



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

MOVIMIENTO DE UNA BURBUJA DE GAS
EN UN LIQUIDO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO

P R E S E N T A :

ROBERTO AGUSTIN ALCARAZ RODRIGUEZ



DIRECTOR DE TESIS:
DR. ROBERTO ZENIT CAMACHO

ENERO 2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Movimiento de una burbuja de gas en un líquido

Roberto Agustín Alcaraz Rodríguez
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Autónoma de México

Director de tesis:
Dr. Roberto Zenit Camacho

Enero de 2004

Dedicatoria

Dedico este trabajo a todos los luchadores sociales que existen y existieron en este mundo, a todos aquellos que proclaman el cambio necesario a esta vorágine de sociedad capitalista. Este es uno de los pequeños espacios que me toca para realizar el reclamo generalizado.

Lo que defiendo trovando.

La voz de mi pueblo santo
es raíz de nuestra cultura
savia de gente tan pura
que nos nutre con su canto.
En un musical océano
mis décimas voy pescando,
con orgullo voy clamando
la tradición de mi tierra.
Lo que la costumbre encierra
yo lo defiendo trovando.

La maldita explotación
que empobrece al campesino
el crimen del asesino
que mata sin compasión
o el político cabrón
que se la vive robando,
mi canto va denunciando
al gobierno y su inmundicia.
Al que vive la injusticia
yo lo defiendo trovando.

A la memoria del Maestro Hermilo Rojas Aragón

Agradecimientos

En primer lugar agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, ya que me abrió sus puertas y con ella su amplia visión del mundo; por otro lado al Instituto de Investigaciones en Materiales que me facilitó la estancia de investigación, apoyándome con una beca del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT).

Agradezco a mis abuelos Agustín Rodríguez y Ma. Elena Santos, así como a la familia en general. A mis progenitores Ma. Elena Rodríguez Santos y Roberto Alcaraz López, ya que sin ellos no hubiera ni existido, por otro lado a mi hermano con el que he cotorreado y me la seguiré llevando así. Mis agradecimientos con mucho amor y cariño a mi segunda familia Rosas Quezada: Dario Rosas, Leticia Quezada, Carlos, Enrique, y mi ninfa Itzel; que han contribuido con mucha intensidad al compromiso con este trabajo de tesis. Con más formalidad le agradezco a mi director de tesis al buen Dr. Roberto Zenit Camacho que es un camarada excelente así como al Dr. Juan Hernández y al Dr. Guillermo Pulos. A mis sinodales: Dra. Catalina Stern, Dr. Francisco Solorio, Mto. en Ing. Jorge Naude y al Ing. Carlos Palacios, que sin duda todos ellos son excelentes personas.

Claro compañeros y hermanos no biológicos pero como si lo fueran, no me olvido de ustedes, cuates de la infancia: Carlitos Palacios (¡que viva Cuba!), Daniel Chehata (el que reniega del LaTeX), Julian Martinez (carnalisimo carnal), Carlos Soster, estos pertenecen a toda la bandera hecha y derecha que me ha acompañado en este camino académico. Liber Sosa, Mario Canek, Alejandro (pico), Naim (Jacinto), Gilberto Basilio, Gustavo (de mero tlalpan) carnales lumpenes inseparables.

Y sin duda alguna, no se encontraran todos y cada uno de los personajes con los que he convivido, no se angustien ya saben que estos agradecimientos los manda un Internacionalista ¡Viva la Internacional!

Resumen

Esta tesis trata del movimiento de una burbuja de gas en un líquido. Con el fin de obtener una medición de la velocidad de ascenso se diseñó un experimento: un contenedor de acrílico con medidas de 40 cm de largo y 14.3 cm de diámetro interno. Se utilizó una válvula de globo como compuerta de apertura y cierre, para la salida de la burbuja. A esta válvula se le agregaron dos extensiones, una tenía la función de boquilla con un diámetro de 5 mm por la cual se desprendía la burbuja, y por el otro lado, la otra fungía como una trampa con la cual se atrapaba a la burbuja. Estas extensiones se maquinaron en aluminio. También se maquinó un piston de Nylon, con el cual se incrementaba la presión del contenedor y disminuía el tamaño de la burbuja. Los líquidos utilizados fueron agua ultra-pura, agua corriente y soluciones de agua-glicerina al 15 y 50 % en peso. Se obtuvieron mediciones de las velocidades de ascenso y factor de forma. Se determinó la transición a trayectoria oscilatoria y se visualizaron campos de velocidad. Estas mediciones se realizaron por medio del procesamiento digital de imágenes de video de alta velocidad. Los campos de velocidades se obtuvieron por medio del método de velocimetría por imágenes de partículas (PIV).

Las velocidades que se encontraron en el agua corriente fueron muy similares a las del agua ultra-pura. En los casos de las soluciones agua-glicerina la velocidad disminuyó debido a la viscosidad. En cuanto al factor de forma, para diámetros equivalentes menores de 1mm, se encontraron burbujas esféricas para todos los líquidos. Para burbujas más grandes se encuentra mayor esfericidad en las burbujas con agua corriente y agua ultra-pura, y formas más elípticas en las de agua con glicerina tanto al 15 como al 50 %. La transición a trayectoria oscilatoria se encontró para burbujas pequeñas tanto en el agua corriente como en el agua pura. Se observó un retardo en la transición en las soluciones con glicerina.

Para finalizar, se analizó cualitativamente el campo de velocidades alrededor de la burbuja. Se observó la estela que se desprende de la burbuja al moverse.

Motivación

Hablar de flujos multifásicos es algo común y recurrente en las investigaciones de estos últimos años. Este tipo de flujos aparece constantemente en muchos fenómenos naturales, así como en los procesos industriales, de tal forma que tratar de entenderlos es de gran interés.

El estudio de la mecánica de fluidos a dedicado una buena parte de tiempo a la formalización matemática de las ecuaciones de movimiento. Las Ecuaciones de Navier-Stokes presentan un gran desafío en su resolución analítica para la mayoría de los casos. Esto ha generado simplificar los problemas, pues la realidad que presentan los flujos, es tener más de una fase.

Este trabajo de tesis, es un trabajo experimental que trata de complementar trabajos teóricos que se han realizado en este campo. Se centra en el movimiento de una sola burbuja de gas en un líquido, este es un caso de flujo bifásico. Es importante tratar de entender el caso de una sola burbuja, para después llevarlo al caso general, como puede verse en suspensión de burbujas. Se pudo caracterizar a la burbuja para diferentes números de Reynolds y Weber realizando mediciones de variables representativas como son: velocidad terminal, tamaño, y forma.

El estudio de los flujos multifásicos sigue siendo un desafío y aún no está entendido completamente. Se espera que con el paso del tiempo, y con investigaciones futuras se pueda comprender mejor la naturaleza de estos flujos.

Índice general

Dedicatoria	I
Agradecimientos	III
Resumen	v
Motivación	VII
Índice general	IX
1. Antecedentes	1
1.1. Flujos multifásicos y bifásicos	1
1.2. Burbujas y gotas	3
1.2.1. Terminología	4
1.2.2. Cohesión y adhesión	5
1.2.3. Tensión superficial	5
1.2.4. Velocidad terminal de una burbuja	7
1.3. Formas y números adimensionales	8
1.4. Investigaciones previas	11
2. Desarrollo experimental	17
2.1. Objetivo	17
2.2. Dispositivo experimental	17
2.3. Funcionamiento del equipo	20
2.3.1. Componentes del equipo	21
2.4. Técnicas de medición	25
2.4.1. Velocidad de la burbuja	25
2.4.2. Forma y tamaño de la burbuja	25
2.4.3. Procesamiento digital de imágenes	26
2.4.4. Método Particle Image Velocimetry (PIV)	29

2.5. Mezclado de las soluciones	30
3. Resultados	31
3.1. Líquidos de diferentes viscosidades	31
3.1.1. Agua corriente	31
3.1.2. Agua pura	36
3.1.3. Agua con glicerina al 15 %	40
3.1.4. Agua con glicerina al 50 %	44
3.2. Comparación de resultados para diferentes líquidos	47
3.2.1. Velocidad terminal	47
3.3. Factor de forma	49
3.3.1. Fotografías	50
3.4. Coeficiente de arrastre	52
3.5. PIV de las burbujas	53
4. Conclusiones	57
4.1. Trabajo a futuro	58
Bibliografía	59
A. Datos técnicos y programas	61
A.1. Válvula de globo ó bola	61
A.2. Diagrama esquemático de la bomba	62
A.3. Programas de análisis digital de imágenes	62
A.3.1. Código del programa en XCAP llamado Inicia	62
A.3.2. Código del programa en XCAP llamado Posición	63
B. Presentaciones del trabajo	65
C. Notas históricas	71

Capítulo 1

Antecedentes

1.1. Flujos multifásicos y bifásicos

El flujo de multicomponentes y mezclas multifásicas cubre un gran espectro de condiciones de flujo y aplicaciones. Un componente es una especie química como el nitrógeno, oxígeno, agua o freón. Una fase se refiere a los estados sólido, líquido y gaseoso de la materia. El flujo de aire, el cual está compuesto de una mezcla de gases (nitrógeno, oxígeno, etc.) es el mejor ejemplo de un flujo multicomponente de una fase simple. Es una práctica común tratar este tipo de flujos, como el flujo de un componente simple con una viscosidad y una conductividad térmica que representen la mezcla. Esta aproximación es práctica, a menos que los constituyentes mayores de los gases componentes, tengan diferencias significativas en sus pesos moleculares. En este caso el momentum asociado con las velocidades de difusión pueden ser importantes. También la naturaleza multicomponente del aire puede ser importante a altas temperaturas donde ocurre la disociación, o a bajas temperaturas en donde algunos elementos pueden condensarse.

El flujo de mezcla de líquidos tiene aplicaciones industriales importantes. (p.ej. el agua que se utiliza para limpiar el aceite desde un pozo, el cual asciende como un flujo multicomponente de una fase simple). Si los dos líquidos son miscibles, entonces la mezcla puede ser tratada como una fase simple con propiedades modificadas. Si los líquidos no son miscibles, el líquido no puede ser visto como homogéneo, y el tratamiento del problema del flujo es mucho más complejo. La mezcla de dos líquidos es generalmente referida como emulsiones.

Un componente simple de un flujo multifásico, es típicamente el flujo de un líquido con su vapor. El ejemplo más común es el flujo de vapor-agua, el cual

se encuentra en una gran variedad de industrias. El flujo de fluidos de una fase simple ha ocupado la atención de científicos e ingenieros durante muchos años. También las ecuaciones para el movimiento y propiedades térmicas de los fluidos de fase simple, son bien aceptadas (ecuaciones de Navier-Stokes) y se encuentran soluciones analíticas para casos específicos bien documentados, Lammers [12]. La mayor dificultad es el modelado, la cuantificación de la turbulencia y sus influencias en la transferencia de masa, momentum y energía. El estudio de los flujos multifásicos representa una desafiante y potencial área fructífera de esfuerzo para el científico y el ingeniero.

Existe un gran número de sistemas hechos por el hombre, utilizando gotas y burbujas. En casi todas las situaciones estos fluidos de partículas, descansan en el interior de un medio continuo fluido, o en un estado semejante a un fluido. Estos tienen una presencia importante en la física del sistema del que proceden.

Sistemas de agua natural, tales como lagos y océanos contienen aire en forma de acumulación de burbujas, que hacen un componente esencial para la vida marina. También encontramos sistemas industriales, (p.ej. en las plantas nucleares encontramos burbujas con agua en ebullición situadas en el reactor, y gotas que se esparcen con rociadores como componentes refrigerantes). En reactores químicos comúnmente encontramos gotas y burbujas, que entre ambas transportan reacciones y productos. Los motores de combustión interna, así como de jets, también utilizan rociadores o atomizadores de hidrocarburos líquidos como combustibles. Pueden encontrarse más sistemas donde aparecen fenómenos físicos importantes a través de la transferencia de calor y de masa, los cuales van acompañados por movimiento de fluido que generalmente sirve para incrementar el transporte, Sadahal [20].

Subdivisión de los flujos bifásicos en categorías y ejemplos. Crowe [5].

- gas-líquido: Dispersión de gotas en gas, niebla, nubes, neblina. Coalescencia de gotas y formación de lluvia. Flujo a alta velocidad de vapor con condensación. Dispersión de burbujas de gas en líquido. Flujo vertical de aceite con gas explosivo. Transporte de aceite y gas en un tubo horizontal. Flujo de líquido un poco más saturado en tubos. Líquido y gas conectados. Régimen anular en un flujo vertical gas-líquido.
- gas-sólido: Dispersión de partículas sólidas en un gas. Aerosoles, dispositivos: recolección de partículas y filtros.
- líquido-sólido: Dispersión de partículas sólidas en líquidos. Hidroso-

les. Transportación hidráulica de partículas. Sólido poroso filtrando líquido. Estelas elásticas en rocas saturadas.

- líquido-líquido: Dispersión de gotas de líquido en líquido. Emulsiones y cremas. Coalescencia de gotas y separación de fases. Cuerpo de líquidos conectados. Transporte de dos líquidos en un tubo horizontal. Movimiento de la interfase aceite-agua en rocas porosas.

Un flujo gas-líquido puede asumir diferentes configuraciones. Por ejemplo, el movimiento de burbujas en un líquido, en el cual el líquido es la fase continua. Por otro lado, el movimiento de gotas de líquido en un gas, es también un flujo gas-líquido, en este caso el gas es la fase continua. También en un flujo separado, en el cual el líquido se mueve a lo largo del fondo de un tubo, y el gas a lo largo de la parte superior del tubo. Los primeros dos ejemplos, burbujas en un líquido y gotas en un gas, son conocidos como flujos de fase dispersa. Los flujos gas-sólido son usualmente considerados como un gas con partículas sólidas suspendidas. Esta categoría incluye el transporte neumático, como los lechos fluidizados.

En los flujos líquido-sólido, las partículas son acarreadas por el líquido y son referidas como flujos de aspersión. Estos cubren una gran gama de aplicaciones, como el transporte de carbón y minerales en un flujo de lodo. Estos flujos pueden ser clasificados como flujos de fase dispersa y son un foco de interés considerable en la investigación de la ingeniería. Una vez más no es apropiado referirse al movimiento de un líquido a través de un medio poroso, como un flujo líquido-sólido, porque la fase sólida no está en movimiento.

1.2. Burbujas y gotas

Una burbuja se define como glóbulo de algún fluido (gas o líquido) que se forma en el mismo líquido o en un líquido diferente y tiende a subir hacia la superficie. Es decir se concibe como la deformación de una pequeña película de líquido en donde la tensión superficial ayuda mucho a generar esa burbuja.

Un ejemplo muy claro de la formación de burbujas es al soplar suavemente sobre un aro que se ha sumergido en jabonadura. En este caso, el aire que se sopla deforma la película de jabón, haciendo que se extienda el jabón para formar dicha película. Este proceso continúa hasta que llega un momento en que el aire queda encerrado totalmente por la película de jabón, formándose así la burbuja que después se desprende.

Si usamos un alambre de cualquier forma: triangular, cuadrado, hexagonal,

redondo, siempre se formarían burbujas esféricas. Pero ¿por qué siempre esferas? La respuesta nos las da la ley del mínimo esfuerzo.

Los procesos en la naturaleza se realizan de tal forma que siempre existe un mínimo de alguna cantidad física. Este mínimo puede representar energía, distancia, cantidad de movimiento, tiempo. Por ejemplo, al soltar una canica colocada en la orilla de una cacerola con fondo redondo, la canica se moverá de un lado a otro, pero finalmente se detendrá en el centro, que es precisamente el lugar donde tiene la mínima energía. Así, las burbujas toman forma esférica porque las esferas son las que tienen la menor superficie para la cantidad de aire encerrada dentro de la burbuja, minimizando también la energía que tiene esa superficie.

1.2.1. Terminología

La gota es una masa de líquido en líquido ó en un medio gaseoso, la burbuja es masa de gas en un medio externo. Las gotas y burbujas generalmente hacen referencia a partículas fluidas en un gran número de moléculas que se consideran como un continuo. Las partículas fluidas y el medio circunvecino están separados por la interface. En algunos casos, (p.ej. las burbujas de jabón), muestran la interface que las separa, por tener una delgada película de líquido. Situaciones más complejas consisten en pares de gotas y burbujas en contacto, o partículas fluidas adentro de la gota. Varios sistemas son ilustrados en la figura 1.1.

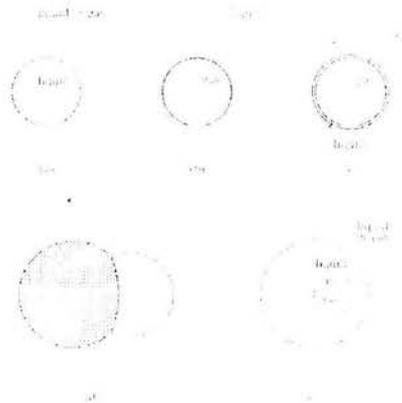


Figura 1.1: a) Gota de líquido. b) Burbuja de gas en líquido. c) Burbuja de jabón. d) Compuesto de gotas-tres interfaces. e) Compuesto de gotas-dos interfaces.

1.2.2. Cohesión y adhesión

En esta sección se hará una breve revisión de algunos conceptos importantes en el estudio del movimiento de una burbuja en un líquido viscoso. La fuerza de cohesión en un líquido es una fuerza de atracción entre sus moléculas que tiende a mantenerlas unidas. La cohesión es distinta de la adhesión. La cohesión es la fuerza de atracción entre partículas adyacentes dentro de un mismo cuerpo, mientras que la adhesión es la interacción entre las superficies de distintos cuerpos. En los gases, la fuerza de cohesión puede observarse en su licuefacción, que tiene lugar al comprimir una serie de moléculas y producir fuerzas de atracción suficientemente altas para proporcionar una estructura líquida. En los líquidos, la cohesión se refleja en la tensión superficial, causada por una fuerza no equilibrada hacia el interior del líquido que actúa sobre las moléculas superficiales. También en la transformación de un líquido en sólido cuando se comprimen las moléculas lo suficiente. En los sólidos, la cohesión depende de cómo estén distribuidos los átomos, las moléculas y los iones, lo que a su vez depende del estado de equilibrio (o desequilibrio) de las partículas atómicas. Existen varios ejemplos de la fuerza de cohesión, uno de ellos es el alcohol, que tiene menor fuerza de cohesión entre sus moléculas, a comparación del agua. Por esta razón el alcohol se volatiliza más rápidamente que el agua.

1.2.3. Tensión superficial

Antes de definir la tensión superficial, es necesario hablar de energía libre de superficie, la cual se define como la cantidad de trabajo necesario, a temperatura y presión constantes, para crear una superficie; esta energía no puede ser evaluada más que haciendo variar el área de la superficie. Es decir, en un determinado cuerpo se trata de provocar una deformación que reacciona en sentido contrario a las fuerzas de cohesión, y éstas tratarán de desplazarse y repartir a las moléculas o átomos en el interior de la superficie. Naturalmente esta deformación no sucede en el caso de los sólidos, donde los átomos ocupan posiciones no intercambiables, por lo que no es posible definir una variación de energía libre por unidad de área.

En el caso de los líquidos, el trabajo realizado se reparte de una forma homogénea; las moléculas se desplazan más fácilmente y la energía es proporcional al aumento de la superficie, entonces es posible definir una energía libre de superficie por unidad de área, y relacionarla con la noción de tensión superficial. Una molécula en el interior de un líquido está sometida a la acción de fuerzas atractivas de cohesión (fuerzas débiles de Van Der Waals)

en todas las direcciones, siendo la resultante de todas ellas una fuerza nula. Pero si la molécula está situada en la superficie del líquido, es sometida a la acción de fuerzas de cohesión que no están balanceadas, cuya resultante es una fuerza perpendicular a la superficie dirigida hacia el interior del líquido, por lo que las moléculas de la superficie tienen más energía que las moléculas interiores, y tienden a irse al seno del líquido; por tal razón la superficie tiende a contraerse o reducirse formando una tensión en la superficie, y a ocupar el área más pequeña posible. De aquí que sea necesario consumir cierto trabajo para mover las moléculas hacia la superficie venciendo la resistencia de éstas fuerzas. Se define entonces cuantitativamente a la tensión superficial, como el trabajo que debe realizarse para llevar moléculas en número suficiente desde el interior del líquido hasta la superficie, para crear una nueva unidad de superficie.

Existe semejanza en la superficie libre de un líquido, y a las propiedades de una membrana elástica bajo tensión. La tensión es el resultado de las fuerzas moleculares, esto se refleja en la considerable curvatura en los bordes donde el líquido está en contacto con la pared del recipiente. La tendencia de cualquier superficie líquida es hacerse lo más reducida posible como resultado de esta tensión, como ocurre con el mercurio que forma una bola casi redonda cuando se deposita una cantidad pequeña sobre una superficie horizontal. La forma casi perfectamente esférica de una burbuja de jabón, se debe a la distribución de la tensión sobre la delgada película de jabón. La tensión superficial es importante en condiciones de ingravidez; en los vuelos espaciales los líquidos no pueden guardarse en recipientes abiertos porque ascienden por las paredes de los recipientes. La tensión superficial del agua varía entre 0.74 N/m^2 a 20°C hasta 0.059 N/m^2 a 100°C . La acción de la tensión superficial es incrementar la presión dentro de una pequeña gota de líquido o dentro de un pequeño chorro de líquido. Para una pequeña gota esférica de radio r , la presión interna p necesaria para balancear la fuerza de tensión debida a la tensión superficial σ se calcula en función de las fuerzas que actúan sobre un cuerpo libre semiesférico:

$$p\pi r^2 = 2\pi r\sigma \quad (1.1)$$

Despejando p en la Ec.1.1 queda finalmente:

$$p = \frac{2\sigma}{r}. \quad (1.2)$$

Para un chorro cilíndrico de radio r , se puede aplicar la ecuación de tensión superficial:

$$p = \frac{\sigma}{r} \quad (1.3)$$

Ambas ecuaciones muestran que la presión se incrementa para radios muy pequeños tanto de la gota como del cilindro.

La atracción capilar es causada por la tensión superficial y por el valor relativo de la adhesión entre líquido y sólido con respecto a la cohesión del líquido. Un líquido que moja el sólido tiene mayor adhesión que cohesión. La acción de la tensión superficial en este caso hace que el líquido suba dentro de un tubo vertical pequeño que se encuentra parcialmente sumergido en él. Para líquidos que no mojan el sólido, la tensión superficial tiende a deprimir el menisco en un pequeño tubo vertical, ver Kundu [11].

1.2.4. Velocidad terminal de una burbuja

Para el cálculo de la velocidad terminal de la burbuja, se necesita igualar la fuerza de arrastre con la fuerza de flotación de la burbuja. Es necesario saber la distancia a la cual la burbuja alcanzaría dicha velocidad, con el fin de poder diseñar el experimento. Para poder obtener la distancia a la que llega a su velocidad terminal, se resolvió la ecuación diferencial que relaciona a la segunda ley de Newton con la fuerza de flotación y la fuerza de arrastre. Debemos de tomar en cuenta que la masa de la burbuja es despreciable respecto al líquido, sin embargo esta masa no es la única que se desplaza, pues existe la masa añadida de la burbuja, que es la masa del líquido que se desplaza en conjunto con la burbuja incrementando la inercia de la partícula. Podemos obtener la velocidad terminal de una burbuja igualando la fuerza de arrastre con la de flotación. La fuerza de flotación para una esfera inmersa en un fluido esta dada por:

$$F_f = \frac{4}{3}\pi R^3(\rho_l - \rho_b)g \quad (1.4)$$

donde R es el radio de la burbuja, ρ_l es la densidad del líquido, ρ_b es la densidad de la burbuja y g es la gravedad.

La fuerza de arrastre esta dada por:

$$F_a = 12\pi\mu UR \quad (1.5)$$

donde μ es la viscosidad del líquido. Esta expresión es solo aplicable para un flujo irrotacional de baja viscosidad, Batchelor [2].

Las ecuaciones 1.4 y 1.5, pueden sustituirse en la ecuación:

$$F_f - F_a = m \frac{dU}{dt} \quad (1.6)$$

considerando que la masa de la esfera es la masa añadida del movimiento:

$$m = m_{ad} = \left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{4}{3}\right)\pi R^3 \rho_l \quad (1.7)$$

Podemos entonces resolver la ecuación diferencial para obtener:

$$U(t) = \frac{R^2 g \rho_l}{9\mu} \left(1 - e^{-\frac{18\mu t}{R^2 \rho_l}}\right) \quad (1.8)$$

y también

$$y(t) = \frac{R^4 g \rho_l}{162\mu} \left(e^{-\frac{18\mu t}{R^2 \rho_l}} - 1\right) + \frac{R^2 g \rho_l}{9\mu} t \quad (1.9)$$

Con la ecuación 1.8, podemos obtener la velocidad de la burbuja en un determinado tiempo, ya que tenemos: radio de la burbuja, densidad del líquido, viscosidad del líquido. Con la ecuación 1.9, se puede obtener la posición que va a tomar la burbuja, en el tiempo determinado y con esto se sabe la longitud del contenedor.

1.3. Formas y números adimensionales

Dependiendo de las propiedades físicas y condiciones de flujo, las burbujas pueden tener una variedad muy grande de formas. La figura 1.2 muestra un ejemplo de el rango de formas posibles, Clift et al. [4].

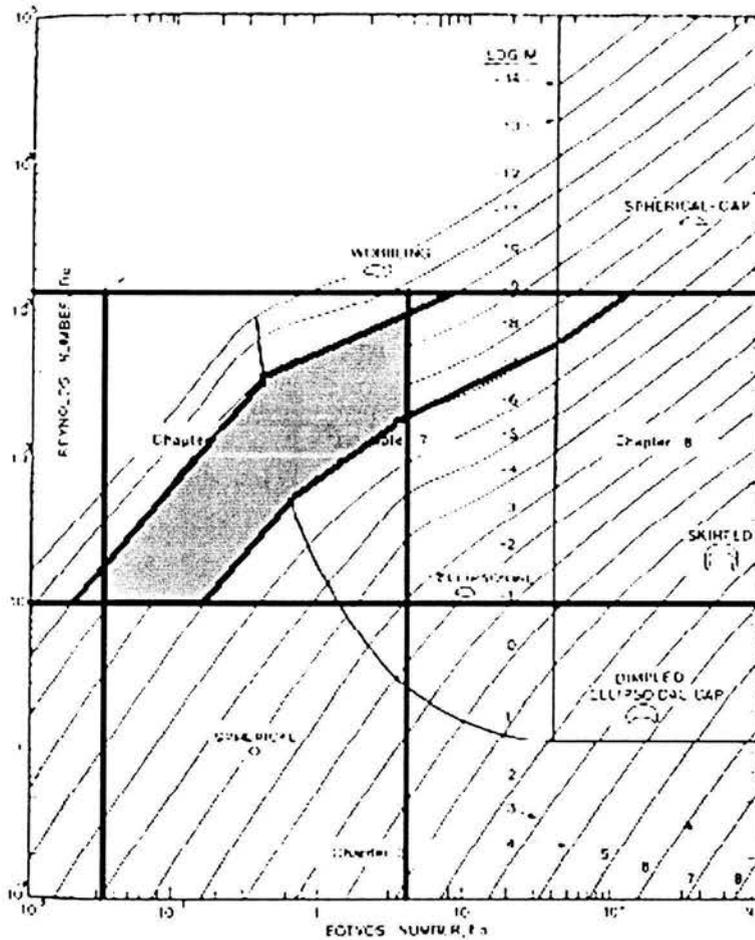


Figura 1.2: En la región rellena se muestran las formas para burbujas en líquidos, que se obtuvieron en esta tesis.

Las variables que deben considerarse para el movimiento de una burbuja en un líquido son: ρ_f , ρ_g , μ_f , μ_g , σ , d , g , v_b . De estas variables pueden formarse los siguientes números adimensionales independientes (Reynolds, Morton, Eötvös, Π_1 , Π_2):

$$Re = \frac{\rho_f v_b d_b}{\mu_f} \quad (1.10)$$

$$M = \frac{g \mu^4}{\rho \sigma^3} \quad (1.11)$$

$$Eo = \frac{g \Delta \rho d^2}{\sigma} \quad (1.12)$$

$$\Pi_1 = \frac{\rho_g}{\rho_f} \quad (1.13)$$

$$\Pi_2 = \frac{\mu_g}{\mu_f} \quad (1.14)$$

Para el caso de burbujas $\Pi_1 \approx 0$, $\Pi_2 \approx 0$. Es también común referirse al número de Weber y al número de Capilaridad, que se definen como:

$$We = \frac{\rho_f v_b^2 d_b}{\sigma} = \left(\frac{M}{Eo} \right)^{1/2} Re^2 \quad (1.15)$$

y

$$Ca = \frac{\mu v_b}{\sigma} = \frac{We}{Re} = \left(\frac{M}{Eo} \right)^{1/2} Re \quad (1.16)$$

donde Weber representa la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas de tensión superficial, y la Capilaridad representa la relación entre las fuerzas viscosas y las fuerzas de tensión superficial. Por otro lado ρ_f y μ_f son la densidad y la viscosidad del fluido, σ , v_b , d_b es la tensión superficial, la velocidad terminal y el diámetro de la burbuja.

Los experimentos realizados en esta tesis, se encuentra en los siguientes rangos:

$$10 \leq Re \leq 1400$$

$$4,70 \times 10^{-8} \leq M \leq 2,53 \times 10^{-11}$$

$$0,024 \leq Eo \leq 4,705$$

También

$$10 \times 10^{-3} \leq We \leq 5,2$$

$$10 \times 10^{-4} \leq Ca \leq 2,45 \times 10^{-2}$$

Este rango de valores corresponde a la región sombreada en la figura 1.2. Estos rangos corresponden a burbujas esféricas y elipsoidales.

1.4. Investigaciones previas

Duineveld [7] reportó la velocidad de burbujas pequeñas formadas en agua ultra-pura. Estas burbujas tienen un número de Reynolds grande y número de Weber pequeño, y se aproximan a tener forma esférica. Una notable contribución de la teoría del movimiento de la burbuja con un alto número de Reynolds fue dada por Levich [13]. Moore [17] extiende estos resultados en un orden mayor para un número de Reynolds e incluye la deformación de las burbujas. Moore calcula la deformación de las burbujas esféricas con un método aproximado por la ecuación normal de balance de fuerzas, solamente a unos cuantos puntos de la superficie de la burbuja. El Sawi [8] y Benjamín [3] satisficieron esta condición de límite sobre la superficie completa de la burbuja. Broeck, Séller-Vanden y Miksis [15] calcularon la forma por métodos numéricos. Leal y Ryskin [19] calcularon numéricamente el coeficiente de arrastre y formas de la burbuja como función del número de Weber, para varios números de Reynolds. Debido a un problema numérico estos investigadores limitaron a un número máximo de Reynolds de 200, correspondiendo a una burbuja con $R=0.45$ mm en agua. Experimentos extensivos realizaron Morton y Haberman [9] que con varios líquidos obtuvieron velocidades de ascenso precisas como función de tamaños de burbujas. Saffman [21], Sears y Hartunian [10] ambos reportaron experimentos y teoría del comportamiento con burbujas de trayectoria ascendente inestable. Todos estos autores mencionaron la influencia de las impurezas en la superficie activa, sobre la velocidad de ascenso. Especialmente el agua es demasiado sensible a las impurezas, el agua destilada común y corriente no es perfectamente pura como fundamentaron Tapuccu y Aybers [1].

El agua ultra-pura es de importancia, porque es el líquido con un número de Morton extremadamente bajo. El número de Morton para agua ultra-pura es de $M=2.4 \times 10^{-11}$, a $20^\circ C$.

El experimento que realizó Duineveld [7], fue en un tanque cúbico, con paredes de cristal de 50 cm de largo. El tanque fue llenado con agua ultra-pura, producida con un sistema de purificación de mili poros. La calidad de la purificación antes mencionada es: resistencia específica $18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ y menor de 10 p.p.b. de partículas orgánicas. La temperatura del agua durante todo el experimento fue de 19.6 a $20^\circ C$. Las burbujas se produjeron en un sistema especialmente diseñado. El radio equivalente de la burbuja varió entre $R=0.33$ y $R=1.00$ mm. El movimiento fue registrado con video de alta velocidad tipo NAC HSV-1000, y con una cámara fotográfica Fuji S-VHS. La iluminación se encontraba en la zona posterior del tanque, y fue por medio de dos estroboscopios con pulsaciones de destello: encendido y apagado de $10 \mu\text{s}$. La cámara estaba equipada con un lente Canon con Zoom $f/1.6$ 16-108 mm con diafragma $f:5.6$ Canon. La imagen fue digitalizada, entre 768×512 pixeles, con 8 bit de nivel de resolución por VFG. El centro y la forma de la proyección de la burbuja, fue determinada con una imagen en rutinas realizadas por el software. La gráfica 1.3 muestra la velocidad terminal como función del radio de la burbuja, obtenida por Duineveld [7].

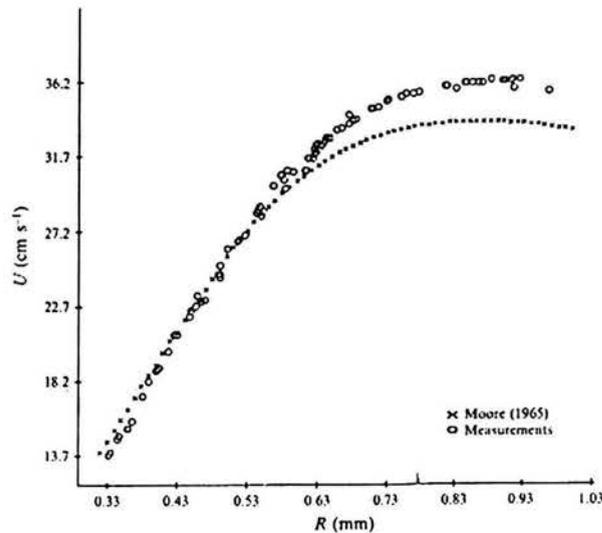


Figura 1.3: Resultados de Duineveld

Otro experimento parecido, realizado por Wu y Gharib [16], constó del análisis a una burbuja con diámetro de rango (0.1-0.2 cm) también en agua ultra-pura. Ellos encontraron que la burbuja en ese rango de diámetro presentaba dos estados de forma: esférica ó elipsoidal, esto dependía del diámetro del tubo capilar desde el cual se iba a desprender. Las burbujas esféricas se movían lentamente, en comparación con las elipsoidales con volumen equivalente. Las burbujas con diámetro menor a 0.15 cm tenían un ascenso rectilíneo, las burbujas grandes y esféricas seguían un camino en zig-zag, y finalmente las burbujas grandes elipsoidales presentaban un camino en espiral.

Varios de los experimentos que se han realizado no concuerdan con los de estos investigadores p.ej. Saffman [21], solo observó zigzag en las burbujas usando agua filtrada. Después Tapuccu y Aybers [1], solo observaron burbujas con ascenso en espiral en un régimen de diámetro $d < 0.2$ cm. La parte principal del aparato experimental de Wu y Gharib, es el tanque de agua hecho de plexiglas con dimensiones de 15cm x 15cm x 61cm. Este fue grande para despreciar los efectos de pared. En el centro de la tapa inferior montaron el tubo capilar, por el cual las burbujas se liberaban en el interior del tanque de agua ultra-pura. Al método usado para la generación de burbujas le nombraron el método del empujón suave. El aparato de generación de burbujas consistía en un capilar de cristal recto y un capilar de teflon en forma de L, incrustado en una valvula de 3 puertas y 2 jeringas de cristal. Las jeringas de cristal **A** y **B**, fueron controladas por 2 bombas tipo jeringas. Generaban una burbuja con un volumen deseado de aire, luego la soltaban adentro del capilar en forma de L, este capilar se rotaba 90° y la burbuja de aire se desprendía suavemente a través del capilar recto al tanque de agua, usando la jeringa **B**. La figura 1.4, muestra un esquema del método para la generación de la burbuja.

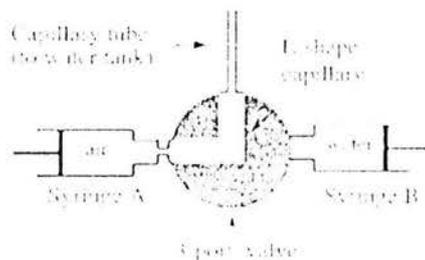


Figura 1.4: Compuerta del método: empujón suave

Las imágenes de la burbuja fueron grabadas por una cámara de alta velocidad (1000 fps, Kodak Ektapro). La cámara tomaba imágenes de 512 x 384 pixeles. El contorno de la burbuja en la imagen digital era analizado usando Matlab. El diámetro equivalente de la burbuja lo calculaban usando:

$$d = (a^2b)^{1/3} \quad (1.17)$$

donde a y b son la longitud horizontal y vertical de la burbuja respectivamente.

La trayectoria de la burbuja era grabada por un sistema de imágenes en tres dimensiones (3D), Cuando la burbuja se soltaba en el interior del tanque de agua, tanto la cámara de alta velocidad, como el sistema de imágenes en 3D, eran disparados simultáneamente, grabando 1000 imágenes consecutivas en un segundo.

El agua que ocuparon fue agua ultra-limpia, con un filtro de 4 módulos (Nanopure, Barnstead) con resistencia específica $\geq 18 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$. Los diámetros de los capilares que usaron fueron $d_i=0.0267$ y 0.120 cm, respectivamente. Ellos observaron que la velocidad terminal de la burbuja con el capilar pequeño, era cerca de dos veces más rápida que la velocidad con el capilar más grande. La figura 1.5, muestra una gráfica velocidad terminal en función del diámetro equivalente, y el factor de forma en función de el número de Weber.

Para la comprensión de los efectos que producía el tamaño del capilar a la forma y movimiento de la burbuja, estos investigadores estudiaron imágenes de la burbuja, cerca del tubo capilar. La figura 1.6, muestra una serie de imágenes usando los dos tubos capilares, de diámetros internos diferentes.

En las fotografías con el capilar de diámetro interno de $d_i=0.0267$ cm, se observa una deformación de la burbuja, en el momento del desprendimiento en el capilar, esta curvatura o deformación permite un ascenso ondulante muy fuerte, que genera vueltas, y estas impulsan a la burbuja a una gran velocidad inicial. En las imágenes de abajo, el diámetro interno del capilar es de $d_i=0.120$ cm, que es similar al diámetro de la burbuja. Esta burbuja conserva una forma esférica debido a la poca perturbación en el proceso de separación.

Esta diferencia de velocidades, resultado del tamaño de los capilares, nos motivó a la realización de esta tesis.

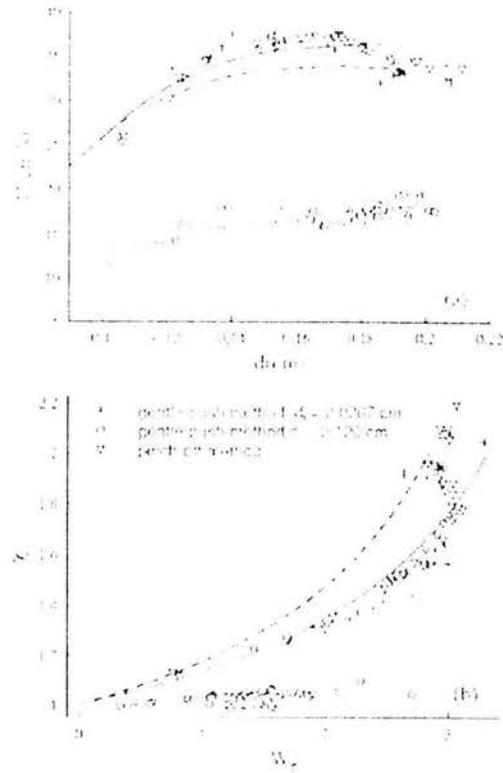


Figura 1.5: Resultados de W_0 y Gharib

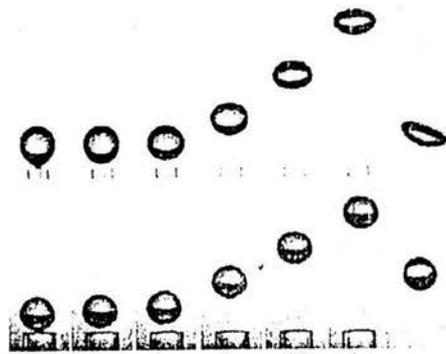


Figura 1.6: Capilares de: $d_i = 0.0267$ cm, superior y $d_i = 0.120$ cm, inferior.

Capítulo 2

Desarrollo experimental

2.1. Objetivo

El objetivo de esta tesis es analizar experimentalmente el movimiento de una burbuja de aire, inmersa en distintas soluciones de agua-glicerina, a partir de la medición de variables representativas de la misma, como son: velocidad terminal, forma y tamaño, así como los números adimensionales: Weber y Reynolds.

2.2. Dispositivo experimental

El dispositivo experimental consiste en un contenedor de acrílico con sección cilíndrica de 14.3 cm de diámetro y altura de 40 cm. En el interior del contenedor se encuentra una válvula de globo. En los extremos de ésta se adaptaron extensiones de aluminio: se maquinaron, una boquilla con cuerda a la cual se le hizo un barreno de 5 mm de diámetro, y una trampa también con cuerda y terminado cónico. Para la apertura de la válvula se maquinó una extensión de bronce, la que permitía abrir o cerrar la compuerta.

El experimento en conjunto va sujeto por medio de cuatro espárragos de 1/4 de pulgada con sus respectivas rondanas y tuercas. La fotografía 2.1 muestra el contenedor completo. La figura 2.2 muestra el diagrama en conjunto. La figura 2.3 muestra un esquema de la compuerta. En el exterior del contenedor, encontramos un pistón de Nylamid (Nylon), enroscado a una de las tapas del cilindro, con el cual presurizamos al líquido en estudio, obteniendo así la disminución del tamaño de la burbuja. La figura 2.4 muestra un esquema del pistón.

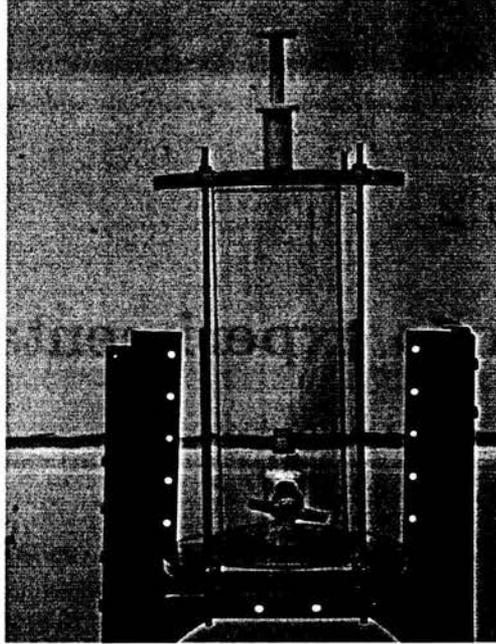


Figura 2.1: Experimento completo

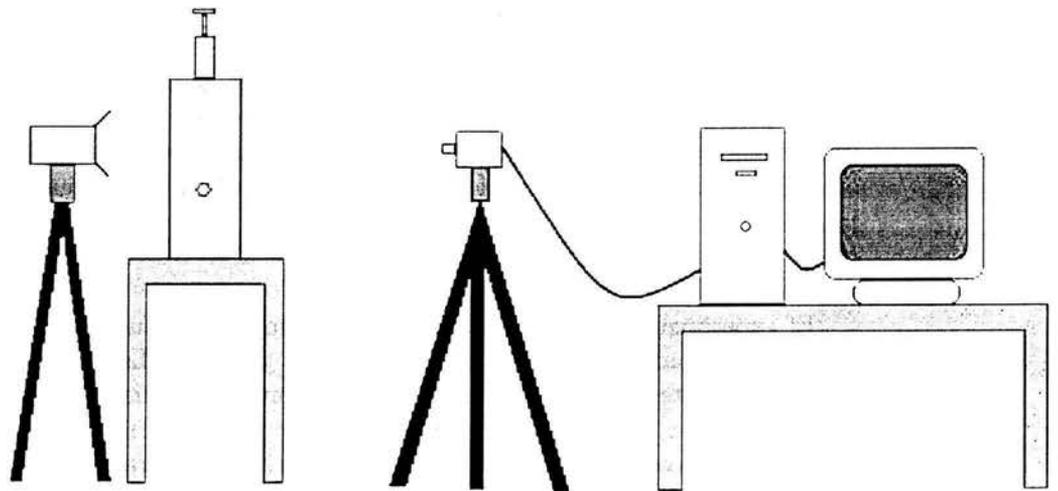


Figura 2.2: Diagrama del experimento

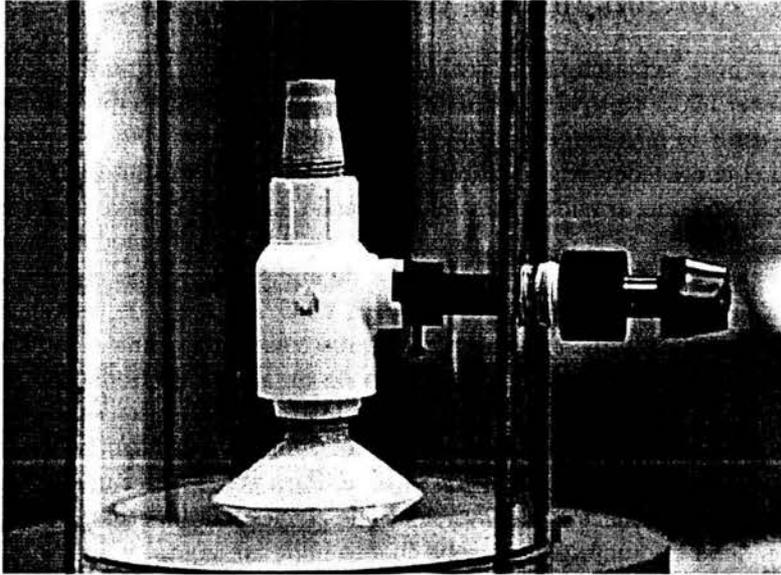


Figura 2.3: Compuerta

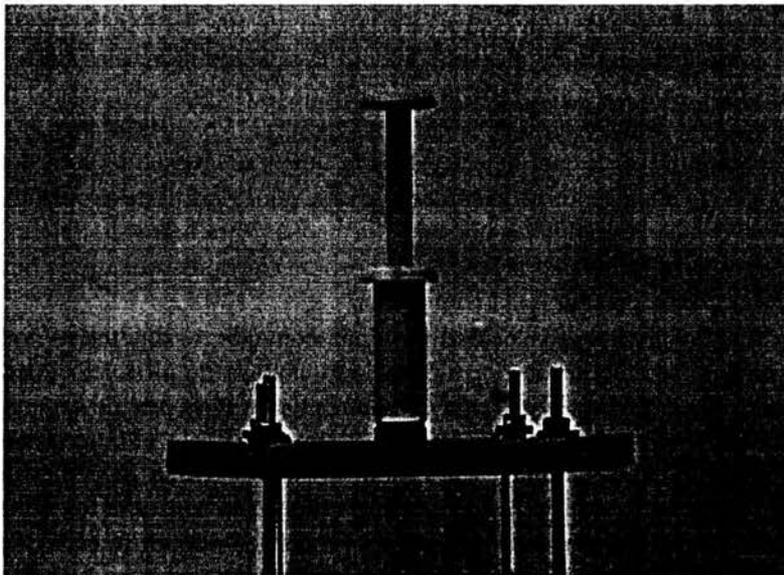


Figura 2.4: Pistón

2.3. Funcionamiento del equipo

El primer experimento se realizó con agua corriente (agua de la llave). En primer lugar tanto el cilindro de acrílico, como las partes que lo integran deben estar lo más limpias posibles, libres de grasa, suciedad, etc. Al tener limpio el contenedor se empezaron a ensamblar las partes internas y externas. Ya teniendo armado el mismo, se vertió agua de la llave hasta llegar al pistón, al cual se le dejó un pequeño espacio de aire e inmediatamente se colocó el émbolo. Teniendo esa burbuja de aire, se insertaba el contenedor en una estructura hecha con perfiles para tener un punto de referencia. Se colocó la cámara de alta velocidad; ésta iba conectada a una computadora la cual obtenía las imágenes por medio de un software (Redlake Imaging MotionScope). También se instaló una lámpara de alta intensidad, pues la buena iluminación es importante. Primero se enfocó y calibró la imagen de la boquilla con la mejor resolución posible. Para poder tener una referencia de escala y poder hacer las conversiones de pixeles a milímetros, se ocupa la imagen de la boquilla, pues se sabe cuanto mide horizontal y verticalmente. El software de la cámara tiene una opción para poder medir el tamaño de pixeles en la imagen deseada, así se obtuvo la conversión de pixeles a mm. La cámara ya enfocada se colocó entre 30 y 35 milímetros más arriba de la boquilla, con el fin de captar a la burbuja en su velocidad terminal. El procedimiento que se usó para capturar a la burbuja fue voltear el contenedor con la compuerta cerrada, en ese momento la burbuja ascendía hasta llegar a la trampa. Ya teniendo atrapada a la burbuja se regresa el contenedor a su lugar inicial y se inserta en su soporte estructural. Por último se procede a abrir la compuerta, la cual dejará salir a la burbuja, en ese instante se toma la foto con un disparador de la cámara de alta velocidad. Este procedimiento se repitió con cada una de las burbujas formadas. Para lograr la disminución de la burbuja se usó el pistón, el cual se oprimía cierta distancia y la burbuja disminuía por la presión en el contenedor.

Las mediciones de la velocidad terminal, como de los diámetros horizontal y vertical se efectuaron por medio de la cámara de alta velocidad. Por otro lado, el análisis de la posición de la burbuja en cada uno de los cuadros, se obtuvieron por medio de un software llamado XCAP, el cual sirve para hacer procesamiento de imágenes. Los datos del programa XCAP, se manipularon por medio de EXCEL obteniendo diámetro equivalente, velocidad promedio horizontal y vertical, factor de forma definido en la ecuación 2.1, así como los números adimensionales Reynolds y Weber.

Por último se tomaron imágenes con el método de medición PIV, con el fin de obtener datos cualitativos de los campos de velocidad.

Los líquidos con que se experimentaron se muestran en el cuadro 2.1.

líquido	ρ [kg/m ³] x10 ³	σ [N/m ²] x10 ⁻³	μ (medida) [Pa s] x10 ⁻³	μ (tabla) [Pa s] x10 ⁻³
agua corriente	0.999	72.96	1.000	1.000
agua-glic. 15 %	1.0345	69.84	1.65	1.535
agua-glic. 50 %	1.1263	64.57	6.17	6.000
agua pura	0.999	72.96	1.000	1.000

Cuadro 2.1: Propiedades físicas de las soluciones utilizadas

2.3.1. Componentes del equipo

Los componentes más importantes en el dispositivo experimental son los siguientes:

Válvula de globo o bola

Las válvulas de bola son diseñadas para sistemas de irrigación, piscinas y spas. Esta llave de paso de alta calidad se cierra dándole un cuarto de vuelta. Está disponible en tamaños de 1/2 a 6 pulgadas, y con conexiones para adherir con algún pegamento ó enroscar. Todas las válvulas de bola termoplásticas son unidades selladas para servicios públicos, y fabricadas en PVC y CPVC . Este tipo de válvulas tienen un vástago Safe-T-Shear y manivela de polipropileno de doble función (cerrado-abierto). Esta válvula esta certificada por National Sanitation Foundation (NSF) para servicio en sistemas de agua potable. La válvula soporta una presión nominal de 150 psi para agua a 73°F, según las normas de fabricación de Spears Manufacturing Company. Figura, 2.5.

También se presentan en el apéndice A, el esquema y el cuadro A.1, que hacen referencia a los componentes de la válvula.

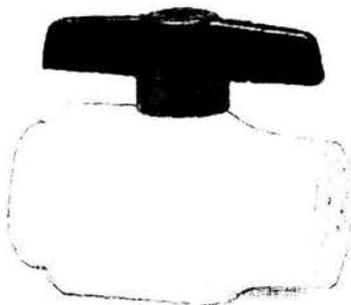


Figura 2.5: Válvula de globo

Boquillas de aluminio y extensión de apertura de la compuerta

Las extensiones (boquillas) que se fabricaron de aluminio, son dos. La primera tiene la función de capturar a la burbuja, en el momento que se voltea el contenedor, facilitando así la permanencia de la burbuja en la válvula. La colocación de la boquilla es por medio de una cuerda de 14 hilos por pulgada. La otra boquilla se encuentra ubicada en la parte superior de la válvula, y esta funge como guía en la salida de la burbuja, también tiene una cuerda de 14 hilos por pulgada. Cabe mencionar que a estas boquillas se les aplicó una capa de pintura epóxica para evitar la oxidación del aluminio. Las fotografías que se muestran a continuación son las boquillas de aluminio que se ocuparon, figura, 2.6

También se maquinó un perno de bronce en el cual se sujetó la válvula. Así mismo, se utilizaba como perilla de apertura y cierre de la misma. Este perno pasaba por un orificio que se le hizo al cilindro, pues la manipulación de la válvula tenía que ser de forma externa para evitar cualquier contacto con el líquido en estudio. Se controlaron las fugas con cinta teflon. A continuación se muestra una fotografía de todo el sistema ensamblado, la válvula con sus boquillas y su perno con la perilla, figura, 2.7.

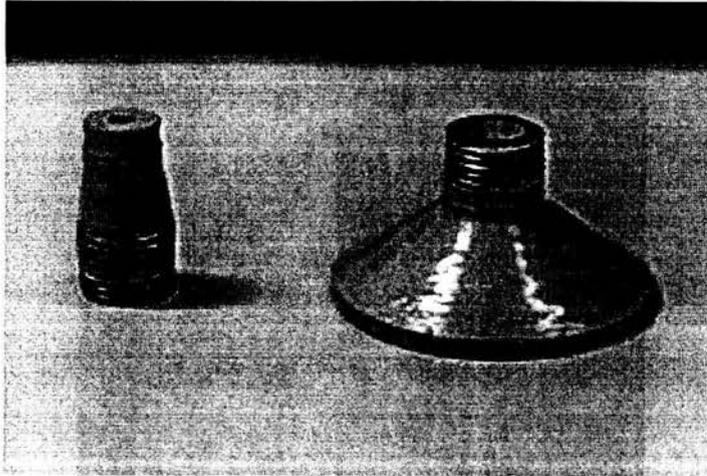


Figura 2.6: Boquillas de aluminio

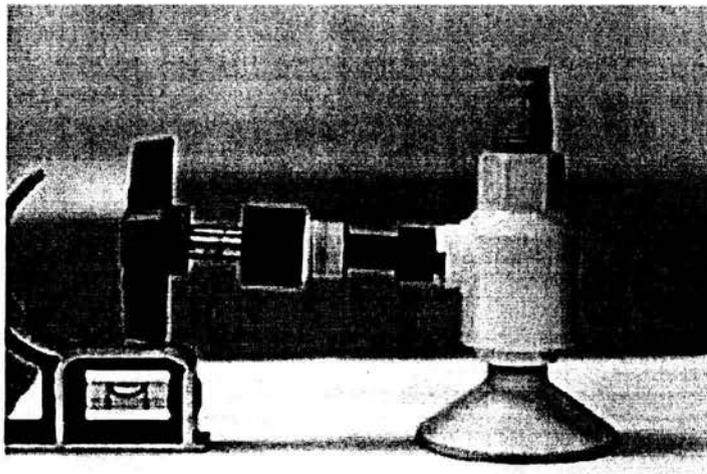


Figura 2.7: Sistema de válvula, con boquillas y perno

Pistón y émbolo

El pistón y el émbolo, se fabricaron de Nylamid (Nylon), pues es un material fácil de maquinar y resistente a grandes presiones. El pistón y el émbolo jugaron un papel importante, ya que con estos se presurizaba el contenedor para disminuir el tamaño de la burbuja. La figura 2.8, muestra

al pistón y al émbolo en conjunto.

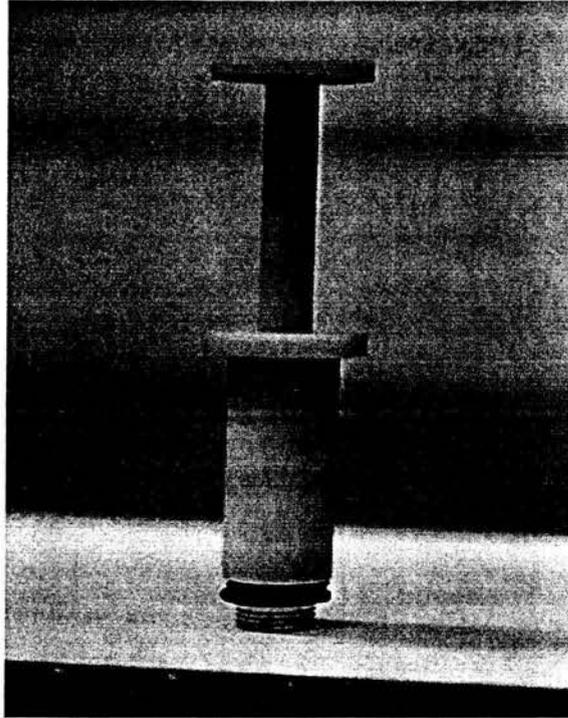


Figura 2.8: Sistema de émbolo, pistón

2.4. Técnicas de medición

2.4.1. Velocidad de la burbuja

El método que se utilizó para la medición de velocidades terminales, así como para tamaño y forma fue el análisis digital de imágenes (ADI) de video de alta velocidad. Las cámaras de alta velocidad, hoy en día tienen una alta tecnología, pueden tomar hasta 10000 cuadros por segundo. La cámara utilizada tiene las siguientes características: las velocidades de grabación son desde 50 hasta 8000 cuadros por segundo, tiene un lente a través del cual se enfoca, la resolución de la imagen depende de la velocidad de grabación, esta puede variar de 480 x 420 pixeles para la grabación más baja, hasta 60 x 68 pixeles para una grabación de 8000 cuadros por segundo. Esta cámara cuenta con una tarjeta tipo PCI, la cual controla sus funciones por medio de la computadora, se opera por un software llamado Redlake Imaging MotionScope, el cual nos sirve como elemento de comunicación con la cámara para la adquisición de las imágenes. Con este programa podemos definir las velocidades tanto de grabación como del obturador de la cámara. El equipo cuenta con un disparador externo. En el experimento, la grabación que se utilizó fue de 250 cuadros por segundo, para una secuencia de imágenes jpeg. Teniendo las imágenes, estas son procesadas por un software llamado XCAP, más adelante se comentará sobre el procesamiento digital de imágenes.

2.4.2. Forma y tamaño de la burbuja

El diámetro equivalente o tamaño de la burbuja, se obtuvo directamente de la imagen obtenida por la cámara de alta velocidad. Se selecciona un cuadro en el cual la burbuja se encuentre sin ningún ángulo de inclinación, figura 2.9, colocando el cursor en el extremo de los diámetros, tanto horizontal como vertical. La medida del diámetro equivalente se obtuvo usando la ecuación 1.17.



Figura 2.9: Diámetro equivalente

El factor de forma se define como:

$$\chi = \frac{d_a}{d_b} \quad (2.1)$$

donde d_a es el diámetro horizontal, y d_b el diámetro vertical. Este parámetro muestra que tan esférica es la burbuja. Estos datos se procesaron en Excel. En las hojas de cálculo se insertaron las mediciones que se tomaron a los diferentes tamaños de la burbuja, (d_a y d_b), graficando así, factor de forma vs. diámetro equivalente, como lo muestra la figura 2.10.

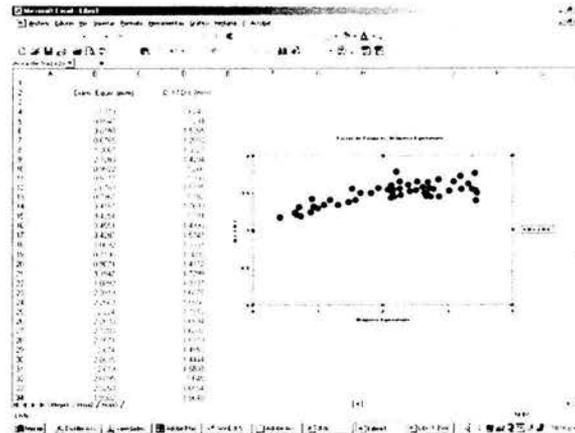


Figura 2.10: Factor de forma en función del Diámetro equivalente

2.4.3. Procesamiento digital de imágenes

El procesamiento de las imágenes que se obtuvieron en la cámara de alta velocidad, fueron hechas con un software llamado XCAP. Los pasos a seguir son los siguientes, primero se tiene que entrar a la pantalla principal mostrada en la figura 2.11.



Figura 2.11: Pantalla principal XCAP

Teniendo esta pantalla se escoge la imagen de la boquilla previamente tomada, a la cual le llamamos calibración, figura 2.12. Esta boquilla nos sirve para poder hacer las conversiones de pixeles a milímetros, pues la parte horizontal de la boquilla mide 16 mm, y la muesca vertical 5 mm.

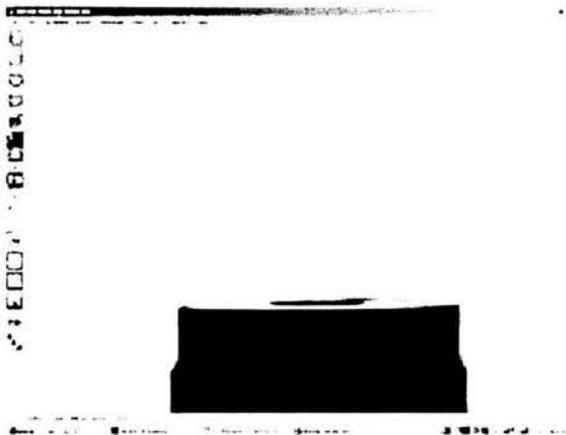


Figura 2.12: Calibración de la boquilla

Se escoge la primera burbuja y se carga la serie de imágenes. Las imágenes podrán ser vistas en una secuencia completa, figura 2.13.

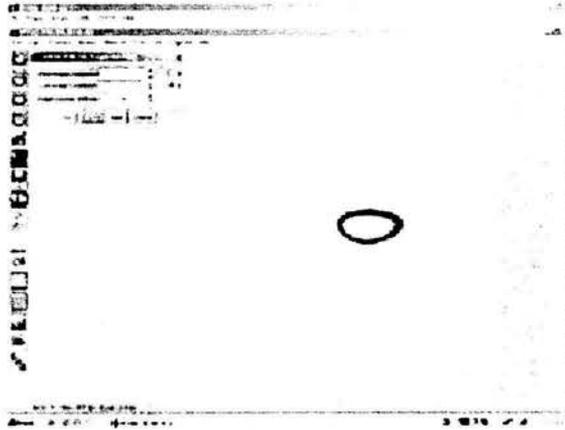


Figura 2.13: Secuencia de la imagen

Esta burbuja tendrá que analizarse con una función del programa llamado Blob Analysis, esta función realiza un contraste en la burbuja, por eso era muy importante tener una buena iluminación; para poder contrastar el fondo con el perfil de la burbuja. Teniendo la burbuja contrastada debemos de tomarle medidas, tanto al diámetro horizontal como al vertical, e insertarlas en una ventana llamada Analysis, para que el programa tenga un rango de búsqueda en su proceso de análisis.

Este software nos da la posibilidad de realizar rutinas de análisis, ya que tiene la ventaja de programación para combinar las distintas variaciones de sus funciones. Esto permitió escribir dos programas llamados *Inicia y Posición*. El código fuente de estos programas se mostraran en el Apéndice A. En el programa *Inicia* se desplegará una ventana llamada Black Board, en la cual se anotaran las condiciones iniciales de la burbuja (posiciones). Estas condiciones iniciales serán mostradas a través de la ventana de Analysis: Set AOI. Figura 2.14.

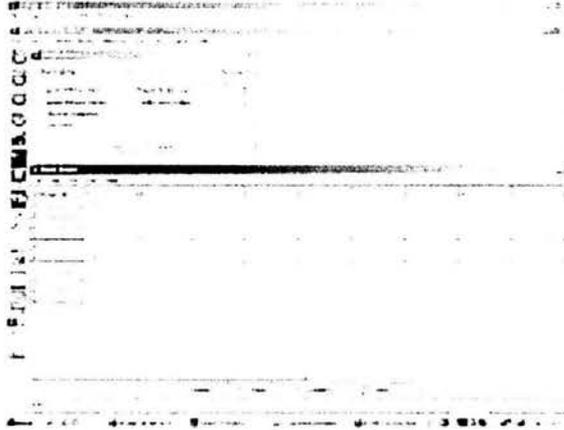


Figura 2.14: Posiciones iniciales de la burbuja

Por otro lado, el programa Posición realizará un análisis de la secuencia de cuadros de la burbuja en las distintas posiciones, tanto en el eje X como en el eje Y, estos datos serán de gran utilidad ya que tendremos la posición y tenemos el tiempo de grabación, por lo tanto podemos obtener la velocidad de la burbuja.

Los análisis posteriores se realizan con Excel. En ese programa se generó una plantilla en la cual se insertaban los datos obtenidos por el software XCAP. Así mismo, en la plantilla se realizaban las conversiones de pixeles a mm. Estos datos permitieron obtener las gráficas del Diámetro Equivalente en función de la Velocidad Terminal, Diámetro Equivalente como función de Reynolds, Diámetro Equivalente como función de Weber y por último Diámetro Equivalente como función del Factor de Forma.

2.4.4. Método Particle Image Velocimetry (PIV)

El PIV puede considerarse como una de las más importantes herramientas de diagnóstico de flujo en la historia moderna de mecánica de fluidos.

En general, la visualización del flujo en movimiento puede obtenerse por tiempo de secuencia de imágenes. Se registra una imagen de video digital, se selecciona un campo de flujo y este se divide en un submuestreo con áreas conocidas, cada área se compara con el tiempo t_1 y en la siguiente imagen de video la misma área corresponde a un tiempo t_2 . Para determinar la trayectoria tomada por las partículas en el tiempo t_1 a t_2 , se ocupa un método estadístico de correlación cruzada. La correlación cruzada nos genera vectores de velocidad, que describen la dirección y la velocidad media de las

partículas. Este proceso se repite para cada imagen o área tomada. Así el resultado de un análisis del PIV es un campo de velocidades. La técnica graba instantáneamente dos dimensiones del vector de campo de velocidades, desde múltiples imágenes fotográficas de campos de partículas ubicadas dentro del flujo, que es iluminado por una fuente de luz. La figura 2.15 muestra un esquema de la configuración óptica del sistema PIV.

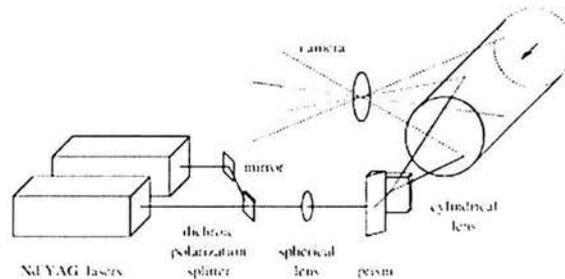


Figura 2.15: Esquema de la configuración óptica, del método de visualización por Particle Image Velocimetry (PIV)

2.5. Mezclado de las soluciones

En el caso de agua corriente, esta se tomó directamente de la llave y se vertió en una cubeta, la cual se introdujo en un contenedor que estaba conectado a una bomba de vacío marca DIVAC 2.2L, esto con el fin de deaerear el agua. El proceso duraba cerca de 20 minutos. Las especificaciones técnicas de la bomba se muestran en el apéndice A, figura A.2. Para las soluciones de agua con glicerina al 15 y 50 % en peso, primero se realizó la mezcla de los porcentajes correspondientes, enseguida se mezcló la solución con un motor de corriente directa, el cual tiene un vástago con aspas para obtener una mezcla homogénea. Ya teniendo la solución, ésta se deaereó por aproximadamente 30 minutos.

El agua ultra-pura se obtuvo de un equipo de dos etapas. La primera etapa se realizaba en el aparato Ultrapure reverse osmosis system, en seguida el agua pasaba a la segunda etapa por el aparato llamado Barnstead Nanopure ultrapure water system, modelo: D4741, que consta de un filtro con 4 módulos. Esta agua tiene una resistencia específica de $18 \text{ M}\Omega\cdot\text{cm}$.

Capítulo 3

Resultados

Se estudio el movimiento de una burbuja en agua y en soluciones agua-glicerina al 15 %, y 50 % en peso. Se obtuvieron mediciones de la velocidad terminal de la burbuja, forma y tamaño. Se calcularon los números adimensionales de Weber y Reynolds.

3.1. Líquidos de diferentes viscosidades

3.1.1. Agua corriente

En el caso de agua corriente, se realizaron experimentos para diferentes tamaños de una burbuja. La figura 3.2, muestra la velocidad terminal de la burbuja como función del diámetro equivalente. También se comparan los resultados con una predicción teórica:

$$V_{teo} = \frac{gd^2\rho}{36\mu} \quad (3.1)$$

donde ρ y μ , son la densidad y la viscosidad del fluido, respectivamente. Esta velocidad se calcula del balance entre fuerza de arrastre y fuerza de flotación en una burbuja esférica moviéndose en un fluido ideal. Batchelor [2].

Las gráficas se mostrarán de la siguiente manera: la primera gráfica muestra las trayectorias de las burbujas. La segunda gráfica muestra la velocidad terminal en función del diámetro equivalente. Después se presenta la gráfica del factor de forma como función del diámetro equivalente. Por último las gráficas de Reynolds como función de Weber.

En la gráfica 3.1 se muestra la trayectoria que presentaban burbujas de diferente tamaño. Con esta comparación se visualizó que el ascenso de

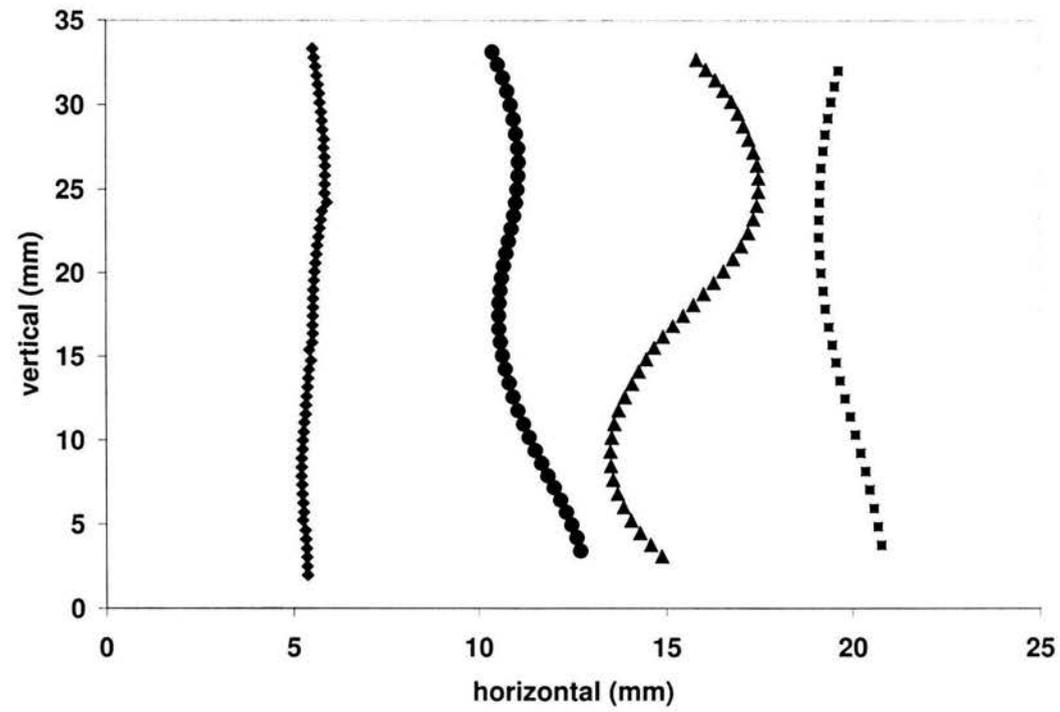


Figura 3.1: Trayectoria de una burbuja de aire en agua corriente, con diferente tamaño: \blacklozenge 0.959 mm , \bullet 2.079 mm, \blacktriangle 3.087 mm, \blacksquare 4.135 mm

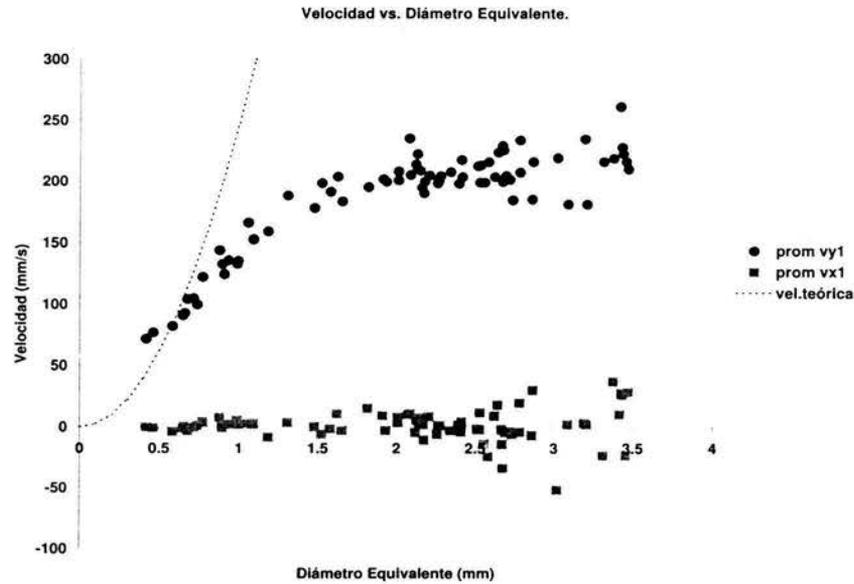


Figura 3.2: Velocidad terminal de una burbuja de aire en agua corriente

una burbuja de tamaño menor a 2.0 mm, presentó una trayectoria cuasilineal. Para tamaños mayores a los 2.0 mm se identificaron oscilaciones en la trayectoria.

En la gráfica 3.2 se muestran velocidades terminales entre 75 a 200 (mm/s) para burbujas con diámetros equivalentes entre 0.4 y 1.6 mm. Para el rango de burbujas de 1.6 a 2.5 mm, se presenta una etapa de transición en la trayectoria de ascenso; sus velocidades fueron de 220 (mm/s). Una observación importante es que la velocidad terminal experimental se asemeja con la velocidad teórica, para burbujas pequeñas entre 0.4 y 0.7 mm de diámetro equivalente. No hay que olvidar que la velocidad teórica es para formas completamente esféricas, sin deformación y en un fluido ideal. Para burbujas mayores a los 2.5 mm, se observó la oscilación en la trayectoria de ascenso con mayor amplitud.

La gráfica 3.3 del factor de forma muestra, que las burbujas pequeñas (menores a 1 mm de diámetro) tienen una forma casi esférica. A medida que van creciendo sus formas son elipsoidales. Estas formas se muestran en la figura 3.20.

Por último se muestra la gráfica 3.4. En esta gráfica se observa el número de Reynolds y de Weber, cuando la burbuja empieza a oscilar. Estos valo-

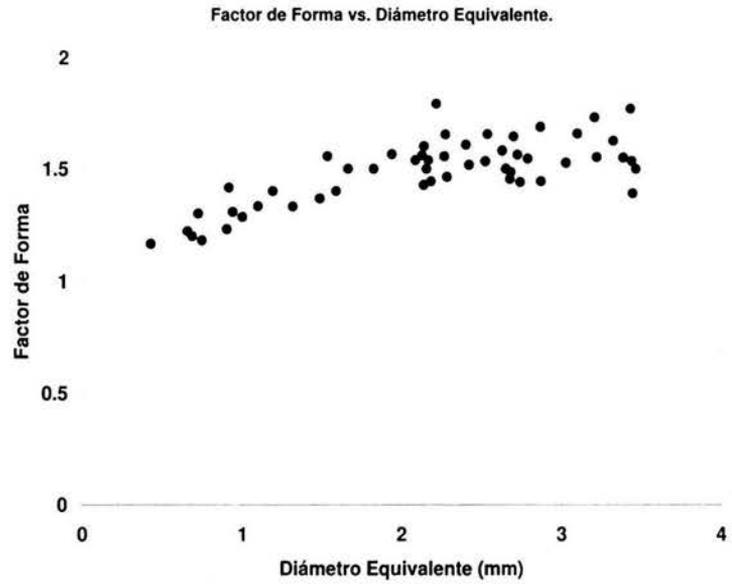


Figura 3.3: Factor de forma como función del diámetro equivalente

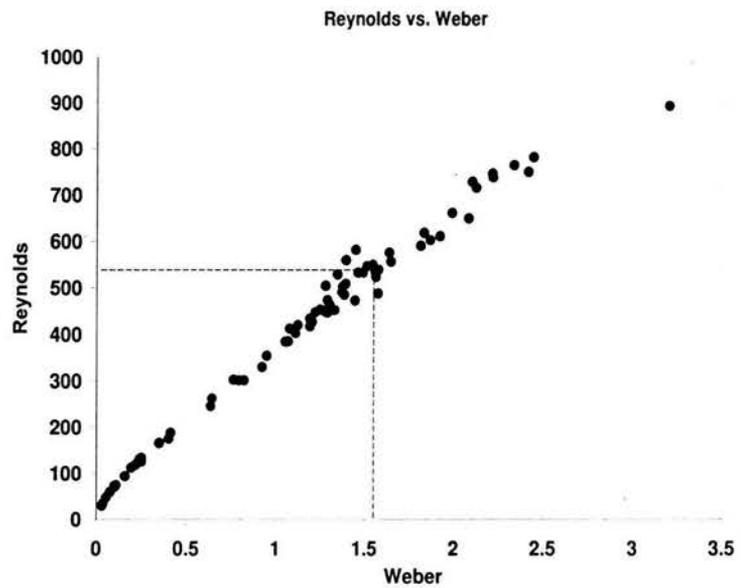


Figura 3.4: Reynolds como función de Weber

res se muestran con la línea discontinua y son los siguientes $Re=534.23$ y $We=1.55$. El tamaño de la burbuja en donde empezó una trayectoria oscilante bien definida fue de 2.51 mm de diámetro equivalente. Los números de Reynolds que se obtuvieron en el agua corriente fueron para un régimen laminar, pues estuvieron en un rango menor a 1000. Para una burbuja de 1 mm de diámetro se obtuvo un $Re \approx 150$ y para la burbuja más grande de 3.5 mm un $Re \approx 800$.

3.1.2. Agua pura

La gráfica 3.5 muestra una trayectoria de ascenso cuasilineal en tamaños de burbujas menores a 2.5 mm y la forma que estas adquieren son bastante esféricas. Por otro lado se observó que las burbujas mayores a los 2.5 mm empiezan a desarrollar oscilación en su trayectoria de ascenso y presentan formas elípticas.

La gráfica 3.6 muestra a la velocidad como función del diámetro equivalente. La gráfica es muy similar a la que se obtuvo con el agua corriente. Una de las respuestas que deben considerarse a esta similitud, es haber tenido contaminación en el contenedor. A pesar del gran cuidado que se tuvo, no hay que olvidar que el agua es muy susceptible a contaminarse. Por otro lado tenemos el tamaño del diámetro interno de la boquilla. El diámetro interno que se ocupó fue $d_i=0.5$ cm. Haciendo referencia a los experimentos que realizaron Wu y Gharib, podemos observar que el tamaño del diámetro interno del capilar o de la boquilla por la cual se va a desprender la burbuja es algo muy importante. Si se tiene un capilar con diámetro pequeño, por ejemplo $d_i=0.0267$ cm, como el que ocuparon estos investigadores, esta burbuja tendrá una deformación importante en el momento en que se desprende del capilar. Esta deformación genera oscilaciones que provocan un impulso a la burbuja. En nuestro experimento se usó una boquilla con un diámetro interno mucho más grande, lo cual permitió que la burbuja desarrollara su tamaño y que se desprendiera sin mucha deformación. Esto evitó que existieran fuerzas de impulso, y se observó una disminución en la velocidad terminal de la burbuja.

La gráfica 3.7 muestra datos del factor de forma en función del diámetro equivalente. La forma que presentaron las burbujas pequeñas son bastantes esféricas. Al ir aumentando de tamaño la burbuja, esta presentó formas más elipsoidales. Estas formas más elipsoidales estimulan la trayectoria de ascenso oscilatorio.

En la gráfica 3.8 se muestra con la línea discontinua, los valores de Reynolds y Weber, a los cuales empieza la trayectoria de ascenso con oscilación. Los valores numéricos son los siguientes $Re=589.23$ y $We=1.84$ con una burbuja de ≈ 2.58 mm de diámetro equivalente. En este tamaño de burbuja se observó con mayor claridad la oscilación en la trayectoria de ascenso.

Como puede verse el número de Reynolds que presentó la burbuja en agua corriente, es menor al que presenta la burbuja en agua ultra-pura en la trayectoria de ascenso oscilatoria. El aumento en el número de Reynolds en agua ultra-pura, indica que existen menores fuerzas viscosas que en el agua corriente. En cuanto al número de Weber, este presentó un aumento con

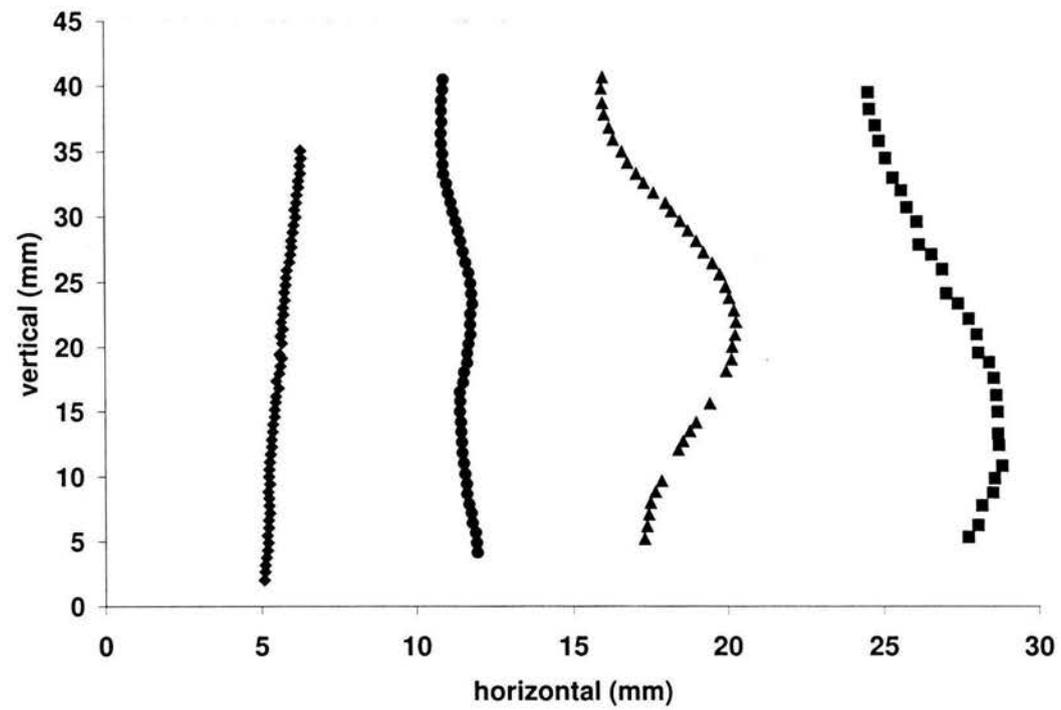


Figura 3.5: Trayectoria de una burbuja de aire, en agua ultra-pura, con diferente tamaño: ◆ 1.049mm, ● 1.852mm, ▲ 3.185mm, ■ 4.000mm

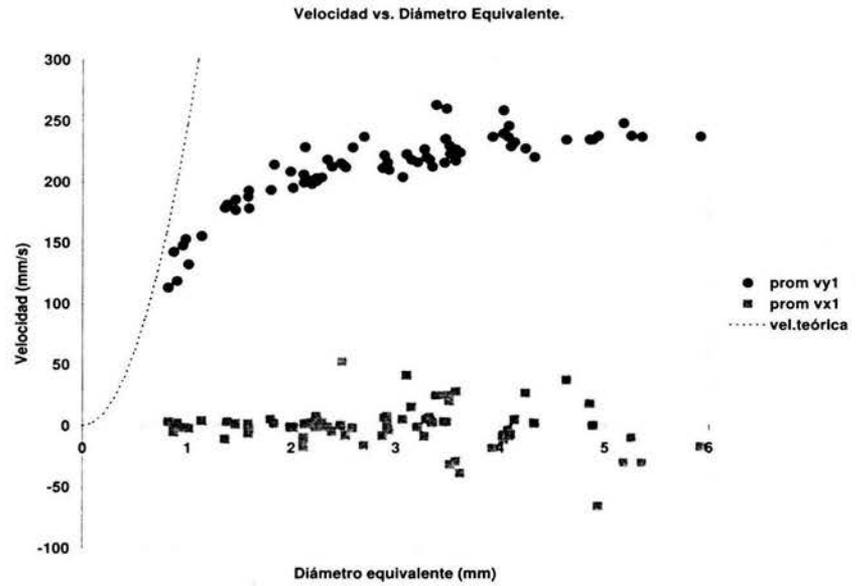


Figura 3.6: Velocidad terminal de una burbuja en agua ultra-pura

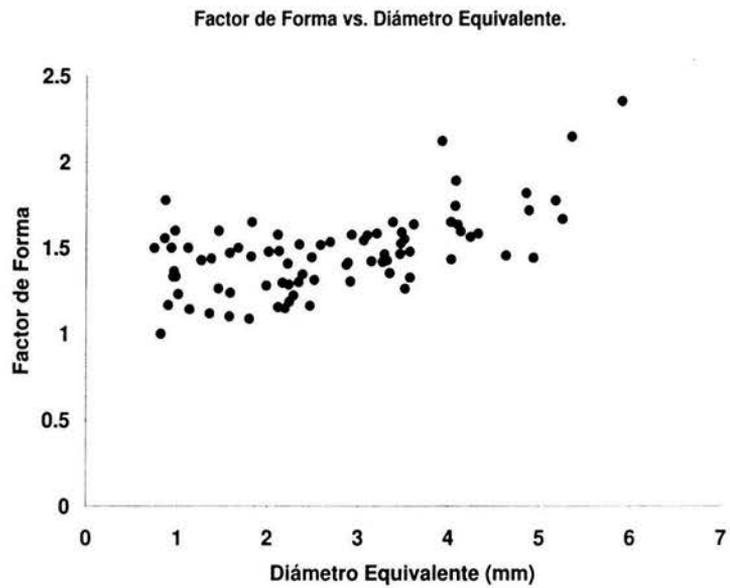


Figura 3.7: Factor de forma como función del diámetro equivalente

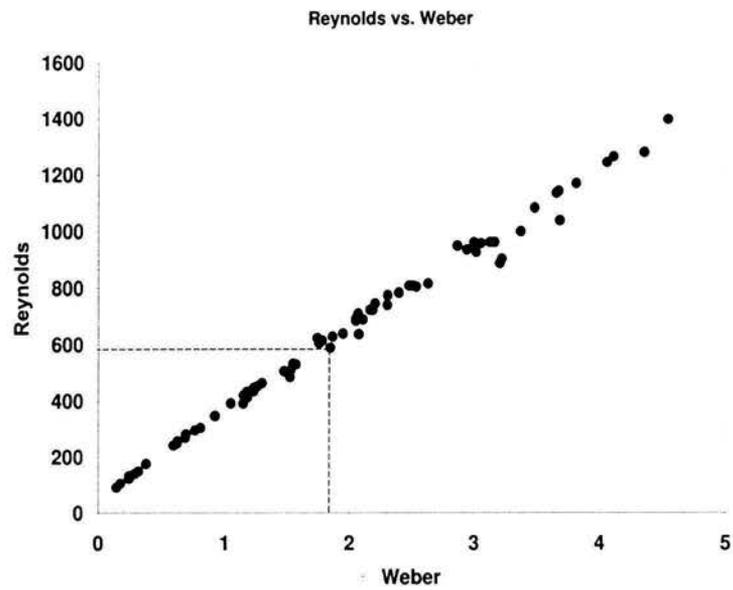


Figura 3.8: Reynolds como función de Weber

respecto al agua corriente. Este aumento significa que existe menor fuerza de tensión superficial que en el agua corriente.

3.1.3. Agua con glicerina al 15 %

La figura 3.9 muestra una gráfica, de la trayectoria de una burbuja, en agua con glicerina al 15 % con diferente tamaño. Para burbujas de tamaño menor a 2.6 mm de diámetro equivalente existe una trayectoria de ascenso cuasilineal. Para burbujas mayores al tamaño antes mencionado, se observó oscilación en la trayectoria de ascenso.

La figura 3.10 muestra la mezcla agua-glicerina al 15 %. La velocidad terminal en función del diámetro equivalente. Se pudo observar que la velocidad terminal de la burbuja no tiene mucha diferencia con la velocidad que esta obtiene en agua corriente, sin embargo, se encontró un retardo en la aparición de la oscilación. La oscilación se hizo presente en forma ondulatoria para burbujas mayores a 2.6 mm.

En lo que se refiere a la gráfica 3.11, el factor de forma como función del diámetro equivalente, se observó cierta similitud con los datos obtenidos para agua corriente. Sin embargo se visualizó mayor esfericidad en las burbujas pequeñas con esta solución. Esta comparación fue con las burbujas de agua corriente y agua ultra-pura, aproximadamente de 1 mm de diámetro.

Por último se obtuvo la gráfica de Reynolds como función de Weber, 3.12. En esta gráfica se marco con una línea discontinua los valores de los dos números dimensionales. Estos valores se calcularon, para el comienzo en que la burbuja asciende con trayectoria oscilante. Los valores de estos números son $Re=391.65$ y $We=2.17$. La burbuja con la cual se obtuvieron estos números tenía un tamaño de 2.66 mm de diámetro.

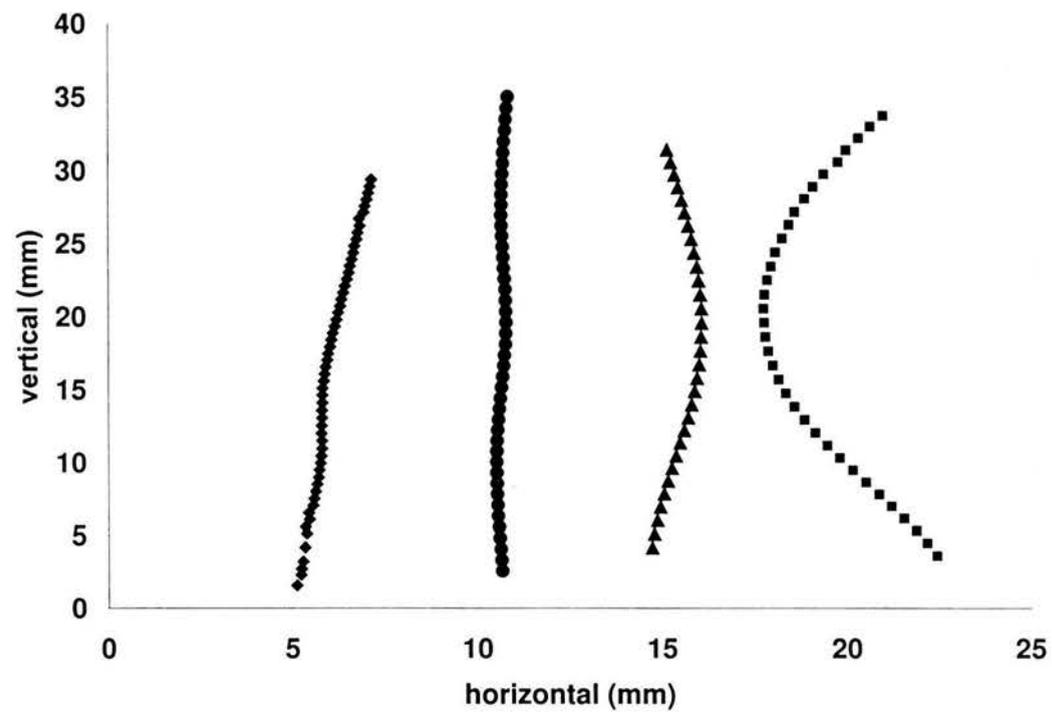


Figura 3.9: Trayectoria de una burbuja de aire, en agua con al 15%, con diferente tamaño: ◆ 1.000mm, ● 2.000mm, ▲ 3.059mm, ■ 4.047mm

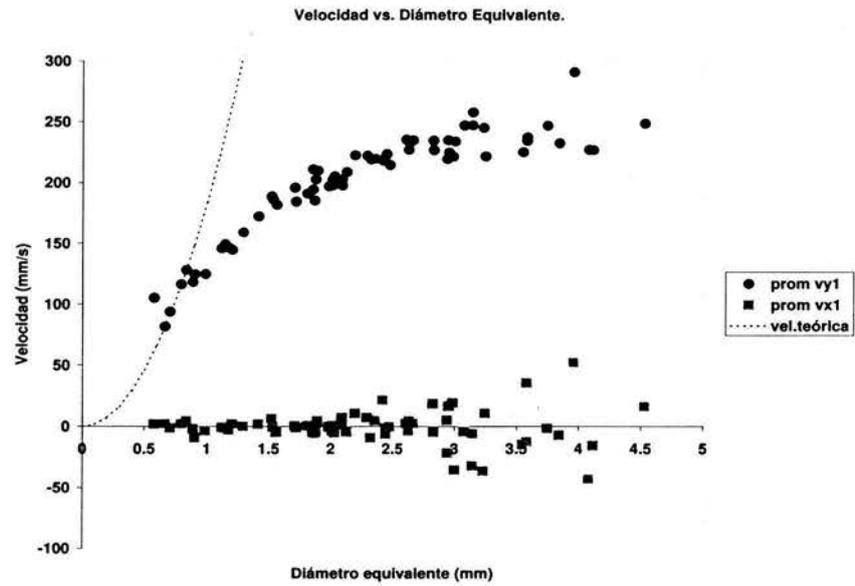


Figura 3.10: Velocidad terminal de una burbuja en agua con glicerina al 15 %

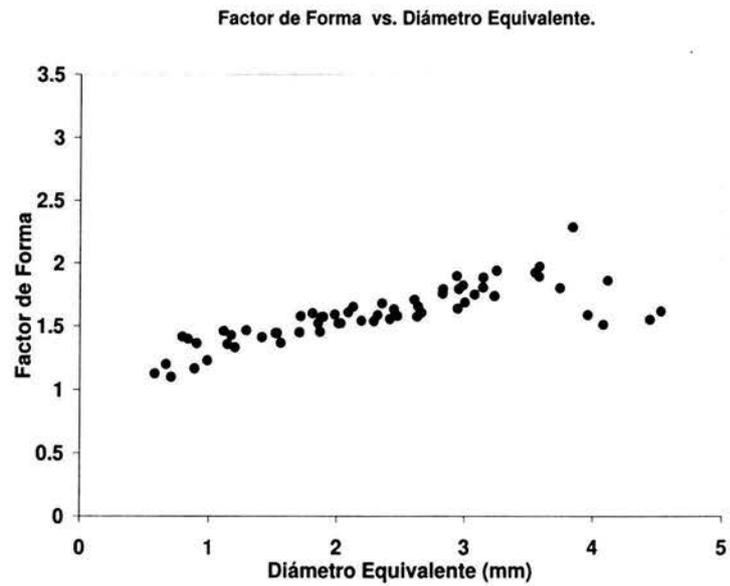


Figura 3.11: Factor de forma como función del diámetro equivalente

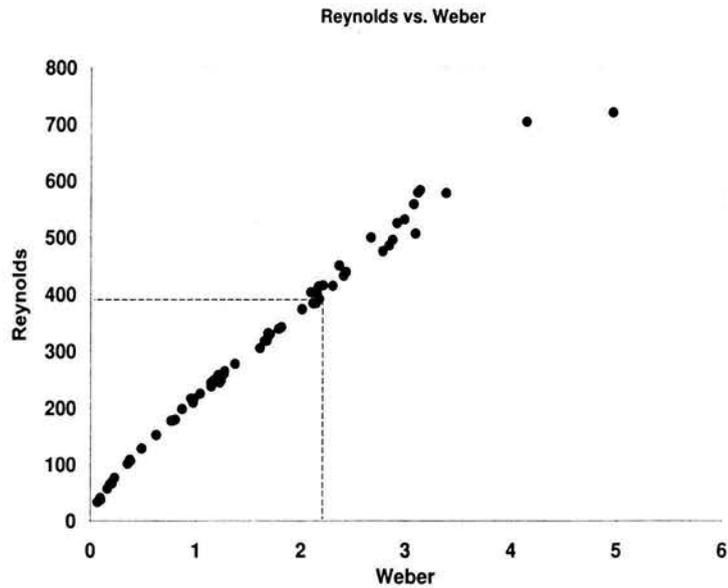


Figura 3.12: Reynolds como función de Weber

Se observó que los valores de Reynolds en el comienzo de la trayectoria oscilante fue menor que los dos líquidos anteriores. Esta disminución del Reynolds es debido a la viscosidad de la solución. En cuanto al número de Weber, este fue mayor que los anteriores. El aumento de este número adimensional indica menor tensión superficial comparado con los otros dos líquidos.

3.1.4. Agua con glicerina al 50 %

La figura 3.13 muestra la trayectoria que generaba la burbuja en sus distintos tamaños. A comparación de los líquidos antes mencionados, las oscilaciones no se hicieron presentes hasta que el tamaño fuera suficientemente grande para provocar esta oscilación. El tamaño de la burbuja con ascenso oscilatorio se visualizó alrededor de los 3 mm en adelante.

La gráfica 3.14 muestra a la velocidad terminal como función del diámetro equivalente. En esta solución es importante señalar que tiene un aumento la viscosidad. Este aumento permitió observar con claridad la disminución de la velocidad terminal de la burbuja. El retardo que tuvo la burbuja en el ascenso oscilatorio fue mucho mayor comparándolo con el agua corriente y el agua ultra-pura. El tamaño aproximado de la burbuja en la trayectoria de ascenso oscilatorio es de 3 mm de diámetro.

En la gráfica del factor de forma 3.15 se observó que para burbujas menores a 1 mm se conservó la forma esférica. Sin embargo para las burbujas mayores la forma esférica se pierde y empieza a deformarse en forma elíptica.

La figura 3.16 muestra los valores de los números adimensionales Reynolds y Weber, para los cuales empieza la trayectoria de ascenso oscilante. Estos valores se marcan con la línea discontinua y son los siguientes: $Re=124.26$ y $We=2.74$. El tamaño de la burbuja con los cuales se obtuvieron los números adimensionales fue de 2.94 mm. El número adimensional de Reynolds es mucho menor a los anteriores, ya que existe mayor viscosidad en la solución. Comparando el número de Weber, en la trayectoria de ascenso oscilatorio, es mayor a los otros tres líquidos.

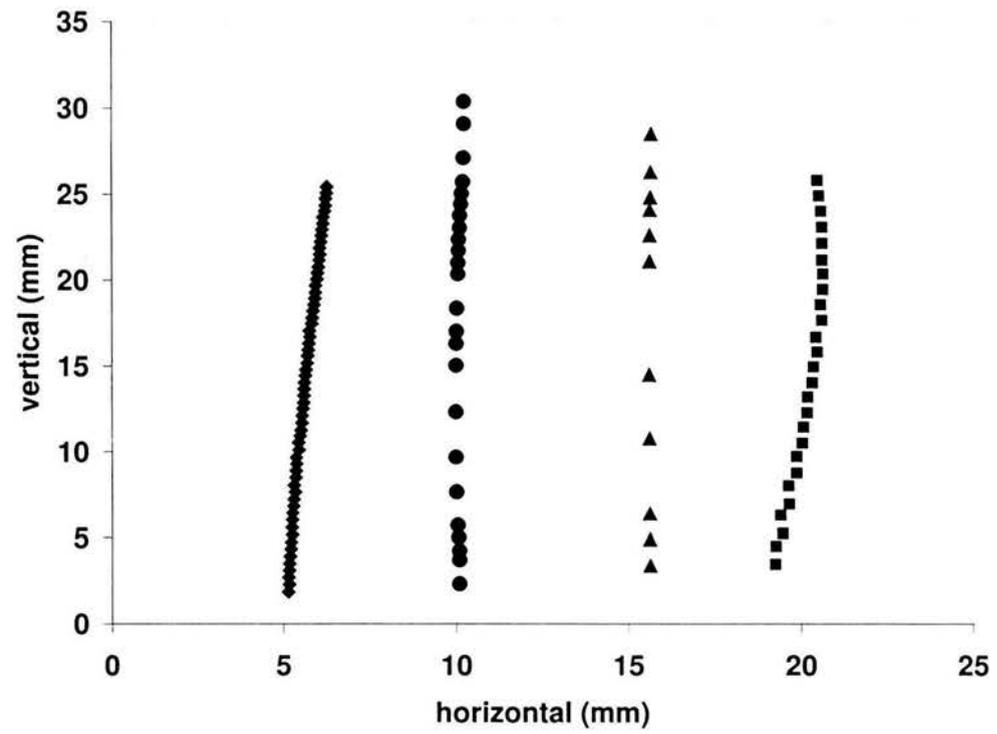


Figura 3.13: Trayectoria de una burbuja de aire, en agua con al 50 %, con diferente tamaño: \blacklozenge 1.117mm, \bullet 2.094mm, \blacktriangle 3.149mm, \blacksquare 4.023mm

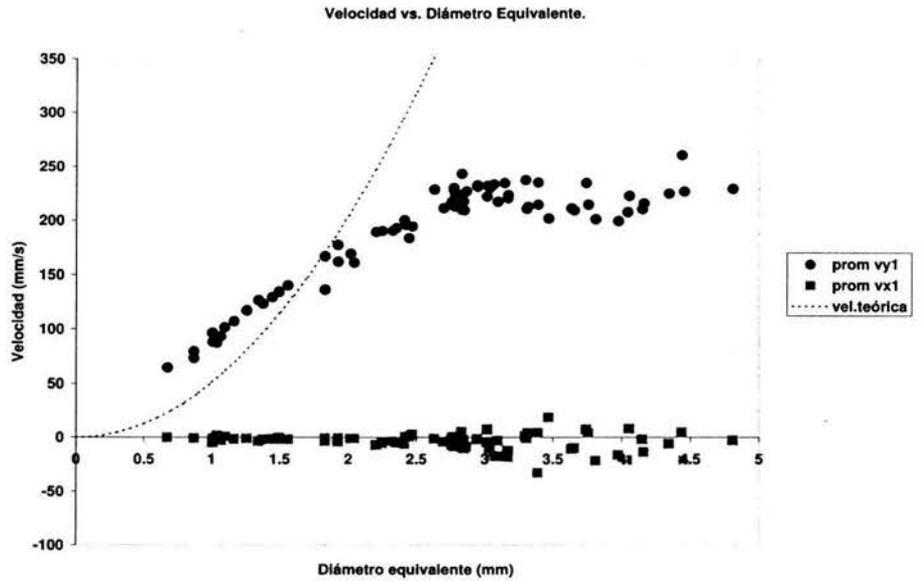


Figura 3.14: Velocidad terminal de una burbuja en agua con glicerina al 50 %

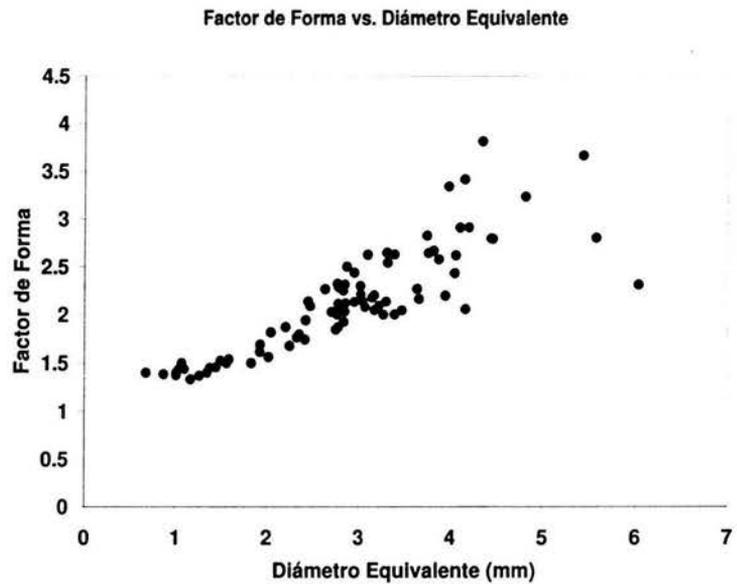


Figura 3.15: Factor de forma como función del diámetro equivalente

3.2. COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA DIFERENTES LÍQUIDOS⁴⁷

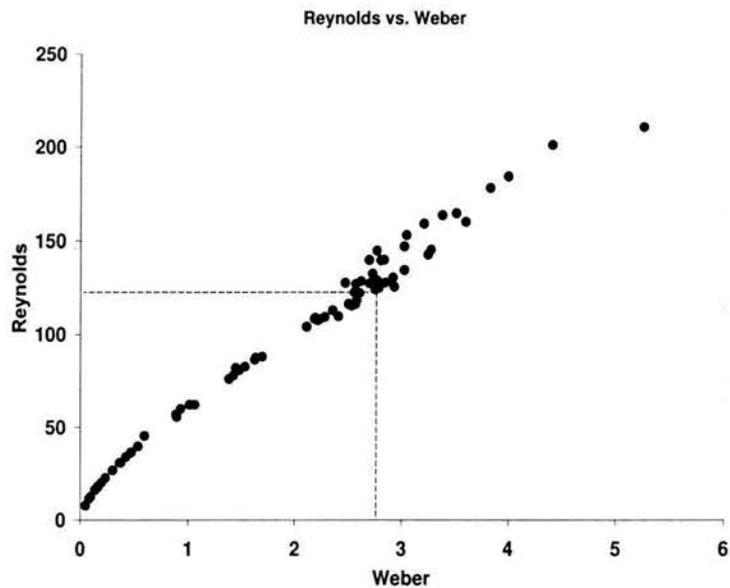


Figura 3.16: Reynolds como función de Weber

3.2. Comparación de resultados para diferentes líquidos

3.2.1. Velocidad terminal

La gráfica 3.17, muestra las velocidades terminales de los líquidos que se utilizaron para este experimento, con el fin de hacer una comparación entre los mismos.

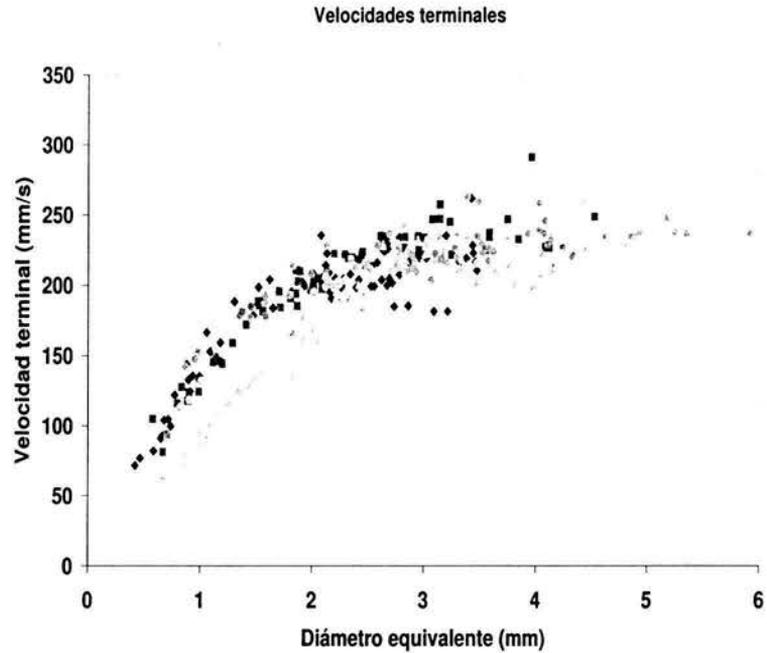


Figura 3.17: Velocidades terminales de los distintos líquidos: \blacklozenge agua corriente, \bullet agua ultra-pura, \blacksquare agua con glicerina 15 %, \blacktriangle agua con glicerina 50 %

La velocidad terminal en el agua corriente como en el agua ultra pura, presentaron una gran semejanza. Como antes se mencionó esta semejanza puede provenir de la contaminación del agua ultra-pura, ya que es muy difícil tener un medio completamente limpio. Sin embargo no podemos descartar que influya el tamaño del capilar por el cual se desprende la burbuja. Se observó también una ligera disminución en la velocidad terminal de la solución agua con glicerina al 15 %. Donde se visualizó perfectamente la disminución de la velocidad terminal, fue en el agua con glicerina al 50 % debido al aumento significativo de la viscosidad.

También se muestran los resultados de otras investigaciones. Es claro que los resultados obtenidos en esta tesis son consistentes con los anteriores, en una región con mayor aproximación al agua contaminada, que al agua ultra-pura. La velocidad terminal experimental para burbujas de aire en agua se presentan en la figura 3.18. Las dos curvas que se muestran en la figura, se basan en experimentos para agua ultra-pura y agua contaminada. Las curvas convergen para burbujas pequeñas (cuasiesféricas). Para burbujas mayores se hace presente la forma elipsoidal. Las superficies activas contaminadas

afectan la velocidad de ascenso disminuyéndola. Clift [4].

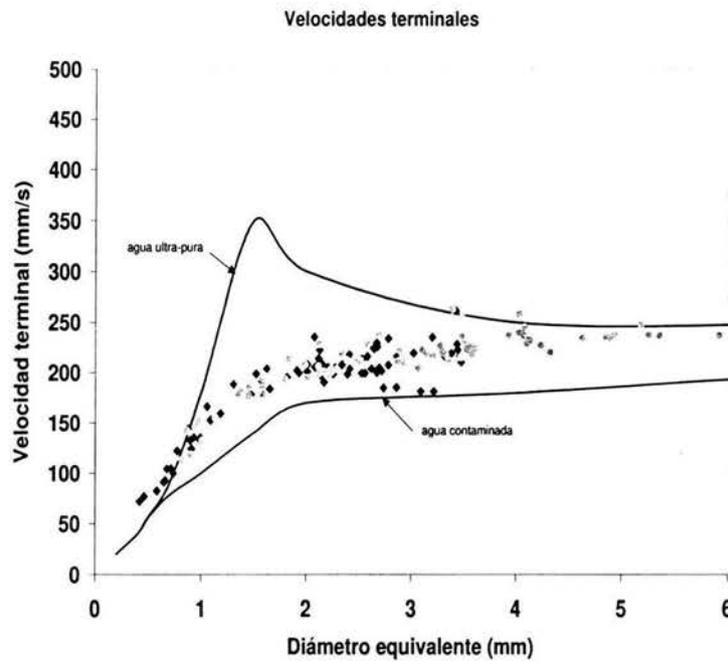


Figura 3.18: Diagrama comparativo del agua ultra-pura y agua corriente: \blacklozenge agua corriente, \bullet agua ultra-pura

3.3. Factor de forma

La figura 3.19, muestra la gráfica factor de forma como función del diámetro equivalente en los diferentes líquidos. Para burbujas pequeñas ≈ 1 mm de diámetro se observó en los cuatro líquidos una forma cuasiesférica. Al ir creciendo estas burbujas, estas se iban deformando tomando formas elípticas. Las burbujas que se formaban en agua con glicerina al 50 %, conservaron formas casi esféricas, en mayores tamaños.

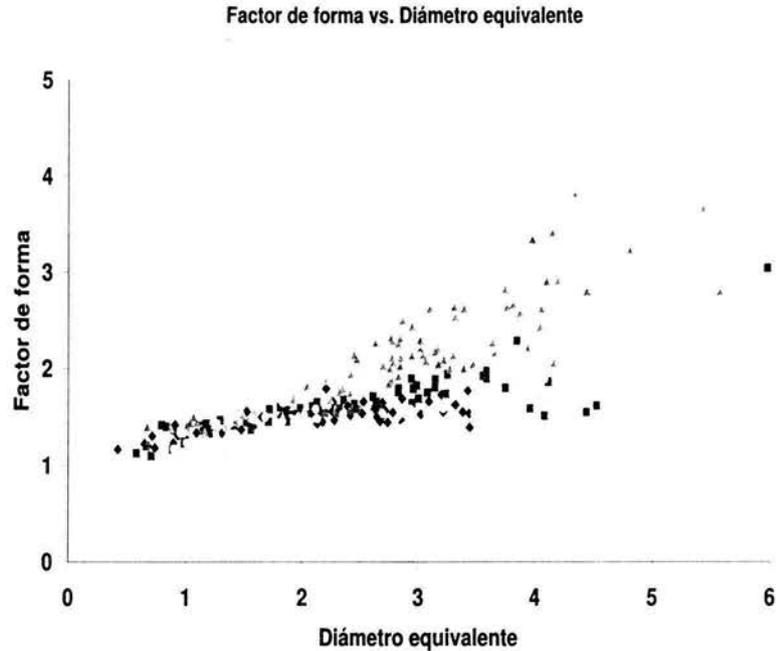


Figura 3.19: Factor de forma como función del diámetro equivalente: \blacklozenge agua corriente, \bullet agua ultra-pura, \blacksquare agua con glicerina 15 %, \blacktriangle agua con glicerina 50 %

3.3.1. Fotografías

Las burbujas en este experimento presentaron una serie de formas, las cuales tienen una relación directa en cuanto a su tamaño, por ejemplo, se observó que las burbujas de 0.5 a 1 mm de diámetro equivalente, conservaban una forma cuasiesférica muy distinta a las burbujas de mayor tamaño. Parecería lógico que las burbujas con mayor viscosidad, y de tamaño grande, conservaran su forma esférica, pero esto no fue así, pues la resistencia que ejerce la fuerza de arrastre en la burbuja es bastante, y la superficie es susceptible a la deformación, la cual se hace presente achatando la burbuja y adquiriendo una forma elipsoidal.

Puede verse que las burbujas con agua pura (menor viscosidad), conservan más esfericidad que las burbujas con mayor viscosidad. Es importante tener en cuenta el desprendimiento que se genera entre la burbuja y la boquilla, pues la deformación que se puede crear en este, modifica tanto la forma como la velocidad terminal de la burbuja, esto se ve claro en los experimentos

hechos por Wu y Gharib [16]

En esta subsección se mostrará un rango de burbujas de aire, a modo de comparación de los distintos líquidos utilizados, los fluidos y las burbujas se muestran en el cuadro 3.1 con las siguientes medidas:

La figura 3.20, muestra las fotografías de las burbujas antes mencionadas.

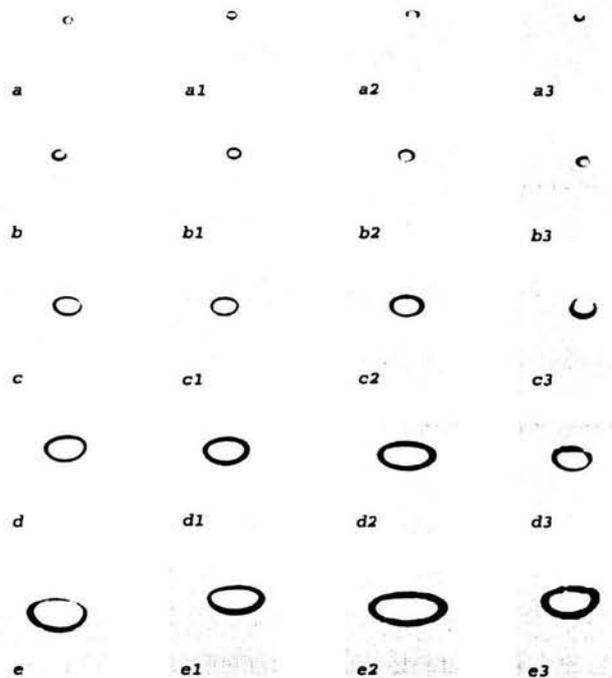


Figura 3.20: Diferentes medidas de burbujas de aire, a) agua de la llave, a1) agua con glicerina al 15 %, a2) agua con glicerina al 50 %, a3) agua pura

agua corriente.	agua con glicerina al 15 %.	agua con glicerina al 50 %.	agua pura.
a) 0.693 mm	a1) 0.706 mm	a2) 0.752 mm	a3) 0.815 mm
b) 1.019 mm	b1) 1.000 mm	b2) 1.012 mm	b3) 1.010 mm
c) 2.079 mm	c1) 2.000 mm	c2) 2.094 mm	c3) 2.222 mm
d) 3.024 mm	d1) 3.059 mm	d2) 3.017 mm	d3) 3.105 mm
e) 4.135 mm	e1) 4.047 mm	e2) 4.114 mm	e3) 4.000 mm

Cuadro 3.1: Medidas de las burbujas, con los distintos fluidos

3.4. Coeficiente de arrastre

El coeficiente de arrastre se puede obtener al igualar a la fuerza de flotación F_f , con la fuerza de arrastre expresada como función del coeficiente de arrastre C_D . La fuerza de flotación es:

$$F_f = \frac{\pi}{6} \rho_f d_b^3 g \quad (3.2)$$

La fuerza de arrastre es

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho_b U_b^2 \left(\frac{\pi}{4} d_b^2 \right) \quad (3.3)$$

Igualando 3.2, 3.3 se tiene:

$$\frac{\pi}{6} \rho_f d_b^3 g = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho_b U_b^2 \left(\frac{\pi}{4} d_b^2 \right) \quad (3.4)$$

Despejando el coeficiente de arrastre tenemos:

$$C_D = \frac{4}{3} \frac{d_b g}{U_b^2} \quad (3.5)$$

donde d_b es el diámetro de la burbuja, g es la gravedad, U_b^2 es la velocidad de la burbuja.

La gráfica 3.21 muestra el coeficiente de arrastre como función de Reynolds, para cada uno de los líquidos utilizados. Los datos coinciden en una curva universal, con excepción de las mediciones en 50 % agua-glicerina para diámetros mayores a 2.8 mm. Esta anomalía puede deberse a que estas burbujas no alcanzaron su velocidad terminal en el canal.

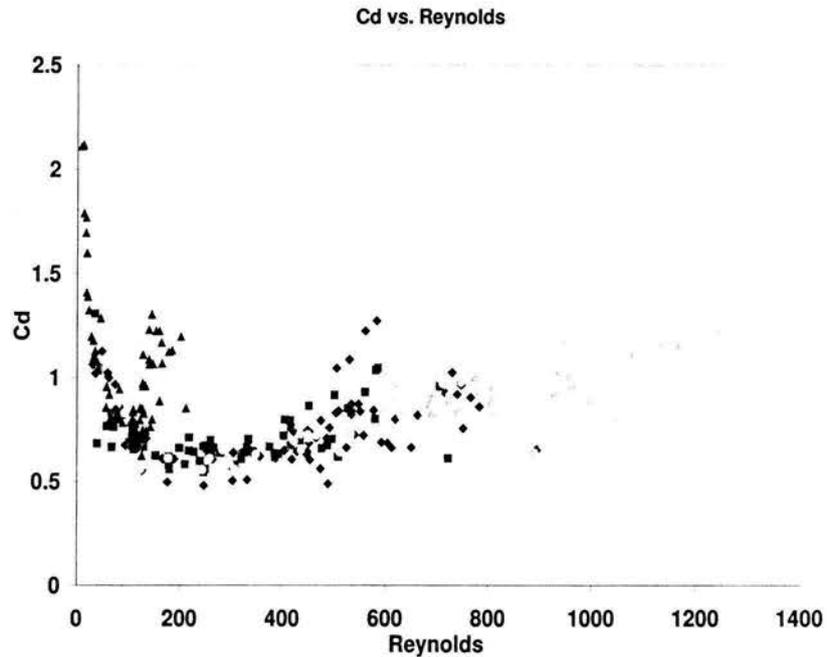


Figura 3.21: Coeficiente de arrastre como función de Reynolds: ◆ agua corriente ■ agua-glicerina 15 % ▲ agua-glicerina 50 % ● agua ultra-pura

3.5. PIV de las burbujas

En esta última sección presentamos algunos resultados de la visualización del campo de velocidades alrededor de burbujas.

Las figuras 3.22 y 3.23 muestran a una burbuja ascendiendo con una trayectoria lineal. Claramente la estela está confinada dentro de una región delgada. El número de Reynolds y Weber que presenta esta burbuja son los siguientes: $Re=80.85$ y $We=1.47$.

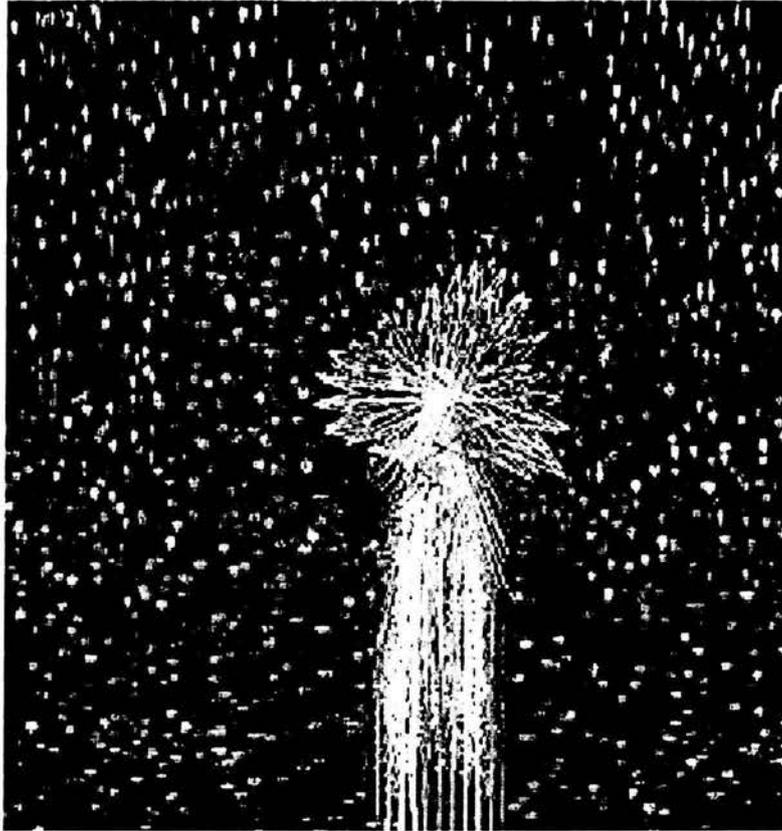


Figura 3.22: Burbuja de aire, en agua con glicerina al 50 % de 2.328 mm de diámetro equivalente

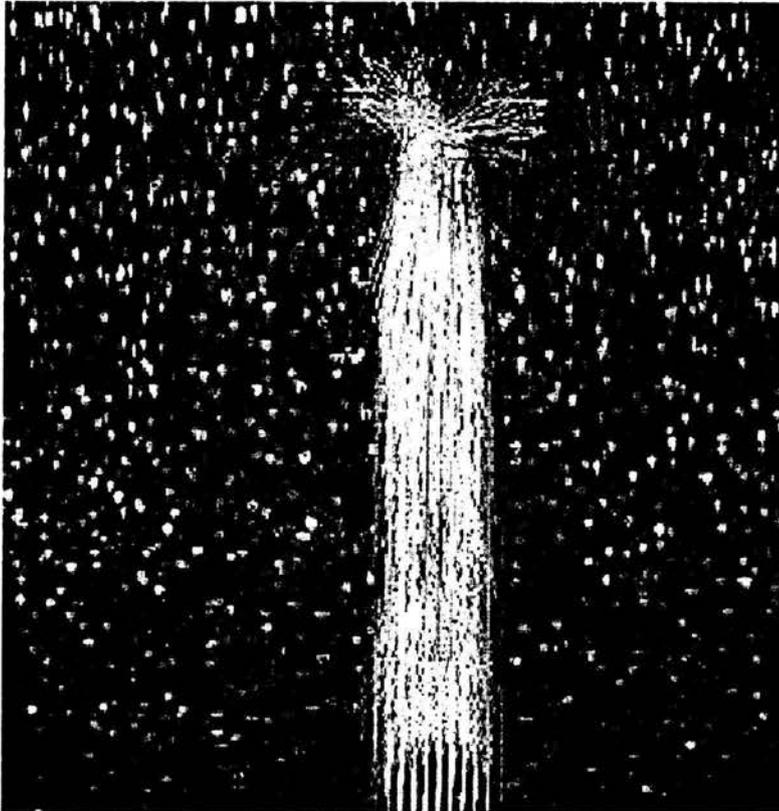


Figura 3.23: Burbuja de aire, en agua con glicerina al 50 % de 2.328 mm de diámetro equivalente

La siguiente figura 3.24, muestra una burbuja de un diámetro equivalente de 3.10 mm, en la cual se observa claramente el desprendimiento de vórtices, de forma periódica en la estela de la burbuja. Los números adimensionales Reynolds y Weber para esta burbuja son: $Re=134.61$ y $We=3.01$.

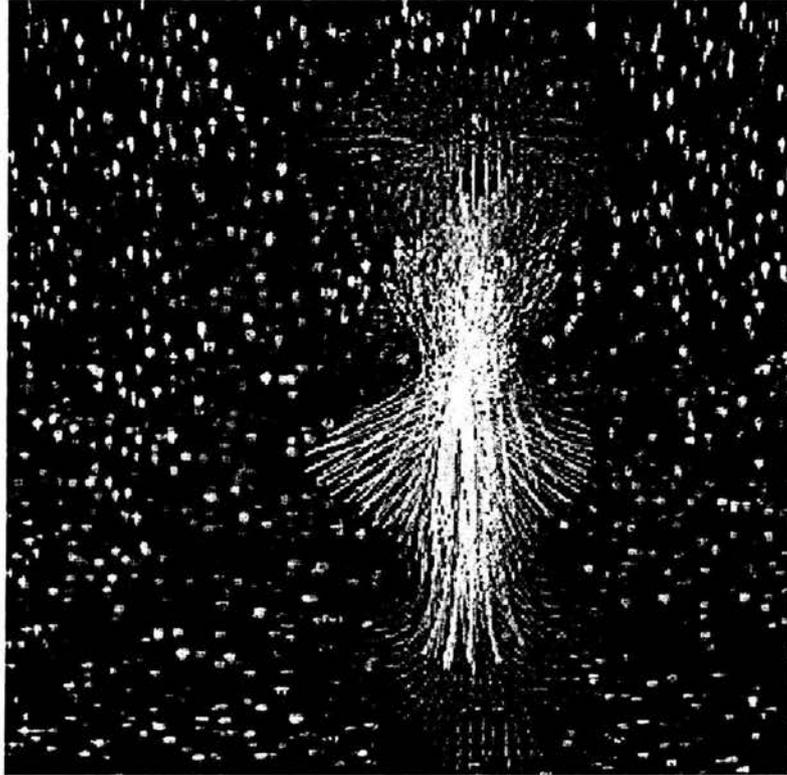


Figura 3.24: Burbuja de aire, en agua con glicerina al 50 % de 3.10 mm de diámetro equivalente

Capítulo 4

Conclusiones

Se estudió experimentalmente el movimiento de una burbuja de gas en diferentes líquidos: agua corriente, agua ultra-pura, soluciones de agua-glicerina al 15 y 50 %. Las mediciones de la velocidad terminal de la burbuja se realizaron con la técnica del análisis digital de imágenes (ADI). Esta técnica es rápida y sencilla apropiada para el estudio basado en una sola burbuja. El efecto viscoso afecta a la velocidad terminal de la burbuja, disminuyéndola considerablemente. Los resultados obtenidos concluyeron que la velocidad terminal de la burbuja en agua ultra-pura, depende también del tamaño del capilar, esto ratifica otros experimentos hechos por Wu y Gharib [16]. En soluciones más viscosas la transición a trayectoria oscilante, se observó a diámetros equivalentes mayores.

El tamaño y la forma de la burbuja también cambia para líquidos de diferentes viscosidades. Para agua corriente y agua ultra-pura la forma de la burbuja es más esférica que para la burbuja en soluciones agua-glicerina, que presenta una forma más elipsoidal. Finalmente se realizó una visualización con (PIV), El interés que se tuvo fue para observar el campo de velocidades de la burbuja en agua con glicerina al 50 % y hacer un análisis cualitativo de la misma. La burbuja para diámetros menores a 2.5 mm asciende con una trayectoria lineal, visualizada por la estela que generó. Para una burbuja mayor al rango antes mencionado, la visualización mostró el desprendimiento de vórtices en la parte posterior de la burbuja.

4.1. Trabajo a futuro

Sería interesante realizar mediciones experimentales con aceite de silicon, el cual es un líquido no-polar y permite a las superficies libres mantenerlas limpias.

También convendría realizar experimentos con una boquilla o capilar más pequeños, para poder comparar los resultados con los obtenidos en este.

Por último sería interesante realizar más experimentos con el PIV. Se podrían obtener grabaciones a diferentes alturas del contenedor para tener una secuencia completa de la formación de la estela, y del desprendimiento de los vórtices.

Bibliografía

- [1] Aybers, N.M. Tapuccu, A. The motion of gas bubbles rising through stagnant liquids. *Wärme-und Stoffübertragung* 2, 118-128,(1969)
- [2] Batchelor G.K. An introduction to fluid dynamics. Ed. Cambridge university press. (1967)
- [3] Benjamin, T.B. Hamiltonian theory for motion of bubbles in an infinite liquid. *J. Fluid Mech.* 181, 349-379,(1987)
- [4] Clift R. Grace J.R, Weber M.E. Bubbles, drops, and particles. Ed. Academic Press. III, 27, (1978)
- [5] Crowe, Clayton. Sommerfeld, Martin. Multiphase flows with droplets and particles. Ed. CRC Press. USA.(1998)
- [6] Dimitri Gidaspow. Multiphase flow and fluidization. Continuum and kinetic theory descriptions.
- [7] Duineveld P.C. The rise and shape of bubbles in pure water at high Reynolds number. *J. Fluid Mech.* 292, 325-332,(1995)
- [8] El Sawi, M. Distorted gas bubbles at large Reynolds number. *J. Fluid Mech.* 62, 163-183,(1974)
- [9] Haberman, W.L. Morton, R.K. An experimental study of bubbles moving in liquids. *Proc. ASCE* 387, 227-252,(1954)
- [10] Hartunian, R.A. Sears, W.R. On the instability of small gas bubbles moving uniformly in various liquids. *J. Fluid Mech.* 3, 27-47,(1957)
- [11] Kundu Pijush K. Fluids Mechanics. Ed. Academic Press. United Kingdom. 8-9,

- [12] Lammers, J.H. The stability of bubbly flows. Ed. University of Twente. USA.
- [13] Levich, Physico Chemical Hydrodynamics. Prentice Hall. (1962)
- [14] Martinez Mercado Julian. Reología de flujos burbujeantes. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería. UNAM. 2003.
- [15] Miksis, J.M., Vanden-Broeck, J., Keller, J.B. Axisymmetric bubble or drop in a uniform flow. *J.Fluids A1*, 124-131, (1981)
- [16] Mingming Wu, Gharib Morteza. Experimental studies on the shape and path of small air bubbles rising in clear water.
- [17] Moore, D.W. The velocity of rise of distorted gas bubbles in a liquid of small viscosity. *J. Fluid Mech.* 23, 749-766, (1965)
- [18] Ohl, C.D., Tijink, A., Prosperetti, A. The added mass of an expanding bubble. *J. Fluid Mech.* 482, 271-290, (2003)
- [19] Ryskin, G. Leal, L.G. Numerical solution of free-boundary problems in fluid mechanics. Part 2. Bouncy motion of gas bubble through a quiescent liquid. *J. Fluid Mech.* 148, 19-35
- [20] Sadahal S.S., Ayyaswamy P.S., Chung J.N. Transport phenomena with drops and bubbles. *Mechanical Engineering Series.*, 1, 2,3, (1997).
- [21] Saffman, P.G. On the rise of small air bubbles in water. *J. Fluid Mech.* 1, 249-275
- [22] Smits, A.J., Lim, T.T. Flow Visualization. Techniques and Examples. Ed. Imperial College Press. London., 3, 44. 6, 123-141, (2000)

Apéndice A

Datos técnicos y programas

A.1. Válvula de globo ó bola

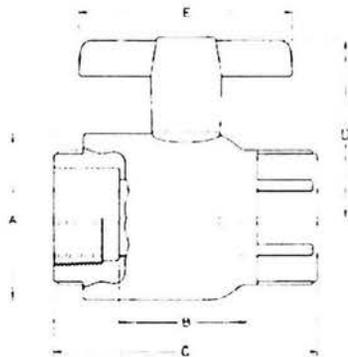


Figura A.1: Esquema de la válvula de bola

Dimensión nominal	Referencia de la dimensión (pulgadas)					Peso aproximado (Lbs.)
	A	B	C	D	E	PVC
1/2"	1-9/16	1-5/16	2-3/4	1-9/16	2-11/16	.17

Cuadro A.1: Dimensiones y peso de la válvula

A.2. Diagrama esquemático de la bomba

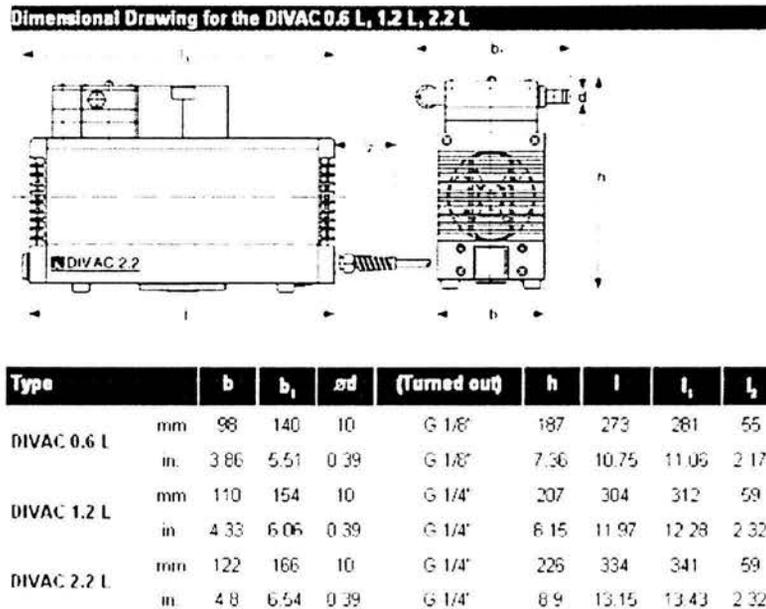


Figura A.2: Esquema de la bomba de vacío

A.3. Programas de análisis digital de imágenes

A.3.1. Código del programa en XCAP llamado Inicia

```
//
// Recorded by: XCAP-Std V2.1
// Recorded on: 6 Mar 2003 23:18:49 GMT
//
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","MuiMenu","Blob
Analysis",0);
MuiScript.apply(3,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"windowResized","",2,1024,740);
MuiScript.apply(3,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"windowVisible","",1,true);
MuiScript.apply(3,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"windowMoved","",2,0,564);
MuiScript.apply(3,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"windowResized","",2,1024,176);
MuiScript.apply(1,"EPIX\256XCAPV2.2","MuiMenu","Black Board",0);
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","windowVisible","",1,true);
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0A0",2,"String","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0A0",1,"ventana");
```

```

MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0A1",2,"String","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0A1",1,"Origx");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0A2",2,"String","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0A2",1,"Origy");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0A3",2,"String","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0A3",1,"Ancho");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0A4",2,"String","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0A4",1,"Largo");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0A5",2,"String","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0A5",2,"String","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0A5",1,"Endindx");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0A6",2,"String","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0A6",1,"Endindy");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0A7",2,"String","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0A7",1,"Endexdx");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0A8",2,"String","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0A8",1,"Endexdy");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0B1",2,"Integer
Number","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0B2",2,"Integer
Number","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0B3",2,"Integer
Number","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0B4",2,"Integer
Number","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0B5",2,"Integer
Number","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0B6",2,"Integer
Number","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0B7",2,"Integer
Number","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0B8",2,"Integer
Number","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0D2",2,"Integer
Number","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0C2",2,"String","CellType");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","A0C2",1,"Cuadro
ini");
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","windowMoved","",2,13,192);
MuiScript.apply(3,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"MuiMenu","Analysis",0);
MuiScript.apply(4,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis:Analysis","windowResized","",2,546,230);
MuiScript.apply(4,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis:Analysis","windowResized","",2,546,230);
MuiScript.apply(4,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis:Analysis","windowMoved","",2,300,300);

```

A.3.2. Código del programa en XCAP llamado Posición

```

//
// Recorded by: XCAP-Std V2.2
// Recorded on: 15 Jul 2003 21:23:14 GMT
//
MuiScript.apply(4,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis:Analysis","MuiStdBtn","Set

```

```

AOI",0);
MuiScript.apply(4,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"SelectAOI:EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis","MuiCard","Image",0);
MuiScript.apply(4,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"SelectAOI:EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis","MuiCard","AOI",0);
MuiScript.apply(4,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"SelectAOI:EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis","MuiNumInput","Origin,
X/H",2,"AOB1","BBRead");
MuiScript.apply(4,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"SelectAOI:EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis","MuiNumInput","Origin,
Y/V",2,"AOB2","BBRead");
MuiScript.apply(4,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"SelectAOI:EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis","MuiNumInput","Width,
X/H",2,"AOB3","BBRead");
MuiScript.apply(4,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"SelectAOI:EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis","MuiNumInput","Height,
Y/V",2,"AOB4","BBRead");
MuiScript.apply(4,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"SelectAOI:EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis","MuiNumInput","End
Incl, X/H",2,"AOB5","BBRead");
MuiScript.apply(4,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"SelectAOI:EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis","MuiNumInput","End
Incl, Y/V",2,"AOB6","BBRead");
MuiScript.apply(4,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"SelectAOI:EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis","MuiNumInput","End
Excl, X/H",2,"AOB7","BBRead");
MuiScript.apply(4,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"SelectAOI:EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis","MuiCard","Image",0);
MuiScript.apply(4,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"SelectAOI:EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis","MuiNumInput","End
Excl, Y/V",2,"AOB8","BBRead");
MuiScript.apply(4,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"SelectAOI:EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis","MuiNumInput","Sequence
Buffer",2,"AOD2","BBRead");
MuiScript.apply(4,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"SelectAOI:EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis","MuiCard","AOI",0);
MuiScript.apply(4,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"SelectAOI:EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis","MuiStdBtn","OK",0);
MuiScript.apply(4,"EPIX\256XCAPV2.2","EPIX\256PIXCI\256:View#1","EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis",
"EPIX\256PIXCI\256:BlobAnalysis:Analysis","MuiStdBtn","Apply",0);
MuiScript.apply(2,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoardCell","AOD2",2,"Attributes","CellType");
MuiScript.apply(3,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoard:CellAOD2","MuiCard","Values",0);
MuiScript.apply(3,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoard:CellAOD2","MuiButton","Increment",0);
MuiScript.apply(3,"EPIX\256XCAPV2.2","BlackBoard","BlackBoard:CellAOD2","windowClosing","",0);

```


Apéndice B

Presentaciones del trabajo

Medición de la velocidad de ascenso de una burbuja en un líquido viscoso

R. Alcaraz, R. Zent

*Instituto de Investigaciones en Materiales,
Universidad Nacional Autónoma de México,
Apdo. Postal 70 300, Cal. Universidad, México D.F. 04510*

Para lograr avances significativos en el entendimiento de los procesos de ascenso de burbujas es necesario entender el movimiento de una sola burbuja en un líquido en reposo. Para el caso de burbujas de muy viscosidad se conoce bien que el movimiento de la burbuja en ascenso cambia de una trayectoria rectilínea a una oscilatoria para burbujas de un tamaño mayor a 2 mm aproximadamente. La transición a una trayectoria oscilante está dada por el valor de un número de Reynolds y Weber del flujo, y también de la presencia de contaminantes y el tamaño del mismo, como parámetro es muy difícil de cuantificar.

Para lograr cierto control en la cantidad de contaminantes en el líquido de prueba, construímos un aparato experimental que permite la realización de experimentos sin que el líquido tengan contacto con el aire ambiental. Permite también que se atrapen una sola burbuja para muchos experimentos. La burbuja de prueba se atrapa después de realizada la medición de su velocidad y se puede realizar una gran cantidad de experimentos bajo condiciones idénticas. El estudio se hizo también con tres el tamaño de la muestra de prueba cambiando la posición dentro del campo de visión del sistema de prueba.

Se realizaron mediciones de la velocidad media de ascenso para diferentes líquidos y un rango amplio de tamaños. Se realizaron también algunas visualizaciones y mediciones de los campos de velocidades utilizando anemometría PIV.

División de Dinámica de Fluidos

IX CONGRESO DE LA DIVISION DE DINÁMICA DE FLUIDOS SOCIEDAD MEXICANA DE FÍSICA

México D.F., 25 de septiembre de 2011

Dr. Roberto Zenit Camacho
Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM
P.O. Box 7054

Apoyado por:

CONACyT y CONAHCYT (Programa de Apoyo a la Investigación)

Medición de la velocidad de ascenso de una burbuja en un líquido viscoso (93).
Por R. Alaraz, R. Zenit

Este artículo está destinado para su **presentación oral** en el IX Congreso de la División de Dinámica de Fluidos de la Sociedad Mexicana de Física. El programa del congreso en la fecha y hora de la noche y la hora de su presentación, se dará a conocer por separado. El programa también puede consultarse en la página web de internet.

Me permito recordar que cada día con 15 minutos para su exposición, deberán presentarse debido al número de trabajos, los horarios de las sesiones y los tiempos de espera que se manejan regularmente, todos por los moderadores. Los reclamos serán por escrito en la memoria de trabajo, mismas que estarán disponibles al menos el tiempo de registro al congreso. Para presentaciones por computadora es necesario traer la presentación previamente grabada en un CD para PC, en formato PDF o Power Point. Para evitar problemas técnicos, no se permitirá conducir computadoras portátiles, celulares durante las sesiones.

Para mayor información sobre el congreso, es preciso que consulten la página web de la División de Dinámica de Fluidos (dfe.fimf.mx). Ahí también podrán encontrar el programa completo del evento y la información sobre los hoteles sede. Si tiene cualquier comentario favor de comunicarse con alguno de los miembros de comité organizador.

Atentamente

Dr. J. Roberto Zenit Camacho
Presidente
División de Dinámica de Fluidos



Sociedad Mexicana de Física (SMF)
Calle de las Américas, 1400
Col. Jardines del Bosque
C.P. 07180, México D.F.
Tel: 5622 4000 ext. 2000

Correo Electrónico: zenit@fimf.mx
Tel: 5622 4000 ext. 2000
www.fimf.mx



La Sociedad Mexicana de Física

Asociación Mexicana de Física Experimental

De

ROBERTO ALCARAZ
IIM-UNAM

En el XI Congreso de la
División de Dinámica de Fluidos (SMF)

Dr. Roberto Alcaraz
Física de la UNAM

México, D.F.
Noviembre, 17, 18 y 19, 2003



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES / REOLOGÍA Y MECÁNICA DE MATERIALES

*Roberto Alcaraz,
Presente*

Por este medio, expresamos a usted nuestro reconocimiento por su participación en el Instituto de Investigaciones en Materiales con el Seminario:

"Movimiento de una burbuja de gas en un líquido"

Impartido el miércoles 4 de febrero de 2004, en la Sala de Conferencias del IMM.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, D.F., 4 de febrero de 2004

DR. OCTAVIO MANERO BRITO
Jefe del Departamento

IMM.cgm*

Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, México, D. F., 04510, Apartado Postal 70 360 o 70 284
Tel/Fax: 5622 4602 o Fax: 5616 1201
Correo electrónico: doptme@mateo.maxwell.umatercu.unam.mx

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

Apéndice C

Notas históricas

Varias anotaciones en cuadernos de Leonardo da Vinci son posiblemente la primera referencia científica de burbujas milimétricas en agua, y que en el momento de ascender no lo hacen en camino rectilíneo. El bosquejo reproducido en la figura C.1 fue encontrado en sus notas.

Da Vinci escribió a un lado del bosquejo: El aire que sumergido junto con el agua, presenta vueltas y su movimiento es sinuoso. Y esto ocurre porque el aire es ligero y no puede permanecer abajo. El agua es más poderosa que el aire y por lo tanto el agua cubre al aire. El aire encontrará siempre su camino más corto y por donde su medio ofrezca menos resistencia. Otro bosquejo se encuentra en la figura C.2

The added mass of an expanding bubble

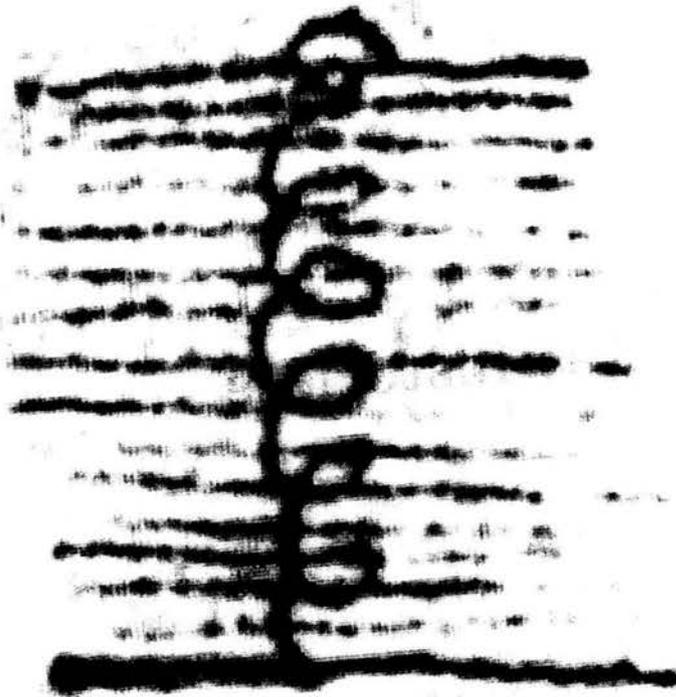


FIGURE 1. Leonardo's sketch of a bubble rising through a liquid from fol. 23r of the Codex Leicester (reproduced with the kind permission of the Arnold Hunt and Foundation from an exhibition catalogue published in 1992)

Figura C.1: Burbuja de aire mostrando ascenso oscilatorio

C. D. Ohl: A Study on the Air System

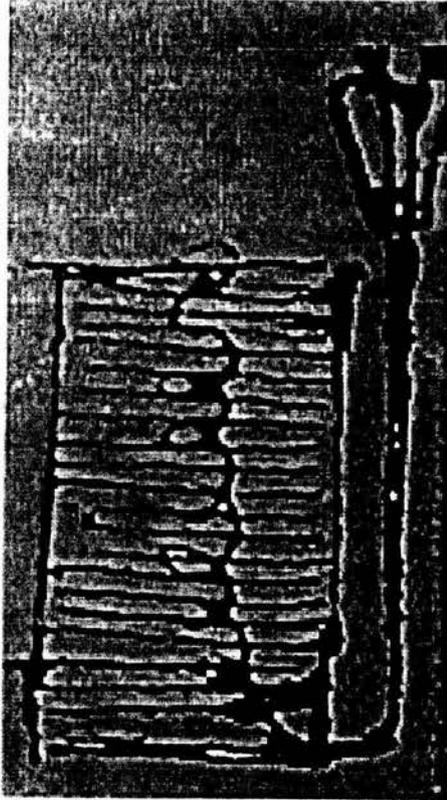


Fig. 9. 19. Another sketch by Leonardo da Vinci and a rising bubble from Manuscript I (1575) reproduced from Raynor and Mochel (1986)

Figura C.2: Burbuja de aire mostrando ascenso oscilatorio, 2o bosquejo

Estas notas y bosquejos se encontraron en un artículo reciente de Ohl et.al [18].