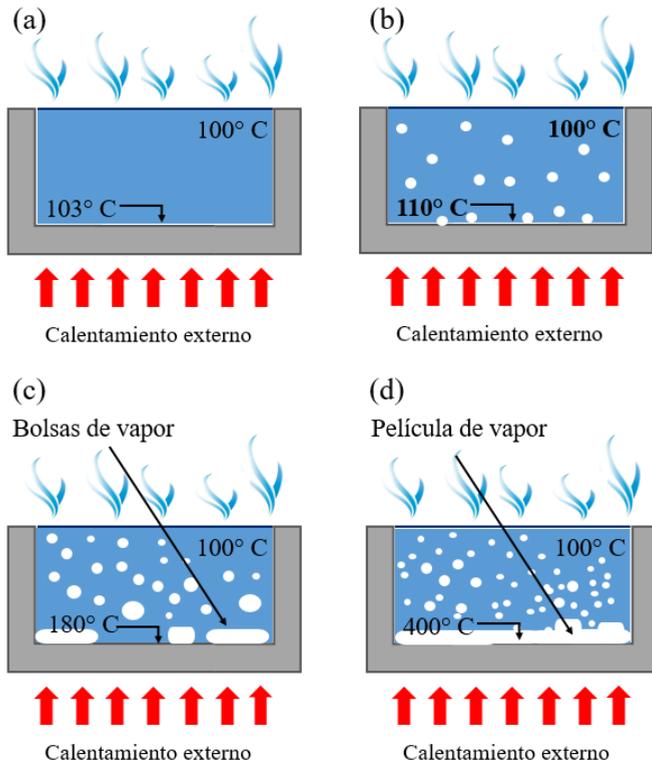


Figura 2.6: Regímenes de ebullición en estanque dentro de un recipiente con líquido[17].

por el mecanismo de convección. Si el calor es transmitido al líquido mediante una superficie sólida, las microburbujas se formarán directamente en la superficie y no dentro del líquido.

La Fig. 2.7 muestra la formación de una microburbuja sobre una superficie calefactora [17]. La superficie f_1 separa al líquido del vapor, mientras que la superficie f_0 separa al sólido del vapor, por ende se generan nuevas interfaces (líquido – vapor y sólido – vapor) que traen consigo la aparición de tensiones superficiales σ_{w-l} , σ_{w-v} que dan muestra de las interacciones.

El trabajo requerido para llevar a cabo la formación de nuevas superficies du-

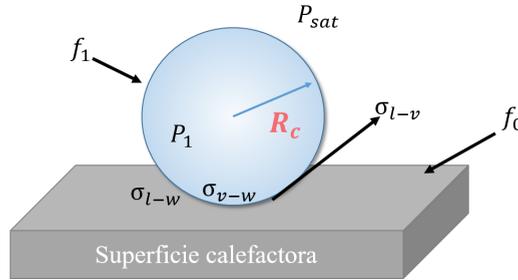


Figura 2.7: Interacción entre una microburbuja y una superficie calefactora [17].

rante la generación de una burbuja de vapor sobre una porción de la superficie calefactora esta dado por la Ec. 2.10:

$$W = \sigma_{l-v}f_1 + (\sigma_{v-w} - \sigma_{l-w})f_0. \tag{2.10}$$

De la Ec. 2.10 se obtiene:

$$W = \sigma f \left[1 - \frac{f_0}{f_1} (1 - \cos\theta) \right], \tag{2.11}$$

donde θ es el ángulo de contacto entre f_1 y f_0 . Se observa que el trabajo de formación de la interfase es menor en tanto se incremente la relación f_0 / f_1 y el ángulo de contacto θ lo que se interpreta como que las paredes sólidas catalizan la ebullición y la condensación del vapor, debido a que el trabajo para llevar a cabo la formación de una burbuja esférica es mayor ($\theta \rightarrow 0$).

La formación de núcleos se ve favorecida por las irregularidades (rugosidad) que presente la superficie calefactora, éstas irregularidades proporcionan mayor área de contacto en la interfase f_0 / f_1 , como se muestra en la Fig. 2.8.

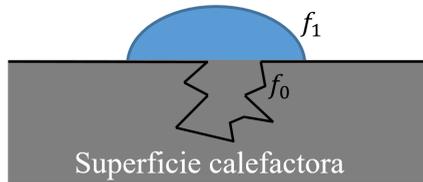


Figura 2.8: Mayor f_0 / f_1 reduce la energía necesaria para generar una burbuja.

Para que las microburbujas se formen y sobrevivan deben al menos igualar las tensiones a las están sometidas por las diversas fuerzas dentro del medio que las

rodea como: la tensión superficial, la cohesión y la presión del líquido o medio, además de las fuerzas ópticas generadas por la incidencia de la fuente de radiación. La presión de vapor dentro de la burbuja debe ser igual o mayor a la presión que se ejerce sobre la burbuja de acuerdo a la Ec. 2.12, la cual esta basada en la ley de la tensión superficial establecida por Young-Laplace [318,20] que indica que la diferencia de presión en la superficie o interfaz aire/gas es inversamente proporcional al radio de curvatura r , como se muestra en la Fig. 2.9.

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \frac{2\sigma}{r}, \quad (2.12)$$

donde σ es es la tensión superficial y r es el radio de la burbuja.

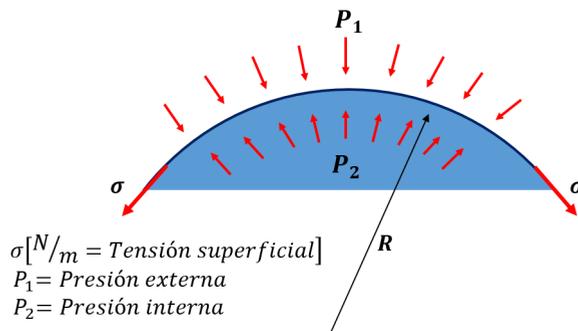


Figura 2.9: Ley de tensión superficial de Young-Laplace.

2.4.4. Convección natural

También llamada convección libre. La presencia de una variación en la temperatura del medio acuoso producirá una diferencia en su densidad y originará su movimiento.

2.4.5. Convección de Termocapilar

Es la tendencia del calor y la masa a viajar hacia áreas donde la tensión superficial es mayor dentro de un medio acuoso. A causa de un gradiente de tensión superficial se produce el movimiento del fluido que es mayor al movimiento causado por convección libre. Ésta convección tiene su origen en el fenómeno de Marangoni, el cual ejerce una fuerza de empuje en la interface de la microburbuja y el medio

acuoso, lleva el nombre del físico italiano Carlo Marangoni quien determinó las causas que generan el movimiento. [20,21]. Los gradientes de tensión superficial pueden ser originados por diversos factores como son;

- Gradientes de temperatura.
- Tensoactivos.
- Aplicación de potencial eléctrico.

La convección de termocapilar es predominante bajo condiciones de micro-gravedad, ya que en condiciones normales la convección causada por la gravedad es predominante.

2.5. Fuerzas presentes en la manipulación de micro-burbujas

Un cuerpo inmerso en un medio acuoso está sometido a fuerzas hidrodinámicas. Dichas fuerzas están en función de la gravedad, densidad del medio acuoso y del cuerpo así como se la viscosidad del medio. La presencia de un gradiente de temperatura induce una fuerza adicional a las fuerzas hidrodinámicas.

2.5.1. Fuerza de Marangoni

Una microburbuja inmersa en un medio acuoso infinito y bajo la presencia de un gradiente de temperatura experimentará una fuerza de empuje hacia la región de mayor temperatura. El incremento de temperatura genera una disminución proporcional de la fuerza de tensión superficial de la mayoría de los líquidos. Dicha disminución genera en la interface entre la microburbuja y el medio acuoso un estrés tangencial, el cual ejerce una fuerza de empuje sobre la superficie de la microburbuja induciendo su desplazamiento a las regiones de mayor temperatura [21-24], como se muestra en la Fig. 2.10.

La fuerza generada por el estrés tangencial recibe el nombre de fuerza de Marangoni y está dada por la Ec. 2.13 [24]:

$$\vec{F}_M = -2\pi R^2 \left(\frac{d\sigma}{dT} \right) \vec{\nabla} T, \quad (2.13)$$

donde R es el radio de la burbuja, $\frac{d\sigma}{dT}$ es la razón de cambio de la tensión superficial respecto a la temperatura del líquido, $\vec{\nabla} T$ es el gradiente de temperatura que

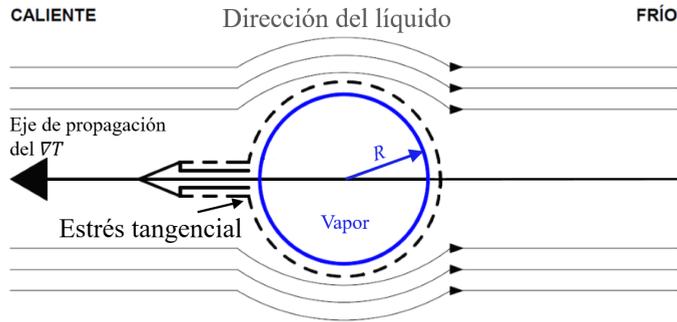


Figura 2.10: Movimiento de una microburbuja debido a la fuerza de Marangoni [24].

indica la razón de cambio de la temperatura respecto a la posición.

Young *et al.* [25] obtuvieron una predicción analítica para la velocidad de migración en el caso donde el número de Marangoni y el número de Reynolds se aproximaran a cero, el cual es llamado modelo YGB. La velocidad de desplazamiento de una microburbuja debido a la presencia de un gradiente de temperatura está dada por [26]:

$$U_M = -\frac{d\sigma}{dT} \frac{R}{2\mu} \vec{\nabla}T, \quad (2.14)$$

donde σ y μ son la tensión superficial y la viscosidad dinámica del medio acuoso respectivamente. La viscosidad es una propiedad física de los líquidos, se origina de las colisiones entre las partículas del líquido que se desplazan a diferentes velocidades, originando una resistencia en su desplazamiento. La viscosidad dinámica también conocida como viscosidad absoluta o simplemente viscosidad.

2.5.2. Tensión superficial

La fuerza de tensión superficial es un vector que presenta una dirección tangencial a la superficie de propagación [27]. Es una propiedad que poseen los líquidos, por la cual parecen estar cubiertos por una capa delgada que es elástica en estado de tensión; esto es generado porque las fuerzas que afectan a cada molécula difieren en el interior del medio y en la superficie. En dicha superficie la fuerza neta es llevada hacia el interior del líquido, lo que provoca que se simule una capa delgada elástica.

La tensión superficial responde a la Ley de Eötvös [28] que es válida para la mayoría de los líquidos. La magnitud de la fuerza de tensión superficial se ve afectado por la presencia de un gradiente de temperatura y/o por la adición de tensioactivos, también llamados surfactantes, los cuales son especies químicas con tendencia a localizarse en la interfase formando una capa mono molecular adsorbida en la interfase que cambia el valor de la tensión superficial. En la mayoría de los líquidos la tensión superficial disminuye conforme la temperatura se incrementa; por lo que $\frac{d\sigma}{dT}$ posee un signo negativo para indicar el decremento de la tensión superficial.

2.5.3. Ley de Eötvös

Establece que la tensión superficial de la mayoría de los líquidos está en función de la temperatura [28]:

$$\sigma \propto \frac{1}{T}, \quad (2.15)$$

donde T es la temperatura. La tensión superficial disminuye con el incremento de la temperatura debido a que a mayor temperatura existe un mayor movimiento molecular y con ello disminuyen las fuerzas de cohesión generando una disminución en la tensión superficial del medio acuoso.

2.5.4. Fuerza de arrastre o de Stokes

Un cuerpo en movimiento que se encuentra inmerso en un fluido está expuesto a fuerzas generadas por la acción del propio fluido. La fuerza de arrastre \vec{F}_A es ejercida por el fluido en dirección contraria a la fuerza que es ejercida por el cuerpo en movimiento. La \vec{F}_A está dada por [26]:

$$\vec{F}_A = -4\pi\mu R U_0, \quad (2.16)$$

donde U_0 es la velocidad total de la microburbuja. El signo negativo indica que la velocidad de desplazamiento es contraria a la acción de las corrientes de convección.

2.5.5. Número de Reynolds

Es una relación adimensional que indica si el fluido se comporta de forma laminar o turbulento dentro de un sistema, el número de Reynolds está dado por la siguiente expresión [24]:

$$Re = \frac{2U_0R}{\nu}, \quad (2.17)$$

donde ν es la viscosidad cinemática del medio acuoso, se considera que el comportamiento de fluido es laminar si $Re < 1$ y turbulento si $Re > 1$.

2.5.6. Adhesión y Cohesión

La adhesión ocurre cuando dos superficies de sustancias diferentes entran en contacto y se unen, se mantienen juntas gracias a las fuerzas intermoleculares. Por el contrario, la cohesión es la fuerza de atracción entre partículas adyacentes de un mismo cuerpo o sustancia [16,19].

La cohesión es la responsable de que el agua forme gotas, la tensión superficial hace que la gota se mantenga esférica y la adhesión genera que la gota se mantenga en su sitio.

En este trabajo el medio acuoso es etanol C_2H_6O , la burbuja es generada de forma fototérmica en la cara de la fibra óptica, el fenómeno de termocapilaridad se genera mediante la incidencia de potencia óptica, alternando la incidencia de la potencia óptica entre dos fibras se produce el movimiento de la burbuja dentro del medio acuoso.

2.5.7. Gradiente de temperatura

Es la variación de la temperatura por unidad de distancia dentro de un medio. La presencia de un gradiente de temperatura induce la transferencia de calor desde el cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura. Mediante la velocidad de Marangoni U_M expresada en la Ec. 2.14 se obtiene la expresión para el gradiente de temperatura:

$$\vec{\nabla}T = -\frac{2\mu U_M}{\frac{d\sigma}{dT}R}. \quad (2.18)$$

2.5.8. Fuerza de flotabilidad

Es la fuerza que ejerce un líquido en sentido vertical sobre la superficie inferior de un objeto inmerso en el propio líquido, tiene su origen en el principio de Arquímedes. La fuerza de flotabilidad está dada por la siguiente expresión [29];

$$\vec{F}_F = \frac{4}{3}\pi R^3 g(\rho_l - \rho_v), \quad (2.19)$$

donde ρ_l y ρ_v son la densidad del líquido y del vapor dentro de la microburbuja respectivamente. $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ es la fuerza de gravedad. La densidad de vapor del etanol es ~ 0 , por lo tanto la Ec. 2.19 queda expresada como:

$$\vec{F}_F = \frac{4}{3}\pi R^3 g \rho_l. \quad (2.20)$$

La fuerza de flotabilidad \vec{F}_F y la fuerza de arrastre \vec{F}_A inducen el desplazamiento de una microburbuja inmersa en un medio acuoso de acuerdo a la solución propuesta por Hadamard-Rybczynski para la ley de arrastre de Stokes [26], la velocidad terminal de la microburbuja U_T está dada por:

$$U_T = \frac{2gR^2}{9\mu} (\rho_b - \rho_l) \quad (2.21)$$

2.5.9. Solución coloidal

También llamada sistema coloide, suspensión coloidal o dispersión coloidal. Consiste en una solución acuosa con partículas suspendidas, las cuales son de mayor tamaño que las moléculas de la solución acuosa. La solución coloidal se diferencia de las suspensiones químicas por el tamaño de las partículas disueltas, las partículas en las soluciones coloidales no son visibles al ojo humano, sólo son visibles a nivel microscópico, mientras que las suspensiones químicas son visibles al ojo humano.

2.6. Referencias

[1] E. Hecht, “Electromagnetic theory, photons, and light”, in *Optics*, A. Black, ed. (Addison Wesley, San Francisco, 2002).

[2] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm and, Steven Chu, “Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles,” *Opt. Lett.* **11**, 288-290 (1986).

[3] A. Ashkin, “The study of cells by optical trapping and manipulation of living cells using infrared laser beams,” *SGSB Bulletin* **4**(2), 133-146 (1991).

[4] A. Ashkin, “Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime,” *Biophys. J.* **61**(2), 569-582 (1992).

[5] K. V. Sepúlveda, I. R. Vargas and, R. Ramos García, “Pinzas ópticas: Las delicadas manos de la luz,” *Ciencia*, **58**, 18-25 (2007).

[6] J. W. Christian, “General introduction in The theory of transformations in metals and alloys,” ed. (Pergamon, 1975).

[7] R. Pimentel-Domínguez, J. Hernández-Cordero and, R. Zenit, “Microbubble generation using fiber optic tips coated with nanoparticles,” *Opt. Express* **20**(8), 8732-8740 (2012).

[8] D. W. Berry, N. R. Heckenberg and, H. Rubinsztein-Dunlop, “Effects associated with bubble formation in optical trapping,” *J. Mod. Opt.* **47**(9), 1575-1585 (2000).

[9] E. Hecht, “The propagation of light,” in *Optics*, A. Black, ed. (Addison Wesley, San Francisco, 2002).

[10] J. M. Hollas, “Electromagnetic radiation and its interaction with atoms and molecules,” in *Modern Spectroscopy*, J. M. Hollas, ed. (John Wiley and Sons, England, 2004).

[11] E. Hecht, “Geometrical optics, photons, and light,” in *Optics*, A. Black, ed. (Addison Wesley, San Francisco, 2002).

[12] J. G. Ortega-Mendoza, F. Chávez, P. Zaca-Morán, C. Felipe, G. F. Pérez-Sánchez, G. Beltran-Pérez, O. Goiz and, R. Ramos-Gracia, “Selective photodeposition of zinc

nanoparticles on the core of a single-mode optical fiber,” *Opt. Express* **21**(5), 6509-6518 (2013).

[13] P. Zaca-Morán, E. Kuzin, J. Torres-Turiján, J. G. Ortega-Mendoza, F. Chávez, G. F. Pérez-Sánchez and, L. C. Gómez-Pavón, “High gain pulsed erbium-doped fiber amplifier for the nonlinear characterization of SWCNTs photodeposited on optical fibers,” *Opt. Laser Technol.* **52**, 15-20 (2013).

[14] J. G. Ortega-Mendoza, A. Padilla-Vivanco, C. Toxqui-Quitl, P. Zaca-Morán, D. Villegas and, F. Chávez, “Optical Fiber Sensor Based on Localized Surface Plasmon Resonance Using Silver Nanoparticles Photodeposited on the Optical Fiber End,” *Sensor* **14**(10), 18701-18710 (2014).

[15] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar, “Ebullición y Condensación,” in *Transferencia de calor y masa*, P. E. Roig, ed. (Mc Graw Hill, 2011).

[16] T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera and, D. P. DeWitt “Boiling and Condensation,” in *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, ed. (John Wiley and Sons, 2011).

[17] Y. A. Cengel, “Basics of heat transfer,” in *Heat transfer*, Y. A. Cengel, ed. (Mc Graw Hill, 2002).

[18] S. Hamzekhani, M. Maniavi Falahieh, M. R. Kamalizadeh and, M. Salmani-nejad, “Bubble dynamics for nucleate pool boiling of water, ethanol and methanol pure liquids under the atmospheric pressure,” *J. Appl. Fluid Mech.* **8**(4), 893-898 (2015).

[19] S. Nukiyama, “The maximum and minimum values of the heat transmitted from metal to boiling water under atmosphere pressure,” *Int. J. Heat Mass Transfer* **9**, 1419-1433 (1966).

[20] K. Takahashi, J. G. Weng and, C. L. Tien, “Marangoni effect in microbubble systems,” *Microscale Thermophys. Eng.* **3**(3), 169-182 (1999).

[21] L. E. Scriven and C. V. Sterling, “The Marangoni effects,” *Nature* **187**(4733), 186-188 (1960).

[22] C. Marangoni, “On the expansion of a droplet of a liquid floating on the surface of another liquid,” *Tipographia dei fratelli Fusi, Pavia* (1865).

[23] R. S. Subramanian and R. Balasubramanian, *The motion of bubbles and drops in reduced gravity* (Cambridge University Press, 2001).

[24] C. E. Brennen, "Translation of bubbles," in *Cavitation and Bubble Dynamics*, ed. (Oxford University Press, New York, 1999).

[25] N. O. Young, J. S. Goldstein and, M. J. Block. "The motion of bubbles in a vertical temperature gradient," *Cambridge University Press* **6**(3), 350-356 (1979).

[26] J. I. Ramos, "Lumped models of gas bubbles in thermal gradients," *Appl. Math. Modelling* **21**(6), 371-386 (1997).

[27] C. E. Brennen, "Phase change, nucleation, and cavitation," in *Cavitation and Bubble Dynamics*, C. E. Brennen ed. (Oxford University Press, New York, 1999).

[28] S. R. Palit, "Thermodynamic interpretation of the Eötvös constant," *Nature* **177**, 11880 (1956).

[29] A. A. Nepomnyashchy, M. G. Velarde and, P. Colinet, "Thermocapillary and solutocapillary migration of drops (and bubbles) and their spreading due to the Marangoni effect," in *Interfacial phenomena and convection*, ed. A. Jeffrey, (Chapman and Hall/crc, 2002).

Capítulo 3

Desarrollo experimental

En este capítulo se presenta la metodología, técnicas y recursos empleados para llevar a cabo la generación y manipulación de microburbujas. En la sección 3.1, se detalla el proceso de fotodeposición de nanopartículas de plata (*NPs de Ag*) sobre el núcleo de fibra óptica. En la sección 3.2, se expone el proceso para generar una microburbuja de etanol. En la sección 3.3, se presentan las configuraciones experimentales para llevar a cabo la manipulación de microburbujas.

3.1. Fotodeposición

El proceso de fotodeposición ha sido ampliamente estudiado, se trata de la inmovilización de (*NPs*) metálicas en el núcleo de una fibra óptica a través de la incidencia de un haz proveniente de una fuente de radiación coherente. La fotodeposición hace uso de los fenómenos de termoforesis, fuerza de gradiente, corrientes de convección y fuerza de Stokes. Es un proceso económico y práctico de implementar que ofrece la ventaja de no requerir de un mayor equipamiento y/o instrumentación óptica.

3.1.1. Absorbancia de nanopartículas de plata

La absorbancia de las *NPs* de *Ag* respecto a la longitud de onda empleada se determinó a través de un espectrómetro modelo HR4000 de la marca Ocean Optics.

El proceso para determinar la absorbancia requiere una medición de referencia, es decir; una medición sin *NPs* de *Ag* fotodepositadas en el núcleo de una fibra óptica. La fuente de radiación coherente ($\lambda = 1064 \text{ nm}$) se acopló a la terminal de la fibra óptica, la cual se ingresa al espectrómetro como se muestra en la Fig. 3.1.

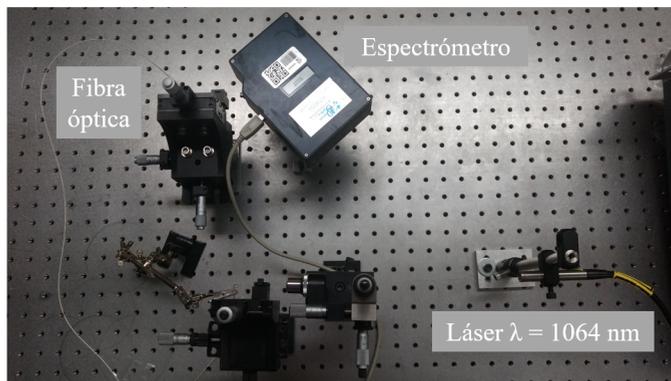


Figura 3.1: Arreglo óptico para medición de absorbancia.

3.1.2. Descripción experimental de fotodeposición

A fin de realizar un proceso de fotodeposición que sea reproducible, se preparó una solución coloidal a base de 0.3 mg de NPs esféricas de Ag (nanopolvo de plata con tamaño menor a 100 nm) con número de producto 576832 de la marca Sigma-Aldrich y 2 ml de etanol C_2H_6O dentro de un vial, la solución coloidal se coloca en una tina ultrasónica modelo SB 120-DTN de la marca Ultrasonic Cleaner durante cinco minutos para homogeneizar la solución.

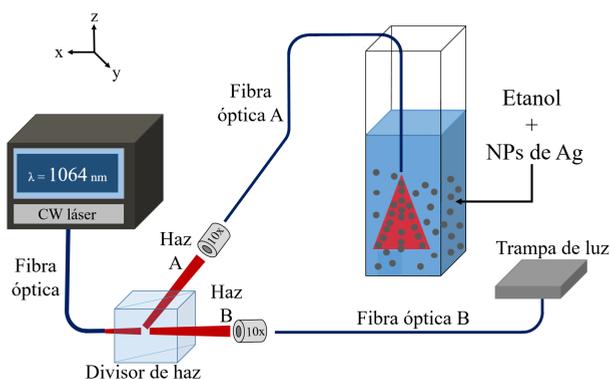


Figura 3.2: Proceso de fotodeposición de NPs metálicas sobre el núcleo de una fibra óptica.

El haz de una fuente de radiación coherente es acoplado a una terminal de fibra óptica. La fotodeposición de NPs de Ag sobre los núcleos de la fibra óptica se lleva a cabo sumergiendo la terminal de la fibra óptica dentro del vial que contiene la solución coloidal, como se muestra en la Fig. 3.2.

A través de un medidor de potencia modelo 2395T-C y una esfera integradora modelo 819C-SF-B, ambos de la marca Newport se realizó el monitoreo del proceso de fotodeposición para conseguir una atenuación en la potencia de salida.



Figura 3.3: Medidor de potencia (a). Esfera integradora (b).

3.2. Generación de microburbujas

Una fuente de radiación coherente fue acoplada a una fibra óptica, en la terminal de dicha fibra óptica se llevó a cabo el proceso de fotodeposición de NPs de Ag. La terminal de la fibra óptica fue ingresada dentro de una cubeta de poliestireno con capacidad de 4.5 ml que contiene etanol, el cual también es conocido como alcohol etílico; es un líquido incoloro, volátil y con un olor característico, cuya densidad en estado líquido es $\rho_l \sim 790 \text{ kg/m}^3$, viscosidad dinámica $\mu = 1,074 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ y punto de ebullición a 78.3°C . En la Fig. 3.4 se muestra el arreglo experimental utilizado para la generación de microburbujas.

3.3. Manipulación de microburbujas

En el presente trabajo de tesis se exponen seis arreglos ópticos a través de los cuales se llevan a cabo la manipulación de microburbujas dentro de una cubeta de poliestireno que contiene etanol.

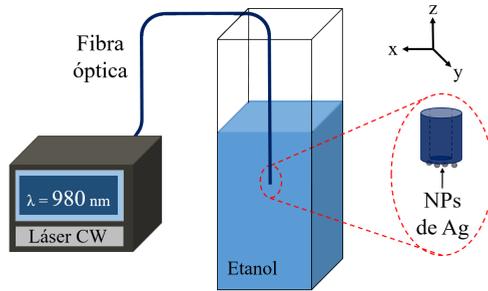


Figura 3.4: Generación de microburbujas.

Primer arreglo óptico

Se emplean dos fuentes de radiación coherente de diferente longitud de onda acopladas a dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente. La magnitud de la fuente de radiación y las atenuaciones en ambas fibras ópticas son diferentes.

Segundo arreglo óptico

A través de dos fuentes de radiación coherente de diferente longitud de onda acopladas a dos fibras ópticas contrapuestas horizontalmente. La magnitud de la fuente de radiación y las atenuaciones en ambas fibras ópticas son diferentes.

Tercer arreglo óptico

Se emplea una fuente de radiación, la cual es dividida y acoplada a dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente. La magnitud de la fuente de radiación y las atenuaciones en ambas fibras ópticas son iguales.

Cuarto arreglo óptico

A través de dos fuentes de radiación de diferente longitud de onda acopladas a dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente y separadas respecto a la normal. La magnitud de la fuente de radiación y las atenuaciones en ambas fibras ópticas son diferentes.

Quinto arreglo óptico

Se emplea una fuente de radiación coherente, la cual es dividida y acoplada a dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente. El proceso de fotodeposición fue reali-

zado en la fibra óptica inferior mientras la fibra óptica superior no cuenta con NPs de Ag inmovilizadas en su núcleo.

Sexto arreglo óptico

A través de tres fuentes de radiación coherente, las cuales son acopladas a tres fibras ópticas dispuestas horizontalmente y separadas entre ellas. La magnitud de las fuentes de radiación y las atenuaciones son diferentes entre sí.

3.3.1. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente con emisión de radiación a diferente λ

Dos fuentes de radiación coherente (onda continua CW) con diferente longitud de onda fueron acopladas a dos fibras ópticas, en las cuales se fotodepositaron NPs de Ag originando una atenuación de diferente magnitud en cada fibra óptica como se muestra en la Tabla 4.1 de la sección 4.1.

Una primera fuente de radiación coherente modelo BL976-SAG300 de la marca Thorlabs que emite a una $\lambda = 980$ nm y una potencia máxima de 300 mW fue utilizada y acoplada a una fibra óptica monomodo modelo 9/125 μm (diámetro interno y externo respectivamente). Una segunda fuente de radiación coherente modelo BWF1-445-450 de la marca BWTEK que emite a una $\lambda = 445$ nm con potencia máxima de 450 mW fue empleada y acoplada a una fibra óptica multimodo modelo 105/125 μm . NPs de Ag fueron fotodepositadas en las terminales de ambas fibras ópticas, las cuales se introdujeron verticalmente y contrapuestas entre ellas, como se muestra en la Fig. 3.5.

Para visualizar la generación y manipulación de microburbujas se empleó una fuente de iluminación blanca de 5 W (LED), un objetivo de microscopio de 50x con apertura numérica (NA, por sus siglas en inglés) de 0.42 de la marca Mitutoyo así como una cámara de vídeo modelo v7.3 de la marca Phantom, la cual se operó a 6,600 cuadros por segundo (fps, por sus siglas en inglés). Dos etapas de traslación X, Y y Z fueron usadas para controlar la alineación y distancia de separación entre las terminales de las fibras ópticas.

La emisión de ambas fuentes de radiación se realizó de forma alternada; se inició con la emisión de la fuente con $\lambda = 980$ nm a una potencia suficiente para inducir la nucleación del medio acuoso y con ello generar una microburbuja, la cual es visualizada en la terminal de la fibra óptica. La manipulación se realizó conmutando la emisión de las fuentes de radiación a una menor potencia que la requerida para la generación de la microburbuja.

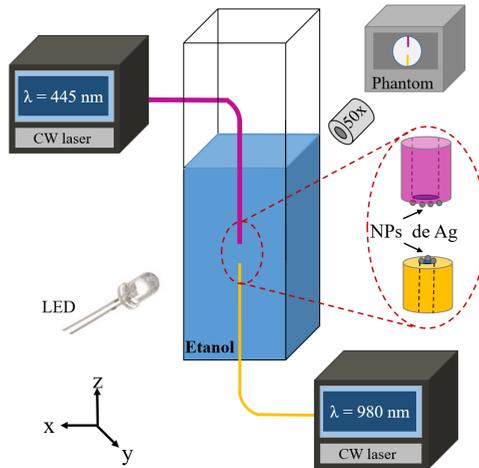


Figura 3.5: Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente.

3.3.2. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas horizontalmente con emisión de radiación a diferente λ

En éste segundo arreglo óptico se utilizaron los recursos y equipos descritos en la sección 3.3.1 para la generación y manipulación de microburbujas, las fibras ópticas se introdujeron horizontalmente y contrapuestas entre ellas dentro de la cubeta con etanol, como se muestra en la Fig. 3.6.

Para visualizar la generación y manipulación de microburbujas se empleó una fuente de iluminación blanca (LED) de 5 W, un objetivo de microscopio de 20x con $NA = 0.28$ de la marca Mitutoyo y una cámara de vídeo de 3.0 Megapíxeles de la marca Motic con capacidad de grabar 60 fps como se muestra en la Fig. 3.6. Mediante dos etapas de traslación X, Y y Z se logró la alineación horizontal de ambas terminales de fibras ópticas.

La emisión de ambas fuentes de radiación se realizó de forma alternada; se inicia con la emisión de la fuente con $\lambda = 445 \text{ nm}$ a una potencia suficiente para inducir la nucleación del medio acuoso y generar una microburbuja, la cual se visualiza en la terminal de la fibra óptica. La manipulación se realizó conmutando la emisión de la fuente con $\lambda = 445 \text{ nm}$ y la fuente con $\lambda = 980 \text{ nm}$ a una radiación menor a la potencia requerida para la generación de la microburbuja.

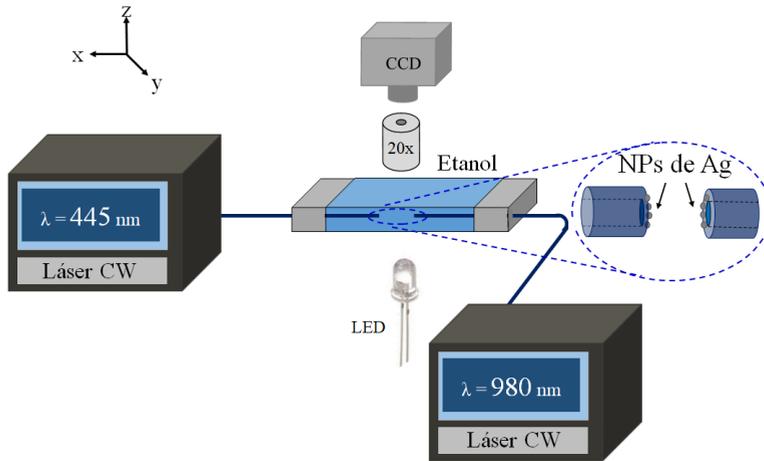


Figura 3.6: Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas horizontalmente.

3.3.3. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente con emisión de radiación a la misma λ

Una fuente de radiación coherente modelo YLR-5-1064-LP-PL1212317 de la marca IPG Photonics que emite a una $\lambda = 1064 \text{ nm}$ con una potencia máxima de 5 W es dividida mediante un divisor de haz infrarrojo 50/50 de la marca Thorlabs, mediante dos objetivos de microscopio 10x de la marca Mitutoyo se acoplan los haces de la fuente en terminales de dos fibras ópticas multimodo 50/125. NPs de Ag se fotodepositaron en los núcleos de las terminales de fibras ópticas hasta obtener una atenuación aproximadamente igual en ambas terminales como se muestra en la Tabla 4.1 de la sección 4.1. Ambas terminales de las fibra ópticas se introdujeron verticalmente y contrapuestas entre sí, como se observa en la Fig. 3.7.

Para visualizar la generación y manipulación de microburbujas se empleó una lámpara de halógeno de 12 V/20 W, un objetivo de microscopio de 50x con $\text{NA}=0.42$ de la marca Mitutoyo y una cámara de vídeo modelo v7.3 de la marca Phantom, la cual se empleó a 6,600 fps. Dos etapas de traslación X, Y y Z fueron empleadas para controlar la alineación y distancia de separación entre las terminales de las fibras ópticas.

La emisión de radiación en cada terminal de las dos fibras ópticas se realiza alternadamente; el paso del haz B es permitido para generar una microburbuja

mientras el haz A es obstruido, la manipulación de la microburbuja se realiza conmutando el paso de los haces a una menor potencia que la necesaria para generar la nucleación del medio acuoso.

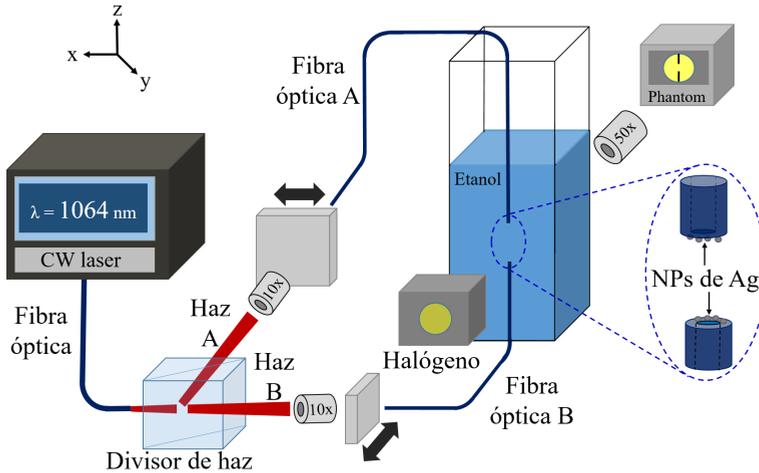


Figura 3.7: Arreglo de dos fibras ópticas con una misma λ .

3.3.4. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente fuera de eje con emisión de radiación a diferente λ

En éste arreglo óptico se emplearon los recursos y equipos descritos en la sección 3.3.1 para la generación y manipulación de microburbujas entre terminales de fibras ópticas contrapuestas verticalmente dentro de una cubeta con etanol. Ambas fibras están separadas de la normal como se muestra en la Fig. 3.8.

Para visualizar la generación y manipulación de microburbujas se empleó una lámpara de halógeno de 12 V/20 W, un objetivo de microscopio de 50x con $NA=0.42$ de la marca Mitutoyo y una cámara de vídeo modelo v7.3 de la marca Phantom, la cual se empleó a 6,600 fps. Una etapa de traslación X, Y y Z fue empleada para desplazar la fibra óptica superior fuera de eje 33° y 43° respecto a la normal.

La emisión de ambas fuentes de radiación se realizó de forma alternada; se inicia con la emisión de la fuente con $\lambda = 980 \text{ nm}$ a una potencia suficiente para inducir la nucleación del medio acuoso y generar una microburbuja, la cual es visualizada adherida a la terminal de la fibra óptica. La manipulación se realizó

conmutando la emisión de las fuentes de radiación a una menor potencia que la requerida para la generación de la microburbuja.

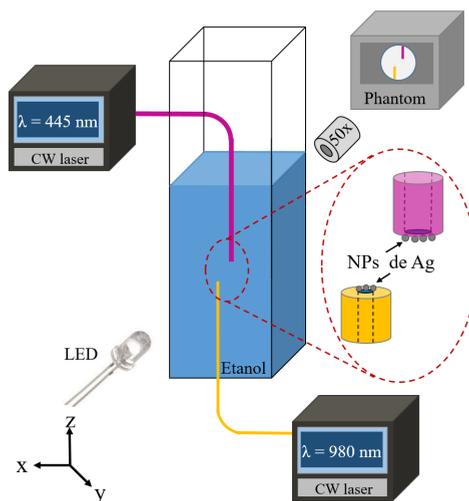


Figura 3.8: Arreglo vertical de dos fibras ópticas fuera de eje.

3.3.5. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente con emisión de radiación a la misma λ ; con y sin NPs

Este arreglo óptico está basado en el arreglo de la sección 3.3.3, en el cual se emplea una misma longitud de onda para ambas terminales de las fibras ópticas a través de la división de la fuente de radiación por un divisor de haz infrarrojo. NPs de Ag fueron fotodepositadas en la terminal de la fibra óptica inferior mientras que la terminal de la fibra óptica superior no fue sometida al proceso de fotodeposición, como se muestra en la Fig. 3.9.

Para visualizar la generación y manipulación de microburbujas se empleó una lámpara de halógeno de 12 V/20 W, un objetivo de microscopio de 50x con $NA=0.42$ de la marca Mitutoyo y una cámara de vídeo modelo v7.3 de la marca Phantom, la cual se empleó a 6,600 fps. Una etapa de traslación X, Y y Z fue empleada para controlar la alineación y distancia de separación entre las terminales de las fibras ópticas.

El haz B es permitido para generar una microburbuja mientras que el haz A es

obstruido. La conmutación de los haces se llevó a cabo posterior a la generación de la microburbuja; se permite el paso del haz *A* en tanto el haz *B* es obstruido.

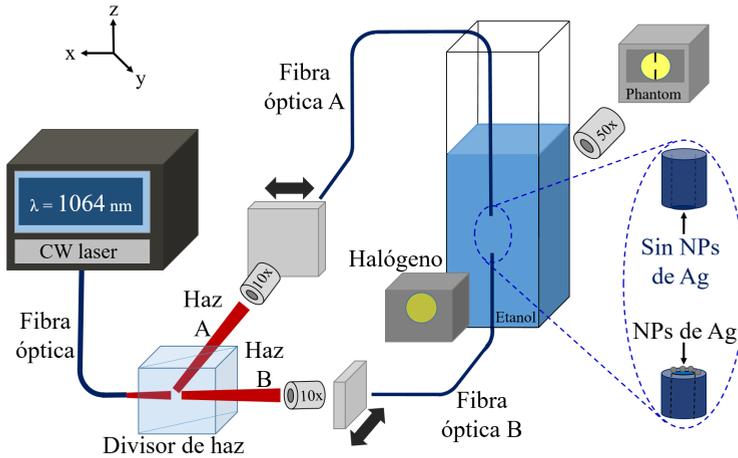


Figura 3.9: Terminal superior sin NPs de Ag, terminal inferior con NPs de Ag fotodepositadas.

3.3.6. Arreglo horizontal de tres fibras ópticas con emisión de radiación a diferente λ

Tres fuentes de radiación coherente fueron acopladas a terminales de tres fibras ópticas, en las cuales se fotodepositaron NPs de Ag, produciendo atenuaciones diferentes en cada terminal, como se muestra en la Tabla 4.1 de la sección 4.1.

Una primer fuente de radiación coherente modelo SFL-1550S de la marca Thorlabs que emite a una $\lambda = 1550 \text{ nm}$ con una potencia máxima de 55 mW fue empleada y acoplada a una fibra óptica monomodo $9/125 \mu\text{m}$, la segunda fuente de radiación utilizada modelo BL976-SAG300 de la marca Thorlabs que emite a una $\lambda = 980 \text{ nm}$ y una potencia máxima de 300 mW fue utilizada y acoplada a una fibra óptica monomodo modelo $9/125 \mu\text{m}$ (diámetro interno y externo respectivamente), la tercer fuente de radiación coherente modelo BWF1-445-450 de la marca BWTEK que emite a una $\lambda = 445 \text{ nm}$ con potencia máxima de 450 mW fue utilizada y acoplada a una fibra óptica multimodo modelo $105/125 \mu\text{m}$.

NPs de Ag fueron fotodepositadas en el núcleo de las fibras ópticas provocan-

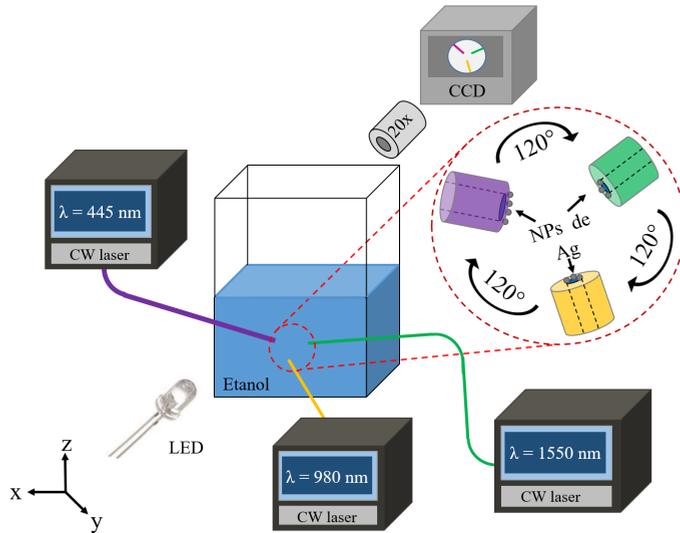


Figura 3.10: Arreglo horizontal de tres fibras ópticas.

do una atenuación diferente en cada terminal. Dentro de la cubeta con etanol se introdujeron horizontalmente las fibras ópticas con una separación de 120° entre cada una, como se muestra en la Fig. 3.10.

Para visualizar la generación y manipulación de la microburbuja se emplea una fuente de iluminación blanca de 5 W, un objetivo de microscopio de 20x y NA = 0.28 de la marca Mitutoyo y una cámara de video de 3.0 Megapíxeles de la marca Motic con capacidad de grabar 60 fps.

La emisión de radiación en cada terminal de las tres fibras ópticas se conmuta iniciando con la operación de la fuente con una $\lambda = 980 \text{ nm}$, seguido de la fuente a una $\lambda = 1550 \text{ nm}$ y finalizando con la fuente a una $\lambda = 445 \text{ nm}$.

En el siguiente capítulo se presentaran los resultados obtenidos para la generación y manipulación de microburbujas en cada uno de los arreglos ópticos descritos en este capítulo.

Capítulo 4

Resultados experimentales

En este capítulo se exponen los resultados experimentales obtenidos sobre la generación y manipulación de microburbujas dentro de una cubeta con etanol bajo las configuraciones experimentales descritas en el capítulo anterior. En la sección 4.1, se exponen los resultados del proceso de fotodeposición. En la sección 4.2, se presenta una secuencia de imágenes de la generación y del perfil de la tasa de crecimiento de una microburbuja. En la sección 4.3, se presentan los resultados de la manipulación de una microburbuja de acuerdo a los arreglos descritos en el capítulo 3. En la sección 4.4, se exponen los resultados obtenidos a través del fenómeno de termocavitación.

4.1. Fotodeposición

El procedimiento de fotodeposición para cada fuente de radiación coherente se llevo a cabo siguiendo los pasos descritos en el capítulo anterior. Las atenuaciones obtenidas por el proceso de fotodeposición en cada terminal de fibra óptica correspondiente a la longitud de onda empleada se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Atenuaciones en fibra óptica por fotodeposición

λ (nm)	445	980	1064	1550
a (dB)	2.8	5.5	7.0	2.9
<i>Tipo de fibra</i>	MM 105/125	SM 9/125	MM 50/125	SM 9/125

En la Fig. 4.1a se muestra una imagen microscópica del núcleo de la terminal de fibra óptica modelo MM 105/125 μm antes del proceso de fotodeposición. En

la Fig. 4.1b se muestra el núcleo de la terminal posterior al proceso de fotodeposición de NPs de Ag empleando la fuente de radiación coherente de $\lambda = 1064$ nm, correspondiente a una atenuación $a = 2.8$ dB de acuerdo a la Tabla 4.1.

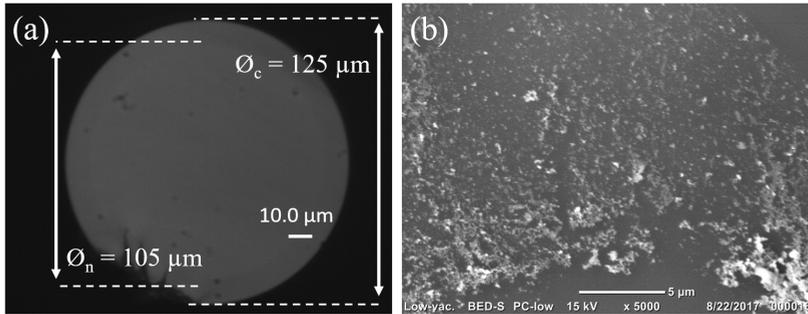


Figura 4.1: Núcleo de fibra óptica MM 105/125 μm sin NPs de Ag (a) y con NPs de Ag (b) fotodepositadas.

4.1.1. Absorbancia de nanopartículas de plata

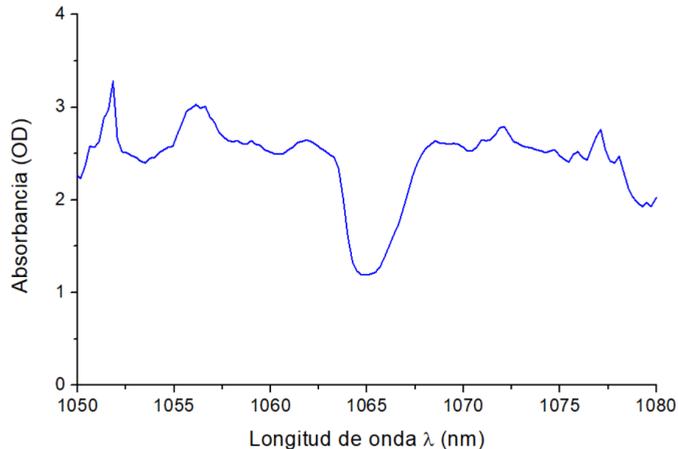


Figura 4.2: Absorbancia de NPs de Ag a $\lambda = 1064$ nm.

La absorbancia que presentan las NPs de Ag fotodepositadas a la longitud de onda de 1064 nm es de 1.34 OD (optical density) como se puede observar en la

gráfica de la Fig. 4.2. En dicha gráfica se puede observar que las NPs de Ag presentan un pico en la absorbancia a ~ 1064 nm, mientras que en el resto del espectro electromagnético se mantiene constante. La gráfica fue determinada a través del software Ocean View v 1.6.3.

4.2. Generación de microburbuja

En la Fig. 4.3 se muestra la secuencia de imágenes acerca de la generación y evolución de una microburbuja sobre la terminal de una fibra óptica multimodo 105/125 que cuenta en su núcleo con NPs de Ag, las cuales provocaron una atenuación de 7 dB. La fuente de radiación emite a una $\lambda = 1064$ nm con una potencia de ~ 16 mW.

El crecimiento del radio de la burbuja se debe a la continua evaporación del etanol alcanzando radios de $63 \mu\text{m}$ en un tiempo de 50 ms como se puede observar en la secuencia mostrada en la Fig. 4.3. La tasa de crecimiento claramente depende de la potencia del haz, sin embargo, esta no fue incrementada para evitar la presencia del fenómeno de termocavitación. El colapso violento de la burbuja producido por la cavitación puede originar el desprendimiento de las NPs de Ag hasta que eventualmente las burbujas no puedan ser creadas.

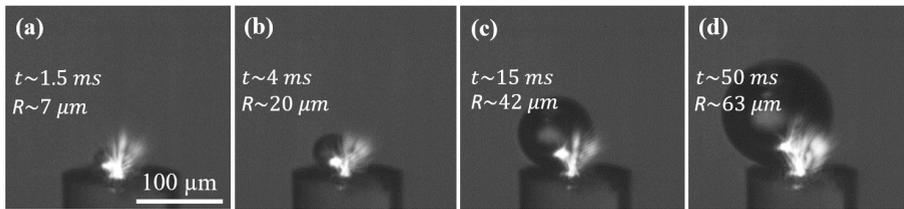


Figura 4.3: Secuencia de la generación de una microburbuja en la punta de una fibra óptica.

4.3. Manipulación de microburbujas

En cada uno de los arreglos experimentales se generó una microburbuja, la cual posteriormente fue sometida a la conmutación de los gradientes de temperatura para llevar a cabo su manipulación.

4.3.1. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente con emisión de radiación a diferente λ

En la terminal de la fibra óptica inferior se generó una microburbuja a través de la incidencia de la fuente de radiación coherente de $\lambda = 980$ nm y una potencia de ~ 98 mW hasta alcanzar un radio de ~ 137 μm .

La emisión de las fuentes de radiación fueron conmutadas; se interrumpió la emisión de la fuente de $\lambda = 980$ nm y se permitió la emisión de la fuente de $\lambda = 445$ nm con una potencia de ~ 74 mW hacía la terminal superior. Bajo éstas condiciones la microburbuja se desplaza en un tiempo de ~ 8 ms desde la terminal inferior a la terminal superior, las cuales mantienen una separación de ~ 476 μm .

En la Fig. 4.4 se muestra la secuencia de imágenes del desplazamiento en sentido $+z$ de la microburbuja alcanzando una velocidad de ~ 64.16 mm/s, manteniendo la forma esférica.

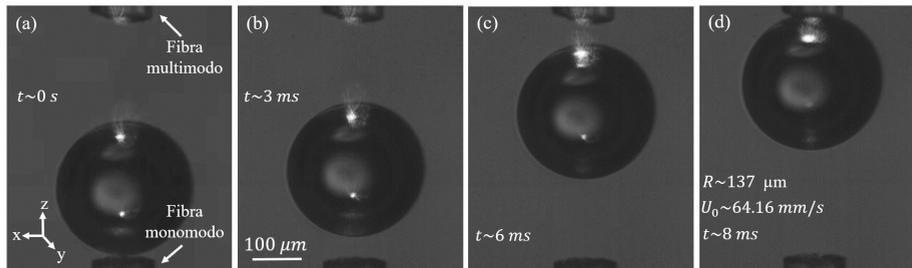


Figura 4.4: Secuencia del desplazamiento de una microburbuja en sentido $+z$ bajo diferente λ , atenuación y potencia.

En la Fig. 4.5 se muestra la secuencia de imágenes del desplazamiento de una microburbuja en dirección $-z$ en un tiempo de ~ 35 ms. La microburbuja se generó en la terminal superior a través de la emisión de la fuente de $\lambda = 445$ nm a una potencia de ~ 82 mW hasta alcanzar un radio de ~ 70 μm .

La emisión de las fuentes fue conmutada para interrumpir la emisión de la fuente de $\lambda = 445$ nm y dar paso a la emisión de la fuente de $\lambda = 980$ nm con una potencia de ~ 88 mW, induciendo el desplazamiento de la microburbuja hacía la terminal inferior a una velocidad de ~ 52.5 mm/s, manteniendo su forma esférica.

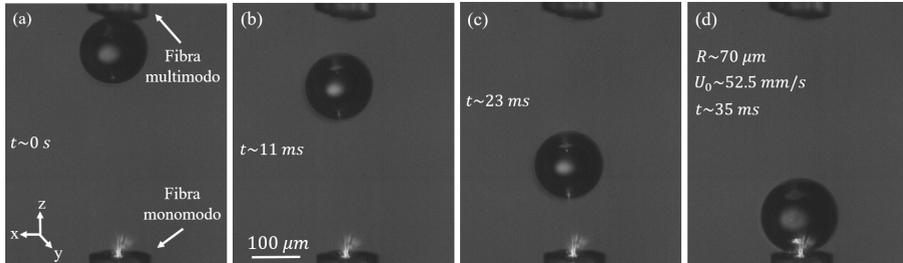


Figura 4.5: Secuencia del desplazamiento de una microburbuja en sentido $-z$ bajo diferente λ , atenuación y potencia.

4.3.2. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas horizontalmente con emisión de radiación a diferente λ

En la terminal de la fibra óptica izquierda se generó una microburbuja de $\sim 300 \mu\text{m}$ de radio a través de la incidencia de radiación de la fuente de $\lambda = 445 \text{ nm}$ a una potencia de $\sim 82 \text{ mW}$. La emisión de las fuentes de radiación es conmutada para inducir el desplazamiento de la microburbuja; la fuente de $\lambda = 445 \text{ nm}$ se interrumpe para dar paso a la emisión de la fuente de $\lambda = 980 \text{ nm}$ con una potencia de $\sim 90 \text{ mW}$.

En la Fig. 4.6 se muestra la secuencia de imágenes correspondientes al desplazamiento de la microburbuja en dirección $+y$ entre dos terminales espaciadas $\sim 1 \text{ mm}$ alcanzando una velocidad de $\sim 1.8 \text{ mm/s}$.

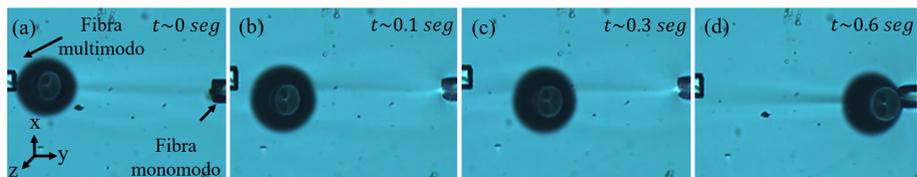


Figura 4.6: Secuencia del desplazamiento de una microburbuja en sentido $-z$ bajo diferente λ , atenuación y potencia.

4.3.3. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente con emisión de radiación a la misma λ

Una microburbuja de $\sim 115 \mu\text{m}$ de radio es generada en la terminal de la fibra óptica inferior a través del paso del haz B de la fuente de radiación de $\lambda = 1064 \text{ nm}$ a

una potencia de ~ 16 mW mientras el haz A es obstruido.

Posterior a la generación de la microburbuja los haces fueron conmutados; se permitió el paso del haz A con una potencia de ~ 14.5 mW mientras el haz B es obstruido. En la Fig. 4.7 se muestra la secuencia de imágenes del desplazamiento de la microburbuja en dirección $+z$ entre las terminales espaciadas ~ 480 μm .

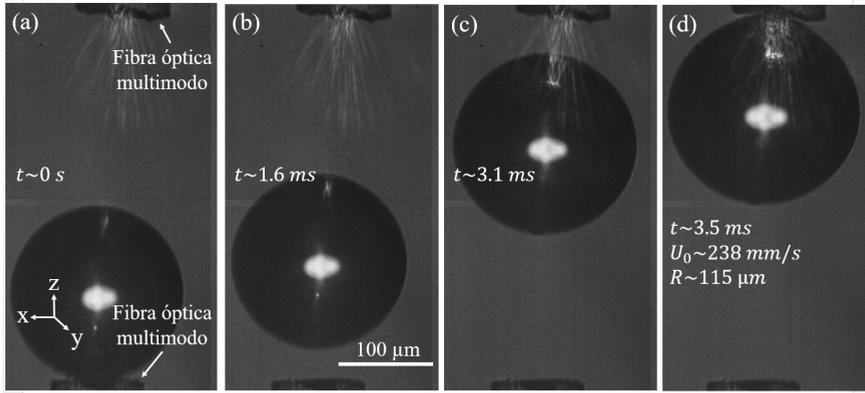


Figura 4.7: Secuencia del desplazamiento de una microburbuja en sentido $+z$ con igual λ , atenuación y potencia.

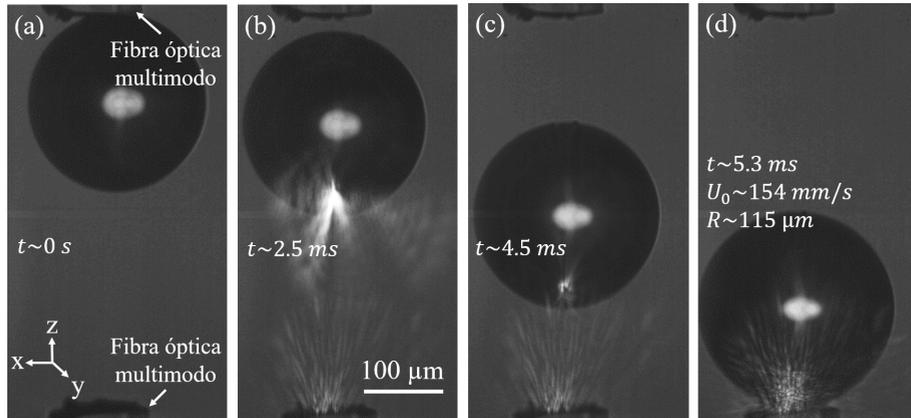


Figura 4.8: Secuencia del desplazamiento de una microburbuja en sentido $-z$ con igual λ , atenuación y potencia.

De acuerdo a los resultados obtenidos es posible observar que la microburbuja se desplaza a una velocidad de ~ 238 mm/s en un tiempo ~ 3.5 ms manteniendo su forma esférica durante su desplazamiento.

En la Fig. 4.8 se muestra la secuencia correspondiente al desplazamiento de la microburbuja entre dos terminales contrapuestas verticalmente. El paso del haz *A* es obstruido mientras el paso del haz *B* es permitido. Bajo estas condiciones la microburbuja se desplaza en dirección $-z$ en un tiempo de ~ 5.3 ms a una velocidad de ~ 154 mm/s, conservando su forma esférica.

4.3.4. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente y fuera de eje, con emisión de radiación a diferente λ

Una microburbuja de ~ 85 μm de radio se generó en la terminal inferior de una fibra óptica que está acoplada a una fuente de radiación de $\lambda = 980$ nm con una potencia ~ 98 mW. La conmutación en la emisión de las fuentes de radiación origina el desplazamiento de la microburbuja hacia la terminal superior acoplada a la fuente de $\lambda = 445$ nm a una potencia de ~ 74 mW.

En la Fig. 4.9 se muestra la secuencia de imágenes correspondiente al desplazamiento de la microburbuja entre dos terminales de fibras ópticas separadas ~ 485 μm con $\sim 33^\circ$ fuera de eje respecto a la normal. Bajo estas condiciones la microburbuja se desplaza en sentido $+z$ a una velocidad de ~ 33 mm/s en un tiempo de ~ 14 ms, conservando su forma esférica durante su desplazamiento.

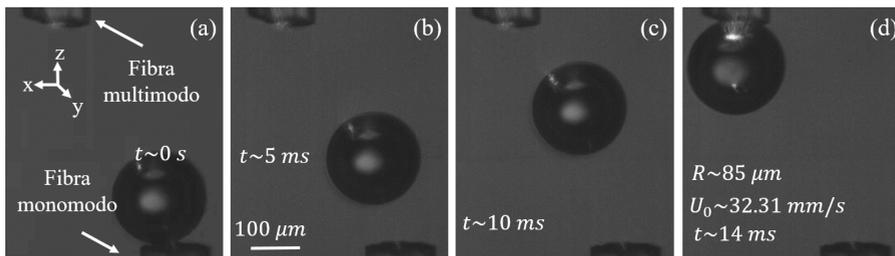


Figura 4.9: Secuencia del desplazamiento vertical desalineado de una microburbuja en sentido $+z$ bajo diferente λ , atenuación y potencia.

En la Fig. 4.10 se muestra la secuencia de imágenes correspondientes al desplazamiento en sentido $-z$ de una microburbuja de ~ 77 μm de radio, la cual fue generada en la terminal superior a través de la emisión de radiación de la fuente de

$\lambda = 445 \text{ nm}$ a una potencia de $\sim 82 \text{ mW}$.

La conmutación de las fuentes se llevo a cabo una vez generada la microburbuja; la fuente de $\lambda = 445 \text{ nm}$ fue interrumpida mientras se permitió la emisión de la fuente de $\lambda = 980 \text{ nm}$ con una potencia de $\sim 88 \text{ mW}$. Bajo éstas condiciones la microburbuja se desplaza en un tiempo de $\sim 30 \text{ ms}$ entre dos terminales separadas $\sim 530 \mu\text{m}$ con $\sim 43^\circ$ fuera de eje respecto a la normal, alcanza una velocidad de $\sim 20 \text{ mm/s}$ y conservando la forma esférica durante el desplazamiento.

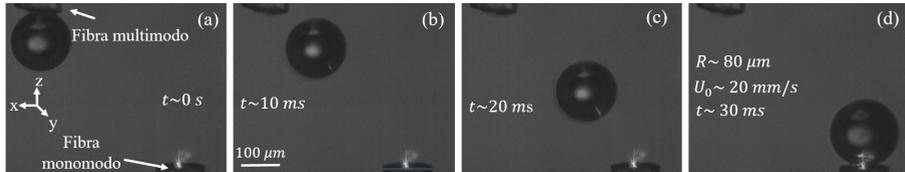


Figura 4.10: Secuencia del desplazamiento vertical desalineado de una microburbuja en sentido $-z$ bajo diferente λ , atenuación y potencia.

4.3.5. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente con emisión de radiación a la misma λ ; con y sin NPs

En el núcleo de la terminal inferior que cuenta con NPs de Ag fotodepositadas se generó una microburbuja de $\sim 80 \mu\text{m}$ de radio mediante el paso del haz B de la fuente de radiación de $\lambda = 1064 \text{ nm}$, con una potencia de $\sim 16 \text{ mW}$. Mientras que el haz A es obstruido, como se muestra en la Fig. 4.11(a).

El paso de los haces fue conmutado; el haz B es obstruido en tanto que el haz A es permitido a la terminal superior. Dicha terminal no cuenta con NPs de Ag fotodepositadas en su núcleo, como se muestra en la secuencia de imágenes de la Fig. 4.11(b-d).

Bajo éstas condiciones el desplazamiento de la microburbuja no logró ser inducido por la emisión de la fuente de radiación, las fuerzas ópticas generadas por el haz de la fuente de radiación no representan un impacto significativo sobre la superficie de la microburbuja.

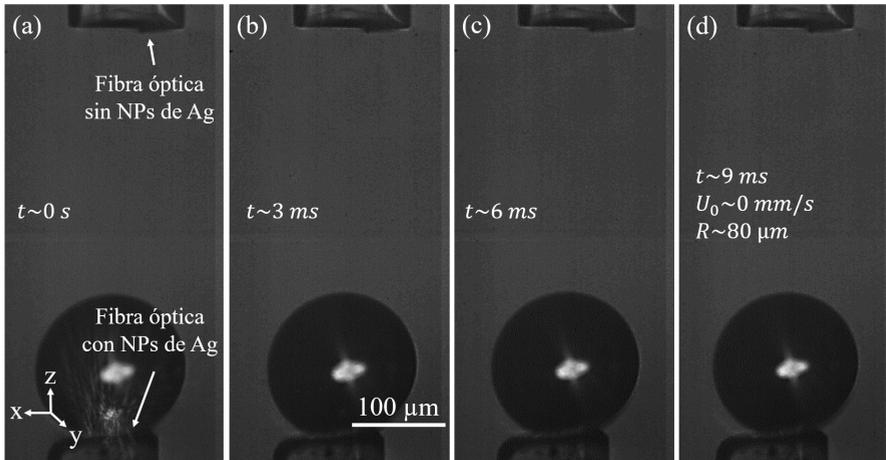


Figura 4.11: Interacción entre una microburbuja y una fuente de radiación.

4.3.6. Arreglo de dos fibras ópticas contrapuestas verticalmente sin emisión de radiación; fuerza de flotabilidad

Una microburbuja de $\sim 150 \mu\text{m}$ de radio fue generada en la terminal inferior a través del paso del haz B de la fuente de $\lambda = 1064 \text{ nm}$ con una potencia de $\sim 16 \text{ mW}$ mientras del haz A es obstruido. Ambos haces son obstruidos mientras que la microburbuja se desplaza en dirección $+z$ en $\sim 9 \text{ ms}$ hasta alcanzar una velocidad de $\sim 37.5 \text{ ms}$, como se muestra en la secuencia de imágenes de la Fig. 4.12.

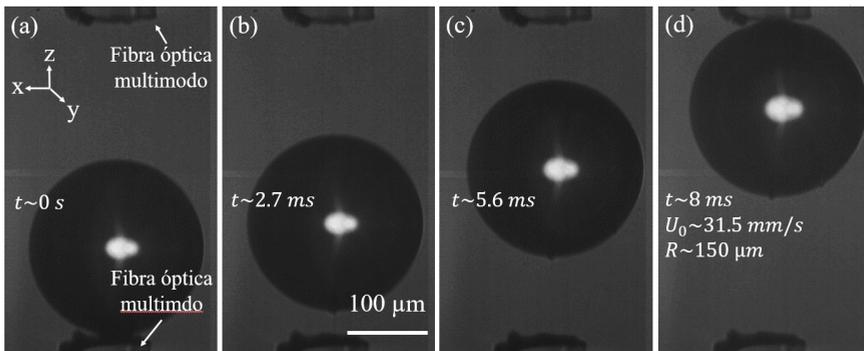


Figura 4.12: Desplazamiento de una microburbuja sin la emisión de radiación.

4.3.7. Arreglo horizontal de tres fibras ópticas con emisión de radiación a diferente λ

En la secuencia de imágenes de la Fig. 4.13 se muestra el desplazamiento que realiza una microburbuja de $\sim 215 \mu\text{m}$ de radio entre tres terminales de fibra óptica, las cuales cuentan con NPs de Ag fotodepositadas en sus núcleos de acuerdo a la Tabla 4.1 y están acopladas a tres fuentes de radiación coherente.

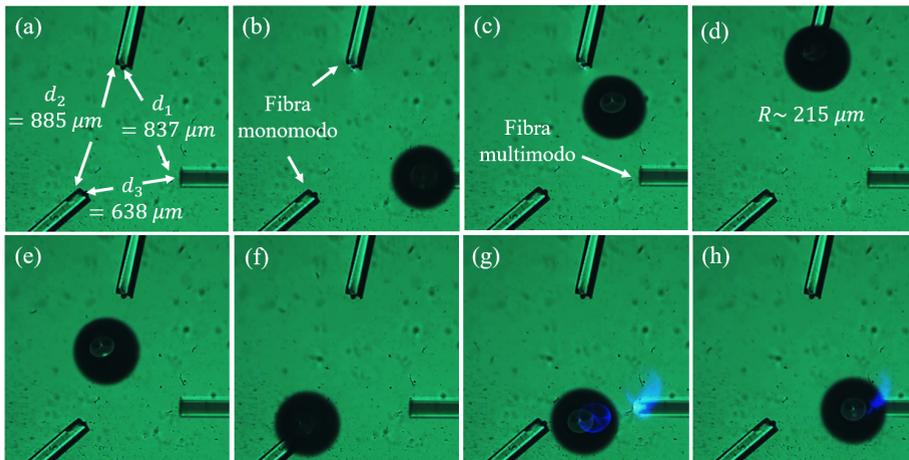


Figura 4.13: Secuencia del desplazamiento de una microburbuja entre tres fuentes de radiación con diferentes λ .

La radiación de una primer fuente de $\lambda = 445 \text{ nm}$ con $\sim 82 \text{ mW}$ fue inicialmente permitida para generar la microburbuja; la radiación de una segunda fuente de $\lambda = 1550 \text{ nm}$ con $\sim 45 \text{ mW}$ se permitió mientras la primer fuente fue interrumpida; la radiación de una tercer fuente de $\lambda = 980 \text{ nm}$ fue permitida con $\sim 88 \text{ mW}$ entre tanto se interrumpió la emisión de la fuente $\lambda = 1550 \text{ nm}$; finalmente se permitió la emisión de la primer fuente de $\lambda = 445 \text{ nm}$ con $\sim 82 \text{ mW}$.

Bajo estas condiciones la manipulación de la microburbuja se llevo a cabo en sentido contrario a las manecillas del reloj, como se muestra en la secuencia de imágenes de la Fig. 4.13.

4.4. Termocavitación

Durante el desarrollo de la sección 4.2, se observó la presencia del fenómeno de termocavitación, el cual es generado por la incidencia de la fuente de radiación de $\lambda = 445 \text{ nm}$ con una potencia de 50 mW sobre las NPs de Ag fotodepositadas en el núcleo de la terminal de la fibra óptica.

En la secuencia de imágenes de la Fig. 4.14 se muestra el fenómeno de termocavitación, bajo estas condiciones la microburbuja alcanza un radio máximo R_{max} de $\sim 200 \mu\text{m}$ en un tiempo de menor a 57 ms.

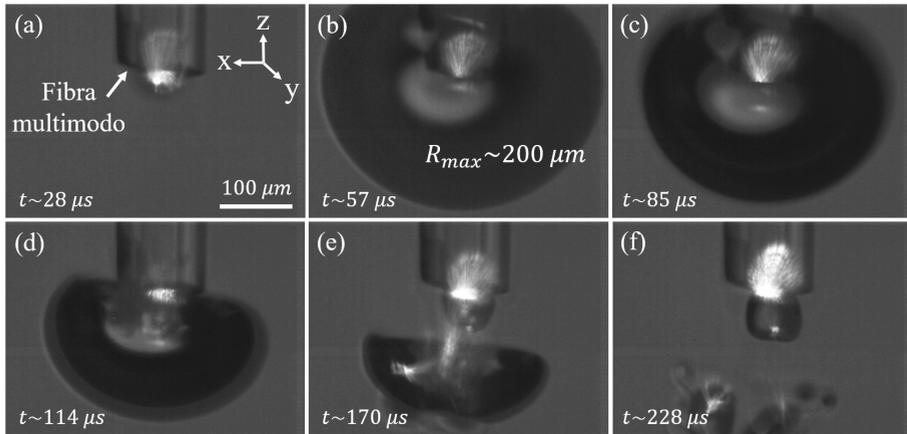


Figura 4.14: Secuencia de la generación del fenómeno de termocavitación.

Una vez que la microburbuja alcanza su R_{max} comienza la fase donde su radio se reduce hasta llevar a cabo la implosión produciendo una onda de choque, la cual se dirige en la dirección de propagación de la fuente de radiación, como se observa en la Fig. 4.14(e). Posterior a la emisión de la onda de choque se produce sobre la terminal una nueva microburbuja. La cual no lleva a cabo el proceso de implosión pero su forma esférica se ve afectada por la presencia de la onda de choque como se muestra en la Fig. 4.14(e-f).

En el siguiente capítulo se analizarán los resultados obtenidos de la generación y manipulación de microburbujas en cada uno de los arreglos ópticos descritos en este capítulo.

Capítulo 5

Discusión

En este capítulo se exponen los resultados de los análisis de las fuerzas involucradas en la generación y manipulación de microburbujas. En la sección 5.1, se presenta el análisis del proceso de nucleación y crecimiento de la microburbuja. En la sección 5.2, se presenta el análisis del gradiente de temperatura. En la sección 5.3, se desarrolla el análisis de fuerzas involucradas en la manipulación de microburbujas. En la sección 5.4 se expone el análisis de las velocidades experimentales y teóricas de la microburbuja. En la sección 5.5 se presentan las potencias ópticas para llevar a cabo la generación y manipulación de microburbujas en función de las longitudes de onda y atenuaciones.

5.1. Generación de microburbujas

Los resultados muestran que la generación de microburbujas puede ser inducida dentro de un medio acuoso a través de la incidencia de una fuente de radiación coherente. La cual al interactuar con las NPs de Ag fotodepositadas en la terminal de la fibra óptica produce dentro del medio acuoso un gradiente de temperatura. Dicho gradiente de temperatura se origina como consecuencia del alto valor de absorbancia que presentan la mayoría de los materiales metálicos; las NPs de Ag absorben la energía de los fotones de la fuente de radiación coherente y la transmiten térmicamente al medio circundante para producir la nucleación del medio acuoso [1-5].

5.2. Gradiente de Temperatura

La distribución del gradiente de temperatura dentro del medio acuso es radial. El incremento de temperatura en estado estacionario debido a una única nanopartícula de radio R en un medio homogéneo está dado por:

$$\Delta T(r) = \frac{\delta_{abs} I}{4\pi k r}, \quad (5.1)$$

para $r > R$, donde I es la intensidad del haz empleado para irradiar las NPs de Ag, δ_{abs} es la sección transversal de absorción de las NPs de Ag, k es la conductividad térmica del medio circundante [6].

Para una única nanopartícula, la temperatura más allá de su diámetro decae a razón de $1/r$, pero para un grupo de nanopartículas no uniforme en dimensiones y en distribución espacial, el decaimiento de la temperatura puede ser completamente diferente. Por ende, los cálculos y medición del perfil de temperatura son complejos de realizar a causa de las reducidas dimensiones involucradas de las escalas de tiempo y volumen. Sin embargo, se puede realizar una estimación de la distribución espacial de la temperatura a través del software COMSOL Multiphysics realizando unas razonables suposiciones. Primero, asumiendo que la película de nanopartículas fotodepositadas en la terminal de la fibra óptica presenta una distribución espacial homogénea, por lo tanto se puede asumir una distribución de temperatura uniforme para así resolver la ecuación de difusión de calor en estado estacionario en conjunto con las ecuaciones de Navier-Stokes.

La configuración empleada para llevar a cabo la simulación en COMSOL Multiphysics consta de una fibra óptica con un radio de $50 \mu m$ inmersa en una celda que contiene etanol. En la Fig. 5.1 se muestra la distribución espacial de la temperatura en 2D donde es posible observar que la distribución tiene una simetría esférica, mientras en la Fig. 5.2 se muestra el perfil de la temperatura a través de una dirección particular r . La línea continua representa el ajuste de una función con decaimiento exponencial. La función para la temperatura en la dirección radial está dada por:

$$T_r = T_0 + \Delta T \exp\left(-\frac{r}{r_D}\right), \quad (5.2)$$

donde T_0 es la temperatura ambiente, ΔT representa la diferencia de temperatura entre la terminal de la fibra óptica y la temperatura ambiente, y $r_D \approx 534 \mu m$ que representa la longitud de difusión de calor. Si bien el ajuste no es perfecto, puede ser tomado como una buena aproximación del comportamiento.

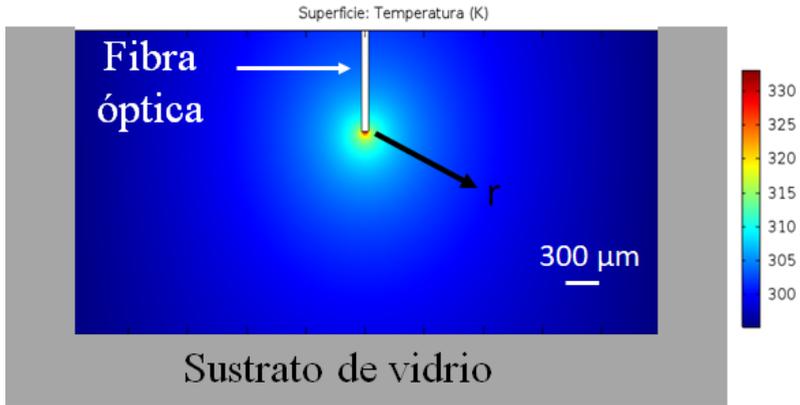


Figura 5.1: Configuración empleada para calcular la distribución espacial de la temperatura mediante el software COMSOL Multiphysics. La fibra es colocada dentro de la celda que contiene etanol.

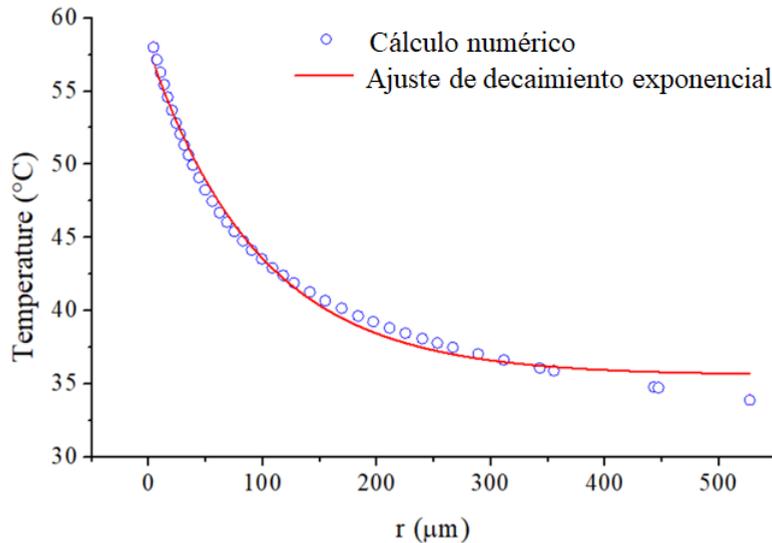


Figura 5.2: Perfil de temperatura desde la fibra hasta el fondo de la celda, en este caso r coincide con el eje z .

La temperatura alcanzada depende de la potencia del haz empleado. Para producir la nucleación del etanol, cuya temperatura de vaporización es $\sim 78^\circ\text{C}$ y con ello generar microburbujas, un umbral de 16 mW de la fuente de radiación de 1064 nm es necesario como se muestra en la Fig. 4.3, donde se aprecia claramente que la microburbuja se genera en un tiempo menor de 1.5 ms.

En la Fig. 5.3 se observa que el radio de la microburbuja depende del tiempo de exposición.

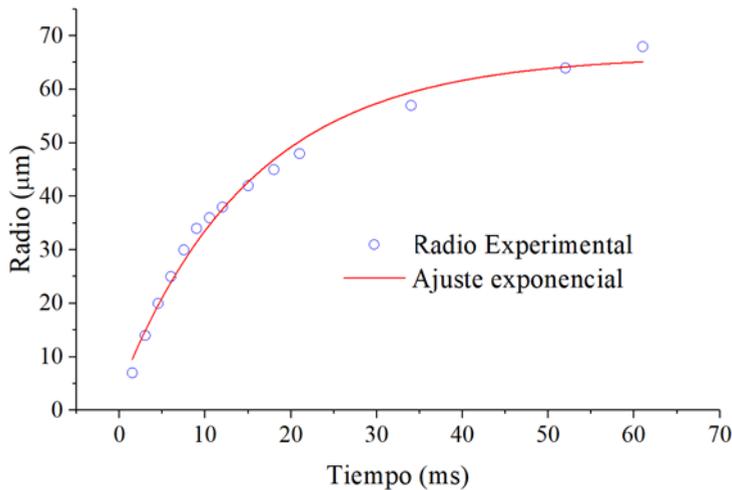


Figura 5.3: Radio de una microburbuja en función del tiempo de exposición.

La línea continua representa el ajuste exponencial que fue obtenido a través de la ecuación:

$$R_t = R_{max} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) \right], \quad (5.3)$$

donde el radio máximo de la microburbuja para esta potencia en particular es $R_{max} = 66 \mu\text{m}$. y el tiempo de formación τ_0 es de 15 ms. Por esta razón, es difícil obtener microburbujas con las mismas dimensiones bajo un control manual como en este trabajo.

5.3. Interacción de fuerzas

Los resultados experimentales muestran que es posible inducir el movimiento de una microburbuja dentro de una solución acuosa a través de un gradiente de temperatura, el cual es generado por la interacción de la fuente de radiación y las NPs de Ag fotodepositadas en el núcleo de la terminal de la fibra óptica.

A continuación se presenta el análisis de las fuerzas hidrodinámicas y térmicas involucradas en la manipulación de microburbujas de acuerdo al arreglo experimental indicados en la sección 3.3.3 y considerando los resultados experimentales obtenidos (R y U_0) en la sección 4.3.3. De acuerdo a la Ec. 2.14 se considera que el comportamiento del medio acuoso es laminar.

5.3.1. Fuerzas hidrodinámicas

Una microburbuja al estar inmersa en un medio acuoso esta sometida a la fuerza de flotabilidad \vec{F}_F , la cual está en función del radio de la microburbuja y la densidad del medio acuoso de acuerdo a la Ec. 2.17, la dirección de esta fuerza es siempre hacia arriba. El líquido en movimiento ejerce una fuerza de arrastre \vec{F}_A que está en función de la viscosidad dinámica del medio μ . La \vec{F}_A es ejercida en el mismo sentido que la fuerza de Marangoni \vec{F}_M [7-9] de acuerdo a la Ec. 2.13. La fuerza de gravedad \vec{F}_G actúa en dirección contraria a la \vec{F}_F , dado que la densidad del vapor es dos ordenes menor a la densidad del líquido, la \vec{F}_G no es tomada en cuenta para el análisis.

5.3.2. Fuerzas térmicas

La intensidad de la fuente de radiación modula la magnitud del gradiente de temperatura. Dicho gradiente produce la disminución proporcional de la tensión superficial del medio acuoso, induciendo en la interface de la microburbuja un estrés tangencial, el cual ejerce una fuerza sobre la interface de la microburbuja llamada fuerza de Marangoni \vec{F}_M [7-9]. La \vec{F}_M es la responsable de inducir el desplazamiento de la microburbuja hacia la zona donde la tensión superficial sea menor, mientras que el líquido se desplaza a la zona de mayor tensión superficial.

5.3.3. Diagrama de fuerzas

La fuerza total \vec{F}_T que experimenta una microburbuja al desplazarse en sentido $+z$ entre dos terminales de fibra óptica contrapuestas verticalmente y bajo la presencia de un gradiente de temperatura está dada por:

$$\vec{F}_T = \vec{F}_A + \vec{F}_F + \vec{F}_M \tag{5.4}$$

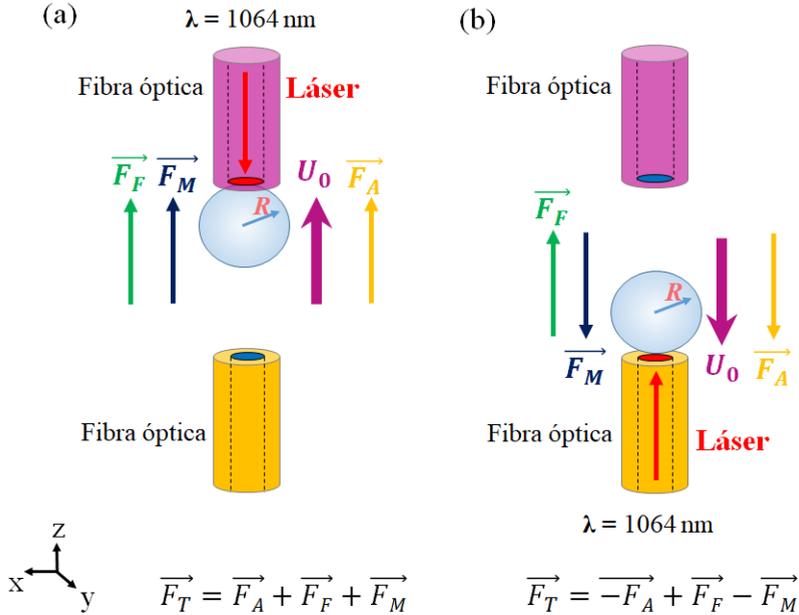


Figura 5.4: Diagrama de fuerzas sobre una microburbuja en desplazamiento.

En la Fig. 5.4(a) se muestra la dirección de las fuerzas que intervienen en el desplazamiento de una microburbuja originado por la presencia de un gradiente de temperatura en la terminal superior inducido por una fuente de radiación.

De acuerdo a la Fig. 5.4(b) la fuerza de flotabilidad \vec{F}_F se contrapone a la fuerza de arrastre \vec{F}_A y a la fuerza de Marangoni \vec{F}_M durante la conmutación de los gradientes de temperatura, originando que la Ec. 5.4 se exprese de la siguiente forma:

$$\vec{F}_T = -\vec{F}_A + \vec{F}_F - \vec{F}_M \tag{5.5}$$

En la Fig. 5.5 se muestra la \vec{F}_M y \vec{F}_T como una función de la distancia r entre la microburbuja y la fuente de calor considerando que las fibras ópticas están colocadas de acuerdo a la Fig. 5.4(b). De acuerdo a la gráfica se observa que la \vec{F}_M incrementa conforme la microburbuja se acerca a la fuente de calor, alcanzado una fuerza de 400 nN para una microburbuja de $110 \mu\text{m}$ de radio. Una vez que

la microburbuja alcanza la fuente de calor (terminal de la fibra óptica) se detiene completamente. La magnitud de \vec{F}_F es de 43 nN para el mismo radio de microburbuja.

De acuerdo con la gráfica de la Fig. 5.5, cuando la distancia r es mayor a 798 μm , la fuerza total cambia de signo debido a que la fuerza de flotabilidad y arrastre superan a la fuerza de Marangoni.

La magnitud de la fuerza de Marangoni para una microburbuja de 110 μm de radio es un orden de magnitud mayor que las fuerzas de flotabilidad y arrastre juntas, a su vez es cinco ordenes de magnitud mayor que las fuerzas ópticas en las pinzas ópticas. [10].

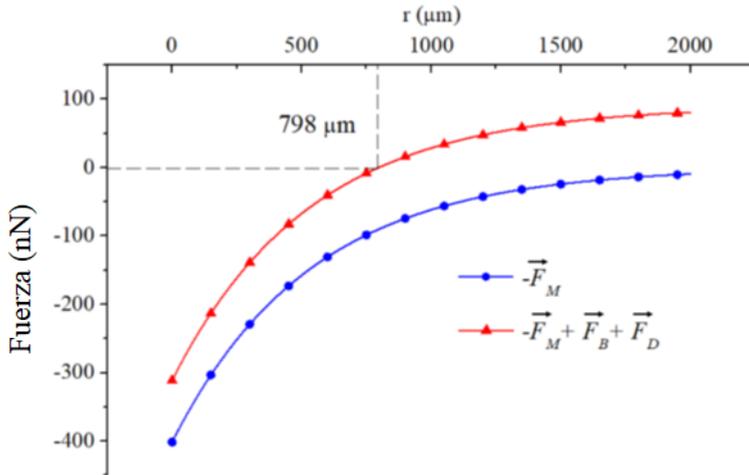


Figura 5.5: Fuerza de Marangoni sobre una microburbuja (con radio $R = 110 \mu\text{m}$, la fuente de calor está colocada a un $r = 0$) en función de la distancia r entre la fuente de calor y la microburbuja cuando la fuente de calor está colocada en la terminal de la fibra óptica inferior.

5.4. Velocidad de desplazamiento

La velocidad total de desplazamiento de una microburbuja U_0 inmersa en una solución acuosa y bajo la presencia de un gradiente de temperatura está dada por [11]:

$$U_0 = U_T + U_M, \quad (5.6)$$

donde U_T es la velocidad terminal de la microburbuja mientras que U_M es la velocidad debida a la fuerza de Marangoni. Derivando la Ec. 5.2 y sustituyendo en la Ec. 2.14 se obtiene la velocidad de Marangoni, la cual está dada por:

$$U_M = \frac{d\sigma}{dT} \frac{R}{2\mu r_D} \Delta T \exp\left(-\frac{r}{r_D}\right). \quad (5.7)$$

La velocidad terminal actúa en dirección $+z$, mientras que la velocidad debida a la fuerza de Marangoni hace lo propio en la misma dirección que el gradiente de temperatura. Por tal razón, se espera que exista una diferencia en la velocidad de la microburbuja cuando se desplaza hacia arriba o hacia abajo como se muestra en la gráfica de la Fig. 5.6

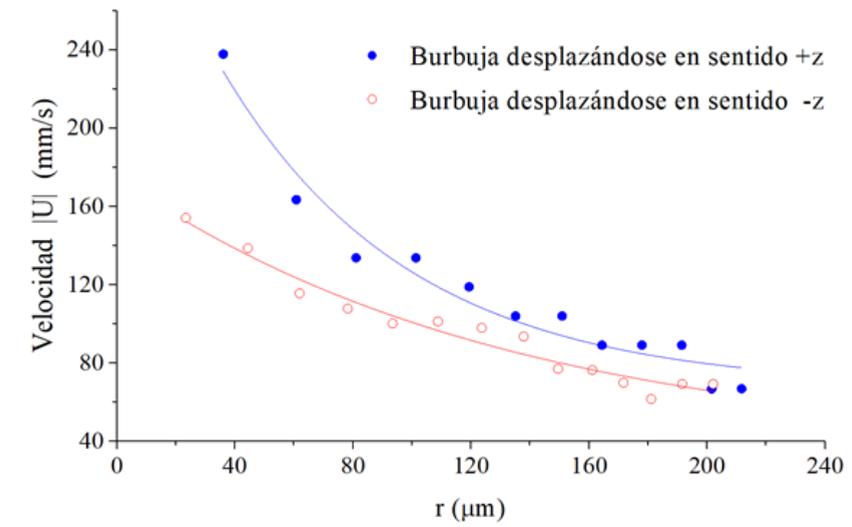


Figura 5.6: Velocidad de desplazamiento de una microburbuja en función de la distancia entre la fuente de calor y la microburbuja. Los puntos corresponden a las velocidades experimentales mientras que el ajuste está representado por las líneas continuas.

El resultado muestra que para una microburbuja de $115 \mu\text{m}$ de radio desplazándose hacia arriba a lo largo del eje z alcanzará una velocidad de 238 mm/s , mientras que desplazándose hacia abajo alcanzará una velocidad de 155 mm/s .

De acuerdo a la Ec. 5.7, conforme la microburbuja se acerca a fuente de calor aumentará exponencialmente su velocidad, lo cual concuerda en gran medida con los resultados obtenidos experimentalmente mostrados en la Fig. 5.6.

Combinando las velocidades cuando la microburbuja se desplaza hacia arriba y hacia abajo se obtiene que:

$$U_T = \frac{U^+ - U^-}{2}, \quad (5.8)$$

y

$$U_M = \frac{U^+ + U^-}{2}, \quad (5.9)$$

donde el superíndice indica la dirección de desplazamiento de la microburbuja. La velocidad terminal calculada mediante la Ec. 2.21 es de 19.65 mm/s, mientras que de los datos experimentales mostrados en la Fig. 5.7 se obtiene que la velocidad terminal es de ~ 20 mm/s, lo cual concuerda en gran medida con las predicciones teóricas.

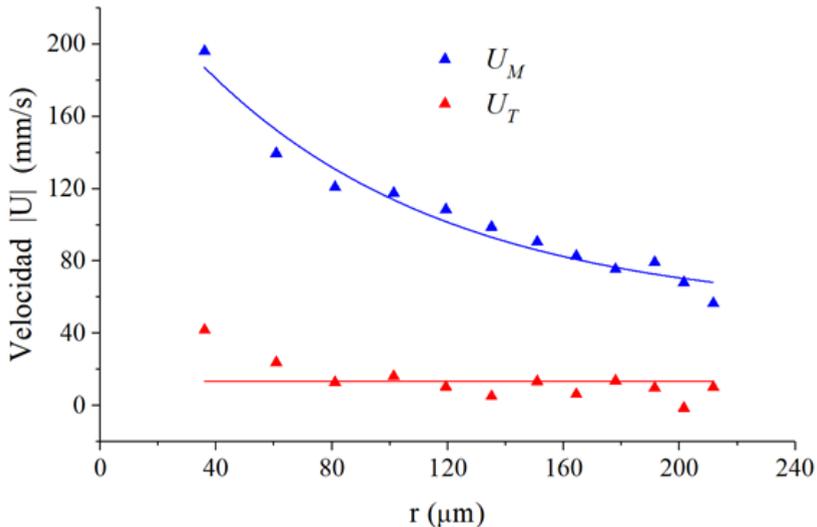


Figura 5.7: Los triángulos corresponden a la velocidad terminal y de Marangoni como resultado de la combinación de los resultados experimentales mientras las líneas continuas corresponden al ajuste de dichas velocidades.

5.5. Potencias ópticas para la generación y manipulación de microburbujas

La energía necesaria para inducir el proceso de nucleación y con ello la generación de microburbujas es mayor a la energía requerida para conducir su manipulación. En la Tabla 5.1 se presenta una comparación entre la potencia de nucleación P_N y la potencia de manipulación P_M en función de la atenuación y longitud de onda de cada fuente de radiación empleada.

Tabla 5.1: Atenuaciones en fibra óptica por fotodeposición

λ (nm)	445	980	1064	1550
a (dB)	2.8	5.5	7.0	2.9
ϕ_{nucleo} Fibra óptica (μm)	105	9	50	9
P_N (mW)	70	98	16	NR
P_M (mW)	62	88	14.5	30

donde NR indica que no se cuenta con registro debido a que por las características de la fuente de radiación de $\lambda = 1550$ nm no se logró generar una microburbuja dentro del medio acuoso.

En el siguiente capítulo se presentarán las conclusiones de este trabajo de tesis.

5.6. Referencias

- [1] G. Baffou, J. Polleux, H. Rigneault, and S. Monneret, “Super-heating and micro-bubble generation around plasmonic nanoparticles under cw illumination,” *J. Phys. Chem. C* **118**(9), 4890-4898 (2014).
- [2] R. Pimentel-Domínguez, J. Hernández-Cordero and, R. Zenit, “Microbubble generation using fiber optic tips coated with nanoparticles,” *Opt. Express* **20**(8), 8732-8740 (2012).
- [3] M. Kitz, S. Preisser, A. Wetterwald, M. Jaeger, G. N. Thalmann and, M. Frenz, “Vapor bubble generation around gold nano-particles and its application to damaging of cells,” *Biomed. Opt. Express* **2**(2), 291-304 (2011).
- [4] N. A. Ivanova and B. A. Bezuglyi, “Optical thermocapillary bubble trap,” *Tech. Phys. Lett.* **32**(10), 854-856 (2006).
- [5] O. V. Angelsky, A. Ya. Bekshaev, P. P. Maksimyak, A. P. Maksimyak, S. G. Hanson and, S. M. Kontush, “Controllable generation and manipulation of micro-bubbles in water with absorptive colloid particles by CW laser radiation,” *Opt. Express* **25**(5), 5232-5243 (2017).
- [6] E. A. Coronado, E. R. Encina, and F. D. Stefani, “Optical properties of metallic nanoparticles: manipulating light, heat and forces at the nanoscale,” *Nanoscale* **3**(10), 4042-4059 (2011).
- [7] R. S. Subramanian and R. Balasubramanian, *The motion of bubbles and drops in reduced gravity* (Cambridge University Press, 2001).
- [8] C. E. Brennen, “Translation of bubbles,” in *Cavitation and Bubble Dynamics*, ed. (Oxford University Press, New York, 1999).
- [9] A. A. Nepomnyashchy, M. G. Velarde and, P. Colinet, “Thermocapillary and solutocapillary migration of drops (and bubbles) and their spreading due to the Marangoni effect,” in *Interfacial phenomena and convection*, ed. A. Jeffrey, (Chapman and Hall/crc, 2002).
- [10] P. H. Jones, E. Stride, and N. Saffari, “Trapping and manipulation of microscopic bubbles with a scanning optical tweezer,” *Appl. Phys. Lett.* **89**(8), 081113 (2006).

[11] J. I. Ramos, "Lumped models of gas bubbles in thermal gradients," *Appl. Math. Modelling* **21**(6), 371-386 (1997).

Capítulo 6

Conclusiones

En el presente trabajo se mostró que la generación y manipulación de microburbujas en una solución no absorbente puede llevarse a cabo a través de la interacción de una fuente de radiación de baja potencia con NPs metálicas fotodepositadas sobre el núcleo de fibra óptica debido a la fuerza de Marangoni.

El proceso de nucleación de microburbujas dentro de la solución fue realizado empleando un gradiente de temperatura generado por cuatro diferentes fuentes de radiación coherente así como cuatro diversas magnitudes de atenuación de transmisión. El gradiente de temperatura fue modulado a través del control en la intensidad de la fuente de radiación, empleando ~ 16.5 mW para generar microburbujas con radios controlados en el caso de la fuente de $\lambda = 1064$ nm con $a = 7$ dB. Las simulaciones numéricas indican que el gradiente de temperatura es descrito por una función exponencial, se determinó una expresión para la velocidad de Marangoni.

Se encontró que la velocidad de la microburbuja puede ser descompuesta en dos componentes: una velocidad constante (velocidad terminal) y una de aceleración (velocidad de Marangoni), comparando los datos experimentales con los teóricos se encontró que concuerdan en gran medida.

Los estudios teóricos mostraron que microburbujas de $115 \mu\text{m}$ de radio separadas una distancia de $798 \mu\text{m}$ de la fuente de calor pueden ser manipuladas por la fuente de radiación de baja potencia. La manipulación de microburbujas se realiza conmutando la posición del gradiente de temperatura, permitiendo alcanzar velocidades de hasta 238 mm/s empleando ~ 14 mW de la fuente de radiación de $\lambda = 1064$ nm.

La propagación del gradiente de temperatura dentro de la solución permite que la manipulación de microburbujas sea independiente a la posición del gradiente de temperatura, manipulando microburbujas incluso con fibras ópticas con sus núcleos desplazados fuera de eje.

A través del arreglo de tres fibras ópticas se ha mostrado que es posible controlar y dirigir el desplazamiento (manipulación) de una microburbuja.

La generación de gradientes de temperatura mediante NPs de Ag fotodepositadas en el núcleo de fibras ópticas permite aplicar éste estudio en soluciones que no sean absorbentes y sin necesidad de emplear soluciones coloidales.

La alta absorción de las NPs de Ag en el rango visible del espectro electromagnético (~ 400 a 500 nm) permite generar termovacitación empleando baja potencia óptica de fuentes de radiación continuas (láser CW).

El uso de fibras ópticas brinda un control espacial preciso para generar gradientes de temperatura localizados; permitiendo generar y manipular microburbujas en zonas profundas y de difícil acceso, incrementando su accesibilidad debido al bajo requerimiento de equipo para su implementación.

Productos derivados del trabajo de tesis

Producción científica

- J. G. Ortega-Mendoza, J. A. Sarabia-Alonso, P. Zaca-Morán, A. Padilla-Vivanco, C. Toxqui-Quitl, I. Rivas-Camero, J. Ramirez-Ramirez and, R. Ramos-García, “Marangoni force-driven manipulation of photothermally-induced microbubbles,” en revisión por la revista Optics Express.
- J. A. Sarabia-Alonso and J. G. Ortega-Mendoza, “Manipulación de burbujas mediante el fenómeno de termocapilaridad,” en Congreso internacional de investigación UPT, Tulancingo, México (2016).
- J. A. Sarabia-Alonso and J. G. Ortega-Mendoza, “Luz láser y la manipulación de micro-objetos” Periodico Milenio, México (2017).

Estancias

- En el Laboratorio de biofotónica, en el Instituto Nacional del Astrofísica, Óptica y Electrónica INAOE, bajo la asesoría del Dr. Rubén Ramos García.
- En el Laboratorio de fisicoquímica de materiales, en la Benemérita Universidad de Puebla BUAP, bajo la asesoría del Dr. Plácido Zaca Morán.