



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE TULANCINGO

Maestría en Computación Óptica

GENERACIÓN Y MANIPULACIÓN DE MICROBURBUJAS
MEDIANTE LA ACCIÓN LÁSER.

TESIS QUE PRESENTA:

ING. FRANCISCO MISAEL MUÑOZ PÉREZ
PARA OBTENER EL TÍTULO DE MAESTRO EN CIENCIAS

DIRECTOR DE TESIS:
DR. JOSÉ GABRIEL ORTEGA MENDOZA

Tulancingo, Hidalgo, México

Diciembre de 2016

DEDICATORIAS

A mis papás y a mis hermanos que siempre han sido una fuente de apoyo constante en mi vida, por su gran ejemplo a seguir y su cariño.

A mi país que me ha otorgado un proceso de formación integral.

A mis compañeros de maestría (autodenominados “los crespos”), que a través de su amistad han contribuido en mi desarrollo profesional y personal.

Son muchas las personas que han formado parte de mi vida profesional, amigos y familiares, a los que agradezco su amistad, consejos, apoyo y compañía en los distintos momentos de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi asesor, el Dr. José Gabriel Ortega Mendoza por la confianza depositada en mí para el desarrollo de este trabajo, por sus sugerencias, motivación y amistad. Le agradezco su empeño y trabajo constante para la realización de este trabajo.

Agradezco al Dr. Alfonso Padilla Vivanco y al Dr. José Alberto Delgado Atencio por las sugerencias para enriquecer este trabajo de tesis.

Al Conacyt por el apoyo otorgado a través de la beca nacional y la beca mixta que me permitieron desarrollar este trabajo de tesis.

De forma especial agradezco al Dr. Ricardo Arias González de la Aleja, investigador del Instituto Madrileño de Estudios Avanzados Nanociencia, por su valiosa asesoría y hospitalidad durante mi estancia en el laboratorio de Nanomanipulación Óptica.

A todos ustedes mi más sincero agradecimiento.

RESUMEN

Las pinzas ópticas permiten la captura y manipulación de partículas dieléctricas, convirtiéndola en una técnica ampliamente utilizada, sin embargo para partículas metálicas pierde efectividad debido a los efectos termodinámicos generados por la absorción óptica de este tipo de partículas. Un efecto asociado a las trampas ópticas es la generación de microburbujas, en la actualidad estas se han convertido en objeto de estudio debido a la facilidad de generación y a sus posibles aplicaciones como agentes de transporte de partículas tanto dieléctricas como metálicas.

La generación de microburbujas en la punta de fibras ópticas inmersas en medios líquidos ha sido demostrada en investigaciones recientes, el mecanismo de formación es consecuencia de la absorción óptica en la punta de la fibra óptica que deriva en efectos térmicos y en consecuencia en la generación de microburbujas.

En este trabajo se presenta la generación y manipulación de microburbujas mediante la acción láser. La generación es posible a través del método de fotodeposición en fibras ópticas, que utiliza los fenómenos termodinámicos e hidrodinámicos para inmovilizar nanopartículas de plata en la cara de una fibra óptica. La radiación láser que viaja a través de la fibra óptica al interactuar con las nanopartículas de plata sufren un calentamiento producto de la absorción, dando origen a un microcalentador que permite la generación de microburbujas. La manipulación se realiza siguiendo una trayectoria suave de referencia normalizada a través de un sistema de control preciso para el transporte de microestructuras.

ABSTRACT

Optical tweezers allow the capture and manipulation of dielectric particles, turning it into a widely used technique, however metal particles to lose effectiveness due to thermodynamic effects generated by the optical absorption of such particles. An effect associated with optical traps is the generation of microbubbles, today these have become the subject of study because of the ease of generation and their possible applications as transport agents both dielectric and metal particles.

The generation of microbubbles at the tip of embedded optical fibers in liquid media has been demonstrated in recent research, the mechanism of formation is a consequence of optical absorption at the tip of the optical fiber resulting in thermal effects and consecuncia in generating microbubbles.

This paper describes the generation and manipulation of microbubbles is presented by laser action. The generation is possible through the method of photodeposition in optical fibers, using the thermodynamic and hydrodynamic phenomena to immobilize silver nanoparticles in the face of an optical fiber. The laser radiation traveling through the optical fiber interacting with silver nanoparticles undergo a heating product absorption, giving rise to a microheater that allows the generation of microbubbles. The manipulation is done following a smooth reference trajectory through a standardized system for transporting precise microstructures control.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIAS	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	8
1.3 Objetivos	8
1.3.1 Objetivo general	8
1.3.2 Objetivos específicos	8
1.4 Justificación	9
1.5 Metodología	10
1.6 Estructura del trabajo de tesis	10
Referencias	13
2 GENERACIÓN DE MICROBURBUJAS	17
2.1 Introducción	17

2.2	Marco teórico	18
2.2.1	Interacción de la luz con la materia	18
2.2.2	Absorción	19
2.2.2.1	Absorción óptica en metales	20
2.2.3	Ebullición	20
2.2.3.1	Curva de ebullición	21
2.2.3.2	Mecanismo de ebullición nucleada	24
2.2.4	Mecanismos de transferencia de calor	26
2.2.4.1	Cambio de líquido a vapor	26
2.2.4.2	Evaporación	27
2.2.4.3	Transferencia de calor	27
2.2.5	Escala en ebullición nucleada	28
2.2.5.1	Escala flujo bifásico	29
2.2.5.2	Escala de crecimiento medio de la burbuja	30
2.2.5.3	Escala local	31
2.2.6	Técnicas de generación de microburbujas	32
2.3	Métodos y materiales	32
2.3.1	Fotodeposición de nanopartículas	32
2.3.2	Generación y visualización de microburbujas	34
2.3.3	Fibra óptica	35
2.3.4	Láser	38
2.3.5	Filtro óptico	39
2.3.6	Cámara Pixelink	41
2.3.7	Objetivo de microscopio	41
2.3.7.1	Objetivo Mitutoyo 10x	41
2.3.7.2	Objetivo Newport 40x	42
2.3.8	Medidor de potencia	43
2.3.8.1	Fotodetector de silicio	44
2.3.8.2	Esfera integradora	45
2.4	Resultados y discusiones	46
2.4.1	Fotodeposición de nanopartículas en la cara de una fibra óptica	46

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	ix
2.4.2 Generación de microburbujas	49
2.5 Conclusiones	55
Referencias	57
3 MANIPULACIÓN DE MICROBURBUJAS	61
3.1 Introducción	61
3.2 Marco teórico	62
3.2.1 Convección	62
3.2.2 Mecanismo físico de la convección natural	63
3.2.3 Corrientes de Marangoni	63
3.2.4 Fuerza de Bjerknæs	64
3.2.4.1 Fuerza primaria de Bjerknæs	64
3.2.4.2 Fuerza secundaria de Bjerknæs	65
3.2.5 Cohesión y Adhesión	66
3.2.6 Presión de radiación en el régimen de rayos ópticos	66
3.2.7 Dinámica de burbujas	67
3.3 Métodos y materiales	71
3.4 Resultados y discusiones	71
3.5 Conclusiones	82
Referencias	85
4 CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	87
4.1 Conclusiones generales	87
4.2 Trabajo futuro	88

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Primera trampa óptica publicada en la literatura, (a) con un haz y (b) dos haces de luz.	2
1.2	Fuerza de dielectroforesis sobre una partícula polarizada.	3
1.3	Fuerza electroforética sobre una partícula cargada bajo la influencia de un campo uniforme.	4
1.4	Fuerza fotoforética experimentada por partículas absorbentes.	6
2.1	Mecanismos de interacción de la luz con la materia.	19
2.2	Curva de ebullición del agua a la presión de 1 atm [3].	22
2.3	Inicio de la ebullición, (a) nucleada y b) en convección natural.	23
2.4	Esquema de una burbuja de vapor de dimensiones críticas que se forma sobre la superficie de un sólido.	25
2.5	Las irregularidades en la superficie de la fuente de calor aumenta la relación $\frac{f_0}{f_1}$	26
2.6	Escala en ebullición nucleada, (a) escala flujo bifásico, (b) escala de crecimiento medio de la burbuja y (c) escala local.	29
2.7	Arreglo de la técnica de fotodeposición de nanopartículas en una fibra óptica.	33
2.8	Arreglo óptico para la generación y visualización de microburbujas.	35
2.9	Espectro de absorción del etanol, el vidrio y el agua.	35
2.10	Interacción de un rayo de luz entre dos medios de densidades ópticas diferentes, (a) reflexión y transmisión (b) diagrama de ángulo crítico y (c) reflexión total interna.	37

2.11	Propagación de un rayo de luz a través de una fibra óptica.	37
2.12	Diagrama de un láser.	39
2.13	Espectro de transmisión de filtro FSQ-550 [34].	40
2.14	Fotografía de la cámara Pixelink PL-B776 [35].	41
2.15	Fotografía del medidor de potencia 2935T – C.	43
2.16	Fotografía de la esfera integradora 819C – SF – 6.	46
2.17	Nanopartículas de plata fotodepositadas en la cara de la fibra óptica bajo diferentes condiciones, (a) 0.33 dB, (b) 1.19 dB, (c) 2.2 dB y (d) 6.7 dB.	48
2.18	Evolución de una microburbuja a través del tiempo generada con una fibra óptica con nanopartículas de plata inmovilizadas mediante el método de fotodeposición que provocan una disminución de potencia de 6 dB.	50
2.19	Evolución de una microburbuja a través del tiempo generada con una fibra óptica con nanopartículas de plata inmovilizadas mediante el método de fotodeposición que provocan una disminución de potencia de 2.2 dB.	51
2.20	Evolución de una microburbuja a través del tiempo generada con una fibra óptica con nanopartículas de plata inmovilizadas mediante el método de fotodeposición que provocan una disminución de potencia de 0.45 dB.	52
2.21	Generación de microburbujas en un extremo de un microchorro.	54
3.1	Traza de rayos, descripción cualitativa de la fuerza de gradiente y la fuerza de esparcimiento. La primera debido a la refracción y la segunda a la reflexión de la luz sobre la burbuja.	67
3.2	Diagrama de fuerzas de una burbuja sobre un líquido y bajo la influencia de una onda ultrasónica. \vec{F}_{Bjrk} es la fuerza de Bjerknes, \vec{F}_D es la fuerza de arrastre (F. Stoke), \vec{F}_{Buo} es la fuerza de flotabilidad y \vec{F}_M es la fuerza de Marangoni.	70
3.3	Arreglo óptico para visualización y manipulación de microburbujas.	72
3.4	Tipos de manipulación de microburbuja, (a) unida a la cara de una fibra óptica y (b) unida a un microchorro de vapor.	73

3.5	Atrapamiento de microburbuja a través de un microchorro de vapor. . .	73
3.6	Manipulación tridimensional de residuo contaminante a través de una microburbuja.	75
3.7	Atrapamiento de microburbuja arreglo de fibra óptica horizontal. . . .	76
3.8	Atrapamiento de microburbuja arreglo de fibra óptica vertical.	77
3.9	Fotografía que muestra la cara de una fibra óptica con nanopartículas de plata inmovilizadas a través del método de fotodeposición y se observa la generación de puntos de nucleación.	77
3.10	Simulación de las fuerzas ópticas sobre una microburbuja.	79
3.11	Fotografía que ilustra el desplazamiento de una microburbuja inmersa en etanol hasta su desprendimiento de la cara de la fibra óptica, (a) 3.61 s y (b) 3.67 s.	79
3.12	Fuerza de flotabilidad para distintos radios de microburbujas.	80
3.13	Visualización mediante la pantalla de un osciloscopio, (a) onda sónica (a) y (b) ultrasónica.	81
3.14	Múltiples burbujas al final de un microchorro de vapor.	82

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe el desarrollo del atrapamiento óptico, así como los primeros reportes de la generación de microburbujas. Se presenta el desarrollo de investigaciones en la generación de microburbujas y como estas han tomado relevancia por las múltiples aplicaciones posibles. Además se menciona el objetivo principal de este trabajo de tesis, los objetivos específicos, la metodología utilizada y el motivo para abordar este tema de investigación el cual está enfocado en la generación y manipulación de microburbujas mediante la acción láser.

1.1 Antecedentes

En 1970, Arthur Ashkin investigador de los laboratorios Bell, se encontraba interesado en la presión de radiación que podría ejercer un haz láser. En sus experimentos, Ashkin utilizó un láser He-Ne y micropartículas de látex con geometría esférica. El enfocaba un haz a través de una lente hacia las partículas suspendidas en agua y observó que éstas eran empujadas hasta la pared del recipiente que las contenía como se muestra en la figura 1.1(a) [1]. Ante este hallazgo dispuso a colocar otro haz en sentido opuesto, de tal manera que equilibrara la presión de radiación del primero. El resultado fue el atrapamiento de una partícula entre los dos haces, figura 1.1(b). De esta forma se dio origen al primer atrapamiento óptico en la historia. Durante el análisis de este fenómeno, Ashkin observó que las partículas no solo son empujadas por la presión de

radiación, sino que además son atraídas hacia la parte más intensa del haz. Por lo que procedió al análisis de trazo de rayos, y en 1986, realizó con éxito atrapamiento con un solo haz de luz, enfocando con una lente el haz sobre una región muy pequeña, donde las partículas fueron atraídas y atrapadas [2].

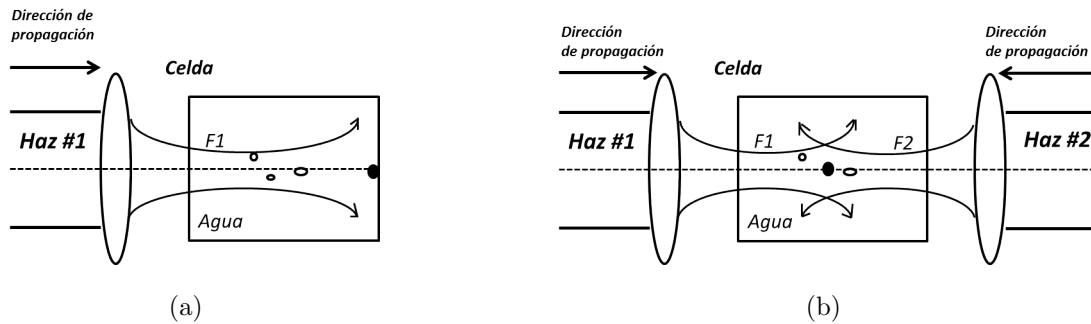


Figura 1.1: Primera trampa óptica publicada en la literatura, (a) con un haz y (b) dos haces de luz.

Han pasado más de 40 años desde que se inventó la primera trampa óptica a la que Arthur Ashkin denominó pinzas ópticas [1]. Una pinza óptica es un arreglo que emplea un haz de luz láser que viaja a través de un objetivo de microscopio de alta apertura numérica para conseguir un haz altamente enfocado el cual proporciona fuerzas de empuje y restauradoras del orden de pico newtons, suficientes para el atrapamiento y manipulación de microobjetos. Esta técnica de manipulación se ha convertido en una herramienta ampliamente utilizada en distintos campos de la ciencia como lo es biotecnología, biología molecular, medicina reproductiva, biología celular, entre otras, y sus aplicaciones cada vez son mayores, entre las que destacan la separación de partículas y el estudio de motores moleculares [3]. Esta herramienta de manipulación de partículas de tamaños nanométricos y/o micrométricos tienen gran trascendencia y ha proporcionado el desarrollo de nuevas áreas de investigación que traen grandes beneficios a la sociedad [2]. Sin embargo cabe mencionar que sus aplicaciones son exclusivas de partículas u objetos con características dieléctricas, es decir, que presentan poca o nula absorción de la luz y así poder disminuir o evitar los efectos termodinámicos e hidrodinámicos provocados por las partículas metálicas. En contraste con la técnica de pinzas ópticas existen también, otras técnicas de manipulación de partículas que se han

desarrollado, llamadas captura electrocinética, fotorrefractiva y fotoforesis. [4]. Las técnicas de manipulación de partículas que emplean fuerzas electrocinéticas son las más comunes en la manipulación de biopartículas. Las fuerzas presentes en esta técnica actúan sobre diferentes partículas dieléctricas o metálicas bajo la acción de un campo eléctrico. Este tipo de captura se realiza mediante dos mecanismos: dielectroforesis y electroforesis. La dielectroforesis se define como el movimiento de partículas polarizadas por la acción del gradiente de campo eléctrico no uniforme debido al desbalance en las fuerzas electrostáticas [5]. La técnica consiste en aplicar un campo eléctrico a una partícula suspendida en un medio, originando que ambos se polarizen, debido a que el campo eléctrico es no uniforme las fuerza son diferentes a cada lado, produciendo un desplazamiento en la partícula [6]. La dielectroforesis depende del tamaño y forma de las partículas, en la conductividad y permitividades de la partícula, el medio de suspensión, en la magnitud y el gradiente de campo eléctrico aplicado (ver figura 1.2).

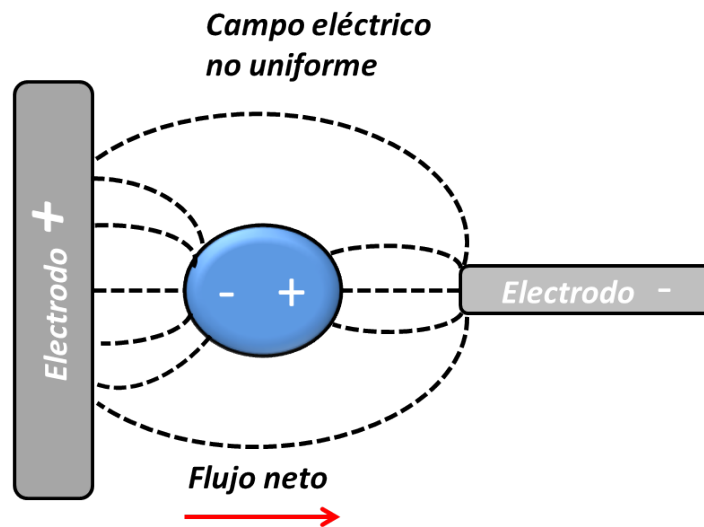


Figura 1.2: Fuerza de dielectroforesis sobre una partícula polarizada.

La electroforesis describe el movimiento de partículas con carga eléctrica superficial, en relación con la solución que lo rodea, bajo la influencia de un campo eléctrico uniforme. Cuando una partícula cargada eléctricamente se le aplica un campo eléctrico esta experimenta una fuerza denominada de Coulomb [7], produciéndose un desplazamiento debido a la atracción que experimenta la partícula a la carga opuesta a ella (ver figura

1.3). La captura electrocinética requiere de un suministro de voltaje externo para poder generar un campo eléctrico y capturar partículas por electroforesis o dielectroforesis [8].

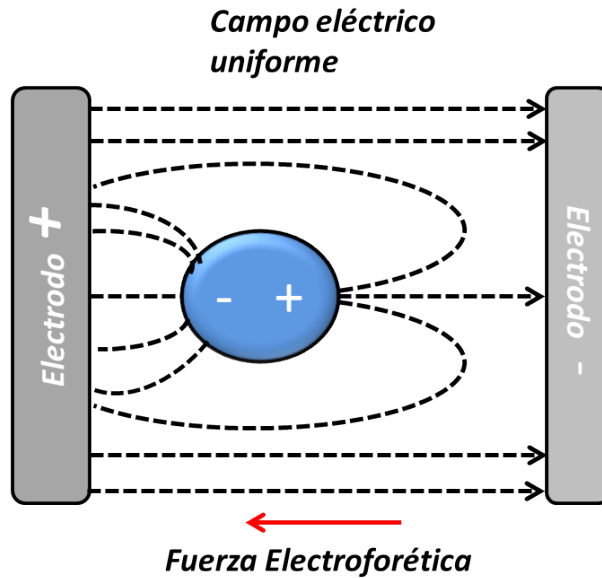


Figura 1.3: Fuerza electroforética sobre una partícula cargada bajo la influencia de un campo uniforme.

En los últimos años con el estudio de nuevos materiales fotorrefractivos, se ha desarrollado una alternativa en la manipulación de partículas metálicas, denominada pinzas fotorrefractivas. Esta técnica utiliza las características fotovoltaicas de algunos materiales para la generación de campos eléctricos. Las pinzas fotorrefractivas consisten en hacer incidir un gradiente de intensidad de potencia óptica sobre un material fotorrefractivo, este por consecuencia genera un campo eléctrico de carga espacial que permite el atrapamiento de partículas metálicas [9]. Esta técnica presenta gran versatilidad, ya que permite confinamiento múltiple o el atrapamiento individual de partículas metálicas, su arreglo experimental es sencillo y no requiere de potencias ópticas elevadas. Así es posible generar una trampa basada en fenómenos electro-ópticos [10, 11].

A lo largo de la última década se ha llevado a cabo un gran avance en el estudio de una alternativa para la manipulación óptica dando origen a una nueva técnica denominada

fotoforesis, como se observa en la figura 1.4, esta puede entenderse de una manera sencilla. Cuando la luz incide sobre la partícula metálica, ésta absorbe la energía de la luz, se calienta de manera no uniforme y el calor se propaga por su superficie. La región del gas o líquido del medio (típicamente aire o agua respectivamente) en contacto con la parte más caliente de la partícula comienza a calentarse debido a la transferencia de calor y, por tanto, aumenta la energía cinética de las partículas del gas. Como consecuencia, las moléculas empiezan a intercambiar más momento lineal con la partículas, recibiendo más golpes y de mayor magnitud que las moléculas del gas situadas alrededor de las zonas más frías de la partícula. Ya que normalmente la luz incidirá sobre la partícula sólo por una cara, el resultado global de estos golpes será un movimiento neto de la partícula alejándose de la fuente de luz [12]. Ahora imaginemos que conseguimos iluminar la partícula de forma simétrica, es decir, que reciba la misma cantidad de luz por todos lados. Entonces, la partícula recibirá también el mismo impulso por todos lados y quedará estable en su posición. De este modo, se habrá atrapado la partícula absorbente [12]. Un fenómeno derivado del atrapamiento de partículas absorbentes suspendidas en medios acuosos es la generación de burbujas debido al calentamiento altamente localizado de las partículas, cuyos diámetros pueden ir desde nanómetros hasta algunas micras. La utilización de burbujas ha tomado gran relevancia en los últimos años, debido a sus características físicas y a su presencia en procesos térmicos. Su presencia se puede observar tanto en el hogar como en el laboratorio, al hervir agua o en técnicas de atrapamiento de partículas.

El estudio de la formación de burbujas tiene sus inicios a finales del siglo XX. A continuación se mencionan algunos trabajos más recientes en la generación de microburbujas.

Uno de los primeros trabajos registrados es el de los investigadores G. Paltauf, M. Frenz y H. Schmidt-Kloiber [13], su trabajo consistió en la formación de microburbujas en la punta de una fibra óptica utilizando un láser pulsado con pulsos de periodo igual a 6 ns. Este trabajo dio origen a nuevas herramientas en la realización de cirugías [14].

En el año 2000, D. W. Berry, N. R. Heckenberg y H. Rubinsztein-Dunlop [15] al estar

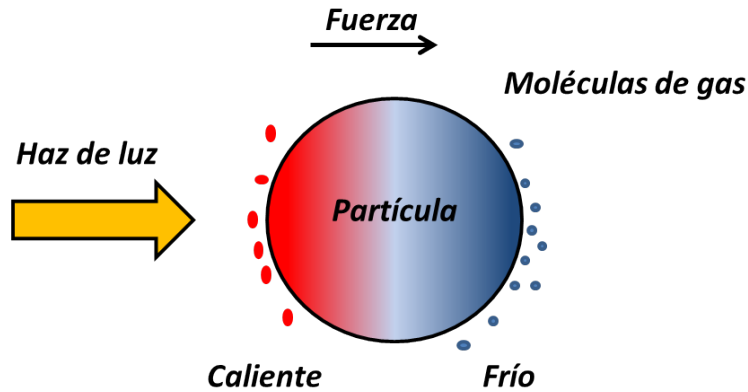


Figura 1.4: Fuerza fotoforética experimentada por partículas absorbentes.

trabajando en el atrapamiento de micropartículas altamente absorbentes observaron la formación de microburbujas en la trampa óptica convencional. Este trabajo reporta la presencia de corrientes convectivas debidas al fenómenos de convección de Marangoni, teniendo efectos significativos sobre las microburbujas y descartando los efectos de convección natural como predominantes. Los autores observan la atracción de microburbujas a regiones de alta temperatura, originando fuerzas de mayor magnitud que las fuerzas ópticas.

Posteriormente en 2004 R. S. Taylor y C. Hnatovsky [16] observaron la generación de microburbujas como actuadores controlables para manipular biopartículas. Los autores reportaron que la formación de microburbujas era consecuencia del sobrecalentamiento altamente localizado y a un fenómeno de ebullición espontánea del fluido en la cara de la fibra óptica. Las burbujas son formadas en agua, así como otros líquidos, esta sonda permitió el atrapamiento, mezcla y manipulación de esferas de vidrio, latex, partículas fluorescentes y material biológico de tamaño micrométrico.

Seis años despues Hema Ramachandran et al. reportan la generación de microburbujas en la punta de una fibra óptica con aplicación en entornos biomédicos, en el transporte y dispersión de nanotubos de carbono tóxicos en ambientes biológicamente relevantes [17]. A través de la modificación de un arreglo de pinzas ópticas realizan la

formación de microburbujas en sangre humana. Los efectos térmicos ocasionados por la trampa óptica permiten la atracción de la burbuja al punto focal de la trampa, así como los nanotubos de carbón son atrapados por la trampa óptica adhiriéndose a la microburbuja. Las microburbujas con los nanotubos de carbón pueden ser manipuladas a lo largo del fluido para después ser explotadas para depositar los nanotubos de carbón en una ubicación específica.

En 2007 J.W. Nicholson et al. reportan la deposición de nanotubos de carbón en la cara de fibras ópticas por las que viaja radiación láser, debido al fenómeno de termoforesis causado por la absorción óptica de los nanotubos y la transferencia de dicho calor al medio circundante. Demostrando que la técnica de fotodeposición es bastante sencilla y que utiliza pocos recursos para la integración de partículas de alta absorción óptica [18].

Tres años después J.C. Ramirez-San Juan et al. presentan sus resultados de termocavitación utilizando un láser infrarrojo CW de media potencia en una solución salina de nitrato de cobre. La solución es sobrecalentada resultando una transición de fase explosiva, permitiendo la implosión de burbujas generadas por la ebullición del agua [19].

En el año 2011 V. I. Yusupov estudia los efectos hidrodinámicos biológicamente inducidos por la radiación láser de potencia media en aplicaciones biomédicas, la generación de burbujas en la punta de una fibra óptica, degradación de la punta y generación de ondas acústicas intensas [20]. El trabajo aborda la utilización de fibras ópticas en tratamientos endoscópicos y procesos médicos hidrodinámicos eficaces realizados en biotejidos saturados de agua. Estos procesos ocasionan una respuesta celular y efectos regenerativos en los tejidos.

Trabajos posteriores han demostrado que la técnica de fotodeposición permite la deposición de diferentes tipos de nanopartículas metálicas y que la saturación de estas en la punta de la fibra óptica representa una característica importante para la generación de burbujas [21].

1.2 Planteamiento del problema

Las investigaciones en atrapamiento óptico son bastas, se han desarrollado técnicas que utilizan el fenómeno de fuerzas ópticas para realizar atrapamiento y manipulación de objetos micro y nanométricos, demostrando tener un alto grado de eficiencia en la captura de partículas dieléctricas, pero careciendo de efectividad para partículas metálicas, ya que estas partículas presentan un fenómeno de absorción de fotones incidentes originando un calentamiento significativo. La partícula caliente provoca que se libere parte de esa energía absorbida al medio que la rodea, creando corrientes de convección que provoca una desestabilización de la trampa óptica, así como aumenta la energía cinética y los efectos térmicos en el fluido. Debido a la liberación térmica de la energía absorbida por la partícula, se genera un gradiente de temperatura que a su vez ocasiona una fuerza de mayor magnitud en comparación con las fuerzas ópticas, denominada fuerza termoforética. Como consecuencia de estos efectos de calentamiento se observa la generación de burbujas sobre aglomeraciones de partículas metálicas inmersos en un fluido. El presente trabajo de tesis aborda la generación de microburbujas sobre la punta de una fibra óptica la cual contiene nanopartículas metálicas y su posterior manipulación siguiendo una trayectoria suave de referencia normalizada a través de un sistema de control preciso.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Generación y manipulación de microburbujas generadas mediante la acción láser.

1.3.2 Objetivos específicos

- Llevar a cabo la revisión bibliográfica de la manipulación de micropartículas dieléctricas y metálicas, así como de microburbujas.
- Fotodeposición de nanopartículas metálicas en la punta de la fibra óptica.

- Generación y manipulación de microburbujas mediante la acción láser a través de una fibra óptica.

1.4 Justificación

En últimos años, los resultados de las investigaciones en atrapamiento y manipulación óptica han hecho contribuciones muy importantes en diferentes campos de la ciencia, tales como la física, biofísica, química y ciencias biológicas; ya que se utilizan para manipular y separar partículas, átomos, moléculas y células vivas [3]. Los métodos de atrapamiento óptico presentan un alto grado de eficiencia en partículas dieléctricas, sin embargo es conocido que en partículas metálicas su eficiencia disminuye debido a su alto coeficiente de absorción. Los efectos asociados a la absorción óptica de las partículas metálicas son la generación de microburbujas, efectos de transporte de calor en el fluido en el que están inmersas y aumento de energía cinética de las partículas [18]. Debido a la formación de un gradiente de temperatura las partículas experimentan una fuerza denominada fuerza termoforética. Estos fenómenos provocan una desestabilización de las trampas ópticas. El fenómeno de generación de microburbujas en trampas ópticas ha sido reportado desde la invención de las pinzas ópticas como un efecto del proceso de atrapamiento, pero es hasta inicios del siglo XXI que este fenómeno toma mayor relevancia en la literatura. Debido a la facilidad del proceso de generación de microburbujas estas representan un potencial agente de captura y transporte de estructuras adheridas o confinadas en estas. El presente trabajo de tesis propone la utilización de un sistema optomecatrónico para generación y manipulación de microburbujas. Siendo posible a través de fibras ópticas con nanopartículas de plata inmovilizadas en su punta a través del método de fotodeposición.

1.5 Metodología

El presente trabajo busca plantear un nuevo método para la manipulación de microburbujas basado en trampas ópticas, fenómenos convectivos y de ebullición nucleada. Para la generación de microburbujas se utiliza un método de fotodeposición de nanopartículas de plata que actuarán como agentes calefactores. Se procederá a estudiar y analizar las características de las trampas ópticas tradicionales y las características de las microburbujas que permitan llevar a cabo su atrapamiento y posteriormente su manipulación. Se desarrollará un conjunto de estrategias de control para generar y manipular adecuadamente microburbujas utilizando luz láser. El modelo de control tendrá como variables, la posición de la microburbuja y una segunda variable la posición de la fibra óptica. Se realizará el diseño y construcción de un arreglo optomecatrónico que contara con un sistema de control tridimensional para la fibra óptica que permitirá la manipulación de la microburbuja previamente atrapada para que esta siga una trayectoria suave de referencia normalizada de una forma precisa. El sistema contará con una interfaz de usuario para su manipulación.

1.6 Estructura del trabajo de tesis

Este trabajo de tesis esta organizado de la siguiente manera:

En el capítulo 1 se realiza una revisión de los antecedentes relacionados con la generación de microburbujas empleando fibra óptica y trampas ópticas, así como los objetivos y metodología empleada en la generación y manipulación.

En el capítulo 2 se presentan los fundamentos y modelos teóricos para la generación de microburbujas. Se realiza una descripción de los fenómenos implícitos en la generación microburbujas y su manipulación.

En el capítulo 3 se presenta una descripción de las pruebas experimentales realizadas para la manipulación de microburbujas, se detallan los arreglos experimentales empleados, así como los procedimientos utilizados.

Finalmente, en el capítulo 4 se presentan las conclusiones generales y el trabajo a futuro, además se en listan las referencias bibliográficas empleadas.

Referencias

- [1] A. Ashkin, “Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers”, Word Scientific, 2006.
- [2] A. Ashkin, J. M. Dziedzic, J. E. Bjorkholm, C. Steven, “Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles”, Optics Letters, Vol. 11, 288-290, 1986.
- [3] J. R. Arias-González, “Manipulación láser de células, orgánulos y biomoléculas”, Temas de Física, REF, Vol. 24-4, 48-52, 2010.
- [4] T. B. Jones, “Electromechanics of particles”, Cambridge University, 1995.
- [5] R. C. Gallo Villanueva y B. H. Lapizco Encinas, “Dielectroforesis para sistemas micro-escala”, Ciencia ergo-sum, Vol. 20-3, 227-230, 2014.
- [6] H.A. Pohl, “Dielectrophoresis”, Cambridge University Press, 1978.
- [7] D.J. Griffiths, “ Introduction to Electrodynamics”, Upper Saddle RIVER, Prentice Hall, 1999.
- [8] X. Zhang, J. Wang, B. Tang, X, Tan, R. Rupp, L. Pan, Y. Kong, Q. Sun y J, Xu, “Optical trapping and manipulation of metallic micro/nanoparticles via photorefractive crystals”, Optics Express, Vol. 17-12, 9981-9988, 2009.
- [9] H. A. Eggert, F. Y. Kuhnert, K. Buse, J. R. Adleman, and D. Psaltis, “Trapping of dielectric particles with lightinduced space-charge fields”, Appl. Phys. Lett., Vol. 90-24, 241909, 2007.

- [10] B. E. A. Saleh, “Fundamentals of Photonics”, Wiley, 2007.
- [11] L. Solymar, D. J. Webb, A. Grunnet, “The Physics and Applications of Photorefractive Materials”, Clarendon Press, 1996.
- [12] A. Turpin, J. Mopart, “Una cámara acorazada óptica”, Investigación y Ciencia, Edición Española de Scientific American, Número 463.
- [13] G. Paltauf, M. Frenz, H. Schmidt-Kloiber, “Laser-induced micro bubble formation at a fiber tip in absorbing media: Experiments and theory”, ISPIE, Vol. 2624-72, 1996.
- [14] P. Zaca-Morán, C. F. Pastelín, C. Morán, G. F. Pérez- Sanchez y F. Chávez, “Microcautery based on zinc metallic nanoparticles photodeposited on the core of an optical fiber”, Applied Surface Science, Vol. 392, 492-497, 2016
- [15] D. W. Berry, N. R. Heckenberg y H. Rubinsztein-Dunlop, “Effects associated with bubble formation in optical trapping”, Journal of Modern Optics, Vol. 47-9, 1575-1585, 2000.
- [16] R. S. Taylor y C. Hnatovsky, “Trapping and mixing of particles in water using a microbubble attached to an NSOM fiber probe”, Optics Express, Vol. 12-5, 916-928, 2004.
- [17] H. Ramachandran, A. K. Dharmadhikari, K. Bambardekar, H. Basu , J. A. Dharmadhikari, S. Sharma y D. Mathur, “Optical-tweezer-induced microbubbles as scavengers of carbon nanotubes”, Nanotechnology, Vol. 21-24, 1-9, 2010.
- [18] J.W. Nicholson, R.S. Windeler y D.J. DiGiovanni, “Optically driven deposition of single-walled carbon-nanotube saturable absorbers on optical fiber end-faces”, Optics Express, Vol. 15, 9176, 2007.
- [19] J.C. Ramirez-San-Juan, “Time-resolved analysis of cavitation induced by CW lasers in absorbing liquids”, Optics Express, Vol.18-9, 8735-9742, 2010.

- [20] V. I. Yusupov, V. M. Chudnovskii, y V. N. Bagratashvili, “Laser Induced Hydrodynamics in Water Saturated Biotissues. 1. Generation of Bubbles in Liquid”, *Laser Physics*, Vol. 20-7, 1641-1646, 2011.
- [21] R. Pimentel-Domínguez, J. Hernández-Cordero y R. Zenit, “Microbubble generation using fiber optic tips coated with nanoparticles”, *Optics Express*, Vol. 20-8, 8732-8740, 2012.
- [22] W. B. Zimmerman, V. Tesar, S. Butler, H. C. H. Bandulasena. “Microbubble Generation. Recent patents on Engineering”, Vol. 2-1, 1-8, 2008.
- [23] V. I. Yusupov, V. M. Chudnovskii, y V. N. Bagratashvili, “Laser-Induced Hydrodynamics in Water and Biotissues Nearby Optical Fiber Tip”, *Hydrodynamics-Advanced Topics*, Ed. INTECH, 95-118, 2011.

CAPÍTULO 2

GENERACIÓN DE MICROBURBUJAS

En este capítulo se describe la metodología llevada a cabo para la realización de las pruebas experimentales. Además se presentan los arreglos experimentales utilizados para la generación de microburbujas usando luz láser, así como las características de la inmovilización de nanopartículas metálicas en fibras ópticas a través del método de fotodeposición y los detalles de la generación de microburbujas.

2.1 Introducción

Las burbujas están presentes en diferentes procesos físicos como la ebullición o el atrapamiento óptico [1]. Sin embargo las burbujas de escala micrométrica han tomado relevancia en investigaciones científicas y en la industria debido a sus propiedades que difieren de las burbujas de tamaño macrométrico [2]. El uso de microburbujas y de sus efectos hidrodinámicos han ido creciendo en la industria y en diversos campos de la ciencia, la medicina ha creado procedimientos con microburbujas en tejidos saturados de agua [4]. La facilidad y los pocos recursos necesarios para su creación las convierte en un posible método de atrapamiento de partículas. En la actualidad existen distintos trabajos que hacen referencia al uso de burbujas como agentes de captura de partículas, hasta transporte de microorganismos [3]. En diversos trabajos de investigación, se ha

demostrado que usando luz láser se puede conducir a la formación de burbujas y su implosión resultando fuertes ondas de choque con presiones muy grandes las cuales pueden causar daño de la superficie y su consecuente degradación [5].

2.2 Marco teórico

En esta sección se describen los conceptos fundamentales de absorción óptica en metales. Se introducen los términos de ebullición, curva de ebullición, así como la ebullición nucleada y los mecanismos de transferencia de calor. Finalmente, se describen las características para la escala de ebullición nucleada y las técnicas de generación de microburbujas.

2.2.1 Interacción de la luz con la materia

La luz al interactuar con la materia experimenta diferentes fenómenos, los más importantes son la reflexión, refracción, absorción y esparcimiento (ver figura 2.2.1). Primero abordaremos el fenómeno de reflexión, cuando un haz de luz incide sobre la frontera entre dos medios, este se refleja con el mismo ángulo con que es incidido. Se puede clasificar la reflexión en dos tipos: especular y difusa. La primera ocurre al incidir un haz de luz sobre una superficie lisa que no presenta un relieve comparable a la longitud de onda del haz de luz. Los rayos son reflejados con el mismo ángulo con que son incididos hacia una misma dirección. La reflexión difusa se da sobre una superficie rugosa cuando la luz incide sobre ella, reflejándose en distintas direcciones, con diferentes ángulos

Otro fenómeno importante es la refracción, la cual ocurre en respuesta a las densidades ópticas contrastantes de los medios cuando la luz pasa de un medio a otro, provocando que las ondas cambien de dirección y velocidad. Esta desviación en la dirección de propagación se explica por medio de la ley de Snell.

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t, \quad (2.1)$$

donde n_i y n_t son los índices de refracción del primer medio y del segundo medio, respectivamente, y θ_i y θ_t son sus correspondientes ángulos de incidencia y refracción.

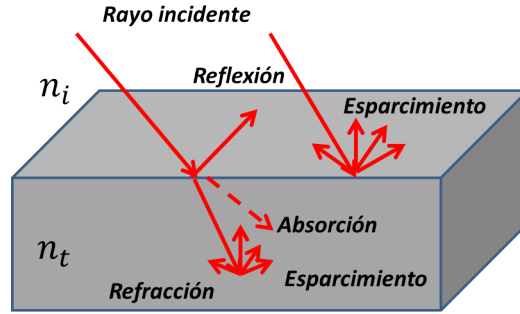


Figura 2.1: Mecanismos de interacción de la luz con la materia.

El índice de refracción (n), está definido por la velocidad de la luz en el vacío (c) y su velocidad en otro medio material (v) como se expresa a continuación:

$$n = \frac{c}{v}. \quad (2.2)$$

El esparcimiento de la luz es otro fenómeno originado por la interacción de la luz con la materia. Imaginemos que cada molécula de un gas se comporta como un pequeño oscilador haciendo que la nube de electrones vibre en su estado fundamental por un fotón, este es absorbido para después emitir otro fotón de la misma longitud de onda. Debido a que las moléculas se encuentran orientadas al azar, los fotones serán esparcidos en todas direcciones

La absorción se abordará con mayor detalle en este trabajo de tesis debido a su importancia, al ser el principal fenómeno en la generación de microburbujas.

2.2.2 Absorción

En la actualidad el término de absorción es utilizado para referirse a la captura de energía sin importar la transformación que esta sufra. La interacción de la luz con la materia ocurre de dos maneras dependiendo de la frecuencia de la luz incidente o de la energía del fotón ($\varepsilon = h\nu$). La primera, el átomo esparcirá la luz, dándole otra dirección sin alterarla. La segunda, si la energía del fotón equivale a la de los estados excitados, el átomo absorberá la luz realizando un salto cuántico hasta el nivel más alto de energía. Esta energía excitadora es transferida por colisiones, movimiento atómico

y/o energía térmica. El proceso de capturar un fotón y su conversión en energía térmica se denomina absorción disipativa [6].

2.2.2.1 Absorción óptica en metales

Típicamente los medios conductores también son los medios con mayor absorción óptica [8]. La principal característica de estos medios es el número de cargas eléctricas libres que son capaces de circular por todas partes dentro del material constituyendo una corriente. Si consideramos un medio conductor perfecto, su conductividad sería infinita y por lo tanto los electrones impulsados a oscilar por una onda armónica solo seguirán las alteraciones del campo, es decir la luz incidente no es absorbida, simplemente remitida por los electrones convertidos en osciladores. Sin embargo para metales reales sus electrones sufren colisiones entre sí y con una red cristalina agitada térmicamente o con imperfecciones convirtiendo la energía electromagnética en calor y únicamente reemite una parte de la luz. Como consecuencia del fenómeno de absorción la amplitud de la onda incidente se atenúa, indicando que el medio tiene un índice de refracción complejo, dado por la siguiente expresión:

$$\tilde{n} = n_r + ik, \quad (2.3)$$

donde la parte real del índice de refracción n indica la velocidad de fase, mientras que la parte imaginaria k indica la absorción cuando la onda electromagnética se propaga a través del material.

2.2.3 Ebullición

La ebullición es un proceso de cambio de fase de líquido a vapor, aunque presenta cierta similitud con la evaporación, existen algunas características que las diferencian. La evaporación ocurre en la interfase vapor-líquido, cuando la presión de vapor es menor que la de saturación del líquido a una temperatura dada. Cabe mencionar que la evaporación no presenta formación de burbujas.

La ebullición se presenta en la interfase sólido-líquido cuando un líquido se pone en contacto con una superficie mantenida a una temperatura superficial T_s mayor a la

temperatura de saturación T_{sat} de ese líquido. El proceso de ebullición se caracteriza por la rápida formación de burbujas de vapor en la interfase sólido-líquido que se separan de la superficie cuando alcanzan cierto tamaño y presentan la tendencia de elevarse hacia la superficie libre del líquido. El flujo de calor en la ebullición, de una superficie sólida hacia el fluido, se expresa con base en la ley de Newton del enfriamiento como:

$$q_{ebullicion} = h(T_s - T_{sat}) = h\Delta T_{exceso}(W/m^2), \quad (2.4)$$

donde $\Delta T_{exceso} = T_s - T_{sat}$ se llama temperatura en exceso, la cual representa el exceso de la temperatura superficial por encima de la de saturación del fluido, h calor latente de vaporización [3].

2.2.3.1 Curva de ebullición

El experimento realizado en 1934 por S. Nukiyama fue el primer estudio cuantitativo sistemático del proceso de ebullición [10]. Nukiyama advirtió que la ebullición toma formas diferentes, dependiendo del valor de la temperatura, ΔT_{exceso} . Establece cuatro diferentes tipos de ebullición: ebullición en convección natural, ebullición nucleada, ebullición de transición y ebullición en película. La curva de ebullición es la gráfica del flujo de calor en la ebullición contra la temperatura en exceso que muestra los diferentes tipos regímenes de ebullición como se muestra en la figura 2.2.

Ebullición en convección natural.

Es el primer régimen de ebullición, una sustancia pura a una presión específica hierve al llegar a la temperatura de saturación, sin embargo, la formación de burbujas se presenta hasta que el líquido alcanza una temperatura mayor a la de saturación. El líquido se encuentra en una condición metaestable, es decir, está sobrecalentado y se evapora cuando sube a la superficie. La convección natural es la principal razón del movimiento del fluido y la transferencia de calor como se muestra en la figura 2.3 b). [3].

Ebullición nucleada.

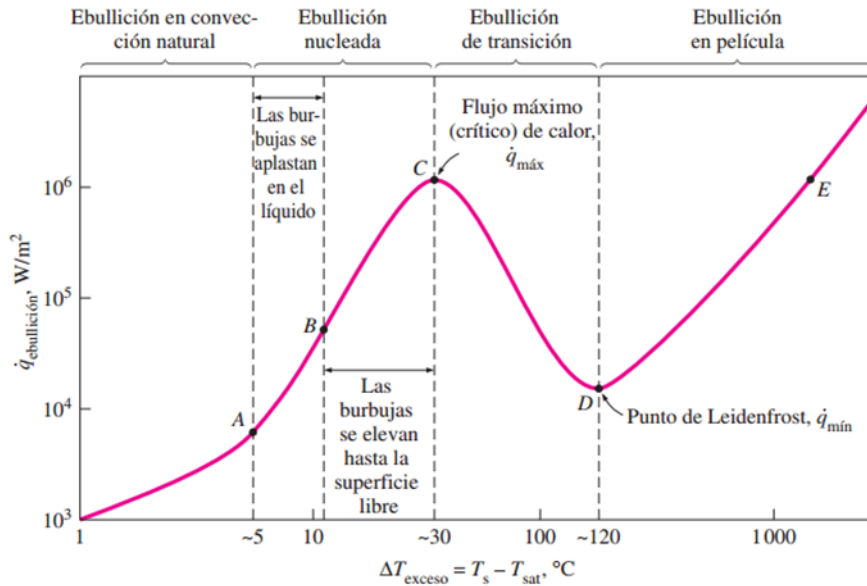


Figura 2.2: Curva de ebullición del agua a la presión de 1 atm [3].

Este régimen se divide en dos regiones, la que va del punto A-B de acuerdo a la figura 2.2, esta se caracteriza por la formación de burbujas aisladas en sitios preferenciales de nucleación sobre la superficie calentada, estas son disipadas poco después que se separan de la superficie calentada. La transferencia de calor es originado por la agitación del líquido hacia la superficie del calentador responsables del coeficiente de transferencia y del flujo de calor más altos en la región de ebullición nucleada como se observa en la figura 2.3.

La segunda región es la que va del punto B-C, la temperatura alcanzada es mayor y las formación de burbujas se da a una tasa mayor debido a un mayor número de sitios de nucleación que forman columnas continuas de vapor en el líquido. Las burbujas flotan hasta la superficie donde liberan su contenido. Se obtiene movimiento a través de corrientes de convección natural que arrastran el líquido transportando calor de las zonas de mayor temperatura a las de menor. A valores grandes de ΔT_{exceso} se obtiene un valor alto de evaporación en la zona donde se encuentra el calentador originando la formación de burbujas que aíslan a este del líquido imposibilitando que el líquido lo humedezca. Al encontrarse aislado el calentador del líquido, la tasa de crecimiento

del flujo de calor disminuye al aumentar ΔT_{exceso} llegando al su máximo en el punto C, denominado flujo crítico o máximo de calor. Una característica importante de este régimen de ebullición es su capacidad de lograr altas tasas de transferencia de calor con valores pequeños de ΔT_{exceso} .

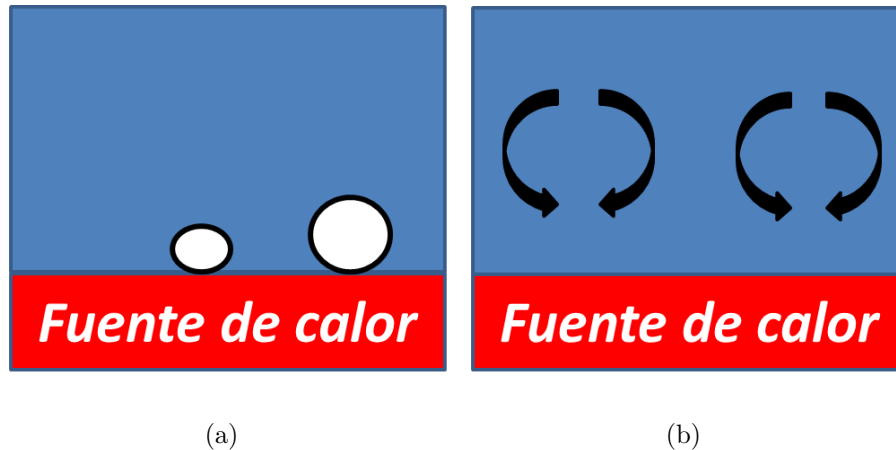


Figura 2.3: Inicio de la ebullición, (a) nucleada y b) en convección natural.

La formación de las burbujas de vapor en el régimen de ebullición nucleada es el resultado de acontecimientos sucesivos de nucleación y la dinámica de crecimiento de la burbuja consecutivos hasta la salida de la burbuja de la pared como se observa en la figura 2.3. La mayor parte de la pared está en contacto con la fase líquida incluso si altas fracciones de huecos se pueden tener justo encima de la pared. Como consecuencia de ello, el supercalentamiento de la pared es bajo, ya que la temperatura del líquido no puede alcanzar valores grandes de sobrecalentamiento, debido a la agitación asociada con el crecimiento de la burbuja y el movimiento, la eficacia del intercambio de calor por convección es mucho mayor con respecto a un caso de fase única.

Al aumentar el flujo de calor aún más, la tasa de burbujas que salen se hace más rápido hasta que las burbujas parecen unirse en chorros de vapor, es decir, se forman burbujas, separada, y la reforma tan rápidamente que se ven las corrientes continuas o columnas de vapor. El flujo de calor se incrementa dramáticamente para los aumentos relativamente modestos en ΔT cambiando la pendiente de la curva de ebullición nucleada.

Después de la salida de ebullición nucleada, el proceso sigue un camino que depende

de la manera en que se aplica el flujo de calor a la superficie.

Ebullición de transición

Cuando la ΔT_{exceso} aumenta hasta superar el punto C, como se muestra en la figura 2.2, el flujo de calor disminuye. Esto es debido a un punto de parcialidad entre la ebullición nucleada y la de película, es decir, alrededor del calentador se forma una película de vapor, que sirve como aislamiento debido a su baja conductividad térmica con relación al líquido. En el punto C la temperatura empieza a decaer hasta llegar al punto D donde ya esta presente ebullición en película y donde la temperatura comienza a aumentar. Este régimen no es deseable por su grado de inestabilidad.

Ebullición en película

Este régimen se caracteriza por que el calentador se encuentra completamente cubierto por una película continua y estable de vapor. Esto ocasiona una baja transferencia de calor en esta región y solo aumenta al incrementar ΔT_{exceso} provocado por la transferencia de calor del calentador al líquido de la película por radiación a altas temperaturas. Sin embargo existe el fenómeno de extinción que ocurre cuando se desea ir más allá del punto C o flujo máximo de calor se debe de incrementar la T_s del calentador, pero para lograrlo también debe aumentar el flujo de calor y como se muestra en la figura 2.2 la temperatura decae debido a que el líquido no puede recibir esta temperatura extra. La temperatura adicional es absorbida por el calentador elevando su temperatura T_s hasta que alcanza un nivel donde transfiere esta temperatura al fluido en forma estacionaria hasta llegar al punto E de temperaturas superficiales muy elevadas.

2.2.3.2 Mecanismo de ebullición nucleada

En ebullición nucleada el flujo de calor es a través de la fase líquida debido a que el coeficiente de conductividad es mayor al del vapor que forman las burbujas. Debido a la superficie del calentador se establece una capa límite que es modificada con el

ascenso de burbujas. Estas modificaciones en la la capa límite eliminan la resistencia térmica consiguiendo transferencias de calor mayores a la conveccion. Cuando el calor se suministra sobre una superficie sólida, las burbujas se forman sobre ella y no en el líquido.

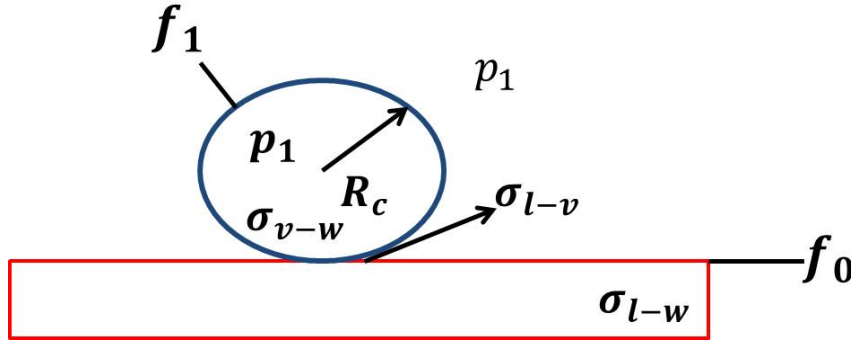


Figura 2.4: Esquema de una burbuja de vapor de dimensiones críticas que se forma sobre la superficie de un sólido.

La superficie f_1 separa al líquido a presión de saturación p_s del vapor a presión p_1 y la superficie f_0 al sólido del vapor como se muestra en la figura 2.4. Debido a la generación de interfaces entre los distintos estados aparecen tensiones superficiales σ_{v-w} , σ_{l-w} y σ_{l-v} .

El trabajo necesario para formar nuevas superficies cuando aparece una burbuja de vapor sobre un superficie es

$$W = \sigma_{l-v}f_1 + (\sigma_{v-w} - \sigma_{l-w})f_0. \quad (2.5)$$

De la expresión 2.5 se obtiene

$$\sigma f_1 \left[1 - \frac{f_0}{f_1} (1 - \cos(\theta)) \right]. \quad (2.6)$$

De la expresión 2.6 se puede deducir que el trabajo es menor si la relación $\frac{f_0}{f_1}$ y el ángulo θ son mayores. Lo cual explica que la superficie cataliza la ebullición y la condensación del vapor. Los núcleos de ebullición se generaran preferentemente en irregularidades de la superficie, donde $\frac{f_0}{f_1}$ es mayor. El tamaño de las irregularidades

que sirven como núcleos de ebullición son más pequeños que R_{cr} . Otro parámetro importante a conocer es el diámetro de separación que está dado por las condiciones de equilibrio mecánico entre las fuerzas de flotabilidad y las generadas por las tensiones superficiales que retienen a la burbuja.

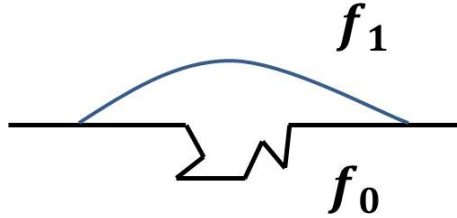


Figura 2.5: Las irregularidades en la superficie de la fuente de calor aumenta la relación $\frac{f_0}{f_1}$.

2.2.4 Mecanismos de transferencia de calor

Existen distintos mecanismos de transferencia de calor que son importantes en la ebullición nucleada. En la ebullición nucleada parcial, o en el régimen de aislamiento de burbuja, la conducción transitoria en el líquido adyacente a la pared es un mecanismo importante para la transferencia de calor desde una superficie [11].

2.2.4.1 Cambio de líquido a vapor

Las estelas de burbujas que salen al quitar la capa límite térmica de la superficie calentada, crea un proceso de separación de la capa límite térmica cíclica. El calor sensible se transporta en líquido sobrecalentado, cuya velocidad de eliminación es proporcional al espesor de la capa de su temperatura media, la zona de la capa límite eliminada por una burbuja, depende de la frecuencia de salida de burbujas y la densidad de sitios de ebullición activos.

A flujos de calor bajos, con un pequeño número de sitios de nucleación activos, una parte significativa de la flujo total de calor se transfiere por convección [12].

2.2.4.2 Evaporación

El calor es conducido desde la capa límite térmica a la interfaz de la burbuja, donde es convertido en calor latente. La macro-evaporación se produce sobre la parte superior de la burbuja mientras la micro-evaporación se produce por debajo de la burbuja a través de la capa delgada de líquido atrapado entre la burbuja y la superficie, denominada evaporación de microcapas. Una hipótesis para el mecanismo de ebullición nucleada teniendo en cuenta la evaporación de una microcapa de agua debajo de la burbuja fue sugerido por primera vez por Moore y Mesler [13]. A partir de oscilaciones en la temperatura medida en el sitio de la liberación de burbujas dedujeron la existencia de una microcapa bajo la burbuja [14].

Sin embargo, incluso después de años investigación, aún no se desarrolla una respuesta eficaz, coherente de un modelo de crecimiento de la burbuja sobre una superficie calentada que incluye adecuadamente la contribución de microcapas, la temperatura variable en el tiempo y el flujo alrededor de la burbuja [15]. Los investigadores Plesset y Prosperetti concluyeron que en subenfriado en ebullición, la evaporación en las microcapas sólo representa el 20% de el flujo de calor total [16]. Lee y Nydahl [17] calcularon el crecimiento de las burbujas esféricas con una microcapa mediante la formulación de Cooper y de Lloyd [18], concluyendo que la evaporación de microcapa es un contributor significativo a la transferencia de calor durante el crecimiento de la burbuja. Una predicción teórica del espesor de microcapas se llevó a cabo por Zhao [19] que se centra en burbujas individuales y se puede utilizar para explicar el mecanismo de ebullición y predecir el flujo de calor en la región de ebullición nucleada a alto flujo de calor y para el flujo de calor mínimo.

2.2.4.3 Transferencia de calor

Los mecanismos de transferencia de calor compiten por el mismo calor en el líquido y por lo tanto, se solapan uno con otro térmicamente. La convección natural también se produce en las zonas inactivas de la superficie, donde no hay burbujas o están creciendo. La tasa de transporte de calor latente depende del flujo volumétrico de vapor lejos de la superficie por unidad de área. El investigador Rohsenow propuso la primera correlación asumiendo el proceso de ebullición, como un proceso dominado por el mecanismo de

la agitación de burbuja, cuya transferencia de calor es por convección forzada inducida por la burbuja, proceso que podría estar correlacionado con la relación de convección forzada monofásica [19]. Esta correlación da resultados razonables para una amplia gama de fluidos y la reducción de presiones. Estas correlaciones utilizan las propiedades físicas del fluido (evaluado a la temperatura de saturación) y son por lo tanto, las correlaciones físicas basadas en la propiedad. El aumento de la rugosidad de la superficie tiene el efecto de aumentar el coeficiente de transferencia de calor de la ebullición nucleada [17]. Auracher [20] y Buchholz [12], tomando ventaja de las crecientes capacidades de tratamiento de datos mediante ordenadores, sensores y cámaras de alta velocidad, llevaron a cabo una serie de experimentos para proporcionar una visión más profunda de algunos de los aspectos sobre los mecanismos extremadamente complejos en la ebullición.

2.2.5 Escala en ebullición nucleada

Para el estudio de los mecanismos físicos asociados con la ebullición nucleada, primero introducimos tres diferentes escalas de longitud como la determinación de los tres niveles de descripción del proceso de ebullición nucleada como se muestra en la figura 2.6. Cada uno de estos niveles se relacionan con una escala de longitud típica diferente para la descripción de la burbuja. Para cada escala se pueden identificar diferentes mecanismos físicos. El tamaño típico de la región cerca de la pared es del orden de magnitud de unos pocos diámetros de burbuja. Esto establece la burbuja como el elemento básico natural del proceso de ebullición nucleada. Los tres diferentes escalas de longitud se pueden definir a partir de tres diferentes niveles de burbujas de modelado. En el primer nivel de la descripción, que se denota como escala de flujo de dos fases, se consideran las burbujas que se fijan en la geometría y el tamaño. Esto es especialmente relevante lejos de la pared. Este nivel de descripción, por lo tanto ignora la dinámica de crecimiento de la burbuja. En el segundo nivel de descripción, la escala de crecimiento de la burbuja media, de las burbujas se toma en cuenta la geometría, pero no su tamaño. Por ejemplo, el burbuja se asimila a una esfera cuyo tamaño depende del tiempo, la dinámica de la formación de burbujas. En el tercer nivel de la descripción, la escala local, denotado tanto en la geometría y el tamaño de la burbuja se consideran como dependiente del

tiempo. La dinámica de la zona de formación de burbujas, por lo tanto describen con más precisión que en la escala media de crecimiento de la burbuja.

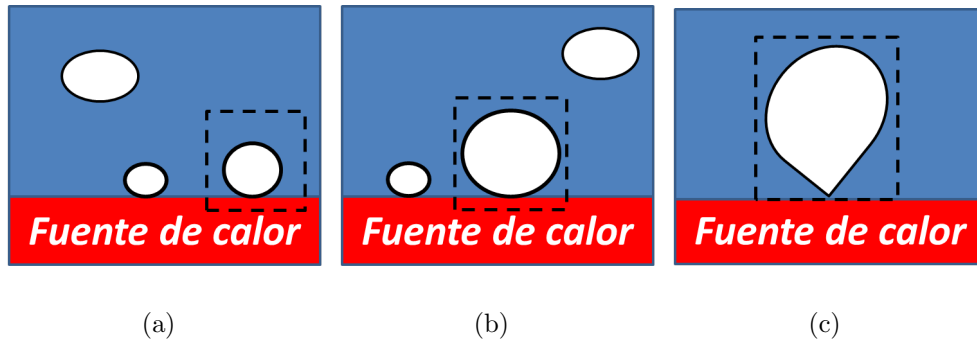


Figura 2.6: Escala en ebullición nucleada, (a) escala flujo bifásico, (b) escala de crecimiento medio de la burbuja y (c) escala local.

2.2.5.1 Escala flujo bifásico

Esta escala es la más grande y está asociado con el nivel más idealizado de la modelación del proceso de ebullición nucleada. La imagen básica considera una población de burbujas procedentes de la pared y que tienen un tamaño y una geometría constante. La frecuencia y el tiempo de emisión de la burbuja son altos. La tasa de vapor entrante de la pared está relacionado con el valor del flujo de calor q en la pared. Es importante señalar que esta escala en realidad no se observa la pared. Este tipo de análisis a gran escala de los flujos ebullición se ha utilizado como ejemplo por Zuber [21] para derivar una correlación para el régimen de ebullición nucleada bajo transferencia de calor hirviendo en la región de burbujas aisladas, donde las burbujas no interactúan entre sí. En el flujo de calor más grande, las burbujas llegan a ser tan numerosas que sus interacciones ya no son despreciables. El gran número de burbujas individuales generados en la zona de la pared cerca de la coalescencia entre sí y algo formar grandes masas de vapor que fluyen fuera de la pared. Estas grandes masas pueden ser idealizadas por un canal de vapor continuo, las columnas de vapor [22].

2.2.5.2 Escala de crecimiento medio de la burbuja

A esta escala, el proceso de ebullición nucleada cerca de la pared casi hirviendo se describe de una manera que facilita la evaluación de la formación de burbujas. La escala característica de este nivel de descripción es la burbuja, que se considera que tiene una geometría fija, pero que varían en tamaño. A partir del estudio del proceso de crecimiento de la burbuja, varios mecanismos de intercambio de calor pueden ser identificados incluyendo el transporte de calor latente. En este nivel de descripción del proceso de ebullición nucleada es idealizado como un conjunto de subfenómenos. El principal es el proceso cíclico de la formación de burbujas cerca de la pared calentada. Cada uno de estos subfenómeno ha sido objeto de estudios específicos, ya sea sobre la base de los modelos de análisis o en la correlación emitida desde la observación experimental. La creación de las burbujas consta de los siguientes eventos: la nucleación, crecimiento, de salida y de espera. Algunos modelos también tienen en cuenta la interacción entre los sitios. Entre los procesos que implican este fenómeno son:

- Partición del flujo de calor pared entre diferentes procesos de transferencia de calor.
 - a.- Latente de evaporación de transporte de calor, eventualmente dos partes alrededor de la burbuja y la contribución de microcapa.
 - b.- Conducción transitoria.
 - c.- La convección natural.
- Frecuencia espacial de el proceso de formación de burbujas, la densidad del sitio de nucleación.
- Tasa de crecimiento de la burbuja.
- Tamaño de salida de la burbuja.
- Tiempo de espera.
- Interacciones de la burbuja: térmica, hidrodinámica y la coalescencia.

2.2.5.3 Escala local

La escala de crecimiento medio de las burbujas se describe el proceso de formación de burbujas media de un modo idealizado que es relevante al flujo de calor bajo régimen de ebullición nucleada. Sin embargo, a altas temperaturas el flujo de burbujas están más repartidas en la pared antes de su salida. Este comportamiento de la burbuja es muy diferente del comportamiento regular. El modelo de proceso de ebullición nucleada a la escala media de la burbuja es demasiado rígido para describir un comportamiento tal de acuerdo con el hecho de que la forma de burbuja se impone a ser esférica o semiesférica. Por lo tanto, debemos tener en cuenta un nivel más pequeño de la modelización del proceso de ebullición nucleada. El nivel actual de la descripción tiene en cuenta el tiempo y el espacio dependientes de la forma de burbuja. Los principales mecanismos físicos que se tienen en cuenta en la escala local, además de los mecanismos físicos considerados en la escala media de crecimiento de la burbuja se enumeran a continuación.

1. Curvatura local de las fuerzas de burbujas y capilares.
2. Retroceso de presión en la interfaz: el salto de presión $p = -m/\rho$, donde m es la tasa de transferencia de masa local.
3. Dinámica de triple línea, ángulo de contacto estático-dinámico y transferencia de calor cuasi-singular asociado [23].
4. Gravedad: efecto del gradiente de presión hidrostática en la forma de burbujas y por consiguiente, en su dinámica de salida cuyo modelo considera la forma dependiente del tiempo de la burbuja y también incluye un modelo para la dinámica de la línea de contacto.
5. Problema de conducción de calor local dentro de la zona de contacto entre la pared y el vapor en la base seco de una burbuja [24].

Para tener en cuenta todo el conjunto de mecanismos y de la geometría compleja que depende del tiempo de la burbuja en este nivel de descripción, se requiere un análisis más complejo.

2.2.6 Técnicas de generación de microburbujas

Existen diferentes métodos para la generación de microburbujas y cada uno tiene un mecanismo físico un tanto diferente. Las técnicas pueden ser clasificadas en cuatro clases [10]:

1. Utilizar un flujo de aire comprimido para disolver aire en un líquido y liberarlo por algún dispositivo o apertura que provoque la nucleación de nano y microburbujas basado en el principio de cavitación. Estas burbujas presentan una tasa de crecimiento alta debido a la rápida disolución del líquido. Cabe mencionar que es la clase más utilizada.
2. A través de un generador de ondas ultrasónicas que permitan provocar un efecto de cavitación altamente localizada en puntos de rarefacción en una onda estacionaria ultrasónica.
3. La tercera clase consiste en la utilización de un flujo de aire a presión baja o controlada y el uso de un método secundario para romper el flujo de aire en pequeñas burbujas, debido a la vibración mecánica u oscilaciones controladas del fluido.
4. La última clase es la generación de microburbujas usando luz láser, esta se basa en el calentamiento altamente localizado y el fenómeno de ebullición del fluido en esa zona. Esta técnica es joven y actualmente se ha popularizado su estudio por su versatilidad y facilidad.

2.3 Métodos y materiales

2.3.1 Fotodeposición de nanopartículas

La incorporación de nanopartículas altamente absorbentes sobre fibras ópticas se lleva a cabo con la técnica de fotodeposición. Esta técnica es bastante sencilla de desarrollar

ya que solo consiste en sumergir una fibra óptica en una solución de etanol con nanopartículas metálicas suspendidas como se muestra en la figura 2.7. El método de fotodeposición se consigue enviando luz láser a través de la fibra óptica, que al interactuar con la solución coloidal de nanopartículas de plata es posible inmovilizar las nanopartículas en la cara de la fibra óptica a través de fenómenos como la termoforesis [25–27], fuerza de gradiente, corrientes de convección, permitiendo impulsar a las nanopartículas originando que estas se depositen sobre la cara de la fibra [28, 29]. La fibra utilizada es de la marca Thorlabs, modelo *FG105LCA*, de diámetro de núcleo de $105\ \mu\text{m}$ y N.A. 0.22. Se utilizó un láser pulsado de la marca Spectra-Physics, modelo Explorer 532 nm Laser System y un objetivo de microscopio 40x para acoplar la luz a la fibra óptica. Se realizó la medición de potencia a la salida de la fibra óptica con un medidor de potencia, marca Newport, modelo 2935T – C y una esfera integradora, marca Newport, modelo 819C – SF – 6. El arreglo experimental se muestra en la figura 2.7.

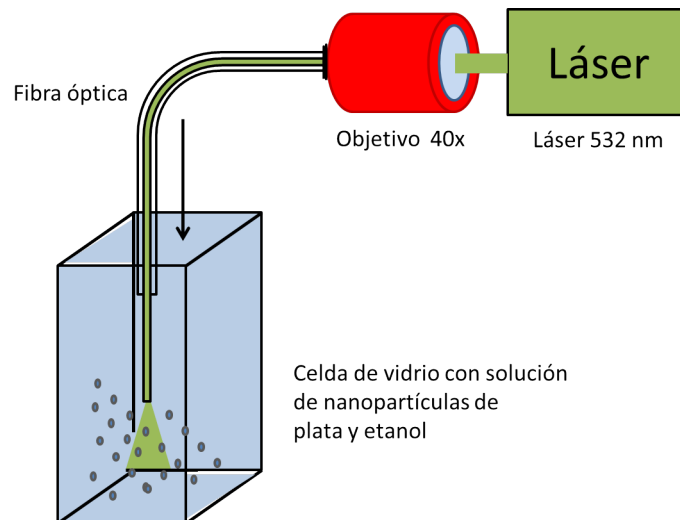


Figura 2.7: Arreglo de la técnica de fotodeposición de nanopartículas en una fibra óptica.

En investigaciones recientes se ha demostrado que este método permite la incorporación de diferentes tipos de estructuras y partículas metálicas dentro de los que destacan los nanotubos de carbono [29]. En este trabajo de tesis se realizó la fotodeposición de

nanopartículas de plata en la cara de la fibra óptica, se realiza a través una solución compuesta de 1.5 *ml* de etanol y 0.3 *mg* de nanopolvo de plata, la solución es contenida en un vial de 1.5 *ml* y es sometida a un baño ultrasónico con un sonicador de muestras marca SperScientific durante 5 minutos con la finalidad de homogeneizar la solución.

2.3.2 Generación y visualización de microburbujas

Realizada la fotodeposición es posible la generación de microburbujas, esto se lleva a cabo cuando la fibra óptica con las nanopartículas depositadas es sumergida en un líquido. El proceso de generación y visualización de microburbujas se realizó empleando una celda de vidrio, marca Luzeren de 3 *mL* y en su interior etanol. Una fibra óptica, marca Thorlabs, modelo *FG105LCA*, con un diámetro de núcleo de 105 μm y N.A. 0.22 con nanopartículas de plata previamente fotodepositadas fue utilizada. Un láser de la marca Spectra-Physics, modelo Explorer 532 *nm* Laser System y un objetivo de 40 x de la marca Newport fueron utilizados, el objetivo permitió acoplar la luz láser con la fibra óptica utilizada. Se empleó un objetivo de la marca Mitutoyo 10 x y N.A 0.26, así como un filtro marca Newport, modelo *FSQ – 550* que permite filtrar la luz del láser y así evitar la saturación del sensor de la cámara, una cámara marca Pixelink que permitió la visualización y grabación de imágenes, modelo *PL – B776* y la iluminación de la escena es por medio de un arreglo de 3 leds, color blanco, potencia máxima 0.24 *W* y un tamaño 3 *mm*, conectados a una fuente de voltaje variable bipolar, marca GWINSTEK, modelo *GPS – 3303* como se muestra en la figura 2.8.

Se emplea una fibra óptica con nanopartículas de plata previamente fotodepositada en su punta y un láser pulsado de $\lambda = 532 \text{ nm}$ y $\nu = 10000 \text{ Hz}$ a una potencia promedio de 100 *mW*, cabe decir que el etanol no presenta absorción a la longitud de onda del láser empleado (ver figura 2.9) garantizando que los efectos térmicos generadores de la burbuja, así como los efectos térmicos e hidrodinámicos en el etanol son originados en su totalidad por el calentamiento de la nanopartículas en la fibra óptica.

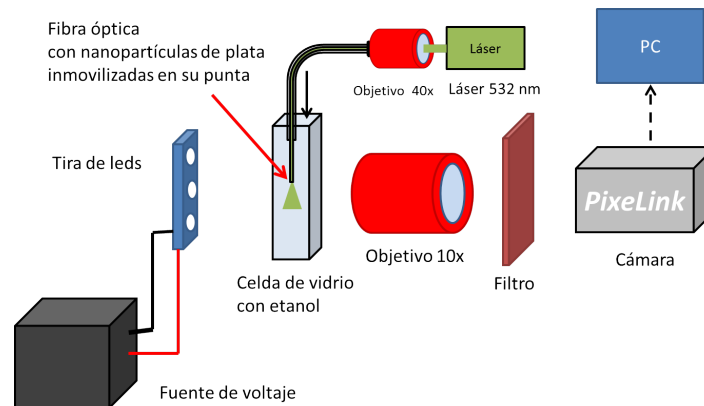


Figura 2.8: Arreglo óptico para la generación y visualización de microburbujas.

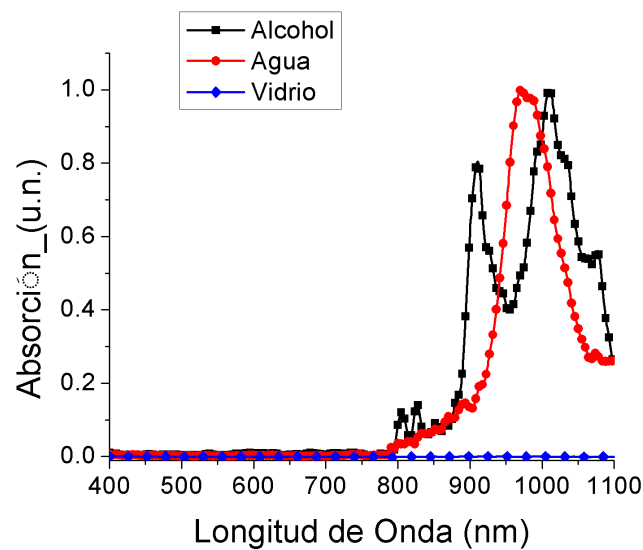


Figura 2.9: Espectro de absorción del etanol, el vidrio y el agua.

2.3.3 Fibra óptica

La fibra óptica utilizada fue multimodo de 0.22 NA, de la marca Thorlabs (ver tabla 2.1), presenta un núcleo de sílice puro con un revestimiento de sílice dopado con flúor, cuenta con una concentración baja de iones de hidroxilo (OH) para UV a visible (250 - 1200 nm) o visibles para aplicaciones NIR (400 - 2400 nm), respectivamente.

Característica	Fibra óptica
Rango de longitud de onda	400-2400 nm (Bajo OH) 250-1200 nm (Alto OH)
Núcleo/Revestimiento	Sílice pura/ Sílice dopada con flúor
Forro	Acrilato
Temperatura de operación (°C)	-40 a 80
Apertura Numérica (N.A.)	0.22±0.02
Ancho de banda a 890 nm	15 MHz*Km

Tabla 2.1: Características de fibra óptica Thorlabs FG105LCA [30].

La fibra óptica es un medio de propagación de la luz, utiliza el concepto de conducir luz dentro de un dieléctrico cuyo diámetro es sumamente pequeño y con una longitud muy grande. Su funcionamiento se basa en la óptica geométrica a través de la ley de Snell. Esta ley establece que cuando un rayo de luz atraviesa un interfaz entre dos medios con distinto índice de refracción, el producto del índice de refracción del primer medio por el seno del ángulo con que incide el rayo con respecto a la normal, conserva la siguiente igualdad [6]

$$n_1 * \text{sen}(\theta_i) = n_2 * \text{sen}(\theta_t), \quad (2.7)$$

donde n_1 y n_2 es el índice de refracción del primer y segundo medio, θ_i y θ_t el ángulo de incidencia y transmisión.

De acuerdo a la ley de Snell podemos deducir algunas cosas. Si $n_1 > n_2$ y θ_i va aumentando obtenemos un ángulo limite (donde $\theta_i < 90^\circ$ obtenemos $\theta = 90^\circ$), mayor a este ángulo el rayo no será transmitido del primer medio al segundo reflejándose al que se denomina reflexión total interna (ver figura 2.10).

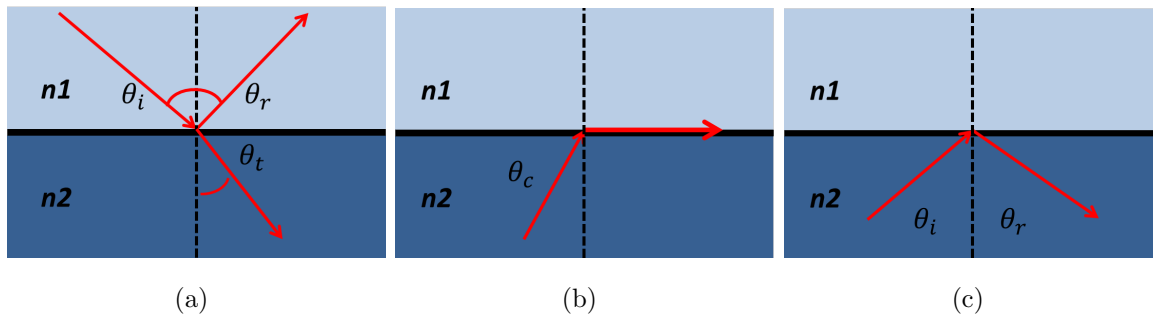


Figura 2.10: Interacción de un rayo de luz entre dos medios de densidades ópticas diferentes, (a) reflexión y transmisión (b) diagrama de ángulo crítico y (c) reflexión total interna.

La rayo incidente es confinado sobre el primer medio de propagación, principio de operación de las fibras ópticas. Las fibras ópticas están compuestas de dos cilindros concéntricos dieléctricos, típicamente vidrio o plástico. El del centro es llamado núcleo y el externo se denomina revestimiento, el primero tiene un índice de refracción mayor al revestimiento y es el medio por donde se propaga el haz de luz (ver figura 2.11).

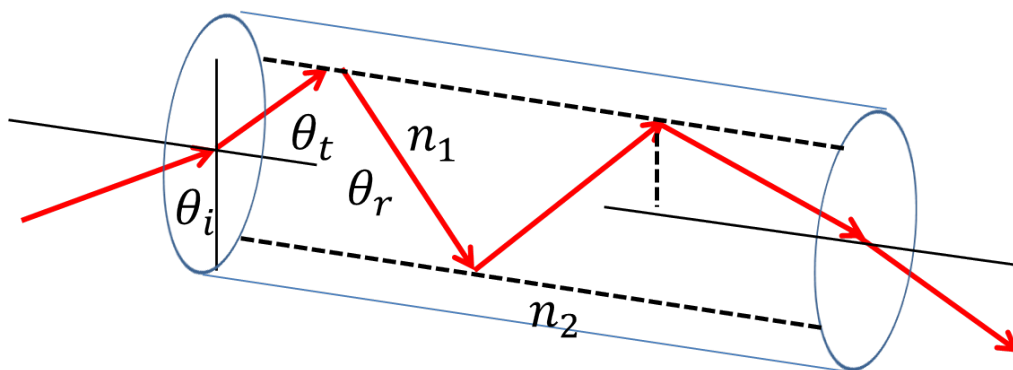


Figura 2.11: Propagación de un rayo de luz a través de una fibra óptica.

Tipos de fibras

Existen dos tipos de fibras ópticas de acuerdo a la forma en que se transmite la luz dentro de la fibra, monomodo y multimodo [6].

- Monomodo: Se transmite un sólo haz de luz por el interior de la fibra permitiendo

un solo modo de propagación paralelo a su eje. Su aplicación es para largas distancias, de hasta 300 km.

- Multimodo: Permite la transmisión de varios haces de luz por el interior de la fibra, variando el ángulo de incidencia. El índice de refracción del núcleo es mayor al del revestimiento. Su aplicación se acota a cortas distancias, menores a 1.5 km.

2.3.4 Láser

El láser utilizado fue de la marca Spectra-Physics, modelo Explorer Q-switching, es empleadó en la técnica de fotodeposición y en la generación de microburbujas. Este láser pulsado une la electrónica de control y el diseño del resonador en uno mismo. El láser Explorer 532 ofrece 532 μJ de energía de pulso a una frecuencia de repetición de pulsos de 10 kHz. Proporciona 2 W de potencia máxima a una frecuencia de repetición de 50 kHz (ver tabla 2.2).

Característica	Láser
Longitud de onda (nm)	532
Medio de ganancia	Nd:YAG
Energía de pulso (μJ)	200 μJ a 10 kHz
Potencia de salida (W)	2 W a 50 kHz
Ancho de pulso	< 15 ns a 10 kHz
Tasa de repetición	Pulso sencillo a 60 kHz
Modo espacial	$M^2 < 1.3$, TEM_{00}
Voltaje de operación	24 VDC ± 2 V
Corriente máxima	< 4 A
Tiempo de encendido (> 95%)	10 min.

Tabla 2.2: Características de láser Spectra Physics Explorer 532 nm [32].

Un láser por sus siglas en inglés, light amplification by stimulated emission of radiation, es un dispositivo que utiliza el principio de emisión estimulada para generar un haz de luz coherente espacial y temporal. Este consta de tres elementos principales, una cavidad

óptica resonante, un medio de ganancia y un sistema de bombeo. La cavidad óptica resonante tiene el trabajo de mantener la luz circulando a través del medio de ganancia. Esta constituida de dos espejos dieléctricos, el primero tiene alta reflectividad cerca del 100% y el segundo o espejo acoplador su porcentaje de reflectividad es ligeramente menor. El medio de ganancia es donde se produce la amplificación óptica, ocurren los procesos de excitación electrónica mediante bombeo de energía, emisión espontánea y emisión estimulada de radiación. La ganancia óptica del medio sea inferior a las pérdidas de la cavidad más las pérdidas del medio [6]. Otro componente importante de un láser es el sistema de bombeo, este proceso excita las moléculas del medio activo; lo que equivale a poner sus átomos en un nivel cuántico mayor. Una vez excitados, pueden emitir fotones que se propaguen en el medio activo e ir generando más fotones produciendo un efecto en cadena. Todos los fotones generan fotones iguales, comportándose coherentemente. Las fuentes de excitación pueden ser electrónicas, radio frecuencia, de sonido, eléctricos o incluso ópticos(ver figura 2.12) [7].

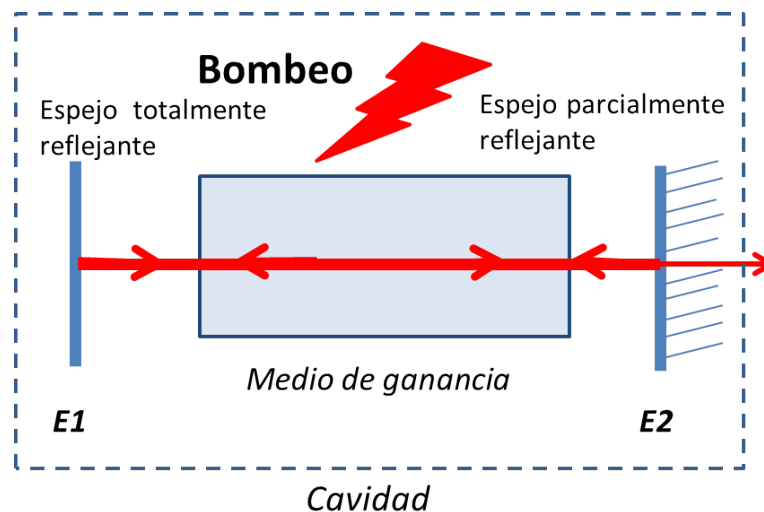


Figura 2.12: Diagrama de un láser.

2.3.5 Filtro óptico

El filtro de vidrio coloreado utilizado fue el FSQ-OG550, es un filtro de vidrio de corte de 50,8 x 50,8 mm de vidrio OG.550 cuyas características se muestran en la tabla 2.3.

El filtro es utilizado para evitar la saturación del sensor de la cámara debido a la luz refractada y esparcida por la solución y las microburbujas.

Característica	Filtro
Longitud de onda de corte	550 nm
Ángulo de incidencia	0°
Umbral	30W/cm ² CW
No. de vidrio	OG.550
Grosor	3 mm

Tabla 2.3: Características del filtro FSQ-550 [34].

Un filtro óptico es un dispositivo capaz de permitir la transmisión de luz con ciertas propiedades atenuando o suprimiendo la radiación que no cumpla con estas características. Dentro de los filtros ópticos más comunes son los filtros de color. Como el utilizado en el presente trabajo de investigación, Para filtrar la luz láser de 532 nm se utilizó un filtro de la marca Newport, modelo FSQ-550 (ver figura 2.13), permitiendo filtrar la luz esparcida por la solución y las nanopartículas de plata incorporadas en la punta de la fibra óptica [6].

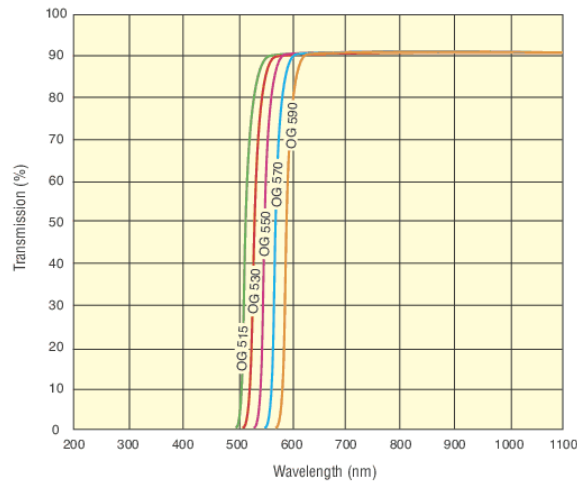


Figura 2.13: Espectro de transmisión de filtro FSQ-550 [34].

2.3.6 Cámara Pixelink

La cámara marca Pixelink, modelo *PL-B776* (ver figura 2.14) empleada en este arreglo experimental para la visualización y grabación de imágenes, contiene un sensor Aptina CMOS, $3.2 \mu\text{m}$ de tamaño de pixel, con una resolución de máxima de 2048×1536 , 3.1 MP, color y una interfaz FireWire [35].



Figura 2.14: Fotografía de la cámara Pixelink PL-B776 [35].

2.3.7 Objetivo de microscopio

Un objetivo de microscopio es un sistema óptico compuesto por una o varias lentes, centradas coincidiendo cada uno de los ejes ópticos para formar el sistema óptico. Las lentes deben ser de alta calidad y funcionamiento. Su función es coleccionar la luz de proveniente de la muestra y proyectar una imagen real, invertida y magnificada al cuerpo del microscopio. Los microscopios más sofisticados pueden también ofrecer un proyector que proyecta la imagen sobre una superficie separada. Aquí se encuentra el punto focal desde donde se proyecta la imagen el cual constituye el plano de la imagen, en lugar de las piezas oculares [6].

2.3.7.1 Objetivo Mitutoyo 10x

Objetivo de la marca Mitutoyo de 10x corregido al infinito fue utilizado para la visualización de microburbujas. Las características se muestran en la siguiente tabla 2.4:

Característica	Objetivo de microscopio
Magnificación	10x
Apertura Numérica	0.28
Distancia de trabajo (mm)	33.5
Longitud focal (mm)	20.0
Resolución (μm)	1.0
Profundidad de foco (μm)	3.5
Compatibilidad con tubo	FL=200mm
Diametro max. (mm)	34.0
Montura	M26 X 36 TPI
Peso (g)	240
Tipo	Corrección infinito
Rango de longitud de onda (nm)	435-655
Manufactura	Mitutoyo

Tabla 2.4: Características de objetivo Mitutoyo 10x [37].

2.3.7.2 Objetivo Newport 40x

El objetivo M-40x es utilizado para acoplar la luz proveniente del láser a la fibra óptica. El objetivo de microscopio M-40x de la marca Newport (ver tabla 2.5), tiene una apertura numérica de 0.65, distancia focal de 4.5 *mm* y una apertura de 5.0 *mm*. El objetivo se corrige para un conjugado posterior a 160 *mm*. Las lentes están recubiertas con anti-reflexión con MgF2 para el espectro visible. Este objetivo M-40x es adecuado para su uso con los filtros espaciales modelo 900 o 910A. La potencia del objetivo del microscopio de la serie M se basa en una longitud de tubo de 160 mm, MP = 160 mm / f.

Característica	Objetivo
Magnificación	40x
Longitud focal (mm)	4.5
Rango de longitud de onda (nm)	400-700
Distancia de trabajo (mm)	0.6
Diámetro de entrada de haz (mm)	4.0
Diámetro de Pinhole calculado (μm)	5.7
Diámetro de Pinhole Recomendado (μm)	10

Tabla 2.5: Características de objetivo Newport M-40x [36].

2.3.8 Medidor de potencia

El medidor de potencia (ver figura 2.3.8) utilizado para verificar la presencia de nanopartículas de plata en la punta de cada fibra óptica fue de la compañía Newport, modelo 2935T – C. Este medidor cuenta con dos canales de lectura de potencia óptica de alto rendimiento y medidor de energía [38]. Las características de este instrumento se muestran en la tabla 2.8:



Figura 2.15: Fotografía del medidor de potencia 2935T – C.

Característica	Medidor de potencia
No. de canales	2
Interfaz	USB-RS232
Taza de muestreo	250 kHz
Resolución	.0004%
Ancho de banda	DC-500kHz(fotodiodo), DC-1 MHz(Thermo o Pyro) a salida análoga
Precisión	± 0.2 % para CW, ± 1 % pico-pico
Entrada de detector	25 mA (fotodiodo), 130 V (thermo y pyro)

Tabla 2.6: Características de medidor de potencia 2935T – C [38].

2.3.8.1 Fotodetector de silicio

El fotodetector de silicio 918D-SL, sus características incluyen almacenamiento integrado de datos de calibración, filtro de atenuación OD1 incorporado con detección automática de encendido/apagado y electrónica de detección de temperatura para la compensación de la desviación de temperatura y calibrado para mediciones de potencia óptica de 400-1100 nm. Compatible con los medidores de potencia Newport [39]. Las características del fotodetector se muestran en la tabla 2.7:

Característica	Fotodetector
Tipo de detector	Alto rendimiento
Rango espectral	400 nm - 1100 nm
Tamaño de sensor	11.3 mm
Densidad de potencia	30 W/cm ²
Pulso de energía con atenador	50 nJ
Material	Silicio
Atenuador	OD1
Conector	DB15
Potencia mínima detectable	20 pW (1936-R/2936-R)
Apertura	10.3 mm

Tabla 2.7: Características de fotodetector 918D – SL [39].

2.3.8.2 Esfera integradora

La Esfera Integradora 819C – SF – 6 (ver figura 2.3.8.2) es una esfera integradora de 4 pulgadas revestida con Spectrafect de 6 pulgadas. Su umbral de daño es de $1,7 \frac{J}{cm^2}$. El puerto a 90° se usa para el detector seleccionable por el usuario. El puerto a 180° es para el haz colimado entrante. El puerto en la ubicación superior es para la cinta de fibra óptica para controlar la longitud de onda. Todas las esferas incluyen un deflector entre los puertos de 90° y 0°, lo que impide la iluminación directa de la fuente de luz al puerto del detector. Cuenta con un conector de 2,5 pulgadas en el puerto 0°, que se puede quitar fácilmente para diversas configuraciones (ver tabla 2.3.8.2).

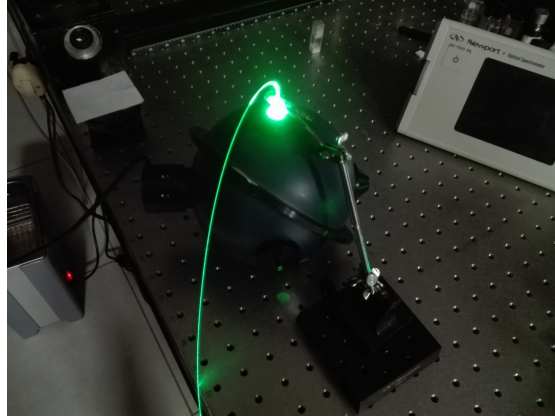


Figura 2.16: Fotografía de la esfera integradora 819C – SF – 6.

Característica	Esfera
Tipo de detector	Esfera integradora
Rango espectral	300 nm a 2.4 μm
Material	Spectrfect
Tamaño de esfera	6 in.
Tamaño de puerto de entrada	2.5 in(0°), 1.0 in. (90°, 180°)

Tabla 2.8: Características de la esfera integradora 819 – SF – 6 [40].

2.4 Resultados y discusiones

2.4.1 Fotodeposición de nanopartículas en la cara de una fibra óptica

Para llevar a cabo los experimentos presentados en este capítulo, se inmovilizarán nanopartículas de plata por el método de fotodeposición a cuatro fibras distintas, con diferentes concentraciones de nanopartículas de plata. La potencia óptica usada en el método de fotodeposición fue de 108 mW , la potencia de salida es dependiente de la concentración de nanopartículas de plata en cada fibra óptica y los tiempos que dura la fibra inmersa en la solución variaron en un lapso de 3 *minutos* aproximadamente, en

la tabla 2.9 se muestran los datos de las cuatro fotodeposiciones realizadas.

Potencia de entrada (mW)	Potencia de salida (mW)	Pérdida de potencia provocada por las nanopartículas (dB)	Tiempo de inmersión en la solución (s)
108	100	0.33	20
108	82	1.19	60
108	65	2.2	65
108	23	6.7	187

Tabla 2.9: Datos de la inmovilización de nanopartículas de plata a cuatro distintas fibras ópticas a través del método de fotodeposición.

Los resultados del proceso de fotodeposición de nanopartículas de plata sobre la cara de una fibra óptica se muestran en la figura 2.17.

La figura 2.17(a) muestra la imagen de la cara de una fibra óptica vista a través de un microscopio óptico modelo Axio Imager 2 de la marca Zeiss, con una concentración de nanopartículas muy baja y una disminución de potencia igual a 0.33 dB. El tiempo en la cual se encontró sumergida la fibra óptica en la solución coloidal fue de 20 s, lo cual provoco una concentración de nanopartículas de plata en el centro de la cara muy escasa y un relieve poco prominente. Las imágenes de la figura 2.17(b-d) muestran las restantes fotodeposiciones realizadas a distintas fibras ópticas, estas fueron observadas a través de un microscopio electrónico de barrido modelo TS5136SB, marca Vega@Tescan, del laboratorio de Físico-Química de Materiales de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, permitiéndonos observar la concentración de nanopartículas de plata y su realce en la cara de cada fibra óptica. La figura 2.17(b) muestra la cara de una fibra óptica con nanopartículas de plata inmovilizadas, estas provocan una disminución de potencia de 1.19 dB. La distribución de las nanopartículas es poco uniforme, presentando mayor concentración en el centro de la cara de la fibra. El tiempo el cual estuvo sumergida la fibra óptica en la solución de nanopartículas de plata fue 60 segundos un tiempo

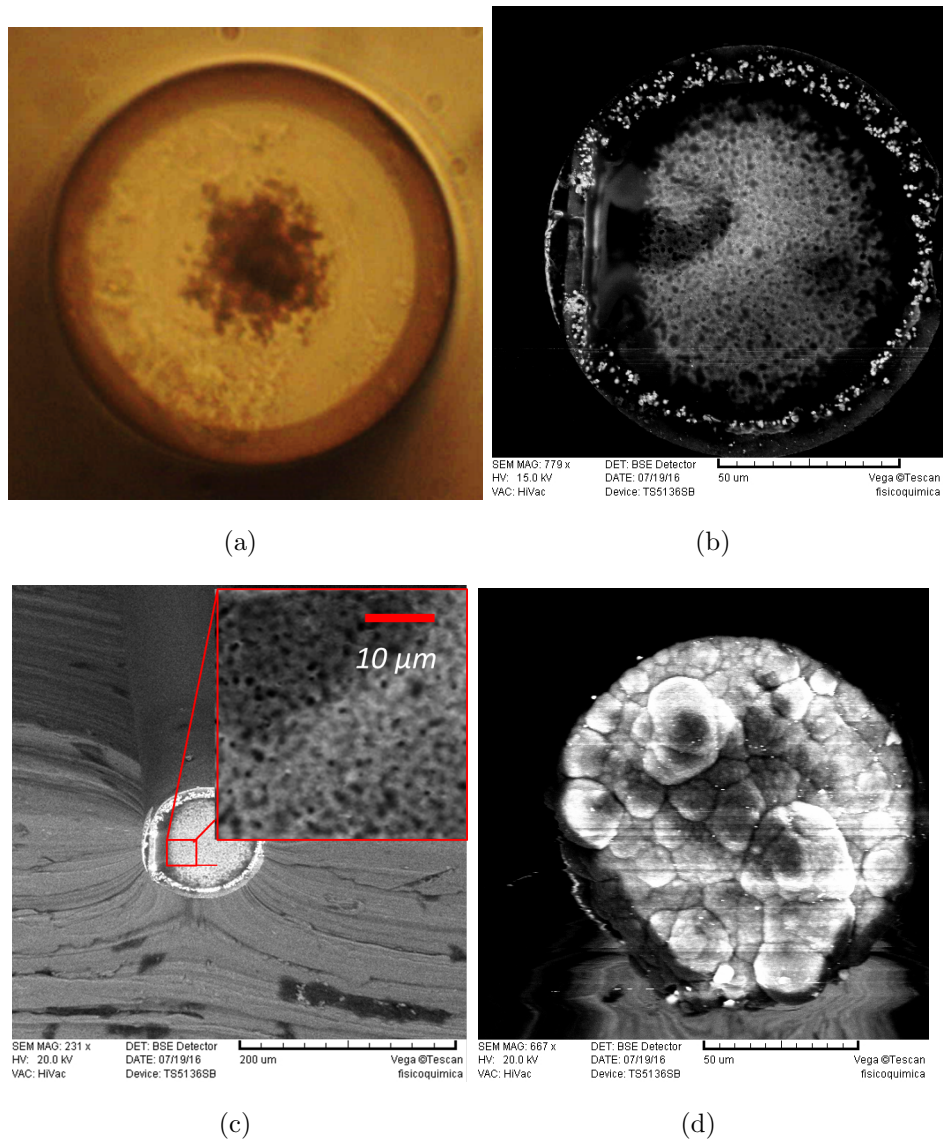


Figura 2.17: Nanopartículas de plata fotodepositadas en la cara de la fibra óptica bajo diferentes condiciones, (a) 0.33 dB , (b) 1.19 dB , (c) 2.2 dB y (d) 6.7 dB .

mayor que el caso anterior. En la figura 2.17(c) se observa la cara de una fibra óptica con nanopartículas de plata inmovilizadas con un disminución de potencia de 2.2 dB , se observa mayor uniformidad en la distribución de las nanopartículas. El tiempo de inmersión de la fibra óptica fue mayor tan solo por 5 s que el caso anterior. Es importante mencionar que la cantidad de nanopartículas inmovilizadas en la punta de

la fibra óptica no es directamente proporcional al tiempo en que se encuentra inmersa una fibra óptica en el seno de una solución coloidal para el método de fotodeposición.

Al realizar un acercamiento a la cara de la fibra óptica anterior, como se muestra en la figura 2.17(c) se observa como la distribución no es totalmente uniforme, dejando pequeñas cavidades y generando aglomeraciones que serán de suma importancia en la generación de microburbujas. La figura 2.17(d) muestra la cara de una fibra óptica con nanopartículas de plata inmovilizadas provocando una disminución de potencia de 6.7 dB, representando la mayor cantidad de nanopartículas inmovilizadas en la cara de una fibra óptica realizada en este trabajo de investigación. Como se puede observar la aglomeración de nanopartículas es muy grande, la cara de la fibra se observa totalmente cubierta y se genera un relieve muy pronunciado.

2.4.2 Generación de microburbujas

Una vez realizada la fotodeposición de nanopartículas de plata en la fibra óptica es posible llevar a cabo la generación de microburbujas. El arreglo experimental para la generación de microburbujas es el mismo utilizado en la técnica de fotodeposición, la diferencia radica que en la punta de la fibra óptica ya existen nanopartículas de plata fotodepositadas y la celda de vidrio contiene únicamente etanol (ver figura 2.8). La generación de microburbujas se realizó utilizando tres fibras ópticas con nanopartículas de plata las provocaron una pérdida de potencia de 6.7 dB, 2.2 dB y 0.3 dB. Los resultados de la generación de microburbujas se muestran en la figura 2.18, la fibra óptica presenta una elevada concentración de nanopartículas de plata inmovilizadas en la cara de la fibra óptica, ocasionando una disminución de potencia de 6.71 dB, al transcurrir tan solo 0.56 s se observa la generación de una burbuja de un tamaño menor a 7 μm , en un lapso de 1 s aumentando su diámetro a 45 μm , para un tiempo de 2.05 s su diámetro a aumentado a 180 μm , para 4 s su diámetro es 252 μm y al paso de 6 s la burbuja a alcanzado su tamaño crítico presentando su desprendimiento de la fibra óptica con un diámetro de 290 μm .

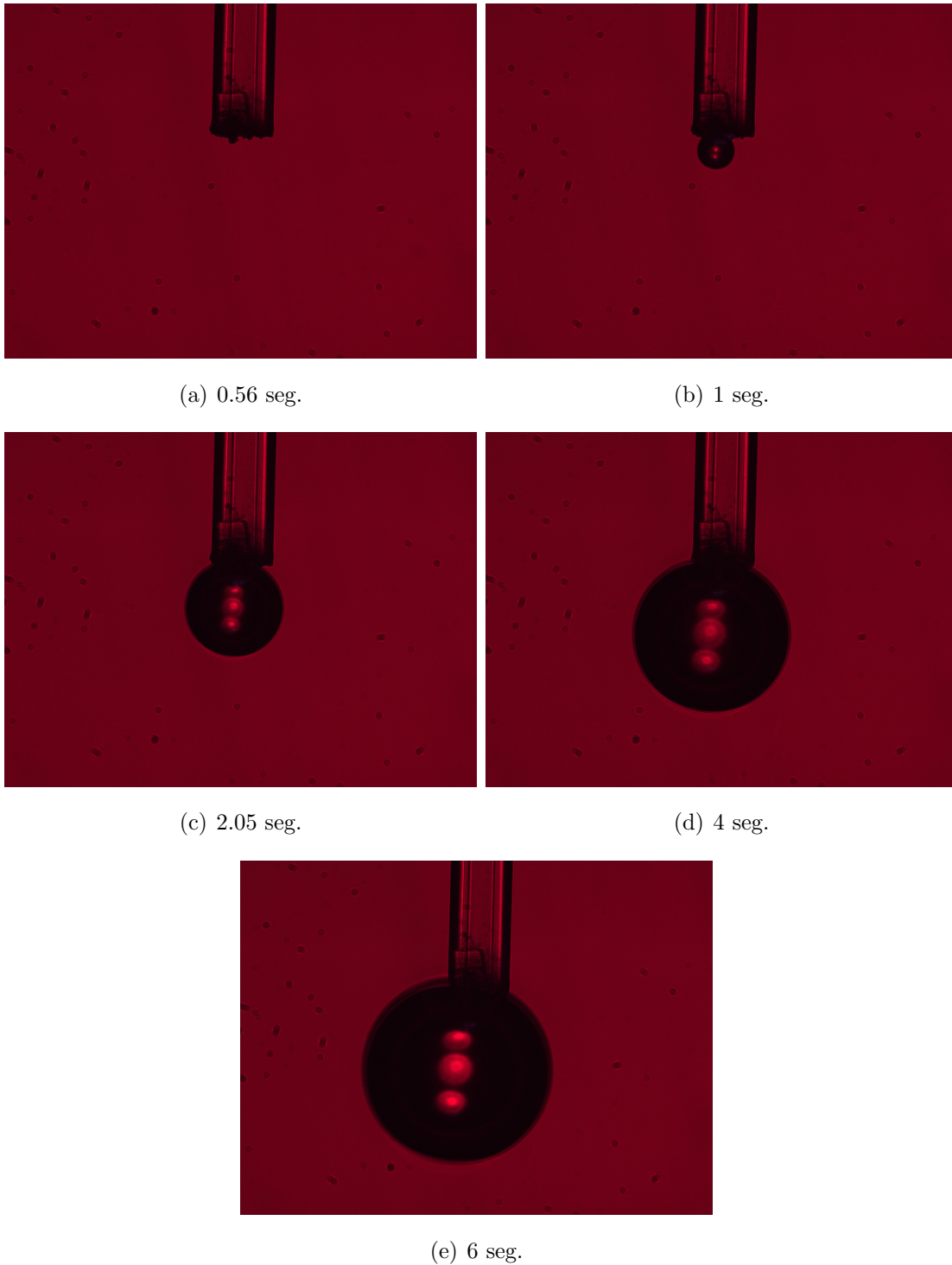


Figura 2.18: Evolución de una microburbuja a través del tiempo generada con una fibra óptica con nanopartículas de plata inmovilizadas mediante el método de fotodeposición que provocan una disminución de potencia de 6 *dB*.

La segunda fibra óptica con nanopartículas de plata inmóviles en su cara, ocasiona una pérdida de potencia de 2.2 dB , permite la generación de una burbuja con un tiempo de vida mayor, su tasa de crecimiento es menor y es más estable. La potencia del láser para su generación es mayor debido a que la cantidad de nanopartículas depositadas es mucho menor en comparación al caso anterior, como se muestra en la figura 2.17, la potencia requerida fue de 100 mW . En la figura 2.19 se observa que al pasar 6 s la generación de una microburbuja al final del microchorro de vapor que asciende al aumentar su tamaño, al paso de 24 s la burbuja presenta un diámetro aproximado de $400 \mu\text{m}$, transcurridos 32 s la burbuja alcanza un diámetro de $450 \mu\text{m}$ y es hasta el paso de 48 s que esta se desestabiliza hasta ascender a la superficie.

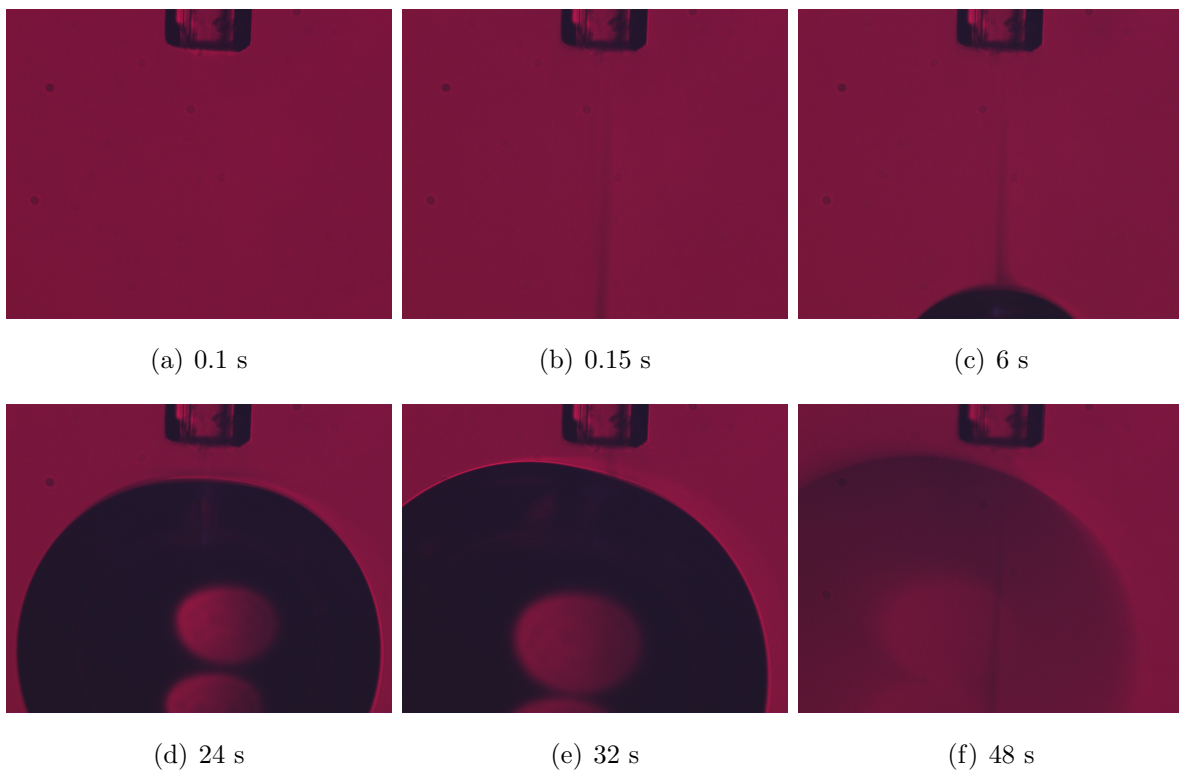


Figura 2.19: Evolución de una microburbuja a través del tiempo generada con una fibra óptica con nanopartículas de plata inmovilizadas mediante el método de fotodeposición que provocan una disminución de potencia de 2.2 dB .

La tercera fibra óptica con nanopartículas fotodepositadas en su punta utilizada en este trabajo de investigación presenta una concentración de nanopartículas muy baja las cuales provocan una disminución de potencia de 0.33 dB. Cuando el depósito de nanopartículas es escaso en la cara de la fibra óptica, la potencia requerida es mucho mayor para la generación de microburbujas debido a que la superficie del microcalentador es menor y el tiempo requerido para la generación de una microburbuja también aumenta.

En la figura 2.20, para un tiempo de 0.12 s se presenta un microchorro con una longitud pequeña y burbujas al final de este que rápidamente ascienden. Al paso de 5 s se genera una burbuja que se mantiene estable en un extremo del microchorro, la burbuja aumenta su diámetro y asciende rápidamente. Transcurridos 26 s la burbuja alcanza un diámetro aproximado de $280 \mu\text{m}$ y 2 s después se desestabiliza desprendiéndose del microchorro.

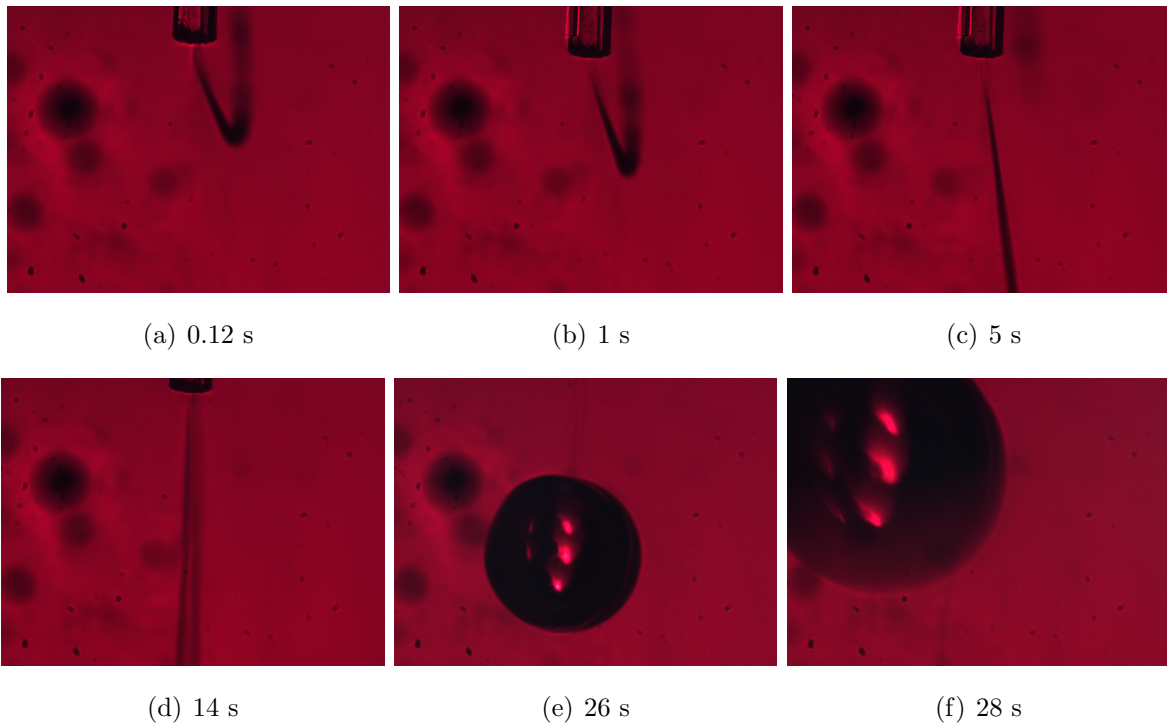


Figura 2.20: Evolución de una microburbuja a través del tiempo generada con una fibra óptica con nanopartículas de plata inmovilizadas mediante el método de fotodeposición que provocan una disminución de potencia de 0.45 dB.

Las microburbujas se generan a partir del calentamiento altamente localizado originado por las nanopartículas depositadas en la cara de la fibra óptica que funcionan como un microcalentador. Un fenómeno implícito en la generación es el supercalentamiento que debe alcanzar una temperatura mayor a la del punto de ebullición del líquido que rodea a la fibra óptica, que para el etanol es de $78.37\text{ }^{\circ}\text{C}$. El depósito de nanopartículas ofrece un área de absorción no uniforme en la cuál se originan fluctuaciones térmicas que facilitan la generación espontánea de microburbujas originadas por la vaporización del etanol como se muestra en la figura 2.18.

A potencias menores a 50 mW la fibra no origina la suficiente temperatura y la punta se enfría eficazmente en el etanol. Sin embargo, una radiación láser de potencia aproximada a 100 mW es suficiente para que el calentamiento que se origina provoque burbujas de vapor. Cuando el etanol se calienta, los gases disueltos en la proximidad de la punta liberan burbujas de vapor, se presentan mecanismos de transferencia de calor, donde se da una evaporación de microcapas, por debajo de la microburbuja se da microevaporación y en la parte superior macroevaporación. El etanol se evapora dentro de las burbujas, de manera que las burbujas están compuestas de vapor de etanol y estas aumentan su tamaño mientras la punta mantenga la temperatura suficiente para evaporar el líquido circundante. Cuando estas alcanzan un tamaño crítico, las burbujas se separan y ascienden a la superficie. Las microburbujas surgen en los mismos puntos de la superficie de la punta, que corresponden a las zonas de mayor temperatura, es una consecuencia de la inhomogeneidad en la capa de nanopartículas de plata depositadas en la punta, la energía absorbida no es uniforme y por lo tanto es mayor en las regiones más gruesas. Las cavidades formadas favorecen el proceso de ebullición nucleada creando pequeñas burbujas que después darán pie a una de mayor tamaño unida a la punta de la fibra óptica.

Un fenómeno importante registrado en la generación de microburbujas es la formación de microchorros de vapor a potencias promedio de 100 mW como se muestra en la figura 2.20. Los microchorros son originados en la punta de la fibra óptica y su longitud es dependiente de la potencia, a potencias altas el microchorro aumenta su longitud y viceversa. Esta característica será de suma importancia en la manipulación de microburbujas.

Cuando el flujo de calor aumenta dramáticamente la tasa de puntos de nucleación aumenta, provocando la generación de los microchorros o columnas de vapor. El tiempo de vida de un microchorro solo depende del tiempo en que se encuentre encendido el láser y las nanopartículas se encuentren depositadas en la punta de la fibra óptica. Los puntos de nucleación se mantienen unidos a la punta y permiten la formación de microburbujas en un extremo, la microburbuja presenta una flexión donde es impactada por el microchorro aumentando su tamaño alimentada por el vapor del microchorro figura 2.21.

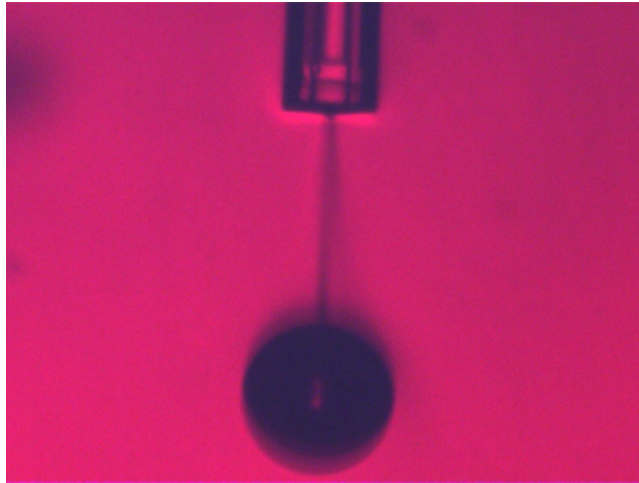


Figura 2.21: Generación de microburbujas en un extremo de un microchorro.

La generación de microburbujas es dependiente de la deposición de nanopartículas en la cara de la fibra óptica, de la potencia láser y del punto de ebullición del líquido en el que se sumerge la fibra óptica. Una gran cantidad de nanopartículas de plata inmovilizadas en la punta de la fibra óptica las cuales ocasionan una pérdida de potencia muy grande, originan microburbujas con una potencia aproximada de 38 mW , debido a una superficie mayor cubierta de nanopartículas, aumenta la cantidad de calor generado y ocasiona una tasa de crecimiento de la burbuja elevada. Es verdad que la potencia requerida para la generación es menor, sin embargo, los efectos termodinámicos e hidrodinámicos aumentan con ello, ocasionado por calor altamente localizado en la punta de la fibra óptica.

2.5 Conclusiones

En el presente capítulo se describieron y discutieron los resultados experimentales de la generación de microburbujas. En primer lugar se presentan los resultados de la técnica de fotodeposición de nanopartículas de plata para cuatro fibras ópticas y en segundo lugar la formación de microburbujas.

Se describieron los procesos fundamentales en la generación de burbujas, como lo es la ebullición nucleada y los mecanismos de transferencia de calor implícitos en el proceso de formación.

La generación de microburbujas es un fenómeno derivado del supercalentamiento de las nanopartículas depositadas en la cara de una fibra óptica, así como la presencia de microchorros de vapor que posibilitan la generación de una microburbuja en un extremo.

La microburbuja surge de puntos de nucleación en la cara de la fibra óptica, que permiten la generación de un microchorro de vapor o la formación de una burbuja adherida a la cara de la fibra óptica. Entre mayor sea el número de sitios de nucleación, la tasa de formación de microburbujas aumenta. La evaporación es originado a través de microcapas, la primera es microevaporación por debajo de la burbuja y la segunda es macroevaporación por encima de la burbuja.

El tamaño de la microburbuja es dependiente de la potencia y de la concentración de nanopartículas de plata, un parámetro a considerar es el punto de ebullición del líquido que entre menor sea, el tiempo de ebullición es menor, así como la temperatura requerida. El proceso de generación de microburbujas usando luz láser es una técnica fácil de aplicar y que no necesita demasiados recursos para llevarse a cabo.

Referencias

- [1] D. W. Berry, N. R. Heckenberg y H. Rubinsztein-Dunlop, “Effects associated with bubble formation in optical trapping”, *Journal of Modern Optics*, Vol. 47, 1575-1585, 2000.
- [2] R. Pimentel-Domínguez, J. Hernández-Cordero y R. Zenit, “Microbubble generation using fiber optic tips coated with nanoparticles”, *Optics Express*, Vol. 20-8, 8732-8740, 2012.
- [3] H. Ramachandran, A. K. Dharmadhikari, K. Bambardekar, H. Basu , J. A. Dharmadhikari, S. Sharma y D. Mathur, “Optical-tweezer-induced microbubbles as scavengers of carbon nanotubes”, *Nanotechnology*, Vol. 21, 245102-9, 2010.
- [4] V. I. Yusupov, V.M. Chudnoskii and V.N. Bagratashvili, “Laser-induced hydrodynamics in water-saturated tissues: 1. Generation of bubbles in liquid”, *Laser Phys*, Vol. 20-7, 1641-1646, 2010.
- [5] V. I. Yusupov, V.M. Chudnoskii and V.N. Bagratashvili, “Laser-induced hydrodynamics in water-saturated tissues: 2. Effect on delivery fiber”, *Laser Phys*, Vol. 21-7, 1230-1234, 2011.
- [6] E. Hecht, “Óptica”, Addison Wesley Iberoamericana, 66, 2000.
- [7] G. Basilio Sánchez, “Del láser I: Principio de funcionamiento del láser”, *La naturaleza de la Materia, Cienciorama*, 237, 2000.
- [8] M. Vendrell, “Óptica Cristalina”, 2002.
- [9] Y. A. Çengel, “Transferencia de calor y masa”, Ed. Mc Graw Hill, 2007.

- [10] S. Nukiyama, "The maximum and minimum values of the heat transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure", *J. Jpn. Soc. Mech. Engrs* 37, 367-374, 1934 or *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 9, 1419-1433, 1966.
- [11] D. E. Forster and R. Greif, "Heat transfer to a boiling liquid-mechanism and correlation", *J. Heat Transfer*, Vol. 81c, 43-53, 1959.
- [12] M. Buchholz, "A study of local heat transfer mechanisms along the entire boiling curve by means of microsensors", *Int. J. Thermal Sciences*, Vol. 45, 269-283, 2006.
- [13] F.D. Moore and R.B. Mesler, "The measurement of rapid surface temperature fluctuations during nucleate boiling", *AIChE Journal*, Vol. 7-4, 620-624, 1961.
- [14] R. R. Sharp, "The nature of liquid film evaporation during nucleate boiling", NASA-TDN, D-3943, 1997.
- [15] V. K. Dhir, "Boiling heat transfer", *Annu. Rev Fluid Mech*, Vol. 30, 365-401, 1998.
- [16] M. S. Plesset and A. Prosperetti, "Flow of vapor in liquid enclosure", *J. Fluid Mech*, Vol. 78, 433-444, 1976.
- [17] R. C. Lee y J.E. Nydahl, "Numerical calculation of bubble growth in nucleate boiling from inception through departure", *J. Heat transfer*, Vol. 111, 474-479, 1989.
- [18] M. G. Cooper and A.J.P. Lloyd, "The microlayer in nucleate pool boiling", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 12, 895-913, 1969.
- [19] W. M. Rohsenow and J.P. Hartnett, "Handbook of heat transfer", Ed. McGraw-Hill, New York
- [20] H. Auracher and W. Marquardt, "Experimental studies of boiling mechanisms in all boiling regimes under steady-state and transient conditions", *Int. J. Thermal Sciences*, Vol. 41, 586-598, 2002.
- [21] N. Zuber, "Nucleate boiling: the region of isolated bubbles and the similarity with natural convection". *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 6, 53-78, 1963.

- [22] V. P. Carey. "Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena". Hemisphere Publishing Corporation, New York, NY, 1992.
- [23] D. M. Anderson and S.H. Davis. "Local Fluid and heat flow near contact lines". J. Fluid Mech, Vol. 268, 231-265, 1994.
- [24] J. Blum, T. Lüttich and W. Marquardt. "Temperature wave propagation as a route from nucleate to film boiling". G.P. Celata, P. Di Marco, R.K. Shah(Eds). Two-Phase Flow Modelling and Experimentation, Pisa, Italy, Vol. 23, 137-144, 1999.
- [25] G. S. McNab y A. Meisen, "Thermophoresis in liquids", J. Colloid Interface Sci, Vol. 44, 339-346, 1973.
- [26] E. Ruckenstein, "Can Phoretic motions be treated as interfacial tension gradient driven phenomena", J. Colloid Interface Sci, Vol. 83, 77-81, 1981.
- [27] A. F. Andreev, "Thermophoresis in Liquids", Sov. Phys. JETP, Vol. 67, 117-120, 1988.
- [28] J. C. Giddings, P. M. Shiundu y S. N. Semenov, "Thermophoresis of metal particles in a liquid, J. Colloid Interface Sci, Vol. 176, 454-458, 1995.
- [29] J.W. Nicholson, R.S. Windeler y D.J. DiGiovanni, "Optically driven deposition of single-walled carbon-nanotube saturable absorbers on optical fiber end-faces", Optics Express, Vol.15, No. 15, 9176-9183, 2007.
- [30] [https : //www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber = FG105LCA](https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=FG105LCA). Recuperado el 2 de noviembre del 2016.
- [31] [http : //www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI_angM01C01/co/Contenu12.html](http://www.optique-ingenieur.org/en/courses/OPI_angM01C01/co/Contenu12.html). Recuperado el 15 de octubre del 2016.
- [32] [http : //www.spectra-physics.com/products/q-switched-lasers/explorer-one](http://www.spectra-physics.com/products/q-switched-lasers/explorer-one). Recuperado el 2 de noviembre del 2016.

- [33] [https : //es.wikipedia.org/wiki/Filtro%C3%B3ptico](https://es.wikipedia.org/wiki/Filtro%C3%B3ptico). Recuperado el 2 de noviembre del 2016.
- [34] [https : //www.newport.com/p/FSQ – OG550](https://www.newport.com/p/FSQ-OG550). Recuperado el 2 de noviembre del 2016.
- [35] [http : //pixelink.com/wp – content/uploads/2015/05/Datasheet_{PL} – B776.pdf](http://pixelink.com/wp-content/uploads/2015/05/Datasheet_PL-B776.pdf). Recuperado el 25 de agosto del 2016.
- [36] [https : //www.newport.com/p/M – 40X](https://www.newport.com/p/M-40X). Recuperado el 2 de noviembre del 2016.
- [37] [http : //www.edmundoptics.com/microscopy/infinity – corrected – objectives/mitutoyo – infinity – corrected – long – working – distance – objectives/46144/](http://www.edmundoptics.com/microscopy/infinity-corrected-objectives/mitutoyo-infinity-corrected-long-working-distance-objectives/46144/). Recuperado el 2 de noviembre del 2016.
- [38] [https : //www.newport.com/p/2936 – R](https://www.newport.com/p/2936-R). Recuperado el 16 de noviembre del 2016.
- [39] [https : //www.newport.com/p/918D – SL – OD1R](https://www.newport.com/p/918D-SL-OD1R). Recuperado el 25 de diciembre del 2016.
- [40] [https : //www.newport.com/p/819C – SF – 6](https://www.newport.com/p/819C-SF-6). Recuperado 16 de noviembre del 2016.

CAPÍTULO 3

MANIPULACIÓN DE MICROBURBUJAS

En este capítulo se describe la metodología seguida para llevar a cabo la manipulación de microburbujas. Además se presentan los arreglos experimentales utilizados para la manipulación de microburbujas usando luz láser y los fenómenos físicos implicados.

3.1 Introducción

En la actualidad la generación y manipulación de microburbujas ha tomado gran relevancia en diversas investigaciones debido a su presencia en diversos fenómenos como lo es la técnica de atrapamiento por pinzas ópticas y en el tratamiento de biotejidos [1]. Las aplicaciones son bastas desde el transporte de partículas hasta implosión de estas en un fenómeno denominado cavitación [2].

Este trabajo de tesis aborda la manipulación de microburbujas a través de dos métodos, el primero es intrínseco a la generación de microburbujas por una punta depositada con nanopartículas metálicas y consiste en la adherencia de la microburbuja en la cara de la fibra. El segundo método utiliza la formación de microchorros de vapor y posteriormente la generación de una microburbuja en un extremo de el microchorro. La manipulación tiene como variables la potencia láser y el movimiento mecánico de la fibra óptica. Los fenómenos físicos implícitos en la manipulación de microburbujas aún no han sido

comprobados en su totalidad, sin embargo se han podido identificar experimentalmente aquellos que están presentes en este proceso como lo es la convección de Marangoni, termoforesis, ebullición nucleada, fuerza de Bjerknes y presión de radiación.

3.2 Marco teórico

Se presentan los conceptos de transferencia de calor por convección, así como las fuerzas implícitas en la formación y manipulación de microburbujas. Se introducen los términos de convección de Marangoni y la dinámica que presentan las burbujas que se encuentran inmersas en un medio acuoso.

3.2.1 Convección

La convección es una de las tres formas de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. La conducción y la convección son similares ya que ambos requieren un medio material, la convección tiene la característica que se presenta en presencia de un movimiento masivo de éste y dentro de un gradiente de temperatura. Sin embargo, la transferencia de calor a través de un líquido o gas puede ser por conducción o convección, dependiendo de la presencia de movimiento masivo del fluido. La conducción se podría considerar como el límite de la convección en el caso de un fluido en reposo. La experiencia muestra que la transferencia de calor por convección depende con intensidad de las propiedades viscosidad dinámica, conductividad térmica, densidad y calor específico del fluido, así como de la velocidad del fluido. Debido a su dependencia de tantas variables la convección es el mecanismo más complejo de transferencia de calor [3].

La convección se clasifica como convección natural (o libre) y forzada, dependiendo de la manera en que se inicia el movimiento del fluido. En la convección forzada se obliga a que el fluido fluya sobre una superficie o en un tubo por medios externos, como una bomba o un ventilador. En la convección natural, cualquier movimiento del fluido es causado por medios naturales, como el efecto de flotación, el cual se manifiesta como la subida del fluido caliente y la caída del fluido frío [4].

3.2.2 Mecanismo físico de la convección natural

En la convección natural el flujo resulta solamente de la diferencia de temperatura del fluido en la presencia de una fuerza gravitacional. La densidad de un fluido disminuye con el incremento de temperatura. En un campo gravitacional, dichas diferencias en densidad causadas por las diferencias en temperaturas originan fuerzas de flotación. Las fuerzas de flotación generan el movimiento del fluido. Sin una fuerza gravitacional la convección natural no es posible. En convección natural una velocidad característica no es fácilmente disponible [4].

3.2.3 Corrientes de Marangoni

Además del fenómeno de supercalentamiento, otro efecto asociado a la formación de burbujas presente, se conoce como convección de Marangoni. Este efecto es el movimiento del fluido impulsado por la dependencia de la temperatura y la tensión superficial. La convección termocapilar o de Marangoni es el movimiento de un fluido debido a un gradiente de tensión superficial provocado por una variación de la temperatura en la frontera entre dos fluidos o en una superficie libre [5].

En condiciones de microgravedad, la convección de Marangoni es dominante. Su efecto puede observarse en la migración de burbujas en la dirección del gradiente de temperatura. Este fenómeno es ocasionado cuando el gradiente de temperatura alrededor de la burbuja provoca una diferencia de tensión superficial a lo largo de la superficie de la burbuja.

La superficie del gradiente de tensión lleva a una tensión tangencial sobre la superficie de la burbuja, que arrastra el líquido vecino. El flujo del líquido ejerce una fuerza sobre la burbuja y hace que se mueva a la región caliente. La siguiente expresión es la velocidad característica de migración por termocapilaridad de una microburbuja en convección de Marangoni [6]:

$$v_0 = \frac{|d\sigma/dT||\nabla T| R}{\mu}, \quad (3.1)$$

donde R es el radio de la burbuja, μ es el coeficiente de viscosidad dinámica, T temperatura y σ tensión superficial. Además de la resistencia normal experimentada por una burbuja dentro de un medio acuoso, podemos identificar la fuerza de Marangoni. Esta actúa sobre la burbuja en la dirección de disminución de la tensión superficial. En presencia de un gradiente de temperatura dT/dx_1 , daría lugar a una fuerza adicional sobre la burbuja en dirección del fluido más caliente y cuya magnitud es [7]:

$$\vec{F}_m = 2\pi R^2(-dS/dT)(dT/dx_1), \quad (3.2)$$

donde S es la tensión superficial y x_1 coordenada del punto del espacio considerado.

3.2.4 Fuerza de Bjerknes

Las fuerzas de radiación acústica hacen referencia a las fuerzas de Bjerknes, cuyo nombre es debido a sus descubridores C.A. Bjerknes y V.F.K. Bjerknes [8]. Dichas fuerzas son divididas en dos tipos, fuerzas primarias de Bjerknes que son experimentadas por burbujas individuales y la fuerza secundaria de Bjerknes que es experimentada entre dos burbujas. Estas son las principales fuerzas que provocan que las burbujas migren en un campo acústico a nodos o antinodos de la onda estacionaria.

3.2.4.1 Fuerza primaria de Bjerknes

Cuando una burbuja de gas en el líquido se somete a una campo de presión acústica, que puede sufrir pulsaciones de volumen. Si el gradiente de presión acústica no es cero, entonces se puede acoplar con las oscilaciones de burbujas a producir una fuerza de traslación en la burbuja. Esto es la fuerza primaria de Bjerknes. Las burbujas de un tamaño más grande que la resonancia viajan por un gradiente de presión [9]. La fuerza primaria de Bjerknes esta dada por las siguiente expresión:

$$\vec{F}_{B1} = -\nabla p_a \langle V(t) \cos(wt) \rangle, \quad (3.3)$$

donde p_a presión de la onda, V es el volumen de la burbuja y w frecuencia circular de la onda de presión.

Las fuerzas hacia los nodos de presión o antinodos de presión, dependen del signo del promedio. La atracción a los nodos o antinodos es dependiente al radio de la burbuja (R) y el radio lineal de resonancia (R_{res}) como se muestra a continuación:

- $R < R_{res}$, las burbujas son atraídas hacia los antinodos de presión.
- $R > R_{res}$, las burbujas son atraídas hacia los nodos de presión.

La repulsión de las burbujas a los antinodos de presión con radio mayor a R_{res} ha sido reportada por Goldman y Ringo [10], y es fácilmente observable en experimentos de cavitación, donde estas grandes burbujas se alojan lejos de los antinodos de presión teniendo la posibilidad de coalescer. La atracción de las burbujas con radios menores al radio de resonancia fue comprobada experimentalmente por Crum y Eller con amplitudes de excitación moderadas [11].

3.2.4.2 Fuerza secundaria de Bjerknes

La fuerza secundaria explica la atracción o repulsión entre dos burbujas bajo la influencia de una onda acústica. Matemáticamente, la fuerza secundaria de Bjerknes se calcula como el tiempo promedio de la fuerza instantánea que se ejerce sobre una burbuja por el líquido circundante acústicamente excitado. Por consiguiente el signo de la fuerza de Bjerknes muestra la dirección resultante de la traducción de la burbuja en un campo acústico. Los argumentos que conducen a la expresión de la fuerza secundaria de Bjerknes pueden extenderse al caso en que la burbuja también experimente el campo acústico radiado por una segunda burbuja. El promedio de la fuerza resultante durante un período acústico será

$$\overline{F_{B2}} = -\frac{\rho}{4\pi} \langle \dot{V}_1 \dot{V}_2 \rangle \frac{\vec{x}_2 - \vec{x}_1}{|\vec{x}_2 - \vec{x}_1|} \quad (3.4)$$

donde V_1, V_2 son el volumen de cada burbuja y \vec{x}_1, \vec{x}_2 la posición espacial de sus centros. En el caso de oscilaciones lineales se puede concluir:

- Una burbuja con radio más pequeño que el radio de resonancia y una con radio mayor al de resonancia se repelen una a otra.

- Dos burbujas con radios menores o mayores que el radio de resonancia, experimentan una fuerza de atracción entre sí.

3.2.5 Cohesión y Adhesión

La adhesión es la propiedad de la materia por la cual se unen y plasman dos superficies de sustancias iguales o diferentes cuando entran en contacto, y se mantienen juntas por fuerzas intermoleculares. La cohesión es distinta de la adhesión. La cohesión es la fuerza de atracción entre partículas adyacentes dentro de un mismo cuerpo, mientras que la adhesión es la interacción entre las superficies de distintos cuerpos [12]. Los líquidos y los gases son diferentes en la distribución de sus átomos, en los líquidos, los átomos se encuentran más alejados unos de otros, en comparación con los átomos de un sólido, la fuerza de cohesión que existen entre ellos son más débiles, los átomos vibran con mayor libertad que en los sólidos, permitiendo que sufran pequeñas traslaciones. La cohesión y la adhesión son fuerzas que afectan a los líquidos. La cohesión se observa en la unión de dos gotas y la adhesión cuando dos placas humedecidas se pegan. Estas dos fuerzas originan el fenómeno de tensión superficial, esto es debido a que las fuerzas de cohesión de las moléculas en el interior del líquido se atraen en todas las direcciones a excepción de su superficie.

3.2.6 Presión de radiación en el régimen de rayos ópticos

En el régimen de rayos ópticos un haz de luz es descompuesto en múltiples rayos individuales. Cada rayo puede cambiar su dirección cuando este es reflejado o refractado (ver figura 3.1). El modelo de rayos ópticos de un simple haz de una trampa óptica para calcular la fuerzas ópticas sobre una esfera de diámetro $\gg \lambda$. Si se considera la fuerza de un simple rayo de potencia P sobre una esfera dieléctrica con un ángulo de incidencia θ con un momento incidente de nP/c . La fuerza total es el resultado de la suma de cada uno de los rayos reflejados que compone el haz de luz de potencia PR y el número de rayos que salen de la esfera decreciendo su potencia PT^2, PT^2R, \dots , donde R y T son los coeficientes de reflexión y transmisión de Fresnel sobre la superficie con un ángulo θ . La fuerza neta esta compuesta de dos fuerzas, F_z y F_γ dadas por las

siguientes expresiones [13]:

$$\vec{F}_z = \vec{F}_s = \frac{nP}{c} \left\{ 1 + R \cos 2\theta - \frac{T^2 [\cos(2\theta - 2r) + R \cos 2\theta]}{1 + R^2 + 2R \cos 2r} \right\}, \quad (3.5)$$

$$\vec{F}_\gamma = \vec{F}_g = \frac{nP}{c} \left\{ R \sin 2\theta - \frac{T^2 [\sin(2\theta - 2r) + R \sin 2\theta]}{1 + R^2 + 2R \cos 2r} \right\}, \quad (3.6)$$

donde θ y r son los ángulos de incidencia y el de refracción. F_z es la componente en la dirección del rayo incidente como la fuerza de esparcimiento F_s de un simple rayo. F_γ es la componente en la dirección perpendicular del rayo como la fuerza de gradiente F_g de un simple rayo.

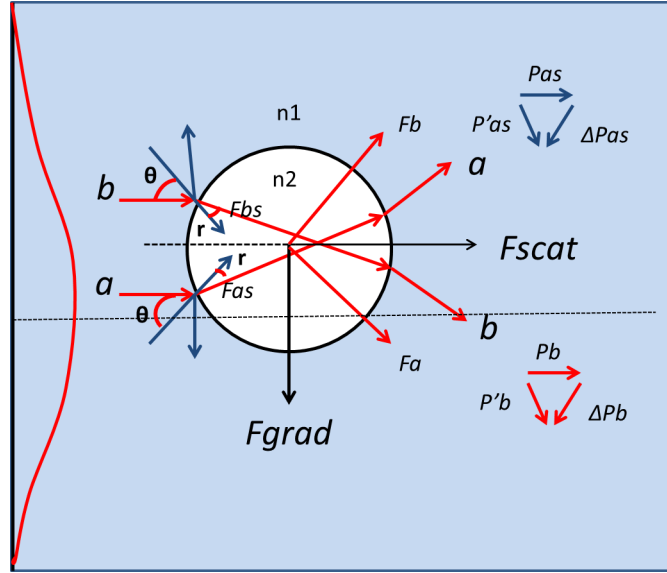


Figura 3.1: Trazo de rayos, descripción cualitativa de la fuerza de gradiente y la fuerza de esparcimiento. La primera debido a la refracción y la segunda a la reflexión de la luz sobre la burbuja.

3.2.7 Dinámica de burbujas

Una comprensión completa del proceso de transferencia de calor de ebullición requiere un análisis de la termodinámica de las burbujas y la hidrodinámica del flujo resultante de la salida de las burbujas de la superficie del calentador. El crecimiento de burbujas

de vapor puede ser un fenómeno físico complejo particularmente. El crecimiento de la burbuja y de salida están influenciados por la orientación de la superficie, el ángulo de contacto, el perfil de espesor y la temperatura en la capa límite térmica, la proximidad de las burbujas entre sí, la difusión térmica transitoria dentro de la pared al líquido adyacente, la forma de la burbuja durante el crecimiento, y así sucesivamente. Se forma una burbuja de vapor y crece en un líquido, siempre y cuando la presión de vapor de la burbuja es mayor que la presión del líquido ambiente $p_b > p_l$. La estabilidad se alcanza cuando $p_b - p_l = 2\sigma/r_b$ que forma una burbuja en equilibrio y que se conoce como la ley de Young-Laplace [14].

La ebullición es un proceso cíclico, el ciclo de ebullición es seguido por un período de espera, que se produce en el sitio de nucleación justo después de la salida de una burbuja y antes de que se forma una nueva burbuja. La salida de la burbuja rompe la capa límite térmica y se forma una nueva burbuja sólo después de que los efectos de la perturbación desaparecen [15]. La nucleación producto cuando el espesor de la capa límite térmica alcanza una fracción crítica del radio del núcleo. Este período de espera entre dos burbujas consecutivos se puede describir de manera significativa sólo en el rango de flujo de calor inferior, donde las burbujas son discretas [16].

La dinámica de la burbuja desempeña un papel clave en el desarrollo de cualquier modelo analítico que pretende predecir los coeficientes de ebullición nucleada y de transferencia de calor. El caso más simple de analizar es la de una sola burbuja esférica creciente dentro de una distancia infinita en un líquido, de manera uniforme y sobrecalentado de una pared. Las diferentes etapas de un burbuja se muestran a continuación:

- Nucleación: La nucleación es un proceso a escala molecular en el que se forma una pequeña burbuja de un tamaño justo por encima de la de equilibrio termodinámica.
- Crecimiento de la burbuja
 - Inercia controlada: El crecimiento inicial a partir del tamaño de nucleación es controlado por la inercia y de la superficie los efectos de tensión. La tasa

de crecimiento es pequeña al principio pero aumenta con el tamaño de la burbuja como la tensión superficial se hace menos importante.

- Térmicamente controlado: La transferencia de calor se vuelve cada vez más importante mientras que los efectos de inercia pierden importancia hasta que la burbuja llega a una etapa de crecimiento asintótico en el que se controla por la tasa de calor transferido desde el líquido circundante para facilitar la evaporación en la superficie de la burbuja.
- Colapso: Durante el proceso de crecimiento de la burbuja al entrar en contacto con el líquido subenfriado. Los fenómenos de control para el colapso son muchos, pero se encuentran en el orden inverso para los de crecimiento. De lo contrario la burbuja se aleja de la superficie del calentador.

En teoría, la velocidad de aumento de la burbuja puede ser determinada por el equilibrio de las fuerzas en la burbuja. Las fuerzas involucradas en la dinámica de una burbuja dentro de un fluido bajo la influencia de una onda ultrasónica y una onda electromagnética son: la fuerza de Bjerknes, la fuerza de arrastre y la fuerza de presión de radiación que empuja a la burbuja hacia abajo, mientras que la fuerza de flotación la empuja hacia arriba como se muestra en la figura 3.2.

$$\overrightarrow{F_{Bjrk}} + \overrightarrow{F_D} + \overrightarrow{F_{Bu\sigma}} + \overrightarrow{P_R} + \overrightarrow{F_M} = 0 \quad (3.7)$$

La fuerza de arrastre es calculada bajo la suposición de que la burbuja tiene un movimiento uniforme, es decir a bajos valores de números de Reynolds el fluido presenta un movimiento laminar y cuando estos son mayores el flujo se torna turbulento desestabilizando a la microburbuja. La ecuación general de la fuerza de arrastre esta dada por la siguiente expresión:

$$\overrightarrow{F_D} = 6v\mu\pi R, \quad (3.8)$$

donde v es velocidad de desplazamiento, μ viscosidad dinámica del medio acuoso y R radio de la burbuja.

La fuerza de flotabilidad, \vec{F}_{Buo} , esta definida por la densidad del fluido ρ multiplicado por el volumen del fluido desplazado ($(4/3)\pi R^3$) y la aceleración de la gravedad g . La ecuación de la fuerza de flotabilidad \vec{F}_{Buo} es:

$$\vec{F}_{Buo} = \rho(4/3)\pi R^3 g. \quad (3.9)$$

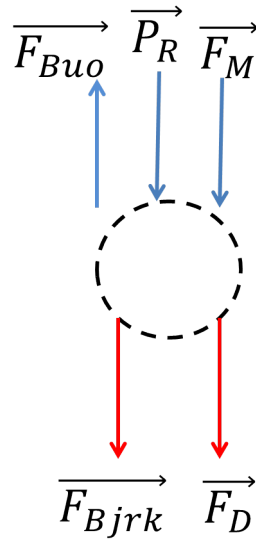


Figura 3.2: Diagrama de fuerzas de una burbuja sobre un líquido y bajo la influencia de una onda ultrasónica. \vec{F}_{Bjrk} es la fuerza de Bjerknes, \vec{F}_D es la fuerza de arrastre (F. Stoke), \vec{F}_{Buo} es la fuerza de flotabilidad y \vec{F}_M es la fuerza de Marangoni.

Los efectos hidrodinámicos y termodinámicos (ver figura 3.2) propios de la generación de microburbujas dentro de un fluido proporcionan una método de manipulación de microburbujas. Una acercamiento inicial a la manipulación de microburbujas es la adherencia natural que tiene la microburbuja sobre la superficie que la genera y que la confina a ella, debido a la fuerza de adhesión. La manipulación de la fuente calefactora y generadora de la microburbuja otorga la posibilidad de manipular la burbuja a voluntad sin que esta se desprenda. Sin embargo los efectos térmicos permiten obtener un segundo método de manipulación que lleva a separar a la microburbuja de la fuente calefactora, haciendo más eficiente su manipulación y aumentando su versatilidad. La formación de microchorros de vapor cuya longitud es dependiente de la potencia del láser y permite

la formación de una microburbuja estable y manipulable. La presente investigación aborda la manipulación de microburbujas separadas de la cara de la fibra óptica y unida a esta, permitiendo tener un control axial dependiente de la potencia y un control tridimensional a través de actuadores colocados en la fibra.

3.3 Métodos y materiales

El arreglo óptico para la visualización y manipulación de microburbujas esta compuesto de una fibra óptica multimodo, marca Thorlabs, modelo *FG105LCA*, con un núcleo de $105\ \mu\text{m}$ y N.A. 0.22. Nanopartículas de plata las cuales fueron previamente fotodepositadas en su punta. La luz proveniente de un láser de la marca Spectra-Physics, modelo Explorer 532nm Laser System, se acopló a la fibra óptica a través de un objetivo $40x$ de la marca Newport. La escena fue iluminada con una fuente compuesta de 3 leds, color blanco, potencia máxima $0.24\ \text{W}$ y tamaño $3\ \text{mm}$. La fuente de iluminación fue alimentada a través de una fuente de voltaje variable bipolar, marca GWINSTEK, modelo *GPS – 3303*. Se utilizó un objetivo de la marca Mitutoyo, magnificación de $10x$ y una apertura numérica de 0.26. Un filtro marca Newport, modelo *FSQ – 550* y una cámara marca Pixelink, modelo *PL – B776*, 3.0 megapíxeles FireWire fueron empleados. La fibra óptica fue introducida en una celda de vidrio, marca Luzeren de $3\ \text{mL}$ que en su interior contiene etanol. Para obtener un control preciso sobre la fibra óptica se utilizó una base Ultralign Integrado - rodillos cruzados teniendo etapa XYZ, marca Newport (ver figura 3.3).

3.4 Resultados y discusiones

A partir de la generación de las microburbujas es posible hablar de su manipulación. La manipulación más sencilla de microburbujas surge debido a la propia naturaleza de su mecanismo de generación, es decir, debido a que ocurre directamente en la cara de la fibra óptica y que la microburbuja se encuentra adherida a esta debido a la fuerza de adhesión y a la fuerza de Marangoni. La primera actúa uniendo a la microburbuja a la cara de la fibra óptica y la segunda la desplaza al centro donde se encuentra el punto de

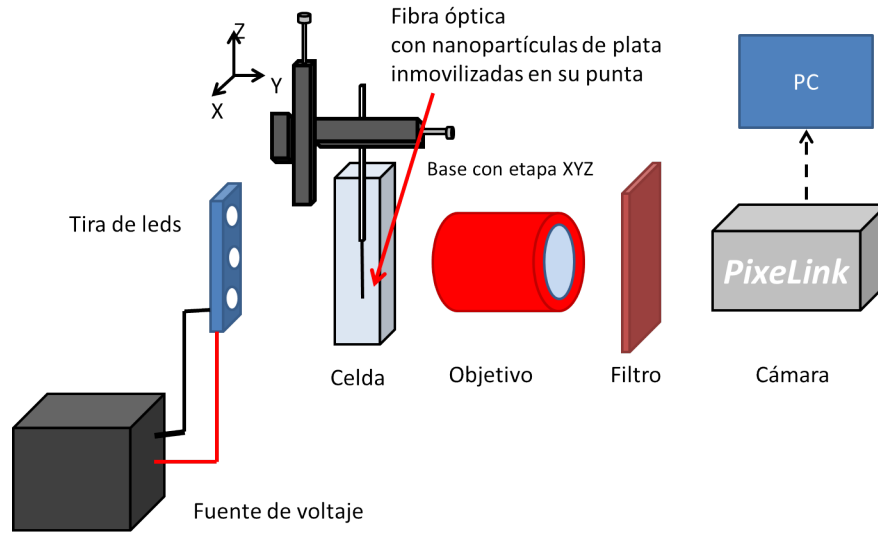


Figura 3.3: Arreglo óptico para visualización y manipulación de microburbujas.

mayor temperatura. A través de un movimiento mecánico de la fibra óptica se obtiene como consecuencia un control sobre la microburbuja posibilitándonos un movimiento tridimensional.

Los resultados experimentales se muestran en la figura 3.4, donde se realizó la manipulación de una microburbuja, del la izquierdo de la figura se observa la microburbuja unida a la cara de una fibra óptica y de lado derecho una microburbuja unida a un microchorro de vapor. En ambos casos se utilizó una fibra óptica con nanopartículas de plata inmovilizadas en su punta las cuales provocan una perdida de potencia de 2.2 dB , la diferencia entre ambas radica en la potencia utilizada para la generación de la microburbuja. Para el primer caso la potencia fue de 100 mW y para el segundo fue de 180 mW .

En la figura 3.5 se muestra el atrapamiento de una microburbuja a través de un microchorro de vapor. La generación fue a través de una fibra óptica con nanopartículas de plata inmovilizadas en su punta que ocasionan una perdida de potencia de 3 dB . En la primera imagen se observa la generación del microchorro de vapor casi de inmediato que es encendido el láser, la microburbuja es generada 1 s después, alejando la cámara (ver imagen (b)) es posible observar como la microburbuja se encuentra sujeta al microchorro y esta aumenta su tamaño al paso del tiempo. Al disminuir la potencia el

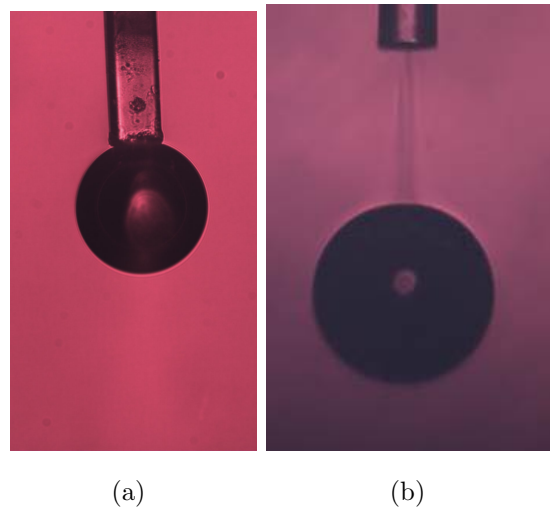


Figura 3.4: Tipos de manipulación de microburbuja, (a) unida a la cara de una fibra óptica y (b) unida a un microchorro de vapor.

microchorro también presenta una disminución en su longitud como se muestra en la imagen (c), al paso de 12 s su tamaño es de $178 \mu m$ y no presenta oscilaciones.

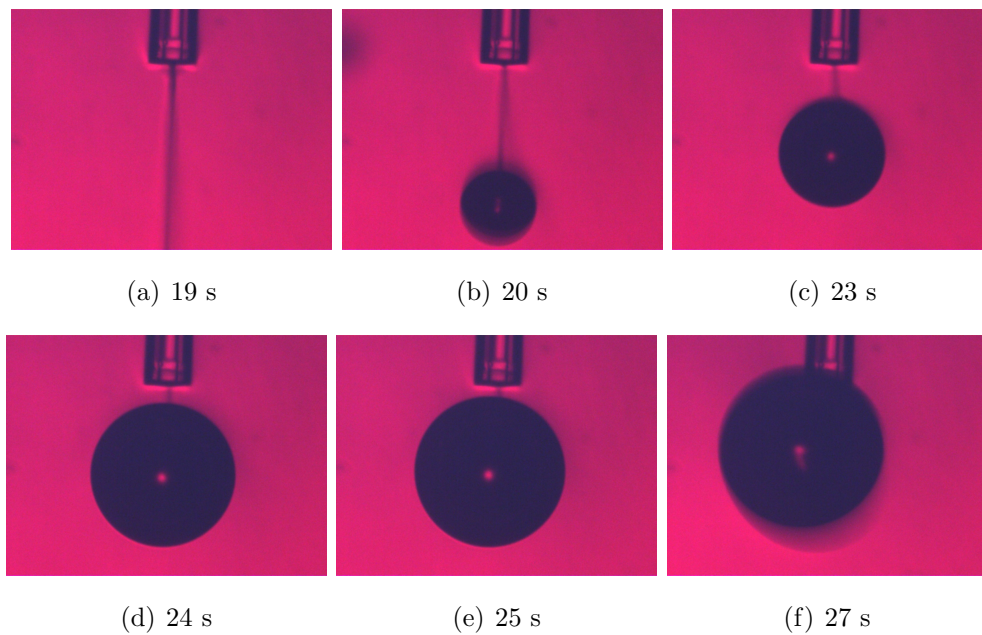


Figura 3.5: Atrapamiento de microburbuja a través de un microchorro de vapor.

Una aplicación realizada en este trabajo de tesis para la generación y manipulación de microburbujas, es la utilización de microburbujas como agentes de transporte de partículas. La figura 3.6 muestra una secuencia de imágenes de la manipulación de un residuo contaminante en agua, a la fibra óptica previamente se le inmovilizaron nanopartículas de plata en su punta a través del método de fotodeposición, estas provocaron una pérdida de potencia de 2.2 *dB*. Cabe mencionar que es posible la manipulación en tres dimensiones de forma estable. Como se observa la microburbuja previamente generada se encuentra adherida a la cara de la fibra óptica, esta es manipulada a través de la fibra, en las imágenes (a-c) la burbuja desciende hasta el residuo, al entrar en contacto con la microburbuja este se adhiere debido a fuerza de adhesión. En las imágenes (d-h), el residuo contaminante es manipulado tridimensionalmente a través de la microburbuja, para después descender hasta ser colocado nuevamente en el fondo de la celda de vidrio.

El mecanismo de atrapamiento de la microburbuja cuando se encuentra adherida a la cara es resultado del gradiente de temperatura generado por la absorción óptica de las nanopartículas, que ocasiona corrientes de convección en el fluido y la migración de la microburbuja hacia regiones de mayor temperatura dando origen a una fuerza termofóretica, así como a la fuerza de adhesión que permite la adherencia de la microburbuja a la cara de la fibra óptica, aunque es de menor magnitud en comparación a las demás fuerzas también contribuye en la manipulación de la microburbuja. Esta proporciona un medio para atraer a las microburbujas hacia los puntos de la cara de la fibra con mayor temperatura y proporciona una trampa fototérmica que permite el atrapamiento de microburbujas con una fuerza mayor que las fuerzas ópticas generadas en una trampa plenamente óptica. La estabilización de la microburbuja, es decir la unión de estas a los puntos de mayor temperatura podría estar relacionado a dos fenómenos. El primero, la formación de un gradiente de temperatura y el segundo es el denominado corrientes de Marangoni, el gradiente de temperatura da lugar a un gradiente de tensión superficial, por lo que los flujos convectivos emergen en la superficie de la burbuja y obligan a la burbuja a permanecer en el punto de mayor temperatura denominado termocapilaridad.

En los experimentos realizados se ha observado que la microburbuja se ha generado con

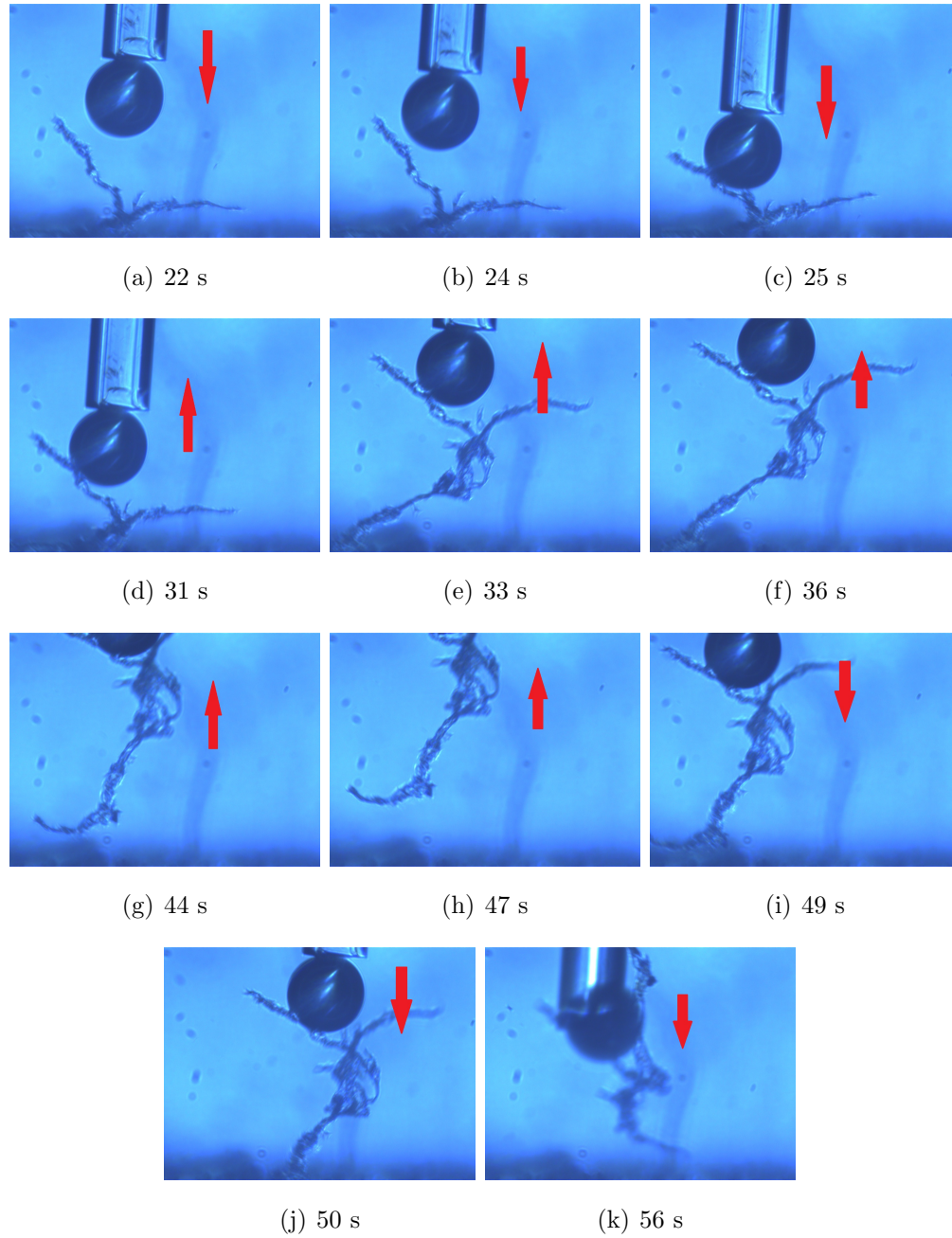


Figura 3.6: Manipulación tridimensional de residuo contaminante a través de una microburbuja.

facilidad con una potencia de 100 mW , la microburbuja alcanza un tamaño máximo de radio igual a $200 \mu\text{m}$ para después separarse de la punta de la fibra y ascender;

posteriormente el proceso se repite, formándose una nueva microburbuja. Un factor importante es el punto de ebullición del líquido donde se estén generando, si este es bajo la potencia óptica para su generación es baja, de lo contrario, la potencia debe de ser mayor.

Sin embargo bajo ciertas condiciones se observó que la microburbuja puede ser separada de la cara de la fibra óptica manteniendola atrapada como se observa en la figura 3.5.

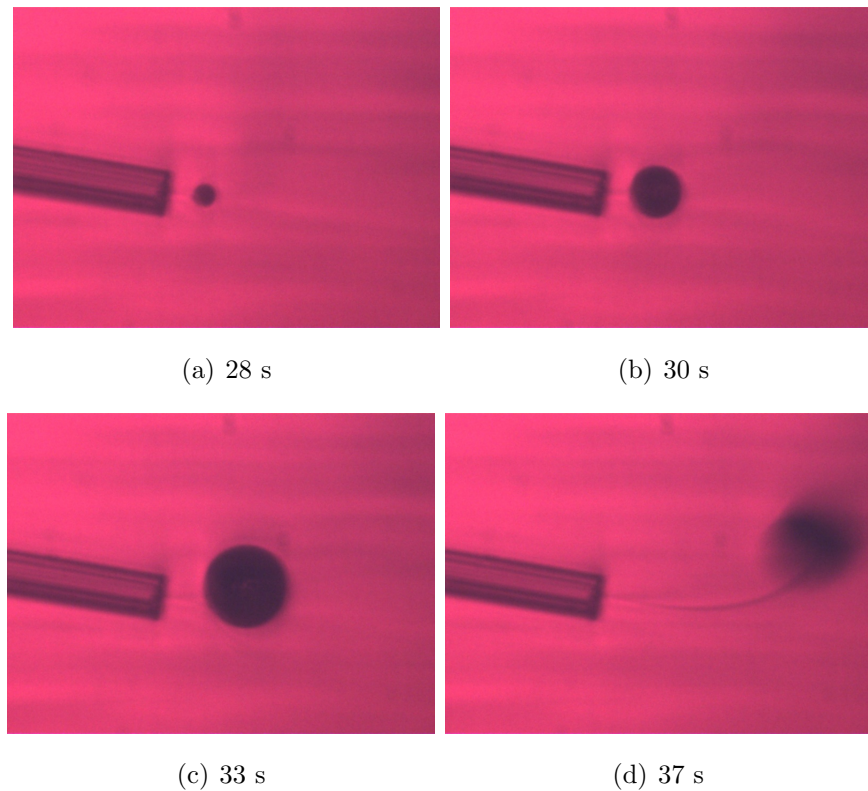


Figura 3.7: Atrapamiento de microburbuja arreglo de fibra óptica horizontal.

Se realizaron distintas configuraciones, colocando la fibra óptica verticalmente cara arriba, verticalmente cara abajo y horizontalmente como se observa en la figura 3.7. Se observó que la generación y manipulación es posible. Cuando se encuentra la fibra cara arriba la burbuja se puede manipular, confirmando que las fuerzas de presión de radiación no son significativas (ver figura 3.8).

En este caso en particular la fuerza de gravedad actúa como fuerza restauradora, siendo contraria a la fuerza de scattering, la burbuja debería tender a escapar de la trampa

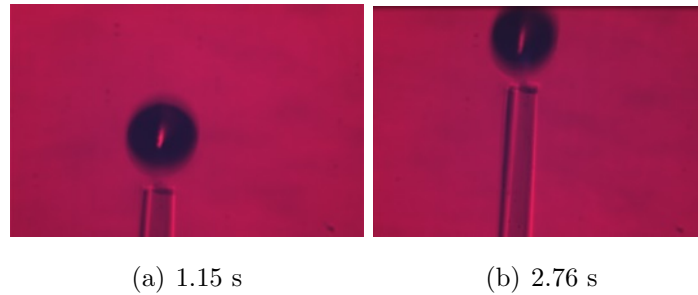


Figura 3.8: Atrapamiento de microburbuja arreglo de fibra óptica vertical.

alejándose del eje óptico, sin embargo el atrapamiento se mantiene estable.

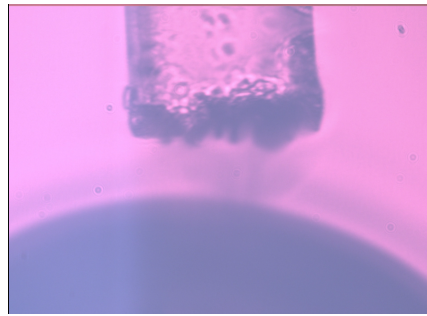


Figura 3.9: Fotografía que muestra la cara de una fibra óptica con nanopartículas de plata inmovilizadas a través del método de fotodeposición y se observa la generación de puntos de nucleación.

Un fenómeno observado en los experimentos realizados en la generación de microburbujas usando una fibra óptica con nanopartículas de plata es la creación de microchorros de vapor en la dirección de propagación del haz con potencias menores a 200 mW . Los microchorros siempre se generan en la punta de la fibra óptica, su longitud es dependiente de la potencia, a mayor potencia aumenta su tamaño alcanzando varios milímetros y se encuentran formados por vapor, sin embargo al descender en el líquido se forman burbujas con un radio del orden de nanómetros.

Estos surgen en un punto sobre la superficie de la cara depositada de la fibra y se mantienen unidos a este punto. Su estabilidad es dependiente de la potencia, si esta es suficiente el microchorro no presenta discontinuidades notables provocadas por la hidrodinámica del fluido. Debido al calentamiento que sufre el fluido se genera un

fenómeno de convección natural que ocasiona corrientes convectivas que provoca que las burbujas del final del microchorro escapen de él y asciendan como se observa en la figura 3.14. Sin embargo se ha observado la generación de una burbuja de mayor tamaño unida al microchorro que presenta una tasa de crecimiento alta y una deflexión en la superficie donde impacta el microchorro de vapor. Dos condiciones deben ser satisfechas para la generación de los microchorro de vapor. En primer lugar, un punto caliente debe formarse sobre la superficie de la punta. En segundo lugar, la vecindad de un punto tal debe estar libre de los centros que proporcionar la generación y el desprendimiento de grandes burbujas.

La generación de microchorros es precedente de la generación de puntos de nucleación que dan pie a generar un sello de vapor en la punta que origina la focalización de un microchorro. El gradiente de temperatura cambia, así la tensión superficial cambia creando una burbuja al final del microchorro como se observa en la figura 3.9. Esta característica permite que la manipulación de la microburbuja sea dependiente a la posición de la fibra óptica.

Con la finalidad de conocer la magnitud de las fuerzas que intervienen en el proceso de manipulación de la microburbuja se llevo a cabo una simulación de las fuerzas presentes en este proceso (ecuación 3.7). Se realizó la simulación de las fuerzas ópticas (ecuaciones 3.5) para una partícula con un índice de refracción $n = 1$ y con un diámetro de $200 \mu m$, que es el radio máximo aproximado obtenido, inmersa en un líquido con un índice de refracción de 1.36.

El resultado de esta simulación es mostrado en la figura 3.10, como se observa no se presenta un punto de equilibrio que permita el atrapamiento de la microburbuja, presentando una fuerza total muy débil. Se realizo el cálculo de la fuerza de arrastre con la ecuación 3.8. Para una microburbuja de $r = 60 \times 10^{-6} m$, la velocidad con la que desplazó la microburbuja fue de $v = 3.96 \times 10^{-3} \frac{m}{s}$, obtenida de las imágenes capturadas de la generación y manipulación (ver figura 3.4).

$$\vec{F}_D = 6\pi r \mu v = 6\pi(60 \times 10^{-6} m)(1.074 \times 10^{-3} \frac{Ns}{m^2})(3.96 \times 10^{-3} \frac{m}{s}) = 4.81 \times 10^{-9} N. \quad (3.10)$$

Como se muestra en la figura 3.10 la fuerza de scattering y la fuerza de gradiente presentan un orden de magnitud $1 \times 10^{-12} N$, siendo más débiles en comparación a la

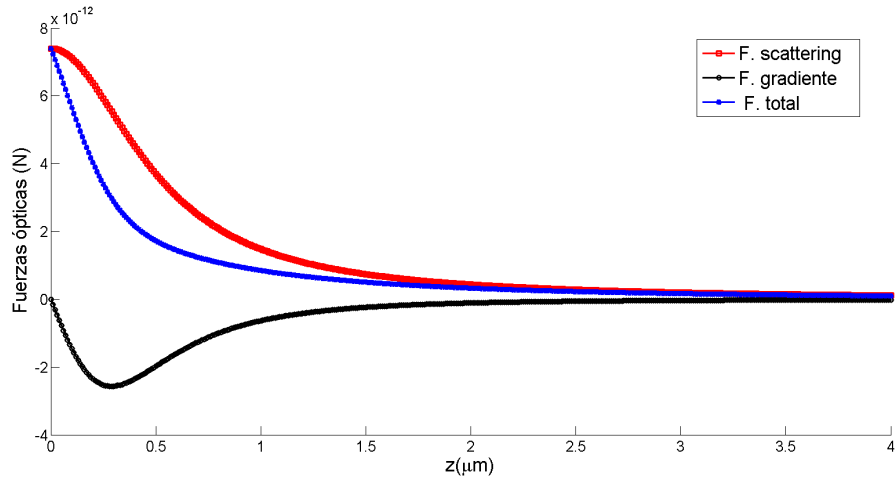


Figura 3.10: Simulación de las fuerzas ópticas sobre una microburbuja.

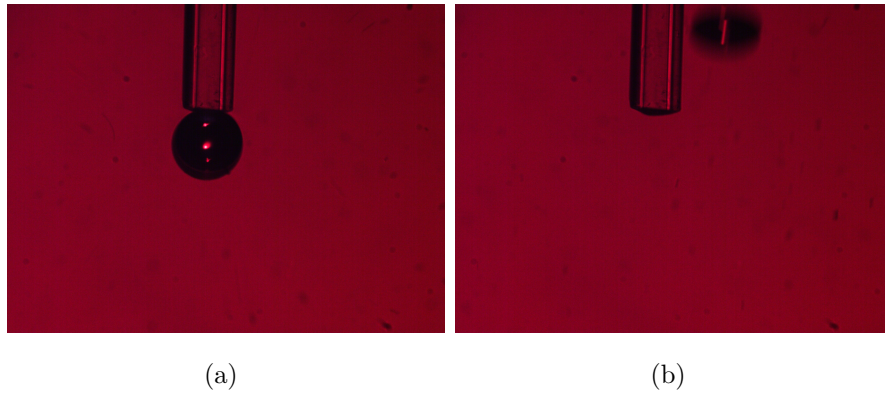


Figura 3.11: Fotografía que ilustra el desplazamiento de una microburbuja inmersa en etanol hasta su desprendimiento de la cara de la fibra óptica, (a) 3.61 s y (b) 3.67 s.

fuerza de arrastre por si misma, cuyo orden de magnitud es de $1 \times 10^{-9} N$. Lo cual nos indica que la fuerza de scattering y la fuerza de gradiente no son responsables del atrapamiento. Estos resultados teóricos concuerdan con las observaciones experimentales.

La fuerza de flotabilidad fue calculada utilizando la ecuación 3.9, cuyos parámetros son: la densidad del fluido, en este caso etanol $\rho = 789 \frac{Kg}{m^3}$, radio de la burbuja de $R = 60$

μm y la constante gravitacional de $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$.

$$\vec{F}_{Bu\sigma} = (\rho \frac{4}{3} \pi R^3 g) = 789 \frac{Kg}{m^3} (\frac{4}{3} \pi) (60 \times 10^{-6} m)^3 (9.81 \frac{m}{s^2}) = 7.003 \times 10^{-9} N. \quad (3.11)$$

Calculando la fuerza de flotabilidad para distintos radios de microburbujas, que van de 0 a 150 μm podemos observar que la fuerza aumenta con respecto del radio. En la figura 3.4 muestra la fuerza de flotabilidad como una función del radio de la burbuja. Es importante comentar que la fuerza aumenta al incrementar el radio de la burbuja.

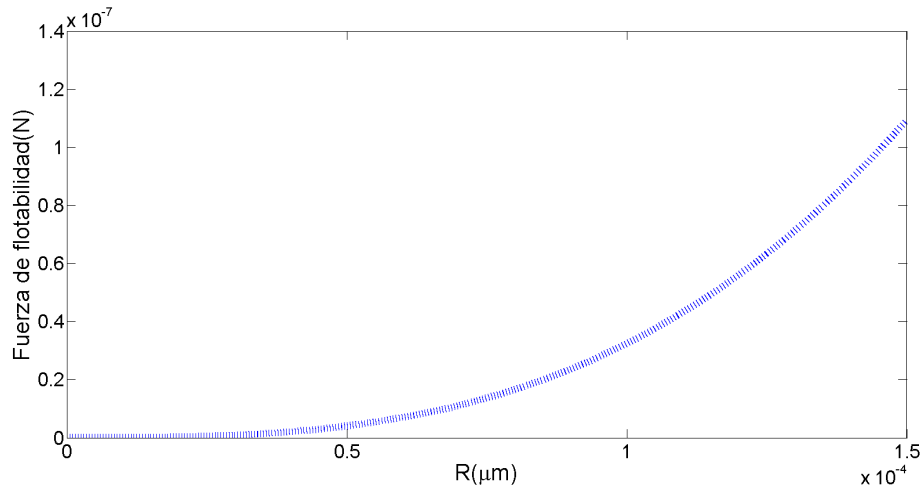


Figura 3.12: Fuerza de flotabilidad para distintos radios de microburbujas.

La fuerza de flotabilidad para radios pequeños inferiores a 100 μm es equiparable con la fuerza de Stoke, posibilitando el atrapamiento y manipulación de microburbujas. A radios pequeños las microburbujas experimentan una fuerza de arrastre que puede ser equiparable a la de flotabilidad. A radios mayores a 100 μm la fuerza de flotabilidad aumenta, ocasionando que las microburbujas experimenten desequilibrio de fuerzas y estas asciendan a la superficie.

Otro fenómeno registrado es la generación de ondas sónicas y ultrasónicas posiblemente como consecuencia de los procesos hidrodinámicos inducidos por el láser en la punta de la fibra óptica con nanopartículas de plata previamente fotodepositadas y las microburbujas. Se colocó un sensor piezoeléctrico junto a la celda de vidrio registrando

una señal audible en un rango de 9-10 kHz y una onda ultrasónica de aproximadamente 42 kHz las cuales se obtuvieron con ayuda de un osciloscopio de la marca Tektronix, modelo TDS-2024, como se observa en la figura 3.13.

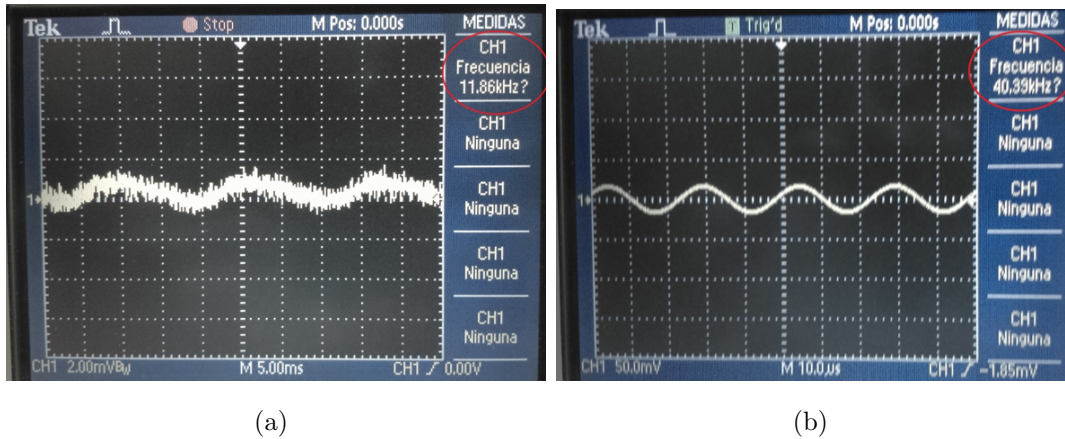


Figura 3.13: Visualización mediante la pantalla de un osciloscopio, (a) onda sónica (a) y (b) ultrasónica.

Es posible que esto suceda como una consecuencia directa de la dinámica de la mezcla gas-vapor y estas ondas esten relacionadas con las resonancias acústicas del sistema y a las vibraciones originadas en la punta de la fibra óptica. A su vez el contacto de la punta de la fibra óptica con etanol resulta en una ebullición explosiva de la solución, resultado por el calentamiento rápido del etanol, provocando la generación y colapso de las burbujas. Cabe mencionar que las burbujas se pueden comportar como resonadores acústicos naturales. Una fuerza implícita debida a la presencia de la onda sonora en el medio acuoso es la fuerza primaria y secundaria de Bjerknes, la primera explica el movimiento de traslación que sufre un burbuja al acoplarse con una onda de presión y la segunda que explica la atracción o repulsión de dos burbujas.

Sin embargo de acuerdo a los resultados experimentales, ninguna de estas fuerzas es significativa, como se puede observar en la figura 3.14 las microburbujas que surgen al final de un microchorro de vapor no presentan ninguna atracción o repulsión significativa entre ellas y las microburbujas no presentan traslación debido a las ondas acústicas. Aunque no descartamos la presencia de la fuerza secundaria de Bjerknes, esta nos

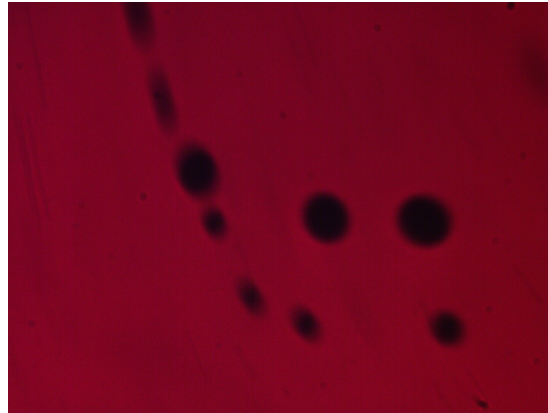


Figura 3.14: Múltiples burbujas al final de un microchorro de vapor.

es tan relevante como las demás fuerzas termodinámicas e hidrodinámicas presentes. Es posible considerar que la fuerza que permite el atrapamiento de la microburbuja al microchorro de vapor sea la fuerza de cohesión, sin embargo es necesario realizar experimentación complementaria para corroborar los efectos de la fuerza de cohesión en este fenómeno.

3.5 Conclusiones

En el presente capítulo se describieron los resultados experimentales sobre la manipulación de microburbujas, adherida a la cara de una fibra óptica y a un microchorro de vapor.

Se comprobó que la utilización de microburbujas como agentes de transporte de residuos, es una opción eficaz y viable para este tipo de aplicaciones. De acuerdo a los resultados experimentales, es posible la utilización de microburbujas como agentes de transporte de microestructuras y la migración de partículas a la superficie de la microburbuja.

La manipulación de microburbujas es posible a través de las fuerzas hidrodinámicas y termodinámicas generadas por la interacción de la radiación láser y las nanopartículas.

La fuerza de adhesión posibilita la manipulación de la microburbuja, sujetandola a la cara de la fibre óptica.

El microchorro de vapor generado permite la formación de una microburbuja, cuyo tamaño aumenta debido al vapor que la alimenta.

Las fuerzas ópticas presentes no son relevantes, por lo tanto su efecto en la microburbuja es despreciable.

Los efectos que ejerce la fuerza secundaria de Bjerknes sobre la microburbuja no son significativos, ya que no se encuentra evidencia de atracción o repulsión de dos o más microburbujas y su desplazamiento a los nodos o antinodos.

Las fuerzas que tienen mayores efectos en la dinámica de microburbujas son la fuerza de Marangoni, la fuerza de arrastre y la de flotabilidad. De acuerdo a lo observado las fuerzas presentan un punto de equilibrio para radios de microburbujas pequeños, posibilitando la manipulación.

Para corroborar los efectos de la fuerza de cohesión sobre las microburbujas es necesario realizar experimentación adicional, que nos permita realizar un análisis de su presencia y consecuencias en la unión del microchorro de vapor y la microburbuja.

Referencias

- [1] V. I. Yusupov, V. M. Chudnovskii, y V. N. Bagratashvili, “Laser-Induced Hydrodynamics in Water and Biotissues Nearby Optical Fiber Tip”, *Hydrodynamics-Advanced Topics*, Ed. INTECH, 95-118, 2011.
- [2] J.C. Ramirez-San-Juan et al. “Time-resolved analysis of cavitation induced by CW lasers in absorbing liquids”, *Optics Express*, Vol. 18, 8735-8742, 2010.
- [3] Y. A. Çengel, “Transferencia de calor y masa”, Ed. Mc Graw Hill, 2007.
- [4] N. V. Suryanarayana. “Engineering Heat Transfer, Wset Publishing Company, 1995.
- [5] D. W. Berry, N. R. Heckenberg y H. Rubinsztein-Dunlop, “Effects associated with bubble formation in optical trapping”, *Journal of Modern Optics*, Vol. 47, 2000.
- [6] K. Takahashi, J. G. Weng y C. L. Tien. “Marangoni effect in microbubble systems”, *Microscale Thermophysical engineering*, Vol. 3, 169-182, 1999.
- [7] C.E. Brennen, “Cavitation and bubble dynamics”, Oxford University Press, 1995.
- [8] V.F. Bjerknes, “Fields of Force”, Columbia University Press, New York, 1906.
- [9] T. G. Leihgton, M. J. Pickworth, A. J. Walton and P. P. Dendy, “Studies of non-linear bubble oscillations in a simulated acoustic field”. *Phys. Med. Biol*, Vol. 33, 239-248, 1988.
- [10] D.E. Goldman and G.R. Ringo, “Detremination of pressure nodes in liquids”, *Journal of the Acoustical Society of America*, 21, 207, 1949.

- [11] L.A. Crum and A.I. Eller, "Motion of bubbles in a stationary sound field". Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 48(01), 181-189, 1970
- [12] J.N. Israelachvili, "Intermolecular and Surface Forces, Academic Press, 1985.
- [13] A. Ashkin, "Forces of a single-beam gradient laser trap on a dielectric sphere in the ray optics regime", Biophysical Journal, Vol. 61, 569-582, 1992.
- [14] Y.Y. Hsu Y R.W. Graham, "An Analytical Experimental Study of the thermal Boundary Layer and the Ebullition Cycle in Nucleate Boiling". NASA Tech, note TN-D-594, 1961.
- [15] Y.Y. Hsu, "On the size range of active nucleation cavities on a heating surface". J. Heat Transfer Trans. ASME, 207-216, 1962.
- [16] R. Cole, "Boiling Nucleation", Adv. Heat Transf., Vol. 10, 85-166, 1974.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

4.1 Conclusiones generales

En este trabajo de tesis se llegó a las siguientes conclusiones:

La fotodeposición de nanopartículas de plata es un método bastante sencillo y que permite eficazmente la inmovilización de nanopartículas en la cara de una fibra óptica.

La generación de microburbujas es resultado directo del calentamiento altamente localizado originado por la absorción específica de la radiación láser por parte de las nanopartículas de plata y la ebullición nucleada del líquido que envuelve a la punta de la fibra óptica.

La formación previa de puntos de nucleación permite la formación de microchorros de vapor y provocando un sello en de vapor en la cara de la fibra óptica. El gradiente de temperatura se modifica y da origen a una microburbuja unida a este microchorro.

La utilización de microburbujas como agentes de transporte es posible de acuerdo con los resultados presentados en el capítulo 3, permitiendo su manipulación tridimensional

y el traslado eficiente de microestructuras.

Las fuerzas ópticas se encuentran presentes, sin embargo sus efectos sobre la microburbuja no son significativos, de acuerdo a los resultados experimentales, las fuerzas hidrodinámicas son mayores.

Las fuerzas de arrastre, Marangoni y flotabilidad son equiparables, encontrando un punto de equilibrio que permite la manipulación de microburbujas.

La utilización de microburbujas como agentes de transporte es un método viable en la manipulación de residuos micrométricos y una opción real en el atrapamiento de diferentes partículas.

4.2 Trabajo futuro

La realización de experimentación para la comprobación de las fuerzas de cohesión y de adhesión permitiría obtener mejores resultados y agregaría información de sus efectos en la manipulación de microburbujas.

Se ha demostrado que la utilización de microburbujas como agentes de transporte es una opción posible en la manipulación de microestructuras, sin embargo, sus aplicaciones podrían ir más allá, permitiéndonos la generación de un motor o una válvula cuyo componente sea una microburbuja.

La fotodeposición de fibras ópticas con diferentes partículas metálicas, así como diferentes geometrías nos permitiría corroborar la versatilidad de este método.

El presente trabajo ha demostrado la generación de microburbujas con un ciclo de vida estable, sin embargo, una investigación más detallada nos permitiría aumentar su tiempo de vida y disminuir su tasa de crecimiento, mejorando el método de fotodeposición.

La utilización de cámaras de alta velocidad permitiría un estudio más preciso de la dinámica de las microburbujas y el análisis de fenómenos hidrodinámicos tales como fenómenos convectivos y la generación de microchorros de vapor.

El diseño y construcción de un dispositivo optomecatrónico que nos permitiera realizar la manipulación de microburbujas a través de actuadores y una interfaz de usuario. Con el empleo de un láser de mayor potencia y la utilización de fibras fotodepositadas permitiría lograr un fenómeno de cavitación sobre las microburbujas generadas, como consecuencia directa de los resultados mostrados en este trabajo de tesis.

En un futuro, la generación de microburbujas y su manipulación tendrá mayor presencia en futuras investigaciones aumentando cada vez más sus aplicaciones.