



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**CAVITACIÓN GENERADA POR EL MÉTODO
DE DETENCIÓN SÚBITA DE UNA
COLUMNA DE LÍQUIDO**

TESIS

Que para obtener el título de
INGENIERO MECÁNICO

P R E S E N T A

HÉCTOR RODRIGO PARRA ALARCÓN

DIRECTOR DE TESIS

DR. FRANCISCO ANTONIO GODÍNEZ ROJANO



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

AGRADECIMIENTOS

Con amor a mis padres y mi hermano.

A mi madre por ser el soporte incondicional que he tenido a lo largo de toda mi vida, poniendo por sobre todo, mi bienestar y mi felicidad; por enseñarme el valor de la humildad y darme la libertad en la toma de mis decisiones, siempre brindándome el apoyo necesario en cada momento.

A mi padre por tus años de arduo trabajo, he tenido todo para salir adelante.

Un agradecimiento especial a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería; saberse parte de la mejor escuela del país es un orgullo que se lleva siempre.

Al Dr. Francisco Godínez por su conocimiento brindado en todo este tiempo, es un excelente investigador y mejor persona aun, gracias por sus consejos y por haberme dado la oportunidad de trabajar con usted.

A la Dra. Margarita Navarrete por darnos todas las facilidades para utilizar su laboratorio.

A la Dra. María Soledad Córdova Aguilar del CCADET por darme acceso a su laboratorio de reología y brindarme todo lo necesario para llevar a cabo mi trabajo.

A todos mis profesores que enriquecieron mi persona con su conocimiento y su experiencia.

A mis compañeros que hicieron de este camino una bonita experiencia de vida, por todos los momentos de diversión y convivencia juntos.

Y por supuesto a mi novia Karen, pues me ha regalado todo lo mejor de ella; haciéndome sentir una persona especial y así, obtener la determinación necesaria para salir adelante en los momentos más complicados de la carrera, te amo.

RESÚMEN

Se estudió teórica y experimentalmente el fenómeno de cavitación generada por el método de detención súbita de una columna de líquido. Para los experimentos se usaron un líquido newtoniano y uno no newtoniano (adelgazante). El dispositivo para generar la cavitación consta de un par de placas que sujetan a un tubo de vidrio transparente que contiene el líquido de prueba; dichas placas corren con baja fricción por tres postes guía y son aceleradas por la acción de un resorte mecánico al ser estirado y liberado. Así, la columna de líquido durante su recorrido es acelerada para posteriormente y de manera súbita ser desacelerada mediante al uso de topes mecánicos. Durante el proceso de desaceleración se genera un pulso de presión negativa (tensión) en el líquido favoreciendo la formación de burbujas de gas. Los experimentos se videograbaron con cámaras de alta velocidad; de esta forma, se analizó el movimiento de la columna líquida y la dinámica de las burbujas generadas dentro del fluido. En cada prueba se varió la distancia que recorre la columna de líquido y se colocó un sensor de fuerza en la parte inferior del tubo para medir amplitud, ancho y forma de los pulsos de tensión. Las burbujas de mayor tamaño se generaron en el líquido newtoniano alcanzando un radio promedio de 12 mm para un recorrido de la columna de 14 cm; así mismo, la duración del proceso de crecimiento y colapso de estas burbujas fue alrededor de 16 ms. Las presiones de mayor amplitud registradas por el sensor de fuerza fueron de ~ 5MPa.

Se utilizó la ecuación de Rayleigh-Plesset para simular la dinámica del crecimiento y parte del colapso de las burbujas producidas en el líquido. Los experimentos indican que el proceso de crecimiento y colapso de las burbujas es mucho más lento de lo que nos arroja el modelo teórico. Esta discrepancia se explica por el hecho de que las burbujas experimentales interactúan con la superficie del tubo y no desarrollan geometrías esféricas; en contraste, en el modelo de Rayleigh-Plesset utilizado solo se consideran burbujas esféricas sin interacciones que puedan deformar su superficie. Esto indica la necesidad de emplear modelos matemáticos más precisos o herramientas computacionales como la de dinámica de fluidos computaciones (CFD) para obtener una mejor aproximación.

ABSTRACT

The phenomenon of cavitation generated by the method of tube-arrest of a liquid column was studied theoretically and experimentally. For the experiments, a Newtonian liquid, and a non-Newtonian liquid (shear thinning) were used. The device for generating cavitation consists of a pair of plates which attach to a transparent glass tube containing the test liquid; these plates run with low friction through three guide posts and are accelerated by the action of a mechanical spring when stretched and released. Thus, the column of liquid during its trail is accelerated for later and is suddenly decelerated using mechanical stops. During the deceleration process a negative pressure (strain) pulse is generated in the liquid inducing the growth of gas bubbles. Experiments were video-recorded with high-speed cameras; In this way, the movement of the liquid column and the dynamics of the bubbles generated within the fluid were analyzed. In each test the distance running through the liquid column was varied and a force sensor was placed at the bottom of the tube to measure amplitude, width, and shape of the strain pulses. The largest bubbles were generated in the Newtonian liquid reaching an average radius of 12 mm for a run of the column of 14 cm; Also, the duration of the process of growth and collapse of these bubbles was about 16 ms. The higher amplitude pressures recorded by the force sensor were ~ 5MPa.

The Rayleigh-Plesset equation was used to simulate the growth dynamics and part of the collapse of the bubbles produced in the liquid. The experiments indicate that the process of growth and collapse of the bubbles is much slower than the theoretical model throws showed us. This discrepancy is explained by the fact that the experimental bubbles interact with the surface of the tube and do not develop spherical geometries; In contrast to the model used of Rayleigh-Plesset equation, only are considered spherical bubbles without interactions that can deform their surface. This indicates the necessity of using more precise mathematical models or computational tools like Computational Fluid Dynamics (CFD) to obtain a better approximation.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos.....	2
Resumen.....	3
Abstract	4
Índice general.....	5

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 Breve introducción.....	7
1.2 Motivación.....	8
1.3 Justificación.....	9
1.4 Objetivos.....	9
1.5 Sumario de capítulos.....	10

CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES Y PRINCIPIOS BÁSICOS

2.1 Fluidos newtonianos y no newtonianos; propiedades y características.....	11
2.2 Cavitación.....	15
2.3 Cavitación ultrasónica: a) Sonoluminiscencia de una burbuja; b) Sonoluminiscencia de muchas burbujas.....	16
2.4 Cavitación transitoria: a) Método de bala-pistón; b) Método de burbuja inducida por láser; c) Método de detención súbita.....	19

CAPÍTULO 3 EXPERIMENTOS DE CAVITACIÓN TRANSITORIA

3.1 Dispositivo mecánico para producir cavitación, usando el método de detención súbita de una columna de líquido.....	26
3.2 Metodología para realizar los experimentos.....	31
3.3 Preparación del fluido no newtoniano y su caracterización reológica.....	32

CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

37

CAPÍTULO 5 COMPARACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES CON UN MÓDELO MATEMÁTICO

5.2 Simulaciones numéricas del radio de una burbuja.....53

CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

61

APENDICE A

Modelos matemáticos para simular la dinámica del colapso/expansión/rebotes de burbujas: a) Ecuación de Rayleigh-Plesset para burbujas esféricas y no esféricas.....63

APENDICE B

Puntas para generar cavitación.....69

APENDICE C

Ambiente Tracker.....72

APENDICE D

Programa Mathematica.....74

Bibliografía.....80

CAPÍTULO

1

1.1 BREVE INTRODUCCIÓN

La cavitación es un proceso físico que puede ocurrir en líquidos, el cual consiste en la formación de cavidades o bolsas de vapor; una causa puede ser el descenso en la presión del líquido hasta alcanzar la presión de vaporización [1]. Diversos experimentos se han llevado a cabo con el objetivo de reproducir el fenómeno de cavitación, estudiando la dinámica del proceso.

La cavitación es un fenómeno que es de suma importancia en la mecánica de fluidos y que ha sido objeto de estudio en diversos campos de la ciencia e ingeniería, incluyendo la acústica, biomedicina, sonoquímica, hidráulica, entre otros. El fenómeno de cavitación se produce en numerosos procesos industriales, tales como lubricación, impresión y recubrimiento, por mencionar algunos. Sin embargo, gran parte de los esfuerzos destinados a la investigación de este fenómeno han sido relacionados con el estudio y diseño de bombas, turbinas, y en general maquinaria que trabaja con fluidos. El estudio de la cavitación es de suma importancia por su relación con fenómenos adversos como la erosión y daños a superficies sólidas por el colapso de cavidades en sus inmediaciones [1]. Otros efectos ampliamente conocidos incluyen la reducción de la eficiencia en turbomaquinaria, generación de vibraciones excesivas y ruido.

Existen diversos tipos de cavitación dependiendo de factores como: la energía utilizada para producir las burbujas, los dispositivos y sus geometrías, tipos de fluidos y sus propiedades, entre otros. Un ejemplo es la cavitación acústica, que se refiere a la formación de burbujas (crecimiento desde núcleos preexistentes), la disminución de su tamaño hasta su colapso y en ocasiones una serie de rebotes. El presente trabajo se centra en el estudio teórico/experimental de otro tipo de cavitación conocida con el nombre de "cavitación transitoria", la cual se produce con un dispositivo que permite frenar súbitamente una columna de líquido.

1.2 MOTIVACIÓN

Hay un número creciente de investigaciones referentes al campo de la biología y la bioingeniería, en que la cavitación se utiliza ya sea para crear algún efecto deseado o como consecuencia de algún otro proceso.

En diversas aplicaciones médicas, la cavitación desempeña un papel importante en efectos quirúrgicos provechosos como el emulsionar tejido no deseado o para pulverizar material sólido no deseado dentro del cuerpo humano.

Durante el proceso llamado litotricia (procedimiento médico que utiliza ondas sonoras de choque para romper cálculos renales, en la vejiga o en el uréter) se desintegran de forma parcial o total piedras compuestas de minerales en mayor medida. El fenómeno de cavitación que surge debido a este proceso, puede causar un daño substancial de forma colateral a tejidos que se encuentran en las inmediaciones donde se lleva a cabo la litotricia [2].

Aunque con el paso del tiempo se ha mejorado este tratamiento utilizando ultrasonido focalizado y así reducir el daño causado a tejidos colindantes al proceso, no se ha eliminado del todo. Debido a lo anterior, es importante estudiar este tipo de fenómenos fuera del paciente, reproduciéndolos de forma experimental y en un ambiente controlado como lo es en un laboratorio, utilizando arreglos experimentales que nos faciliten su total comprensión. Pero además es deseable que dichos arreglos experimentales sean de manufactura accesible, de bajo costo, que se operen de forma sencilla y que no requieren de instrumentación costosa y sofisticada.

Hoy en día existen diversos métodos para generar el fenómeno de cavitación transitoria. En el presente trabajo, se llevaron a cabo los experimentos utilizando el método de detención súbita; reproduciendo el fenómeno en dos tipos de fluidos, un newtoniano y un no newtoniano, esto, debido a que las condiciones naturales a las que se lleva a cabo este problema implica trabajar con fluidos biológicos; que pueden tener propiedades y comportamiento similares a cualquiera de los dos tipos de fluidos mencionados anteriormente, esto permitirá tener condiciones más próximas a las reales. El arreglo experimental para este método es, a comparación con otros métodos, económico, de manufactura accesible, se opera de forma sencilla y rápida, la instrumentación propia del arreglo experimental no es costosa y sofisticada, solo se utiliza instrumentación más avanzada para la captura y medición de parámetros del fenómeno.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En el presente trabajo, se pretende sentar las bases de un estudio a mediano y/o largo plazo para contribuir a la solución de problemas en procedimientos médicos como la litotricia, donde existen efectos secundarios como daños sustanciales a tejidos colindantes a causa de la aparición de cavitación transitoria.

Los resultados de esta tesis podrán ser orientados a reproducir el fenómeno de cavitación transitoria en condiciones más realistas, en vez de utilizar únicamente líquidos que tengan propiedades y características similares al fluido biológico; se pretende utilizar el fluido biológico en sí, además se pretende implementar en el experimento, el entorno natural del proceso, tal como colocar tejido biológico en las proximidades donde se recrea la cavitación. Esto permitirá entender y controlar mejor los daños colaterales a procedimientos médicos basados en cavitación. Todo lo anterior beneficiará a un sector tan importante como el de la salud, las intervenciones médicas tenderán a ser más seguras y eficaces; e inclusive sin repercusiones posteriores en el bienestar de las personas.

1.4 OBJETIVOS

Objetivo general

- Estudiar experimentalmente la dinámica de burbujas por medio del método de detención súbita.

Objetivos particulares

- Investigar el fenómeno de cavitación transitoria.
- Realizar experimentos con un fluido newtoniano de referencia y un no Newtoniano.
- Preparar un fluido newtoniano y un fluido no newtoniano y caracterizarlos reológicamente.
- Instrumentar el experimento para obtener señales acústicas, así como imágenes para el análisis de la dinámica de la cavitación transitoria.
- Comparar los resultados experimentales con el fluido no newtoniano contra un modelo matemático de la dinámica del colapso/expansión/rebote de una burbuja.

1.5 SUMARIO DE CAPÍTULOS

En el capítulo 2, se revisa antecedentes y principios básicos, donde se da un panorama general de diferentes tipos de fluidos, sus propiedades y características. También se proporciona información al lector de forma que se familiarice con el fenómeno de cavitación y diversos tipos de ésta. De igual forma, se ofrece al lector una breve revisión de sonoluminiscencia en sus dos vertientes como lo es sonoluminiscencia de una sola burbuja y sonoluminiscencia de muchas burbujas. También se mencionan de manera breve algunos métodos para generar cavitación transitoria, así como una comparación de estos con el método de detención súbita. Al final de este capítulo se presenta una revisión de artículos realizados por diversos autores, quienes han estudiado la cavitación transitoria desde puntos de vista teóricos y/o experimentales.

En el capítulo 3, se da la información concerniente al arreglo experimental para realizar pruebas de cavitación transitoria, a los parámetros a considerar para el experimento y a la instrumentación requerida para la obtención de datos y resultados. De igual forma, se da información sobre la preparación de los fluidos a considerar en los experimentos, y su respectiva caracterización.

En el capítulo 4, se presentan los resultados experimentales y su discusión; también, se hace una comparación entre los datos experimentales y un modelo matemático de la dinámica radial de las burbujas.

En el capítulo 5, se comparan los resultados experimentales con un modelo matemático que, en este caso es el de Rayleigh-Plesset.

El capítulo 6, contiene las conclusiones generales del trabajo, recomendaciones y propuestas para el trabajo a futuro.

CAPÍTULO

2

ANTECEDENTES Y PRINCIPIOS BÁSICOS

2.1 Fluidos newtonianos y no newtonianos; propiedades y características

Para introducir el concepto de fluido newtoniano, se considera una capa de un fluido contenido entre dos placas paralelas separadas por una diferencial de altura dy ; la placa inferior está fija, y la superior se desplaza una velocidad dV_x , así como se muestra en la Figura 1.1. El fluido es sujeto a un cortante mediante la aplicación de una fuerza F , que será balanceado por una fuerza de fricción dentro del fluido de forma opuesta. Para un fluido newtoniano incompresible en régimen laminar, el resultado del esfuerzo cortante es igual al producto del gradiente de velocidad y el coeficiente de viscosidad. En este caso, el gradiente de velocidad será en dirección perpendicular al esfuerzo cortante [3].

Como la aceleración es nula, suponiendo que la presión no varía en la dirección del flujo, se puede demostrar que el equilibrio de fuerzas de un pequeño elemento fluido conduce al resultado de que el esfuerzo cortante es constante en todo el fluido [4].

$$\frac{F}{A} = \tau_{yx} = \eta \left(-\frac{dV_x}{dy} \right) = \eta \dot{\gamma}_{yx} \quad (1)$$

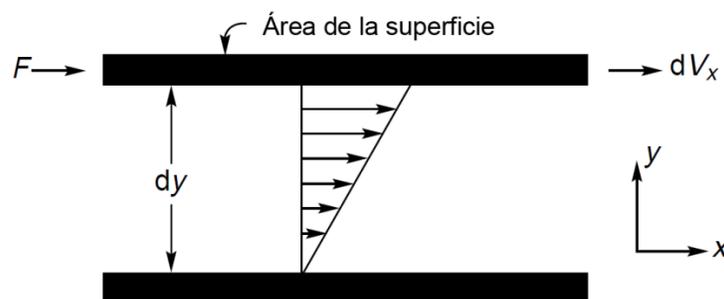


Figura1. Representación esquemática del flujo cortante unidireccional [1].

La constante de proporcionalidad η se denomina viscosidad *dinámica del fluido*. Es importante mencionar que esta propiedad es independiente de la velocidad de corte $\dot{\gamma}_{yx}$ y del esfuerzo cortante τ_{yx} ; sin embargo, depende del material, presión y temperatura. La magnitud del gradiente de velocidad $\frac{dV_x}{dy}$ no tiene ningún efecto sobre la magnitud de η .

Los fluidos que siguen la relación funcional (1), se denominan newtonianos. Ejemplos de este tipo de fluidos son el agua, aceite, gasolina, alcohol y glicerina.

En la figura (2), se observa que la pendiente de la curva del esfuerzo cortante versus la rapidez de deformación es una medida de la viscosidad aparente del fluido. Debido a que los fluidos Newtonianos mantienen una relación lineal entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación, la pendiente es constante [5].

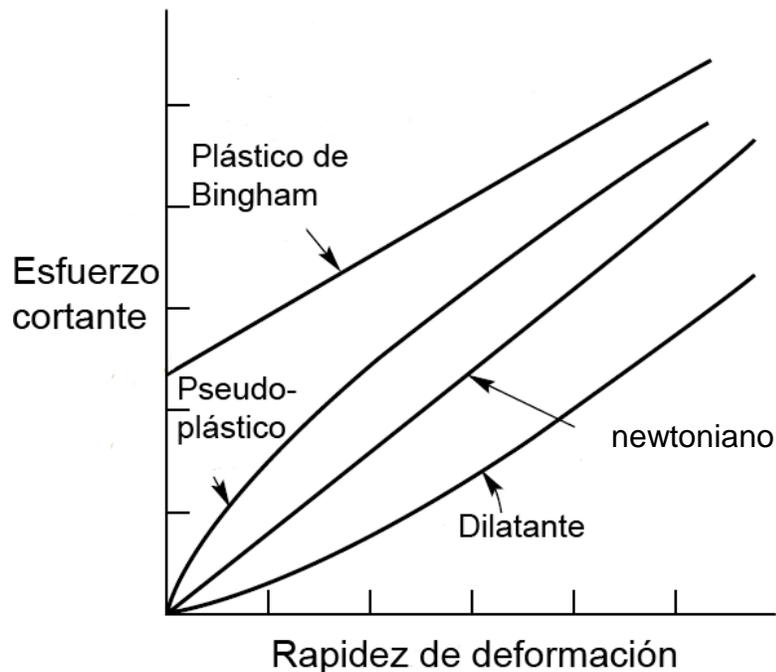


Figura 2. Esfuerzo cortante en función de la rapidez de deformación de materiales viscosos [4].

La figura (3), muestra el comportamiento del fluido newtoniano, y fluidos no newtonianos (Dilatante y Pseudoplástico), de la viscosidad *versus* velocidad de corte, el fluido newtoniano presenta un comportamiento de viscosidad constante.

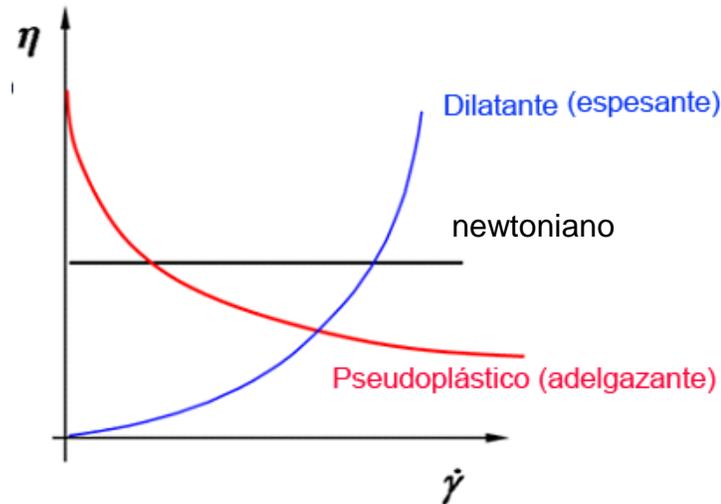


Figura 3. Comportamiento de fluidos Newtonianos y no Newtonianos, la viscosidad vs velocidad de corte [5].

Los tipos de fluidos no newtonianos mas comunes se pueden clasificar como:

Dilatante es el fluido donde la resistencia a la deformación aumenta al aumentar el esfuerzo cortante, algunos ejemplos son las suspensiones de almidón o las arenas movedizas, las cuales se espesan a medida que uno se mueve en ellas.

Pseudoplástico o adelgazante es el fluido en el que disminuye su resistencia al aumentar el esfuerzo.

Plástico de Bingham en este tipo de fluido se necesita un esfuerzo finito (límite de fluencia) antes que el fluido comience a fluir del todo. Ejemplos de este tipo de fluidos son cremas para el acné o dentríficos.

Algunos fluidos requieren gradualmente un incremento en el esfuerzo cortante, y así, mantener constante la velocidad de deformación; este tipo de fluidos se les llama reopéticos. El caso opuesto es el de un fluido que necesita esfuerzos que vayan disminuyendo, llamados tixotrópicos [6]. El comportamiento de estos fluidos se observa en la figura (4).

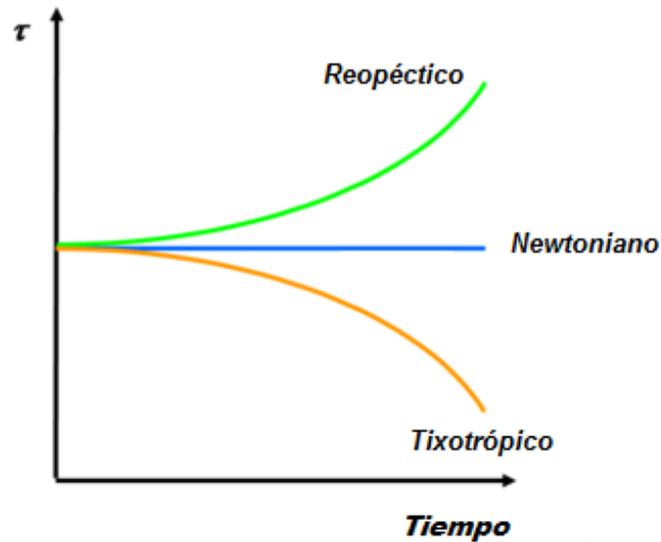


Figura 4. Efecto del tiempo sobre el esfuerzo aplicado en algunos fluidos [7].

Muchas soluciones de agentes que aumentan la viscosidad empleados en las emulsiones, presentan comportamiento de un fluido adelgazante, tal como la carboximetilcelulosa así como gomas solubles en agua. La relación que describe el comportamiento de los fluidos adelgazantes es la denominada ley de potencia o de Ostwald-de Waele que puede escribirse como:

$$\tau = k(\dot{\gamma})^n \quad (2)$$

donde k y n son constantes. La constante n describe qué tan rápido cambia la viscosidad con la velocidad de deformación y se le conoce como índice de comportamiento, cuando $n < 1$ este modelo corresponde a fluidos adelgazantes, mientras que si $n > 1$ este modelo se refiere a los fluidos dilatantes [8].

La constante k caracteriza la magnitud de la viscosidad y se le denomina como índice de consistencia. Si se sustituye la ley de potencia (2) en la ecuación (1), se obtiene que la viscosidad depende explícitamente de la velocidad de deformación como se muestra a continuación [8]:

$$\eta = k(\dot{\gamma})^{n-1} \quad (3)$$

En este caso, la viscosidad disminuye o aumenta en función de la velocidad de deformación dependiendo si el fluido es adelgazante o dilatante.

2.2 Cavitación

La cavitación es un fenómeno que se produce cuando la presión en algún punto de la corriente líquida se hace menor que la presión de vapor del líquido a la temperatura de trabajo. Este descenso en la presión hace que el líquido se vaporice, apareciendo burbujas (cavidades) en el seno de la corriente líquida. Cuando las burbujas entran a una región de alta presión o bajas temperaturas, estas, colapsan violentamente produciendo diversos fenómenos como ondas de choque y luminiscencia, por mencionar algunos. Si las burbujas colapsan cerca de una superficie, en ocasiones se producen chorros de líquido que impactan la superficie produciendo con el tiempo erosión en materiales como el metal [9].

El colapso de la burbuja puede ser un fenómeno de baja energía, sin embargo, ocurre en un punto localizado. En la figura (5), se presentan las fases de una burbuja que colapsa en las cercanías de una superficie. En la fase uno, la presión ejercida por el líquido incide sobre la burbuja, en la fase dos inicia el colapso de la burbuja, en la fase tres y cuatro se forma el chorro de agua, que posteriormente, en la fase cinco, impacta en la superficie.

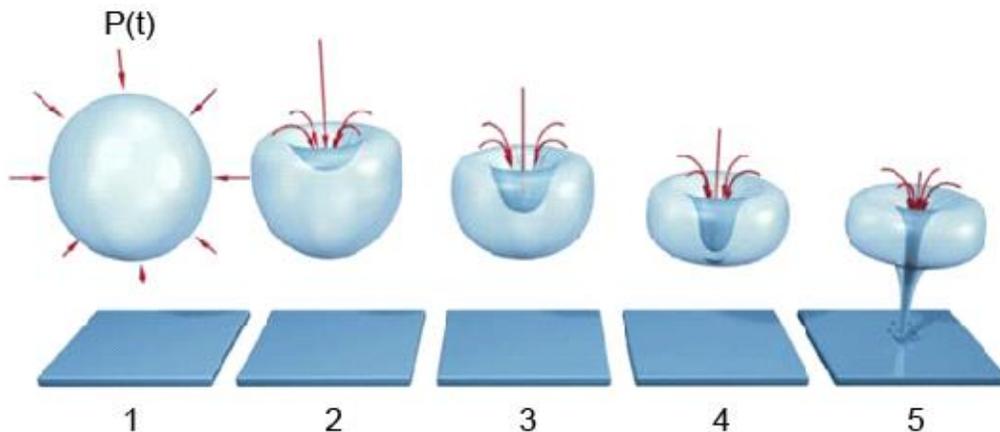


Figura 5. (1) La presión $P(t)$ del líquido actúa sobre la burbuja, (2) iniciando el colapso de la misma, (3) y (4) la formación del chorro de agua y finalmente (5) impactando sobre una superficie, provocando posteriormente erosión en equipos de trabajo como bombas o en álabes de una turbina [10].

Una burbuja aislada y en proceso de implosión/expansión produce muy poco daño sino es que nulo. Por el contrario, una acumulación de burbujas en proceso de implosión/expansión puede ocasionar en el transcurso de cierto tiempo una serie de desperfectos en una superficie dada, lo cual se conoce como “erosión por cavitación”. Es importante no confundir con el término “corrosión por cavitación”; la corrosión es debida a reacciones químicas y la erosión es la eliminación física de material por una fuerza externa, sin embargo, es importante hacer notar que la cavitación puede favorecer la corrosión sobre el material mediante la exposición de superficies [11].

2.3 Cavitación ultrasónica: a) Sonoluminiscencia de una burbuja; b) Sonoluminiscencia de muchas burbujas.

Otro fenómeno generado a partir del colapso de burbujas por cavitación es sonoluminiscencia. Este es un fenómeno que produce luz. Para ello se utilizan ondas de ultrasonido en un medio líquido [12]. Así, cuando un medio líquido es irradiado por una onda ultrasónica, la presión instantánea en algunas regiones del medio llega a ser negativa durante la fase de succión o de rarefacción [13].

En la figura (6), una presión positiva empuja hidrostáticamente las caras del líquido comprimiéndolo. Por otro lado, en la presión negativa ésta jala cada una de las caras del líquido para expandirlo. Así, cuando la presión en algunas regiones del líquido se vuelve negativa, muchas burbujas de aire aparecen en ese punto debido a que el aire disuelto en el líquido ya no puede estar disuelto en el mismo [13].

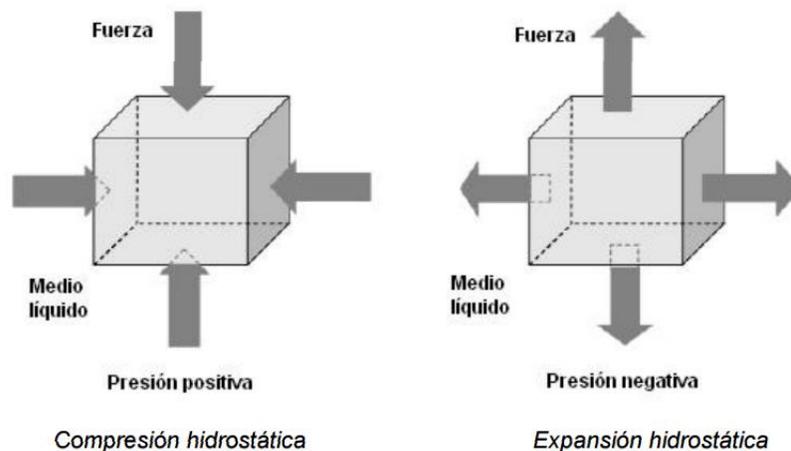


Figura 6. Presión positiva y presión negativa [13].

Ultrasonido de altas frecuencias (de los 20 kHz a varios MHz), es transmitido a través de un líquido como una onda de presión e induce un movimiento vibracional de moléculas a través del mismo. La irradiación ultrasónica induce la producción de microburbujas por cavitación en el líquido a través del cual se transmite. Estas microburbujas crecen durante los posteriores ciclos de compresión- expansión, hasta que alcanzan un tamaño crítico. La compresión de la burbuja o conjunto de burbujas conlleva a su colapso, provocando que la mezcla de gas y vapor contenida en ellas alcance condiciones de presión ~ 10000 Atm y temperatura ~ 10000 K. Este fenómeno de formación, crecimiento y colapso violento de las microburbujas en líquidos es llamado cavitación acústica, paralelamente al colapsar la o las burbujas bajo las condiciones extremas ya mencionadas, emiten pulsos de luz de corta duración ~ 100 ps [10].

SONOLUMINISCENCIA DE UNA BURBUJA

Existen dos clases de sonoluminiscencia (SL): sonoluminiscencia de una burbuja (SLUB) y sonoluminiscencia de múltiples burbujas (SLMB). En la SLUB se aplica un campo acústico senoidal estacionario para atrapar y hacer levitar en una posición fija a una burbuja de gas/vapor dentro de un medio líquido. Las variaciones del campo hacen que la burbuja oscile volumétricamente y de manera no lineal, alcanzando velocidades supersónicas durante el colapso; lo cual, permite concentrar energía y calentar los gases del interior para producir la emisión del pulso de luz por cada ciclo acústico. La frecuencia del campo acústico para producir SLUB oscila entre (20-40) kHz.

El movimiento radial de una burbuja sonoluminiscente sigue un comportamiento no lineal, caracterizado por una asimetría entre una etapa de expansión lenta y una compresión rápida seguida de una serie de rebotes. La figura (7) muestra la dinámica radial típica de una burbuja luminiscente producida en agua con un campo acústico de 50 kHz, bajo condiciones de presión y temperatura típicas de la ciudad de México (77kPa y 24°C, respectivamente).

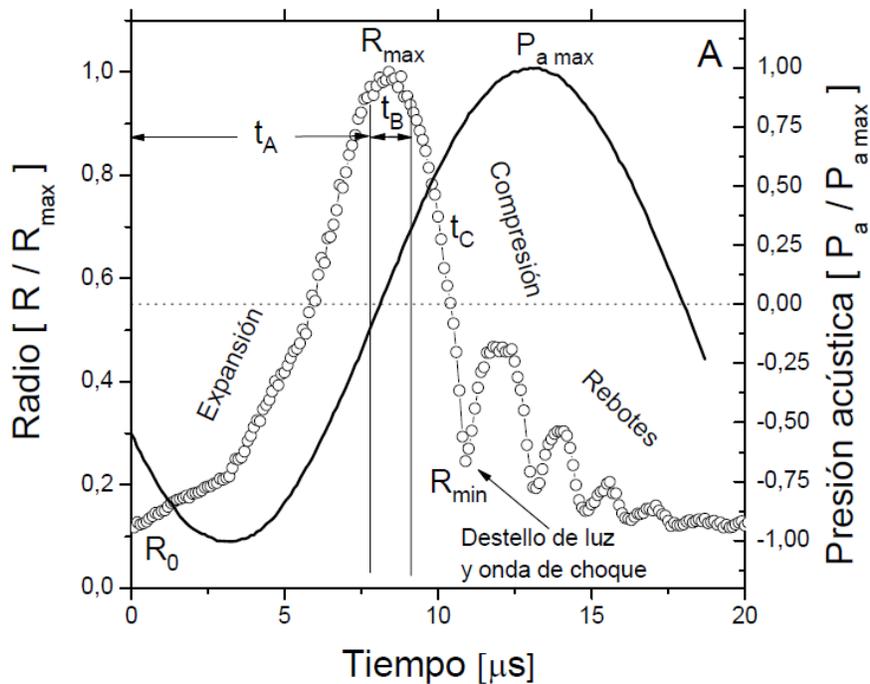


Figura 7. Curva del radio de una burbuja en función del tiempo: la burbuja inmersa en el fluido comienza su movimiento con un radio inicial (R_0), cuando el campo de presión se torna negativo la burbuja se expande. Cuando la presión de excitación (línea gruesa continua) se torna positiva, la burbuja continúa expandiéndose durante un tiempo $t_B \sim 1.5 \mu s$ hasta alcanzar un radio máximo (R_{max}). La presión interna disminuye sin contrarrestar la presión del líquido y la burbuja colapsa en un tiempo $t_C \sim 500 \text{ ns}$ hasta alcanzar un radio mínimo (R_{min}). En esta etapa los gases contenidos en la burbuja alcanzan densidades y temperaturas altas, emitiendo un pulso de luz, así como una onda de choque que viaja a través del líquido hacia las paredes del resonador. La burbuja experimenta una serie de “rebotes” alcanzando el radio inicial de equilibrio repitiéndose el ciclo [13].

SONOLUMINISCENCIA DE MÚLTIPLES BURBUJAS.

Para la reproducción de sonoluminiscencia de múltiples burbujas (SLMB), basicamente existen dos métodos posibles de manera experimental; uno consiste en utilizar un transductor ultrasónico para generar una onda estacionaria, en el otro se utiliza una bocina inmersa en un líquido para generar un campo de presión aleatorio.

En el primer caso, figura (8), se irradia en el líquido una onda ultrasónica en la superficie del contenedor, a través de un transductor ultrasónico que está unido a él. En el líquido se forma una onda estacionaria por la superposición de la onda incidente y la onda reflejada [14].

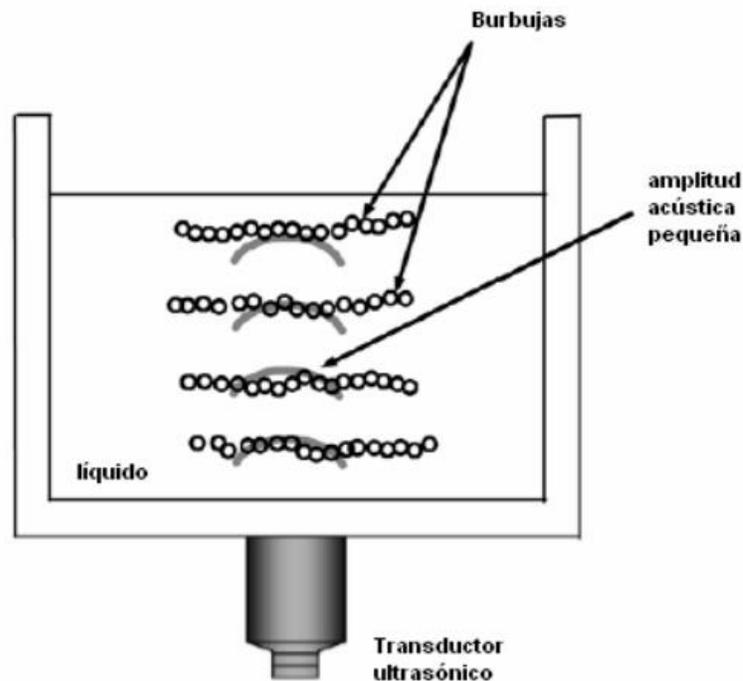


Figura 8. Dispositivo experimental para la producción de SLMB de tipo de onda estacionaria[14].

El segundo método experimental, figura (9,) consiste en una bocina ultrasonica que es sumergida en un líquido [14]. La cavitación es un proceso de nucleación, y los líquidos contienen generalmente un gran número de partículas que sirven como núcleos. Como consecuencia, la propagación de ondas acústicas a través del líquido irradiadas por la punta de la bocina, generan un gran número de burbujas que interactúan entre sí distribuidas en una región a lo largo del líquido [15], dichas burbujas alcanzan temperaturas de hasta 5000 K, presiones cercanas a 100 Mpa y velocidades de calentamiento/enfriamiento de $\sim 10^{10}$ K/s [14].

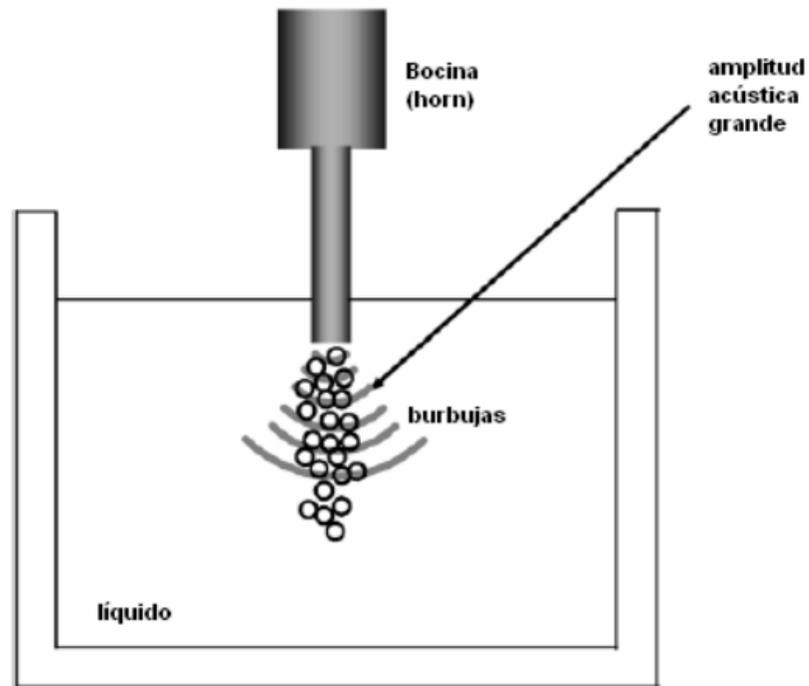


Figura 9. Dispositivo experimental para producir SLMB de tipo bocina [14].

2.4 Cavitación transitoria: a) Método de bala-pistón; b) Método de burbuja inducida por láser; c) Método de detención súbita.

Cavitación transitoria es un tipo de cavitación que está caracterizada por grandes variaciones de tamaño en la burbuja y un eventual colapso de la misma, donde el colapso puede ser bastante violento. Este colapso está acompañado por condiciones de muy alta temperatura y de muy alta presión en los alrededores del medio donde ocurre, a menudo, provocando la formación de ondas de choque o jets de líquido; dependiendo de la distancia entre la burbuja que colapsa y una superficie sólida, las ondas de choque pueden dañar esas superficies con el paso del tiempo.

Existen diversos métodos para recrear el fenómeno de cavitación transitoria, algunos de ellos se explican a continuación.

MÉTODO DE BALA-PISTÓN

En este método el líquido está contenido en un tubo cilíndrico vertical, equipado con un pistón de acero en su extremo inferior. Un pulso de presión (con un ancho de decenas de μs) es generado en el líquido por medio de un disparo de una bala de plomo que impacta en el extremo inferior del pistón, acertando normalmente en su centro. El dispositivo basado en este método también posee una brida superior que conecta al tubo a un suministro de Nitrógeno regulado libre de oxígeno y a un manómetro. Cuando el pulso generado por el impacto de la bala encuentra la superficie del

líquido contenido en el tubo, este es reflejado como un pulso de tensión promoviendo la formación de burbujas. Los cambios de presión dentro del líquido son monitoreados utilizando tres transductores de presión dinámica montados mecánicamente y de manera aislada en la pared del tubo, lo anterior se observa en la figura 10. El experimento puede ser modificado, utilizando otro tipo de pistones y balas de diferente material y peso [16].

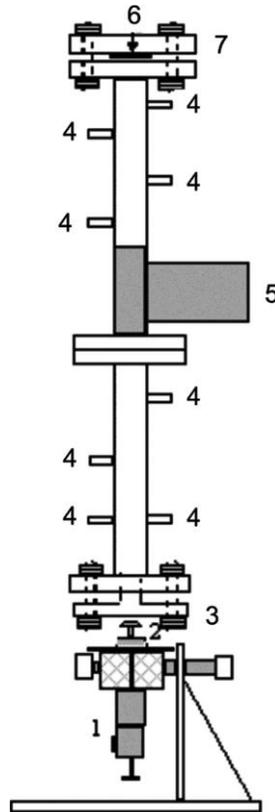


Figura 10. Arreglo experimental del método bala-pistón. (1) pistola Magnum modelo 700, (2) “cabezal tipo hongo”, (3) pistón de acero, (4) transductores de presión montados al tubo, (5) soporte de brazo, (6) junta de sellado, (7) brida de sellado [16].

MÉTODO DE BURBUJA INDUCIDA POR LÁSER

Es un método ampliamente usado para la generación de cavitación transitoria conocido como *laser-induced bubble* (LIB), un haz láser centrado produce una burbuja de gas en un líquido con un diámetro de unos pocos milímetros. La burbuja colapsa y rebota emitiendo pulsos de luz de duración de 30-50 ns. Con este método se pueden producir burbujas esféricas y no esféricas. Además, pequeños sólidos de impurezas, absorben parte de la energía inyectada por el láser generando puntos muy calientes que ayudan a generar cavidades alrededor de estos puntos, que en primer lugar crecen de forma rápida, luego su crecimiento radial es más lento, durante esta desaceleración una onda expansiva se desplaza fuera del centro produciendo un campo de tensión localizado y generando burbujas. Una cámara de alta velocidad se utiliza para capturar el proceso de formación, crecimiento y colapso de las cavidades [16]. La figura 11 esquematiza el proceso de generación de cavitación transitoria usando un pulso láser.

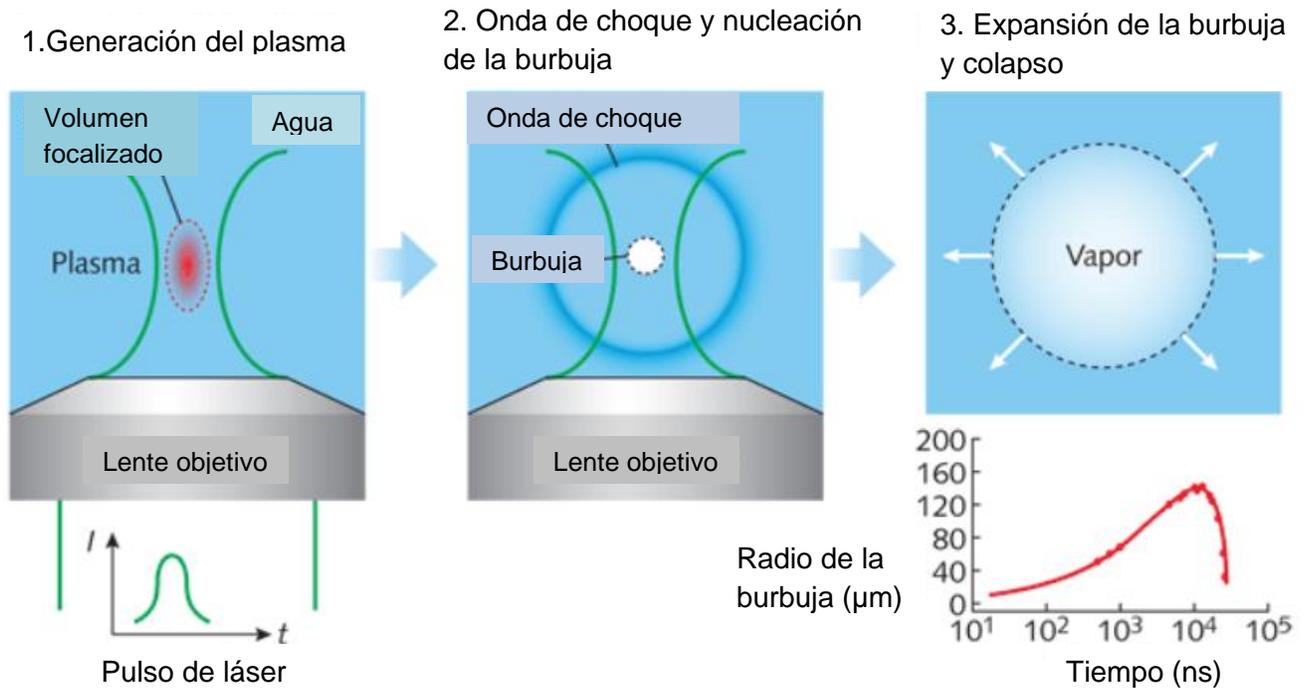


Figura 11: Cavitación transitoria por medio de un punto focalizado utilizando un láser [17].

MÉTODO DE DETENCIÓN SÚBITA

El método de detención súbita o conocido como “tube-arrest method”, se ha utilizado como experimento para poder generar cavitación transitoria y luminiscencia. El método consta básicamente de una barra que contiene una ligera abolladura o muesca en su extremo inferior, se introduce a lo largo del eje vertical de un tubo que contiene al líquido de trabajo, de esta forma se forma un núcleo de burbuja de aire en la muesca. El tubo se sujeta a una placa, que se desplaza de forma vertical y que a su vez está sujeta a un resorte fijado en un extremo. Para la generación de cavitación el tubo se tira una cierta distancia hacia abajo, estirando el resorte almacenando energía. El tubo se libera para ser tirado rápidamente por el resorte, hasta el punto donde se encuentra con un tope, momento en el cual se detiene súbitamente la placa con el tubo. De esta forma el líquido contenido en el tubo se somete a una tensión debido a la velocidad con el que el resorte jala hacia arriba. La generación, expansión y colapso de una o varias burbujas se capturan con una cámara de alta velocidad para visualizar la evolución del fenómeno de cavitación. La figura 12 muestra un arreglo experimental para producir cavitación por el método de detención súbita.

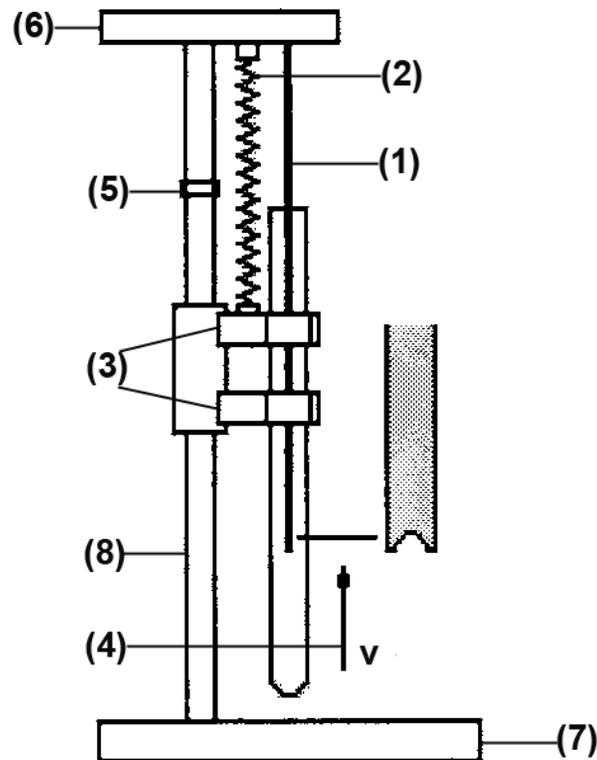


Figura 12. Arreglo experimental para la generación de cavitación transitoria. Las partes que lo integran son: (1) barra que contiene la muesca en su extremo inferior, donde se genera el núcleo de aire para generar la burbuja, (2) resorte que tira del tubo hacia arriba con una velocidad v , (3) sujetadores para el tubo que contiene al líquido, (4) tubo que contiene el líquido, (5) tope donde se detiene repentinamente el tubo que es tirado por el resorte, (6) placa de sujeción superior, (7) placa de sujeción inferior, (8) corredera [18].

En comparación con los métodos de bala-pistón y burbuja inducida por láser, el método de detención súbita prescinde de instrumentación adicional como lo es el láser, o como lo es el pistón. Son menos los parámetros a considerar al utilizar esta instrumentación. Por otro lado, con el método de detención súbita es posible producir burbujas de tamaño del diámetro del tubo que contiene al líquido, es decir, por arriba del orden de 2cm o incluso mayores; mientras que con otros métodos solo se crean burbujas del orden de algunos mm.

En la figura 13 se muestra una serie de fotografías (tomadas con una cámara de alta velocidad) donde se observa cómo evoluciona el crecimiento de la burbuja justo en la muesca de la barra (1), ver figura (12). También se observa como la burbuja se separa de la muesca y al final del proceso colapsa [19].

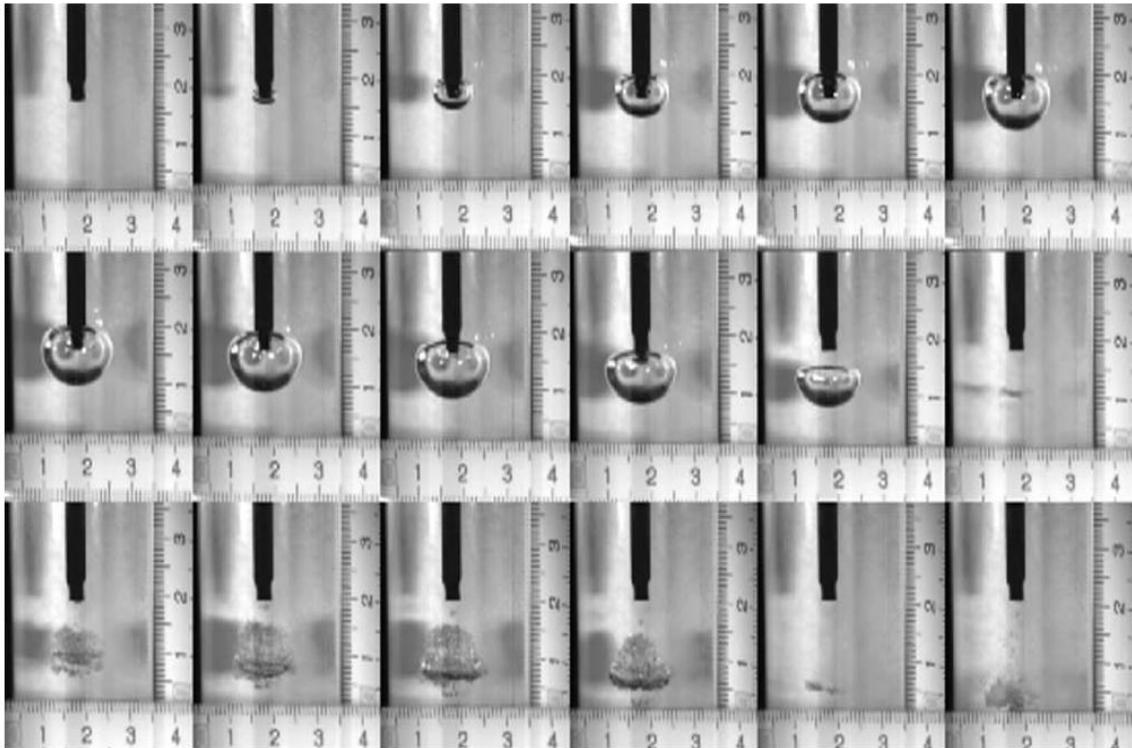


Figura 13. Fotografías del proceso de cavitación transitoria por el método de detención súbita utilizando como líquido agua, la velocidad final del recorrido antes de la detención fue 1.2m/s [19].

Es importante mencionar que se han hecho diversos estudios sobre cavitación transitoria con el método de detención súbita utilizando diferentes líquidos. Tales como ácido sulfúrico, agua, poliacrilamida, carboximetilcelulosa y ácido fosfórico. Esto permite obtener diferentes comportamientos durante la generación de cavitación y sonoluminiscencia, dependiendo de las propiedades del líquido que se está utilizando.

En la tabla (1), se indican algunos de los experimentos realizados con el método de detención súbita, utilizando diversos tipos de fluidos. Inclusive en algunos casos donde se usan ácidos (sulfúrico y fosfórico) se adicionan gases nobles tales como el Argón, Xenón y Helio.

En la mayoría de los trabajos teórico experimentales resumidos en la tabla (1) se utilizan ecuaciones simplificadas de la dinámica de burbujas, como las ecuaciones de Rayleigh y Rayleigh-Plesset. La instrumentación utilizada en la mayoría de los casos está constituida por cámaras de alta velocidad, fotomultiplicadores, hidrófonos, transductores piezoeléctricos y osciloscopios. Las condiciones de presión y temperatura en la mayoría de los experimentos son las ambientales estándar mientras no se indique otro dato.

Tabla 1. Arreglos experimentales para la generación de cavitación transitoria utilizando diversos líquidos, gases y diversas condiciones de presión y temperatura.

Autor y año	Fluido	Instrumentación	Condiciones de temperatura y presión	Modelos matemáticos
G.D.N Overton y D.H. Trevena [25] (1980)	Agua	Tubo vertical acero, polietileno. Transductor piezoeléctrico, hidrófono, osciloscopio.	Temperatura Ambiente. Presión atmosférica.	—
D.H Trevena. [16] (1984)	Agua	Cámara de alta velocidad, alambre de platino, electrodos de platino, láser.	Temperatura Ambiente. Presión atmosférica.	—
By P. R. Williams, P. M. Williams, S. W. J. Brown y H. N. V. Temperley [21] (1998)	Agua	Transductores de presión dinámica, cámara de alta velocidad, videocámara Kodak, intensificadores. Iluminación por lámparas flash de xenón.	Temperatura de 20°C. Presión atmosférica.	Esfuerzo y velocidad que surge de la reflexión de ondas de compresión (Temperley y Trevena 1979) [21].
Chen Qi-Dai and Wang Long. [19] (2003)	Agua destilada	Cámara de alta velocidad, PMT, PZT.	Temperatura Ambiente. Presión atmosférica.	Se considera un modelo que está en función de la altura de la columna de agua con respecto al tiempo. No se puede considerar el modelo de Rayleigh, ya que la burbuja deja de tener la forma esférica tomando la forma cilíndrica del tubo.
Chen Qi-Dai y Wang Long [22] (2004)	Glicerina	Cámara de alta velocidad, tubo fotomultiplicador.	Temperatura del fluido varió: 16°C, 24°C y 32°C. Presión atmosférica.	—
Avik Chakravart Theo Georgiou, Tacye E. Phillipson, and Alan J. Walton [23] (2004)	Ácido fosfórico (disuelto con xenón).	Oscilador sinusoidal, vibrador, amplificador de audio, altavoz subwoofer.	Ambiente Los tubos contienen rastros de aire disuelto (0.1–10 Torr), restante de una incompleta desgasificación del agua.	—
David J. Flannigan y Kenneth S. Suslick [24] (2005)	Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) 85% en peso. Se añadió Xe, Ar y He en 3 muestras diferentes.	Hidrófono, resonador de 7mm de diámetro.	Temperatura ambiente Se dopó al líquido a una presión de 50 Torr de He, Ar y Xe para cada uno de los experimentos.	—

Emil A. Brujan y P. Rhodri Williams [20] (2005)	Fluidos no-newtonianos (Polímeros como poliacrilamida, carboximetilcelulosa).	Cámara de alta velocidad, hidrófono, láser, emisor de ultrasonido.	Temperatura Ambiente. Presión atmosférica.	Rayleigh–Plesset (Comportamiento de una burbuja en un fluido incompresible). Ecuación de Gilmore (Pérdida de energía de la burbuja debido a las ondas de presión radiadas) Ecuación Reológica de Williamson (Viscosidad aparente). No incide de forma importante la Reología del fluido en el colapso de las burbujas.
Qi-Dai Chen, Long Wang. [19] (2005)	Agua —	Cámara de alta velocidad, Arreglo de dispersión de luz, fotomultiplicador, transductor piezoeléctrico.	Temperatura Ambiente. Presión atmosférica.	—
Frederic Caupin y Eric Herbert. [26] (2006)	Agua —	Resonador esférico, micrófono piezoeléctrico	Temperatura de 22°C. Presión atmosférica.	—
Ying Chong-Fu and Li Chao , Xu de Long, Deng Jing-Jun[27] (2008)	Agua destilada, Etilenglicol. —	Hidrófono, transductor piezoeléctrico, fotomultiplicador.	Temperatura Ambiente. Presión atmosférica.	Modelo que considera la presión ejercida en la columna del líquido, considerando parámetros como el módulo de elasticidad, velocidad del flujo, longitud de la columna, desplazamiento de la misma.
Raúl Urteaga, Pablo Luis García-Martínez, and Fabián J. Bonetto [28] (2009)	Ácido fosfórico saturado con gas noble (xenón). —	Fotografía estroboscópica, altavoz, motor, esfera de vidrio al vacío no unido al tubo, fotodiodo para el desplazamiento vertical, cámara de alta velocidad, fotomultiplicador, lentes esféricas para un plano de iluminación uniforme, filtros para luz dispersa.	Temperatura de 28°C. Se dopó el líquido con gas xenón a una presión aproximada de 27mbar.	—
Matev Dular y Olivier Coutier-Delgosha [29] (2013)	Agua —	Termocámara, cámara de alta velocidad, cristal de zafiro, fotomultiplicador.	Temperatura Ambiente. Presión atmosférica.	Modelo de Rayleigh considerando los efectos térmicos en el crecimiento y colapso de la burbuja en sus alrededores.

CAPÍTULO

3

Experimentos de cavitación transitoria

3.1 Dispositivo mecánico para producir cavitación, usando el método de detención súbita de una columna de líquido.

La figura (15) muestra el dispositivo mecánico que se utilizó para llevar a cabo los experimentos de cavitación transitoria. El dispositivo está compuesto por un soporte, donde están dispuestos tres columnas cilíndricas de acero montadas entre dos placas de sujeción, una superior y una inferior (7). En la parte superior del dispositivo mecánico y unido a la placa de sujeción superior, está dispuesto un resorte (2), cuyo extremo inferior se une a un gancho (9), el cual, está sujeto a una primer placa con buje guía (10) y esta a su vez se une, a una distancia de separación D , a una segunda placa con buje guía, ambas se desplazan de forma vertical hacia arriba y hacia abajo a través de las tres correderas cilíndricas de acero (8). Asegurado en la placa de sujeción superior (6), está dispuesto el vástago de acero con 718 mm de largo (1), donde, en su extremo inferior, se pueden montar las distintas puntas que contienen la muesca de ~ 1 mm de diámetro (ver figura 16, detalle A y el apéndice B), el vástago se introduce a lo largo del tubo de cristal (4) de 26 mm de diámetro externo, 2 mm de espesor y 480 mm de largo que contiene al líquido. El tubo con líquido se monta y se fija a placas con bujes guía (10) mediante dos sujetadores (5). El dispositivo mecánico, permite acelerar el conjunto de placas con bujes guía (10) y el tubo (4) con líquido mediante la fuerza elástica ejercida por el resorte (2) al ser estirado una distancia h , ver figura 16. Pero la cavitación se logra con la detención súbita de la columna de líquido contenida en el tubo (4), lo cual se logra con los tres topes de neopreno (3). Cuando la columna se frena, se genera un pulso de presión negativa que “tensiona” al líquido haciendo que la burbuja inicial (núcleo) localizada en la muesca del extremo inferior del vástago (1), ver figura (16) crezca y colapse cíclicamente hasta extinguirse.

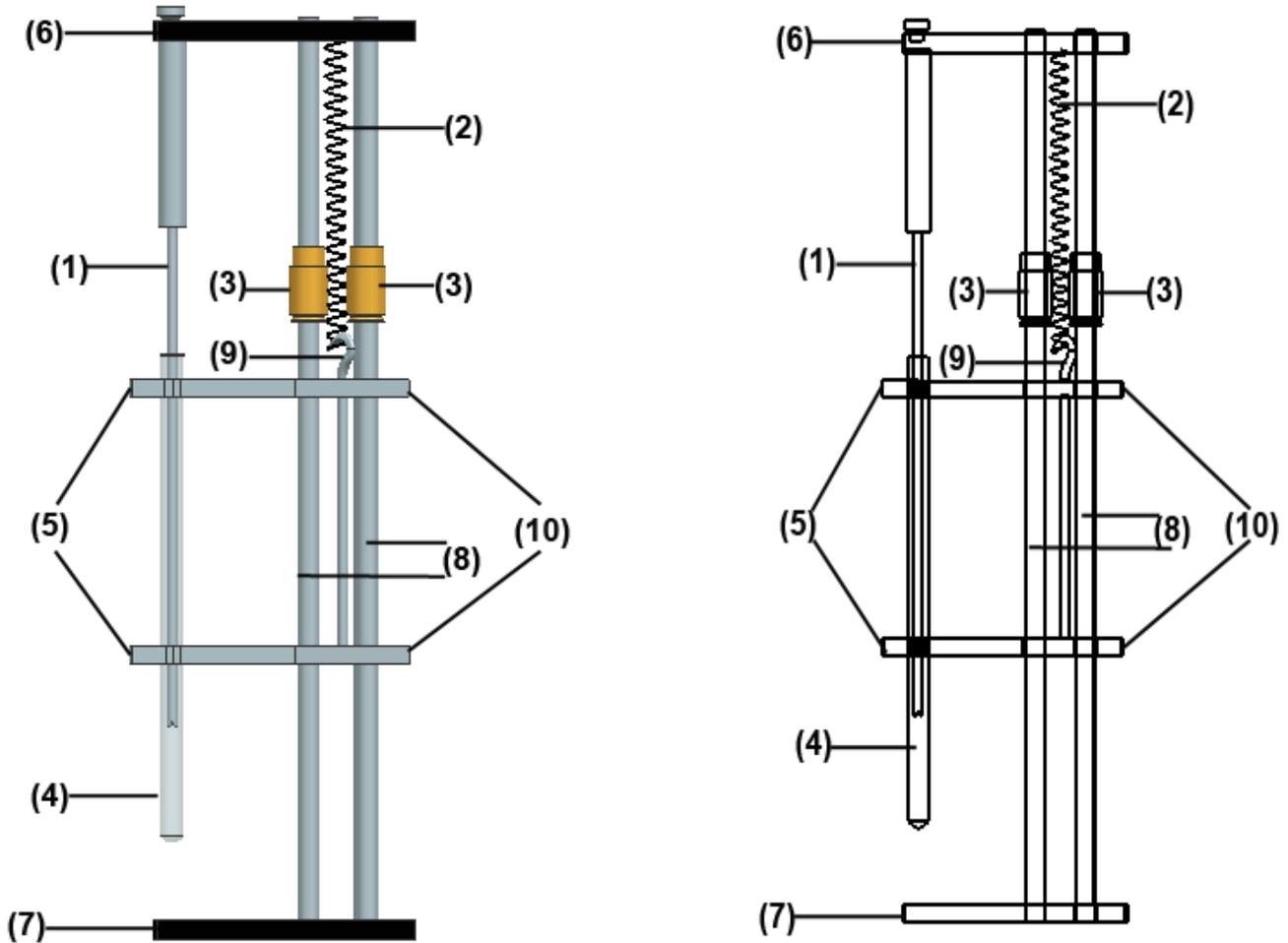


Figura 15. Dispositivo mecánico para generación de cavitación transitoria, vista lateral izquierda: (1) Vástago donde se acoplan, por medio de rosca, las puntas (ver apéndice B) que contienen la muesca en su extremo inferior, donde se genera el núcleo de aire para generar la burbuja, (2) resorte que tira del tubo hacia arriba con una velocidad v , (3) tres topos de neopreno donde se detiene repentinamente el tubo que es tirado por el resorte, (4) tubo que contiene el líquido, (5) sujetadores del tubo que contiene al líquido, (6) placa de sujeción superior, (7) placa de sujeción inferior, (8) correderas cilíndricas de acero, (9) gancho que sujeta el extremo inferior del resorte, (10) placas con bujes guía.

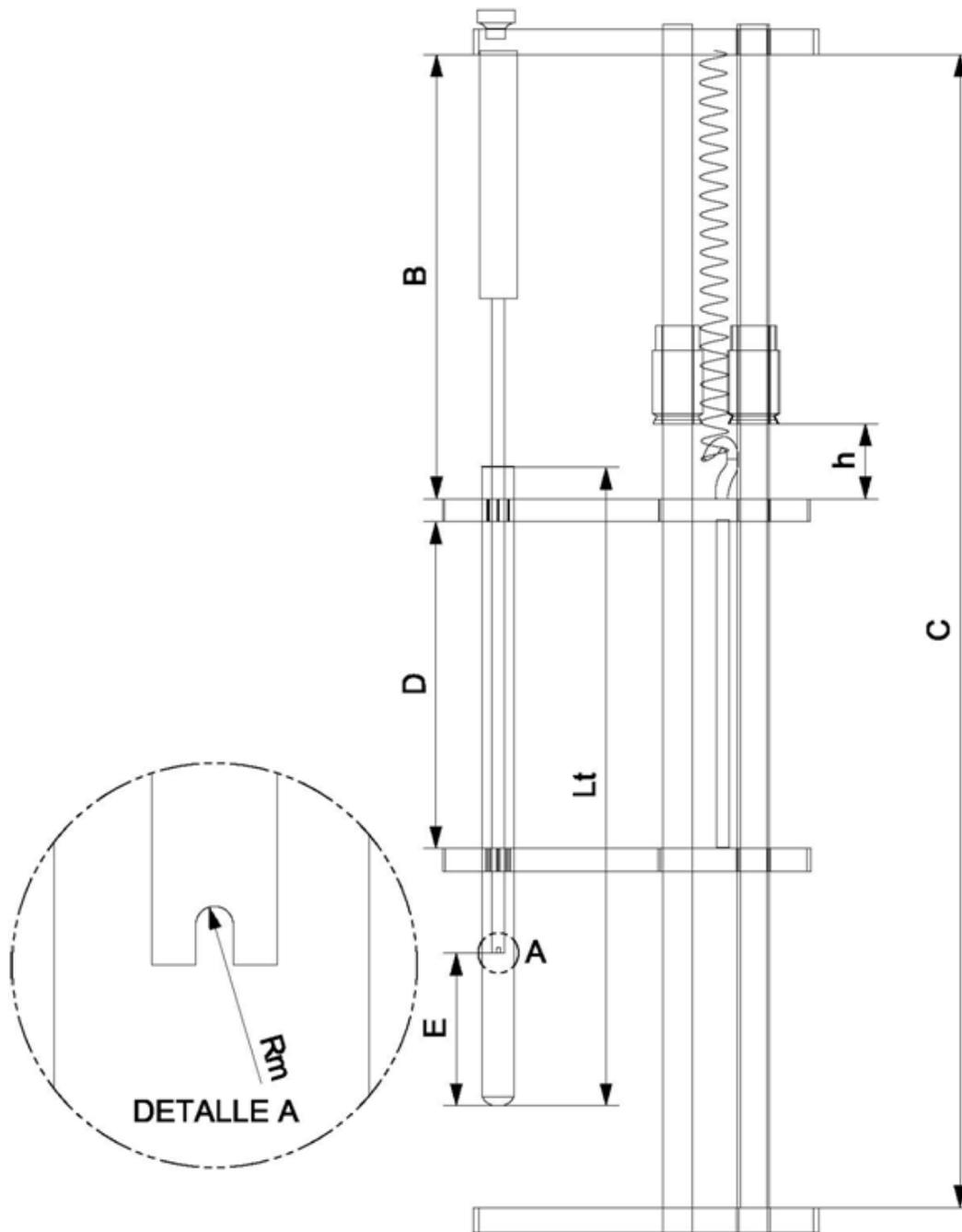


Figura 16. Plano del dispositivo mecánico para crear cavitación transitoria. Los parámetros a considerar para el experimento de cavitación son: **h**, que corresponda a la carrera del tubo hacia arriba hasta el punto donde se detiene subitamente con los topes de neopreno; **Lt**, es la longitud del tubo que contiene el líquido; **Rm**, es el radio de la muesca del vástago que se introduce en el tubo con líquido; **B**, es la distancia de la placa de sujeción superior a la placa-corredera superior; **C**, es la distancia entre la placa de sujeción inferior y la placa de sujeción superior; **D**, es la distancia entre la placa-corredera superior y la placa-corredera inferior; **E**, es la distancia de la punta que contiene la muesca donde se inserta el núcleo de burbuja a la punta del tubo que contiene el líquido. El detalle **A**, muestra la muesca donde inicialmente se atrapa una cantidad de gas que sirve de núcleo para hacer propicia la cavitación.

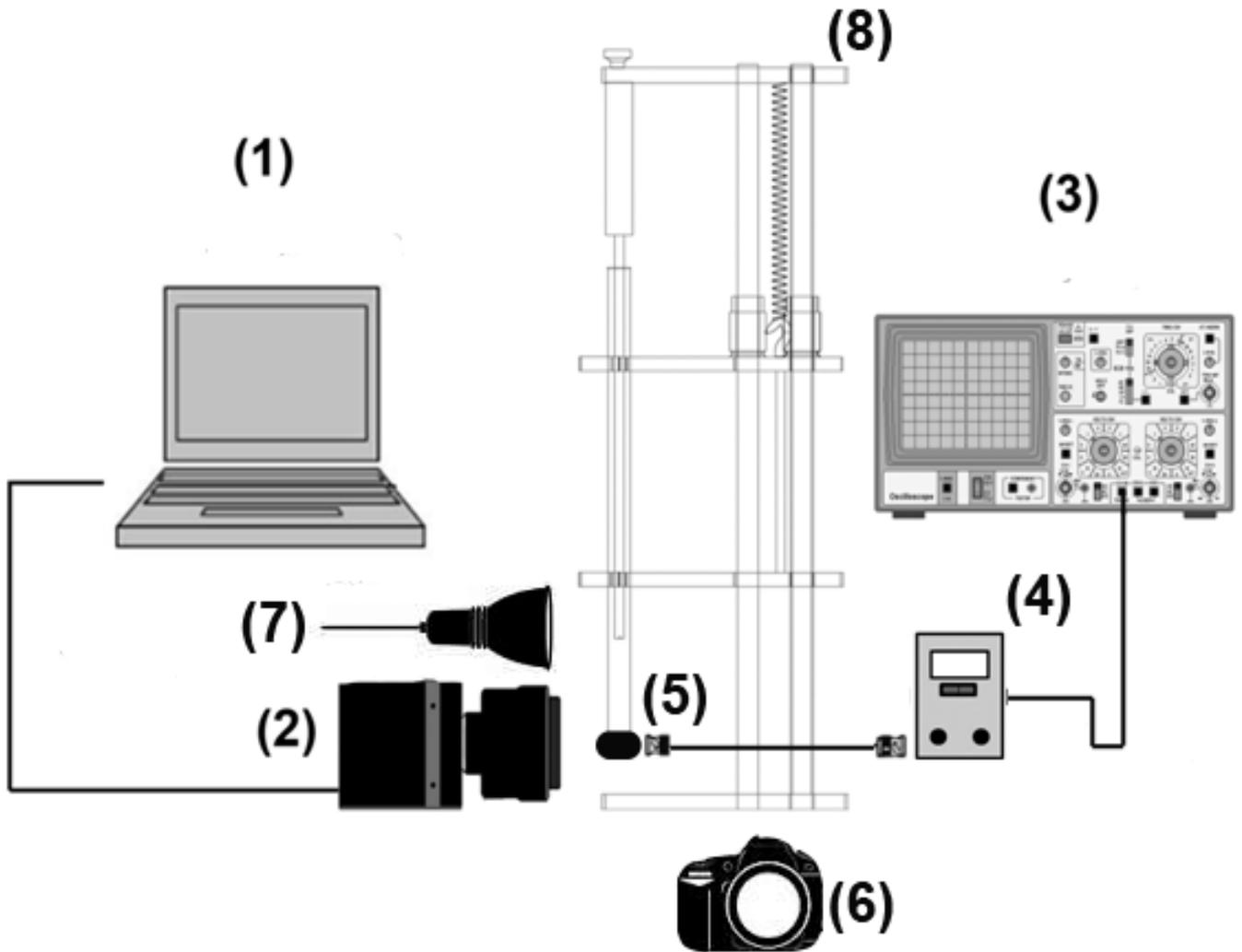


Figura 17. Arreglo experimental para generar cavitación transitoria, (1) computadora conectada a la cámara de alta velocidad para obtener las imágenes de alta velocidad del fenómeno, (2) cámara de alta velocidad, (3) osciloscopio, (4) acondicionador de señales, (5) sensor de fuerza, (6) cámara digital, (7) lámpara de xenón, (8) dispositivo mecánico para acelerar/desacelerar subitamente una columna de líquido.

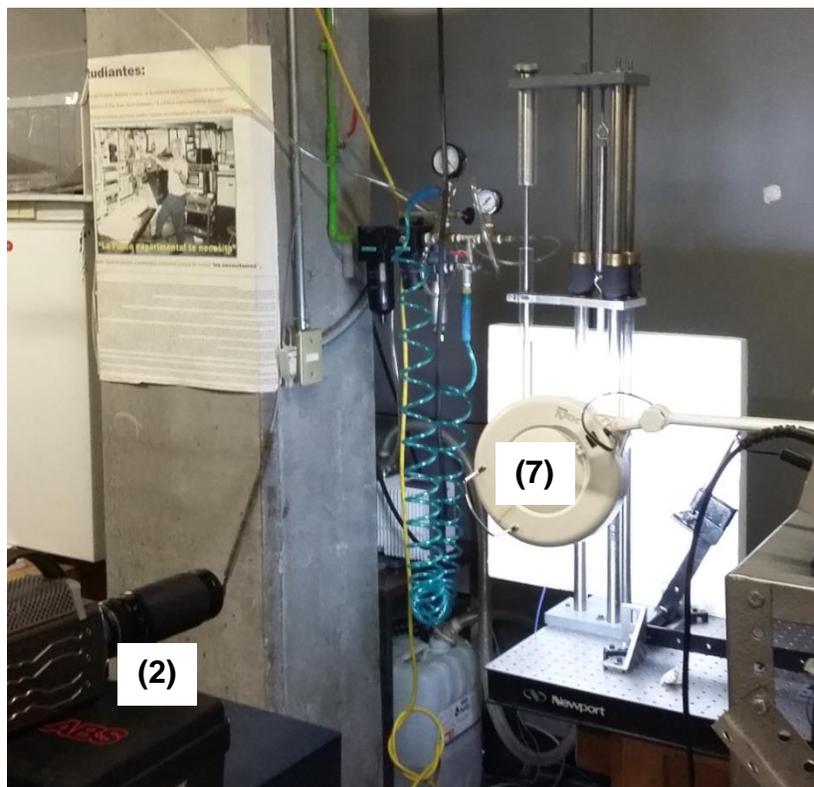
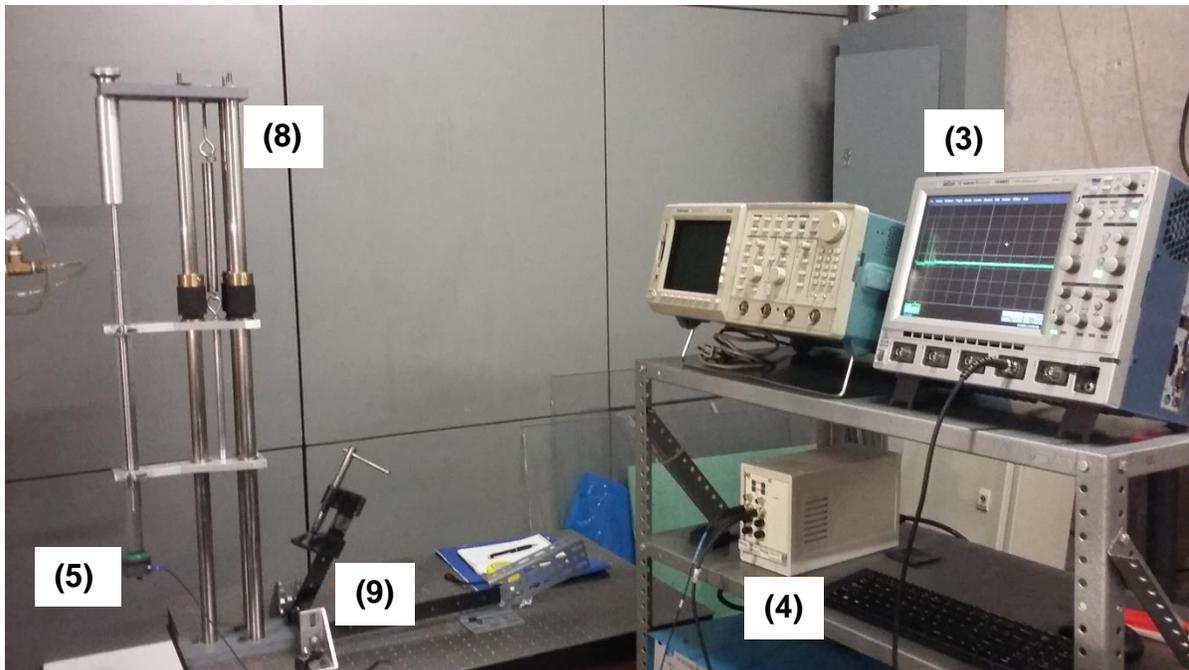


Figura 18. Arreglo experimental para generar cavitación transitoria , este arreglo consta de (2) cámara de alta velocidad Phantom V 9.1, (3) osciloscopio Tektronix TDS540 A 500 MHz de 4 canales y (4) acondicionador de señal PCT (5) sensor de fuerza modelo PCB 200B04 4.448kN (6) cámara digital Casio Exilim Exf1 60 fps (7) lámparas de xenon, (8) dispositivo mecánico, (9) gatillo mecánico.

3.2 Metodología para realizar los experimentos.

Todos los experimentos se realizaron a condiciones ambientales de temperatura y presión, $T \sim 20^\circ\text{C}$ y 77 kPa respectivamente.

1. Como primer paso, se requiere desgasificar cada uno de los líquidos por un lapso de 15 minutos; esto nos permite aminorar las cavidades por gases que se encuentren dentro del líquido y así poder reproducir el fenómeno por cavitación de mejor manera para su posterior análisis.
2. Limpiar el tubo (4) para eliminar posibles manchas y facilitar la visualización por medio de la cámara de alta velocidad, esto se debe hacer antes y después de verter el líquido de prueba (fluido newtoniano y no newtoniano).
3. Verter cualquiera de los líquidos (fluido newtoniano o no newtoniano) en el tubo (4), hasta alcanzar una columna de fluido de 33cm. Posteriormente, se fija el tubo (4) con líquido al dispositivo experimental de tubo de arresto, utilizando los sujetadores (5), ver figura (15).
4. Fijar la carrera 'h', que recorrerá el tubo con el líquido antes de ser detenido subitamente. En cada experimento se vario 'h'; empezando en $h = 5.5\text{cm}$, $h = 6\text{cm}$, $h = 8\text{cm}$, $h = 11.5\text{cm}$, $h = 14\text{cm}$, $h = 15\text{cm}$ y $h = 18\text{cm}$.
5. Preparar lámparas (7), cámara de alta velocidad (2) y sensor de presión (5) con el osciloscopio (3) para la cáptura de de datos de cada uno de ellos, ver figura (18).
6. Una vez todo preparado, el experimento se lleva a cabo liberando el sistema por medio del gatillo mecánico (9) y grabando todo el proceso por medio de la cámara de alta velocidad (2), cámara digital (6) y el osciloscopio (3) (ver figuras 17 y 18).
7. Se realizaron una prueba para cada valor de 'h' y para ambos fluidos (newtoniano y no newtoniano)

En la tabla (2), se encuentran los distintos valores de 'h' que se utilizaron para cada uno de los experimentos.

Carrera 'h'	Valor [cm]
h1	5.5
h2	6
h3	8
h4	11.5
h5	14
h6	15
h7	18

Tabla 2. Tabla de los respectivos valores de la carrera 'h'.

3.3 Preparación del fluido no newtoniano y su caracterización reológica.

La metodología para preparar el gel de carbopol es la siguiente:

1. Colocar 99.88% en peso de propilenglicol en un vaso de precipitado.
2. Verter 0.10% en peso de carbopol al vaso de precipitado con el propilenglicol del paso 1.
3. Mezclar la solución perfectamente con un agitador durante 1 minuto.
4. Añadir 0.02% en peso de trietanolamina gota a gota, mientras se agita la mezcla al mismo tiempo, hasta obtener una mezcla lo más homogénea posible.
5. Dejar reposar la mezcla por un lapso de 12 horas, antes de ser caracterizada reológicamente.

Los fluidos newtoniano y no newtoniano fueron caracterizados en un reómetro marca Anton Paar, modelo Physica MCR 101.

En la figura (19) se muestran las gráficas del fluido Newtoniano (Propilenglicol), aplicando un ajuste con la expresión (2), ley de potencia o de Ostwald-de Waele, la caracterización se realizó a 25°C ,15°C y a 4°C. En las gráficas 19a, 19b y 19c; se observan las curvas reológicas del fluido Newtoniano a distintas temperaturas. Como era de esperarse, la viscosidad tiene un comportamiento casi constante, conforme aumenta la velocidad de corte. En la gráfica 19a, se obtuvieron menos puntos en la caracterización; así mismo, la velocidad inicial de deformación tuvo como inicio, una década abajo en comparación con la gráfica 19b y 19c. En la gráfica 19c, en los últimos tres puntos se observa que disminuye la viscosidad, pero esto es debido a que a esas velocidades de deformación el fluido que se encuentra en el plato base, empieza a salirse del mismo, es decir, empieza a salpicar el fluido debido a la rotación del cono-plato y el reómetro lo detecta como una disminución en la viscosidad.

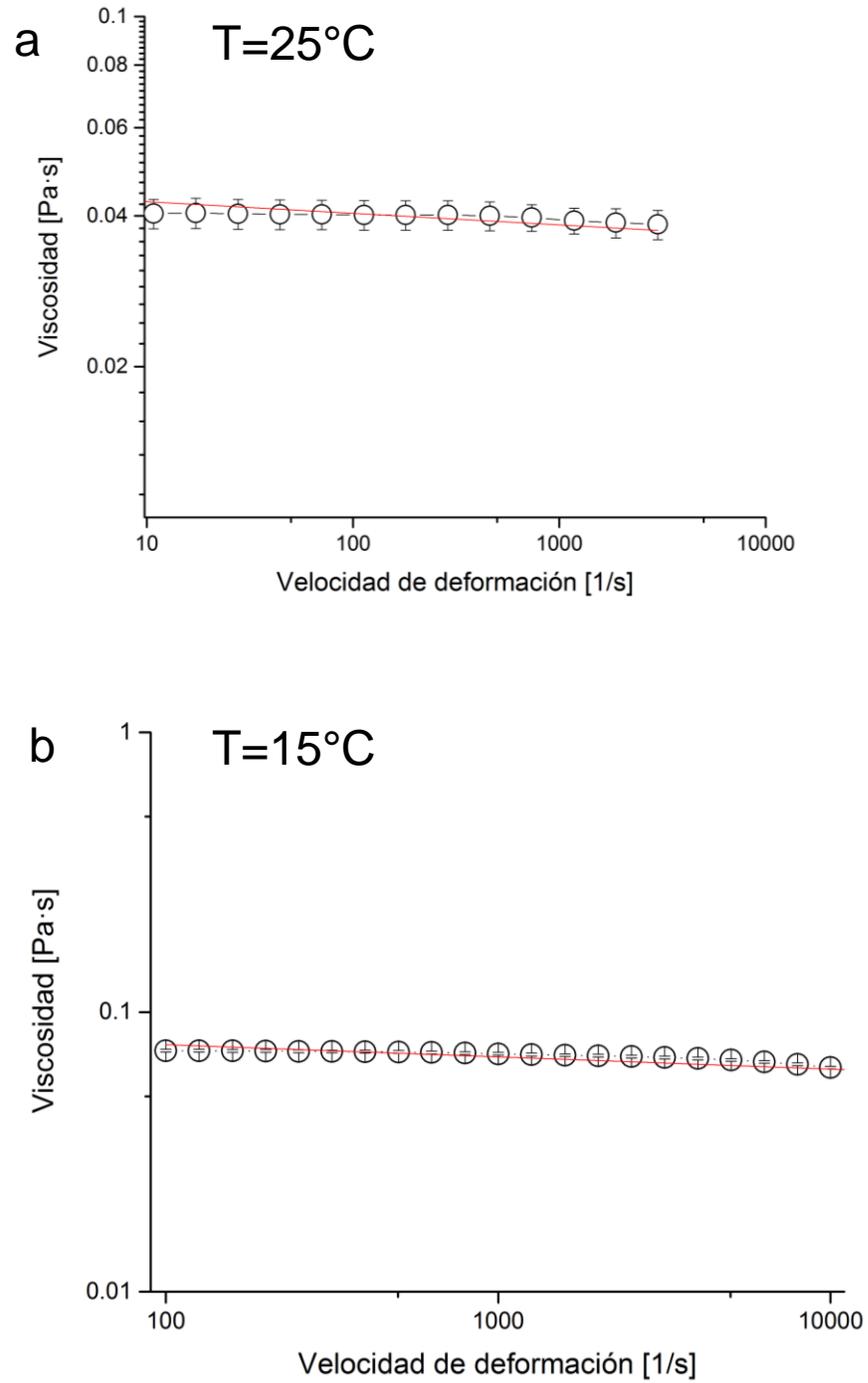


Figura 19. Gráfica log-log, de la velocidad de deformación vs viscosidad, obtenida en el reómetro (a) a 25°C , (b) a 15°C y (c) a 4°C del fluido Newtoniano (propilenglicol). **Continúa en pag. 34.**

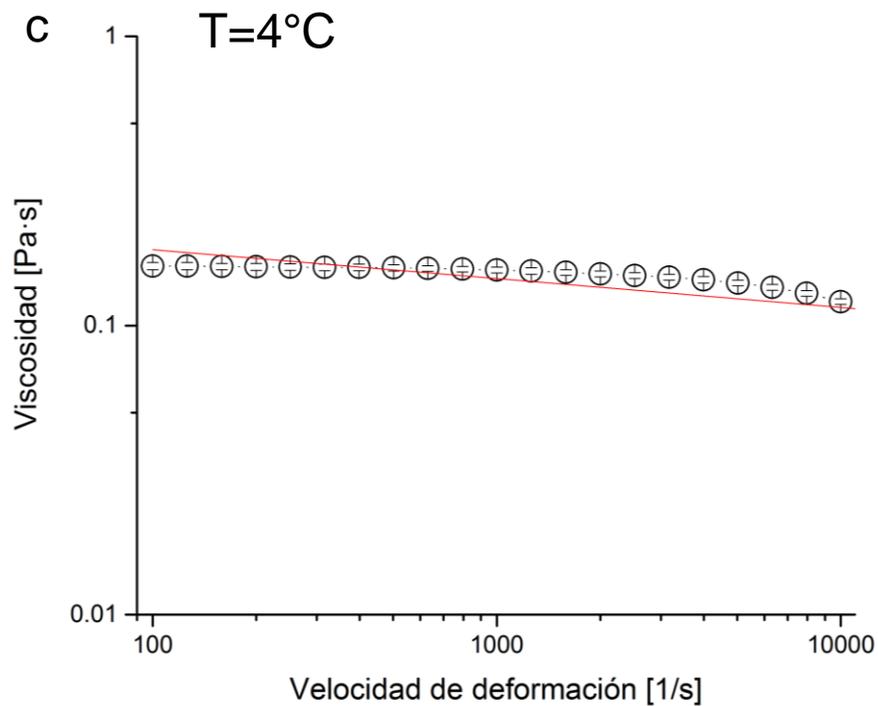
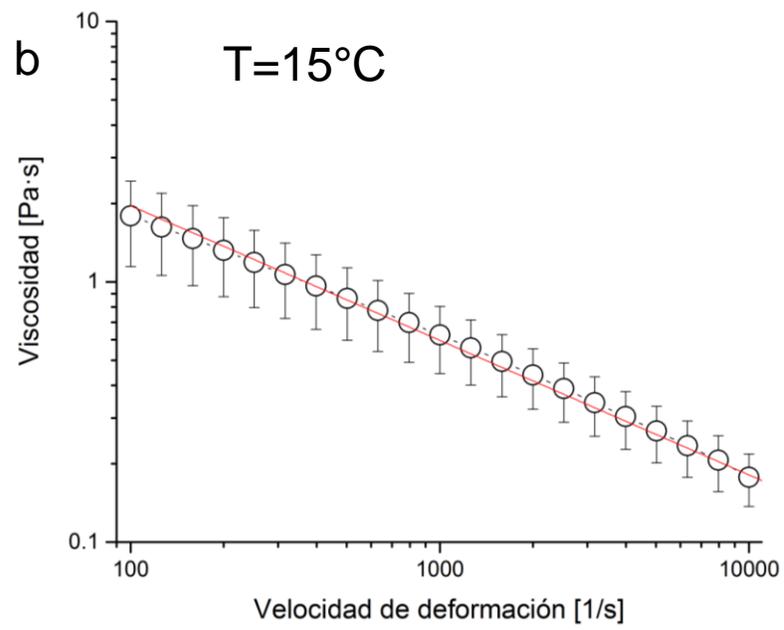
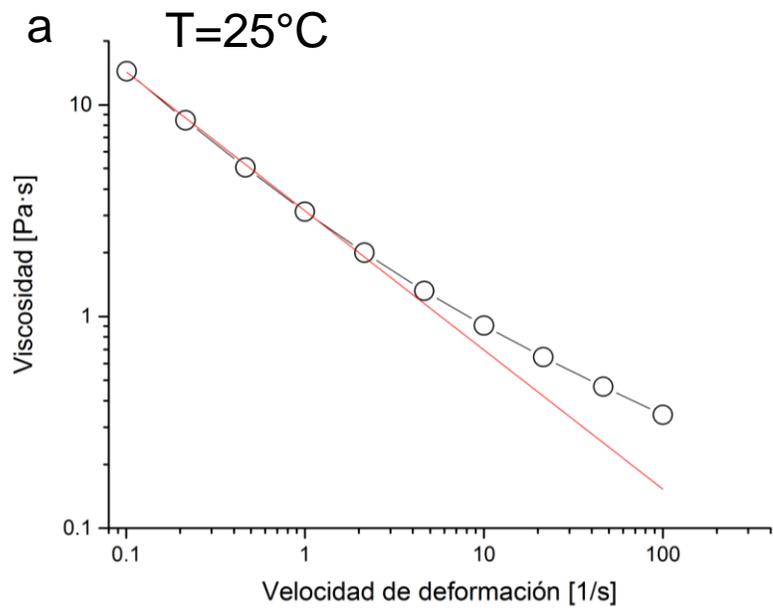


Figura 19. (Continuación de pag.33) Las líneas continuas en las gráficas, representan un ajuste de la ley de potencias. Los símbolos huecos representan los datos experimentales y las barras verticales en los símbolos huecos, son barras de error.

En la figura (20) se muestran las gráficas del fluido no Newtoniano. En la figura 20a, la velocidad de deformación inicial, comenzó tres décadas abajo en comparación con las figuras 20b y 20c; se puede observar que, en las tres gráficas la viscosidad disminuye conforme aumenta la velocidad de deformación, concluyendo; que efectivamente el gel de carbopol se comporta como un fluido no Newtoniano adelgazante.



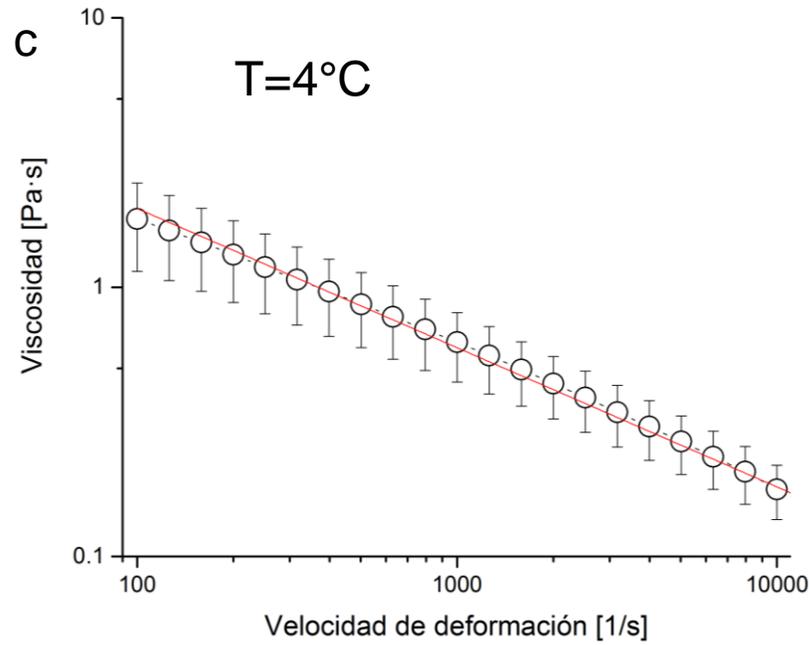


Figura 20. Gráfica log-log, de la velocidad de deformación vs viscosidad, obtenida en el reómetro (a) a 25°C, (b) a 15°C y (c) a 4°C del fluido no newtoniano (gel de carbopol). Las líneas continuas en las gráficas, representan un ajuste de la ley de potencias. Los símbolos huecos representan los datos experimentales y las barras verticales en (b) y (c) que atraviesan verticalmente los símbolos huecos, son barras de error.

La tabla (3) recopila los valores de n y k , de los ajustes de la ley de potencia a las curvas experimentales para ambos fluidos.

Tabla 3. Para la preparación del fluido no Newtoniano llamado (Gel de carbopol), se necesitan los siguientes compuestos químicos, propilenglicol (PG), etilenglicol (EG), Carbopol (C) y trietanolamina (TEA), indicados en porcentaje en peso). Los parámetros k y n son, los índices de consistencia y comportamiento, respectivamente, del modelo de la ley de potencia $\eta = k(\dot{\gamma})^{n-1}$. Se llevaron a cabo mediciones reológicas donde la velocidad de corte varía de $0.1 < \dot{\gamma} < 100$, $10 < \dot{\gamma} < 10000$ y de $100 < \dot{\gamma} < 10000 \text{ s}^{-1}$ [30].

Fluido	Composición	$n(-1)$	$k(\text{Pa} \cdot \text{s}^n)$	$\rho(\text{Kg}/\text{m}^3)$	$\eta(\text{Pa} \cdot \text{s})$
GEL DE CARBOPOL	PG/EG/C/TEA, 9/0.5/98.88/0.10/0.02	.70	1.031	1113	
Propilenglicol a 25°C		.977	0.045	1040	0.040
Propilenglicol a 15°C		.956	0.094	1040	0.070
Propilenglicol a 4°C		.90	0.289	1040	0.153
Gel de carbopol a 25°C		.723	1.1113	1113	0.430
Gel de carbopol a 15°C		.483	21.196	1113	0.526
Gel de carbopol a 4°C		.483	21.196	1113	0.733

CAPÍTULO

4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección, se analizan por medio de curvas y tablas, los resultados obtenidos después de realizar los experimentos para generar cavitación transitoria; también, se hace una breve discusión de los mismos.

En las figuras 21 a 23 se presentan la dinámica del sistema; básicamente el comportamiento de las placas con bujes guía y el tubo con líquido sujeto a ellas al liberarse por medio del gatillo mecánico e instantes después, impactar con los tres topes de neopreno. En la figura 21, 22 y 23; se observa el desplazamiento, velocidad y aceleración respectivamente, para cada uno de los valores que se le asignaron a 'h'. Las curvas se obtuvieron mediante análisis de videos usando el programa Tracker [31] (ver apéndice C).

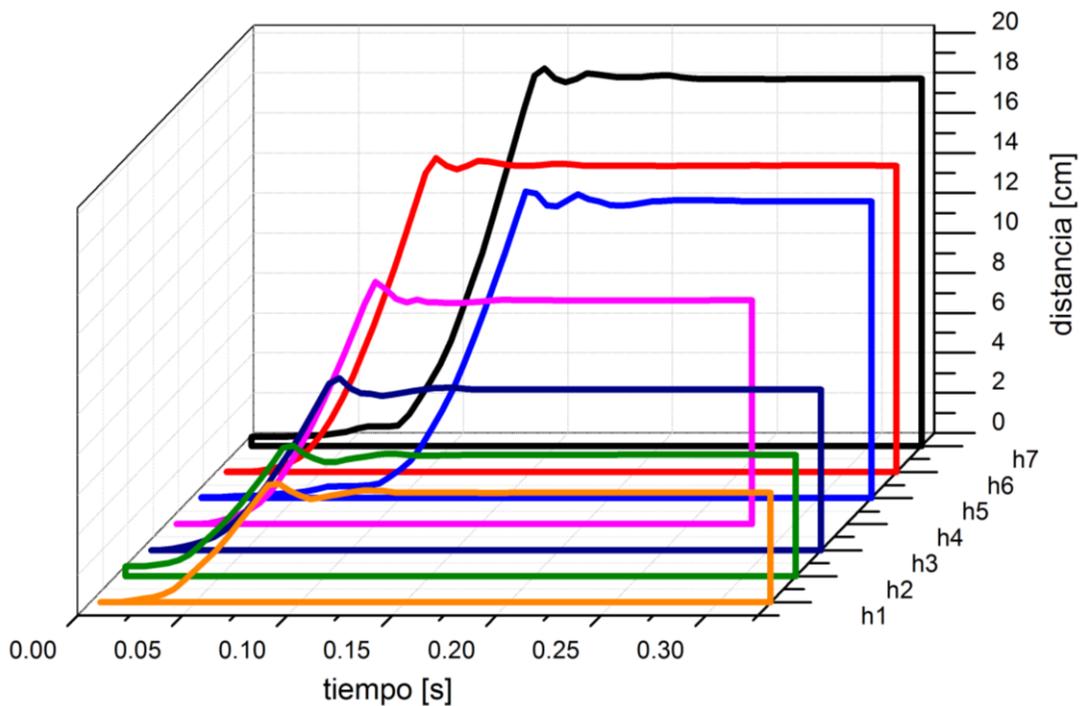


Figura 21. Curvas en cascada del desplazamiento de la columna de líquido para cada una de las 'h'; los tiempos de recorrido, son los alcanzados en el punto máximo de las curvas.

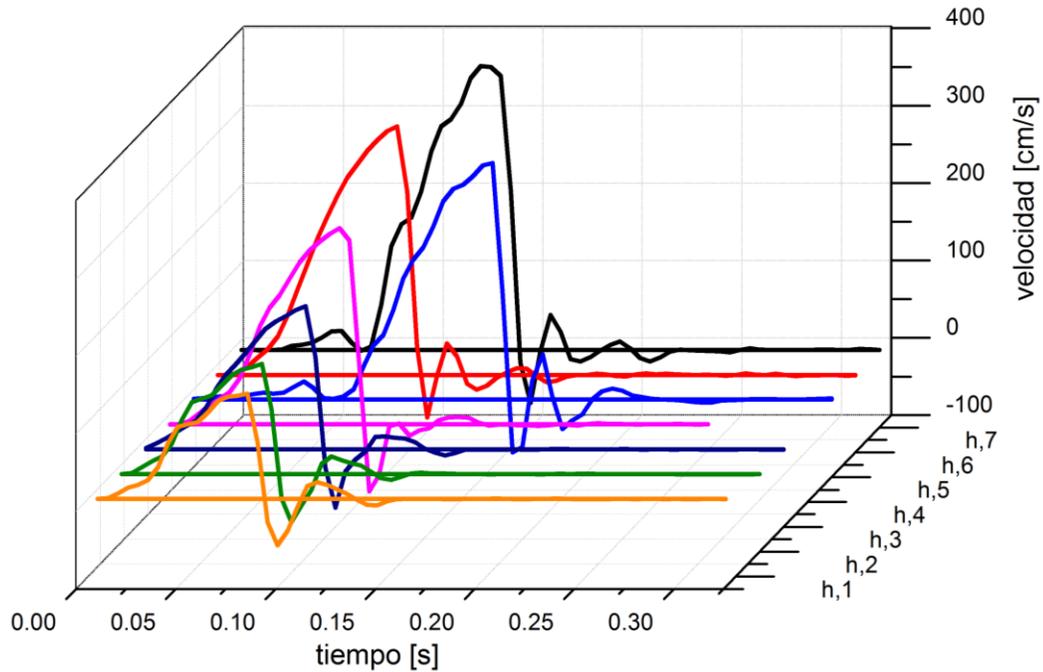


Figura 22. Curvas en cascada de la velocidad de la columna de líquido para cada una de las 'h'.

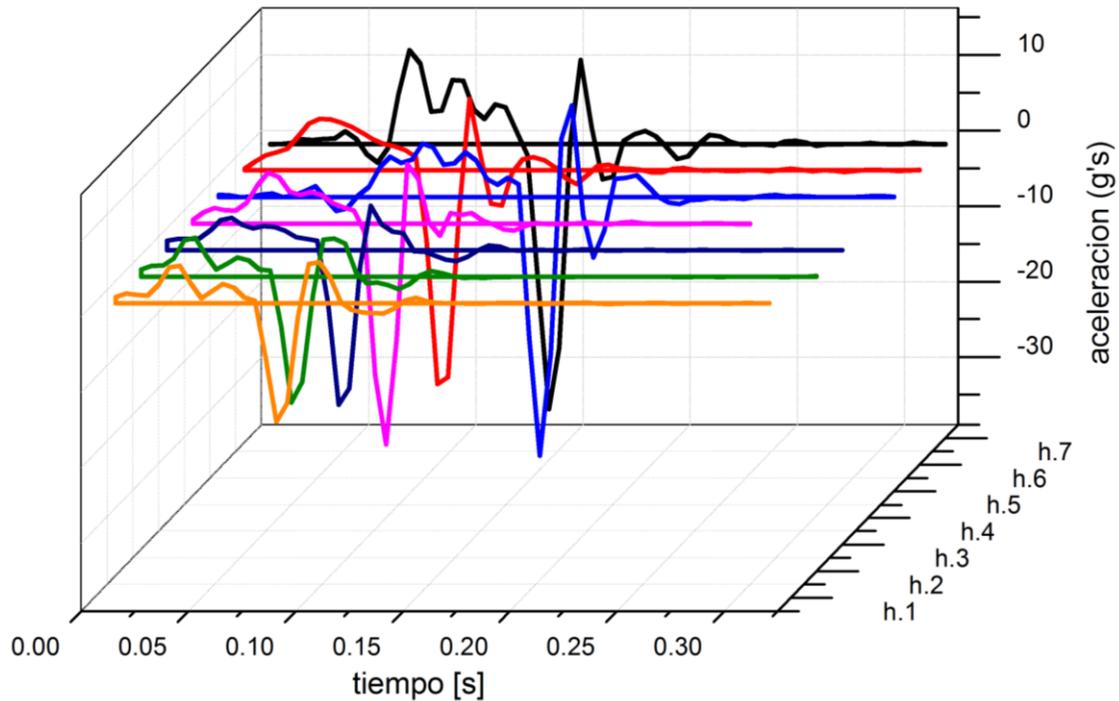


Figura 23. Curvas en cascada de la aceleración de la columna de líquido para cada una de las 'h'.

En la figura 24, se muestran las gráficas referentes al experimento realizado con el propilenglicol; donde, la carrera $h = 5.5$ cm. Las gráficas, representan la dinámica del sistema compuesto por el resorte, el tubo con líquido y las placas con bujes guía; desde el momento que se libera el sistema

accionando el gatillo mecánico, hasta su detención súbita con los tres topes de neopreno. Además, se muestra la dinámica de la burbuja desde un radio inicial, su crecimiento en el tiempo hasta un radio máximo y finalmente su colapso; cabe mencionar que, tanto las curvas de la dinámica del sistema, como las curvas de la dinámica de la burbuja; se obtuvieron con el sensor de fuerza, mostrando el comportamiento del fluido cuando se “comprime” (parte positiva de la figura 24c, entre 0 y 0.06 seg.) a lo largo de la carrera de ascenso y posteriormente, su “tensión” (parte negativa de la figura 24c, entre 0.06 y 0.07 seg.) al momento de ser detenido súbitamente por los tres topes de neopreno.

En 24a se muestra la gráfica del desplazamiento de la columna de líquido, tiempo de recorrido antes de ser detenido súbitamente es de ~ 0.06 s, la curva muestra un punto máximo ligeramente mayor a 5.5 cm, debido a que se comprimen los topes de neopreno posteriormente, el sistema se estabiliza en 5.0 cm. En 24b se muestra la curva de la velocidad, donde se observa que la velocidad pico que alcanza el tubo con líquido antes de ser detenido súbitamente es de 130 cm/s, como es de esperarse, alcanza ese pico en el mismo tiempo obtenido en la curva de desplazamiento. En 24c se muestra la curva de la aceleración, alcanzando una desaceleración en el momento de la detención súbita del tubo con líquido de 15 g's, en el mismo de ~ 0.07 s.

En 24d se muestra la curva obtenida por el sensor de fuerza, la fuerza debida a la aceleración del tubo con líquido en su desplazamiento hacia arriba, se relaciona con respecto al área efectiva del sensor; obteniendo una presión de ~ 1.5 Mpa con una duración de 0.05 s para después caer con una presión negativa de .25 Mpa en el momento de la detención súbita. Finalmente, en 24e se observa la evolución de la burbuja desde su crecimiento, hasta su colapso. Con un radio inicial de .27 cm, un radio máximo de .37 cm y un radio mínimo de .07 cm, con una duración del proceso de 2 ms.

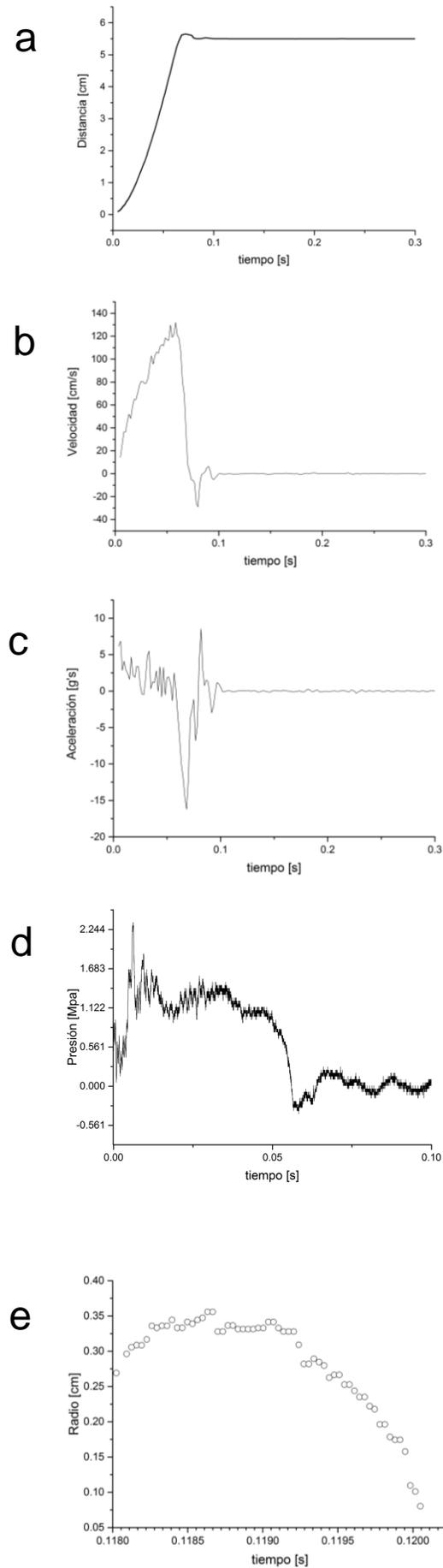


Figura 24. Gráficas correspondientes al experimento con fluido newtoniano (Propilenglicol). Para obtener las curvas con el programa Tracker, los experimentos del fenómeno de cavitación se grabaron con la cámara Phantom a 80000 fps (cuadros por segundo) y la dinámica del sistema (placas con bujes guía y tubo con líquido), fue grabada con la cámara digital a 600 fps.

En la figura (25) se muestra la gráfica que contiene el tiempo de recorrido y desplazamiento del sistema para cada una de las distancias 'h'. El recorrido (carrera) representa la distancia que avanza el tubo con líquido desde una posición inicial, hasta hacer contacto con los tres topos de neopreno. Es importante hacer notar que, el desplazamiento para cada 'h' es ligeramente mayor a la carrera original en cada punto, debido a que los tres topos de neopreno se comprimen un poco, debido a la fuerza que ejercen las placas con bujes guía al impactar sobre ellos. Por otro lado, en el tiempo de recorrido se observa un pico fuera de tendencia para h5, se puede discernir que en ese punto los bujes de las placas, al momento de su recorrido hacia arriba, experimentan cierto atascamiento con las correderas cilíndricas de acero, impidiendo su desplazamiento con fricción mínima, lo que ocasiona un mayor tiempo en su carrera.

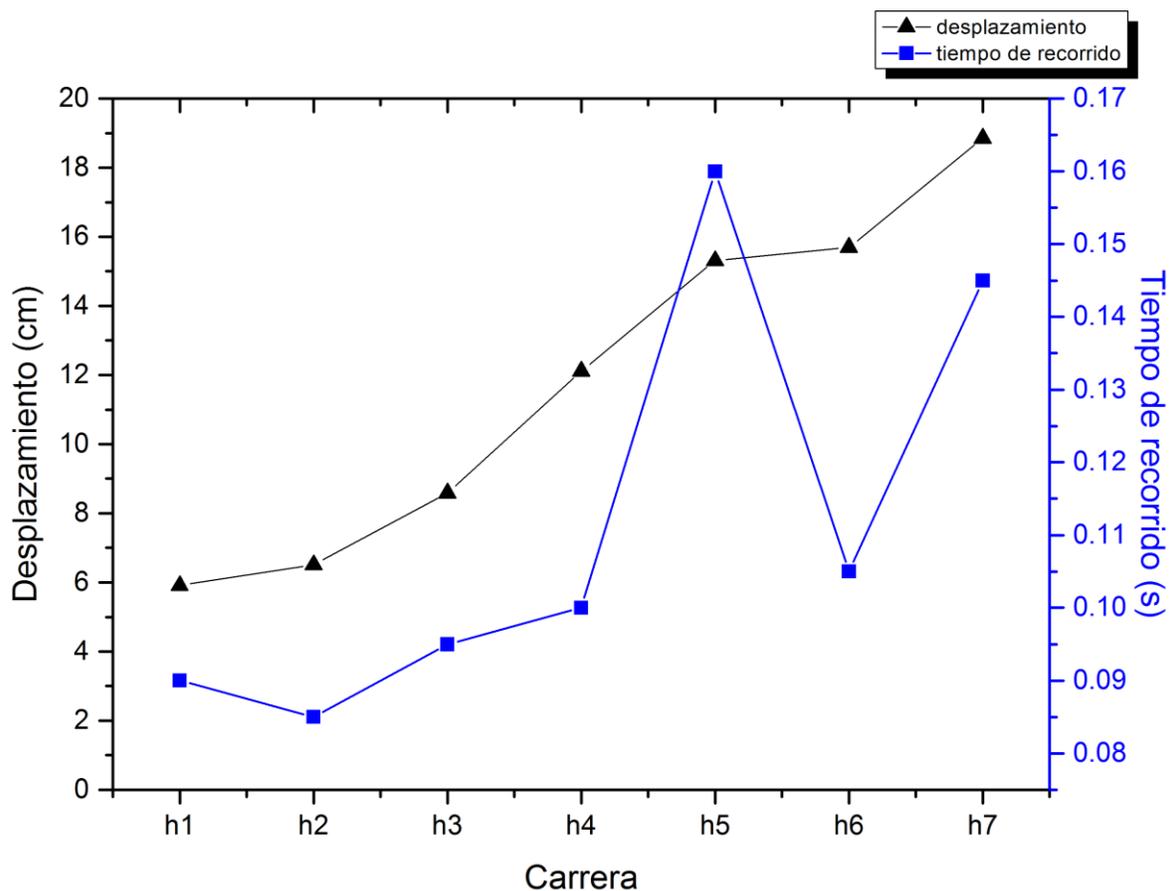


Figura 25. Desplazamiento y tiempo de recorrido contra carrera.

En la figura (26) se muestra la gráfica de la velocidad máxima que alcanza la columna de líquido para cada 'h', donde se observa que, al incrementar la carrera se incrementa la velocidad del sistema, antes de ser detenido súbitamente.

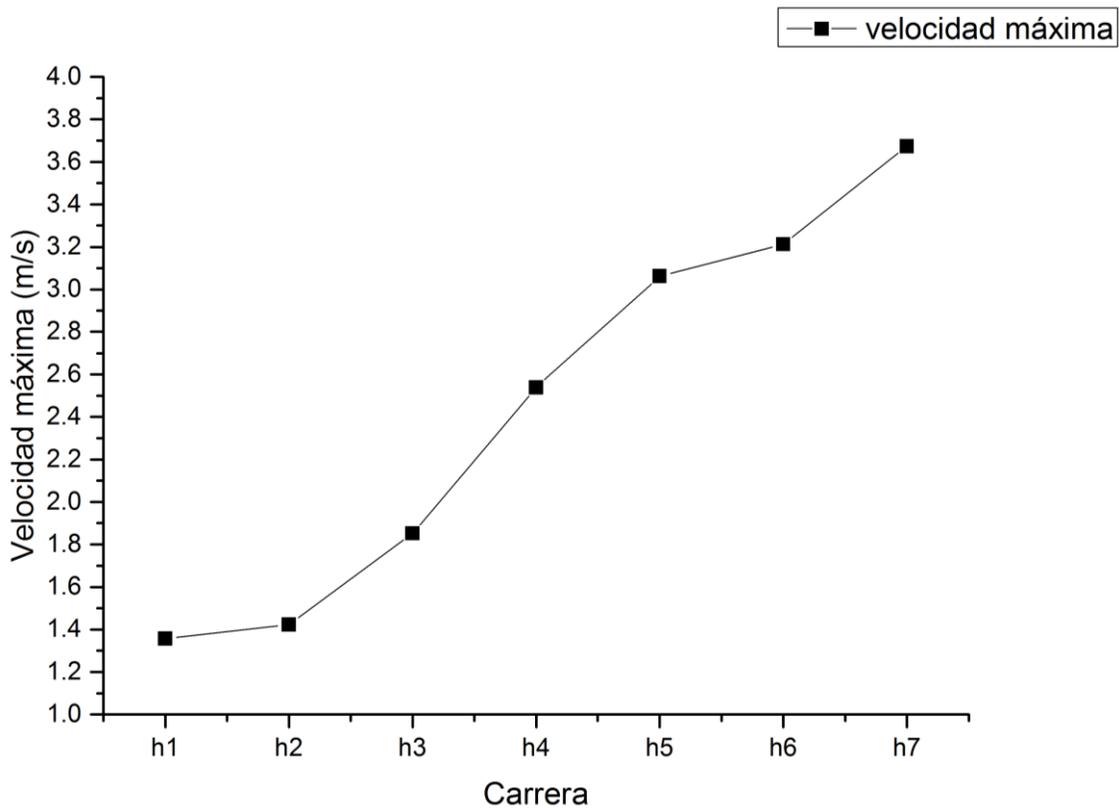


Figura 26. Gráfica velocidad contra carrera.

En la figura (27) se muestran las curvas de desaceleración y aceleración promedio del sistema, ambas medidas en g's, con respecto a cada una de las carreras 'h'. En primera instancia, se observa un cambio gradual de menor desaceleración a mayor desaceleración al incrementarse la carrera, sin embargo, para h6 se observa un comportamiento que rompe la tendencia y esto se puede atribuir a que, en cierto punto de la carrera hacia arriba antes de ser detenido súbitamente por los topes, el sistema de bujes con guía, experimentó algún roce o una mayor fricción con las correderas, desacelerando previamente el sistema antes de detenerse por completo. Por otro lado, la aceleración promedio en los puntos h1 y h4, presentan un comportamiento fuera de la tendencia y esto se atribuye a que, en algún punto del recorrido hacia arriba, los bujes guía experimentaron menor fricción con respecto a las correderas cilíndricas de acero, obteniendo una mayor aceleración.

Es de suma importancia hacer notar que, las desaceleraciones que se logran con el modelo de tubo de arresto son altas, alcanzando valores de hasta 36 g's. Precisamente, estas desaceleraciones "tensionan" al líquido facilitando la formación de cavidades.

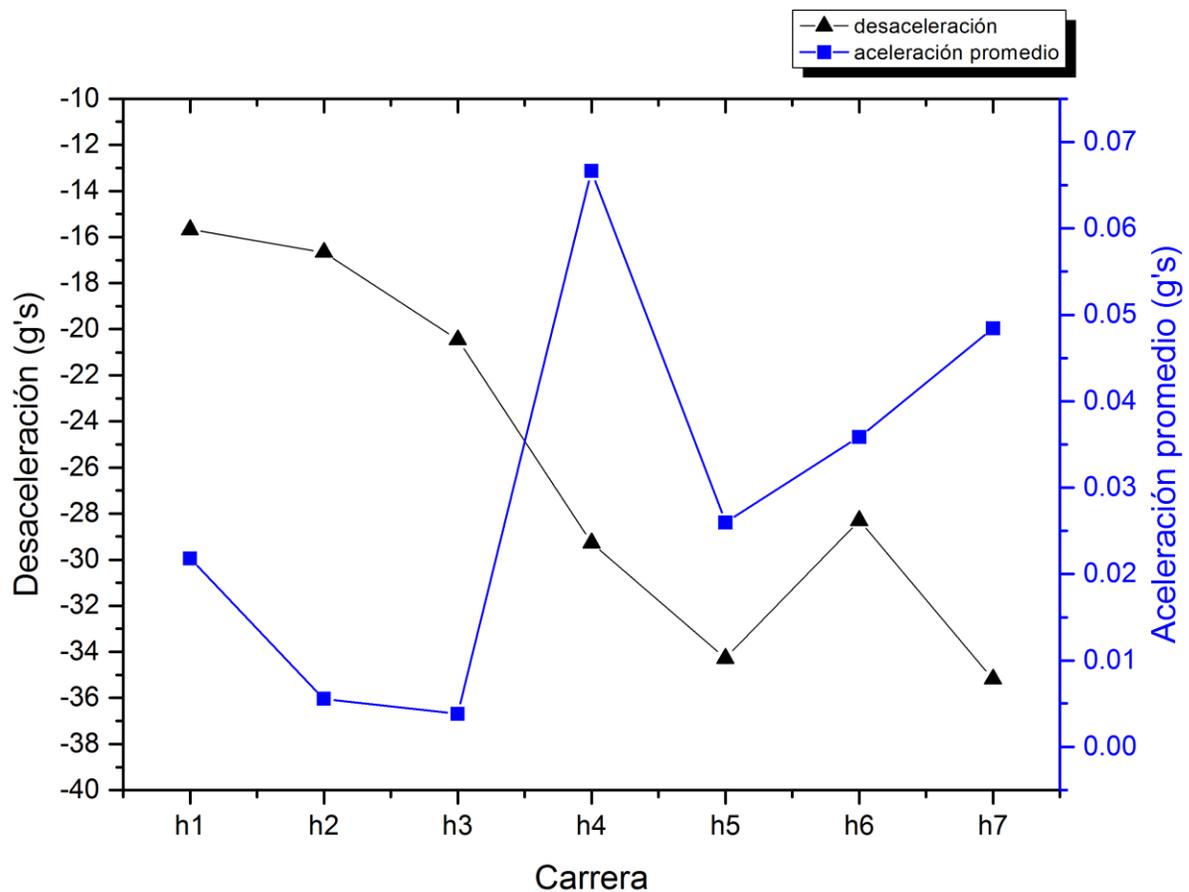


Figura 27. Gráfica de des aceleración y aceleración promedio máxima contra carrera.

La caída de presión dentro del tubo con el fluido puede estimarse utilizando la ecuación conocida como ecuación del martillo de agua (water hammer equation) y que se expresa de la siguiente forma:

$$\Delta p = \rho_l c_l V_S \quad (4.1)$$

donde: Δp es la caída de presión dentro del fluido, ρ_l es la densidad del fluido (propilenglicol) con un valor de $1040 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, c_l es la velocidad del sonido dentro del fluido (propilenglicol) y su valor es de $1003 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ y V_S es la velocidad del tubo justo antes de que sea detenido súbitamente por los topes [29].

En la tabla (4), se observan los valores de velocidad de la columna de líquido, justo antes de ser detenida súbitamente. Utilizando la expresión (4.1), se calculan los valores de la caída de presión en el fluido. Así mismo, por medio del sensor de fuerza colocado en la parte inferior del tubo con fluido (ver figura 18), se obtienen los valores de la presión que el fluido experimenta, al momento de ser “tensionado” (ver figura 28) cuando se detiene súbitamente; en este momento, el sensor

detecta una disminución en la presión dentro del tubo con fluido, propiciando el crecimiento de una o varias burbujas.

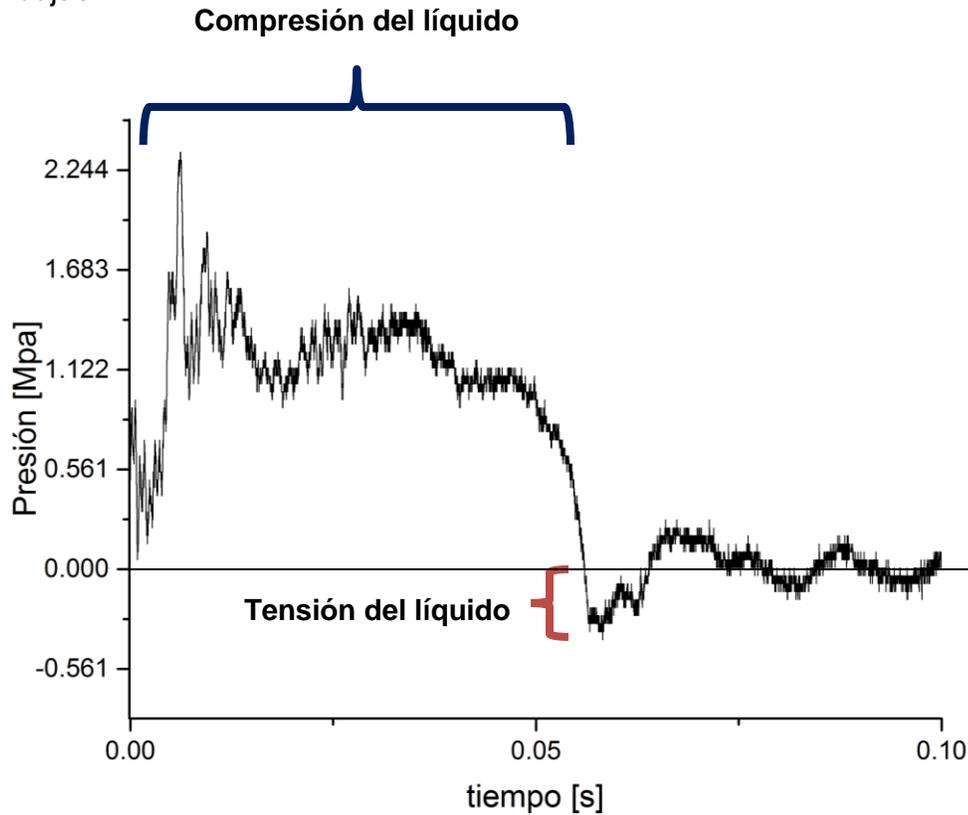


Figura 28. La tensión del líquido es registrada por el sensor, midiendo una disminución en la presión.

Carrera	V_S [m/s]	Δp [MPa]	Presión del sensor [MPa]
h1	1.35742	1.4159	2.2473
h2	1.42374	1.4851	3.3708
h3	1.85256	1.9324	3.7754
h4	2.53874	2.6482	4.3070
h5	3.0617	3.1937	4.3148
h6	3.21174	3.3502	5.2455
h7	3.67397	3.8323	5.5414

Tabla 4. Valores de la velocidad del sistema de tubo con líquido variando la carrera 'h'; y valores correspondientes a la caída de presión calculada por la expresión (4.1) y valores de la presión medidos por el sensor de fuerza.

En las figuras 29a y 29b se muestra la evolución de la burbuja correspondiente a los experimentos en el fluido newtoniano (propilenglicol), desde un radio inicial en el tiempo 0, hasta un radio final en el momento de su colapso, en la gráfica 29a se observa un radio máximo de 12.5 [mm] y en 29b un radio máximo de 11.5 [mm], así como el tiempo del proceso (crecimiento y colapso) que es de 15ms y 16ms respectivamente, la carrera 'h' que recorrió el tubo con fluido para estas pruebas fue de 14cm.

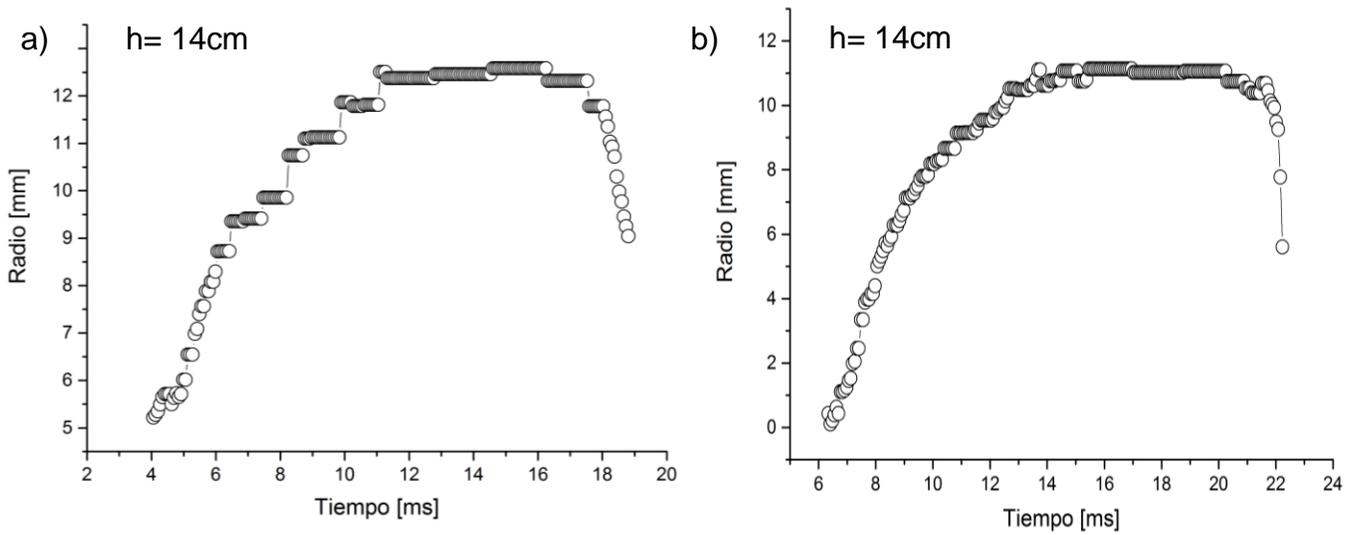


Figura 29. Gráficas de la evolución del radio de la burbuja respecto en función del tiempo, correspondientes a distintos valores de 'h'.

En las figuras 30a y 30b se muestra el comportamiento de las burbujas en el fluido newtoniano producidas con carreras 'h' de 15cm y 18cm respectivamente, se observa un radio pico de 6.5 mm en 30a y de 5.5 en 30b, por otro lado, la duración del proceso correspondiente a la figura 30b es mas rápido que en la figura 30a, el radio mínimo alcanzado por ambos procesos antes de que la burbuja se extinguiera, fue muy similar, de 1 mm. Por otro lado en la figura 30c, se llevó a cabo con una carrera de 11 cm y se observa un radio pico de 4.25 mm, una duración de 5.5 ms y un radio mínimo de 1 mm.

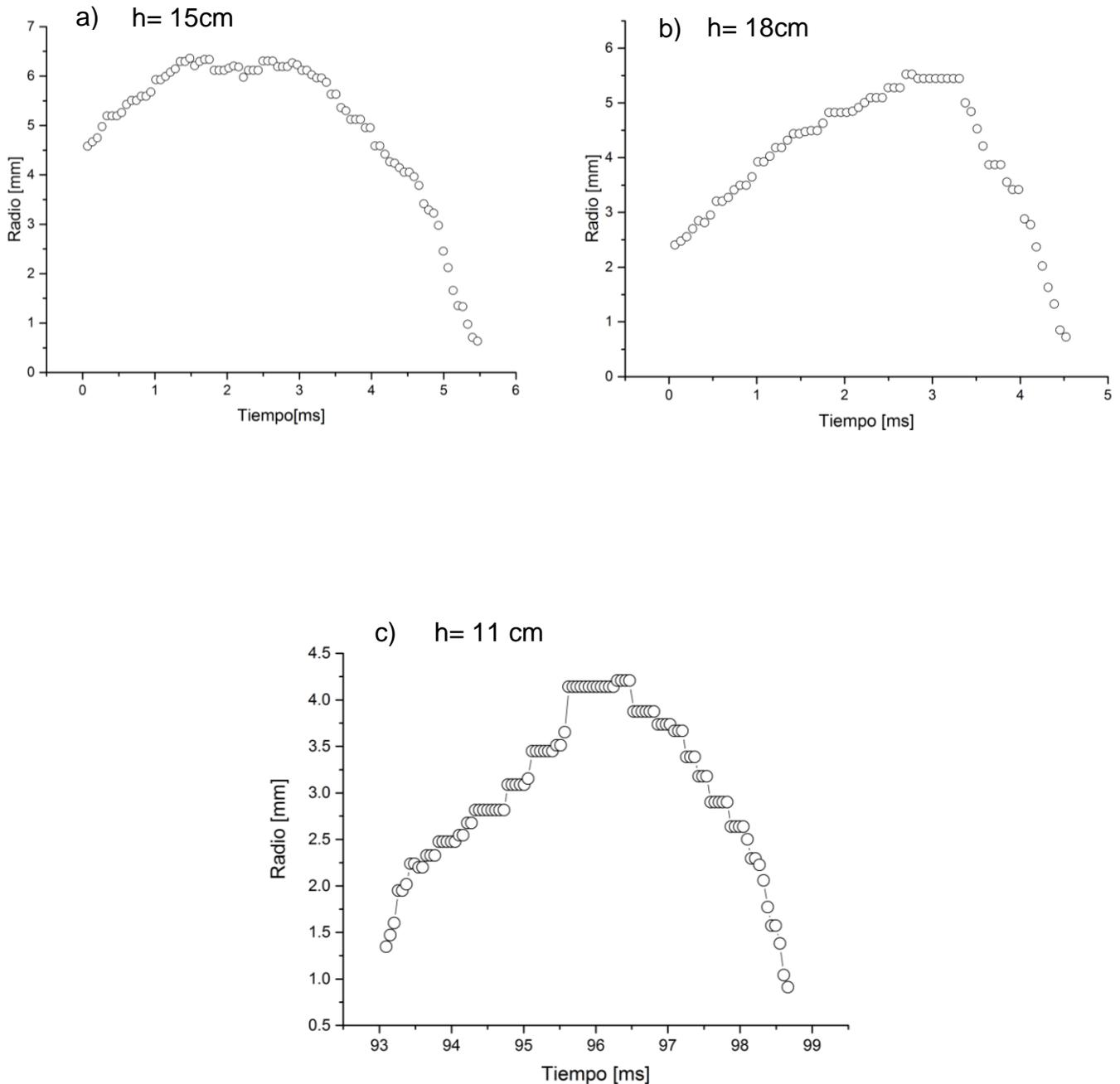


Figura 30. Gráficas que muestran la evolución del radio de una burbuja con respecto al tiempo.

En la figura (31) se observa el proceso de expansión/colapso de una burbuja en un experimento realizado con fluido no newtoniano (gel de carbopol), y que presenta una serie de rebotes antes de extinguirse. Hay intervalos de tiempo donde la burbuja no es perceptible, pero reaparece con un radio cada vez menor. En el primer rebote, se observa que el radio máximo que alcanza, es incluso mayor que el radio inicial en $t = 0\text{s}$. El radio máximo alcanzado por la burbuja es de 1cm y el mínimo de 0.1cm . El experimento se realizó con una carrera 'h' de 15 cm .

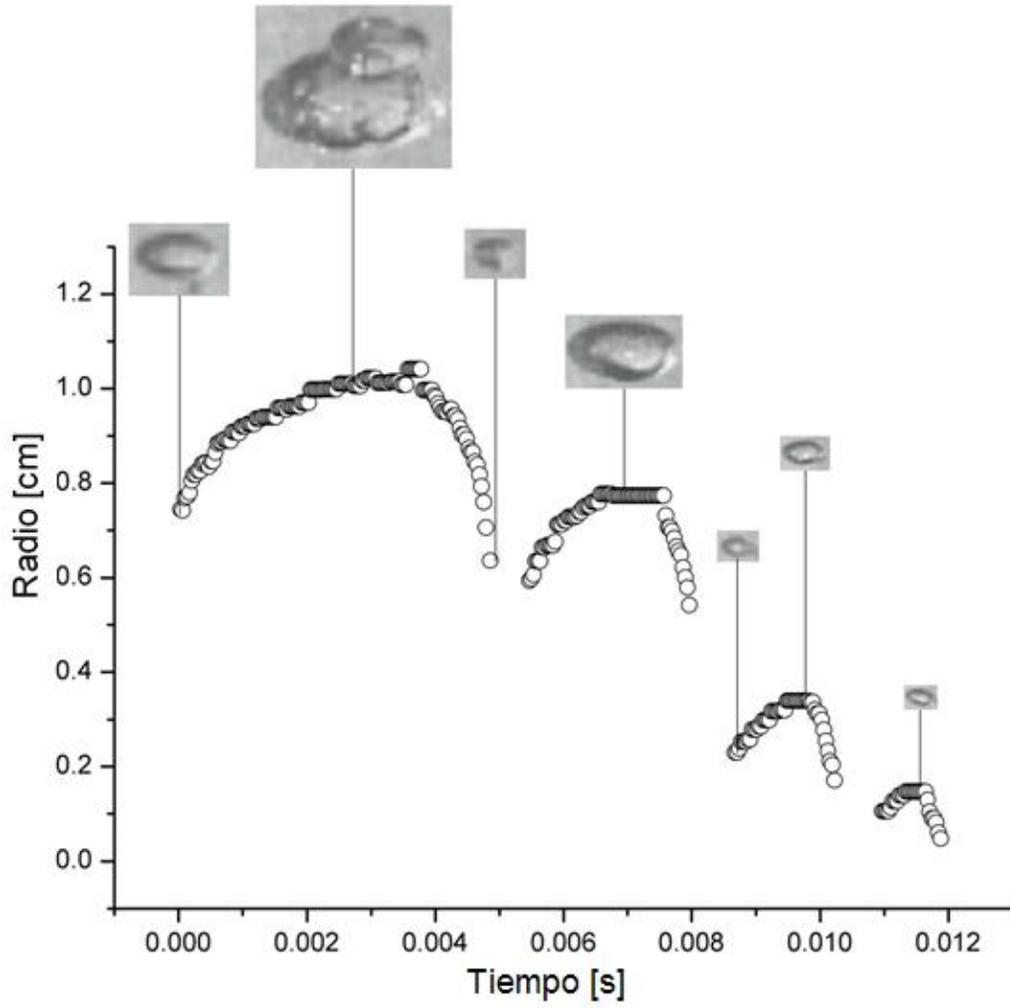


Figura 31. Gráfica de una burbuja que experimentó diversos rebotes, hasta desaparecer.

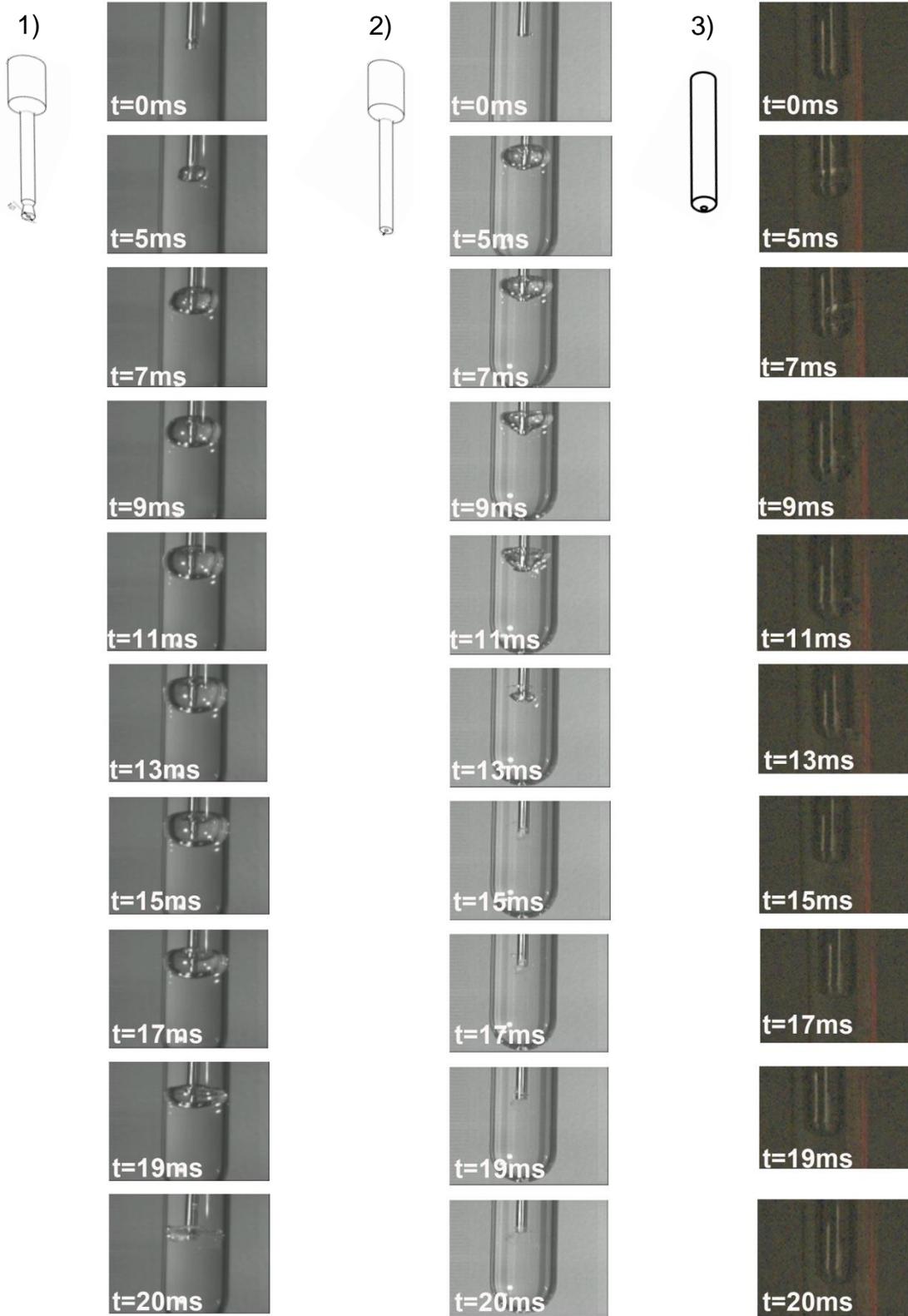


Figura 32. Se muestra una serie de fotografías con la evolución de la burbuja en el tiempo, cada una con distinto diseño de punta que contiene a la muesca donde se inserta el núcleo de burbuja. 1) Punta de tobera, 2) punta recta, 3) punta redondeada con la misma sección transversal que la barra, donde no hay generación de burbuja y solo se alcanza a ver una estela del fluido que pasa a través de sus paredes, además que la calidad de las fotografías es menor a las anteriores ya que la cámara de alta velocidad fue también de menor velocidad. Todas las pruebas se realizaron con una carrera 'h' de 14cm.



Figura 33. Se comparan dos secuencias fotográficas realizadas 1) fluido newtoniano y 2) con fluido no newtoniano (adelgazante), los dos experimentos a una misma carrera 'h' de 5.5 cm, en el fluido newtoniano (1) se logra desprender la burbuja de la punta, formando dos interfaces de tamaño pequeño, en el fluido adelgazante (2) no se logra desprender la burbuja de la punta ni logra crecer, únicamente viéndose el núcleo insertado en la muesca de la punta.

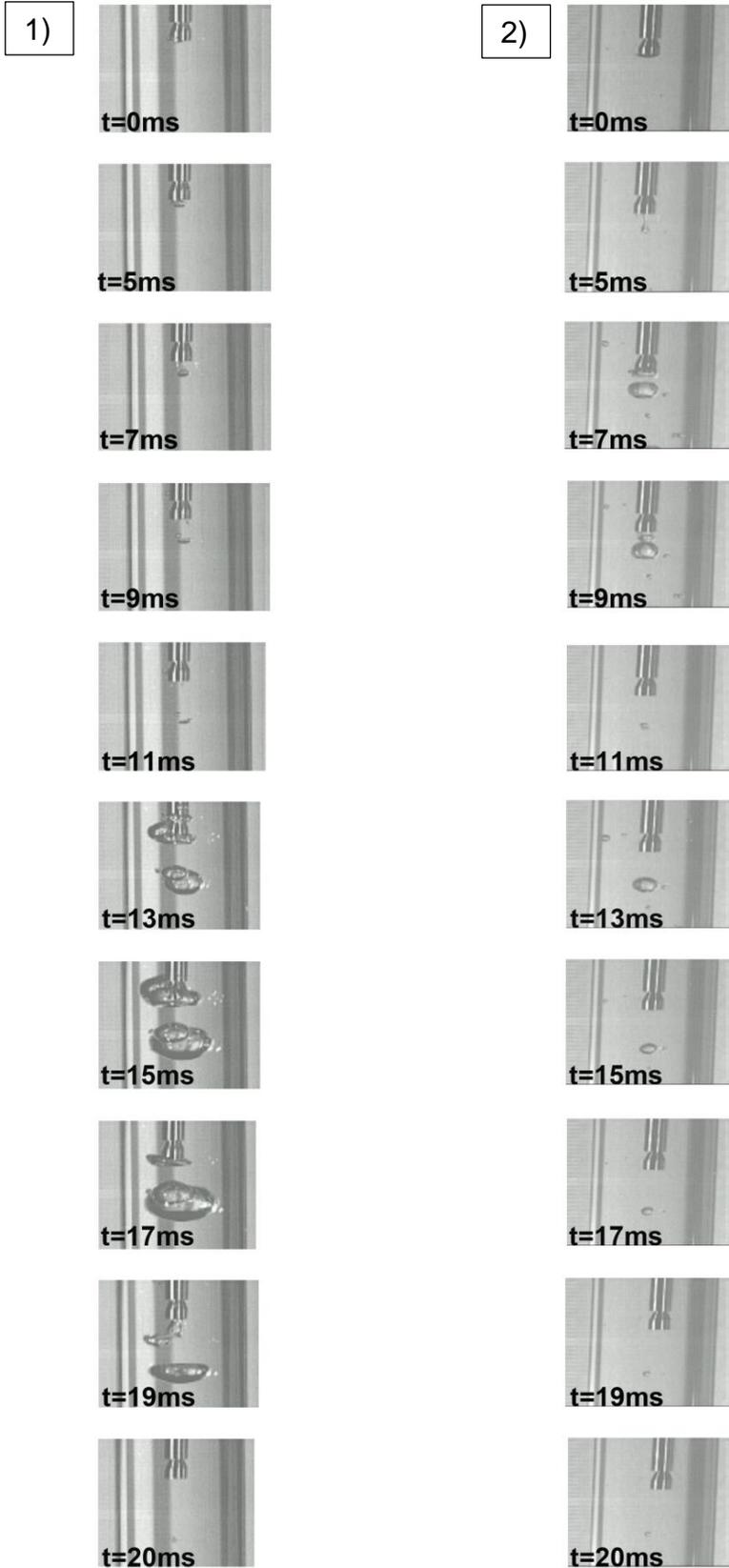


Figura 34. Se comparan dos series de fotografías, 1) fluido newtoniano y 2) fluido no newtoniano (adelgazante), los experimentos se realizaron con una carrera 'h' de 8.0 cm; en el fluido newtoniano 1) se desprende la burbuja de la punta y creciendo en el tiempo muy alejada de una forma circular y colapsando posteriormente, a la par que en la punta se logra formar otra cavidad que al final se desprende sin crecer; en 2) se logra desprender una burbuja sin crecer con un radio considerable y teniendo algunos rebotes hasta solo quedar una pequeña burbuja de radio mínimo.

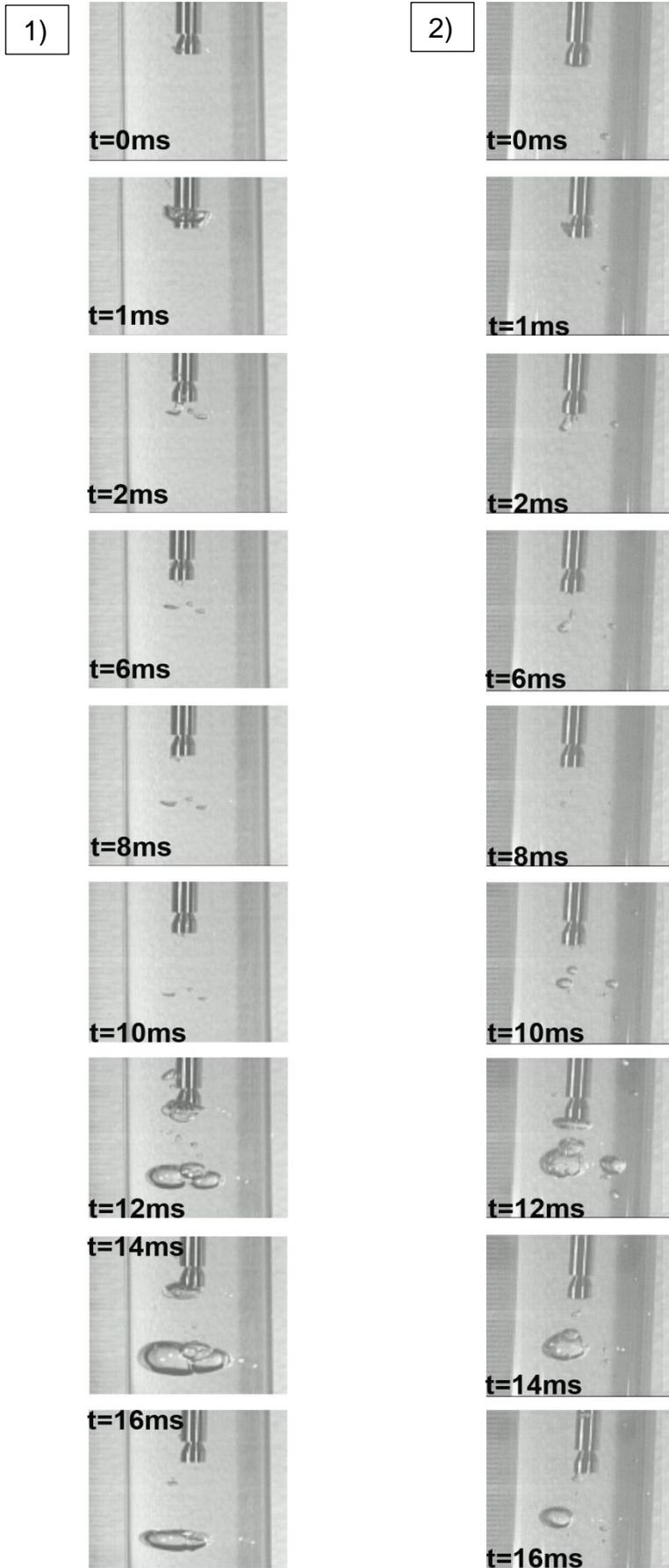


Figura 35. Secuencias fotográficas realizadas con 1) fluido newtoniano y 2) fluido no newtoniano (adelgazante), a una carrera 'h' de 15cm. En ambos experimentos se logra desprender la burbuja de las puntas, creciendo en el tiempo para luego disminuir su radio, en ambas se logran crear diferentes burbujas, que se adhieren unas con otras en su superficie y al final lograr cohesionarse hasta convertirse en una sola.

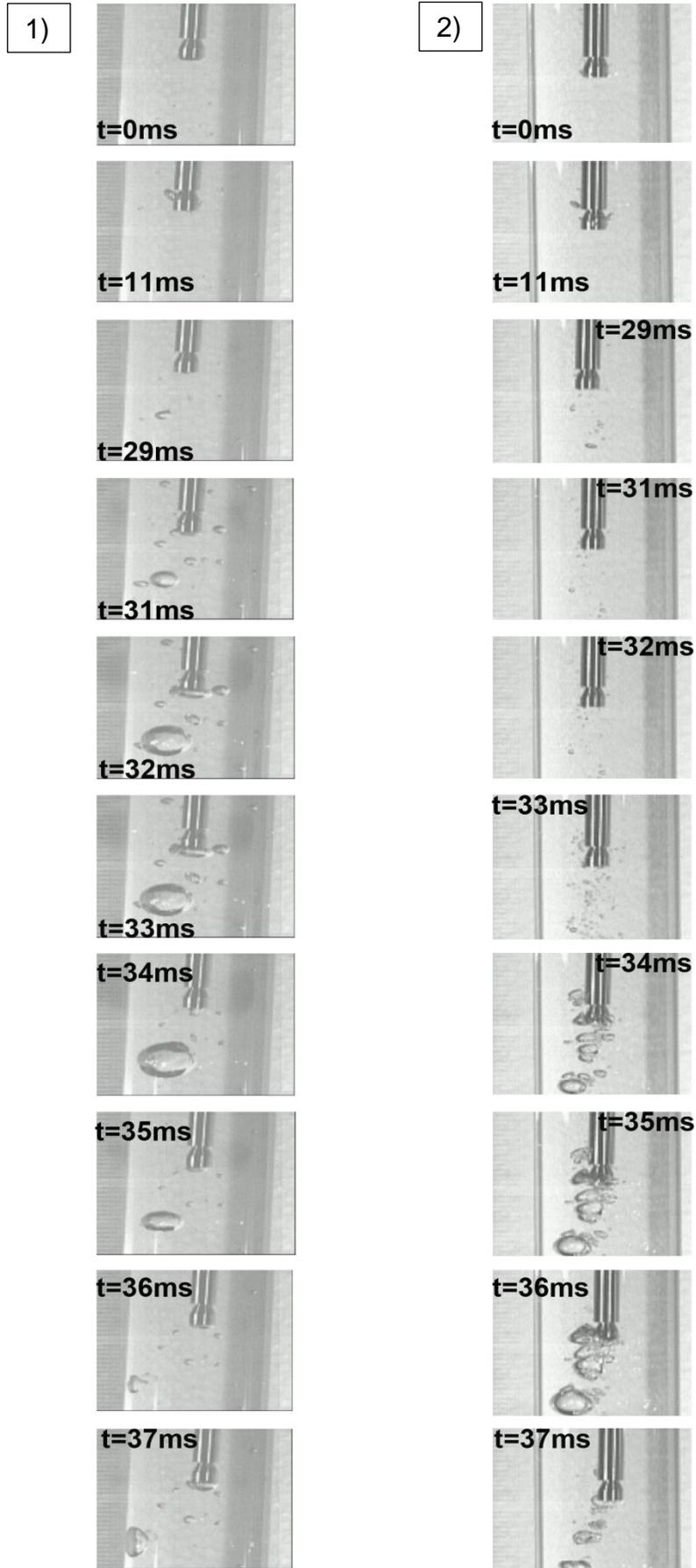


Figura 36. Experimentos realizados en 1) fluido newtoniano y 2) fluido no newtoniano (adelgazante) a una carrera 'h' de 18 cm. En el fluido newtoniano se logra observar que la burbuja se desprende y crece en el tiempo con una serie de burbujas de menor tamaño radial a su alrededor para luego decrecer en tamaño. En el fluido adelgazante ocurre un fenómeno donde muchas burbujas crecen en el tiempo distanciadas a una corta distancia unas de otras para luego disminuir en su tamaño radial.

CAPÍTULO

5

COMPARACIÓN DE DATOS EXPERIMENTALES CON UN MODELO MATEMÁTICO

Una burbuja gasificada rodeada por un medio líquido experimenta ciclos de crecimiento, colapso y rebotes amortiguados en respuesta a un pulso de presión negativo en el líquido. Este fenómeno puede ser simulado usando la ecuación de Rayleigh-Plesset (ERP) la cual, es la base teórica para analizar la dinámica de burbujas [31].

Las oscilaciones radiales de una burbuja de gas en un medio líquido incompresible son descritas por la ERP,

$$P_1 - (P_0 - P_a \text{sen} 2\pi\omega t) = \rho_1 \left(R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \right), \quad (5.1)$$

donde la presión en el líquido en la interfase líquido-gas P_1 es

$$P_1 = P_g(R) + P_v - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\eta\dot{R}}{R}, \quad (5.2)$$

Siendo R , $P_g(R)$, P_v , σ , η , ρ_1 , P_0 , P_a y ω : el radio de la burbuja, presión del gas, presión del vapor, tensión superficial, viscosidad del líquido, densidad del líquido, presión ambiental, presión de excitación en el medio líquido y frecuencia de excitación en el medio líquido respectivamente. Se asume que el gas en la burbuja es ideal, tiene un índice politrópico κ con una compresión uniforme; así, la presión del gas en la burbuja es espacialmente homogénea y puede ser descrita por:

$$P_g(R) = P_0^* \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\kappa} \quad (5.3)$$

donde R_0 es el radio inicial y P_0^* es la presión cuando $R = R_0$ y $\dot{R} = \ddot{R} = 0$. Entonces escribimos:

$$P_0^* = P_0 + \left(\frac{2\sigma}{R_0} \right) - P_v. \quad (5.4)$$

Se asume que la burbuja es isotérmica ($\kappa = 1$) cuando $R \geq R_0$ (donde la dinámica es lenta) y adiabática ($\kappa = \gamma$ coeficiente de calor específico).

Una versión de la ERP con una corrección de compresibilidad es [31]:

$$\left(P_1 + \frac{R}{c_1} \frac{d}{dt} P_1 + \frac{2\pi\omega t}{c_1} P_a \cos 2\pi\omega t \right) - (P_0 - P_a \sin 2\pi\omega t) = \rho_1 \left(R\ddot{R} + \frac{3}{2} \dot{R}^2 \right) \quad (5.5)$$

Donde P_1 está dada por la expresión 5.2. La compresibilidad del líquido, adiciona dos términos a la expresión 5.1. El término $\frac{2\pi\omega t}{c_1} P_a \cos 2\pi\omega t$ es muy pequeño para afectar la dinámica debido a que, $\frac{\omega R}{c_1} \ll 1$, así $\frac{R}{c_1} \frac{d}{dt} P_1$ es el responsable de las frecuencias en los rebotes. Sin embargo, el gas es la parte más compresible del sistema y las inhomogeneidades en la presión del gas tienen el potencial de alterar la dinámica tradicional de la ERP.

Así se reemplaza la presión homogénea $P_g(R)$ por la presión instantánea quedando:

$$P_1 = P_g(R) + \frac{R}{3c_g} \frac{d}{dt} P_g(R) + P_v - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\eta\dot{R}}{R}, \quad (5.6)$$

Para grandes expansiones, la presión del gas es cercana a cero y su derivada temporal es insignificante. Cuando la burbuja se está comprimiendo y expandiendo rápidamente cerca de condiciones ambientales, durante los rebotes, la presión del gas es no homogénea; en el momento de colapso, la presión instantánea describe un incremento efectivo en la interfaz líquido-gas, la cual, impide el colapso de la burbuja provocando los rebotes [31].

De acuerdo con Williams P.R. y Williams R.L. [32] la expresión que representa la presión y la tensión de la columna de líquido al acelerar y posteriormente al ser detenida súbitamente, es la siguiente:

$$p(t) = \frac{d}{dt} \left[\frac{a_0}{\left\{ \frac{1+(t-a_1)^2}{a_2^2 a_3} \right\}^{\left(\frac{a_3+1}{2} \right)}} \right], \quad (5.7)$$

donde, a_0 , a_1 , a_2 y a_3 son parámetros de ajuste con los que se controla la amplitud, ancho y forma del pulso.

En la figura (37) se muestra la gráfica del comportamiento de una burbuja en su crecimiento y colapso; simulación basada al utilizar la ec. 5.7, donde se muestra el pulso de presión y tensión de la columna de líquido en la primera fase del proceso, omitiendo las demás fases de presión y tensión que corresponderían a los rebotes de la burbuja.

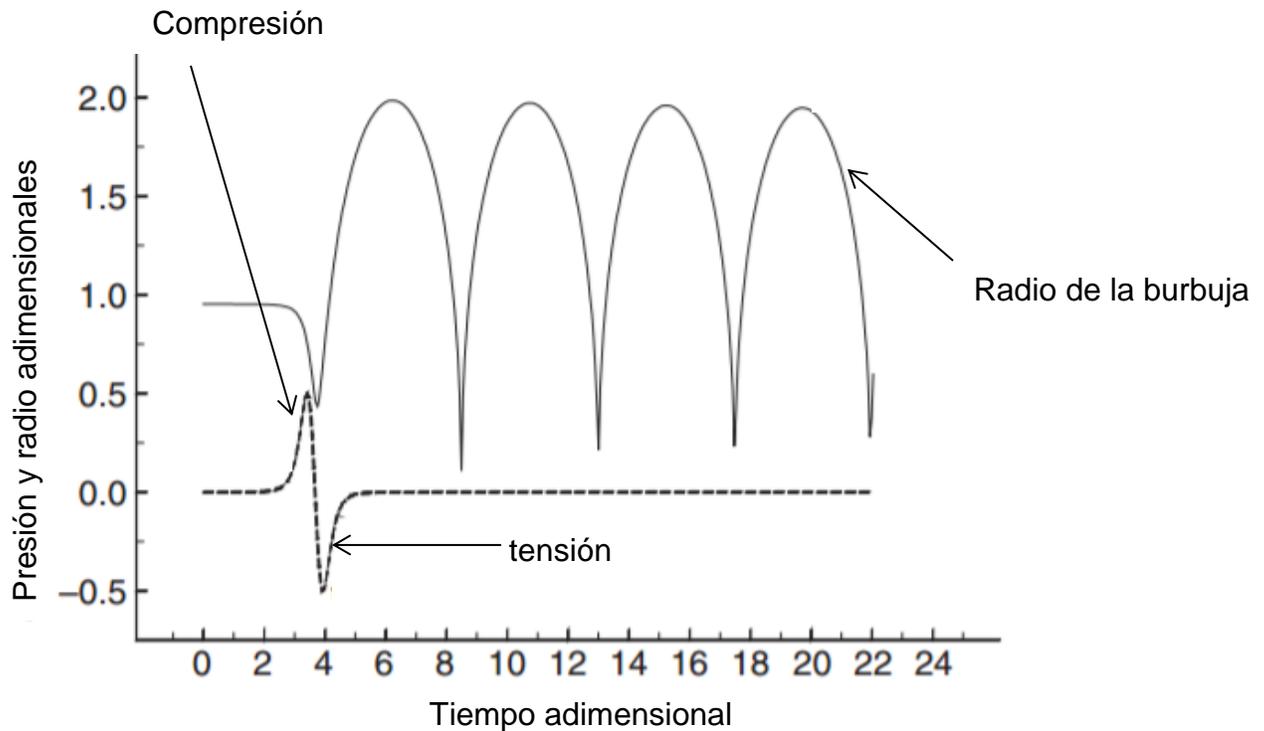


Figura 37. Representación gráfica del crecimiento, colapso y frecuencia de rebotes de una burbuja y la primera fase de un pulso de presión y su contra parte de tensión, calculados con la ecuación (5.7) [32].

5.2 Simulaciones numéricas del radio de una burbuja.

Las gráficas experimentales se comparan con simulaciones numéricas realizadas en mathematica 10 (ver anexo D) utilizando la expresión 5.5 de la ERP; además de la simulación numérica del pulso de presión negativa presente en el medio líquido en el momento de la detención súbita de la columna de líquido (ecuación 5.7). Todas las simulaciones se hicieron considerando a $\gamma = 1$, esto no afecta debido a que las velocidades del colapso son bajas. Además, se tomaron valores de a_0 , a_1 , a_2 y a_3 de tal forma que estuvieran en el mismo orden de magnitud, del ancho y amplitud de los pulsos de presión registrados con el sensor de fuerza.

En la figura 38a y 38b se muestra la comparación de la dinámica radial de la burbuja experimental con la obtenida a partir de la ERP y la gráfica del pulso de tensión teórico de la columna de fluido, respectivamente. En la comparación de la burbuja, inmediatamente se observa que el proceso de crecimiento y colapso de la burbuja experimental es prácticamente 8 veces más lento que la obtenida con la ERP. Por otro lado, la burbuja experimental alcanza su radio máximo y mantiene el mismo por un lapso de tiempo; esto se debe a que la interfaz de la burbuja toca las paredes del tubo que contiene al líquido, la pared sirve de barrera en esa dirección, impidiendo el crecimiento de la burbuja más allá de la medida diametral del tubo, para así iniciar el proceso de colapso.

Lo que respecta a la figura 38b, se observa el pulso de tensión en el medio líquido inmediatamente después de la detención súbita del tubo con fluido, alcanzando un pico de 1.2 MPa.

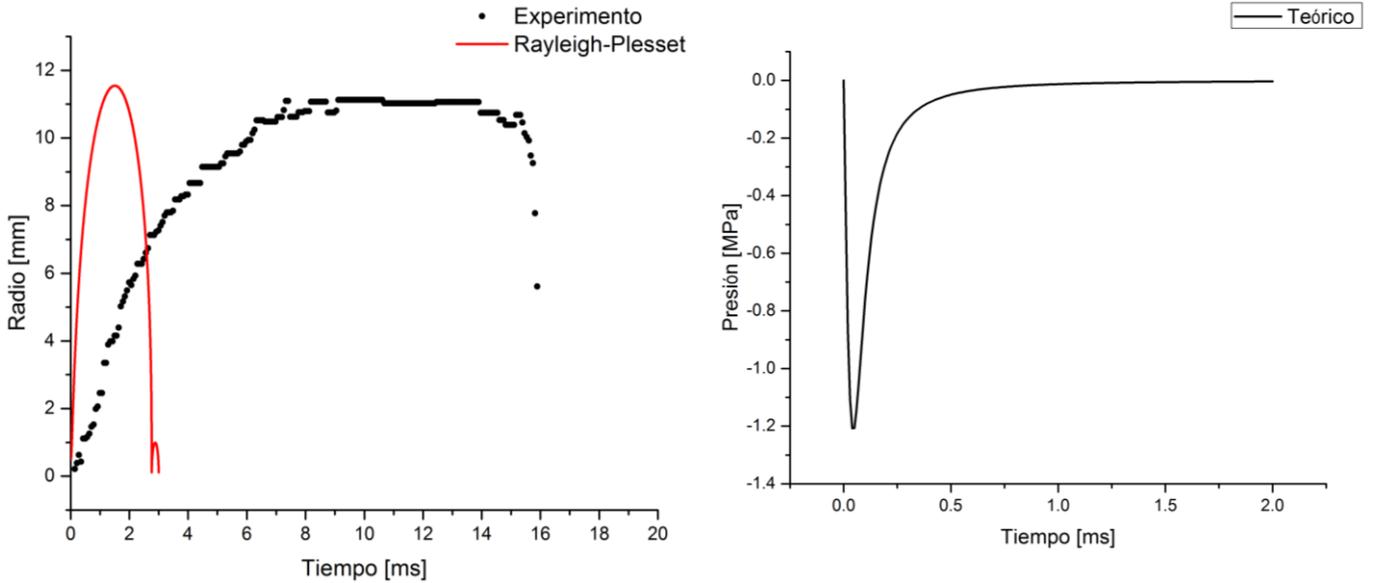


Figura 38. a) Gráficas de los radios de la burbuja experimental (realizada con una $h'=14\text{cm.}$) y con la ERP- b) pulso de tensión en el líquido.

En 39a la gráfica experimental muestra en primera instancia, un radio inicial de 5 mm, un radio máximo de 13 mm y un radio mínimo antes del colapso de 9 mm, es decir, más grande que en el radio inicial. La duración del proceso en 39a es de 1 ms más corto que en 38a, siendo de 15ms; mientras que, en la duración registrada por la ERP en ambas gráficas, es la misma, con un tiempo de 3 ms cada una. Por último, el pico máximo en el pulso de presión negativo en 39b es de 0.85 MPa, 0.4 menor que en 38b.

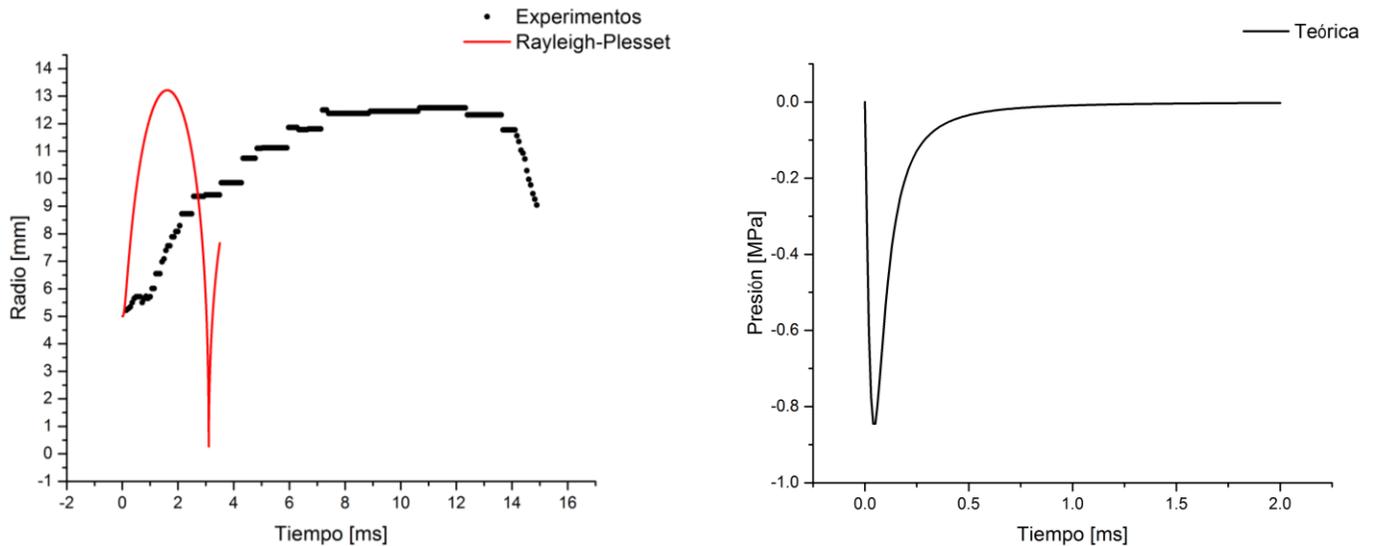


Figura 39. a) Gráficas de los radios de la burbuja experimental (realizada con una $h'=14\text{cm.}$) y con ERP; b) pulso de tensión en el líquido.

En la figura 40a se observa la comparación del resultado experimental y utilizando la ERP; en el modelo experimental, la burbuja tiene un radio inicial aproximado de 2.5 mm, un radio máximo de 5.5 mm y un colapso cerca de 0.5 mm; la duración del proceso alcanza los 4.5 ms. Utilizando la ERP, el radio máximo se equipara al radio máximo experimental; sin embargo, se logra observar que la duración del proceso es 3 veces más lento considerando el primer colapso, ya que se perciben una serie de rebotes hasta colapsar por completo. En 40b se obtuvo un pulso de tensión negativo de forma teórica, el cual, alcanza una amplitud de 0,35 MPa y un ancho menor a 25 ms.

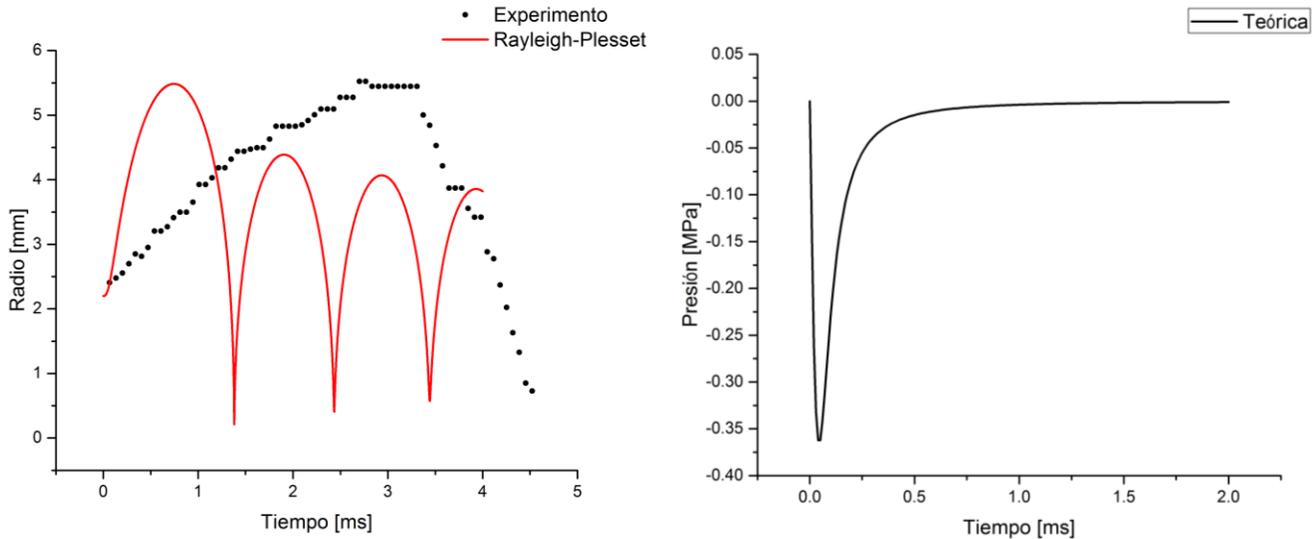


Figura40. a) Gráficas de los radios de la burbuja experimental (realizada con una $h'= 18\text{cm.}$) y con la ERP- b) pulso de tensión en el líquido.

En la figura 41a se puede observar que el radio inicial de la burbuja experimental es de 4.5 mm, un radio máximo aproximadamente 6.5 mm y un radio mínimo antes del colapso de 0.5 mm; el tiempo del proceso relacionado a esta burbuja experimental es de 5.5 ms. Por otra parte, con la ERP, el radio máximo es muy aproximado, donde nuevamente vemos diferencia es en la duración del proceso; ya que en la parte teórica nos indica una duración de casi 2 ms antes de llegar al colapso. En la figura 39b se observa un pulso negativo de presión de poco más de 0.20 MPa y una amplitud de 0.25 ms.

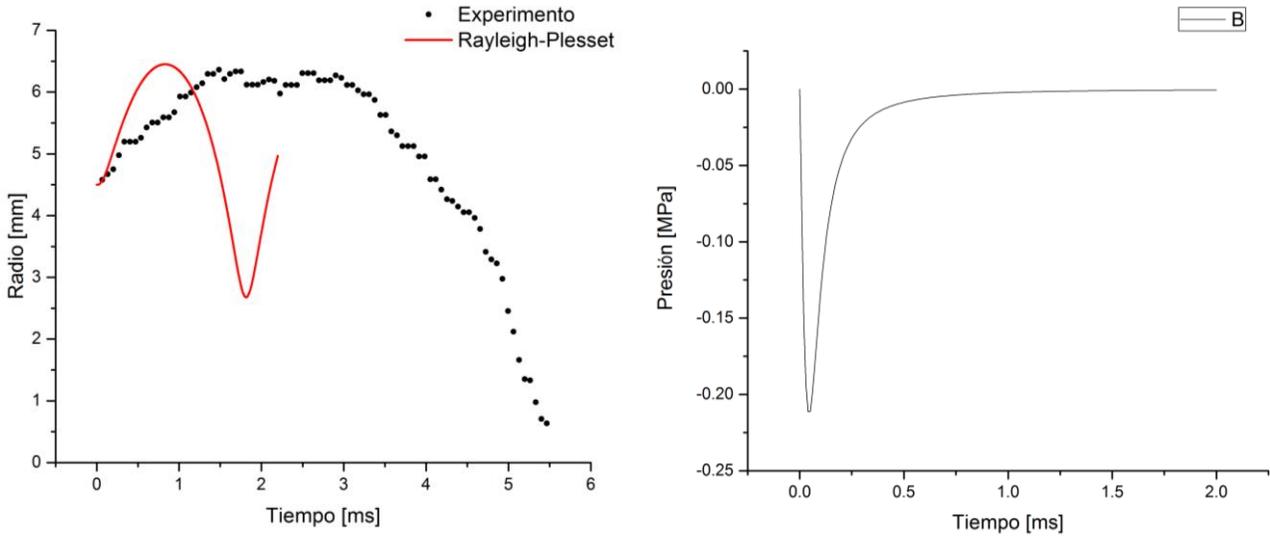


Figura 41. a) Gráficas de los radios de la burbuja experimental (realizada con una $h'= 15\text{cm.}$) y con la ERP-b) pulso de tensión en el líquido ec.5.7.

Se observa que, en la figura 42a, el proceso de la burbuja en la curva experimental el radio de la burbuja inicial es de 1.25 mm mientras que, el radio máximo es de 4.25 mm, finalmente un radio mínimo antes del colapso de 1 mm; la duración de todo el fenómeno es de 5.5 ms. En la curva obtenida teóricamente por la ERP, el radio es de similar magnitud y nuevamente, el proceso es mucho más lento, teniendo una duración de poco más de 1 ms y que, posteriormente presenta una serie de rebotes. La curva 42b muestra el pulso de presión negativo con una amplitud de .23 MPa en su punto mayor y un ancho de .25ms.

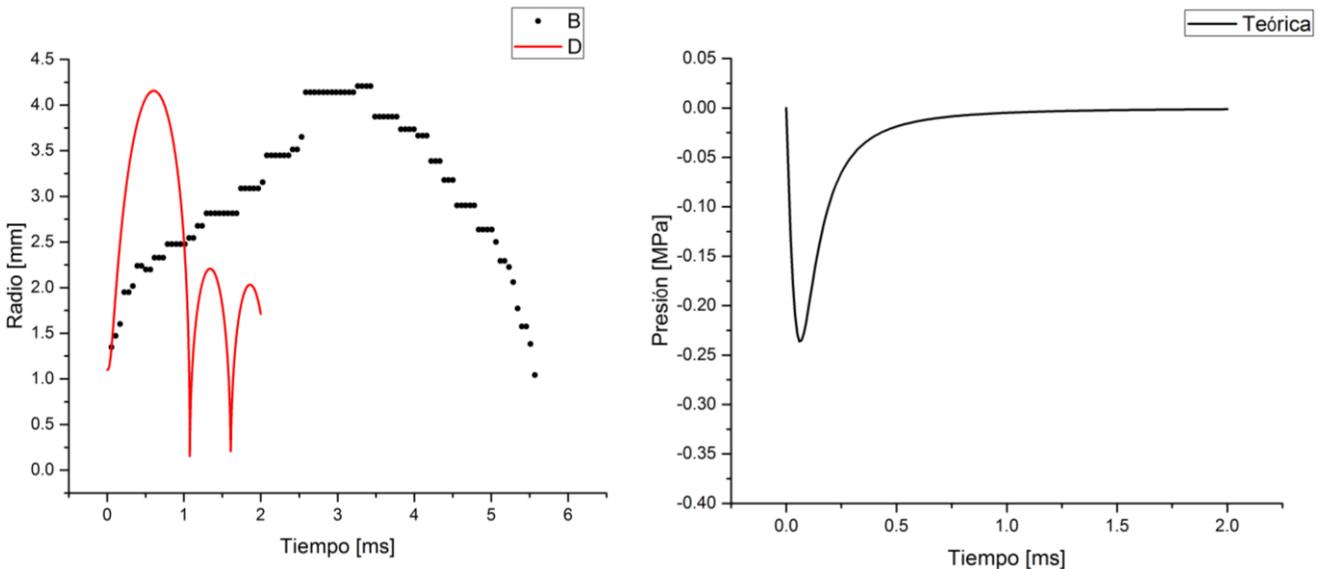


Figura 42. a) Gráficas de los radios de la burbuja experimental (realizada con una $h'= 11\text{cm.}$) y con la ERP; b) pulso de tensión en el líquido.

En efecto, observando los resultados previamente mostrados se puede inferir que, el proceso experimental que comprende el crecimiento de la burbuja y el colapso de la misma, es mucho más lento que el proceso obtenido teóricamente por medio de la ERP. En contraste con nuestras comparaciones; Dular y Coutier reportan una excelente similitud entre sus resultados teóricos y experimentales, tales que recurren a:

- 1) Modelo experimental basado en el método de tubo de arresto.
- 2) Modelo teórico basado en la ecuación de Rayleigh-Plesset.

Tal es el caso de Dular y Coutier [29] donde, la determinación de la evolución del radio de la burbuja en los experimentos, es basada en la estimación del volumen del vapor en cada instante del tiempo, por medio del procesamiento de imágenes obtenidas de diferentes ángulos con cámaras de alta velocidad. Utilizando la ecuación que define el volumen de una esfera y despejando el radio:

$$r_v = \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{1/3} \quad (5.8)$$

La figura 43 muestra los resultados después de realizar los cálculos respectivos anteriormente mencionados. Obtienen resultados muy similares, comparando el comportamiento de la burbuja en su forma experimental y en su forma teórica; dando la impresión de que, se está realizando un ajuste de la curva teórica a la experimental; ya que, como se mostró y se mencionó en las gráficas de este trabajo, el fenómeno experimental es mucho más lento que, el fenómeno obtenido utilizando el modelo teórico de la ERP. Para acercarse más al comportamiento real de la dinámica radial, se debe contemplar la forma de las burbujas (forma de toroide o elipsoide).

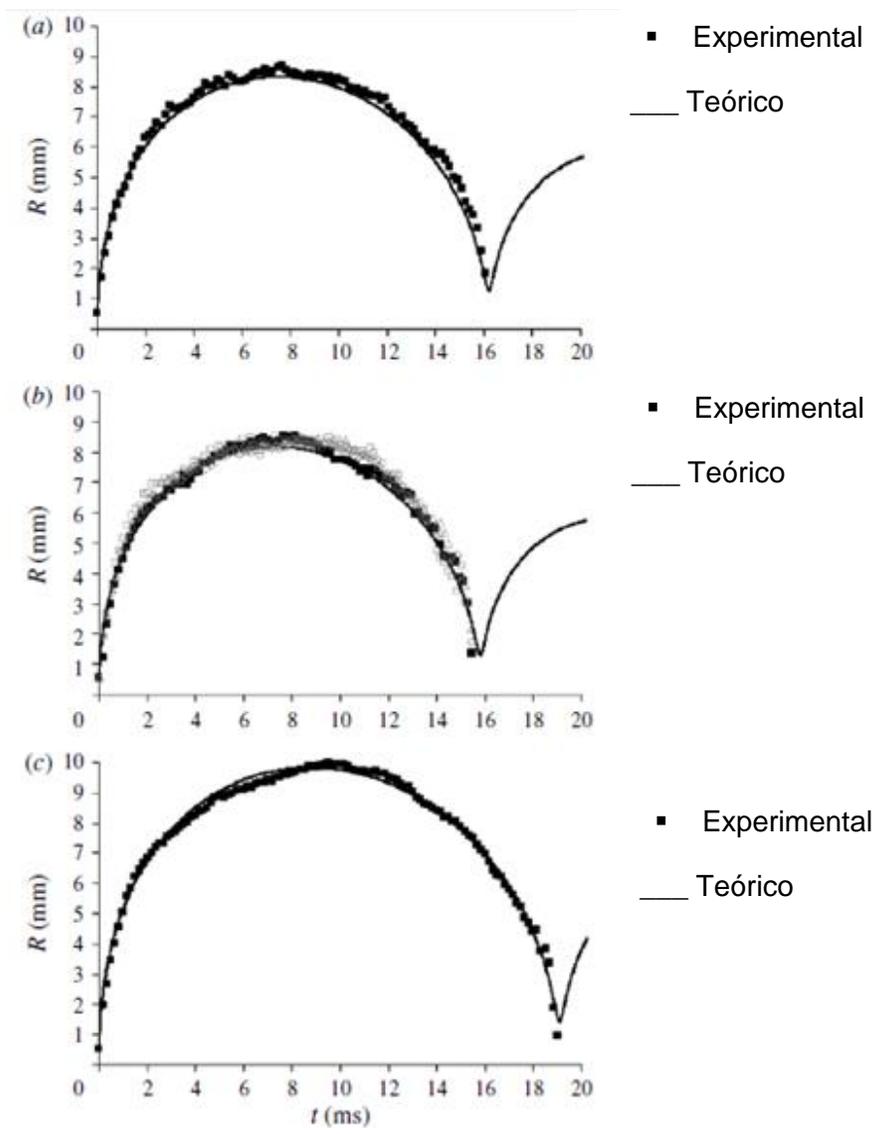


Figura 41. Cálculo del proceso de crecimiento y colapso de una burbuja esférica de acuerdo a Dular y Coutier [29].

CAPÍTULO

6

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Se reprodujo experimentalmente el fenómeno de cavitación utilizando el método de detención súbita de una columna de líquido. Para los experimentos se usaron dos tipos de fluidos, uno newtoniano (propilenglicol) y uno no newtoniano (gel de carbopol). Ambos fluidos se caracterizaron reológicamente para corroborar sus propiedades; el fluido newtoniano efectivamente posee una viscosidad constante e independiente de la velocidad de corte, el no newtoniano muestra un comportamiento adelgazante. Todas las pruebas se grabaron con una cámara de alta velocidad, para así, estudiar la dinámica de las burbujas generadas. Así mismo, se utilizó la ecuación de Rayleigh-Plesset para modelar el crecimiento y los primeros instantes del colapso de las burbujas producidas en el líquido. Cabe mencionar que la ecuación utilizada solo modela la dinámica de burbujas esféricas.

Al realizar la comparación entre las curvas experimentales y las curvas teóricas (para el fluido newtoniano) del radio de la burbuja en función del tiempo, se observan grandes discrepancias. Las curvas experimentales muestran procesos de expansión-compresión mucho más lentos que las predicciones teóricas; aunque el modelo si es capaz de predecir con buena aproximación el radio máximo de las burbujas si se consideran adecuadamente el ancho y la amplitud de los pulsos de desaceleración (pulso de tensión) a los que se somete la columna líquida cuando es acelerada y posteriormente detenida súbitamente. Los pulsos de desaceleración se registraron con un sensor piezoeléctrico de fuerza y se aproximaron con una expresión matemática (que reproduce con buena aproximación su ancho, amplitud y forma) para después ser considerados en el modelo.

En todos los casos, las observaciones muestran que las burbujas en ambos fluidos no desarrollan una geometría esférica. Esto explica el motivo por el que la ecuación de Rayleigh-Plesset no es capaz de igualar la dinámica de las burbujas experimentales. Se observó cualitativamente a cada una de las burbujas generadas en ambos fluidos, percibiéndose el predominio en tamaño que tienen las burbujas en el propilenglicol, respecto al tamaño de las burbujas en el gel de carbopol; se puede decir entonces que la viscosidad de cada uno de los fluidos, influye en la capacidad de la burbuja para crecer en mayor o menor medida, siendo el propilenglicol un medio más propicio para generar burbujas más grandes.

El método de arresto súbito sirve para generar cavitación transitoria a bajo costo, el diseño del dispositivo para desarrollar el método es relativamente fácil y los materiales utilizados son accesibles económicamente. Sin embargo, el proceso de fabricación del dispositivo debe ser realizado con cuidado y precisión para garantizar un adecuado funcionamiento. En nuestro caso,

se tuvieron problemas en el ensamble del dispositivo experimental y con ello defectos de funcionamiento como interferencias mecánicas (ocasionando fricción excesiva e irregular en diversas zonas a lo largo de la carrera que recorre la columna líquida) que alteraron la reproducibilidad del fenómeno. Es necesario mencionar que existen otras variables experimentales con las que hay que ser cuidadoso para evitar al máximo la variación de las condiciones en las que se reproduce el fenómeno, tales como la temperatura del fluido, la presencia de aire que pueda ganar el fluido en cada experimento; además del desgaste cíclico que sufren los componentes mecánicos del modelo experimental, entre otras.

Para trabajos a futuro, se puede considerar la experimentación utilizando una mayor cantidad de fluidos newtonianos y no newtonianos, las puntas utilizadas pueden variar más aun en su geometría incluyendo también puntas más delgadas, que favorezcan el crecimiento esferoidal de las burbujas y por ende colapsos más energéticos.

Otras posibilidades interesantes de experimentación son: el estudio de la generación de ondas de choque por el colapso de las burbujas y su efecto erosivo en ciertos materiales como los metales; también se puede estudiar el efecto ondas de choque generadas por burbujas en fluidos no newtonianos en distintos tipos de tejido biológico, etc. Esta segunda posibilidad es lo que da justificación a la presente investigación; si bien no se realizaron experimentos con fluidos biológicos adelgazantes y tejidos biológicos, creemos se sentaron las bases y se generó conocimiento valioso que serán útiles para realizar investigaciones en esta dirección.

Por último, será necesario utilizar modelos matemáticos que nos permitan modelar las condiciones de la burbuja con una mayor aproximación ya que, las formas de las burbujas distan mucho de ser esféricas, teniendo formas más complejas que van desde las elipsoidales a las toroidales, o en casos más precisos, utilizar herramientas como CFD.

APÉNDICE

A

ECUACIÓN DE RAYLEIGH-PLESSET

A.1. Modelos matemáticos para simular la dinámica del colapso/expansión/rebotes de burbujas: a) Ecuación de Rayleigh-Plesset para burbujas esféricas y no esféricas.

En la dinámica de burbujas, el problema básico es determinar los campos de presión y velocidad del medio donde interactúan dos fluidos, junto con el movimiento de la pared de la burbuja cuando está influenciada bajo una presión dependiente del tiempo. Las ecuaciones diferenciales que describen el movimiento de una sola burbuja, nos indican cómo el radio de la burbuja varía con el tiempo.

Considerando una burbuja de gas en equilibrio perfecto en un líquido figura (13). Se tiene que:

$$P_g = P_0 + \frac{2\sigma}{R_B} \quad (1)$$

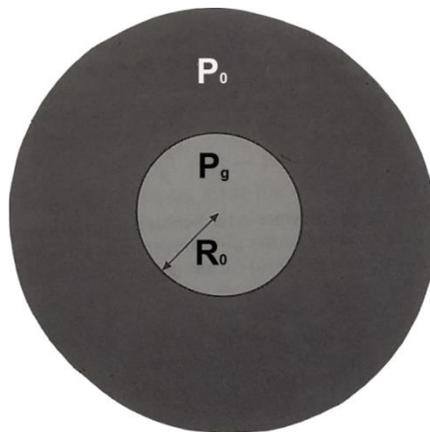


Figura 13. Burbuja de gas en equilibrio mecánico contenida en un líquido [33].

Donde P_g es la presión del gas, P_0 es la presión del líquido, σ es la tensión superficial del líquido y R_0 es el radio de la burbuja.

Renombrando a R como radio crítico R_C para que la burbuja sea estable, entonces se tiene que:

$$R_C = \frac{2\sigma}{P_g - P_0} \quad (2)$$

Se puede observar que para $R < R_C$ es una condición de inestabilidad, la tensión superficial $2\sigma/R$ predomina y la burbuja se contrae, y si $R > R_C$, la presión del gas P_g predomina y la burbuja se expande indefinidamente.

Suponiendo que una burbuja está en estado de equilibrio, se puede cuestionar de cuál es el valor mínimo de la presión acústica P_A , será necesaria para el crecimiento de una burbuja de gas de radio R_B .

Si la burbuja esté en equilibrio, entonces la presión debe ser $P_0 + 2\sigma/R_B$. Entonces, si la burbuja cambia de tamaño debido al decremento en la presión absoluta externa (de la aplicación de un campo de sonido externo) entonces la condición de equilibrio se convierte en [33]:

$$\left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_B}\right) \left(\frac{R_B}{R}\right)^3 = P_0 - P_A + \frac{2\sigma}{R} \quad (3)$$

El término del lado izquierdo de la ecuación representa la presión del gas en la burbuja debido a la expansión isotérmica. En el lado derecho de la ecuación, P_A , es la presión acústica.

Se considera una burbuja esférica vacía inmersa en un líquido expandiéndose o contrayéndose figura 14. Si R es el radio de la pared de la burbuja en el tiempo t , entonces \dot{R} es la velocidad radial. Sea \dot{r} la velocidad radial en el espacio del líquido a cualquier distancia de r . Entonces para un líquido incompresible se tiene que [33]:

$$\dot{r} = \frac{R^2 \dot{R}}{r^2} \quad (4)$$

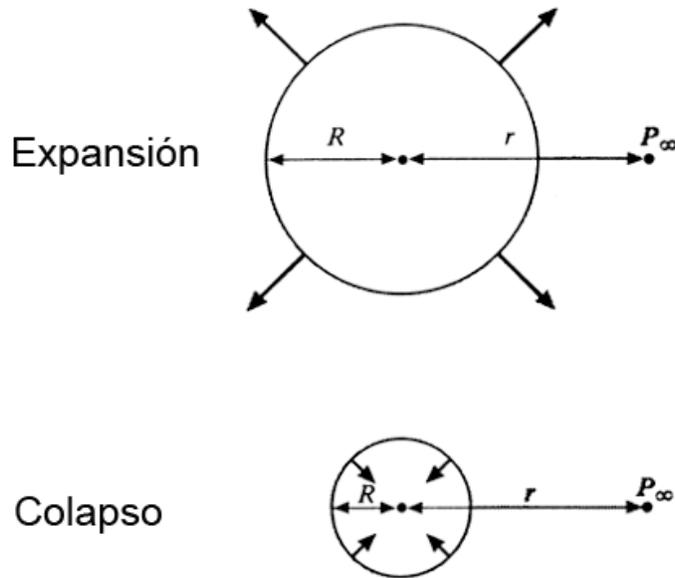


Figura 14. Expansión y colapso de burbujas [30].

El movimiento radial es conservativo y el potencial de velocidad es:

$$\phi = - \int_r^\infty r dr = - \frac{R^2 \dot{R}}{r} \quad (5)$$

Si P es la presión en el líquido con densidad ρ a una distancia r y P_∞ es la presión en el líquido en el infinito, entonces la ecuación del movimiento del líquido está dado por el teorema de Bernoulli, así que [33]:

$$\frac{P_L - P_\infty}{\rho} = - \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{2} u^2 \quad (6)$$

Desarrollando la derivada del lado derecho obtenemos:

$$\frac{P_L - P_\infty}{\rho} = \frac{2R\dot{R}^2 + R^2\ddot{R}}{r} - \frac{1}{2} \frac{R^4 \dot{R}^2}{r^4} \quad (7)$$

El movimiento en la pared de la burbuja se considera que $r = R$ y se obtiene:

$$\frac{P_L - P_\infty}{\rho} = R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \quad (8)$$

Donde $P_L = P(t)$ = presión en el líquido como límite la pared. La ecuación (8) es la ecuación fundamental de la dinámica de una burbuja.

Se considera una burbuja la cual contiene gas. Este gas actuará como amortiguador para absorber la energía del líquido que incide sobre las paredes de la burbuja, llegando a un punto donde se detenga el anterior proceso para volver a expandirse. Se supone que el gas contenido en la burbuja obedece la ley general de los gases [33]:

$$P_g \left(\frac{4\pi R^3}{3} \right) = R_g T \quad (9)$$

Donde P_g es la presión del gas y R_g es la constante del gas, asumiendo condiciones adiabáticas en la burbuja $P_g (4\pi R^3/3) = \text{constante}$ donde γ es la relación de los calores específicos del gas. Suponiendo que el gas inicial contenido (en $R = R_0$) da una presión del gas en la burbuja de $(P_0 + 2\sigma/R_0)$ donde P_0 es la presión atmosférica en el líquido y σ es la tensión superficial. Si el radio cambia de R_0 a R , a temperatura constante la presión del gas [33].

$$P_i = \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \quad (10)$$

Quedando la ecuación (2.12):

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left[\left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} - P_\infty \right] \quad (11)$$

Al definir las condiciones de frontera, se tiene que considerar el efecto de la viscosidad en el líquido, si μ es la viscosidad del líquido se tiene ahora:

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left[\left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu\dot{R}}{R} + P_\infty \right] \quad (12)$$

La ecuación (2.15) es conocida como la ecuación de *Rayleigh-Plesset*.

Reescribiendo la ecuación (2.15) :

$$\rho \left[R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \right] = [P_L - P_\infty(t)] + P_{g0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu\dot{R}}{R} \quad (13)$$

En la ecuación (2.16) \dot{R} y \ddot{R} es la primera y segunda derivada respectivamente del radio de la burbuja respecto al tiempo y R_0 es el radio inicial de la burbuja.

En el lado derecho de la ecuación, aparecen cuatro términos. El primero $P_L - P_\infty(t)$, es la diferencia de presión que hay en el líquido cercana a la pared de la burbuja y la presión en el infinito del líquido, este es el término que indica la evolución de la burbuja. Es el término fundamental ya que la evolución de la burbuja (crecimiento, colapso, oscilaciones) dependerá de ella misma [33].

El segundo término es la contribución del gas no condensable. Esta se basa en varios supuestos. En primer lugar, se asume que la masa del gas no condensable dentro de la burbuja se mantiene constante durante la evolución. Es un supuesto simplificado, que podría ser evaluado resolviendo la ecuación de difusión de masa, la cual no se aborda en este texto. En segundo lugar, se supone que esta masa constante del gas, tiende a seguir un comportamiento politrópico, caracterizado por un coeficiente politrópico. Para un proceso isotérmico $\gamma = 1$, la transformación del gas a menudo puede ser asumida como proceso isotérmico, ya que el tiempo característico para la evolución de un núcleo en cavitación real de flujos es por lo general mucho mayor que la requerida para transferencia de calor por lo que el equilibrio térmico es constantemente logrado. Sin embargo, para burbujas grandes resultantes de la explosión de un núcleo, el comportamiento tiende a ser adiabático.

El comportamiento politrópico es descrito por la siguiente ley entre la presión parcial del gas dentro de la burbuja p_g y su radio R :

$$p_g R^{3\gamma} = p_{g0} R_0^{3\gamma} \quad (14)$$

donde el subíndice 0 se refiere a condiciones iniciales. En esta ecuación R^3 representa el volumen de la burbuja. En la ecuación (2.16) parece simplemente aparecer la presión parcial instantánea p_g del gas dentro de la burbuja.

El tercer término es la contribución de la tensión superficial. σ es el coeficiente de tensión superficial expresado en N/m.

El último término aparece el efecto de la viscosidad dinámica μ del líquido. La disipación debido a la viscosidad parece ser proporcional a la tasa de deformación \dot{R} e inversamente proporcional al radio de la burbuja [33].

APÉNDICE

B

PUNTAS PARA GENERAR CAVITACIÓN

APÉNDICE

C

AMBIENTE TRACKER

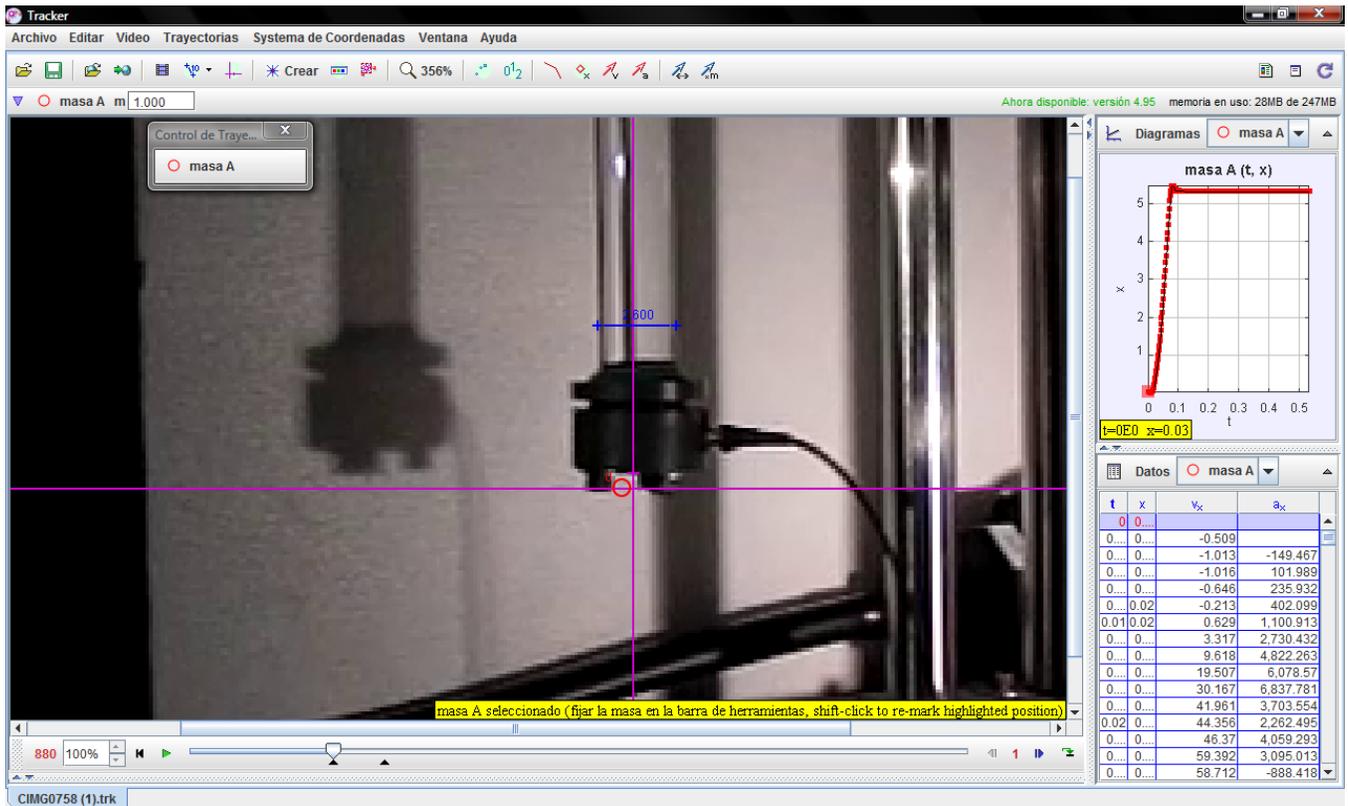


Figura C.1. Ambiente Tracker.

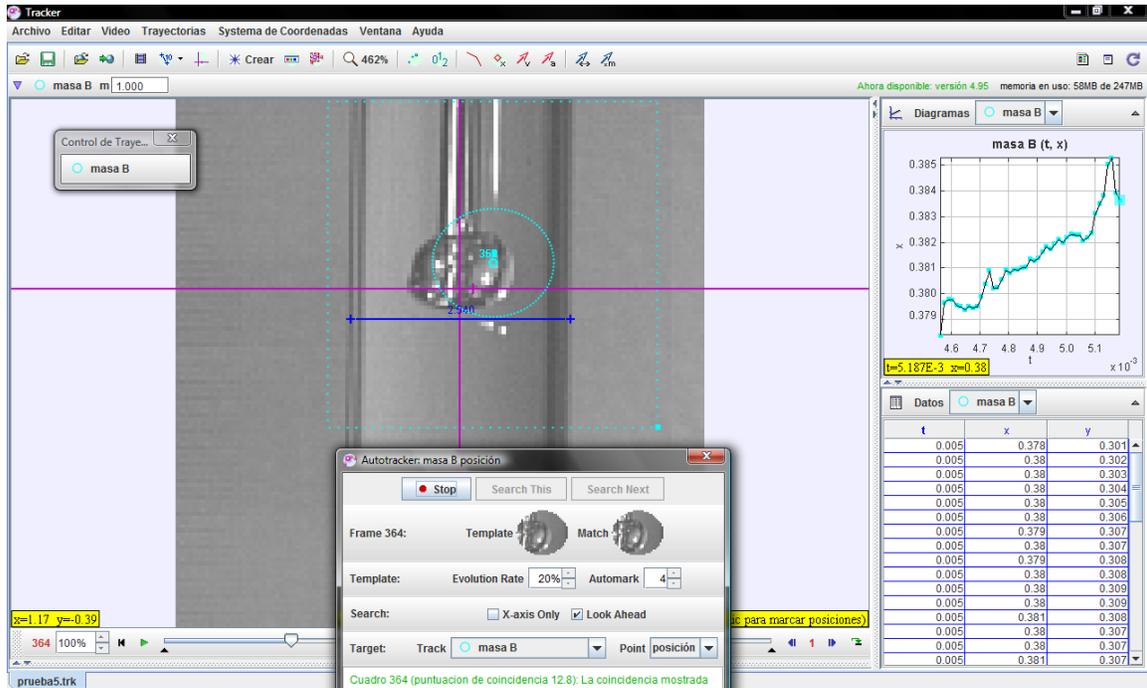


Figura C.2. El programa de Tracker, requiere un control de trayectoria (masa B en color verde agua), mismo que seguirá una partícula u objeto, definiendo su desplazamiento, velocidad, aceleración, etc. En este caso, cómo evoluciona el tamaño de la burbuja.

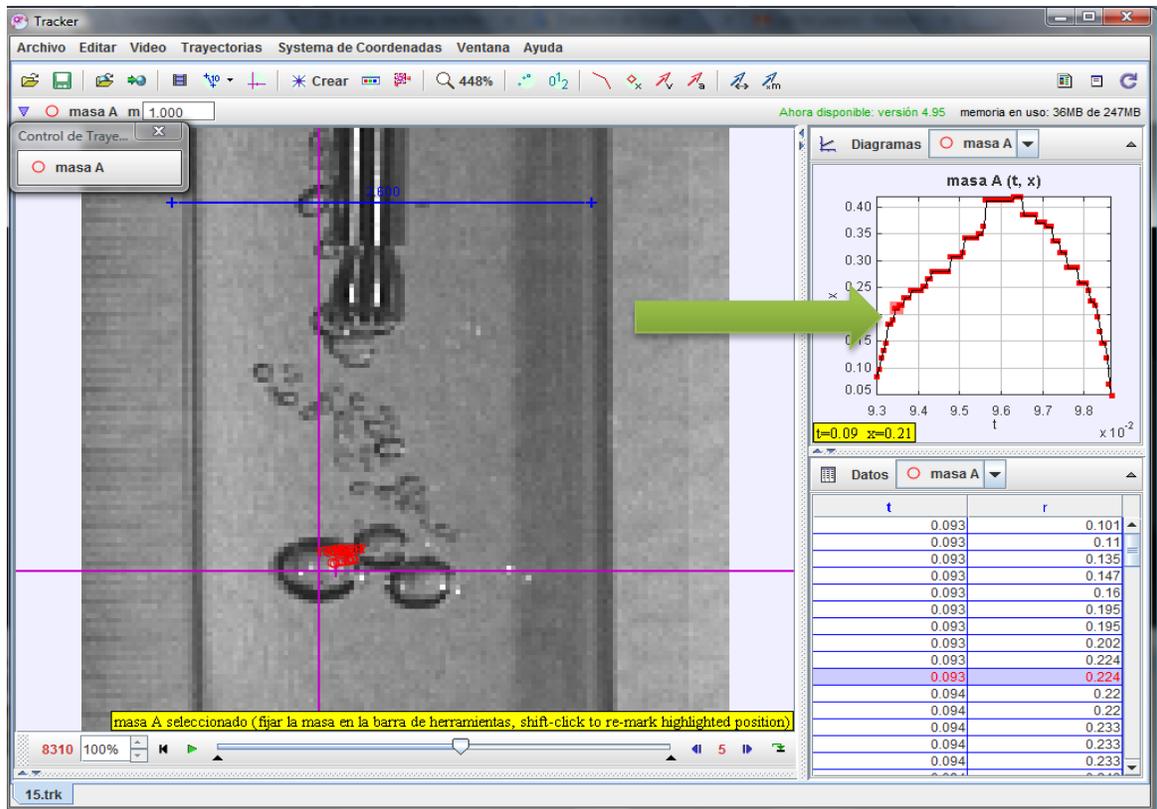


Figura C.3. La flecha, indica la curva característica de la partícula u objeto al definir sus parámetros.

APÉNDICE

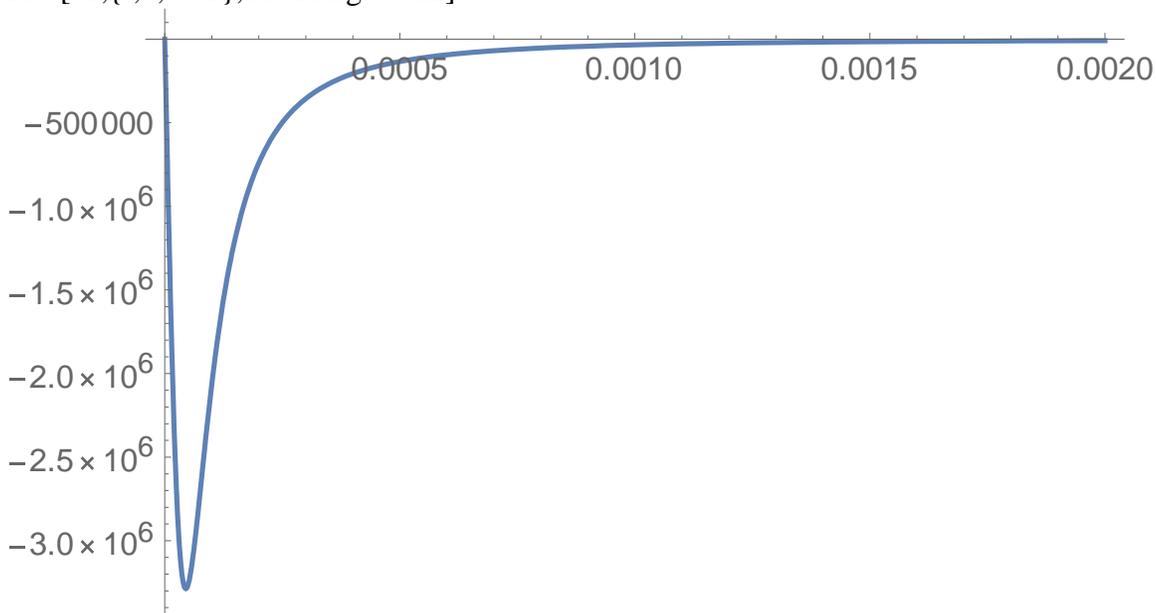
"D"

PROGRAMA DE MATHEMATICA

Rayleigh-Plesset Equation (versión Moss sin normalizar)

a0=540;
a1=.0000;
a2=.02;
a3=.00001;

e1=(2 a0 (-1/2)-a3/2) (-a1+t) $\left(1 + \frac{(-a1+t)^2}{a2^2 a3}\right)^{-\frac{3}{2}-\frac{a3}{2}}$)/(a2² a3);
Plot[e1,{t,0,.002},PlotRange->All]

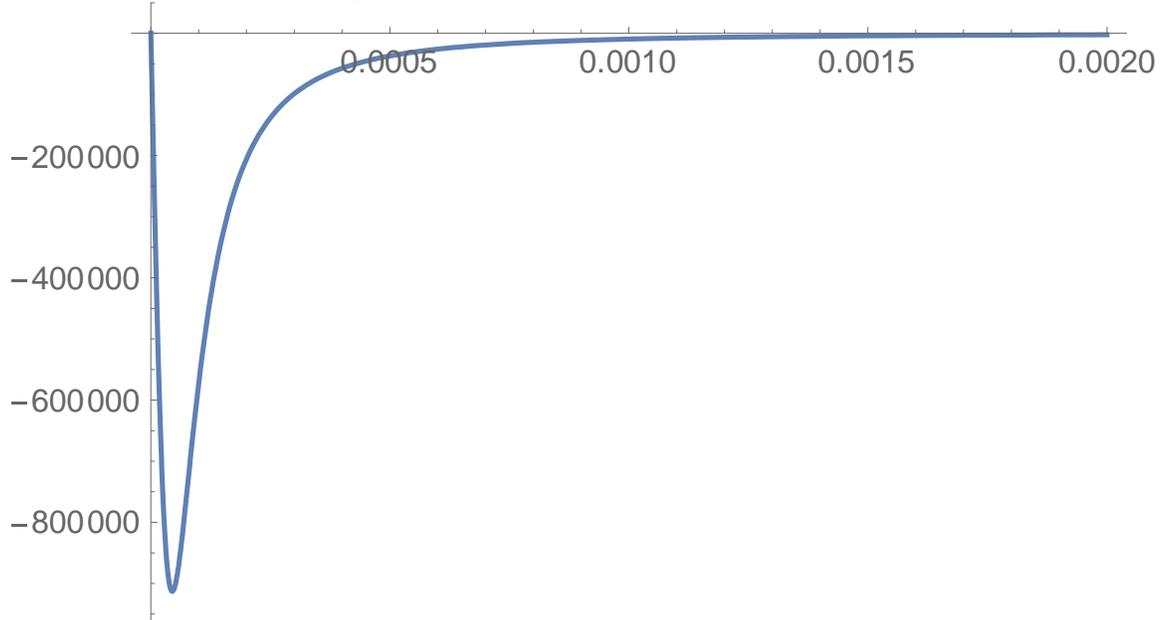


Rayleigh-Plesset Equation (versión Moss sin normalizar)

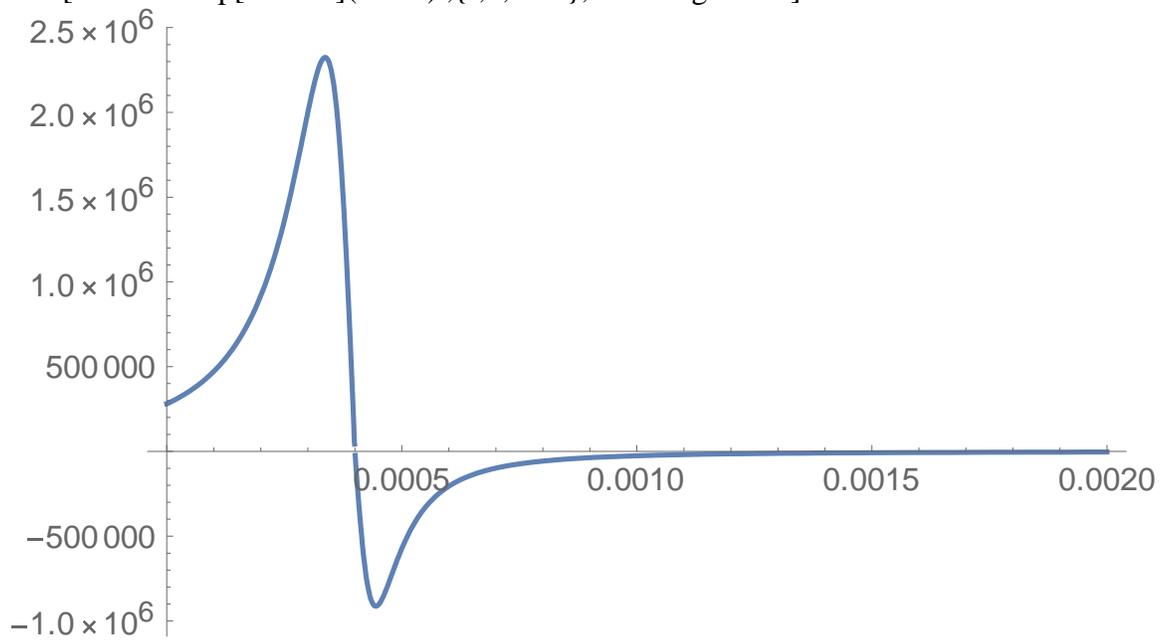
a0=150;
a1=.0000;
a2=.01;
a3=.00004;

e2=1/(a2² a3) 2 a0 (-1/2)-a3/2) (-a1+t) $\left(1 + \frac{(-a1+t)^2}{a2^2 a3}\right)^{-\frac{3}{2}-\frac{a3}{2}}$;

```
Plot[e2,{t,0,.002},PlotRange->All]
```



```
Plot[e1+UnitStep[t-.0004](e2-e1),{t,0,.002},PlotRange->All]
```



```
F11=Table[{t,e1+UnitStep[t-.0004](e2-e1)},{t,0,.004,.00001}];
```

```
Export["Fuerza.dat",F11]
```

```
Fuerza.dat
```

```
Clear[ρ,η,σ,R0,po,pv,cg0,R,t];
```

```
ρ=1036.0;
```

```

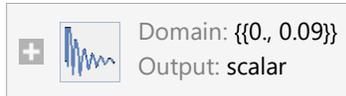
η=0.0404;
σ=0.0456;
pv=110.0;
cg0=319.0;
R0=4*10^-3;
po=.77*10^5;
γ=1;
p1=(po -pv+ (2.0σ)/R0);
Clear[ radius,solution2 ];
solution2 = NDSolve[ { ρ(R''[t]R[t] + 3/2 R'[t]^2) ==
  - po -(e2)+
  (p1 ( R0^3/R[t]^3)^γ)-(p1 γ (R0/R[t])^3 γ R'[t])/cg0+ pv
  -(2.0σ)/R[t] - 4.0η R'[t]/R[t],
  R[0] == R0, R'[0]==0 },R, {t,0.0,90*10^-3}, MaxSteps ->1000000]
radius = R[t] /. solution2[[1]]
plot2=Plot[radius*10^3,{t,0,.004}, PlotRange->All,PlotPoints->1000,AxesLabel->{"t(s)","radius(mm)"}]

```

```

{{R->InterpolatingFunction[

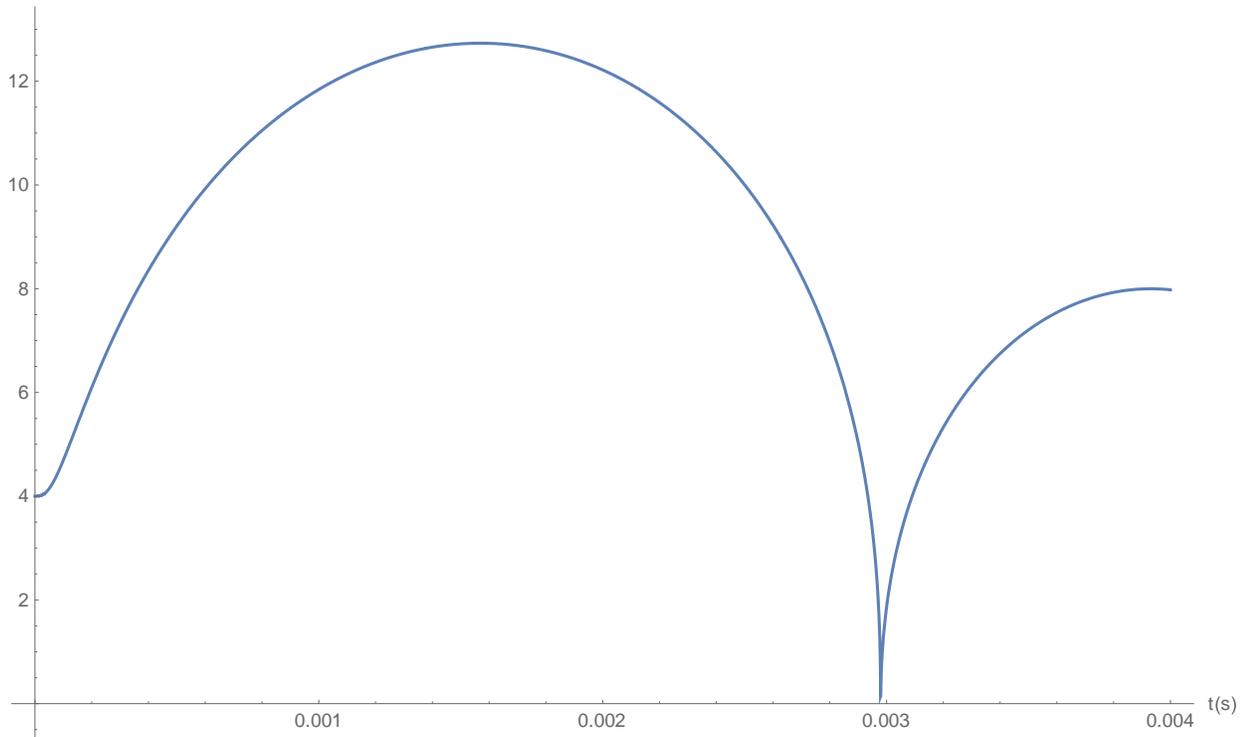
```



```

InterpolatingFunction[
radius(mm)
]
]
]

```

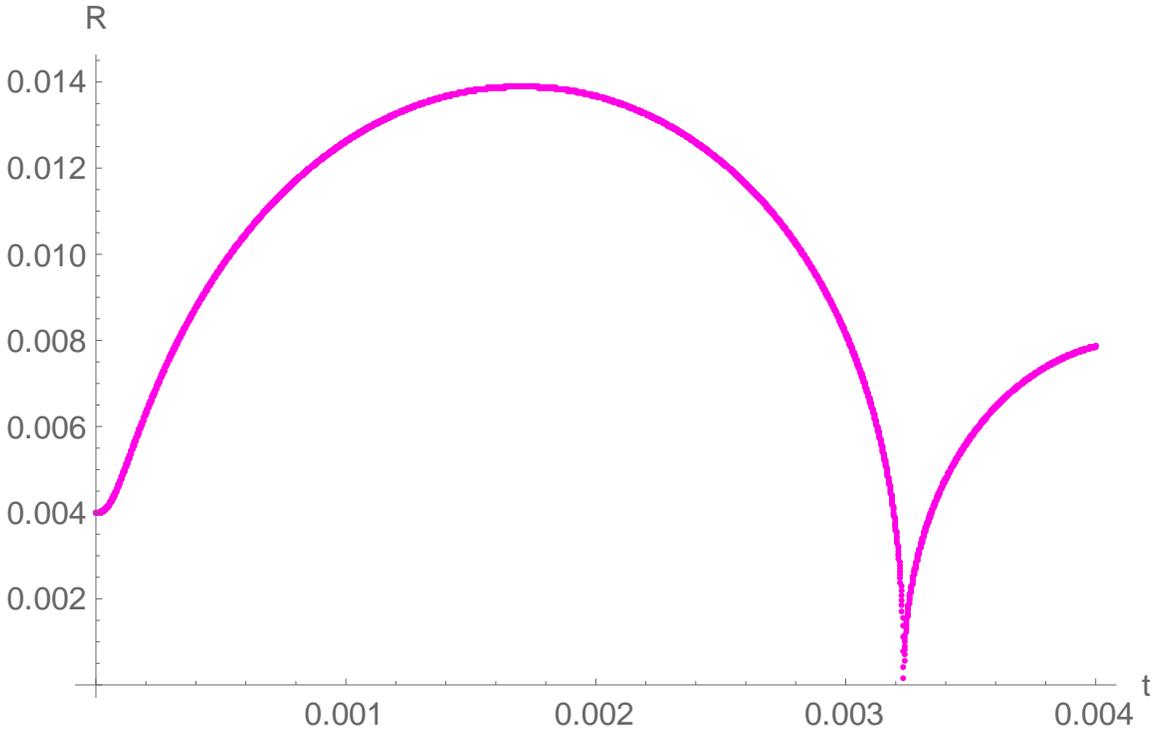


```

Radio11=Table[{t,R[t]/.solution2[[1]]},{t,0,.004,.000001}];

```

```
aa2=ListPlot[Radio11,PlotStyle->Hue[.85],PlotRange->All,AxesLabel->{"t","R"}]
```



```
puntoslimpios=Radio11/.{α_Complex,z_Complex}->{Re[α],Re[z]};
```

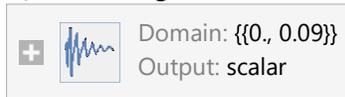
```
Export["Radio.dat",puntoslimpios]
```

```
Null
```

```
Radio.dat
```

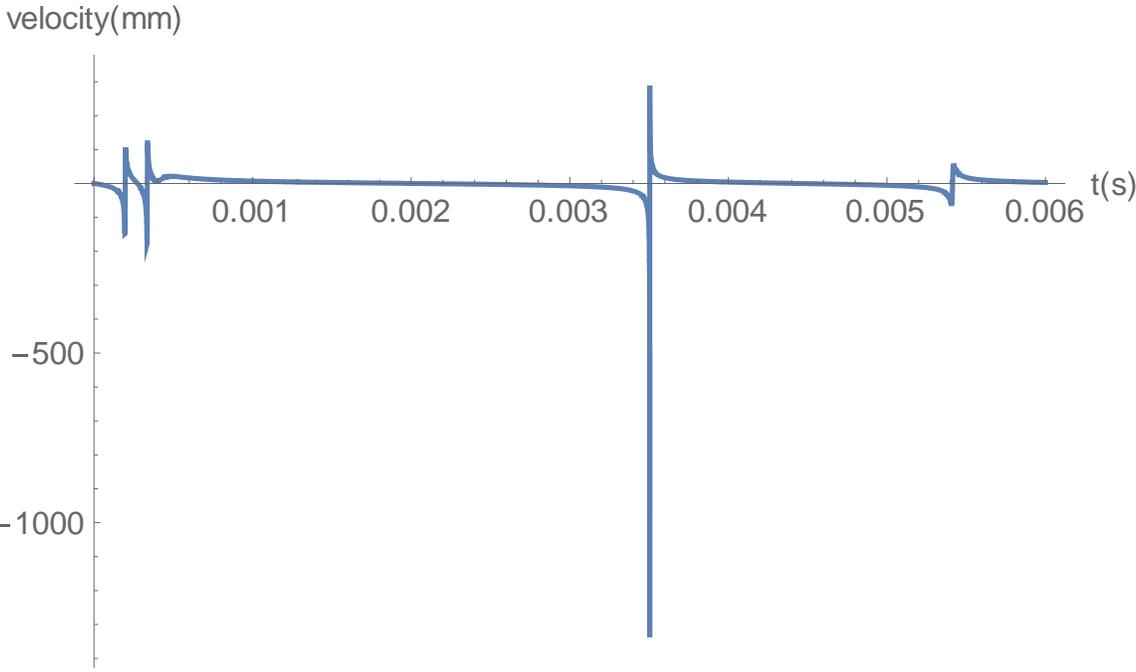
```
vel =R'[t]/. solution2[[1]]
```

```
plot3=Plot[vel,{t,0,.006},PlotRange->All,PlotPoints->1000,AxesLabel->{"t(s)","velocity(mm)"}]
```

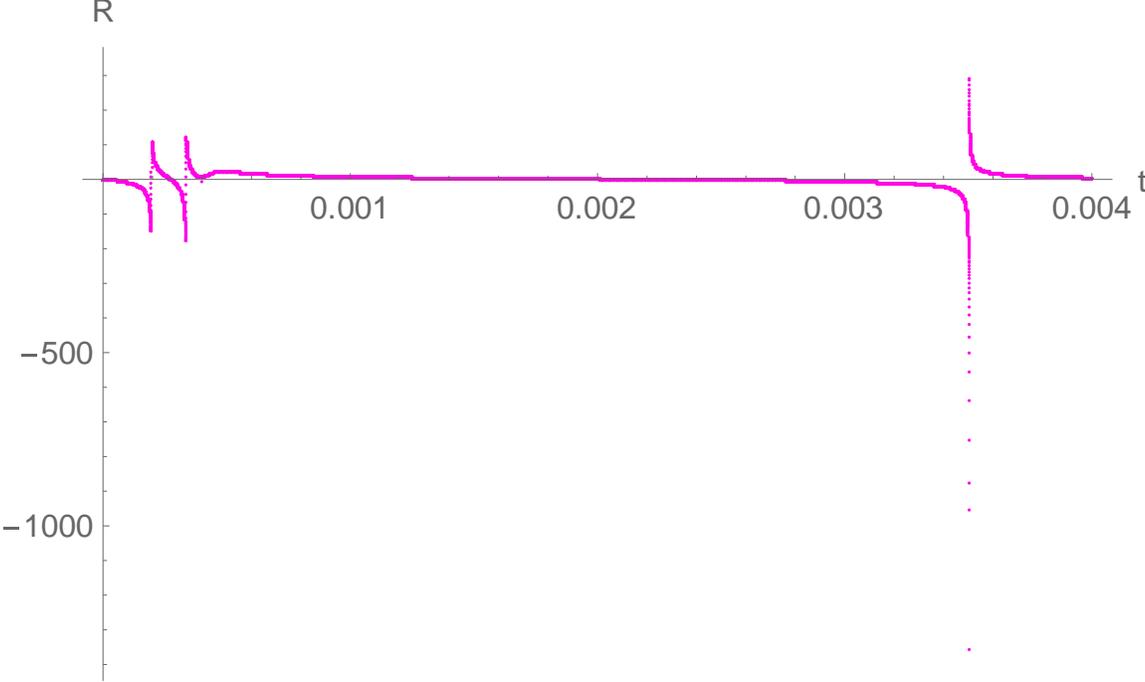


```
InterpolatingFunction[
```

```
][t]
```



```
vel2=Table[{t,R'[t]/.solution2[[1]]},{t,0,.004,.0000001}];  
vv2=ListPlot[vel2,PlotStyle->Hue[.85],PlotRange->All,AxesLabel->{"t","R"}]
```



```
puntoslimpios=vel2/.{alpha_Complex,z_Complex}->{Re[alpha],Re[z]};  
Export["Vel 3 nov2008.dat",puntoslimpios]
```

Vel 3 nov2008.dat

$$d1 = \partial_t \left(p1 \left(\frac{ram}{r[t]} \right)^{3\gamma} \right)$$

$$-((3 p1 ram \gamma (ram/r[t])^{-1+3 \gamma} r'[t])/r[t]^2)$$

Simplify[r[t]/(3cg0)*d1]

$$r[t]/(3cg0) \partial_t \left(p1 \left(\frac{ram}{r[t]} \right)^{3\gamma} \right)$$

$$\partial_t \left(\frac{a0}{\left(1 + \frac{(t-a1)^2}{a2^2 a3} \right)^{\frac{a3}{2} + \frac{1}{2}}} \right)$$

p=

$$1/(a2^2 a3) 2 a0 \left(1 + \frac{(t-a1)^2}{a2^2 a3} \right)^{-\frac{3}{2} - \frac{a3}{2}} (-1/2 - a3/2) (-a1+t)$$

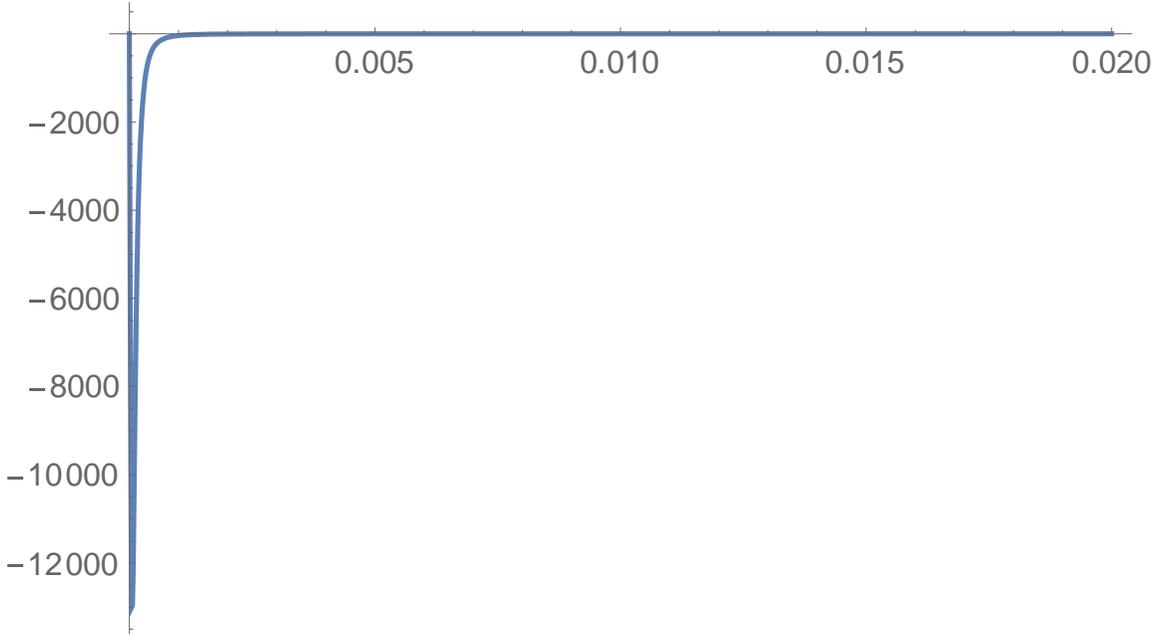
a0=2;

a1=0;

a2=.0001;

a3=1;

Plot[1/(a2² a3) 2 a0 ((1/2)-a3/2) (-a1+t) $\left(1 + \frac{(t-a1)^2}{a2^2 a3} \right)^{-\frac{3}{2} - \frac{a3}{2}}$, {t,0,.02},PlotRange->All]

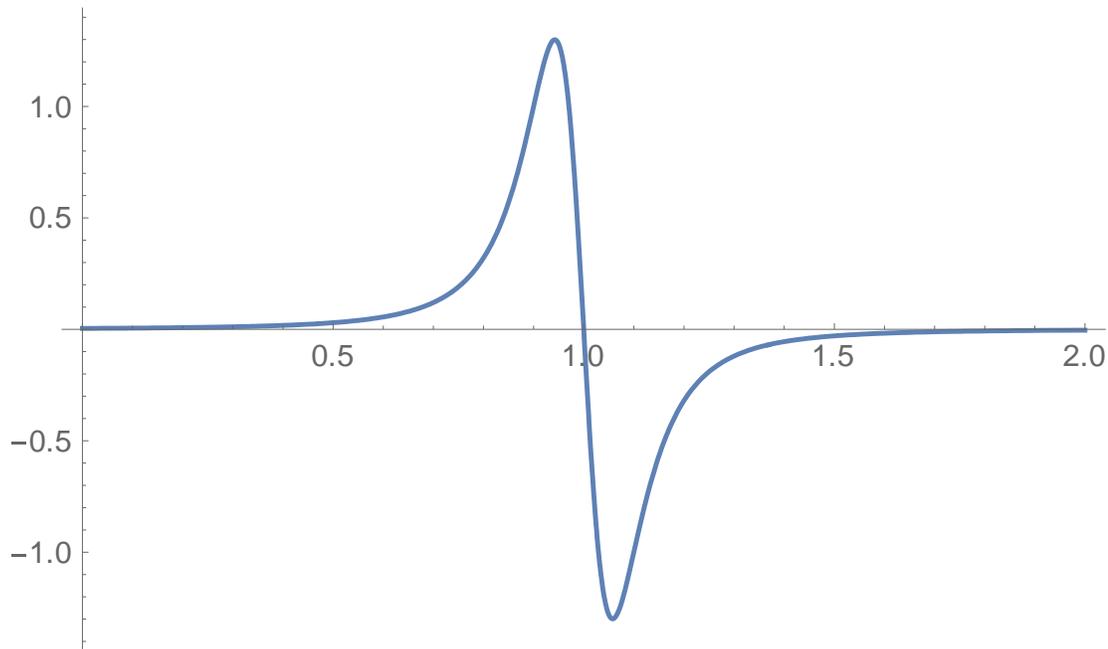


$$\partial_t \left(\frac{a0}{\left(1 + \frac{(t-a1)^2}{a2^2 a3} \right)^{\frac{a3}{2} + \frac{1}{2}}} \right)$$

p=

a0=.2;a1=1;a2=.1;a3=1;

Plot[p,{t,0,2},PlotRange->All]



BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Eisenberg, P. (1950). Cavitation, *16-MM SOUND FILMS*, pp. 121-128. Fecha de consulta: 8 de Octubre del 2015. Disponible en: <http://web.mit.edu/hml/ncfmf/16CAV.pdf>
- [2] Brennen, C.E. (2006). A Review of Cavitation Uses and Problems in Medicine, *Cavitation: Turbomachinery & Medical Applications*, pp. 1-12. Fecha de consulta: 7 de febrero del 2016. Disponible en: <http://authors.library.caltech.edu/3873/>
- [3]. Chhabra R.P. y Richardson J.F., (1999). *Non-newtonian flow and applied rheology*, University of Wales, Swansea, Swansea, Great Britain. Butterworth-Heinemann.
- [4]. White, M. (2008). *Mecánica de fluidos*. México, D.F. Mc GrawHill.
- [5]. Mott, L. (2006). *Mecánica de fluidos*. Sexta Edición. México, D.F. Pearson
- [6]. Cengel, A. y Cimbala, M. (2007). *Mecánica de fluidos Fundamentos y Aplicaciones*. Primera Edición. México, D.F. Mc GrawHill.
- [7]. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas. *Manual de Prácticas del Laboratorio de fundamentos de fenómenos de transporte*. Práctica No. 3. Determinación de la viscosidad de los fluidos.
- [8]. Méndez, A. F., Pérez, L., Paniagua, A. M. (2010). Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette). *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, 4(1), 237-245.
- [9] Evans, J. (2005). "Cavitation – A largely Misunderstood Phenomenon", Fecha de consulta: 20 de marzo del 2016, Disponible en <http://www.pumped101.com/cavitation.pdf>

- [10]. Focus-It <http://eswt.net/cavitation>.
- [11]. Ganz, S. (2012) "Cavitation: Causes, Effects, Mitigation and Application" Rensselaer Polytechnic Institute Hartford, Connecticut Fall, Fecha de consulta: 3 de Junio del 2016, Disponible en: http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~ganzs/FW/Project/FW_Project_Report%20Cavitation.pdf
- [12]. Baghdassarian, O., Chu, H-C., Tabbert, B. and Williams, G.A. (2001). SPECTRUM OF LUMINESCENCE FROM LASER-INDUCED BUBBLES IN WATER AND CRYOGENIC LIQUIDS, *Phys Rev Lett*, 86(21), 4934-4937.
- [13]. Godínez, F.A. (2010). Sonoluminiscencia de una sola burbuja modelada con mecánica clásica no lineal. Tesis que para obtener el grado de Dr. En Ingeniería Mecánica-Mecánica aplicada. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería- Facultad de Ingeniería UNAM.
- [14]. Morales, J.L. (2006). Sistema para la reproducción de sonoluminiscencia en resonador esférico. Tesis que para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Eléctrica-Sistemas Electrónicos. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería- Facultad de Ingeniería UNAM.
- [15]. Suslick, K.S., Mcnamara, W.B., Didenko, Y. (1999). Hot spot conditions during Multiple-Bubble cavitation, *Sonochemistry and sonoluminescence*, pp.191-204.
- [16]. Trevena, D.H. (1984). Cavitation and the generation of tension in liquids, *The institute of physics*, 17(1984), 2139-2164.
- [17.] <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-46/issue-11/world-news/pulsed-laser-induced-cavitation-ultrafast-bubbles-enable-novel-nano-microfluidic-systems.html>
- [18]. Chen, Q-D., Long, W. (2004). Production of large size single transient cavitation bubbles with tube arrest method, *Chinese physics*, 13(4), 564-570.
- [19]. Chen, Q-D., Wang, L. (2005). Luminescence from transient cavitation bubbles in water, *Physics Letters A*, 339, 110-117.
- [20]. Brujan, E.A., Williams, P.R. (2005). Bubble dynamics and cavitation in non-newtonian liquids, *Rheology Reviews* 2005, 147-172.
- [21]. Williams, P.R., Williams, P. M., Brown, S. W. J. and Temperley, H. N. V. (1999). On the tensile strength of water under pulsed dynamic stressing, *The royal society*, 455, 3311-3323.
- [22]. Chen, Q-D., Long, W. (2004).Luminiscence from Tube-Arrest Bubbles in Pure Glycerin, *Chinese Physics*, 21(9), 1822-1824.
- [23]. Chakravarty, A., Georghiou, T., Phillipson, T.E., Walton, A.J. (2004). Stable sonoluminescence within a water hammer tube, *Physical Review*, E 69, 066317-1 - 066317-8.
- [24]. Flannigan, D.J., Suslick, K.S., (2005). Molecular and atomic emission during singlebubble cavitation in concentrated sulfuric acid, *Acoustical society of America*, 6(3), 157-161.
- [25]. Overton, G. D. N., Trevena, D. H. (1980). Cavitation phenomena and the occurrence of pressure tension cycles under dynamic stressing, *J. Physics D: Appl. Physics*, 14(1981), 241-250.
- [26]. Caupin, F., Herbert, E. (2006). Cavitation in water: a review. *C. R. Physique*, 7, 1000-1017.
- [27]. Chong, Y., Chao, L. (2008). The pressure field in the liquid column in the tube-arrest method, *Chinese Physics B*, 17(07), 2580-2589.

- [28]. Urteaga, R., García, P.L. and Bonetto., F.J. (2009). Dynamics of sonoluminescing bubbles within a liquid hammer device, *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys.* 79(1 Pt. 2).
- [29]. Dular, M., Coutier-Delgosha, O. (2013). Thermodynamic effects during growth and collapse of a single cavitation bubble, *J. Fluid Mech*, 736, 44-66.
- [30]. Godínez F. A., De la Calleja, E., Lauga, E., Zenit, R. (2014). Sedimentation of a rotating sphere in a power-law fluid. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 213, 27-30.
- [31]. C. Mos, Levatin J., Szeri A.; (2000); A new damping mechanism in strongly collapsing bubbles; *The Royal Society*; No. 456; pp. 2983-2994.
- [32]. Williams P.R., Williams R. L.; Cavitation of liquids under dynamic stressing by pulses of tension; (2002); *Journal of Physics D: Applied Physics*; No. 35; pp.2222-2230.
- [33]. Ronald Young F (2005). *Sonoluminescence*. United States of America: CRC Press.