



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA**

FACULTAD DE INGENIERIA

**SISTEMA PARA LA REPRODUCCION  
DE SONOLUMINISCENCIA EN  
RESONADOR ESFÉRICO**

**T E S I S**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA**

ELECTRICA – SISTEMAS ELECTRONICOS  
P R E S E N T A :

**JORGE LUIS MORALES ROMERO**



TUTOR:

DRA. MARGARITA NAVARRETE MONTESINOS

2006



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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.

## **JURADO ASIGNADO:**

PRESIDENTE: Dra. Castañeda Guzmán Rosalba

SECRETARIO: Dra. Stern Forgach Catalina Elizabeth

VOCAL: Dra. Navarrete Montesinos Margarita

1er. SUPLENTE: Dr. Rendón Garrido Pablo

2do. SUPLENTE: M.I. Haro Ruiz Luis Arturo

INSTITUTO DE INGENIERÍA

## **TUTOR DE TESIS:**

Margarita Navarrete Montesinos

---

## **AGRADECIMIENTOS**

La realización de este trabajo fue posible gracias a la participación de numerosas personas e instituciones que directa e indirectamente contribuyeron con ello.

Agradezco muy especialmente a mi esposa Nélica por su apoyo, paciencia y motivación para que nunca claudicara.

A mis padres Fernando e Hilda y a mis hermanos Fernando, Daniel y Lilia por su apoyo incondicional.

A Rubén, Naty, Rubencito y Cristina por motivarme a seguir en este camino.

A mis amigos Francisco Hernández y Francisco Godinez por sus sugerencias.

A mi directora de tesis Dra. Margarita Navarrete por toda su ayuda y colaboración en la realización de este trabajo.

Al Dr. Mayo Villagrán por las facilidades otorgadas en laboratorio de fotofísica en el CCADET.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada.

A DGAPA-PAPIIT con el proyecto IN-103706.

# CONTENIDO

|  |    |
|--|----|
| RESUMEN.....   | 6  |
| OBJETIVO.....  | 7  |
| INTRODUCCION.....  | 7  |
| I.1.- BREVE INTRODUCCION HISTORICA.....  | 7  |
| I.2.- FUNDAMENTOS DE LA SONOLUMINISCENCIA.....   | 10 |
| I.3.- MECANISMOS QUE EXPLICAN LA SONOLUMINISCENCIA.....  | 12 |
| I.4.- DISPOSITIVOS PARA PRODUCIR SONOLUMINISCENCIA.....  | 17 |
| I.4.1.- Reproducción de sonoluminiscencia de múltiples burbujas (SLMB)...  | 17 |
| I.4.2.- Producción de sonoluminiscencia de una sola burbuja (SLSB).....  | 20 |
| <br>   |    |
| CAPITULO 1   |    |
| 1.1.- MONTAJE EXPERIMENTAL/DISEÑO ELECTRONICO.....   | 24 |
| 1.2.- APARTO BASICO PARA OBTENER SL.....   | 24 |
| 1.3.- DESARROLLO DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL.....   | 26 |
| 1.3.1.- Material, equipo y artículos empleados.....  | 26 |
| 1.3.2.- Ensamble experimental.....   | 28 |
| <br>   |    |
| CAPITULO 2   |    |
| 2.1.-METODOLOGIA PARA OBTENER SONOLUMINISCENCIA DE UNA SOLA BURBUJA.....   | 43 |
| PASO 1.- Desgasificación adecuada de agua tridestilada mediante vacío....  | 44 |
| PASO 2.- Llenado del matraz y su sujeción con pinzas a la estructura de soporte.....   | 44 |
| PASO 3.- Aplicación del campo acústico senoidal y el barrido en frecuencia para establecer las frecuencias de resonancia del sistema matraz-soporte a temperatura ambiente controlada..... | 45 |
| PASO 4.- Conexión del inductor para alcanzar el máximo voltaje de salida..   | 47 |
| PASO 5.- Nucleación de burbujas mediante inyección de agua por gravedad.....   | 49 |
| PASO 6.- Estabilización de la burbuja mediante la optimización del voltaje y frecuencia aplicados.....   | 50 |
| PASO 7.- Observación de la sonoluminiscencia estable en las señales del mic y su control.....  | 51 |
| <br>   |    |
| CAPITULO 3   |    |
| 3.1.- PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL SISTEMA.....  | 53 |
| 3.1.1.- Tensión y corriente aplicada al sistema.....   | 54 |
| 3.1.2.- Medición de la presión acústica.....   | 60 |

|   |    |
|---|----|
| 3.1.3.- Pruebas experimentales para conocer el ambiente en el que se obtiene sonoluminiscencia..... | 70 |
| 3.1.4.- Primeras mediciones de la burbuja.....  | 74 |
| 3.2.- IMAGENES DE BURBUJAS SL.....  | 77 |
| CONCLUSIONES.....   | 79 |
| APENDICE A  |    |
| ESPECIFICACIONES DEL HIDROFONO.....   | 80 |
| HYDROPHONE BOOSTER AMPLIFIER.....   | 80 |
| HP SERIES SUBMERSIBLE PREAMPLIFIER.....   | 81 |
| DC COUPLER.....   | 82 |
| HP 0.2mm INTERCHANGEABLE PROBE.....   | 83 |
| APENDICE B  |    |
| ESPECIFICACIONES DEL OXIMETRO YSI 58.....   | 84 |
| APENDICE C  |    |
| PROPIEDADES PIEZOELECTRICAS DE CERAMICAS.....   | 85 |
| APENDICE D  |    |
| RESONANCIA DE UN CIRCUITO RCL EN SERIE.....   | 86 |
| APENDICE E  |    |
| TABLA DE CALIBRACION PARA OXIMETRO.....   | 88 |
| BIBLIOGRAFIA.....   | 89 |

# RESUMEN

La física de la sonoluminiscencia (emisión de luz por colapso de burbujas en líquidos irradiados por ondas ultrasónicas) es una de las disciplinas de investigación que ha tenido gran auge en las últimas décadas en los principales centros y laboratorios de investigación en el mundo. Es abundante en la variedad de fenómenos susceptibles de estudio y de facetas posibles de investigación debido a sus implicaciones tecnológicas. Dentro de ellas resulta propio citar a los fenómenos de concentración de energía, de emisión de luz en el intervalo de los 60 y 300 ps y del aprovechamiento de las altas presiones y temperaturas que se alcanzan dentro de la burbuja para la generación de reacciones químicas, así como la fabricación de nuevos materiales, y más recientemente la posibilidad de alcanzar la fusión en frío.

Ésta tesis tiene como principal objetivo la implementación del sistema electromecánico y el desarrollo de la metodología para reproducir el fenómeno de sonoluminiscencia en resonador esférico (SLSB) en medio acuoso en forma estacionaria bajo las condiciones ambientales de la Ciudad de México. El sistema está integrado por elementos electro-mecánicos que son acoplados para máxima transferencia de energía.

Se ha desarrollado una metodología que asegura la obtención de la sonoluminiscencia en forma rápida y estable. Para esto se realizaron diversas pruebas que abarcaron el reconocimiento de los parámetros ambientales que intervienen en la producción de la SL y su relación con los parámetros electro-mecánicos.

Específicamente se encontró la respuesta en frecuencia del sistema bajo diferentes condiciones del medio acuoso, se hicieron mediciones de la presión acústica aplicada en presencia de SL y de la onda de choque generada también durante la SL. Se relacionaron los parámetros entre: a) el porcentaje de Oxígeno disuelto en el medio y el tiempo de duración de la SL, b) el cambio en la temperatura del medio y c) el corrimiento de la frecuencia aplicada para obtener SL.

Se describen las diferentes pruebas experimentales realizadas y asimismo, se discuten y comparan los resultados experimentales encontrados con los resultados presentados en publicaciones internacionales.

# OBJETIVO

Implementación del sistema electromecánico y el desarrollo de la metodología para reproducir el fenómeno de sonoluminiscencia en resonador esférico (SLSB) en medio acuoso en forma estacionaria bajo las condiciones ambientales de la Ciudad de México.

# INTRODUCCIÓN

## I.1.- BREVE INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

Sonoluminiscencia, SL, la conversión de la energía acústica en luz, tiene sus orígenes en la sonoquímica, cuando R. Loomis descubrió en 1927 que el agua bajo una onda ultrasónica intensa formaba  $H_2O_2$  [1, 2]. Posteriormente, experimentos realizados por Olson en 1929 demostraron que la formación de este compuesto esta correlacionada con la formación de cavitación transitoria [2].

En 1934 H. Frenzel y H. Shultes observaron que placas fotográficas sumergidas en agua se velaban cuando se aplicaba un campo acústico [2,3]; al indagar el fenómeno se dieron cuenta que además, aparecían pequeñas emisiones de luz en forma aleatoria en algunas burbujas. Fue la primera vez que se observó el fenómeno. En 1957, Harvey le da el nombre de *sonoluminiscencia* (SL), utilizando la terminación *luminiscencia* aludiendo a la luz fría en contraste con la luz caliente, como por ejemplo el fuego. Yosioka y Omura [4] en el año de 1962 reportan por primera vez la emisión de luz de una sola burbuja controlada por ultrasonido, sin embargo, su trabajo fue ignorado dada la poca difusión entre la

comunidad científica de aquella época. La SL permaneció olvidada varios años más, ya que era considerada como un fenómeno errático, transitorio e impredecible, y solo se conocía la sonoluminiscencia de múltiples burbujas (SLMB). En 1985 Crum y Reynolds [5] reportan la observación de SLMB y tratan de encontrar una respuesta para el fenómeno, pero al no poder estudiarlo por su aleatoriedad deciden producir SL con otros métodos. En 1989 Felipe Gaitan, mientras realizaba sus estudios de doctorado bajo la tutela de L. Crum, encuentra un método para obtener una sola burbuja SL atrapada en una onda acústica en medio acuoso dentro de un recipiente resonante, en otras palabras, SL de una sola burbuja (SLSB). Sin embargo, no fue sino hasta 1991 cuando Seth J. Putterman, al investigar este fenómeno, realiza algunos experimentos cuyos resultados generan un merecido interés en el mundo de la ciencia, provocando el estudio masivo del fenómeno en diversos laboratorios alrededor del mundo.

El fenómeno de la sonoluminiscencia ha sido observado, hasta ahora, en procesos como los siguientes:

- Cavitación en agua inducida por campos acústicos intensos (Frezel y Shultes, 1934 [3]),
- En el impacto de un jet de agua sobre un placa estacionaria, (Schimid, 1959),
- En una sola burbuja inmersa en agua controlada por un campo ultrasónico, (Yosioka, 1962 [6]),
- En la cavitación de agua producida en la salida de un tubo de Venturi, (Jarman, 1964),
- En las burbujas generadas con pulsos láser enfocados en el interior de líquidos criogénicos, (Jarman, 1971 [7]),
- En líquidos cuando un láser pulsado es enfocado en su interior, (Buzukov, 1971),
- En la cavitación de agua provocada por pulsos modulados ultrasónicos, (Ceschia, 1973),

- Por descargas eléctricas en líquidos (Benkouskii,1974),
- En sólidos (Ostrovskii, 1979 [8]),
- En una sola burbuja de aire en agua desgasificada atrapada en un campo acústico estacionario (SLSB, Gaitan, et al, 1989 [9]),
- En el colapso de burbujas de vapor supersaturado, (Chakravarty, 2001) [10].

En la SLSB las mediciones realizadas hasta la fecha han arrojado datos muy interesantes, como los que se mencionan a continuación:

Se ha encontrado que el tiempo del destello del pulso de luz emitido por la burbuja es de algunos picosegundos (entre 50-100 ps) y éstos aparecen con una regularidad dada por la frecuencia externa aplicada a la cavidad. [11-13].

El radio inicial de la burbuja es del orden de los micrómetros, antes de que el campo acústico actúe sobre ella. Una vez que ésta es atrapada dentro de un campo acústico senoidal, el radio se va incrementando hasta alcanzar una magnitud del orden de las decenas de micrómetros. En este punto de máxima expansión ocurre un semi-vacio dentro de la burbuja, causando el repentino colapso de la misma y haciendo que el radio decrezca hasta unas cuantas fracciones de su valor máximo, y es durante este proceso que se emite un destello luminoso [11]. Sin embargo, de acuerdo con Barber [13] no es posible determinar un radio “general” para cada experimento ya que el tamaño de la burbuja depende de parámetros ambientales como: la presión acústica aplicada, temperatura ambiente y tipo de gas disuelto en el agua, entre otros. También, se ha observado que la temperatura del agua afecta considerablemente la cantidad de luz emitida: por ejemplo, la intensidad de luz emitida en cada destello se incrementa en un factor de 200 al bajar la temperatura del medio de 35 °C a 0 °C [11].

Otras pruebas realizadas en donde se mide el espectro de emisión del pulso de luz emitido por la burbuja, han mostrado que la mayor parte de éste no se

encuentra en el intervalo de la luz visible [11,12]. Dichos experimentos muestran que la burbuja emite más luz violeta que roja y más ultravioleta que violeta [12]. Esto es debido a que no es posible seguir el espectro más allá de energías fotónicas de 6 eV, las cuales corresponden a una longitud de onda del ultravioleta de 0.2  $\mu\text{m}$ , ya que por encima de estas energías la luz no se propaga a través del agua porque es absorbida.

En base a cálculos espectrofotométricos, una energía de 6 eV corresponde a una temperatura de 72,000 K, esto indica que el interior de la burbuja posiblemente se encuentre a una temperatura mayor. Por otro lado, el volumen de la burbuja se reduce por un factor de un millón al ir decreciendo su radio. En este sentido, si consideramos una compresión adiabática en el interior de la burbuja, resulta que se tiene una temperatura mayor a los 10,000 K y una presión mayor a las 10,000 atm, según los cálculos realizados con datos experimentales en 1952 por B. Noltingk y E. Neppiras del "Mullard Electronic Research Laboratory" de la universidad de Surrey en Inglaterra.

## **I.2.- FUNDAMENTOS DE LA SONOLUMINISCENCIA**

Una onda acústica es la propagación de una presión oscilante a la velocidad del sonido del medio [6]. Una onda ultrasónica se define como una onda acústica cuya frecuencia está por encima de los 20 kHz.

Así, cuando un medio líquido es irradiado por una onda ultrasónica, la presión instantánea en algunas regiones del medio llega a ser negativa durante la fase de succión ó de rarefacción (rarefaction phase). En otras palabras, cuando la amplitud de la presión de una onda ultrasónica (o amplitud acústica), es mayor que la presión ambiente, la presión instantánea mínima es negativa. La definición de presión negativa puede ser explicada de manera más fácil utilizando la figura A:

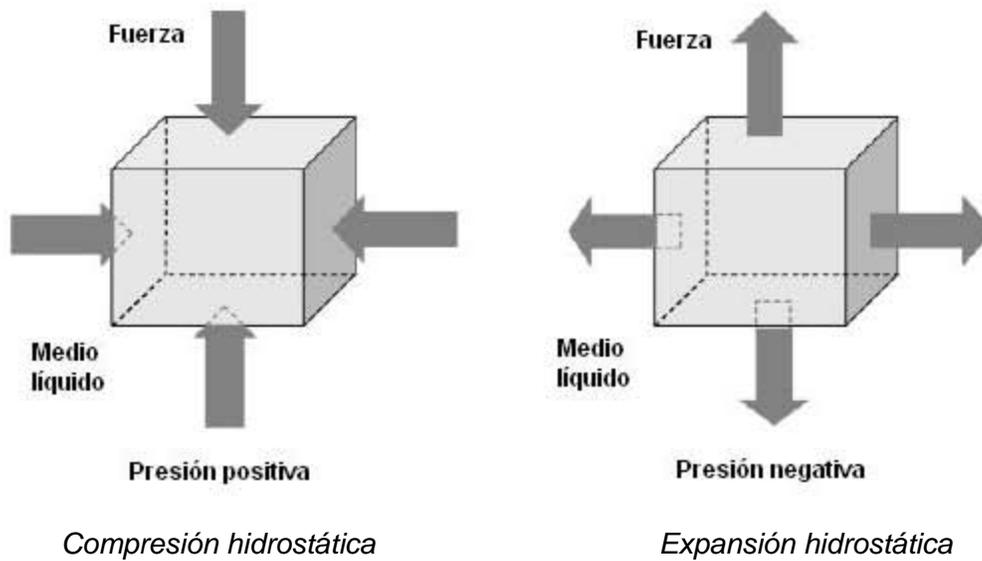


Figura 1.- Presión negativa

En la figura 1, una presión positiva empuja hidrostáticamente las caras del medio líquido comprimiéndolo. Por otro lado, en la presión negativa ésta *jala* cada una de las caras del líquido para expandirlo. Así, cuando la presión en algunas regiones del líquido se vuelve negativa, muchas burbujas de aire aparecen en ese lugar debido a que el aire disuelto en el líquido ya no puede estar disuelto en éste. Y es esta aparición de burbujas, generadas por ondas ultrasónicas, lo que se conoce como cavitación acústica.

En la cavitación generada por una onda acústica senoidal, las burbujas que se forman se expanden y colapsan sucesivamente de acuerdo a la presión de oscilación de la onda ultrasónica aplicada. Durante la fase de rarefacción de la onda ultrasónica, la burbuja se expande debido a que la presión dentro de la burbuja se vuelve más grande que la presión del líquido fuera de ella. Mientras que durante la fase de compresión la burbuja se colapsa, ya que la presión del líquido fuera de la burbuja se vuelve más grande que la presión dentro de la misma [14]. La temperatura y presión dentro de la burbuja que se está colapsando se incrementa debido al trabajo efectuado por el líquido hacia la burbuja que se encoge, provocando que dicha burbuja se caliente [15]. Debido a

estas temperaturas y presiones que se generan (5000 K y 300 atm [6, 15]), un pulso débil de luz es emitido por la burbuja [6]. De acuerdo con los investigadores que estudian SL y sonoquímica estas temperaturas son tan altas que producen la emisión de luz, debido a que la energía en el colapso es tan concentrada que alcanza a separar las moléculas de los gases que se encuentran dentro de las burbujas, emitiendo luz por la recombinación de dichas moléculas disociadas. Este efecto es conocido como *quimioluminiscencia* y fue presentado por primera vez por Virginia Griffing en 1952 [11]. Sin embargo, a pesar de que el calentamiento adiabático de una burbuja que se colapsa provee un impresionante mecanismo para la concentración de energía, esta no puede ser la única respuesta para la luz emitida en este fenómeno. Dicho calentamiento por si mismo no puede generar el espectro continuo hacia el ultravioleta. Es así que es necesario añadir una etapa adicional para la explicación de la amplificación de energía.

Una posible solución fue planteada por Barber y Putterman [12]. Ellos se dieron cuenta que las velocidades que presenta la burbuja al colapsarse pueden producir ondas de choque hacia el interior de la burbuja, y aunque el movimiento de la burbuja es detenido por las fuerzas que existen entre las moléculas del gas, la onda de choque que implosiona puede continuar hacia el centro y posteriormente concentrar la energía del colapso. No obstante, investigaciones posteriores demuestran que son necesarios otros mecanismos para explicar este fenómeno, como se expone con mayor detalle a continuación.

### **I.3.- MECANISMOS QUE EXPLICAN LA SONOLUMINISCENCIA**

En la actualidad existen varias teorías que explican el mecanismo mediante el cual se produce la sonoluminiscencia, sin embargo, ninguna de ellas explica las mediciones experimentales del fenómeno en su totalidad. En este trabajo solo se describen brevemente las más aceptadas por la comunidad científica.

En 1993 Wu y Roberts [16] modelaron la dinámica de la burbuja usando las ecuaciones fundamentales de dinámica clásica y reportaron, de acuerdo con sus cálculos numéricos, la formación de una onda de choque esférica hacia el centro de la burbuja durante el colapso y un incremento de temperatura de más de  $10^6$  K en el centro de ella; donde la onda de choque esférica converge. Sin embargo, aunque la intensidad del pulso de luz calculada coincide con el valor experimental observado y reportado por Hiller [17], el ancho de pulso que ellos calculan resulta de alrededor de 1.2 ps. Esto contradice los experimentos publicados por Barber en 1992 [18], en los cuales se reportaba un ancho del pulso de la SLSB de alrededor de 50 ps. Después de la publicación de Wu y Roberts y ante la contradicción existente en cuanto al ancho del pulso de luz emitido, la formación de ondas de choque esféricas hacia el centro de la burbuja mediante simulaciones numéricas [19] se convierte en el nuevo tema de interés para muchos investigadores de SLSB. A este modelo se le nombra *modelo de la onda de choque*.

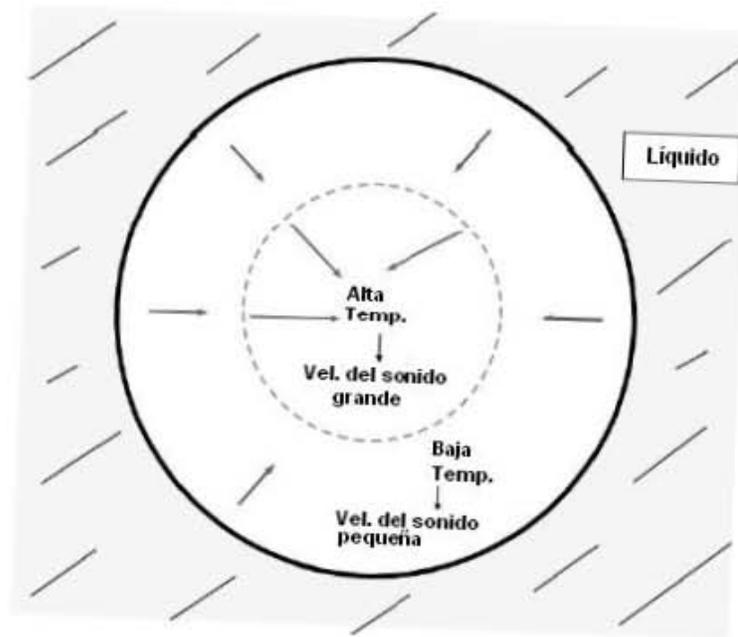
Sin embargo, en 1997 Gompf [20] reporta que el ancho de pulso de la luz emitida por la SLSB algunas veces resulta más largo que el reportado por Barber [18]. De acuerdo con el experimento de Gompf [20] de entre 60 y 250 ps. Hiller en 1998 [21] reporta que el ancho del pulso de luz que se emite de la SLSB es, en algunos casos, de cientos de picosegundos (de 40 a 350 ps). Y en ese mismo año, Pecha et al. [22] reporta también que el ancho de pulso medido en su experimento tiene un intervalo de 130 a 250 ps. Estas observaciones experimentales indican que el modelo de onda de choque no es muy adecuado para explicar el mecanismo de la SLSB.

En 1997 Yasui [23] sugiere que la burbuja de SLSB se calienta casi uniformemente por compresión cuasi-adiabática y que la luz es emitida desde toda la burbuja en vez de solo del centro. Este modelo lleva el nombre de *modelo de hot-spot*.

Haciendo una comparación entre este modelo de hot spot y el modelo de la onda de choque se tiene que una de las diferencias más notables es la temperatura calculada que se alcanza en el interior de la burbuja. De acuerdo con esta última, la temperatura en el centro de la burbuja donde la onda de choque esférica converge es mayor de  $10^6$  K, mientras que con el modelo de hot-spot la temperatura considerada casi espacialmente uniforme alcanza un poco más de  $10^4$  K.

Aún más, Cheng y Yuan [24] reportan en 1998 que de acuerdo con sus cálculos numéricos usando las ecuaciones fundamentales de dinámica de fluidos que incluyen la conducción térmica, ninguna onda de choque se puede formar dentro de la burbuja de SLSB.

La no existencia de la onda de choque es clarificado en 1999 por Voung [25]. De acuerdo con su publicación, la disminución de la velocidad de la onda a partir de que sale del centro de la burbuja, lo cual se debe a una disminución de la temperatura que se da al atravesar ésta desde el centro de la burbuja, es el motivo de que no exista la formación de una onda de choque. Durante el colapso de la burbuja, la temperatura cerca de la pared externa es mas baja que la que se encuentra cerca del centro, ya que el aire y vapor cerca de la pared externa son enfriados por conducción térmica [6, 25]. Para la formación de onda de choque, la perturbación de presión emitida interiormente por la pared de la burbuja debe dar alcance y traspasar a las perturbaciones de presión previamente emitidas. La figura 2 muestra la dificultad que se presenta para formarse una onda de choque dentro de una burbuja que se esta colapsando.



*Figura 2.-Dificultad para la formación de una onda de choque dentro de una burbuja que colapsa*

Fundamentados en las discusiones anteriores, en 1999, Hilgenfeldt [26] y Yasui [27] reportan que la emisión de luz de la SLSB se puede originar por formación de un plasma en el centro de la burbuja. Ellos toman como base sus cálculos numéricos y asumen que existe uniformidad espacial de la temperatura dentro de la burbuja sonoluminiscente, al igual que en el modelo de hot-spot. Esta uniformidad espacial de la temperatura fue vista experimentalmente en burbujas dentro de una solución de  $H_2SO_4$  acuosa concentrada [27b].

Los pulsos de luz emitidos por un plasma son explicados en la figura 3. Los gases y el vapor son débilmente ionizados a temperatura y presión altas dentro de la burbuja; hay electrones moviéndose alrededor como movimiento térmico que se acercan frecuentemente a iones positivos y átomos neutros provocando una aceleración o desaceleración de estos electrones [6]. Cuando una partícula cargada, como algún electrón, es acelerada o desacelerada, se emite luz, esto se denomina radiación Bremsstrahlung [28].

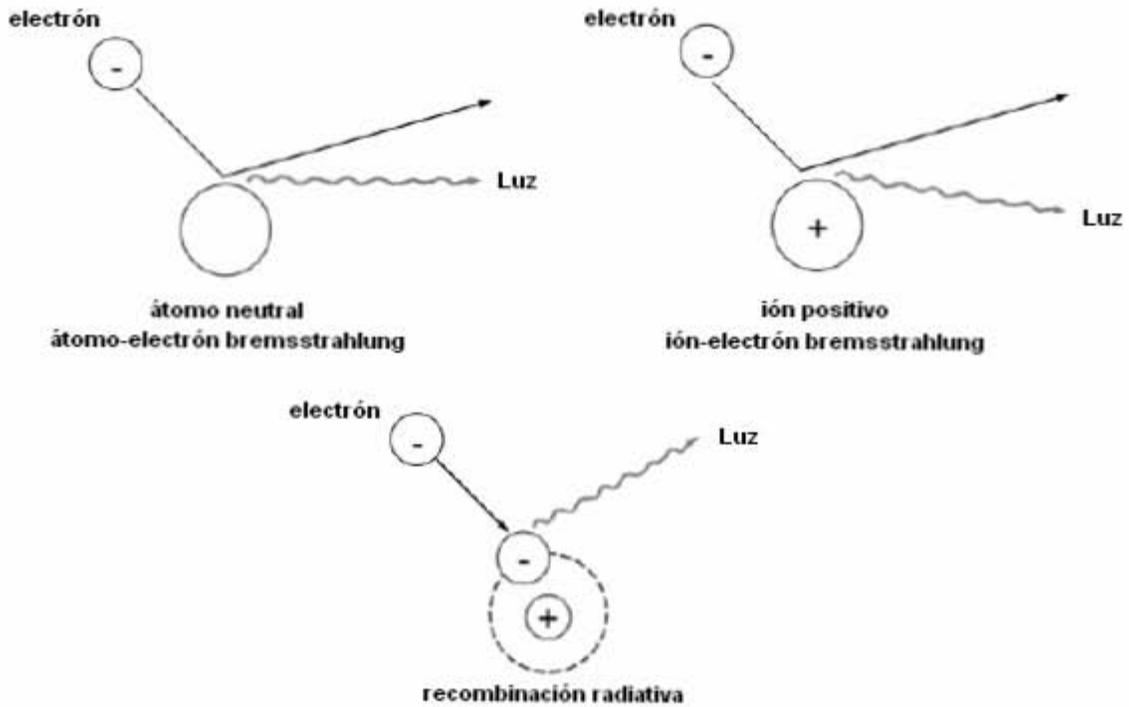


Figura 3.-Emisión de luz de los electrones en un plasma

En los plasmas conocidos, la frecuencia de las colisiones entre electrones e iones positivos es más alta que con un átomo neutro debido a diferencias que existen entre las distancias de interacción [6, 30]. Sin embargo, en el plasma formado dentro de la burbuja SBLB la frecuencia de las colisiones entre los electrones con los átomos neutros es más alta que con los iones positivos porque la densidad de los átomos neutros es muy alta.

De acuerdo con Hilgenfeldt [26, 31] y Yasui [27], la recombinación radiativa, la cual es la emisión de luz cuando un electrón y un ión positivo se recombinan para formar un átomo neutro, también contribuye considerablemente en la emisión de luz en una burbuja SLSB.

## **I.4.- DISPOSITIVOS PARA PRODUCIR SL**

Aunque el mecanismo fenomenológico de la SL es complicado de explicar, el fenómeno es relativamente fácil de reproducir y alterar una vez que se conocen las variables físicas a controlar. Estas variables físicas experimentalmente controlables, como la intensidad y frecuencia de la onda acústica aplicada, la presión y temperatura del agua, etc. presentan un intervalo preciso para que se presente la SLSB.

En este sentido, se han construido diferentes tipos de aparatos con características similares, tanto para producir SLSB como SLMB. En todos ellos se producen cavidades llenas de algún gas y generalmente se usa un transductor o una bocina para generar la onda acústica.

### **I.4.1.- REPRODUCCIÓN DE SONOLUMINISCENCIA DE MÚLTIPLES BURBUJAS (SLMB)**

En general existen dos métodos experimentales para producir SLMB [6]: uno de tipo de onda estacionaria [32], y el otro de tipo bocina [33].

En el primer caso, el líquido es irradiado por una onda ultrasónica desde la superficie del contenedor, a través de un transductor ultrasónico unido a él; figura 4. En el líquido se forma una onda estacionaria por la superposición de la onda incidente y la onda reflejada.

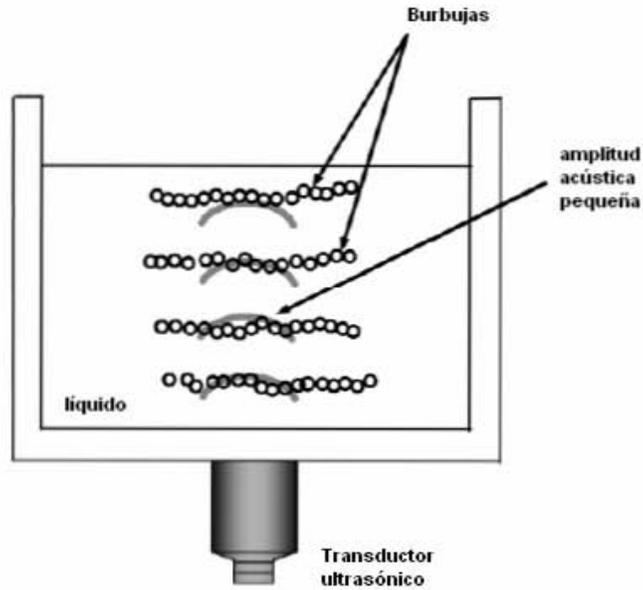


Figura 4.- Aparato experimental para producir SLMB de tipo de onda estacionaria

El segundo método experimental consiste en un a bocina ultrasónica que es sumergida en un líquido e irradia ultrasonido desde la punta de dicha bocina, figura 5.

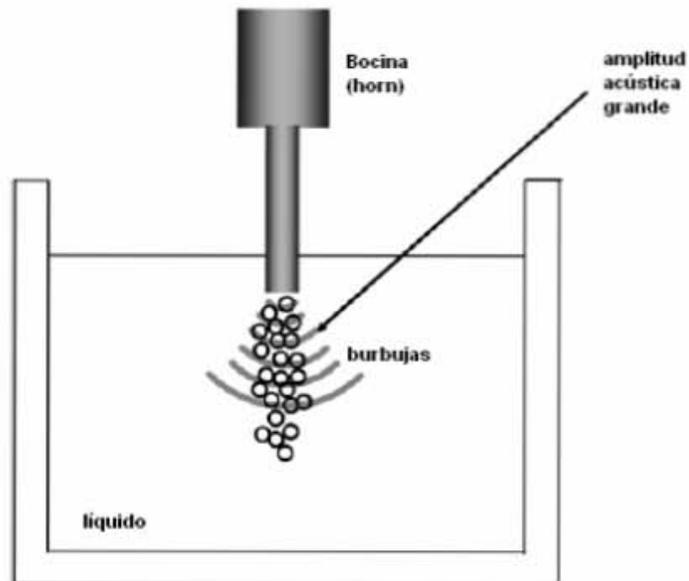


Figura 5.- Aparato experimental para producir SLMB de tipo de bocina

En el mercado ya existen aparatos de tipo bocina “listos para usarse” que reproducen el fenómeno de SLMB. Como ejemplos se tienen el SL100 y el nuevo SL100B (Figura 6) de TEACHSPIN, siendo estos los únicos dispositivos que es posible encontrar en Internet y que pueden ser vendidos fuera de su país de origen. La siguiente tabla muestra algunas de sus características y su precio al público [34]:

| <b>CARACTERÍSTICAS</b>              | <b>SL100</b> | <b>SL100B</b> |
|-------------------------------------|--------------|---------------|
| Bocina ultrasónica                  | x            | x             |
| Cavidad resonante                   | x            | x             |
| Micrófono PZT                       | x            | x             |
| Contenedor para desgasificación     | x            | x             |
| Amp. De potencia (HV)               | x            | x             |
| Circuito de detección de resonancia | x            | x             |
| Inyector de burbuja                 | x            | x             |
| Entrada Fotomultiplicador*          |              | x             |
| Entrada Hidrófono*                  |              | x             |
| Control de temperatura*             |              | x             |
| Precio en US\$                      | 2495         | 4165**        |

\*Estos dispositivos se venden por separado.

\*\*Precio para pedidos fuera de US/CA

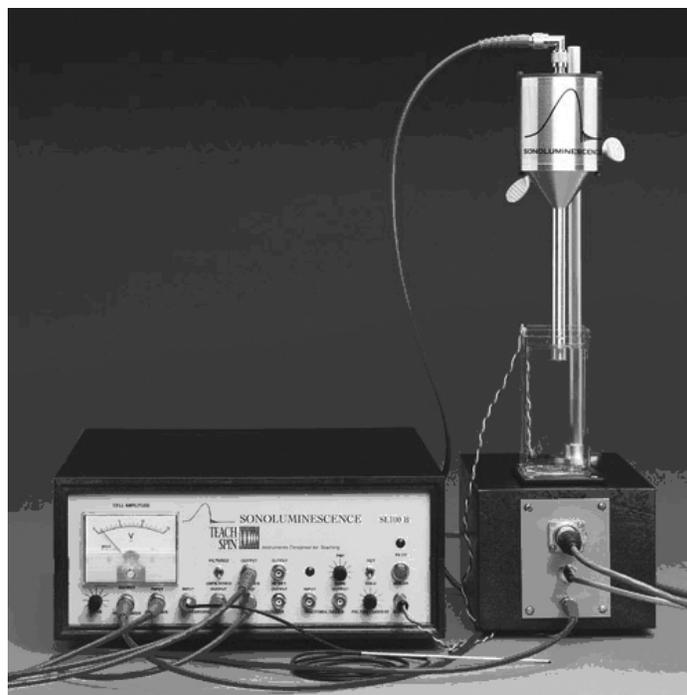


Figura 6.- Aparato para producir SLMB de TEACHSPIN, mod. SL100B

#### I.4.2.- PRODUCCIÓN DE SONOLUMINISCENCIA DE UNA SOLA BURBUJA (SLSB)

Hasta ahora se han realizado numerosos experimentos con tres tipos de aparatos que producen sonoluminiscencia. El más común de ellos es el que utilizó Gaitan y se debe a su simplicidad en la fabricación, figura 7. Básicamente consiste en un matraz esférico al que se le adhieren dos transductores piezoeléctricos en forma de anillo a los lados. En este aparato, se aplica sobre el líquido una onda ultrasónica estacionaria utilizando la salida amplificada de un generador de señales. Si esta señal se aplica con una determinada amplitud y frecuencia, es capaz de atrapar una sola burbuja<sup>1</sup> en el antinodo de presión de

---

<sup>1</sup> La cantidad de burbujas atrapadas depende del modo de vibración en el cual se encuentre resonando el sistema. Dicha cantidad puede ser 1, 2, 4, 6, ...  
F. B. Seeley, *Effects of higher-order modes and harmonics in single-bubble sonoluminescence*. J. Acoustic Soc. Am. **4**, 105, abril, (1999).

dicha onda debido a la fuerza de Bjerknes<sup>2</sup>, [6, 9, 11-12]. Y si las condiciones de presión, frecuencia, temperatura y cantidad de aire disuelto en el agua son las adecuadas, la burbuja emite luz en cada colapso con un periodo igual al de la onda ultrasónica de excitación.

Algo importante con este aparato es la reproducibilidad del experimento, la cual depende significativamente de la frecuencia de resonancia del sistema, y esta, entre otras cosas, depende del nivel del líquido y su temperatura en el matraz. Esto provoca que la SL no sea repetible fácilmente si no se conocen con detalle las principales variables que la afectan.

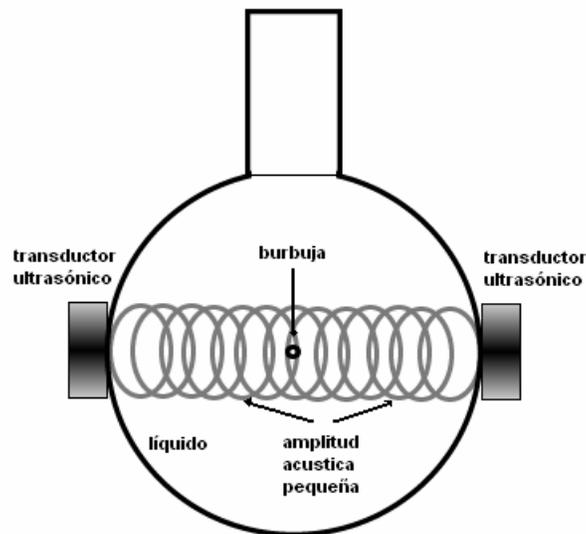
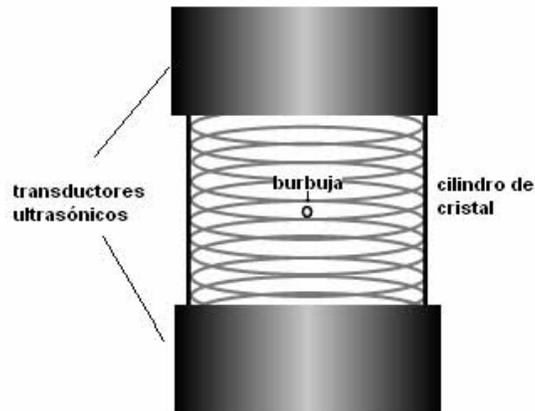


Figura 7.- Aparato para producir SLSB de matraz esférico

Una solución para estos problemas se presenta en la figura 8, en donde se muestra el aparato de tipo cilindro utilizado para controlar la composición y la presión parcial del gas contenido en el resonador, así como el volumen de líquido dentro de él.

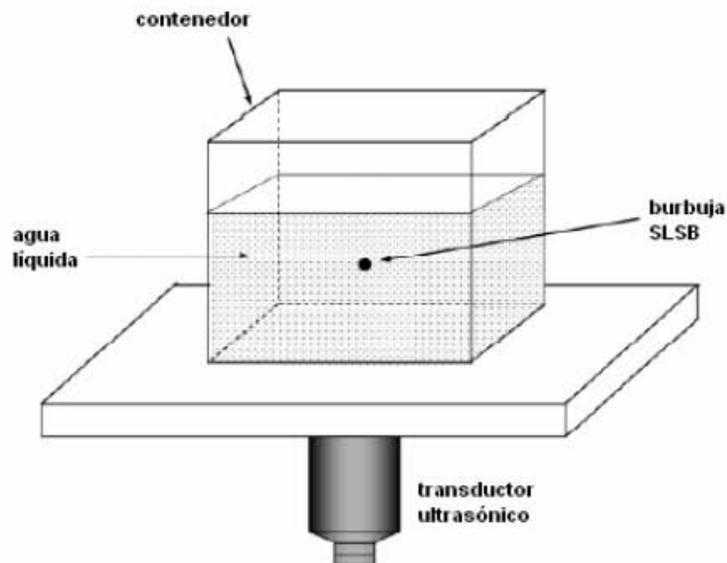
<sup>2</sup> Existen dos fenómenos físicos que se clasifican como fuerza de Bjerknes: la atracción o repulsión de burbujas independientes en el nodo o antinodo de presión de un campo acústico estacionario y la atracción mutua o repulsión de burbujas oscilantes. R. Mettin, et Al, *Bjerknes forces between small cavitation bubbles in a strong acoustic field*. Phys. Rev. E, **56**, 2924-2931, (1997).

Al igual que el aparato de tipo matraz esférico, en este también se utilizan dos transductores piezoeléctricos en forma de anillo, aunque en general se prefieren los de forma de disco [12, 35, 36].



*Figura 8.- Aparato para producir SLSB de tipo cilindro*

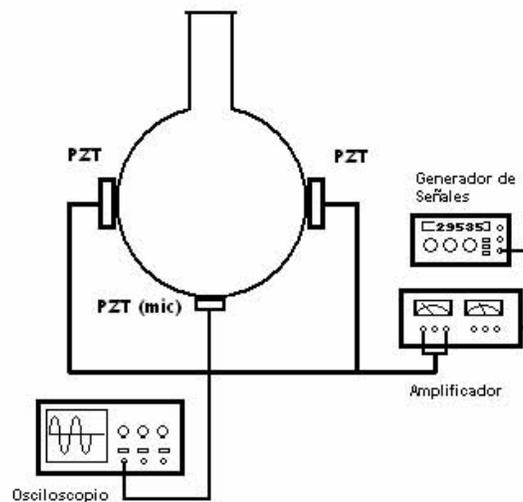
Otro aparato muy utilizado para producir SLSB se presenta en la figura 9 [5, 11]. La peculiaridad de éste, es que a su vez es posible obtener, mediante algunos cambios en las variables físicas que afectan el experimento, SLMB.



*Figura 9.- Aparato para producir SLSB de tipo onda estacionaria*

En la elección del aparato para la producción de SL se debe tomar en cuenta la disponibilidad de los contenedores, así como de los transductores. En este sentido, y considerando que la SLSB es la mejor forma para estudiar la SL, se elige el aparato diseñado por Gaitan como prototipo. Un aspecto importante de este aparato es que la geometría del matraz hace que las ondas aplicadas dentro de él sean consideradas como ondas planas.

La figura 10 muestra el diagrama del sistema desarrollado y adaptado para las condiciones de presión barométrica y temperatura promedio de la Ciudad de México. El sistema consta de un matraz esférico, dos transductores piezoeléctricos, un transductor piezoeléctrico como micrófono, un osciloscopio y un amplificador de audio.



*Figura 10.- Sistema desarrollado por Gaitan para obtener SLSB*

A lo largo de este trabajo de investigación se presenta la forma adecuada para su acoplamiento, los materiales y equipo necesario para su funcionamiento, los pasos a seguir para la realización de los experimentos, algunas sugerencias y observaciones que se deban tener en cuenta, así como los resultados que se obtuvieron de los experimentos realizados.

# CAPÍTULO 1

## 1.1.- MONTAJE EXPERIMENTAL / DISEÑO ELECTRÓNICO

Este capítulo describe los pasos a seguir para el montaje de un sistema eficaz para reproducir SLSB. Se enlistan los materiales y el equipo necesario. Se describe como se debe realizar el acoplamiento, el ajuste y la calibración. Al final del mismo se explica en forma general el funcionamiento de dicho aparato.

## 1.2.- APARATO BÁSICO PARA OBTENER SL

Gaitan en 1989 reportó un sistema con el cual era posible hacer levitar una burbuja de aire en el interior de un matraz esférico lleno de agua, y encontró que ajustando algunos parámetros del sistema era posible hacer que dicha burbuja emitiera luz.

El aparato reportado esta constituido principalmente de:

- a) Una cavidad resonante (matraz esférico, cilindro hueco, etc.),
- b) Un medio en el cual se va hacer levitar la burbuja, (agua, glicerina, HCl, etc.),
- d) Un sistema para mantener un campo acústico estacionario dentro de la cavidad resonante
- e) Un dispositivo para generar burbujas (hilo caliente, pipeta, etc.)

El procedimiento seguido por Gaitan para obtener SL era atrapar la burbuja con una onda senoidal acústica estacionaria e ir incrementando lentamente su amplitud hasta hacerla entrar en resonancia con la cavidad. De esta forma, el radio de la burbuja evoluciona a través de unos estados que hacen que la energía transferida del campo acústico a la burbuja se concentre y esta emita un pulso de luz por ciclo [11], SLSB en otras palabras.

Sin embargo, el procedimiento descrito anteriormente no resulta fácil de llevar a cabo debido a que:

- Es difícil generar una sola burbuja, por lo general se tienen muchas y de diversos tamaños dependiendo del método empleado.
- El campo acústico debe ser manipulado para atrapar la burbuja correcta (en tamaño) en el punto exacto, y hacerla quedar estacionaria. Luego conducirla a un punto en donde las oscilaciones aplicadas no lleguen a disolverla dentro del medio o tan débiles que no puedan mantener la burbuja estacionaria.

Es común que los sistemas reportados que se emplean para obtener la SL guarden algunos secretos. Sin embargo, aquí se planteará como llevar a cabo todo el procedimiento.

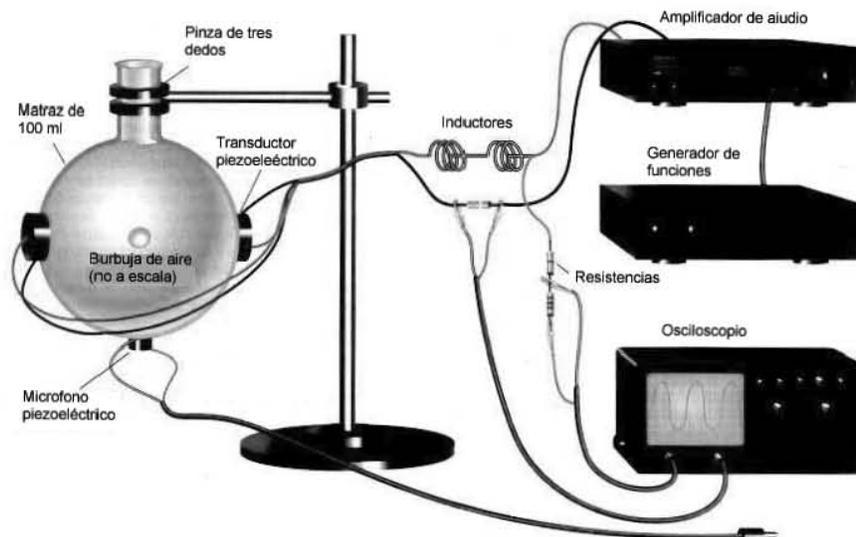


Figura 1.1.- Esquema del sistema básico para obtener SLSB.

La figura 1.1 muestra el sistema para obtener SL publicado por Hiller y Barber en 1995 [37], el cual incluye al igual que el de Gaitan [9]:

A) un resonador acústico esférico (matraz de 100 ml),

- B) dos transductores piezoeléctricos (PZT) para generar las ondas acústicas estacionarias a través del medio
- C) un micrófono (transductor piezoeléctrico)
- D) un par de inductores
- E) un amplificador de potencia (de audio)
- F) un generador de señales
- G) y un osciloscopio

Mucho del “*know-how*” necesario para producir SLSB generalmente se omite o no se le da la suficiente importancia en las publicaciones, como por ejemplo, ¿Por qué se utiliza un inductor, y cuál debe ser su impedancia?, ¿Qué potencia debe tener el amplificador de audio?, ¿Cuáles son las características mínimas con que debe contar el generador de funciones?, ¿Cómo saber que se está en trabajando en la frecuencia correcta?, ¿Cuál es la amplitud que se debe aplicar a los transductores para atrapar una burbuja? Y ¿Cuál sería para tener SL?, o ¿Por qué si la SL se supone muy estable se vuelve muy difícil producirla después de dos horas de trabajo? Estas preguntas y otros detalles, que ocurren durante la experimentación, se contestan más adelante a fin de que nada se omita o quede oculto y sea posible producir SL de una manera comprensible.

## **1.3.- DESARROLLO DEL PROTOTIPO EXPERIMENTAL**

### **1.3.1.- MATERIAL, EQUIPO Y ARTÍCULOS EMPLEADOS**

A continuación se especifican los materiales, equipo electrónico y diversos artículos empleados para la implementación del prototipo.

#### **MATERIALES**

- Alambre magneto para embobinar calibre 22.
- Cable coaxial.

- Epóxico transparente de secado rápido (~5 min).

## EQUIPO ELECTRÓNICO

- Generador de funciones HP-Agilent modelo 33120A
- Un osciloscopio Tektronix modelo TDS520D.
- Amplificador de Audio ONKIO modelo M282 de 100 Wrms. La potencia del amplificador puede ser mayor, en caso de que ya se cuente con uno.
- Y como pre-amplificador una consola mezcladora Yamaha modelo MG10/2.

## ARTÍCULOS

La siguiente lista detalla los artículos necesarios que conforman el resonador:

- Un matraz esférico de 290 ml. Otra opción es utilizar un matraz de destilación al cual se modifica cortando una parte del cuello. En estos experimentos se utiliza un matraz esférico marca Schoff-Duran manufacturado en Alemania.
- Dos transductores piezoeléctricos PZT (C-5400, Navy Type I), tipo anillo con diámetro exterior (OD) de 20 mm, diámetro interior (ID) de 7.85 mm y espesor de 4.4 mm, de Channel Industries Inc.
- Un transductor piezoeléctrico PZT (C-5400, Navy Type I), tipo disco con diámetro de 8 mm y espesor de 3.05 mm, de Channel Industries Inc,

## EQUIPO AUXILIAR

Para desgasificar el agua, realizar mediciones de temperatura, presión acústica y porcentaje de oxígeno disuelto en el agua se cuenta con lo siguiente:

- Bomba de vacío de 1 Hp.
- Termómetros: Termopar tipo K para multímetro Fluke® mod. 80PK-1 y termómetro de mercurio.
- Hidrófono de aguja, marca Precision Acoustics Ltd. Cuenta con un amplificador independiente de 25 dB como auxiliar. Las hojas de especificación se presentan en el apéndice A.
- Oxímetro, marca y modelo YSI 58. El apéndice B presenta los datos del fabricante.

### **1.3.2.- ENSAMBLE EXPERIMENTAL**

El ensamble experimental consiste en la integración de todos los materiales, artículos y equipo electrónico utilizados para la generación de SL, como lo es: la preparación y pegado de los transductores, la construcción de una bobina a partir de su diseño, pruebas de acoplamiento entre al amplificador de audio y los transductores, el acondicionamiento del medio y cuidados especiales.

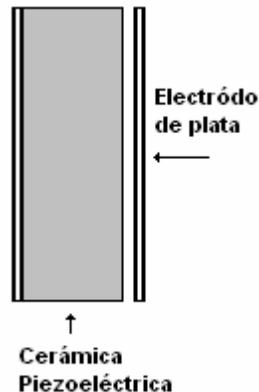
En la última parte se presenta la explicación del funcionamiento del sistema ya acoplado, así como los pasos a seguir para la obtención de SLSB.

#### **TRANSDUCTORES PIEZOELÉCTRICOS**

Los transductores son dispositivos que transforman una señal eléctrica en mecánica y viceversa. Así, un transductor piezoeléctrico esta manufacturado con materiales cerámicos; a partir de un polvo fino que se comprime y sinteriza a alta presión. Es mecánicamente frágil e implica que su manejo debe ser cuidadoso, hay que evitar golpes ya que esto provocaría fracturas internas que harían que su funcionamiento no fuese el adecuado. En su estado original, éste polvo está compuesto por una multitud de dominios con polarización aleatoria. Consecuentemente, son materiales isotrópos y no poseen propiedades piezoeléctricas. Es solo mediante la aplicación de un campo eléctrico muy intenso que se logran orientar los dominios, fijando la polarización en un eje. Una vez que el material cerámico ha sido sinterizado y polarizado, se le aplica

una cubierta de algún material conductor, llamado electrodo, figura 1.2. Es común utilizar plata para este propósito, pero existen aplicaciones en donde las cerámicas son sometidas a altas temperaturas por lo que pueden despolarizarse, en estos casos en particular se utiliza níquel [38].

Normalmente el electrodo cubre toda la superficie axial de la cerámica, aunque puede haber algunos casos, bajo especificaciones especiales, que tengan un margen o diseño particular. En cualquier caso, la polarización del material cerámico se indica comúnmente grabando el signo de “+” ó punto (-) sobre una de las caras.



*Figura 1.2.- Cerámica Piezoeléctrica con electrodos*

Para este proyecto se emplea como material cerámico:  $\text{PbZrTiO}_3$  (Zicornato de titanato de plomo, o un PZT). Dicho material presenta características excelentes para esta aplicación: un factor de acoplamiento elevado con constantes piezoeléctricas y dieléctricas altas.

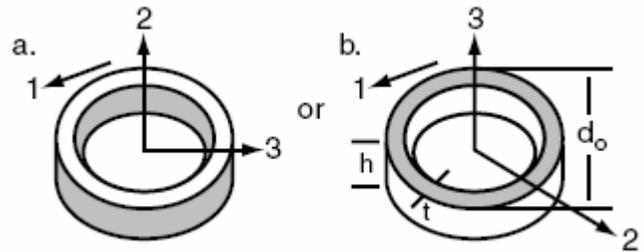
### PZT En Forma De Anillo Cilíndrico

El comportamiento de un transductor piezoeléctrico es caracterizado por diversos parámetros como la constante piezoeléctrica  $k$ , las constantes elásticas del material y la geometría de la cerámica. Ésta última es la que determina las propiedades piezoeléctricas que tendrá el transductor, además de limitar el lugar en donde se vaya a colocar.

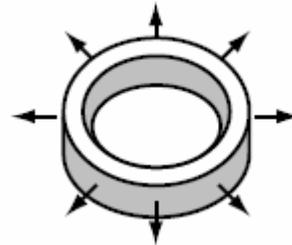
En los experimentos realizados por Gaitan [9], Crum [11] y Barber [12], se emplean transductores piezoeléctricos con forma de un anillo cilíndrico. Nosotros también usamos esta geometría ya que se ajusta a la superficie esférica del matraz por carecer de un centro plano.

Las características piezoeléctricas de los transductores PZT con forma de anillo se describen a continuación:

**ANILLO TRANSVERSAL**



**MODO DE MOVIMIENTO PRIMARIO O FUERZA APLICADA**



**GEOMETRIA**

$$d_o > 3h > 3t$$

**FRECUENCIA**

$$\frac{N_c}{d_m}$$

**CAPACITANCIA**

$$a. C = \frac{2\pi K_3^T \epsilon_0 h}{\ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}, \quad b. C = \frac{\pi K_3^T \epsilon_0 (d_o^2 - d_i^2)}{4h}$$

**VOLTAGE GENERADO**

$$a. V = g_{31} \frac{d_o}{2} P, \quad b. V = \frac{1}{2} g_{31} h \frac{d_o}{t} P$$

**DESPLAZAMIENTO**

$$a. \Delta d_m = \frac{d_{31} d_m}{t} V, \quad b. \Delta d_m = \frac{d_{31} d_m}{h} V$$

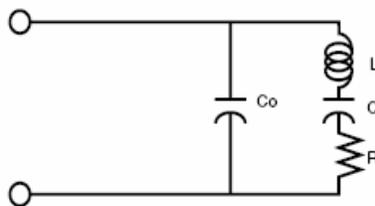
Donde:

- $C$  Capacitancia
- $d_{ij}$  Constante piezoeléctrica ( $d_{31} = -135 \text{ e}^{-12} \text{ m/V}$ )\*
- $d_i$  Diámetro interno

- $d_m$  Diámetro medio  $(d_o + d_i)/2$
  - $d_o$  Diámetro exterior
  - $\epsilon_0$  Permitividad del vacío (8.85 e-12 F/m)
  - $g_{ij}$  Constante piezoeléctrica ( $g_{31} = -11.7 \text{ e}^{-3} \text{ Vm/N}$ )\*
  - $h$  Altura
  - $K_{ij}$  Coef. de acpto. Electromecánico ( $K_3^T = 1300$ )\*
  - $N$  Constante de frecuencia ( $N_{PZT} = 1040 \text{ Hz m}$ )\*
  - $P$  Presión
  - $t$  Ancho
  - $V$  Tensión (voltage)
- \* Datos del fabricante para PZT 5400 Navy I, ver apéndice C

### Circuito Eléctrico Equivalente

Desde un punto de vista electrónico los transductores piezoeléctricos son similares a los capacitores, con una capacitancia  $C$ , ya que la constante piezoeléctrica proporciona una cantidad de carga como una función de la fuerza deformante  $Q = kF$  [39]. Así, un circuito eléctrico equivalente que considera las características electromecánicas de la cerámica piezoeléctrica se constituye de la siguiente manera:



*Figura 1.3.- Circuito eléctrico equivalente para transductor cerámico*

De la figura 1.3, L, C y R representan las propiedades mecánicas análogas a la masa efectiva, compliancia y pérdidas mecánicas respectivamente.  $C_0$  es la capacitancia eléctrica [38]. Sin embargo, el inconveniente de este circuito es que solo modela las frecuencias cercanas a la primera resonancia fundamental.

## Acondicionamiento De Los Discos De PZT Para Usarlos Como Transductores

Procedimiento a seguir para acondicionar los discos de PZT como transductores:

1. Eliminación del óxido formado en los transductores por exposición al aire. Esto se realiza por frotado con una *goma dura* para borrar grafito, teniendo cuidado de no calentar ni rallar la superficie del transductor. La figura 1.4 muestra los transductores antes (a) y después (b) de limpiados.



Figura. 1.4 (a) PZT con óxido, 1.4 (b) PZT una vez que se limpiaron

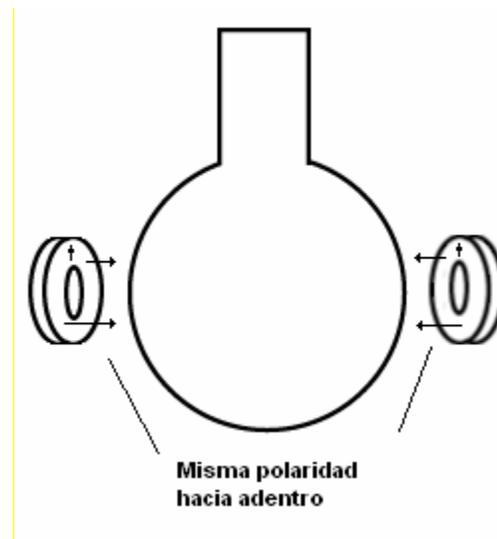
2. Para tener un medio de contacto entre los transductores y el generador de señales, se fijan alambres conductores en las superficies de los electrodos de las cerámicas. Se recomienda emplear alambre magneto (alambre de cobre esmaltado, calibre 22,  $A = 0.65$  mm) que soporta una corriente<sup>1</sup> superior a la que circulará a través de él y además es manipulable.
3. Para soldar los alambres se utiliza soldadura de 62% estaño, 36% plomo y 2% plata. Los alambres deben estar libres de esmalte en sus puntas, aproximadamente 2 mm., y bañados en soldadura. Para asegurar que el transductor tenga mejor contacto con el matraz y que se tengan alambres de repuesto, hay que soldar tres alambres, de 15 cm aproximadamente, sobre cada cara de la cerámica a una distancia equidistante entre cada uno. Hay que tener cuidado al hacer esto ya que los electrodos de los cerámicos

---

<sup>1</sup> Según la *American Wire Gauge standard*, un alambre calibre 22 puede soportar una corriente máxima de 1.0 A sin que éste pierda sus propiedades. Para obtener estos datos, la AWGS aplica  $3.0 A/mm^2$  a todos los alambres a probar.

pueden ser evaporados si se aplica calor excesivo durante el proceso de soldar. Además, la cerámica puede destruirse si alcanza una temperatura aproximada a los  $320^{\circ} \text{C}^2$ , es por ello que se deben soldar las puntas de los alambres rápidamente, no tardar más de cinco segundos y esperar algún tiempo, para que se enfríe la cerámica, antes de continuar con los demás.

4. Al aplicar un voltaje a los transductores, éstos se expandirán de un lado y se contraerán del otro debido a la polarización que poseen. Es por ello, que se colocan sobre el matraz con la polarización encontrada, tal y como se muestra en la figura 1.5, para que funcionen al unísono. Asimismo, los transductores tienen una marca “+” para indicar el lado positivo. Por razones de seguridad el lado positivo de los transductores es pegado del lado del matraz, ya que éste lado conducirá una tensión elevada. La figura 1.6 muestra los transductores con los alambres colocados y soldados.



*Figura 1.5.- Forma de colocar los transductores de anillo en el matraz*

---

<sup>2</sup> Temperatura de Curie. Apéndice C.

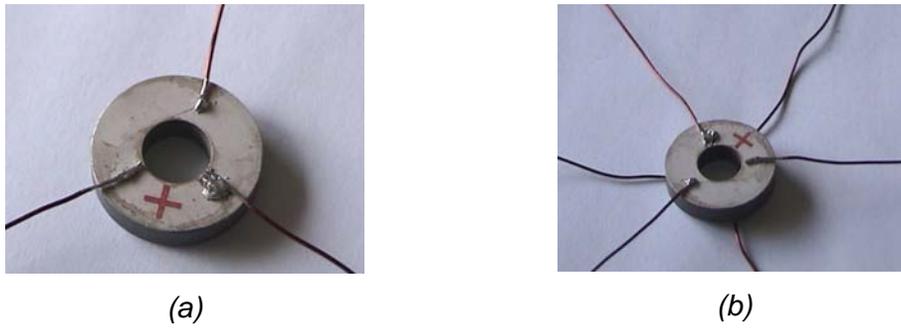


Figura 1.6(a) PZT soldado en una cara, 13(b) PZT soldado en las dos caras

### Acondicionamiento del Disco de PZT para Usarlo Como Sensor

El transductor de disco es preparado de la misma forma que los anteriores; sin embargo, en éste no importa el eje de polarización y en consecuencia es indiferente que lado queda pegado al matraz, ya que solo se utiliza como micrófono (*mic*).

Para encontrar la posición más adecuada para adquirir las señales, se realizaron pruebas en diferentes posiciones del matraz. Un transductor piezoeléctrico se coloca en posiciones P1, P2, P3 y P4 angulares con respecto al eje acústico y se mide el voltaje pico a pico, ver figura 1.7. Los resultados se despliegan en la tabla 1.1.

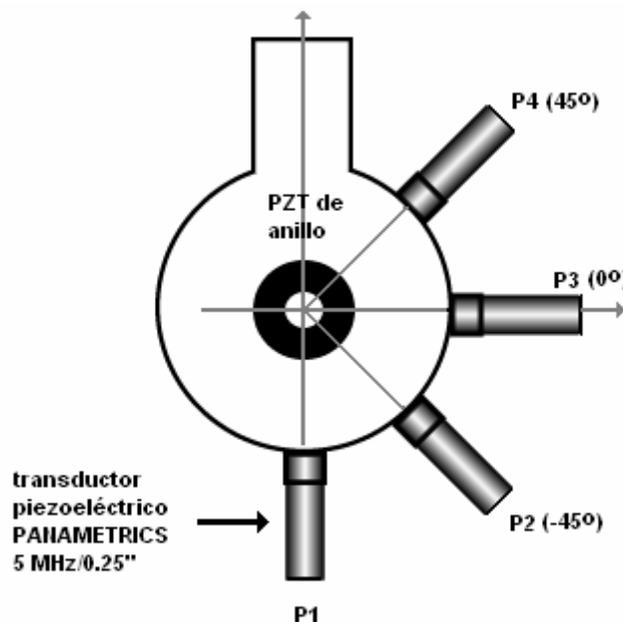


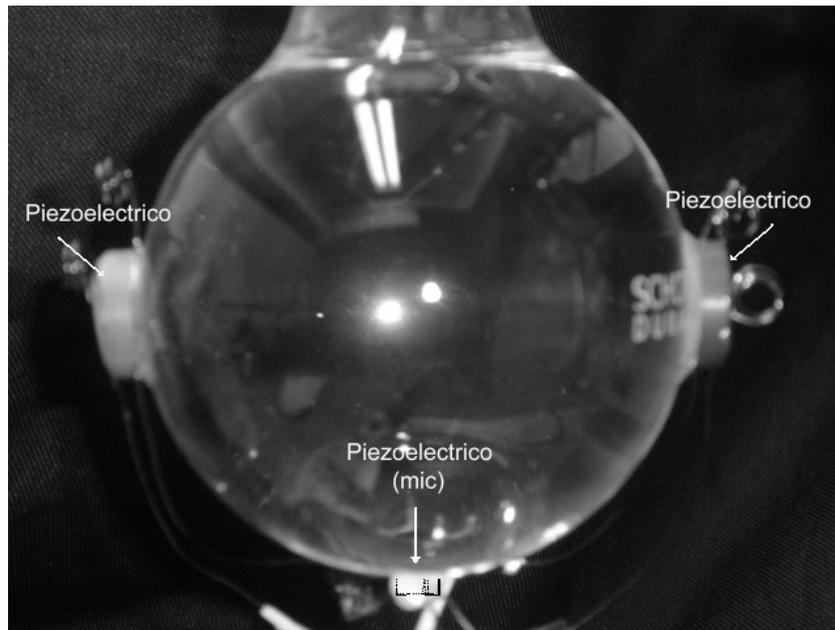
Figura 1.7.- Pruebas de colocación para sensor piezoeléctrico

| <b>Posición en el matraz</b>  | <b>P1</b>     | <b>P2</b>     | <b>P3</b>     | <b>P4</b>     |
|---|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Resultados experimentales en [mVpp]. Condiciones iniciales: 50.7 kHz, 19°C, 15.98V (del amplificador) | 216           | 266           | 196           | 310           |
|   | 234           | 240           | 204           | 236           |
|   | 186           | 196           | 244           | 230           |
|   | 198           | 228           | 184           | 284           |
|   | 264           | 290           | 188           | 234           |
|   | 200           | 146           | 170           | 270           |
|   | 212           | 176           | 172           | 254           |
|   | 216           | 160           | 154           | 224           |
|   | 238           | 266           | 122           | 216           |
|   | 250           | 224           | 110           | 260           |
| <b>Promedio</b>   | <b>221.40</b> | <b>219.20</b> | <b>174.40</b> | <b>251.80</b> |
| <b>Desv. Est.</b>   | <b>24.66</b>  | <b>48.53</b>  | <b>39.15</b>  | <b>29.67</b>  |

*Tabla 1.1.- Mediciones de tensión pico a pico en diferentes posiciones del sensor piezoeléctrico*

Según los resultados de las pruebas (ver tabla 1.1), la mejor posición para colocar el sensor en la parte inferior del matraz (lugar P1). Esto debido a que las amplitudes de ondas acústicas presentan una menor desviación estándar en ese lugar.

## Fijación De Los Transductores En El Matraz



*Figura 1.8.- Transductores pegados en el matraz*

Una vez que se tienen los transductores preparados para ser colocados en el matraz, como lo muestra la figura 1.8, solo se deben tener en cuenta las siguientes indicaciones para su fijado: el epóxico seleccionado no debe encoger al secar, ya que puede provocar fracturas en las cerámicas piezoeléctricas, por otro lado, una vez que han sido pegados los transductores al matraz, se debe soldar solo un par de alambres (uno al lado positivo y uno al negativo) por cada transductor a un cable coaxial. El mic, a su vez, debe ir conectado también a un cable coaxial lo mas cerca posible de éste para eliminar la mayor cantidad de ruido posible.

## INDUCTOR VARIABLE

La bobina o *inductor variable* es utilizada como medio de acoplamiento eléctrico para tener un aumento en la tensión aplicada a los transductores, o lo que es lo mismo, una máxima transferencia de energía entre ellos y el amplificador, y con ello obtener una mayor presión acústica al interior de la cavidad resonante. Es

indispensable que la bobina utilizada sea de inductancia variable, ya que, como se mencionó anteriormente, las variaciones en el volumen del líquido utilizado en la cavidad resonante afectan la resonancia del sistema, además, esta inductancia cambiará de acuerdo a la frecuencia que se este utilizando. Es por ello que para tener una máxima transferencia de energía se deben realizar pequeños ajustes a la inductancia de acoplamiento una vez que se ha identificado la inductancia de acuerdo a la frecuencia que se utilizará.

### Cálculos Para El Inductor

La ecuación básica para el cálculo de la inductancia en una bobina es la siguiente:

$$L = \frac{N^2 A \mu_0 \mu_r}{l} \quad (1),$$

Donde:

L= inductancia [H]

N= número de vueltas del alambre

A= área del núcleo de ferrita [ $78.54 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ]

$\mu_r$ = permeabilidad magnética del núcleo de ferrita [100 H/m]

$\mu_0$ = permeabilidad magnética del vacío [ $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ]

l= longitud del núcleo de ferrita [0.14 m]

El intervalo del inductor construido para el prototipo experimental es de 8.44 mH (sin el núcleo) a 93.9 mH (con el núcleo centrado en el arrollamiento). Es importante destacar que para deslizar el núcleo de ferrita y hacer ajustes finos de inductancia, el embobinado del alambre magneto se realiza sobre un tubo de cartón duro. Las dimensiones finales del inductor ya terminado son las mostradas en la figura 1.9:

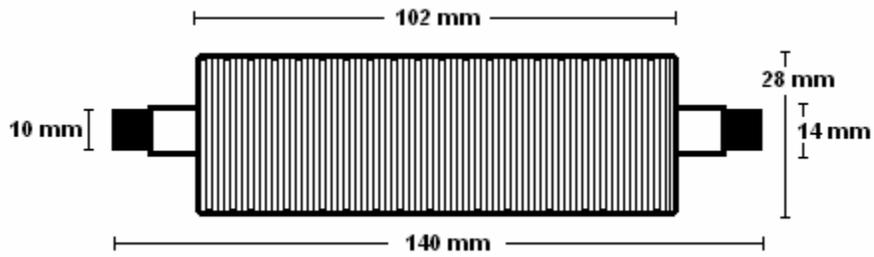
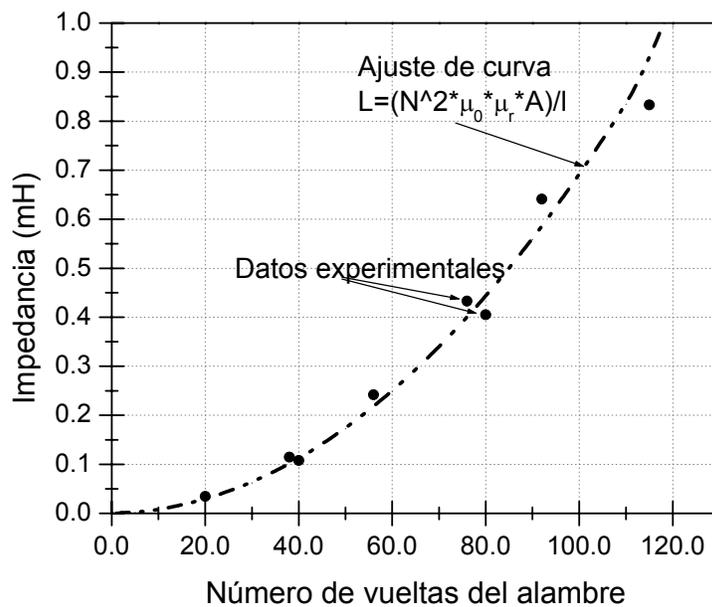


Figura 1.9.- Dimensiones de la bobina sintonizable con núcleo de ferrita

### Caracterización Eléctrica Del Inductor

El inductor variable utiliza como núcleo una barra de ferrita de 14 cm de longitud por 1 cm de diámetro y alambre magneto calibre 22. Durante la construcción del inductor se realizan mediciones cada 20 y/o 40 vueltas para obtener una curva que permita predecir el número de éstas necesario para determinada inductancia. En la gráfica 1.1 se observa el comportamiento de la inductancia al irse aumentando el número de vueltas alrededor del núcleo:



Gráfica 1.1.- Curva de inductancia obtenida a partir de los datos experimentales.

En la grafica también se observan los valores obtenidos experimentalmente y se muestra la curva de la ecuación 1, teniendo ambos una coincidencia aceptable. En este sentido, de la Grafica 1.1 es posible conocer el número aproximado de vueltas necesarias para alcanzar la inductancia requerida. De igual manera al despejar N de la ecuación 1 se obtiene este dato.

Cabe mencionar que estas dimensiones pueden variar dado que el valor de la impedancia de acoplamiento cambia con el tipo de amplificador y la frecuencia utilizada. El diseño de la bobina estará sujeto a un valor un poco mayor a la de *impedancia máxima requerida* (capítulo II).

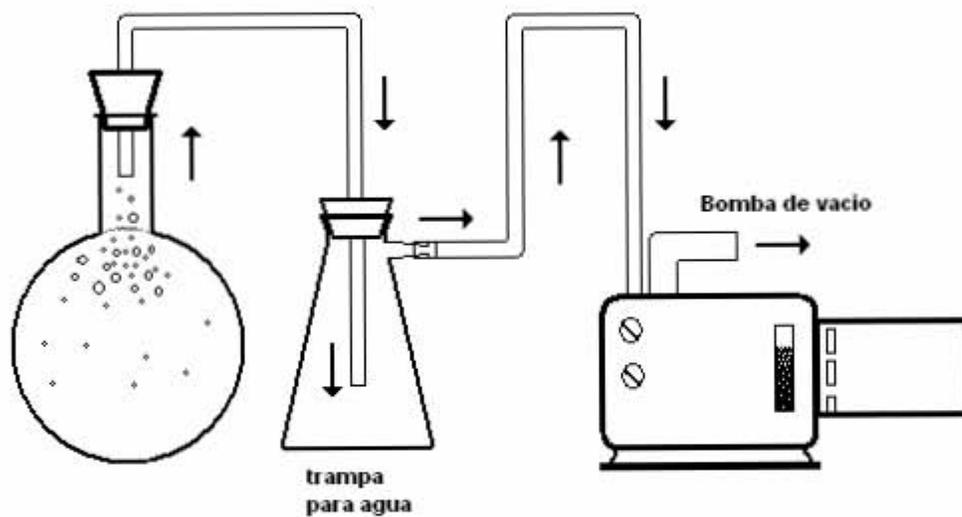
## PREPARACIÓN DEL AGUA

Para obtener SL es necesario que el agua este libre de todo tipo de partículas ya que interferirían en la formación de las burbujas. Es por ello se utiliza agua tridestilada.

La desgasificación del agua consiste en la extracción parcial del aire disuelto en ella. Ésta *semi-desgasificación* es realizada porque con un contenido de aire muy grande se formarían una gran cantidad de burbujas que interfieren en el proceso para la formación de SL. Según [10-12, 17], en condiciones al nivel del mar, es necesario que exista aproximadamente un 10% de saturación de aire en el agua, de lo contrario las burbujas son incontrolables. Los resultados de las pruebas para la ciudad de México, 2235 m sobre el nivel del mar, se presentan en el capítulo II.

El agua puede ser desgasificada por ebullición o por extracción del aire con una bomba de vacío. En el primer caso, el contenedor se debe cerrar herméticamente una vez que el agua ha hervido lo suficiente (de 20 a 30 minutos) y dejarse enfriar. Este método, sin embargo, no es recomendable ya que no se puede tener control de la cantidad de aire que queda disuelta en el agua. Por otro lado, utilizar una bomba de vacío resulta ser un mejor método para controlar la cantidad de aire que se requiera extraer.

Una vez que se cuenta con agua semi-desgasificada, ésta se debe verter muy lentamente en el matraz donde se realizará la SL hasta que llene por completo la parte esférica. Se debe formar un menisco en el cuello del matraz, de tal manera que se tenga una continuación de la forma esférica de éste. Otra forma es extraer el aire directamente del matraz donde se realiza el experimento, teniendo cuidado de no dañar los conectores de los transductores que se encuentran pegados a él. La figura 1.10 muestra este último procedimiento.



*Figura 1.10.- Procedimiento para realizar la semi-desgasificación*

## ACOPLAMIENTO DEL EQUIPO

En la figura 1.11 se observa el equipo acoplado y listo para conectarse al amplificador y al osciloscopio con las conexiones de cable coaxial. El cable coaxial que se utiliza para los transductores es de  $50 \Omega$  de impedancia con una longitud de 1 m para cada uno. En el caso del cable que une los PZT de anillo con el amplificador, éste se separa para dar cabida a la bobina como se observa en la figura.

El diagrama de conexión del matraz con el equipo se tiene en la figura 1.12. En este diagrama se cuenta con un pre-amplificador, el cual es un equipo opcional utilizado para control manual de la amplitud del amplificador de audio.

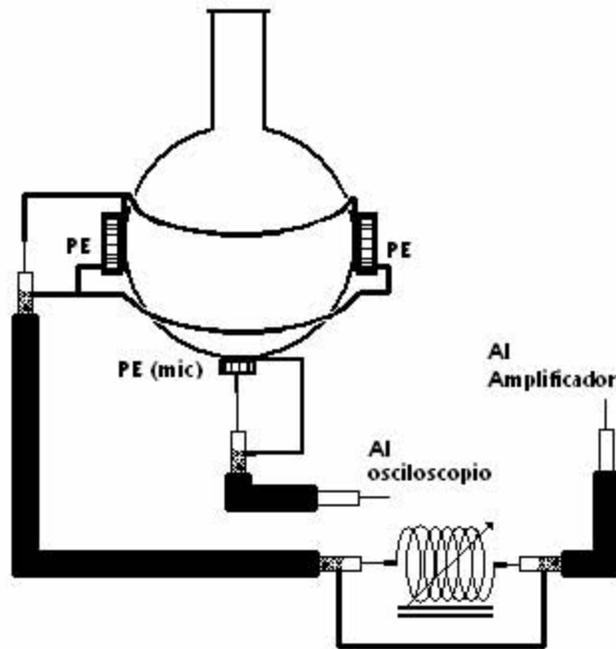


Figura 1.11.-Diagrama de conexión de los polos de los transductores a cables coaxiales

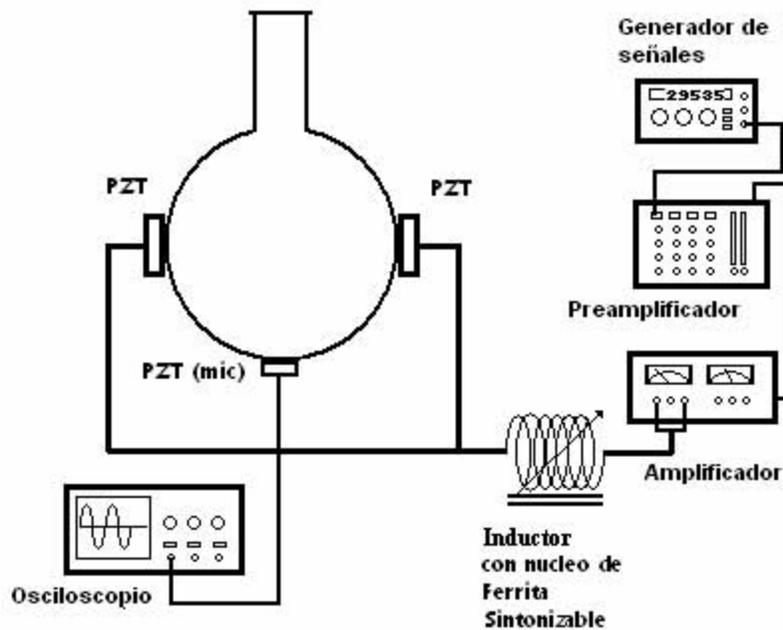
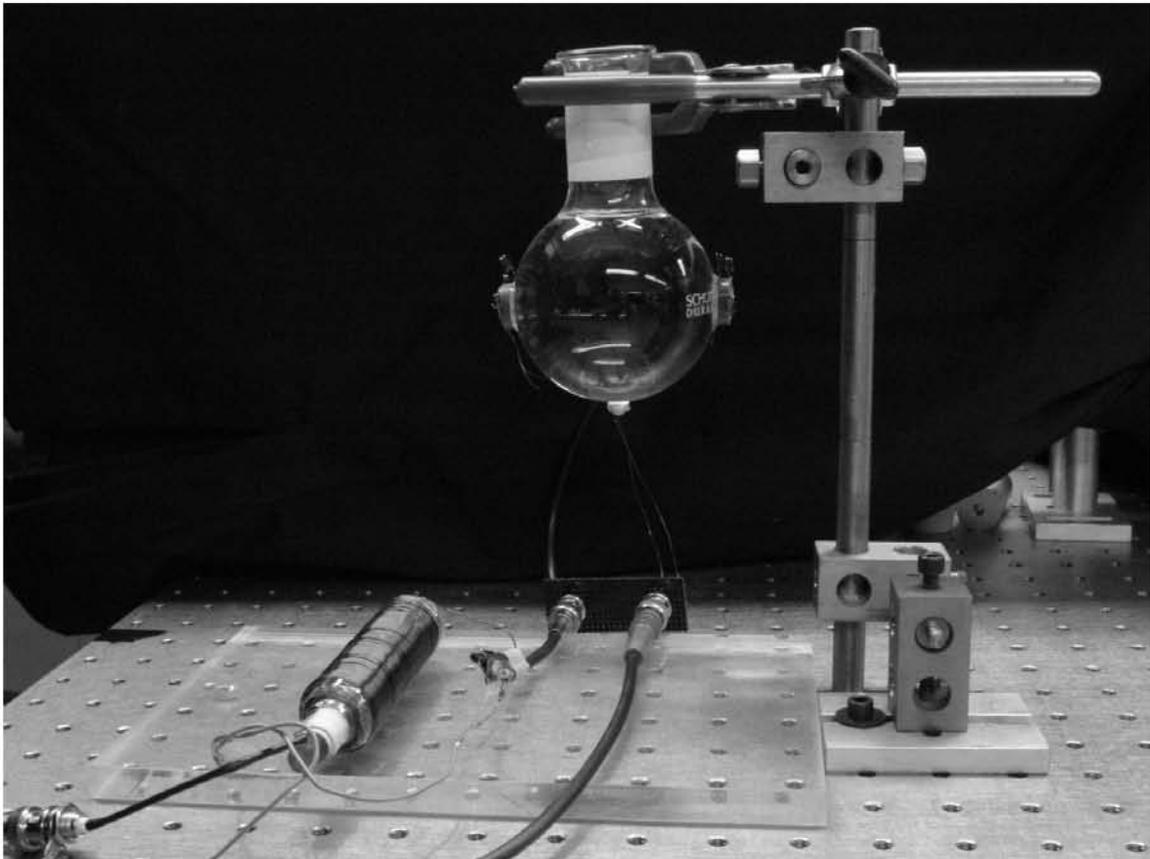


Figura 1.12.- Diagrama del Sistema completo para producir SLSB

El tipo de conectores que llevan los cables coaxiales en las puntas dependerá del tipo de conexión que necesiten los aparatos. Generalmente los osciloscopios y generadores de funciones tienen conectores BNC y el amplificador, por ser un aparato de audio comercial, utiliza conectores tipo banana y/o estereo. Habiendo realizado todo lo anterior se cuenta con un equipo capaz de producir SLSB, figura 1.13. El siguiente paso es la producción de la misma.



*Figura 1.13.- Fotografía del Sistema completo para producir SLSB*

# CAPÍTULO 2

## 2.1.- METODOLOGÍA PARA OBTENER SONOLUMINISCENCIA DE UNA SOLA BURBUJA

En este capítulo se describe detalladamente la metodología a seguir para obtener SLSB en sus diferentes modalidades; una burbuja, dos y tres burbujas de una forma sistemática; los experimentos registrados en este capítulo se realizaron a la altura de la Ciudad de México 2235 m.

La metodología para obtener sonoluminiscencia bajo condiciones de la ciudad de México tiene las siguientes etapas:

- 1) *Desgasificación adecuada de agua tri-destilada mediante vacío.*
- 2) *Llenado del matraz y su sujeción con pinzas a la estructura de soporte.*
- 3) *Aplicación del campo acústico senoidal y el barrido en frecuencia para establecer las frecuencias de resonancia del sistema matraz-soporte a temperatura ambiente.*
- 4) *Conexión del inductor para alcanzar el máximo voltaje de salida.*
- 5) *Nucleación de burbujas mediante inyección de agua por gravedad.*
- 6) *Estabilización de la burbuja mediante la optimización del voltaje y frecuencia aplicados.*
- 7) *Observación de la Sonoluminiscencia estable en las señales del mic y su control.*

## **PASO 1.- DESGASIFICACIÓN ADECUADA DE AGUA TRIDESTILADA MEDIANTE VACÍO.**

El proceso de desgasificación consiste en extraer del agua el aire disuelto mediante una bomba de vacío. La cantidad de aire extraído es controlado con el tiempo de aplicación del vacío dependiendo del volumen de agua que se tenga. La concentración de aire disuelto que permanece en el agua se monitorea midiendo la cantidad de oxígeno<sup>1</sup> disuelto en ella con un oxímetro. En el capítulo III se presentan a detalle los resultados de las pruebas experimentales, así como la gráfica de la que se infiere el tiempo que es necesario desgasificar el agua para obtener un nivel de saturación de aire adecuado para producir SL.

## **PASO 2.- LLENADO DEL MATRAZ Y SU SUJECIÓN CON PINZAS A LA ESTRUCTURA DE SOPORTE.**

El matraz debe estar lleno de agua tridestilada una vez que se tiene controlada la cantidad de aire disuelto en ella. En caso de que se necesite agregar mas agua, se utiliza una pipeta larga y se agrega, en pequeñas cantidades, agua igualmente desgasificada en tiempo y volumen; hay que tener cuidado en no agitar mucho el agua dentro del matraz.

El matraz se sostiene con una pinza de tres dedos o cualquier otro sujetador que soporte el peso del matraz con agua (figura 2.1). Dicho sujetador debe permitir una libre vibración del matraz.

---

<sup>1</sup> El aire contiene aproximadamente 16% de O<sub>2</sub>

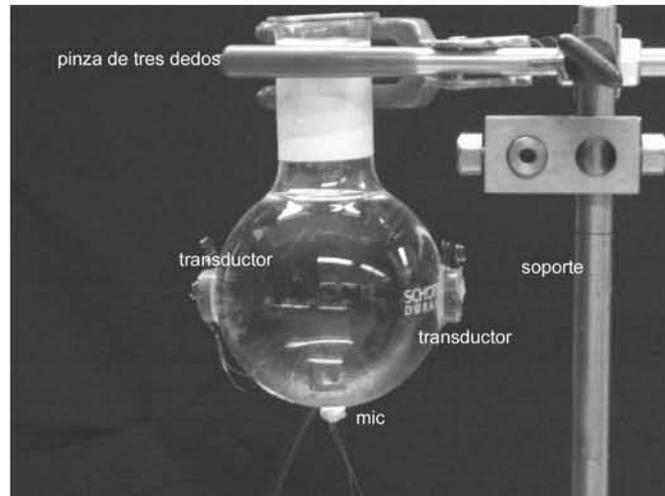


Figura 2.1.- Matraz para SLSB sostenido por pinza de tres dedos

### **PASO 3.- APLICACIÓN DEL CAMPO ACÚSTICO SENOIDAL Y EL BARRIDO EN FRECUENCIA PARA ESTABLECER LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA DEL SISTEMA MATRAZ-SOPORTE A TEMPERATURA AMBIENTE CONTROLADA.**

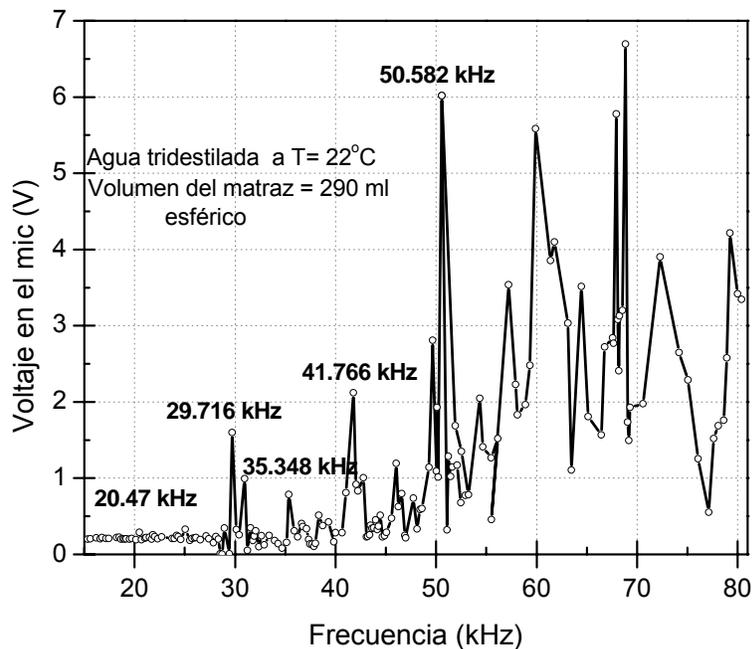
Se busca la frecuencia de resonancia del sistema y sus armónicos. Para encontrarlos se realiza un barrido en frecuencia con el generador de funciones y se buscan picos en el voltaje que se miden con el *mic*. Cabe resaltar que entre mayor sea la frecuencia de resonancia del sistema, mayor será el voltaje que mida el *mic*, además, entre mayor es la frecuencia de resonancia del sistema, menor es el radio de la burbuja que puede ser atrapada.

Uno de los problemas que surge al realizar el barrido en frecuencia es que la temperatura del agua cambia constantemente. Estas variaciones en la temperatura corresponden a corrimientos en la frecuencia de resonancia del sistema. Es por ello que el barrido de frecuencia se debe realizar rápidamente para que el cambio de temperatura pueda ser despreciado.

La respuesta en frecuencia del prototipo experimental se encuentra de la siguiente forma:

- A) Se utiliza el arreglo mostrado en la figura 1.12, desconectando el inductor para disminuir la interferencia electromagnética.
- B) Se fija la tensión administrada al sistema a un valor en donde se observe una señal de salida del *mic* a una frecuencia de 10 kHz.
- C) Se realiza un barrido grueso en frecuencia de la señal de entrada en intervalos de, p. ej., 100 Hz y se anotan los valores de tensión medidos por el *mic*.
- D) Alrededor de los máximos relativos encontrados en el paso anterior, se hace un ajuste fino (pasos de 1 Hz) y se registra la frecuencia, el voltaje medido por el *mic*, y la temperatura del agua.

Un ejemplo de la respuesta en frecuencia del sistema se despliega en la siguiente gráfica.



Gráfica 2.1.- Barrido en frecuencia del sistema a temperatura de 22°C, con 15  $v_{rms}$  de entrada. Los picos marcados corresponden a máximos relativos donde es posible observar SL

La frecuencia de resonancia para un resonador esférico se puede obtener aproximadamente con la siguiente ecuación:

$$f_r = \frac{v}{D}$$

Donde  $v$  es la velocidad del sonido en el medio por el que pasa y  $D$  el diámetro del recipiente.

Para una esfera de 290 ml ( $280 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ ) el diámetro es de 0.08 m, y teniendo  $v = 1450 \text{ m/s}$ , da como resultado que  $f_r = 18125 \text{ Hz}$ . Este resultado presenta un error de alrededor  $\pm 15\%$  cuando es comparado con los resultados experimentales.

#### **PASO 4.- CONEXIÓN DEL INDUCTOR PARA ALCANZAR EL MÁXIMO VOLTAJE DE SALIDA.**

Una vez que se elige la frecuencia a la que se va a trabajar (alguno de los máximos relativos encontrados), se conecta el inductor variable y se ajusta hasta que se observe un máximo en la señal del *mic*. Esta tensión será mucho mayor que la obtenida en el paso 3 debido a que el sistema (amplificador, bobina y transductores) queda acoplado para una máxima transferencia de energía. En este sentido, la inductancia de la bobina se puede aproximar utilizando la gráfica 2.2.

#### **MODELADO DEL SISTEMA RESONANTE**

Con fines puramente ilustrativos, el circuito eléctrico equivalente del sistema puede ser representado en su forma más sencilla como un circuito RCL en serie. Es necesario indicar que este modelo solo es aceptable cuando no existe cambio alguno en las condiciones operación; como la frecuencia, temperatura o

presión acústica aplicada. Y solo sirve para observar el comportamiento de la inductancia cuando hay cambios en la frecuencia de excitación del sistema.

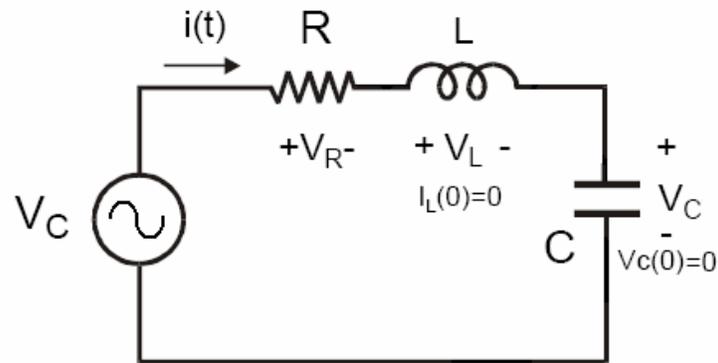
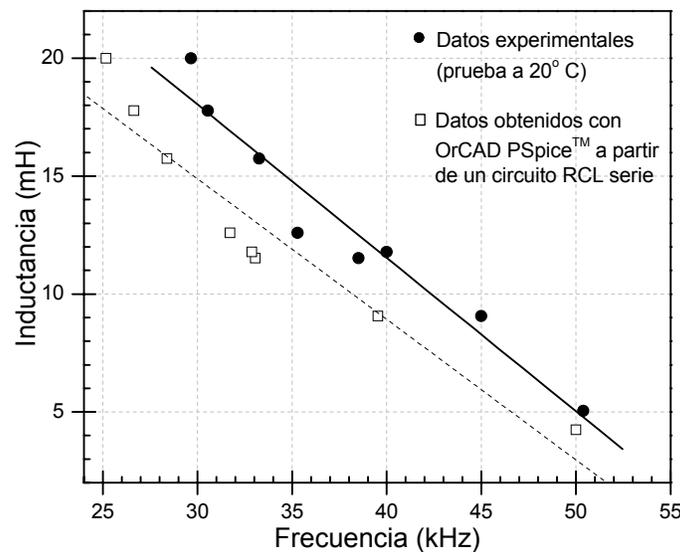


Figura 2.2.- circuito RCL aproximado al modelo equivalente del sistema

En el apéndice D se presenta el análisis detallado del circuito que relaciona el comportamiento de la frecuencia de resonancia del sistema frente a cambios en la inductancia de la bobina, tal y como se muestra en la gráfica 2.2.

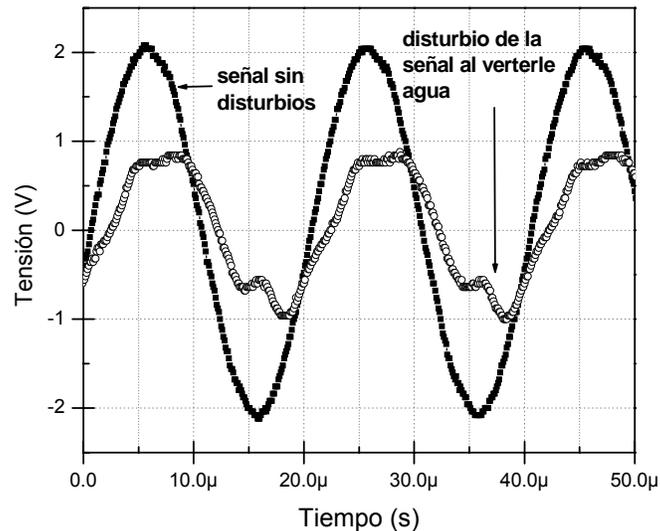
Los datos que fueron obtenidos con OrCAD PSpice™ a partir de un circuito RCL serie con:  $R= 100 \Omega$ ,  $C= 2 \text{ nF}$ ,  $L \text{ [mH]}$  variable con los valores experimentales.



Gráfica 2.2.- Comportamiento de la Inductancia de la bobina variable contra la frecuencia aplicada al sistema.

## PASO 5.- NUCLEACIÓN DE BURBUJAS MEDIANTE INYECCIÓN DE AGUA POR GRAVEDAD.

Para producir burbujas sonoluminiscentes, primero se introducen burbujas de aire al matraz mediante la extracción y re-inyección de agua con una pipeta. Algunas de las burbujas bajo el campo acústico se colapsan y se diluyen, mientras que otras, las que quedan atrapadas en un nodo de presión, se unen y forman una burbuja estable. Esto se observa en el osciloscopio como transitorios en la forma de la señal del mic (gráfica 2.2). Si no ocurre lo anterior, puede deberse a dos cosas: no se está en la frecuencia correcta (máxima transferencia de energía), ó el agua esta sobresaturada de aire o sin la cantidad de aire necesaria disuelta en ella. Bajo estas condiciones es muy difícil (o imposible) obtener SL.

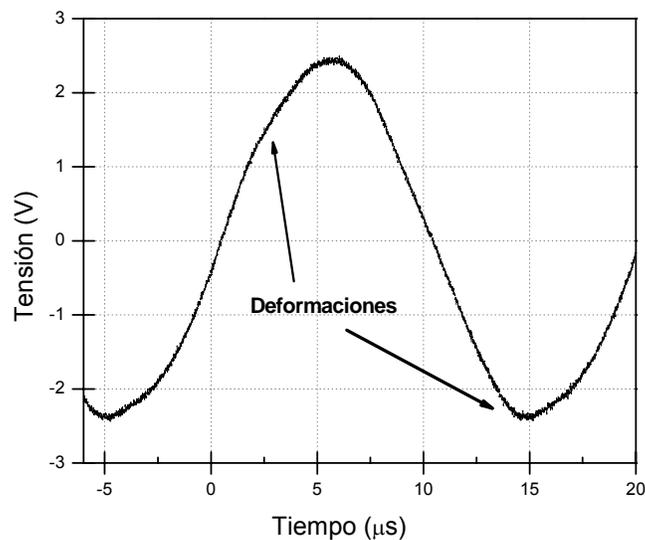


Gráfica 2.2.- Disturbio presentado al introducir el matraz y/o verterle agua

## PASO 6.- ESTABILIZACIÓN DE LA BURBUJA MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DEL VOLTAJE Y FRECUENCIA APLICADOS.

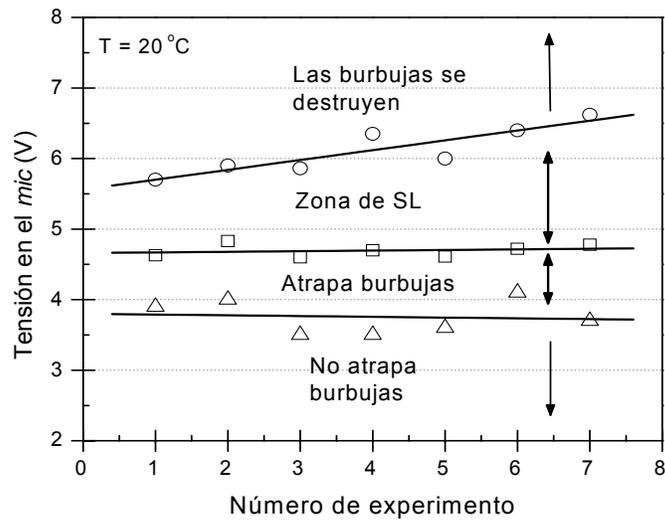
Si todo lo anterior fue realizado correctamente, en el osciloscopio se observa una señal senoidal estable con algunas distorsiones y/o rizos en las crestas y valles de la señal, como se presenta en la gráfica 2.3. Esto es un indicador de que se han atrapado burbujas. Las distorsiones en la señal se observan como rizos en las crestas y/o una “inclinación” de la misma señal hacia la derecha o a la izquierda.

Lo siguiente es ir incrementando lentamente la tensión hasta que se observe una tenue luz azul que es emitida en alguna de las burbujas que ha(n) quedado atrapadas en los nodos de presión.



Gráfica 2.3.- Distorsiones en la señal al atrapar una burbuja

En la gráfica 2.4 se despliegan los límites de las zonas donde se produce la SL; para una temperatura de 20°C y una frecuencia de 50.225 kHz.

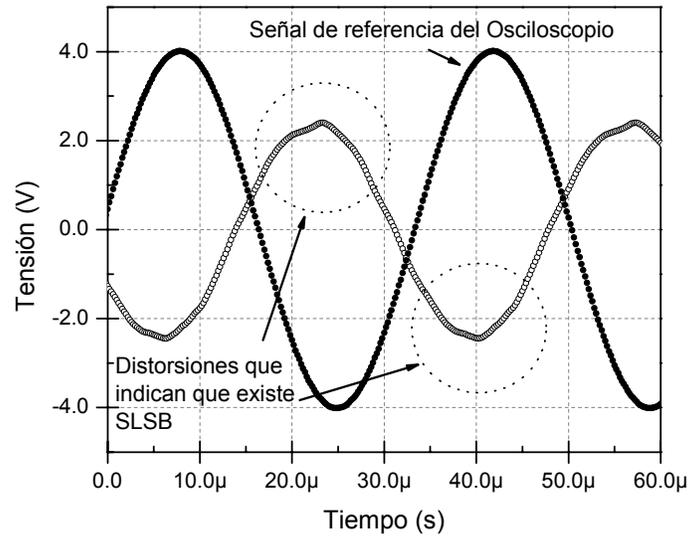


Gráfica 2.4.- Intervalos donde se pueden atrapar burbujas y obtener SL

La posición de la burbuja (o burbujas) SLSB dentro del matraz dependerá principalmente de la frecuencia aplicada en los transductores.

## PASO 7.- OBSERVACIÓN DE LA SONOLUMINISCENCIA ESTABLE EN LAS SEÑALES DEL MIC Y SU CONTROL.

Pueden ocurrir corrimientos en frecuencia si existen cambios en la temperatura del agua. Al estar trabajando en un ambiente sin control de clima, lo probable es que la temperatura aumente y la SLSB empiece a desaparecer. Esto se puede corregir incrementando un poco la frecuencia de la señal de entrada como se presenta en el siguiente capítulo.



Gráfica 2.4.- Distorsiones de la señal al tener SLSB

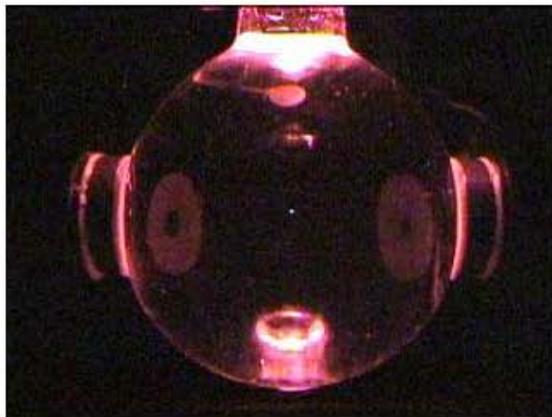
Si las condiciones ambientales del sistema no son modificadas al igual que los parámetros de la señal de entrada, la burbuja puede permanecer en el mismo estado (SLSB) por periodos de tiempo muy largos, incluso hasta días de duración.

# CAPÍTULO 3

## 3.1.- PRUEBAS EXPERIMENTALES DEL SISTEMA

En este capítulo se presentan las diversas pruebas realizadas al prototipo experimental, a partir de las cuales se obtienen los parámetros de diseño electro-mecánicos para la reproducción de SL incluyendo las características ambientales que deben tomarse en cuenta para un funcionamiento exitoso. Se encuentran los intervalos de operación del amplificador, generador de señales y bobina mientras se produce SL.

Las pruebas se realizan en dos frecuencias de 50 y 29 kHz, que son las encontradas cuando se caracterizó el sistema electro-mecánico (ver gráfica 2.1). Con la frecuencia de 50 kHz se tiene SLSB aproximadamente en el centro del resonador, como se muestra en la siguiente figura:



*Figura 3.1.- SLSB en el centro del resonador*

Mientras que alrededor de la segunda frecuencia se tienen burbujas SL en diferentes posiciones, una, dos y tres burbujas al mismo tiempo, dependiendo de la presión aplicada por los transductores. Ver figura 3.2.



*Figura 3.2.- SL en tres posiciones del resonador*

Los parámetros que se estudian durante las pruebas son:

- [A] Tensión y corriente aplicada al sistema.
- [B] Medición de la presión acústica.
- [C] Medio ambiente que rodea la SL.

### **3.1.1.- TENSIÓN Y CORRIENTE APLICADA AL SISTEMA**

Para medir la tensión y la corriente que demanda el sistema cuando se establece la SL de tres burbujas, se recurre al arreglo de la figura 3.1, fijando la frecuencia aplicada al resonador en 29.732 kHz. Se emplea un multímetro marca FLUKE® 187 True-rms y una punta de prueba tipo TCP202 de Tektronix para medir corriente.

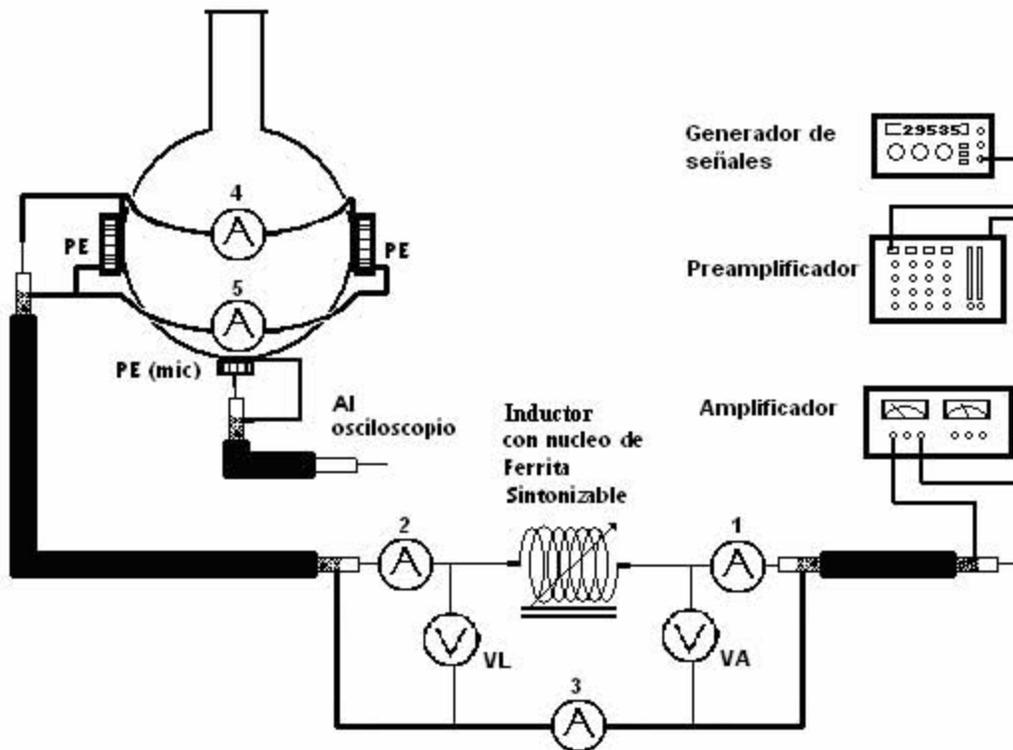


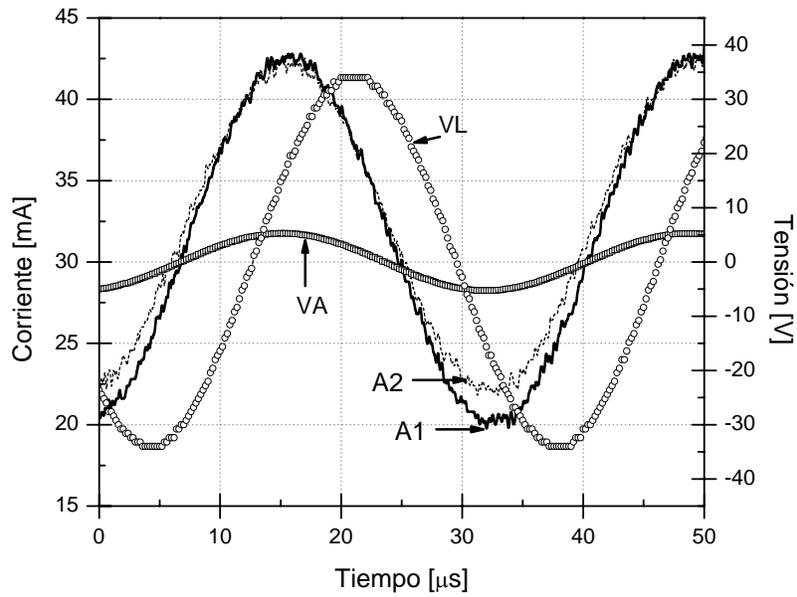
Figura 3.1.- Arreglo experimental para medir la tensión y la corriente aplicada. VA es la tensión en el amplificador de audio y VL es la tensión del inductor; A1, A2 y A3 son los puntos donde se mide la corriente

Se mide la corriente en dos puntos de monitoreo, A1 y A2, y el voltaje en dos puntos:  $V_{VL}$ ,  $V_{VA}$ . Con estos datos posteriormente se calculan los valores de la potencia alcanzada.

En la gráfica 3.1 se despliegan los resultados de estas medidas. Los valores del voltaje pico a pico alcanzados en los puntos de monitoreo son:

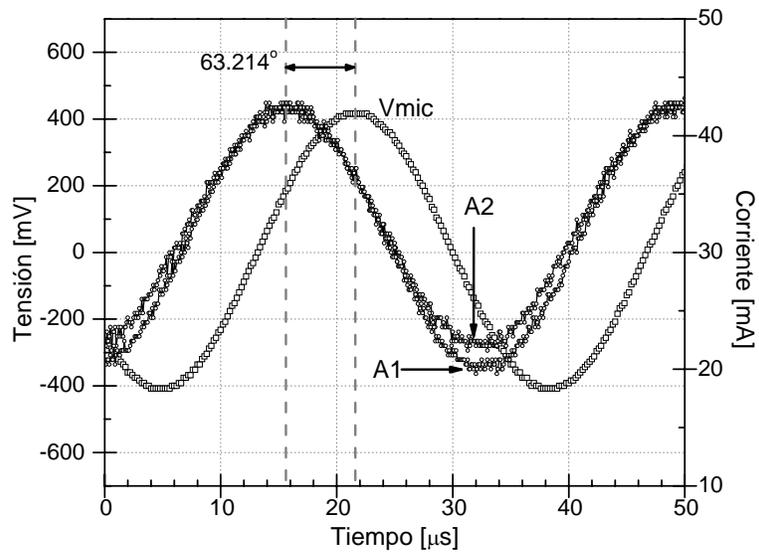
$$V_A = 10.56 V_{PP}, \quad A_1 = A_3 = 23.2 \text{ mA}_{PP}$$

$$V_L = 68 V_{PP}, \quad A_2 = 21.2 \text{ mA}_{PP}$$



Gráfica 3.1.- Tensiones y corrientes en el arreglo experimental; fijando la frecuencia a  $f=29.732$  kHz

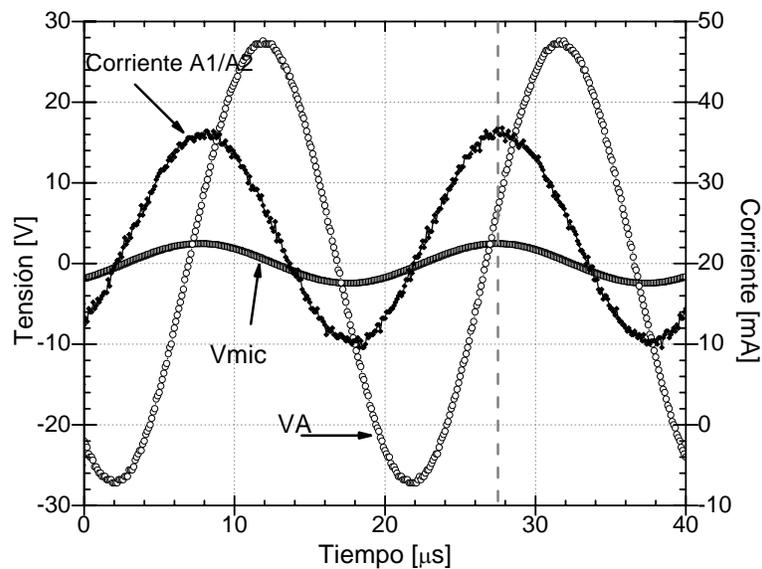
La SLSB se presenta a diferentes frecuencias, el análisis de la tensión y la corriente presenta características particulares para cada una de ellas.



Gráfica 3.2.- Diferencia de fase entre la corriente y  $V_{mic}$ ;  $\Phi=63.21^\circ$

Una de éstas características es la diferencia de fases entre la tensión que se aplica a los transductores y la corriente. Para este caso (frecuencia= 29.732 kHz), la diferencia de fase es de  $55.71^\circ$  entre  $A_1/A_2$  y  $V_L$ , y de  $-6.35^\circ$  entre  $A_1/A_2$  y  $V_A$ . Asimismo, también existe una diferencia notable de fase entre la tensión del *mic* y la corriente, como se presenta en la gráfica 3.2, cuya diferencia de fase es de  $63.21^\circ$ .

Estas mismas medidas fueron realizadas con una frecuencia de 50.545 kHz. Sin embargo con esta frecuencia no es necesario utilizar la bobina, por lo que esta no se conecta para los experimentos. Los resultados se presentan a continuación.



Gráfica 3.3.- Tensiones y corrientes en el arreglo experimental;  $f=50.545$  kHz

En la gráfica 3.3 se despliegan la tensión y la corriente en los puntos de control del arreglo de la figura 3.1. Aquí, el inductor no se emplea ya que dentro del intervalo de frecuencia aplicada el amplificador de audio suministra la potencia suficiente para reproducir la SLSB; por lo que solo se mide  $V_A$  y  $A_1/A_2$ . Los valores promedio extraídos de la gráfica son:

$$V_A = 58 V_{pp}, \quad A_{1/2} = 26.4 mA_{PP}$$

$$V_{mic} = 4.96 V_{PP}$$

También, se observa en la Fig. 3.3 que la corriente que circula por el sistema se encuentra en fase con la tensión del *mic*, mientras que la fase entre la corriente A1/A2 y VA es de 67.05°. Los resultados de ambas pruebas se resumen en la tabla 3.1.

|                            |                     |                     |
|----------------------------|---------------------|---------------------|
| <b>F [kHz]</b>             | 29.732              | 50.545              |
| <b>VA [V<sub>PP</sub>]</b> | 10.56               | 58.00               |
| <b>VL [V<sub>PP</sub>]</b> | 68.00               | N.A.                |
| <b>A1 [mA]</b>             | 23.2                | 26.4                |
| <b>A2 [mA]</b>             | 21.2                | 26.4                |
| $\Phi_{(I/V_i)}$           | -6.35°              | N.A.                |
| $\Phi_{(I/V_o)}$           | 55.71°              | 67.00°              |
| $\Phi_{(I/V_{mic})}$       | 63.21°              | 0°                  |
| <b>Potencia en A2</b>      | <b>P = 103.4 mW</b> | <b>P = 103.4 mW</b> |

*Tabla 3.1.- Pruebas experimentales de tensión y corriente a diferentes frecuencias*

Potencia en el punto de monitoreo A1 con f=29.732 kHz

La potencia compleja se calcula a partir de (2):

$$S = \frac{V_P I_P}{2} \cos(\theta_V - \theta_I) + j \frac{V_P I_P}{2} \sin(\theta_V - \theta_I) \quad (2)$$

$$S = \frac{5.28 \times 0.0116}{2} \cos(-6.35) + j \frac{5.28 \times 0.0116}{2} \sin(-6.35), \text{ resultando:}$$

$$S = 30.436m - j3.387m \text{ VA}, \text{ ó } S = 30.6238m \angle -6.35 \text{ VA}$$

Y la potencia promedio se obtiene de (3):

$$P = \frac{V_P I_P}{2} \cos(\theta_V - \theta_I) \quad (3)$$

$$P = 30.436 \text{ mW}$$

Para la potencia en el punto de monitoreo A2 con  $f=29.732 \text{ kHz}$

De (2) y (3):

$$S = \frac{34 \times 0.0108}{2} \cos(55.71) + j \frac{34 \times 0.0108}{2} \sin(55.71)$$

$$S = 103.4m + j151.7m \text{ VA} \text{ ó } S = 103.58 \angle 55.71 \text{ VA}$$

$$P = 103.4 \text{ mW}$$

Potencia en el punto de monitoreo A1/A2 con  $f=50.545 \text{ kHz}$

Asimismo, de (2) y (3):

$$S = \frac{29 \times 0.0132}{2} \cos(67) + j \frac{29 \times 0.0132}{2} \sin(67)$$

$$S = 74.78m + j176.18m \text{ VA}$$

$$P = 74.78 \text{ mW}$$

## COMENTARIOS

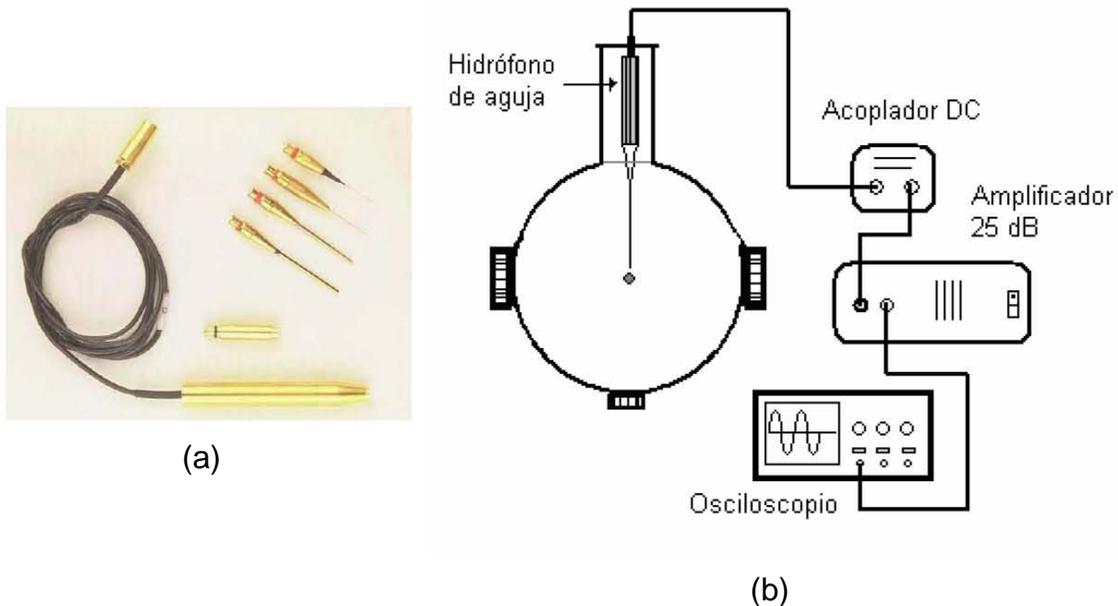
La potencia en el punto A1 a frecuencia de 29.732 Khz es mayor que la empleada a 50.545 kHz. Esto se puede explicar más fácilmente si se analiza el sistema como si fuera un circuito RCL en serie<sup>1</sup>, en donde el efecto capacitivo del transductor piezoeléctrico anula la tensión del inductor ya que se encuentran en resonancia. Esto compensaría el supuesto aumento en la potencia. Además, a mas baja frecuencia la transferencia de energía al sistema es menos eficiente por estar alejada de la frecuencia natural principal que en este caso es de 50.45 kHz.

---

<sup>1</sup> Ver apéndice D

### 3.1.2.- MEDICIÓN DE LA PRESIÓN ACÚSTICA

La presión acústica que alcanza el medio líquido dentro del matraz se mide con un hidrófono de aguja (de Precision Acoustics LTD), ver fig 3.2a. Se escoge el hidrófono con un diámetro de 0.2 mm, ancho de banda de 10kHz a 60MHz y sensibilidad de 55 nV/Pa. En la figura 3.2b se muestra un esquema del sistema para realizar estas mediciones.



*Figura 3.2.- Hidrófonos de aguja, (b) arreglo experimental típico para medir la presión acústica dentro del matraz*

El hidrófono cuenta con un amplificador o “booster” con una ganancia de 25 dB $\pm$ 1dB con un ancho de banda de 50 kHz a 125 MHz.

## PROCEDIMIENTO PARA LA MEDICIÓN DE LA PRESIÓN ACÚSTICA APLICADA AL MEDIO DENTRO DEL RESONADOR

La presión acústica aplicada se midió utilizando un hidrófono de aguja y como sabemos, el introducir un dispositivo de medición dentro del campo de algún parámetro en cualquier sistema, afectará directamente dicho campo; por lo que es necesario conocer los intervalos de posición en donde se puede colocar dicho dispositivo para minimizar las perturbaciones provocadas y obtener resultados mas reales. En nuestro caso, se realizaron numerosas mediciones para encontrar la posición en que se podía colocar la punta del hidrófono cerca de la burbuja SL sin afectar visiblemente su comportamiento. La distancia mínima encontrada fue aproximada a los 5 mm; a distancias menores la burbuja se afecta visiblemente, ésta se desplaza hacia abajo o hacia un lado, es decir cambia su posición original.

El procedimiento que se siguió para la medición de la presión acústica abarca dos puntos: a) el reconocimiento de la señal proporcionada por el hidrófono para diferentes condiciones de preparación de agua, manteniendo constantes la frecuencia y la tensión aplicada, y b) la medición de la presión acústica en función de la distancia entre la punta del hidrófono con respecto a la burbuja SL.

### a) Reconocimiento de Señales / Calibración del sistema

Este inciso tiene como objetivo el reconocimiento de las señales que proporciona el hidrófono y además conocer el comportamiento de éstas durante la reproducción de la sonoluminiscencia y relacionarlas con el tratamiento que se le da al agua; manteniendo constantes la frecuencia y la tensión aplicada.

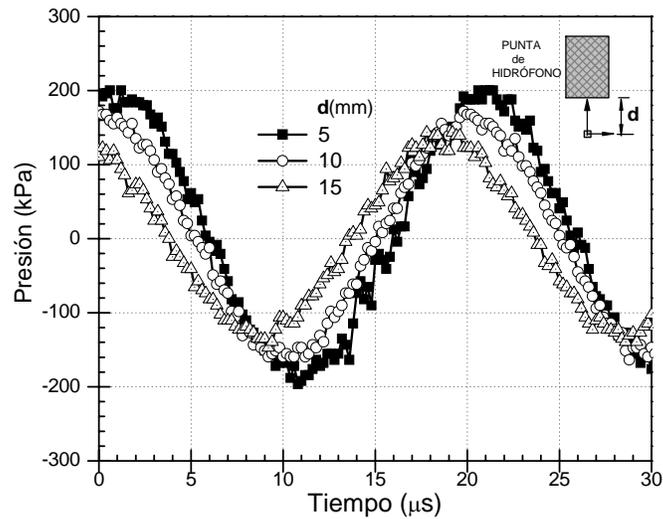
#### *Mediciones de presión usando como medio acuoso:*

- 1) agua sin-desgasificar a temperatura ambiente.
- 2) parcialmente-desgasificada (entre 25s y 45s con bomba de vacío),  $T=18.1^{\circ}\text{C}$  y
- 3) muy-desgasificada (mayor a 2 min. con bomba de vacío),  $T = 15.3^{\circ}\text{C}$

1) Medio: agua sin-desgasificar.

En la gráfica 3.4 se despliegan las formas de onda de la señal de la presión adquiridas colocando la punta del hidrófono en diferentes posiciones dentro de una muestra con agua sin-desgasificar a temperatura ambiente de 19 °C, aplicando una frecuencia de 50.324 kHz, y una tensión de entrada de 35.00 V<sub>rms</sub>.

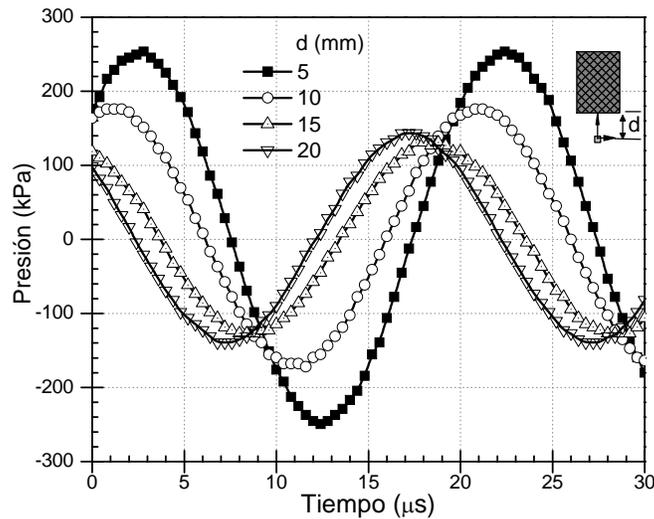
Para este caso la presión resulta ser de ± 200 kPa; aproximadamente a 5 mm de donde aparecería la burbuja SL. El resultado es el esperado: la presión disminuye conforme el hidrófono se aleja del centro del matraz y las formas de onda se presentan muchos picos debido a las múltiples cavidades que se encuentran en el medio acuoso.



Gráfica 3.4.- Presión resultante al utilizar agua sin-desgasificar

2) Medio: agua parcialmente-desgasificada.

Con agua parcialmente-desgasificada se obtienen las formas de onda de la presión que se despliegan en la gráfica 3.5. Observe que las señales son mas suaves, esto debido a que las perturbaciones provocadas por la presencia de burbujas disminuye considerablemente. Al igual que en el experimento anterior, la frecuencia se mantuvo a 50.359 kHz, la temperatura del agua a 18.1 °C y la tensión de entrada es de 35.02  $V_{rms}$ . La presión adquirida es de  $\pm 250$  kPa aproximadamente a 5 mm de la posición donde se formaría la burbuja SL

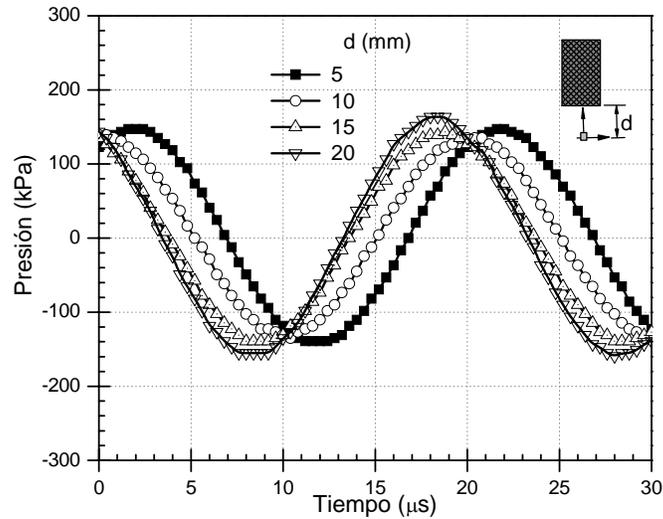


Gráfica 3.5.- Presión resultante al utilizar agua parcialmente-desgasificada

3) Medio: agua altamente-desgasificada.

Por último, en la gráfica 3.6 se presentan los resultados para agua altamente-desgasificada. Similar a las pruebas con agua parcialmente-desgasificada, las señales no presentan grandes perturbaciones. La frecuencia aplicada es de 50.321 kHz, temperatura del agua es de 15.3 °C y se aplica una tensión de entrada de 35.09  $V_{rms}$ . La presión a 5mm de la burbuja resulta de  $\pm 146$  kPa aproximadamente. Se observa que la presión va disminuyendo ligeramente conforme se realizan mediciones con el hidrófono mas alejadas del centro del

matraz, esto se debe al cambio de temperatura del medio que provoca un corrimiento en la frecuencia de resonancia de aproximadamente 500 Hz.



Gráfica 3.6.- Presión resultante al utilizar agua muy-desgasificada

b) Mediciones de la presión acústica en función de la distancia entre la punta del hidrófono y una burbuja SL.

Fijando la frecuencia acústica senoidal a 54.547 kHz y una temperatura del medio acuoso de  $T= 19.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  se obtiene sonoluminiscencia de una burbuja aproximadamente en el centro del resonador. Para medir la presión acústica senoidal alrededor de la burbuja se coloca la punta del hidrófono, (ph), muy lentamente a una distancia aproximada de 5 mm de la misma, se adquiere la señal del hidrófono y luego se desplaza la punta verticalmente fijando posiciones cada 5 mm y se vuelve a medir. Las formas de onda de señal que nos da la presión se despliegan en la figuras 3.7 y 3.8 aplicando diferentes voltajes de entrada.

Al igual que en los demás experimentos de presión, se observa un corrimiento de la señal hacia la izquierda (cambio de fase) conforme el hidrófono se aleja de la burbuja. Esto ocurre debido a que la frecuencia y la velocidad de propagación de la onda son constantes aún cuando existan cambios en la distancia que se recorre. En otras palabras:

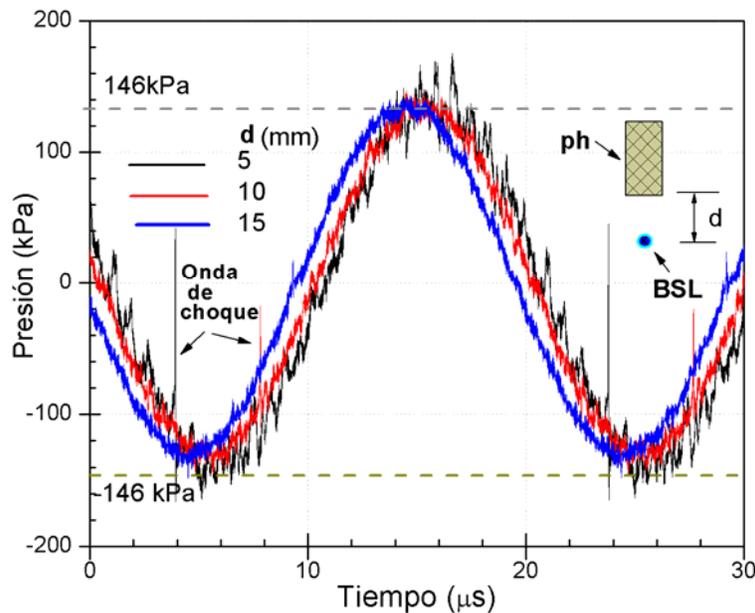
$$f = \frac{v}{d}, \quad (4)$$

Donde:

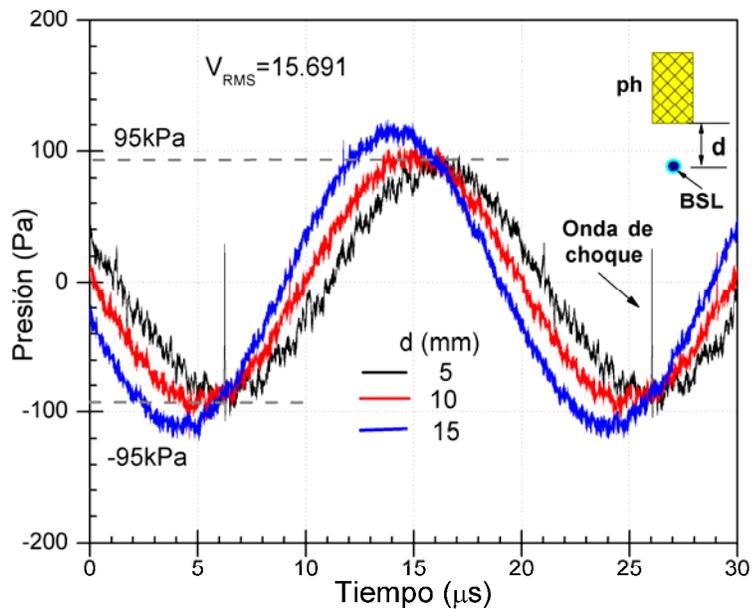
$f$  = frecuencia de la señal, constante

$v$  = velocidad de propagación en el medio, constante

$d$  = distancia, variable



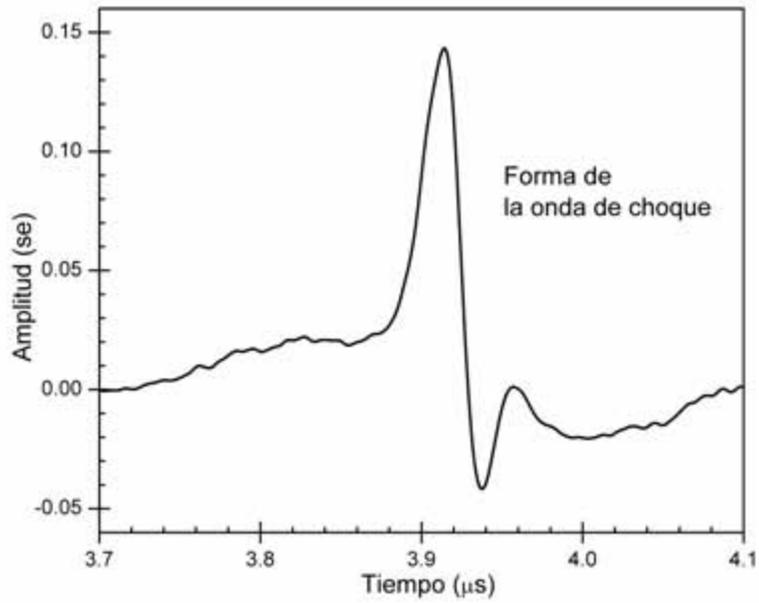
Gráfica 3.7.- Señales del hidrófono de aguja (55nV/Pa) a 5mm, 10mm y 15mm, la tensión aplicada es de 19.77  $V_{RMS}$



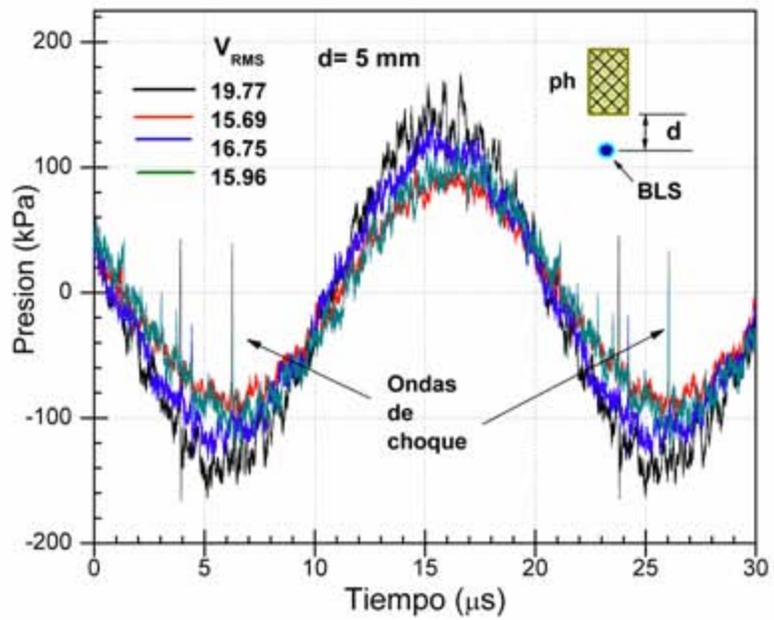
Gráfica 3.8.- Señales del hidrófono de aguja (55nV/Pa) a 5mm, 10mm y 15mm, la tensión aplicada es de 15.691  $V_{RMS}$

Otra forma de verificar, a partir de las señales del hidrófono, que efectivamente hay presencia de SLSB, es si se observa la presencia de una onda de choque.

Con fines de estudio de ésta onda que se emite durante la SL se realizaron pruebas con el hidrófono a una misma distancia y diferentes tensiones de entrada. Las gráficas 3.9 y 3.10 presentan los resultados.

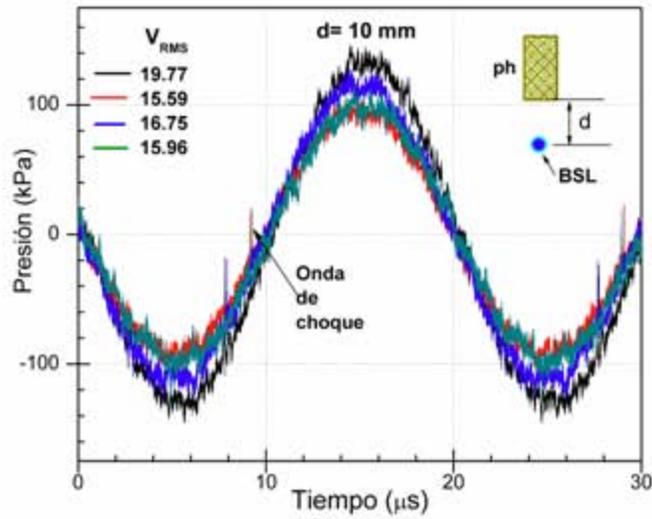


(a)



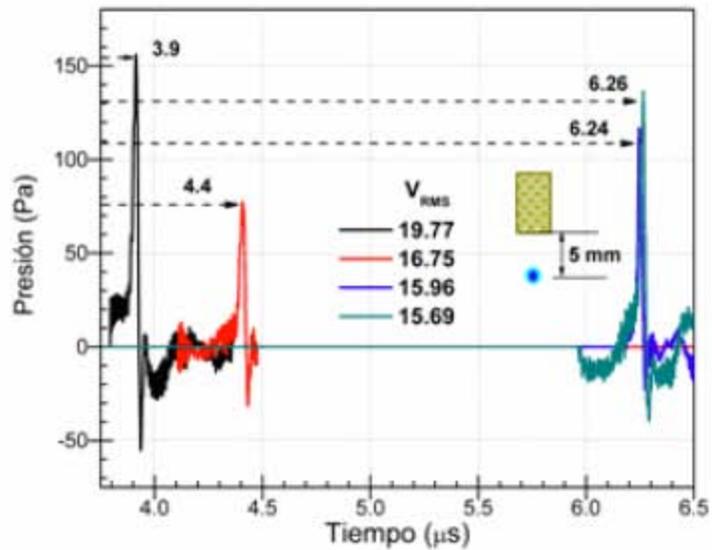
(b)

Gráfica 3.9.- Señales del hidrófono de aguja (55nV/Pa) a 5mm, (a) señal amplificada de la onda de choque, (b) con diferentes tensiones aplicadas



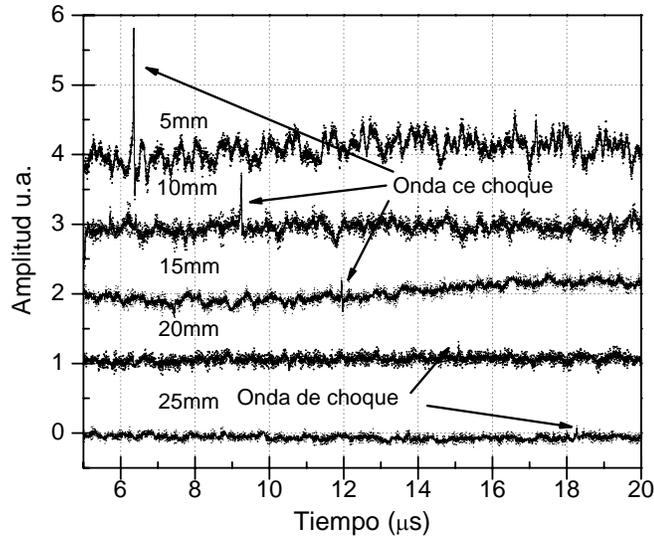
Gráfica 3.10.- Señales del hidrófono de aguja (55nV/Pa) a 10mm, con diferente tensiones aplicada

En la gráfica 3.11 se tiene una aproximación de la gráfica 3.9 donde se observa mas claramente como la onda de choque resulta ser más rápida conforme se aumenta la tensión al sistema.

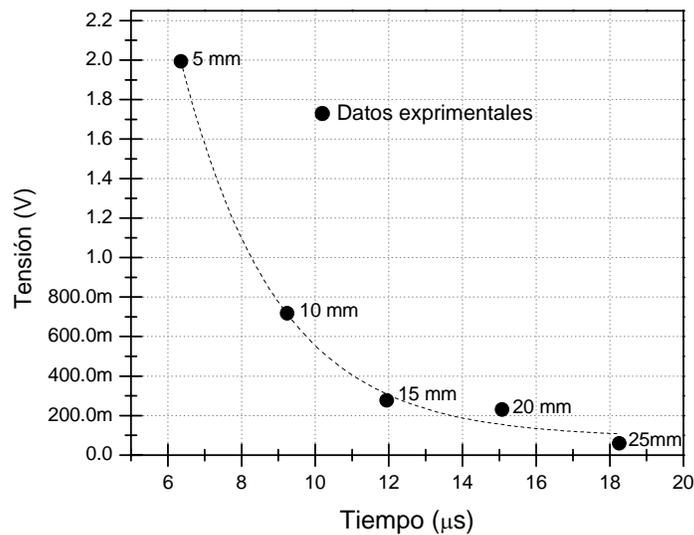


Gráfica 3.11.- Señales del hidrófono de aguja (55nV/Pa) a 5mm, con diferente tensión aplicada por el amplificador

También es posible conocer la evolución de dicha onda de choque en intensidad y velocidad de propagación. En la gráfica 3.12 se presentan el resultado de una prueba experimental en donde se fue alejando el hidrófono de la burbuja SL en intervalos de 5 mm. Este mismo resultado se expone en una forma mas clara en la gráfica 3.13.



Gráfica 3.12.- Señales del hidrófono de aguja ( $55\text{nV/Pa}$ ) a 5mm, 10mm, 15mm, 20mm y 25mm normalizadas y filtradas con presencia de SLSB y  $16\text{ V}_{\text{rms}}$  aplicados



Gráfica 3.13.- Señales del hidrófono de aguja (55nV/Pa) a 5mm, 10mm, 15mm, 20mm y 25mm con presencia de SLSB y 16  $V_{rms}$  aplicados

Se observa que la amplitud de la onda de choque sigue una trayectoria similar a la de una exponencial negativa conforme el hidrófono se aleja de la burbuja SL.

### **3.1.3.- PRUEBAS EXPERIMENTALES PARA CONOCER EL AMBIENTE EN EL QUE SE OBTIENE SONOLUMINISCENCIA**

Para conocer bajo que condiciones ambientales ocurre la SL, fueron realizadas diversas pruebas experimentales. Es importante conocer a fondo el comportamiento de dichas condiciones ambientales, ya que el éxito o fracaso para obtener SL dependerá de que se realicen ajustes al sistema *in situ* para compensar los cambios en el ambiente. Las pruebas experimentales consisten en investigar dos casos:

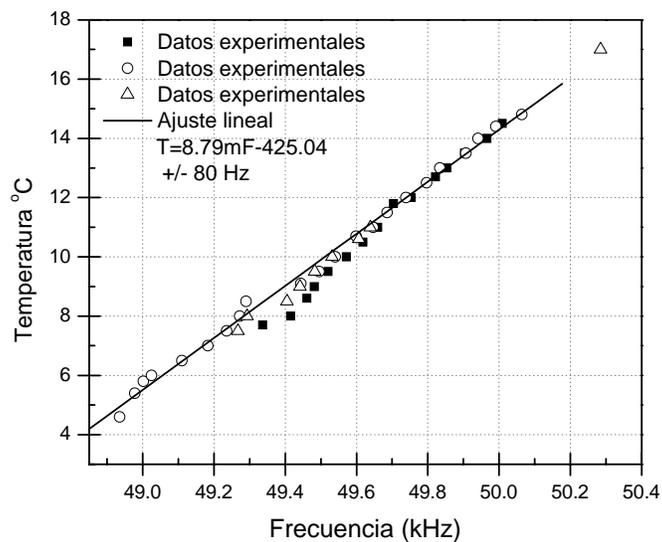
Temperatura del agua dentro del matraz.

Cantidad de oxígeno disuelto en el agua.

#### **TEMPERATURA DEL AGUA DENTRO DEL MATRAZ**

Los cambios en la temperatura del agua afectan principalmente a la frecuencia de resonancia del sistema a una razón aproximada de 113 Hz por cada 1 °C de cambio. Esto es posible observarlo en la gráfica 3.14. Las mediciones de temperatura se efectuaron utilizando un termopar tipo K para multímetro Fluke® y se compararon con un termómetro de mercurio.

Es importante controlar cualquier cambio de temperatura, principalmente si la temperatura va en aumento. En este sentido, a través de numerosas pruebas experimentales se encontró que es muy difícil producir SL a temperaturas mayores de 21 °C, por lo que es importante mantener una temperatura inferior.



*Gráfica 3.14.- Comportamiento de la frecuencia de resonancia debido a variaciones en la temperatura*

## CANTIDAD DE OXÍGENO DISUELTO EN EL AGUA

Varios factores son los que afectan el nivel de saturación de oxígeno que puede tener el agua como la temperatura, la presión y la salinidad del agua. Éstos influyen de la siguiente manera:

Menor temperatura del agua, Mayor cantidad de  $O_2$  disuelto.

Menor presión atmosférica (mayor altitud), Menor cantidad de  $O_2$  disuelto.

Menor concentración de sales, Mayor cantidad de  $O_2$  disuelto.

Para el caso de la Ciudad de México se considera lo siguiente para calcular el nivel máximo de saturación:

- Altura de 2235 m sobre el nivel del mar.
- A  $20^\circ C$  a nivel del mar el aire tiene una solubilidad en el agua de 9.09 mg/l.

- El porcentaje de calibración del oxímetro para una presión de 76,874 Pa (2235 m sobre el nivel del mar) es de aproximadamente 76 %.

Esto quiere decir que a 2235 m sobre el nivel del mar y 20 °C se tiene 100% de saturación con 6.91 mg/l ± 0.2. De aquí se tiene la siguiente ecuación:

$$saturacion = (solubilidad @ T) \left( \frac{\%calibracion @ altura}{100} \right)$$

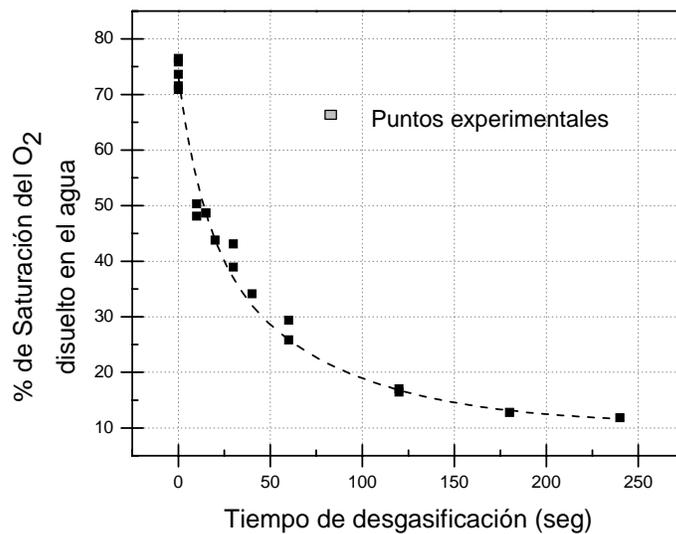
Los datos se extraen de tablas, ver apéndice E.

### Medición De La Concentración De O<sub>2</sub> Disuelto En Agua Tridestilada

Para efectuar las mediciones se utiliza un oxímetro marca YSI 5000 y una bomba de vacío con motor de 1 Hp para desgasificar el agua tridestilada. Las mediciones se realizan de la siguiente manera:

- a) Se calibra el Oxímetro a la temperatura y presión ambiente que existe en el momento de realizar la prueba.
- b) Se realiza la desgasificación por un tiempo determinado a un volumen de 290 ml de agua.
- c) Se registra la medición de oxígeno disuelto.
- d) La medición se repite tres veces.

La gráfica 3.15 presenta las mediciones de O<sub>2</sub> disuelto en agua tridestilada en % de saturación. Los datos fueron ajustados tomando 6.91 mg/l a 20 °C como 100% de saturación de O<sub>2</sub>, a una altura de 2235 m sobre el nivel del mar. Con esta prueba se encontró que se produce SL con niveles de saturación de O<sub>2</sub> de entre 30% y 50% en agua tridestilada.



Gráfica 3.15.- Porcentaje de saturación de O<sub>2</sub> disuelto en el agua a diferentes tiempos de desgasificación

La tabla 3.2 presenta todos los resultados presentados en este capítulo y sirve como guía práctica para producir SL sin mayor complicación. Un parámetro importante que no se encuentra presente es el del porcentaje de O<sub>2</sub> disuelto en el agua ya que este es el mismo para ambas frecuencias estudiadas de 30% a 50%:

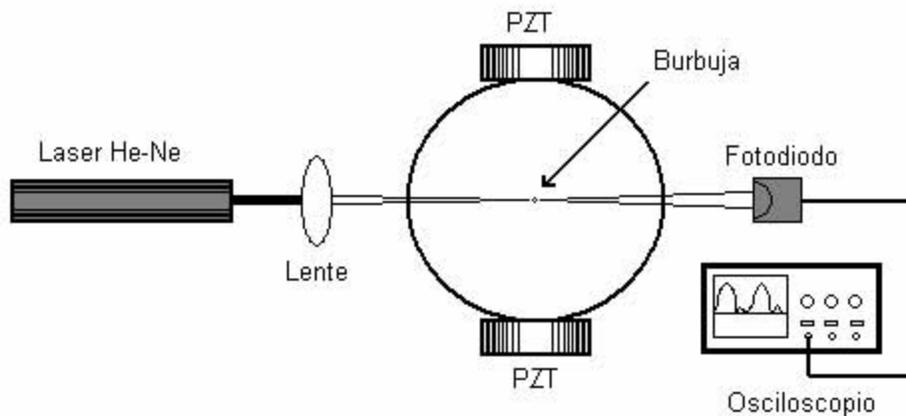
| Frecuencia (kHz) | Temperatura del agua (°C) | Presión del hidrófono (kPa) | Tensión aplicada (V <sub>rms</sub> ) | Tensión del mic (V <sub>pp</sub> ) | Burbujas SL encontradas |
|------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| 29.5 - 29.8      | 10 - 24                   | N.D.                        | 15 - 20                              | 3.5 - 5.5                          | 1, 2, 3                 |
| 49.5 - 50.5      | 18 - 20                   | 95-145                      | 15 - 20                              | 3.5 - 5.5                          | 1                       |

Tabla 3.2.- Resultados de pruebas experimentales de SL a diferentes frecuencias

### 3.1.4- PRIMERAS MEDICIONES DEL RADIO DE LA BURBUJA

Un trabajo importante de la SL consta en observar el cambio en el tamaño de la burbuja y compararlo con modelos teóricos propuestos por investigadores en el área de la dinámica de burbujas [12].

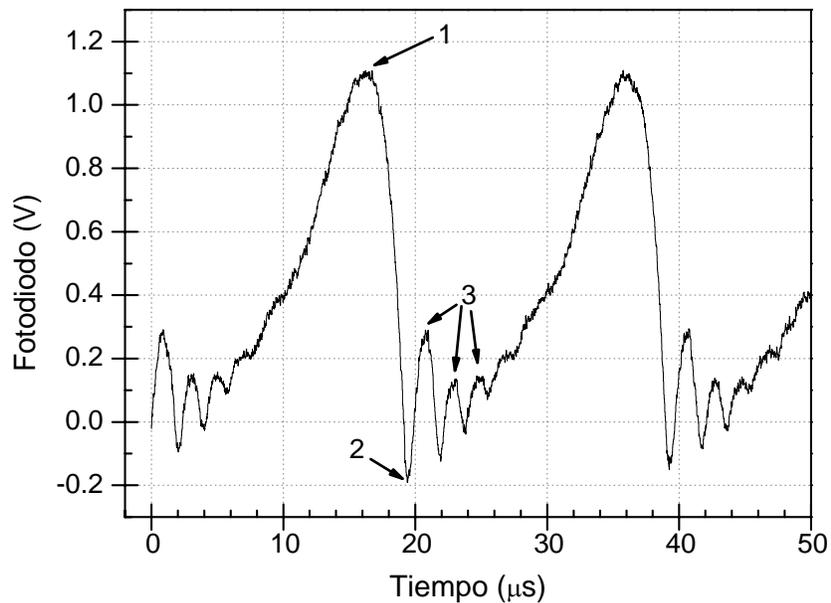
Para observar los cambios en el tamaño de la burbuja sonoluminiscente se usa simplemente un láser continuo, una lente de enfoque, un fotodiodo “y buena suerte”, como se observa en el arreglo de la figura 3.3. La metodología es la siguiente: a) se enfoca un haz láser en la burbuja SL utilizando una lente. b) ya que la burbuja aumenta y disminuye su tamaño con cada ciclo, el haz láser es totalmente dispersado, o pasa parcialmente por encima de la burbuja; estos cambios se observan con un fotodiodo de respuesta rápida ( $< 2\text{ns}$ ).



*Figura 3.3.- Arreglo experimental para observar los cambios en el radio de la burbuja*

En la gráfica 3.16 se muestran algunos de los resultados preliminares del experimento. El punto 1 representa un aumento máximo en el tamaño de la burbuja. En el punto 2 se tiene la disminución mínima que alcanza la burbuja. Por último, en el punto 3 se tienen oscilaciones del tamaño de la burbuja antes de incrementarse hasta un tamaño máximo. Este comportamiento ya ha sido

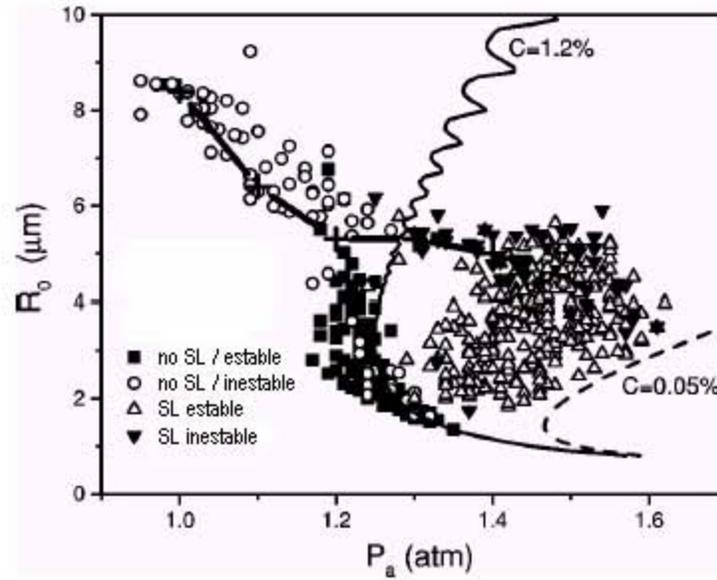
reportado por [4-6, 11-12], ajustándose de alguna manera a los modelo teóricos propuestos.



*Gráfica 3.16.-Resultados experimentales del cambio en el tamaño de la burbuja*

Sin embargo, con este método no se puede conocer el valor real del radio ya que se debe tener una calibración adecuada para lo cual se necesitan más elementos como son: un acoplador opto-acústico, fotomultiplicadores, cámaras de alta velocidad y osciloscopios de más resolución que no se encuentran al alcance por el momento. También es necesario desarrollar una metodología confiable, que funcione y con la cual sea posible relacionar la amplitud de la señal con el radio de la burbuja. Así, será posible corroborar gráficas como la que presenta Ketterling [41] (gráfica 3.17). En donde se observan las regiones experimentales de la SL estable o inestable considerando el radio inicial de la burbuja y la presión acústica que se aplica. Sin embargo, y apoyándome en las experiencias adquiridas durante la realización de los experimentos, en dicha gráfica no se indica como afecta la temperatura, la presión atmosférica, cambios en la concentración de gases disueltos en medio o cambios en la frecuencia de excitación. Cambios en estos parámetros afectan sensiblemente el

comportamiento de la SLSB, además de que están directamente relacionados con el tamaño de la burbuja.

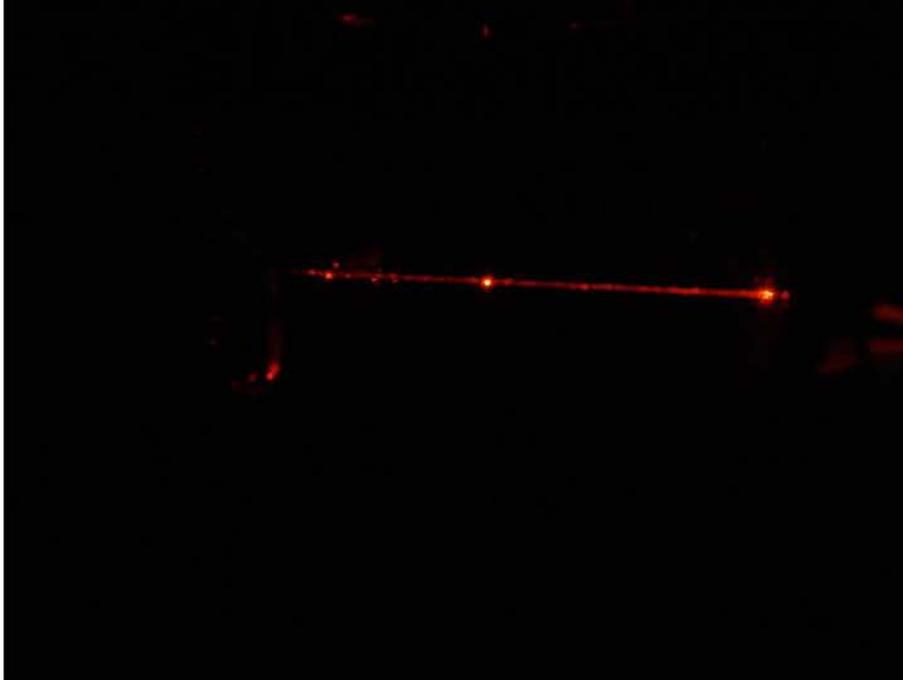


Gráfica 3.17.- Mapeo experimental de las zonas de estabilidad e inestabilidad de SLSB [41]

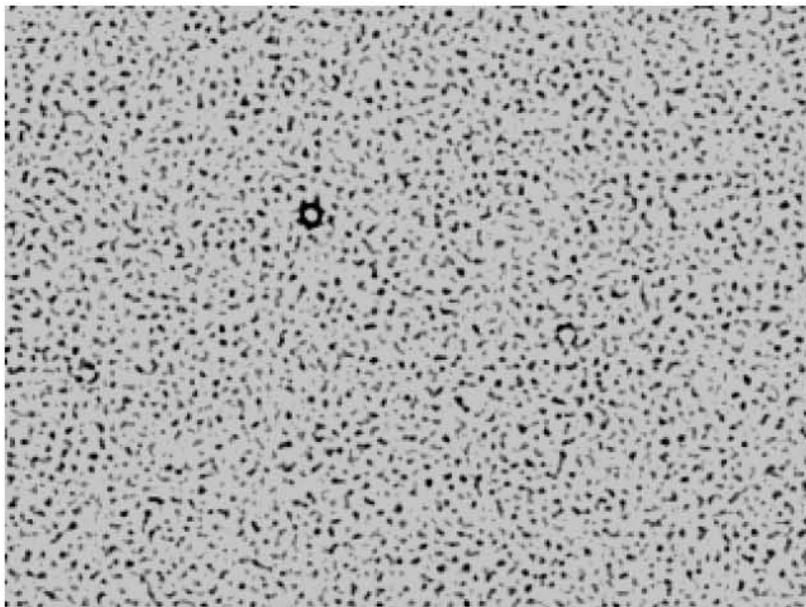
### 3.2.- IMÁGENES DE BURBUJAS SL



*Figura 3.4.- SLSB,  $f=50$  kHz,  $20$  °C, fotografía digital 7MPix, 15s exposición, ISO 400*



*Figura 3.5.- SLSB,  $f=50$  kHz,  $20$  °C, láser He-Ne rojo, fotografía digital 4 Mpix 1/3s exposición, ISO 400*



*Figura 3.6.- SL con tres burbujas,  $f=29.5$  kHz,  $21$  °C, imagen procesada digitalmente, 4Mpix, 30s exposición, ISO 400*

# CONCLUSIONES

Es posible encontrar en diversas publicaciones [5-6, 10-12], así como también en páginas de Internet [13, 34], explicaciones en forma somera sobre como implementar un sistema que produzca sonoluminiscencia, SL. Sin embargo, todos ellos omiten detalles sin los cuales simplemente no es posible su reproducción.

La implementación del sistema descrito en este trabajo, aunque simple, no es sencilla; ya que se deben conocer los intervalos correctos de los parámetros involucrados (presión acústica, frecuencia de resonancia, temperatura, porcentaje de O<sub>2</sub> disuelto), acordes con la presión atmosférica del lugar para la obtención de la SL controlable.

La metodología, para conocer los intervalos, aquí desarrollada es aplicable para sistemas que usan resonadores esféricos. Para nuestro caso en particular, usando un resonador de 290 ml, agua tridestilada y desgasificada a la presión ambiente de la Ciudad de México, se estudiaron dos intervalos de frecuencia en donde se produce SL:

1) Una burbuja sonoluminiscente centrada en el resonador:

$f_{exc} = 50 \pm 0.5$  kHz,  $T = [18-20]$  °C y O<sub>2</sub> disuelto en el agua (%) = [30-50].

2) Tres burbujas sonoluminiscentes:

$f_{exc} = 29.5 \pm 0.3$  kHz,  $T = [15-20]$  °C y O<sub>2</sub> disuelto en el agua(%)= [30-50].

Para ambos casos: A) el intervalo de presión acústica se encuentra entre (90 - 150) kPa, medido con hidrófono de aguja. B) la tensión del *mic* debe encontrarse entre 3.5 V<sub>PP</sub> y 5.5 V<sub>PP</sub>. C) además hay que considerar que se presenta un corrimiento en frecuencia de  $\sim 150 \pm 20$  Hz por cada °C de cambio en el agua.

En resumen, este trabajo abarca el desarrollo completo de la implementación de un sistema SL, desde los materiales empleados hasta la calibración del equipo, con todo detalle. Dando respuesta a las posibles interrogantes que pueden surgir al tratar de construir un prototipo similar y utilizarlo en las condiciones ambientales de la Ciudad de México.

# APÉNDICE A

## ESPECIFICACIONES DEL HIDRÓFONO

### HYDROPHONE BOOSTER AMPLIFIER



#### DESCRIPTION

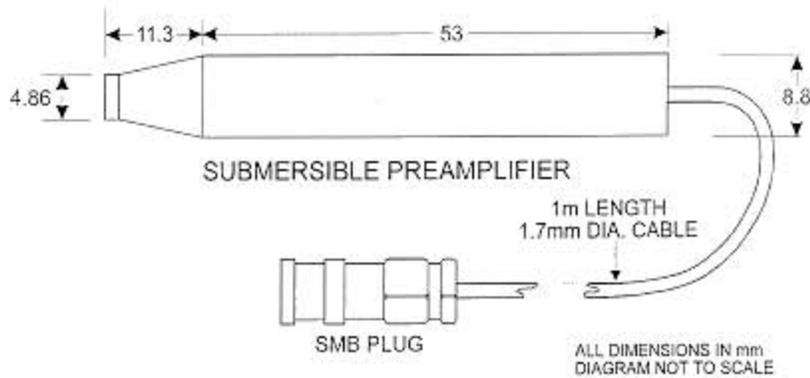
This amplifier is an optional item to the basic Hydrophone Measurement System. It has been included in the HP Series to provide, when required, further amplification of the hydrophone signal.

#### SPECIFICATION

|                        |   |
|------------------------|---|
| Voltage Gain:          | 25dB minimum  |
| Bandwidth:             | 50kHz to 125MHz $\pm 1.0$ dB                                    |
| Maximum Output Level:  | 29dBm for 1dB compression (18.1V pk – pk into 50 $\Omega$ load) |
| Input Impedance:       | Nominal 50 $\Omega$   |
| Output Impedance:      | Nominal 50 $\Omega$ (VSWR 2:1)                                  |
| Output Noise Level:    | Typically 70 $\mu$ V pk – pk (bandwidth 125MHz)                 |
| Noise Figure:          | Typically 10dB  |
| Phase:                 | Non-inverting   |
| Terminations:          | BNC socket  |
| Output                 | BNC socket  |
| Power Requirements:    | 100/120/220/240V ac,<br>50 to 60Hz, 7.5W                        |
| Operating Temperature: | 0 to 50°C   |
| Size:                  | (90mm $\times$ 205mm $\times$ 194mm)                            |
| Weight:                | 2.6kg   |

All specifications are subject to change without notice.

## HP SERIES SUBMERSIBLE PREAMPLIFIER -



### DESCRIPTION

The Submersible Preamp connects either directly to an Interchangeable Probe ('HP' series), or, if required, via a 20dB In Line Attenuator (A20/1). Power is provided by a DC Coupler (DC1), the dc power and the acoustic signal sharing the same conductors in the interconnecting coaxial cable between the preamp and the coupler.

### SPECIFICATION

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Voltage Gain:         | Nominal 8dB at 3.5MHz                                      |
| Bandwidth:            | 10kHz to 50MHz (-3dB)<br>5kHz to 100MHz (-6dB)             |
| Maximum Output Level: | 650mV pk - pk into 50Ω load                                |
| Input Impedance:      | 1MΩ in parallel with 8pF                                   |
| Output Impedance:     | 50Ω (VSWR less than 1.2:1) over the range<br>40kHz -130MHz |
| Output Noise Level:   | Typically 60uV rms (100MHz bandwidth)                      |
| Terminations:         |  |
| Input                 | MCX  |
| Output                | SMB  |

Power Supply Requirements: Phantom fed by Precision Acoustics' DC Coupler Model DC1

Operating Temperature Range: 0 to 50°C

Cable Details:

Length 1m minimum

Diameter 1.7mm outside diameter

Weight: 29gm

This specification is subject to change without notice.

For further details contact one of our Applications Engineers.

## DC COUPLER

### DESCRIPTION

The DC Coupler provides dc power to the Submersible Preamplifier whilst at the same time acting as an acoustic signal coupler between the preamplifier and the users measurement system (via a Hydrophone Booster Amplifier, if used).

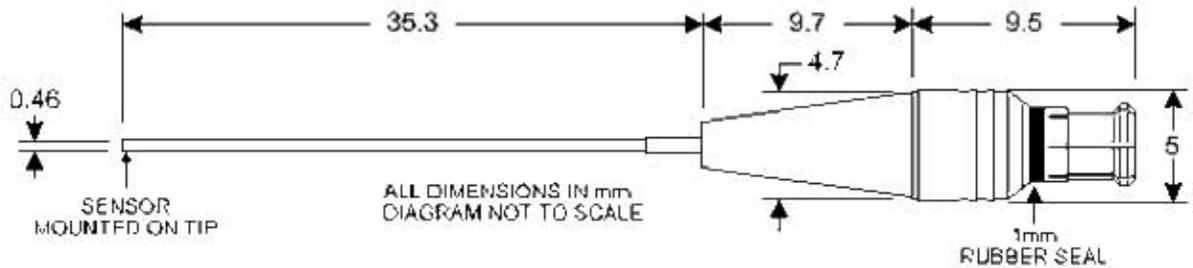
### SPECIFICATION

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| RF Input Impedance:              | 50ohms   |
| RF Output Impedance:             | 50ohms   |
| Input Power Supply Requirements: | 28V dc $\pm$ 1V (to ensure <1% variation in system gain) |
| Terminations:<br>Input<br>Output | SMB Jack<br>BNC Jack                                     |
| Weight:                          | 89gm<  |

N.B. This specification is subject to change without notice.

For further details contact one of our Applications Engineers. We will be pleased to answer your questions.

## HP 0.2mm INTERCHANGEABLE PROBE



HP 0.2mm INTERCHANGEABLE PROBE

### DESCRIPTION

As a general purpose device for most applications, this probe represents a good all-round compromise between sensitivity and directionality. It is currently the best selling device in the HP series of probes.

### SPECIFICATION

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Output Impedance:           | 13pF $\pm$ 2pF  |
| Typical Probe Sensitivity:  | 55nV/Pa (equivalent to -265.2dB re 1V/ $\mu$ Pa) at 3MHz<br>- measured at the output of a correctly terminated HP1 Submersible Preamplifier |
| Sensitivity Tolerance:      | Sensitivity variation between individual probes is approx. $\pm$ 3dB  |
| Typical Frequency Response: | Class A ( $\pm$ 2dB): 5 to 25MHz  |
| (as defined by IEC60866)    | Class B ( $\pm$ 4dB): 1 to 35MHz  |
| Sensor Material:            | 9 micron thick gold electroded Polyvinylidene difluoride (PVdF) film  |
| Sensor Dimension:           | 0.2mm diameter disc   |

This specification is subject to change without notice.

For further details contact one of our Applications Engineers.

# APÉNDICE B

## ESPECIFICACIONES DEL OXÍMETRO YSI 58



### Dissolved Oxygen Performance Specifications

|                                  |                                    |
|----------------------------------|------------------------------------|
| <b>Readout:</b>                  | LCD                                |
| <b>Accuracy:</b>                 | $\pm 0.03$ mg/L                    |
|                                  | $\pm 0.03$ %                       |
|                                  | $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$          |
| <b>Range:</b>                    | 0-20 mg/L                          |
|                                  | 0-200 % air                        |
|                                  | -5°to +45°C temperature            |
| <b>Resolution:</b>               | 0.01mg/L                           |
|                                  | 0.1% air                           |
|                                  | 0.1°C temperature                  |
| <b>Power:</b>                    | Battery & AC                       |
| <b>Salinity Compensation:</b>    | Yes                                |
| <b>Temperature Compensation:</b> | Automatic                          |
| <b>Other Features:</b>           | Analog Recorder Output of 0-1 volt |
|                                  | Membrane selector switch           |

# APÉNDICE C

## PROPIEDADES PIEZOELECTRICAS DE CERÁMICAS

| TABLE VII: PROPERTIES OF PIEZOELECTRIC CERAMICS                     |                            |                 |      |                    |                         |                    |                   |                    |       |                     |
|---|----------------------------|-----------------|------|--------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|-------|---------------------|
| (Values are averaged and a consistent set)                          |                            |                 |      |                    |                         |                    |                   |                    |       |                     |
|   |                            | BARIUM TITANATE |      |                    | LEAD ZIRCONATE TITANATE |                    |                   |                    |       |                     |
| Material Reference Numbers<br>Channel Industries, Inc.<br>U.S. Navy |                            | 300             | 600  | 1300<br>Navy<br>IV | 5400<br>Navy<br>I       | 5500<br>Navy<br>II | 5600<br>Navy<br>V | 5700<br>Navy<br>VI | 5800  | 5804<br>Navy<br>III |
| Coupling Coefficients   | $k_{33}$                   | .46             | .39  | .45                | .71                     | .73                | .73               | .72                | .67   | .66                 |
|   | $k_{31}$                   | -.19            | -.16 | -.18               | -.36                    | -.37               | -.36              | -.37               | -.32  | -.32                |
|   | $k_{15}$                   | .46             | .39  | .45                | .72                     | .71                | .68               | .65                | .60   | .59                 |
|   | $k_p$                      | -.32            | -.27 | -.30               | -.60                    | -.62               | -.62              | -.62               | -.55  | -.54                |
| Piezoelectric Constants   |                            |                 |      |                    |                         |                    |                   |                    |       |                     |
| $d_{33}$  | $10^{-12}$ m/V             | 145             | 82   | 145                | 300                     | 400                | 505               | 550                | 245   | 240                 |
| $d_{31}$  | "                          | -58             | -33  | -56                | -135                    | -185               | -225              | -250               | -107  | -105                |
| $d_{15}$  | "                          | 245             | 150  | 245                | 525                     | 625                | 670               | 690                | 390   | 382                 |
| $g_{33}$  | $10^{-3}$ Vm/N             | 13.1            | 16.8 | 12.2               | 26.1                    | 25.8               | 22.0              | 19.4               | 25.2  | 25.8                |
| $g_{31}$  | "                          | -5.2            | -6.8 | -4.7               | -11.7                   | -11.9              | -9.8              | -8.8               | -11.0 | -11.3               |
| $g_{15}$  | "                          | 20.5            | 29.8 | 19.1               | 40.5                    | 40.0               | 31.5              | 26.4               | 31.5  | 32.2                |
| Free Dielectric Constants   |                            |                 |      |                    |                         |                    |                   |                    |       |                     |
| $K_3^T$   |                            | 1250            | 625  | 1350               | 1300                    | 1750               | 2600              | 3200               | 1100  | 1050                |
| $K_1^T$   |                            | 1350            | 570  | 1450               | 1475                    | 1775               | 2400              | 2950               | 1400  | 1340                |
| Elastic Constants   |                            |                 |      |                    |                         |                    |                   |                    |       |                     |
| $1/S_{11}^E = Y_{11}^E$   | $10^{10}$ N/m <sup>2</sup> | 11.7            | 11.6 | 11.9               | 8.2                     | 6.4                | 6.2               | 6.2                | 8.6   | 8.6                 |
| $1/S_{33}^E = Y_{33}^E$   | "                          | 11.1            | 11.0 | 11.3               | 6.5                     | 5.2                | 5.1               | 4.8                | 7.1   | 7.1                 |
| $C_{44}^E$  | "                          | 4.2             | 4.2  | 4.3                | 2.5                     | 2.0                | 2.2               | 2.3                | 2.9   | 2.9                 |
| Density (min.)  | $10^3$ kg/m <sup>3</sup>   | 5.5             | 5.4  | 5.55               | 7.55                    | 7.6                | 7.5               | 7.4                | 7.55  | 7.55                |
| Mechanical Q  |                            | 450             | 1200 | 600                | 500                     | 75                 | 70                | 65                 | 1100  | 1050                |
| Curie Point, °C   |                            | >115            | >140 | >115               | >300                    | >350               | >240              | >190               | >300  | >300                |
| Dielectric Loss Tangent (Max)                                       |                            |                 |      |                    |                         |                    |                   |                    |       |                     |
| Low field   |                            | .008            | .003 | .008               | .004                    | .02                | .02               | .02                | .004  | .004                |
| 2KV/cm RMS  |                            | NA              | .01  | .015*              | .02                     | NA                 | NA                | NA                 | .007  | .005                |
| 4KV/cm RMS  |                            | NA              | .025 | .03*               | .04                     | NA                 | NA                | NA                 | .01   | .01                 |
| Change in $K_3^T$ (%) (Max)   |                            |                 |      |                    |                         |                    |                   |                    |       |                     |
| 2KV/cm RMS  |                            | NA              | 3    | 6*                 | 5                       | NA                 | NA                | NA                 | 2.5   | 2.0                 |
| 4KV/cm RMS  |                            | NA              | 8    | 12*                | 18                      | NA                 | NA                | NA                 | 6.5   | 4.0                 |
| Static Tensile Strength psi   |                            | 7500            | 8500 | 7500               | 11000                   | 11000              | 11000             | 11000              | 12000 | 12000               |
| Rated Dynamic Tensile Strength psi                                  |                            | 3000            | 3500 | 3000               | 6000                    | 4000               | 4000              | 4000               | 7000  | 7000                |
| Change in $N_f$ / Time Decade %                                     |                            | 0.5             | 0.4  | 0.4                | 1.5                     | 0.2                | 0.25              | 0.25               | 1.0   | 1.0                 |
| Change in $k_p$ / Time Decade %                                     |                            | -1.8            | -0.7 | -1.9               | -2.3                    | -0.2               | -0.35             | -0.35              | -2.0  | -1.8                |
| Change in $K_3^T$ / Time Decade %                                   |                            | -0.8            | -2.9 | -1.3               | -5.5                    | -1.0               | -1.5              | -1.5               | -5.0  | -4.0                |

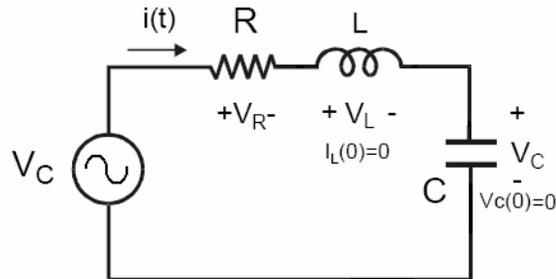
\*Values for 1300 are at 1.5 and 3KV/cm RMS

NA—not applicable

Channel Industries, inc. Manual de cerámicas piezoeléctricas.

# APÉNDICE D

## RESONANCIA DE UN CIRCUITO RCL EN SERIE



Un circuito RCL en serie consiste de una resistencia  $R$ , un inductor  $L$  y un capacitor  $C$  conectados en serie a una fuente de voltaje. La impedancia total de estos tres elementos es:

$$Z = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = |Z|e^{j\phi}$$

En donde:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \phi = \angle Z = \tan^{-1} \frac{\omega L - 1/\omega C}{R} = \begin{cases} -90^\circ, \omega = 0 \\ 90^\circ, \omega \rightarrow \infty \end{cases}$$

La frecuencia de resonancia se define particularmente como:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Cuando  $\omega = \omega_0$ , el circuito se encuentra en resonancia con las siguientes propiedades:

Los efectos de  $L$  y de  $C$  se anulan entre ellos

$$j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = 0$$

Las impedancias del capacitor y del inductor tienen la misma magnitud pero una fase opuesta

$$Z_L = j\omega_0 L = j\sqrt{\frac{L}{C}}, Z_C = 1/j\omega_0 C = -j\sqrt{\frac{L}{C}}$$

La impedancia compleja  $Z$  es real y alcanza un mínimo

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = R, \angle Z = 0$$

La corriente  $I$  y la tensión  $V$  se encuentran en fase, y dado un valor  $V$  cualquiera, la corriente  $I = V/Z = V/R$  alcanza su máximo valor.

La relación de la magnitud de impedancia inductor/capacitor y la resistencia se define como el factor de calidad.

$$Q = \frac{|Z_L|}{R} = \frac{|Z_C|}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$Q$  es inversamente proporcional a la resistencia  $R$  en el circuito. De acuerdo a la versión para fasores de la ley de Ohm, las tensiones a través de cada uno de los tres componentes son:

$$V_R = IZ_R = IR = V$$

$$V_L = Ij\omega_0 L \Big|_{\omega_0=1/\sqrt{LC}} = j\sqrt{\frac{L}{C}} \frac{V}{R} = jQV$$

$$V_C = I \frac{1}{j\omega_0 C} \Big|_{\omega_0=1/\sqrt{LC}} = -j\sqrt{\frac{L}{C}} \frac{V}{R} = -jQV$$

La magnitud de la tensión  $V_L$  a través de  $L$ , y  $V_C$  a través de  $C$ , son  $Q$  veces más grandes que la tensión  $V_R$  a través de  $R$  el cual es el mismo que el de la fuente de tensión  $V$ . Sin embargo, ya que  $V_L$  y  $V_C$  se encuentran con polaridad opuesta, se cancelan uno al otro.

EL circuito RCL en serie es un filtro paso banda con la banda centrada alrededor de la frecuencia de resonancia  $\omega_0 = 1/\sqrt{CL}$ , el cual puede ser ajustado cambiando  $C$  o  $L$ . El ancho de banda se determina a partir del factor de calidad  $Q$  (o de la resistencia  $R$ ), a más grande  $Q$  (menor  $R$ ), se tiene un ancho de banda mas angosto.

# APÉNDICE E

## TABLA DE CALIBRACIÓN PARA OXÍMETRO

| TABLE I. SOLUBILITY OF OXYGEN IN WATER EXPOSED TO WATER SATURATED AIR AT 760 mm Hg PRESSURE |                 |         |                 |         |                 |
|---|-----------------|---------|-----------------|---------|-----------------|
| TEMP °C   | SOLUBILITY mg/L | TEMP °C | SOLUBILITY mg/L | TEMP °C | SOLUBILITY mg/L |
| 0   | 14.62           | 16      | 9.87            | 32      | 7.31            |
| 1   | 14.22           | 17      | 9.67            | 33      | 7.18            |
| 2   | 13.83           | 18      | 9.47            | 34      | 7.07            |
| 3   | 13.46           | 19      | 9.28            | 35      | 6.95            |
| 4   | 13.11           | 20      | 9.09            | 36      | 6.84            |
| 5   | 12.77           | 21      | 8.92            | 37      | 6.73            |
| 6   | 12.45           | 22      | 8.74            | 38      | 6.62            |
| 7   | 12.14           | 23      | 8.58            | 39      | 6.52            |
| 8   | 11.84           | 24      | 8.42            | 40      | 6.41            |
| 9   | 11.56           | 25      | 8.26            | 41      | 6.31            |
| 10  | 11.29           | 26      | 8.11            | 42      | 6.21            |
| 11  | 11.03           | 27      | 7.97            | 43      | 6.12            |
| 12  | 10.78           | 28      | 7.83            | 44      | 6.02            |
| 13  | 10.54           | 29      | 7.69            | 45      | 5.93            |
| 14  | 10.31           | 30      | 7.56            | 46      | 5.84            |
| 15  | 10.08           | 31      | 7.43            | 47      | 5.74            |

| TABLE II. CALIBRATION VALUES FOR VARIOUS ATMOSPHERIC PRESSURES AND ALTITUDES |       |          |       |      |                       |
|--|-------|----------|-------|------|-----------------------|
| PRESSURE   |       | ALTITUDE |       |      | CALIBRATION VALUE (%) |
| INCHES Hg  | mm Hg | kPa      | Ft.   | m    |                       |
| 30.23  | 768   | 102.3    | -276  | -84  | 101                   |
| 29.92  | 760   | 101.3    | 0     | 0    | 100                   |
| 29.61  | 752   | 100.3    | 278   | 85   | 99                    |
| 29.33  | 745   | 99.3     | 558   | 170  | 98                    |
| 29.02  | 737   | 98.3     | 841   | 256  | 97                    |
| 28.74  | 730   | 97.3     | 1126  | 343  | 96                    |
| 28.43  | 722   | 96.3     | 1413  | 431  | 95                    |
| 28.11  | 714   | 95.2     | 1703  | 519  | 94                    |
| 27.83  | 707   | 94.2     | 1995  | 608  | 93                    |
| 27.52  | 699   | 93.2     | 2290  | 698  | 92                    |
| 27.24  | 692   | 92.2     | 2587  | 789  | 91                    |
| 26.93  | 684   | 91.2     | 2887  | 880  | 90                    |
| 26.61  | 678   | 90.2     | 3190  | 972  | 89                    |
| 26.34  | 669   | 89.2     | 3496  | 1066 | 88                    |
| 26.02  | 661   | 88.2     | 3804  | 1160 | 87                    |
| 25.75  | 654   | 87.1     | 4115  | 1254 | 86                    |
| 25.43  | 646   | 86.1     | 4430  | 1350 | 85                    |
| 25.12  | 638   | 85.1     | 4747  | 1447 | 84                    |
| 24.84  | 631   | 84.1     | 5067  | 1544 | 83                    |
| 24.53  | 623   | 83.1     | 5391  | 1643 | 82                    |
| 24.25  | 616   | 82.1     | 5717  | 1743 | 81                    |
| 23.94  | 608   | 81.1     | 6047  | 1843 | 80                    |
| 23.62  | 600   | 80.0     | 6381  | 1945 | 79                    |
| 23.35  | 593   | 79.0     | 6717  | 2047 | 78                    |
| 23.03  | 585   | 78.0     | 7058  | 2151 | 77                    |
| 22.76  | 578   | 77.0     | 7401  | 2256 | 76                    |
| 22.44  | 570   | 76.0     | 7749  | 2362 | 75                    |
| 22.13  | 562   | 75.0     | 8100  | 2469 | 74                    |
| 21.85  | 555   | 74.0     | 8455  | 2577 | 73                    |
| 21.54  | 547   | 73.0     | 8815  | 2687 | 72                    |
| 21.26  | 540   | 71.9     | 9178  | 2797 | 71                    |
| 20.94  | 532   | 70.9     | 9545  | 2909 | 70                    |
| 20.63  | 524   | 69.9     | 9917  | 3023 | 69                    |
| 20.35  | 517   | 68.9     | 10293 | 3137 | 68                    |
| 20.04  | 509   | 67.9     | 10673 | 3253 | 67                    |
| 19.76  | 502   | 66.9     | 11058 | 3371 | 66                    |

Manual de calibración para oxímetro YSI

# BIBLIOGRAFÍA

[1] B. Barber, “*Synchronous picosecond sonoluminescence*,” Ph. D. Dissertation, UCLA Physics Department, (1992).

[2] C. Cámara, *Cavitación y luminiscencia en un tubo de venturi*. Tesis para obtener el título de físico, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, (2000).

[3] H. Frenzel y H. Schultes, *Luminescenz im ultraschallbeschickten Wasser*, Z. Phys. Chem. B, **27**, 421-424, (1934).

[4] K. Yosioka, A. Omura, *The Light emission from a single bubble driven by ultrasound and the spectra of acoustic oscillation*. Proc. Annu. Meet. Acoust. Soc. Jpn. May, (1962) (solo en japones).

[5] L. Crum, G.T. Reynolds, *Sonoluminescence produced by stable cavitation*. J. Acoustic Soc. Am., **78**, 137, (1985).

[6] K. Yasui, et al., *Sonoluminescence*, Applied Spectroscopy Reviews, **39**, 399-436, (2004).

[7] P. Jarman , K. J. Taylor. *Acústica* **23**, 243, (1970).

[8] I. V. Ostrovskii, et al., *Sonoluminescence and acoustically driven optical phenomena in solids and solid–gas interfaces*. Phys. Rep., **311**, 1-46, (1999).

[9] D. F. Gaitan, “*An experimental investigation of acoustic cavitation in gaseous liquids*,” Ph. D. dissertation, University of Mississippi, (1990).

[10] M. Navarrete, M. Villagrán-Muniz y R. Gaytan, *Aparato didáctico para reproducir el fenómeno de sonoluminiscencia de una sola burbuja*. Memorias del congreso SOMI XVI, DIDAC 3-1, (2001).

[11] L. Crum, *Sonoluminescence*, Physics today, **47** Issue 9, 22, (1994).

[12] B. Barber, et al., *Defining the unknowns of sonoluminescence*, Phys. Rep., **281**, 67, (1997).

[13] R. Gutenkunst, *Extracting light from water: Sonoluminescence*. [www.curj.caltech.edu](http://www.curj.caltech.edu), (2002).

[14] T. Leighton, *The acoustic bubble*; Academic. London, (1994).

- [15] M McNamara, et al., *Sonoluminescence temperatures during multi-bubble cavitation*, Nature, London, **401**, 772–775, (1999).
- [16] C. C. Wu, P. H. Roberts, *Shock-wave propagation in a sonoluminescence gas*. Phys. Rev. Lett., **70**, 3424–3427, (1993).
- [17] R. Hiller, S. J. Putterman, B. P. Barber, *Spectrum of synchronous picosecond sonoluminescence*. Phys. Rev. Lett., **69**, 1182–1184, (1992).
- [18] B. P. Barber, et al., *Resolving the picosecond characteristics of synchronous sonoluminescence*. J. Acoust. Soc. Am., **91**, 3061–3063, (1992).
- [19] W. C. Moss, et al., *Hydrodynamic simulations of bubble collapse and picosecond sonoluminescence*, Phys. Fluids, **6**, 2979–2985, (1994).
- [20] B. Gompf, et al., *Resolving sonoluminescence pulse width with time-correlated single photon counting*. Phys. Rev. Lett. **79**, 1405–1408, (1997).
- [21] R. A. Hiller, S. J. Putterman, K. R. Weninger, *Time-resolved spectra of sonoluminescence*. Phys. Rev. Lett., **80**, 1090–1093, (1998).
- [22] R. Pecha, et al., *Resolving the sonoluminescence pulse shape with a streak camera*, Phys. Rev. Lett., **81**, 717–720, (1998).
- [23] K. Yasui, *Alternative model of single-bubble sonoluminescence*. Phys. Rev. E, **56**, 6750–6760, (1997).
- [24] H. Y. Cheng, M. Chu, P. T. Leung, *How important are shock waves to single-bubble sonoluminescence?* Phys. Rev. E, **58**, 2705–2708, (1998).
- [25] V. Q. Vuong, A. J. Szeri, D. A. Young, *Shock formation within sonoluminescence bubbles*, Phys. Fluids, **11**, 10–17, (1999).
- [26] S. Hilgenfeldt, S. Grossmann, D. A. Lohse, *A simple explanation of light emission in sonoluminescence*, Nature (London), **398**, 402–405, (1999).
- [27] K. Yasui, *Mechanism of single-bubble sonoluminescence*. Phys. Rev. E, **60**, 1754–1758, (1999).
- [27b] D. J. Flannigan, K. S. Suslick, *Plasma formation and temperature measurement during single-bubble cavitation*. Nature, **434**, 52–55, (2005).
- [28] S. Gasiorowicz. *Quantum Physics*, 1<sup>st</sup> Ed.; John Wiley & Sons: New York, (1976).
- [29] L. Frommhold. *Electron-atom bremsstrahlung and the sonoluminescence of rare gas bubble*, Phys. Rev. E, **58**, 1899–1905, (1998).

- [30] Y.B. Zel'dovich, Y. P. Raizer, *Physics of Shock Waves and High-Temperature Hydrodynamic Phenomena*; Academic: New York, Vols. I y II. (1966).
- [31] S. Hilgenfeldt, S. Grossmann, D. A. Lohse, *Sonoluminescence light emission*, *Phys. Fluids*, **11**, 1318-1330, (1999).
- [32] S. Hatanaka, et Al., *Mechanism of multi-bubble sonoluminescence at excessive sound pressure*. *Jpn J. Appl. Phys.*, Part 1, **40**, 3856–3860, (2001).
- [33] E. B. Flint, K. S. Suslick, *Sonoluminescence from nonaqueous liquids – emission from small molecules*. *J. Am. Chem. Soc.*, **111**, 6987–6992, (1989).
- [34] <http://www.sonoluminescence.com/SL100B.html>
- [35] F. Gaitan, et al., *Sonoluminescence and bubble dynamics for a single, stable, cavitation bubble*. *J. Acoust. Soc. Am.*, **91**, 3166-3183, (1992).
- [36] R. A. Hiller, et al., *Effect of noble gas doping in single-bubble sonoluminescence*, *Science* **265**, 248-250, (1994).
- [37] R. A. Hiller, B. P. Barber, *Producing light from a bubble air*, *Scientific America*, **272**, 78, (1995).
- [38] <http://www.channelindustries.com/catalog.htm>
- [39] G. Simon, *Experimental and theoretical investigation of single-bubble sonoluminescence; Ph.D. dissertation*, Eötvös University, Faculty of Science, (2003).
- [40] F. R. Young, *SONOLUMINESCENCE*. Ed. CRC PRESS. Estados Unidos, (2005).
- [41] J. A. Ketterling, R. E. Apfel, *Extensive experimental mapping of sonoluminescence parameter space*. *Phys. Rev. E*, **61** (4), 3832-3837, (2000).