



DETECCIÓN DE BURBUJAS EN COLUMNAS DE  
FLUIDO POR MEDIO DE ULTRASONIDOS

JAIVER BELTRÁN VALDÉS

Código 11891624479

Universidad Antonio Nariño

Maestría en Ingeniería Física

Facultad de Ciencias

Bogotá D.C., Colombia

2022

# DETECCIÓN DE BURBUJAS EN COLUMNAS DE FLUIDO POR MEDIO DE ULTRASONIDOS

**Jaiver Beltrán Valdés**

Tesis presentada como requisito para optar al título de:

**Magíster en Ingeniería Física**

Director:

Diego Alejandro Roa Romero. Ph.D.

Co-Director:

Gustavo Adolfo Orozco Alvarado. Ph.D.

Línea de Investigación:

Física Computacional

Grupo de Investigación:

Modelado y Computación Científica

Universidad Antonio Nariño

Maestría en Ingeniería Física

Facultad de Ciencias

Bogotá D.C., Colombia

2022

# NOTA DE ACEPTACIÓN

DIEGO ROA ROMERO Ph D.  
Director.

JURADO I

JURADO II

A Glovald´s donde sea que estés...

A la Morena por su amor incondicional...

# AGRADECIMIENTOS

Al profesor Diego Roa Romero PhD, por su dedicación y paciencia al guiar este trabajo.

A Gustavo Orozco Alvarado PhD, por invitarme a trabajar con este grupo.

Agradecimientos sinceros al Ingeniero y amigo Johan Steven Mejía Mogollón por su invaluable aporte en el proceso experimental.

A mis compañeros y amigos M.Sc. Aura Suarez, M.Sc. Oscar Ruíz, Ing Diego Henao, quienes me permitieron hacer parte de sus vidas, alegrías y pesares.

A una persona excepcional, Victor Manuel Rico Botero PhD quien mostró el camino en las etapas cruciales del desarrollo. Muchas gracias...

A todas las personas que con su paciencia, ayuda o simplemente silencio, asistieron y ayudaron en su elaboración y culminación.

## RESUMEN

En este documento, se muestran los resultados obtenidos para el diseño y montaje de un prototipo a escala laboratorio que sirva para detectar burbujas producidas en columnas de líquido usando ultrasonidos. El método utilizado, consistió en evaluar los voltajes recibidos por un transductor piezo-eléctrico, el cual es estimulado con una señal ultrasónica, proveniente de otro cerámico de similares características. Este arreglo, se acopló a una columna de material acrílico, conteniendo fluido en su interior, para posteriormente, relacionar dichos voltajes con el tamaño de las burbujas de aire generadas en el interior del fluido. Esta medida de tamaño en la burbuja, se encontró por medio del análisis de imágenes, en este proceso, se programó un algoritmo computacional en MATLAB, que permitió determinar el tamaño promedio de las burbujas a partir de una serie de videos. Posteriormente, se realizó un proceso de adquisición, filtración y análisis de datos basados en la interfaz de desarrollo PSoC, para observar el comportamiento y las variaciones de voltaje provenientes del paso de la burbuja a través de los sensores ubicados en la cámara acústica, finalmente, se encuentra la relación entre tamaños de burbuja y voltajes. Los resultados obtenidos, permiten corroborar que la posibilidad de detectar burbujas por medio del método de ultrasonidos propuesto, es factible.

Palabras clave: Ultrasonido, piezo electricidad, cámara acústica, transductor, tamaño de burbuja.

## ABSTRACT

This document shows the results obtained for the design and assembly of a laboratory-scale prototype to detect bubbles produced in liquid columns using ultrasound. The method used consisted in evaluating the voltages received by a piezo-electric transducer, which is stimulated with an ultrasonic signal coming from another ceramic device of similar characteristics. This arrangement was coupled to a column of acrylic material, containing fluid in its interior, then relate these voltages to the size of the air bubbles generated in the interior of the fluid. The bubble size measurement was performed by means of digital image analysis. In this process, a computational algorithm was programmed in MATLAB, which allowed determining the average size of the bubbles from a series of videos. Subsequently, a data acquisition, filtering and analysis process was performed based on the PSoC development interface, to observe the behavior and voltage variations coming from the passage of the bubble through the sensors located in the acoustic chamber, finally, the relationship between bubble sizes and voltages is found. The results obtained corroborate that the possibility of detecting bubbles by means of the proposed ultrasonic method is feasible.

Keywords: Ultrasound, piezo electricity, acoustic chamber, transducer, bubble size.

# CONTENIDO

Agradecimientos	v
Resumen	vi
Abstract	vi
Índice general	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABLAS	x
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>2. TEORÍA DEL ULTRASONIDO</b>	<b>5</b>
2.1. GENERACIÓN DEL SONIDO . . . . .	5
2.2. ULTRASONIDO . . . . .	6
2.3. ANTECEDENTES E HISTORIA . . . . .	6
2.4. ESTADO DEL ARTE . . . . .	7
2.5. CARACTERÍSTICAS DEL ULTRASONIDO. . . . .	10
2.6. INTERACCIÓN ULTRASONIDO-BURBUJA . . . . .	12
2.7. EFECTO PIEZOELÉCTRICO . . . . .	15
<b>3. MÉTODO EXPERIMENTAL</b>	<b>19</b>
3.1. EQUIPOS Y MATERIALES . . . . .	20
3.2. CÁMARA ACÚSTICA . . . . .	21
3.3. GENERADOR DE BURBUJAS . . . . .	22
3.4. SEÑAL DE ULTRASONIDO . . . . .	25
3.5. OSCILOSCOPIO . . . . .	27
3.6. GENERADOR DE SEÑALES . . . . .	28
3.7. DETECCIÓN DE SEÑALES-ADQUISICIÓN DE DATOS . . . . .	29
3.8. SISTEMA DE VIDEO . . . . .	31
3.9. DESARROLLO EXPERIMENTAL . . . . .	34

---

<b>4. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES</b>	<b>37</b>
4.1. DESCOMPONER VIDEO EN IMÁGENES . . . . .	38
4.2. IMÁGENES A FORMATO DE GRISES . . . . .	39
4.3. RECORTAR IMAGEN . . . . .	40
4.4. BINARIZACIÓN . . . . .	41
4.5. ESTRUCTURA Y MORFOLOGÍA DE IMAGEN . . . . .	43
4.6. CÁLCULO DE ÁREA . . . . .	45
4.6.1. ERRORES EN EL CÁLCULO DE TAMAÑO . . . . .	46
4.7. EFECTOS DEL ULTRASONIDO EN LA FORMA DE LA BURBUJA . . . . .	48
<b>5. CUANTIFICACIÓN DE VOLTAJES</b>	<b>49</b>
5.1. CIRCUITO AMPLIFICADOR SUMADOR . . . . .	50
5.2. DIGITALIZACIÓN Y ENVÍO DE DATOS . . . . .	53
5.3. FASES PS <sub>0</sub> C EN EL DESARROLLO . . . . .	55
5.4. TRATAMIENTO DE DATOS CON MATLAB . . . . .	59
<b>6. RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>	<b>63</b>
6.1. RESULTADOS MEDIDAS DE VOLTAJE . . . . .	64
6.2. RESULTADOS TAMAÑO DE BURBUJA . . . . .	65
6.3. RELACIÓN TAMAÑO VOLTAJE . . . . .	67
<b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>73</b>
7.1. CONCLUSIONES . . . . .	73
7.2. RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS . . . . .	74
<b>A. Anexo: Linealización Ecuación Rayleigh Plesset.</b>	<b>76</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>80</b>

# LISTA DE FIGURAS

2-1. Zonas de compresión y dilatación en una onda sonora, evidenciando longitud de onda. Fuente: [1] . . . . .	10
2-2. Esquemas de un Piezo Eléctrico. Fuente: Autor . . . . .	16
2-3. Diagrama de ejes en un Piezoeléctrico. Autor. . . . .	17
2-4. Elemento Piezoeléctrico Vibración Longitudinal. Autor. . . . .	18
2-5. Elemento Piezoeléctrico Vibración Trasversal. Autor. . . . .	18
3-1. Diagrama. Fases de desarrollo experimental. Autor . . . . .	20
3-2. Diagrama de montaje experimental. El cilindro representa la CA, en la cual se representan los PZT emisor y receptor adheridos, el generador de señales, un osciloscopio usado para monitoreo de las señales, el sistema de generación de burbuja, adquisición de datos y captura de imágenes. Autor . . . . .	20
3-3. Presentación Física Cámaras Acústicas. Medidas en (mm). Autor. . . . .	22
3-4. Presentación Física Generador de Aire. Autor. . . . .	23
3-5. Presentación Física Relevé electromecánico y Bomba Peristáltica. Autor. . .	24
3-6. Agujas (Yelcos). Autor. . . . .	24
3-7. Presentación Física PZTA SMR 3515T55 izquierda, PZTD SMD35T4S311 derecha. Autor. . . . .	26
3-8. Presentación Pegue PZT DISCO Autor. . . . .	27
3-9. Osciloscopio Utilizado. Autor. . . . .	28
3-10. Generador de señales. Autor. . . . .	29
3-11. Imágenes LF-353P y Circuito Acondicionamiento Señal. Autor. . . . .	30
3-12. Fuentes Reguladas de Voltaje. Autor. . . . .	30
3-13. Imagen PSoC. Autor. . . . .	31
3-14. Montaje Protoboard. Autor. . . . .	31
3-15. Imágenes Procesadas a partir de burbujas en Agua. Autor. . . . .	32
3-16. Imagen Obtenida en Glicerina. Autor. . . . .	32
3-17. Detalle Ubicación Regleta al interior de la CA. Autor. . . . .	33
3-18. Sistema de video. Autor. . . . .	34
3-19. Montaje general en sitio. Autor. . . . .	34
3-20. Detalle Guía Corcho-Ingreso aguja en CA. Autor . . . . .	36
4-1. Diagrama de Bloques. Procesamiento de imágenes MATLAB. Autor. . . . .	38
4-2. Procesamiento de imágenes. Imagen en color a Imagen en grises. Autor. . . .	40

<b>4-3.</b>	Procesamiento de imágenes. Recorte de la imagen. En la imagen de la izquierda, se muestra la fotografía en tonos de gris. En la derecha se muestra el recorte de la zona de interés donde el único objeto relevante es la burbuja. Autor. . . . .	41
<b>4-4.</b>	Procesamiento de imágenes. Binarización de la imagen. A la izquierda imagen en escala de grises, a la derecha resultado de la binarización. Autor. . . . .	42
<b>4-5.</b>	Procesamiento de imágenes. Corrección de la imagen. Izquierda: imagen en escala de grises, centro: imagen binarizada, derecha: imagen modificada. Autor. . . . .	44
<b>4-6.</b>	Procesamiento de imágenes. Correlación píxeles-milímetros. Arriba izquierda: Imagen de regleta en color. Arriba derecha: Imagen regleta binarizada. Abajo: Acercamiento. Autor. . . . .	45
<b>4-7.</b>	Variaciones de Parámetros en proceso de tratamiento imágenes. . . . .	47
<b>4-8.</b>	Secuencia fotogramas Aguja No 20, prueba 1. PZTA. Secuencia correspondiente a las fotografías Nos: 96-98-100-102-104-106-108-110-112. . . . .	48
<b>5-1.</b>	Diagrama Procesamiento de Señal. Fuente: Autor . . . . .	49
<b>5-2.</b>	Topología Filtro Pasa Alto y Sumador Multi entrada Fuente: Autor . . . . .	50
<b>5-3.</b>	Curvas de Rendimiento en Amplificación LF-353P. El punto óptimo de trabajo se da donde se cruzan las curvas, rango acorde con las frecuencias a manejar. Fuente: [2] . . . . .	51
<b>5-4.</b>	Diagrama de Bloques Simplificado PSoC 5LP CY858LP. Fuente:[3]. . . . .	55
<b>5-5.</b>	Diagrama de Bloques Top Design. Digitalización y envío datos. Fuente: Autor . . . . .	56
<b>5-6.</b>	Proceso de muestreo: A: Señal original. B: Señal sin burbuja, puntos de muestreo. C: Señal con burbuja, puntos de muestreo. Autor. . . . .	58
<b>5-7.</b>	Gráfica Voltajes en función del tiempo al paso de la burbuja, obtenidos por digitalización en el PSoC. Fuente: Autor . . . . .	59
<b>5-8.</b>	Ampliacion zona de Voltajes en función del tiempo al paso de la burbuja, obtenidos por digitalización en el PSoC. Fuente: Autor . . . . .	60
<b>5-9.</b>	Gráficas: A la izquierda se observa el Histograma que permite definir la señal de referencia. A la derecha, gráfica de Voltaje en función del tiempo a partir del manejo de datos por MATLAB. Fuente: Autor . . . . .	61
<b>6-1.</b>	Montaje CA, Procesamiento del Video. Fuente: Autor . . . . .	66
<b>6-2.</b>	Gráfica Área-Voltaje PZTA . . . . .	69
<b>6-3.</b>	Gráfica Área-Voltaje PZTD . . . . .	69

# LISTA DE TABLAS

<b>2-1.</b> Clasificación de las Ondas Sonoras respecto de su frecuencia.[4] . . . . .	5
<b>3-1.</b> Diámetros Internos Agujas (Calibre). . . . .	25
<b>3-2.</b> Características básicas Osciloscopio UNI-T 2102CEL. . . . .	27
<b>3-3.</b> Características básicas Generador UNI-T 1010A. . . . .	28
<b>6-1.</b> Voltajes generados burbuja PZTA. Frecuencia 48.2 <i>KHz</i> . . . . .	64
<b>6-2.</b> Voltajes generados burbuja PZTD. Frecuencia 52.9 <i>KHz</i> . Valores de error. .	65
<b>6-3.</b> Valores de Área a partir de las Imágenes PZTA. Las columnas 3 y 4 describen intervalos de error asociados al procesamiento de la imagen (error sistemático). Las columnas 6 y 7 muestran los intervalos de error considerando el error estadístico y sistemático. . . . .	66
<b>6-4.</b> Valores de Área a partir de las Imágenes PZTD. Las columnas 3 y 4 describen intervalos de error asociados al procesamiento de la imagen (error sistemático). Las columnas 6 y 7 muestran los intervalos de error considerando el error estadístico y sistemático. . . . .	67
<b>6-5.</b> Relación Voltaje- Área PZTA. . . . .	68
<b>6-6.</b> Relación Voltaje- Área PZTD. . . . .	68

# 1. INTRODUCCIÓN

El sonido es una onda mecánica asociada a variaciones de densidad y presión, la cual para propagarse, requiere un medio material sólido, líquido o gaseoso. A su vez, el ultrasonido es una banda del espectro acústico cuya frecuencia supera el límite perceptible por el oído humano.

A nivel industrial, existen múltiples aplicaciones del ultrasonido; algunas de las cuales permiten: medir distancias [5], controlar procesos industriales [6], detectar defectos en concretos [7], detectar calidades en soldaduras [8], reconocer objetos [9], desarrollar ensayos no destructivos en materiales [10][11], entre otras.

Es muy importante para el área médica, la industria y las obras civiles entre otras, detectar burbujas y micro burbujas, ya que la presencia de éstas, pueden dar lugar a anomalías en tejidos y la salud en general; imperfecciones en concretos, desgaste anormal de estructuras, vibraciones o defectos en el comportamiento de un material o en el resultado final de procesos industriales, imperfecciones en la calidad del producto final u otras condiciones no esperadas [12].

A nivel médico, se hace necesaria la posibilidad de detectar la formación de burbujas en la sangre por descompresión o "enfermedad del buzo". Dicha DCS (Decompression Sickness por sus siglas en inglés), tiene lugar cuando al bajar la presión en el entorno del buceador, se forman pequeñas burbujas de nitrógeno en la sangre y otros tejidos, las cuales aumentan rápidamente su tamaño, pudiendo causar parálisis temporal, lesiones permanentes e incluso

la muerte [13]. De allí la importancia de posibilitar la detección de dicha formación tempranamente a fin de tomar los correctivos y preservar la integridad del buzo. Actualmente la manera mas utilizada, corresponde con las PADI DIVE TABLES [14] , un sistema de valores sobre los cuales se calcula las repeticiones, tiempo de inmersión y ascenso durante el proceso de buceo, pero no constituye una fuente efectiva de monitoreo en el sistema circulatorio del buzo.

A nivel industrial, uno de los problemas a abordar, tiene que ver con las torres de destilación para etanol carburante. Este producto ha tenido un crecimiento en el mercado mundial de los alcoholes desde hace ya dos siglos. Los antecedentes del empleo de etanol como combustible se remiten a los inicios del desarrollo de las primeras máquinas de combustión interna y actualmente toma importancia dada la posibilidad de reducir la contaminación ambiental, el efecto invernadero y la posible escasez de recursos petrolíferos. El proceso de producción de etanol anhidro involucra columnas de destilación que contienen en su interior empaques usualmente cerámicos de varias formas, su finalidad es incrementar la transferencia de masa por el contacto entre gases y líquidos, proceso durante el cual, el gas aumenta la concentración de algún compuesto al estar en presencia del líquido y por tanto mejora la eficiencia del proceso.

De poderse conocer la distribución de burbujas durante el proceso, se podría incrementar la productividad ya que sería posible determinar zonas de estancamiento y también formación de vórtices o puntos muertos que se convierten en regiones que disminuyen las operaciones de transferencia de calor y masa dentro de la columna.

En Colombia actualmente no existen empresas dedicadas al diagnóstico de estos inconvenientes y usualmente se suelen contratar empresas extranjeras que en la mayoría de los casos genera sobre costos y usualmente utiliza fuentes ionizantes causando daño en el producto terminado por el uso de esta radiación [15].

La principal razón de este proyecto es ampliar los métodos experimentales basados en genera-

dores de ultrasonidos e igualmente, analizar la interacción que se presenta entre el ultrasonido y la burbuja en un detector de las mismas. De esta manera, permite evaluarse la respuesta de los voltajes recibidos y así, poder hallar relaciones entre, tamaño de las burbujas generadas en el fluido y su voltaje obtenido. De esta forma verificar la posibilidad de aplicación en el torrente sanguíneo, en el interior de una columna de destilación, o en otro tipo de aplicaciones, además de servir como base para lograr detecciones de otro tipo de elementos y en otro tipo de circunstancias.

Con base en lo anterior y por consiguiente, se tienen los siguientes objetivos planteados:

**GENERAL:**

Implementar y validar una prueba de concepto que fundamente un prototipo para detectar burbujas por medio de ultrasonidos.

**ESPECÍFICOS:**

1. Caracterizar a escala laboratorio, el comportamiento de un arreglo de piezo eléctricos, configurados como emisor-receptor de ultrasonidos, adosados alrededor de una columna acrílica con un fluido en su interior.
2. Implementar un sistema de análisis digital, que permita determinar el tamaño de una burbuja presente en una cámara acústica, a partir de las imágenes obtenidas por video.
3. Evaluar las variaciones de voltaje que provoca una burbuja al paso por el detector en la cámara acústica, hallando la relación entre tamaño (Área) y variación del voltaje.

La organización del documento se ha estipulado de la siguiente manera:

En el capítulo 2, se muestran los fundamentos teóricos de los conceptos aplicados en el montaje y desarrollo de la investigación, tales como piezo electricidad y ultrasonido. En el capítulo

3, se describe el proceso experimental propuesto, sobre el cual se desarrolló la investigación, allí mismo se evidencian los primeros resultados obtenidos sobre la caracterización de la cámara acústica. En el capítulo 4, se aborda el proceso de la adquisición y procesamiento de imágenes. En el capítulo 5, se ilustra el proceso para determinar los voltaje obtenidos durante el desarrollo del proyecto. En el capítulo 6, se expresa el consolidado general de resultados desde los objetivos planteados. Por último, el capítulo 7, presenta las conclusiones generales y perspectivas futuras.

## 2. TEORÍA DEL ULTRASONIDO

El sonido es el ejemplo mas importante de una onda longitudinal. En este capítulo, ilustraremos su descripción desde el punto de vista físico, ampliando el concepto de ultrasonido y su interacción con las burbujas de gas en un fluido.

### 2.1. GENERACIÓN DEL SONIDO

No importa si la transmisión de sonido se da a partir de un estruendo fuerte o una agradable melodía musical, el generador primario de este efecto es un objeto que vibra. Las ondas generadas por esta vibración, pueden viajar en un medio bien sea líquido, sólido o gaseoso tomando diferentes velocidades y a su vez, generando variaciones de densidad y presión. Con respecto de su frecuencia, se pueden clasificar de acuerdo con el umbral audible, de esta forma, tenemos: “infrasonidos”, “sonidos audibles” y “ultrasonidos”. Los rangos de frecuencia aceptados para esta clasificación son:

<i>CLASIFICACIÓN</i>	<i>FRECUENCIA (Hz)</i>
Infrasonido	$< 20$
Sonido audible	20-20000
Ultrasonido	$> 20000$

**Tabla 2-1.:** Clasificación de las Ondas Sonoras respecto de su frecuencia.[4]

## 2.2. ULTRASONIDO

De acuerdo con la clasificación anterior, las ondas acústicas con frecuencias mayores a 20000  $Hz$ , son llamadas “ultrasonido”. La capacidad auditiva de los seres humanos, no es homogénea, sin embargo, el valor máximo audible aceptado es de 20000  $Hz$ . Los ultrasonidos, puede variar desde los 20  $kHz$ , hasta varios  $GHz$  [4]. Debido a su alta frecuencia y cortas longitudes de onda, se pueden utilizar para producir entre otras, imágenes de objetos, determinar medidas de distancia y a nivel médico, es comúnmente utilizado en seres humanos y en animales para obtener imágenes de órganos internos, sin necesidad de someter al paciente a cirugías o exámenes invasivos. También puede ser utilizado en la detección de defectos y fallas en pruebas no destructivas a nivel de obras civiles, adicionalmente, puede utilizarse en la limpieza de superficies. Entre los animales que usan el ultrasonido, se encuentran los murciélagos, quienes detectan a sus presas y basan su vuelo en la detección de objetos con ayuda del ultrasonido.[16].

## 2.3. ANTECEDENTES E HISTORIA

Los primeros referentes relacionados con el ultrasonido, se ubican en el Siglo XVIII: Lazzaro Spallanzani, logró demostrar que los murciélagos son animales que navegan en la oscuridad usando sonidos inaudibles, dando inicio a la eco localización como concepto [17]. En 1826 Jean Daniel Colladon(1802-1893), un físico suizo y Jacques Charles-Francois Sturm (1803-1855) su asistente, demuestran que la rapidez del sonido en el agua es mayor que esta misma rapidez en el aire [18]. Sobre la base de este experimento, la velocidad del sonido en el agua se calculó como 1435 m/seg, un valor similar al estándar actual de 1490 m/seg a 25°C, utilizado en la física de hoy en día [19].

El concepto de ultrasonido renació en el año de 1880 con el descubrimiento de la piezoelec-

tricidad por el físico francés Pierre Curie junto a su hermano Jacques, ellos realizaron un experimento que demostró que ciertos cristales se deformaban cuando eran expuestos a un campo eléctrico, convirtiendo la energía eléctrica en energía mecánica. De esta forma generaron ondas similares a las del sonido pero con frecuencias mayores al rango audible del ser humano [20]. Paul Langevin, físico francés, durante la primera guerra mundial (años 10-20's), desarrolló un dispositivo capaz de detectar submarinos enemigos a través de ultrasonido; el dispositivo utilizaba el efecto piezo eléctrico mediante cristales de cuarzo y amplificadores de tubo de vacío, lo que constituyó la base del sistema de navegación SONAR (Acrónimo de; Sound Navigation Ranking), implementado durante la segunda guerra mundial [21]. Sokolov en el año 1929, describió un método usando sonido reflejado para detectar defectos en las placas de metal. En el año 1942, el ingeniero americano Floyd Firestone aplicó esta tecnología y recibió la patente; fue la que por último se aplicó a la medicina [22]. El primero en descubrir el potencial que tenía esta nueva herramienta diagnóstica fue Karl Dussik, la denominó "hipersonografía". Mediante esta herramienta, Dussik era capaz de detectar tumores cerebrales [23]. Actualmente a nivel médico, la aplicación de ultrasonido, está ampliamente difundida en el diagnóstico no invasivo, la ecografía para determinar el estado del feto durante el embarazo, y otras aplicaciones de similares características [24].

## 2.4. ESTADO DEL ARTE

Recientemente, Leroy *et al.*, [25] utilizaron el ultrasonido, para encontrar burbujas de aire en harina. Con ayuda de rayos X se pueden identificar inicialmente las burbujas en la masa y de esta forma reconocer sus características, para contrastarlas con los valores obtenidos con ultrasonido. La idea fundamental del trabajo, era comprobar que el ultrasonido podría utilizarse para determinar dichas características de las burbujas confinadas en un medio elástico.

En el estudio de Lasso [26], presenta un análisis de la interacción ultrasonido-burbuja, des-

de la perspectiva de la simulación computacional para potenciar las técnicas diagnósticas no invasivas. Sus resultados, evidencian similitudes entre los modelos propuestos en forma computacional y los eventos reales.

Por su parte, Lars [27], describe las características de la teoría acústica a la luz de la interacción entre burbuja y sonido, tanto lineal como no lineal, mostrando resultados experimentales y su uso para modelar fenómenos mediante simulaciones computarizadas.

De igual manera, C.H.Leow *et al.*, [28], describen la técnica ultrasónica como método no invasivo para visualizar el flujo dentro del sistema sanguíneo. Se utilizaron imágenes de ultrasonido con medio de contraste de micro burbujas y se calculó una medida de entropía para cuantificar la concentración de las mismas. Así mismo, utiliza el ultrasonido para controlar y manipular dichas concentraciones de micro burbujas. Los resultados indicaron que la técnica es capaz de cuantificar el grado de mezcla dentro de las diferentes configuraciones estudiadas.

Así mismo, Himanshu *et al.*, [29], evalúan la posibilidad medir y modificar el tamaño de micro burbujas utilizadas como medio de contraste en técnicas de imágenes de ultrasonido, esto con el objetivo de aumentar la resolución de la técnica. Encuentran que efectivamente la manipulación en el tamaño mejora la sensibilidad, lo que tiene aplicaciones en la evaluación de patologías como la artero-esclerosis.

E. Mohseni *et al.*, [30] estudian el efecto de la producción de burbujas en fluidos para el tratamiento de aguas residuales. Una de las técnicas utilizadas consiste en el uso de agujas para la generación de burbujas dentro del fluido; técnica que también será utilizada en esta investigación. Ellos encuentran que la formación de dichas burbujas se ve afectada por el tamaño e inclinación de la aguja, presión y material de la misma. Estos resultados se evalúan y se comparan para determinar el rendimiento de membranas de tipo comercial.

Saavedra [31] describe un nuevo método para la detección de burbujas en un prototipo simplificado del muslo humano, por medio de un anillo piezoeléctrico colocado alrededor de éste. En adición, utiliza dos cámaras de alta velocidad, que graban las burbujas provenientes del sistema generador de burbujas y también pequeños micrófonos, que miden las perturbaciones dentro del prototipo.

Iwasaki *et al.* [32] detecta burbujas producidas por cavitación por medio de ultrasonidos de alta frecuencia. De esta forma predecir los efectos a nivel terapéutico y secundarios de la cavitación, garantizando la eficacia y seguridad del tratamiento.

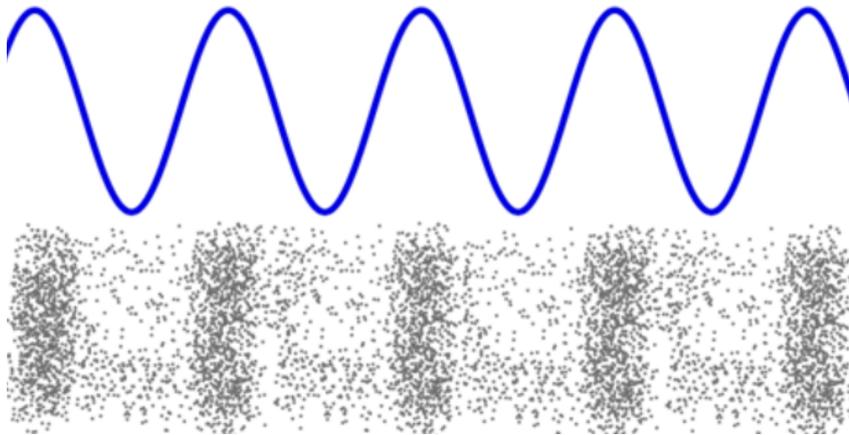
Fu *et al.* [33], utiliza un método de múltiples cámaras de alta velocidad, para obtener imágenes 3D de burbujas, por medio de superposición de estas. Busca con este método, minimizar el error en la estimación del tamaño de la burbuja y su impacto en aplicaciones de ingeniería.

Izadifar *et al.* [34], realiza un compendio de las técnicas para detectar y utilizar micro burbujas como medios de contraste y sus repercusiones a nivel médico, igualmente las limitaciones de los métodos, entre ellos el ultrasonido como sistema de detección.

Se evidencia con estos estudios que la aplicación del ultrasonido para la estimación de tamaños de objetos confinados, es un campo activo y polifacético, con amplias posibilidades de expansión para su aplicabilidad. En la siguiente sección, se estudian las propiedades físicas del ultrasonido y su interacción con burbujas.

## 2.5. CARACTERÍSTICAS DEL ULTRASONIDO.

Las características físicas del ultrasonido, obedecen a los mismos principios de las ondas sonoras. Por lo tanto, un ciclo de ondas, será una combinación de alta presión (compresión) y baja presión (dilatación), así mismo, la distancia entre dos puntos de compresión (o dos de dilatación) es la longitud de onda.



**Figura 2-1.:** Zonas de compresión y dilatación en una onda sonora, evidenciando longitud de onda. Fuente: [1]

- Transmisión de ultrasonidos.

La propagación de un ultrasonido en un medio ocurre por la acción de las fuerzas que ejerce una partícula en cada una de las partículas vecinas [35]. La manera en que la onda se desplaza, puede describirse mediante la ecuación de onda, que define el cambio de la presión en el tiempo, en términos del cambio de la distancia y que en su forma unidimensional se ve como:

$$\frac{\partial^2 \Delta P}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial x^2}; \quad (2-1)$$

Donde  $\Delta P$  es el cambio en la presión del medio y  $c$  es la velocidad, la cual depende de las propiedades acústicas del medio: por ejemplo la velocidad de un pulso ultrasónico a través del tejido blando en un ser humano es alrededor de 1540 m/s; también es de 341 m/s en el

aire a temperatura ambiente y de aproximadamente 5600 m/s en el acero inoxidable. Por lo general, se puede evidenciar que la velocidad del sonido es mayor en sólidos que en líquidos y a su vez, en líquidos que en gases. De la ecuación (2-1), se asume que la solución general es de la forma:

$$p(x, t) = p_o \cos(kx - \omega t) \quad (2-2)$$

En la ecuación 2-2,  $p_o$  representa el valor absoluto de la amplitud de presión,  $\omega$  es la frecuencia angular. La variable  $k$  tiene varias denominaciones: Constante de propagación, número de onda o frecuencia espacial y en cualquier caso esta relacionada con  $k = 2\pi/\lambda$  [36]. Esta solución representa una onda plana que sería el modelo en primera aproximación para describir la interacción de ultrasonido y burbuja.

- Atenuación.

Cuando una onda de ultrasonido viaja, parte de su energía es transmitida al medio (absorción). La atenuación es una característica de los materiales y puede a la postre dar información de sus propiedades físicas e irregularidades dentro de las muestras [37]. La ecuación clásica para estimar la atenuación en un medio líquido parte de:

$$I \propto e^{-\alpha x} \quad (2-3)$$

Donde  $I$  es la intensidad,  $\alpha$  es el coeficiente de atenuación y  $x$  es la distancia. Sus unidades para el S.I., están dadas en ( $W/m^2$ )

Otra consideración importante, lo constituyen los mecanismos de absorción de ultrasonido, estos se identifican como:

1. Amortiguación por viscosidad. Corresponde a la fricción asociada con el movimiento re-

lativo de las partículas. Para un fluido, el coeficiente de absorción estará dado por:

$$\alpha_v = \frac{\omega^2 \eta}{2\rho c^3} \quad (2-4)$$

Donde  $\eta$  es la viscosidad dinámica del fluido. Se evidencia además que  $\alpha_v \propto \omega^2$ . Las unidades para el S.I., están dadas en  $(Ns/m)$

2. Amortiguación térmica. En este caso una fracción de la energía transportada por la onda, es convertida en calor, en virtud de la termo elasticidad. Esta energía se disipa en el material por conductividad térmica.

3. Relajación molecular. En este caso, las variaciones de temperatura o presión asociadas al paso de la onda alteran la configuración de la energía molecular de una configuración a otra [38].

Las anteriores relaciones, permiten evaluar el comportamiento del sistema utilizado en la interacción ultrasonido-burbuja.

## 2.6. INTERACCIÓN ULTRASONIDO-BURBUJA

El comportamiento de una burbuja en un fluido viscoso, se puede describir de manera general por medio del modelo matemático de Rayleigh-Plesset que se muestra en la ecuación (2-5). Este corresponde a la respuesta de una burbuja esférica en un campo de presión variable en un líquido incompresible correspondiendo con una ecuación no lineal [26]. El análisis dimensional realizado sobre las ecuaciones de la sección 2.6, da como resultado  $(N/m^2) = (Kg/s^2m) = Pa$

$$\rho R \ddot{R} + \rho \frac{3\dot{R}^2}{2} = \left[ \left( p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} - p_v \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3k} + p_v - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\eta\dot{R}}{R} - p_0 - p(t) \right] \quad (2-5)$$

Donde  $R$  es el radio de la burbuja en cualquier momento,  $R_0$  es el radio en equilibrio,  $\rho$  es la densidad del medio  $\sigma$  es la tensión superficial,  $\eta$  es la viscosidad,  $p_0$  es la presión hidrostática del medio y  $p_v$  es la presión del gas dentro de la burbuja,  $\kappa$  es el coeficiente de dilatación adiabático y  $p(t)$  es la presión de la onda incidente.

Cuando la perturbación en la burbuja es pequeña, es decir, su cambio en el radio es pequeño con respecto al radio que mantendría en el equilibrio, la descripción matemática del fenómeno se puede hacer por medio de un modelo lineal como se indica en la ecuación 2-6. Esta expresión representa un oscilador armónico amortiguado forzado.

$$m_{RP}\ddot{R} + b_{RP}\dot{R} + \kappa_{RP}R = P_A e^{i\omega t} \quad (2-6)$$

Esta es la ecuación de movimiento para una burbuja, cuando esta se encuentra en un líquido viscoso y es perturbada por una onda sonora de presión; en consecuencia el radio de la burbuja cambiara en torno a la onda incidente, obteniendo una relación en la ecuación de radio y presión (sufijo RP) [39].

El término análogo a la masa  $m_{RP}$  en este caso, corresponde a la inercia del fluido cuando es desplazado por la superficie de la burbuja. La relación entre la presión ejercida y la velocidad con que se desplaza, corresponde con la impedancia acústica propia del medio y del tipo de onda que esta cruzando, además genera en el fluido los mencionados efectos de inercia que actúan como una masa radial, que dependen de la densidad del fluido  $\rho$  y el radio de la burbuja  $R_0$ . Su ecuación se describe como aparece en la ecuación 2-7.

$$m_{RP} = \rho R_0 \quad (2-7)$$

En cuanto a la constante de amortiguamiento de la burbuja,  $b_{RP}$ , actúan dos factores: uno

relacionado con la energía mecánica transmitida por la burbuja al medio al oscilar (amortiguamiento radiante)  $b_{rad}$  y el otro relacionado con la viscosidad del medio donde se encuentra la burbuja (amortiguamiento viscoso)  $b_{vis}$ , cuando es perturbada por una onda de presión sonora.

La constante de elasticidad  $\kappa_{RP}$  es el cambio de volumen de la burbuja, debido al cambio de presión fuera de la misma. La rigidez de la burbuja se obtiene considerando el coeficiente de dilatación adiabático  $\kappa$ , la presión inicial en la que se encuentra el fluido  $p_0$  y el radio de la burbuja en estado estable  $R_0$  así:

$$k_{RP} = \frac{3\kappa p_0}{R_0} \quad (2-8)$$

El amortiguamiento radiante se evidencia cuando se considera un fluido incompresible alrededor de la burbuja y está relacionado con el flujo de energía por unidad de área, radiado en forma de onda mecánica por la burbuja como cuerpo vibrante. Por lo tanto el factor de amortiguamiento radiante, dependerá del área superficial de la burbuja (que es una medida de su tamaño) como se observa en la ecuación 2-9.

$$b_{rad} = \frac{\rho \omega^2 R_0^2}{c} \quad (2-9)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido que rodea la burbuja,  $\omega$  es la frecuencia angular o circular del fluido,  $R_0$  es el radio inicial de la burbuja y  $c$  es la velocidad del sonido en el medio en el que se encuentra la burbuja.

Ahora, respecto del amortiguamiento viscoso, podemos relacionarlo con las fuerzas viscosas del fluido que aparecen en el proceso de expansión-contracción propio de la vibración de la burbuja. Teniendo presente la viscosidad del fluido  $\eta$ , la ecuación quedaría como:

$$b_{vis} = \frac{4\eta}{R_0} \quad (2-10)$$

El amortiguamiento total resulta de la suma de los términos de amortiguamiento tanto radiante como viscoso, tal como se indica en la ecuación 2-11.

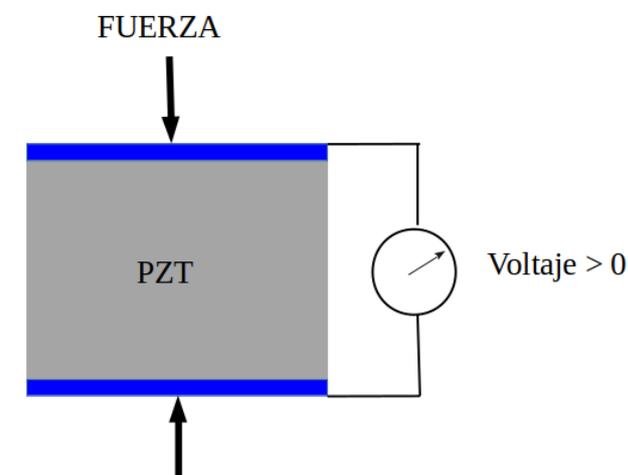
$$b_{RP} = b_{tot} = b_{vis} + b_{rad} \quad (2-11)$$

Asumiendo que la disipación de la energía es función del tamaño de la burbuja, se podría encontrar experimentalmente una relación entre el tamaño de la burbuja y el comportamiento de la señal de ultrasonido para una onda incidente sobre su superficie. La relevancia de estas dos ecuaciones y su referencia en este escrito, radican en la posibilidad de abrir nuevas líneas de investigación que sugieran análisis numéricos, modelaciones o simulaciones computarizadas para dar aproximaciones al comportamiento descrito en estas ecuaciones. En lo observado experimentalmente en esta investigación aunque no se aprecia un cambio, ni en la forma, ni el tamaño de la burbuja, antes de asumir una descripción por medio de alguno de estos modelos, es importante señalar que son solo un marco referencial y los datos acá disponibles, no establecen sino posibilidades a futuros desarrollos, incluida la relación inversa: efecto burbuja señal.

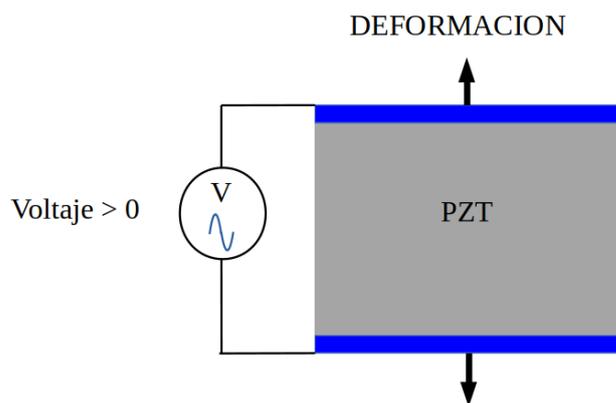
## 2.7. EFECTO PIEZOELÉCTRICO

En 1880 Pierre y Jacques Curie, descubrieron el efecto piezoeléctrico, fenómeno que en la actualidad reviste gran importancia, dadas las múltiples aplicaciones en las cuales se puede observar. A través de experimentos en cristales de cuarzo, vieron que si se le aplicaba una deformación a una de las caras, daba como resultado la inducción de cargas en la superficie. A este efecto, lo llamaron “piezoelectricidad”. Un año mas tarde, descubrieron que el efecto inverso también ocurre y que al aplicar un determinado potencial eléctrico, se generaba una deformación mecánica, fenómeno reversible, por cuanto, al dejar de someter el cristal a la perturbación mecánica o eléctrica, recuperaban su forma original [40]. Se comprendió

entonces que la presión generaba la movilización de cargas, lo que se refleja en una diferencia de potencial en la superficie; mientras que la aplicación de una diferencia de potencial externa, tiene un efecto mecánico generando una deformación. Esta situación fue corroborada en diferentes cristales, todos con una característica en común; ninguno tiene centro, pero si un eje de simetría [41]. El esquema de este fenómeno, se muestra en la figura 2-2. Los materiales que poseen estas propiedades pueden ser cristales naturales o cerámicos sintéticos [42].



(a) Esquema Piezo Directo

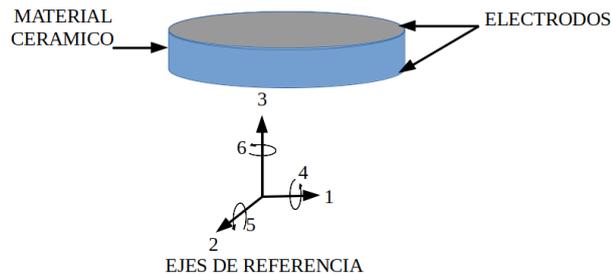


(b) Esquema Piezo Inverso

**Figura 2-2.:** Esquemas de un Piezo Eléctrico. Fuente: Autor

Al estimular un piezo-eléctrico con una señal de voltaje alterno, dará como resultado la oscilación de dicho material, lo que es utilizado para producir ondas de ultrasonido. La

estructura física del elemento, se compone de dos electrodos y un material cerámico, como se puede observar en la figura 2-3.



**Figura 2-3.:** Diagrama de ejes en un Piezoeléctrico. Autor.

Un elemento piezo eléctrico, puede trabajar tanto en modo de vibración longitudinal como transversal. En general, se pueden presentar dos tipos de elementos piezoeléctricos por su modo de vibración.

### **MODO LONGITUDINAL-MODO TRANSVERSAL**

En el modelo longitudinal, la dirección de la tensión mecánica de operación (fuerza), es paralela a la dirección de polarización  $P$ . La dirección de polarización  $P$ , es la misma que la del campo eléctrico  $E$  y su desplazamiento eléctrico  $D$  como se ilustra en la figura 2-4.

Por su parte, en el modelo transversal, la dirección para la Tensión mecánica de operación  $T$  (fuerza), es perpendicular a la dirección de polarización  $P$  y a su vez la dirección de polarización  $P$ , es la misma que la del campo eléctrico  $E$  y el desplazamiento eléctrico  $D$  de acuerdo con la figura 2-5.

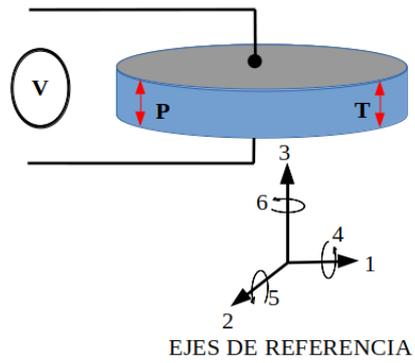


Figura 2-4.: Elemento Piezoeléctrico Vibración Longitudinal. Autor.

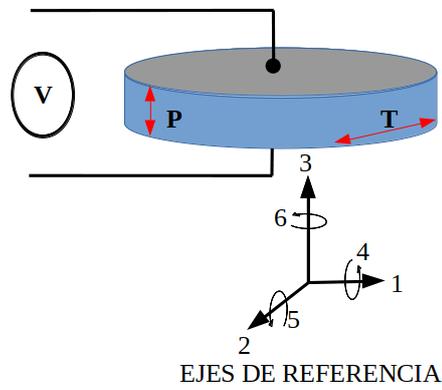


Figura 2-5.: Elemento Piezoeléctrico Vibración Transversal. Autor.

### 3. MÉTODO EXPERIMENTAL

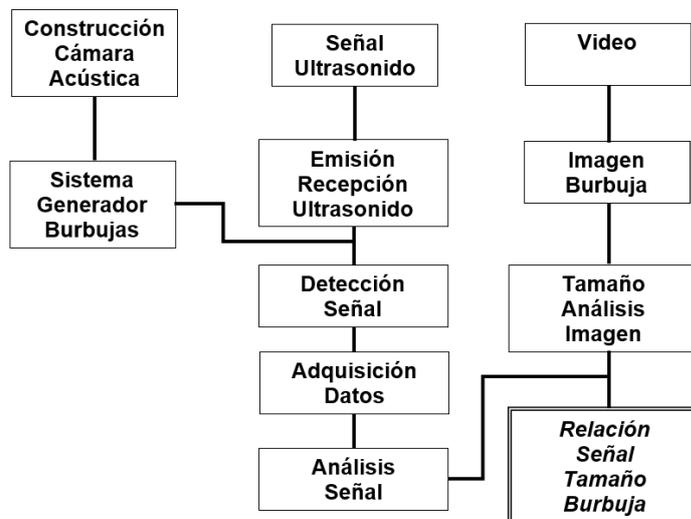
El problema planteado consiste en medir la relación entre el tamaño de una burbuja al interior de una columna de fluido, que es sometida a una onda de ultrasonido y la respuesta en voltaje detectada en un sistema de piezo eléctricos alrededor de dicha columna.

El montaje implementado permitió de forma simultánea, generar una burbuja al interior de una columna de fluido contenida en un recipiente, que sirve como cámara acústica (CA). Así mismo tomar video del paso de la burbuja para determinar su tamaño y finalmente medir la respuesta en voltaje de un arreglo de piezoeléctricos (PZT) adheridos a la cámara.

Para desarrollar cada uno de estos procesos, fue necesario trabajar en tres aspectos a saber:

1. Construcción de la CA y sistema generador de burbujas (SGB).
2. Sistema de emisión y recepción de ultrasonido, adquisición y análisis de la señal de voltaje.
3. Grabación de videos del paso de la burbuja y análisis de imágenes para determinar tamaño de la misma.

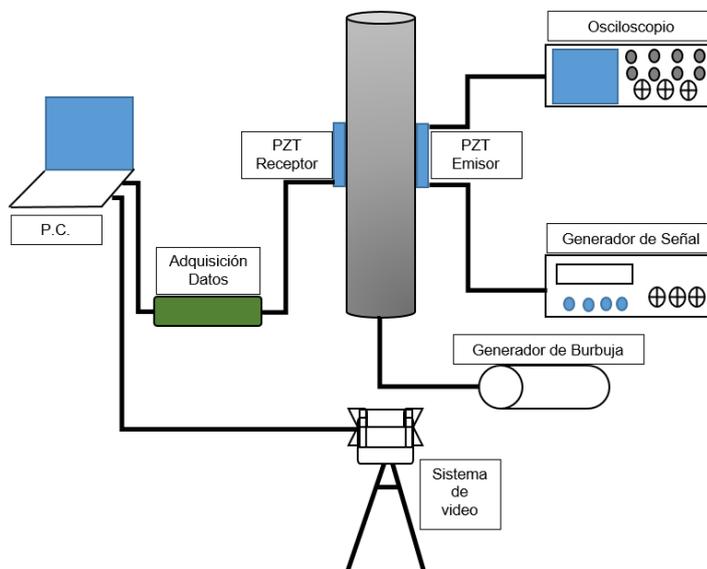
En el diagrama expuesto en la figura 3-1, se resumen las etapas desarrolladas:



**Figura 3-1.:** Diagrama. Fases de desarrollo experimental. Autor

En la siguiente sección se describen los materiales y equipos usados

### 3.1. EQUIPOS Y MATERIALES



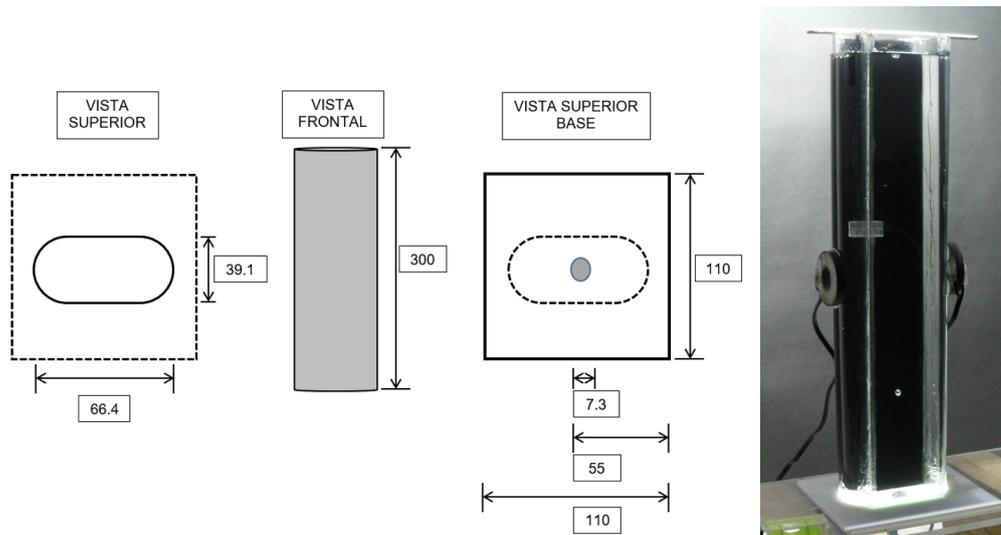
**Figura 3-2.:** Diagrama de montaje experimental. El cilindro representa la CA, en la cual se representan los PZT emisor y receptor adheridos, el generador de señales, un osciloscopio usado para monitoreo de las señales, el sistema de generación de burbuja, adquisición de datos y captura de imágenes. Autor

De acuerdo con los requerimientos descritos se implementó un montaje que se ilustra en la figura 3-2, en la que se observa un esquema de la configuración de la CA y los PZT, el sistema de generación de burbujas, un generador de onda que permite producir el ultrasonido a través del PZT emisor, un sistema de adquisición de datos que toma la señal del PZT receptor y la digitaliza para su análisis. Finalmente una cámara de video que permite capturar imágenes de las burbujas. A continuación, se describen de manera detallada los materiales y equipos utilizados para la realización de esta investigación.

### 3.2. CÁMARA ACÚSTICA

La CA consiste en un recipiente con paredes de vidrio y acrílico. La cara frontal es plana, de vidrio transparente y permite observar el paso de la burbuja. Tiene dos caras laterales circulares en acrílico donde se adhieren los PZT, la razón de esta forma curva obedece al pegue del componente PZT, buscando evitar interferencias a partir de la soldadura de los cables conductores; igualmente los efectos de la onda ultrasónica, se verán atenuados en la zona de viaje en el aire y se pueden despreciar, respecto de la zona de viaje a través del peque y su transmisión al medio donde se encuentra confinado el fluido. La cara posterior es plana, en acrílico negro opaco para evitar reflexiones en el proceso de toma de video. La base es un cuadrado acrílico en el cual se realizó una perforación para acoplar el sistema de ingreso de aire y dar lugar a la generación de burbujas.

La geometría y dimensiones de la CA, como se observa en la figura 3-3, presenta una altura de 300 mm. Medidas interiores entre las caras curvas 66.4 mm. Medidas internas entre caras planas 39.1 mm. Espesor pared caras curvas 3.0 mm. Espesor cara plana de vidrio 3.9 mm. Espesor cara plana de acrílico 3.0 mm. La base es un cuadrado acrílico con espesor de 3.0 mm, largo 110 mm, ancho 110 mm.



**Figura 3-3.:** Presentación Física Cámaras Acústicas. Medidas en (mm). Autor.

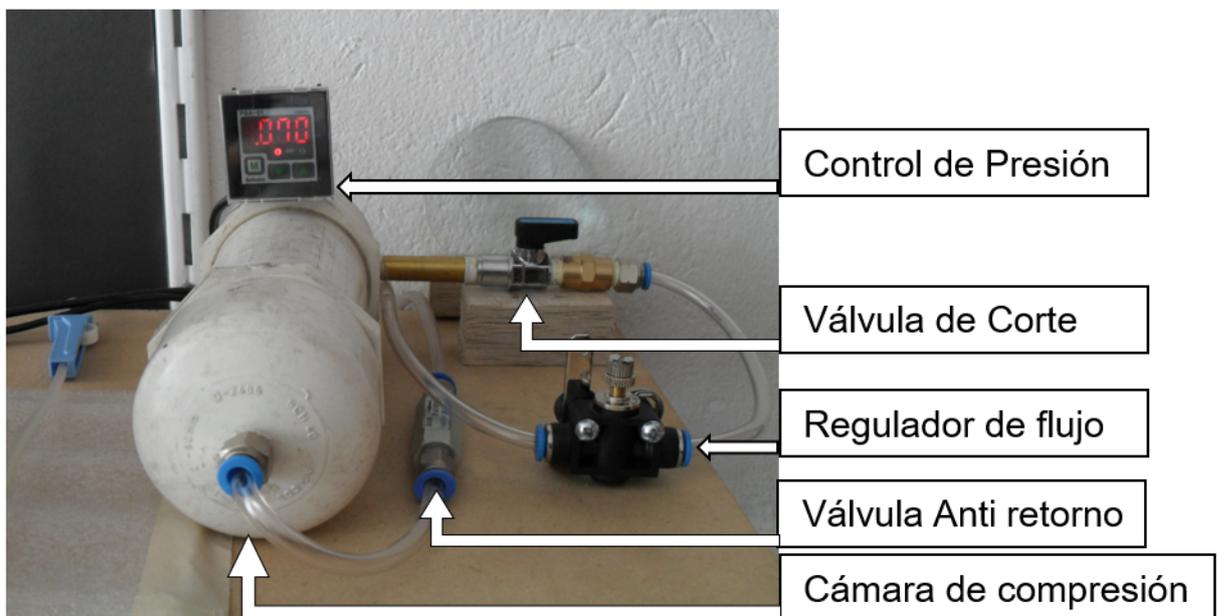
El Acrílico del cual se hicieron las caras curvas y la cara trasera plana, es el polímero de metil metacrilato, PMMA. el cual es un termo plástico rígido excepcionalmente transparente. En su estado natural es incoloro pero se puede pigmentar para obtener una infinidad de colores. También se puede dejar sin pigmento para producir una lámina completamente transparente como las utilizadas en la investigación. [43].

La geometría utilizada para la CA obedece a dos necesidades. La cara plana permite tomar imágenes de la burbuja sin distorsionar su forma, lo que ocurriría si la CA fuera de forma cilíndrica. Las caras laterales curvas limitan la superficie de contacto entre los PZT y el acrílico lo que facilita su adhesión considerando los electrodos del PZT.

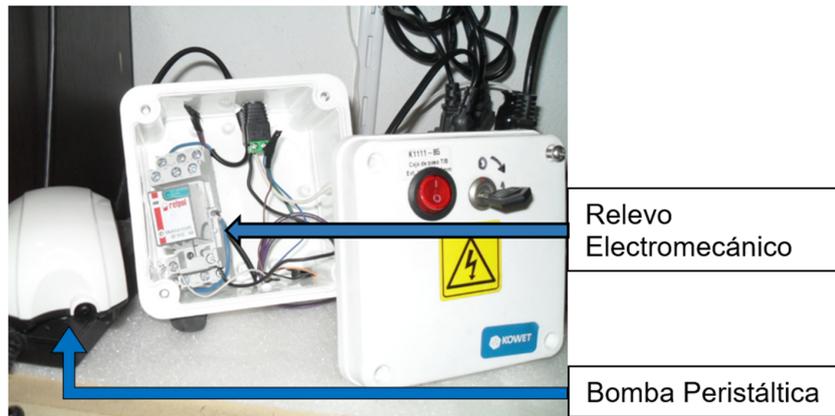
### 3.3. GENERADOR DE BURBUJAS

Para generar las burbujas se inyecta aire en la parte inferior de la columna de fluido. El sistema debe garantizar el control del flujo de aire de modo que se obtengan burbujas de tamaños homogéneos. También debe permitir el cambio en el flujo de modo que se pueda cambiar el tamaño de la burbuja. El sistema implementado se basó en el uso de una bomba

peristáltica marca Jenaca modelo AP1688 con capacidad para inyectar aire hasta 1.6 litros por minuto a presión atmosférica. Este dispositivo se conecta con una válvula anti-retorno Mindman MJBB-01-G para aire y después pasa a una cámara de compresión construida en tubería PVC RDE 21, en el cual se instaló un control de presión Autonics PSA-01 100kPa con variación máxima de 1 milibar, la salida está regulada por una válvula de corte, que permite la carga de aire en la cámara de compresión; la liberación de aire, se hace a través de la válvula reguladora de flujo. Los elementos mencionados se conectan con acople rápido tipo racor de 6 mm a través de mangueras plásticas. El control eléctrico de arranque del sistema generador de aire, lo constituye un relevo electromecánico MR3N-2013-23-1012WT conectado con el control de presión, el cual se encarga de activar o desactivar el sistema, una vez se llegue a la presión programada. El dispositivo mencionado, replica el funcionamiento de un compresor industrial y se muestra en la figura 3-4:

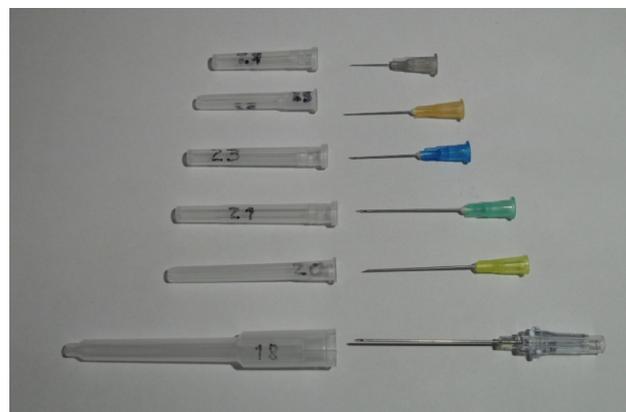


**Figura 3-4.:** Presentación Física Generador de Aire. Autor.



**Figura 3-5.:** Presentación Física Relevo electromecánico y Bomba Peristáltica. Autor.

El proceso de generación de burbujas, se completa con agujas hipodérmicas de diferentes tamaños, ya que su diámetro interior, permite variar los tamaños de la burbuja generada, siempre que se controle la presión y flujo de aire que ingresa a la CA. Se muestran las agujas en la figura 3-5 y los diámetros internos de cada aguja utilizada, en la tabla 3-1:



**Figura 3-6.:** Agujas (Yelcos). Autor.

Numero Aguja (Gauge)	Diámetro interno (mm)
18	0.838
20	0.584
21	0.495
23	0.318
25	0.241
27	0.191

**Tabla 3-1.:** Diámetros Internos Agujas (Calibre).

### 3.4. SEÑAL DE ULTRASONIDO

La señal de ultrasonido requerida, fue desarrollada utilizando dos PZT para el desarrollo experimental, uno de ellos se conecta al generador de señales para que actué como emisor y el otro se ubica diametralmente opuesto funcionando como receptor, como se observa en la figura 3-3. Los PZT, provienen de la firma Steminc Steimer & Martin Inc, con asiento en Doral, Florida USA., compañía especializada en el diseño y fabricación de PZT cerámicos sintéticos de Titanato Circonato de Plomo. Para los PZT artificiales o sintéticos tenemos los semiconductores piezoeléctricos, los polímeros y las cerámicas piezoeléctricas; los escogidos para esta experimentación fueron los referenciados como: “SMR 3515T55” (PZTA) y “SMD 35T4S31” (PZTD), los cuales presentan las siguientes especificaciones:

SMR 3515T55: Aro de cerámica piezoeléctrica con electrodos de plata en ambas caras.

Material Piezoeléctrico: SM121. Titanato Circonato de Plomo.

Dimensiones: Diámetro 35 mm. Diámetro interior 15 mm. Espesor 5.5 mm.

► Frecuencia de resonancia: 44 KHz  $\pm$  2 KHz.

► Modo de Resonancia: Modo Radial.

► Impedancia resonante  $Z_m$ :  $\leq 14.5 \Omega$

► Condiciones de operación: 23  $\pm$  3°C 40-70 % Humedad Relativa.

► Aplicaciones: Sensor ultrasónico, Sensor de Vibración, Sensor de Presión, Generador de

oscilaciones, Transductor de mezcla de biodiesel, Sensor de expansión, Sensor de compresión y expansión

SMD 35T4S311: Disco de cerámica piezoeléctrica con electrodos de plata en ambas caras.

Material Piezoeléctrico: SM311. Titanato Circonato de Plomo.

Dimensiones: Diámetro 35 mm. Espesor 4 mm.

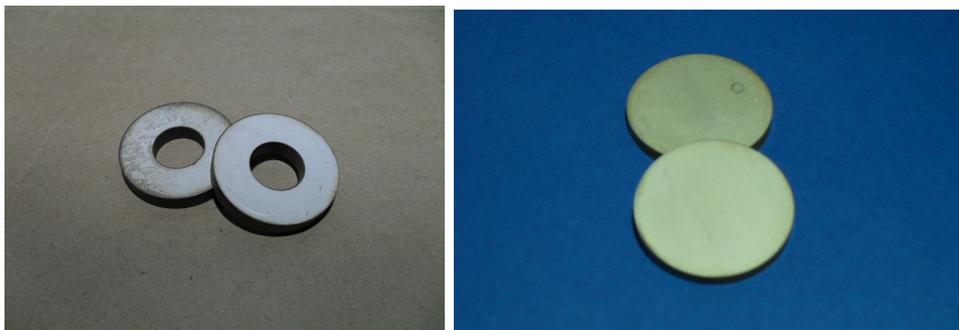
► Frecuencia de resonancia:  $55.6 \text{ KHz} \pm 5 \text{ KHz}$ .

► Modo de Resonancia: Modo Radial o en sentido del espesor.

► Impedancia resonante (Radial)  $Z_m: \leq 15.7 \Omega$

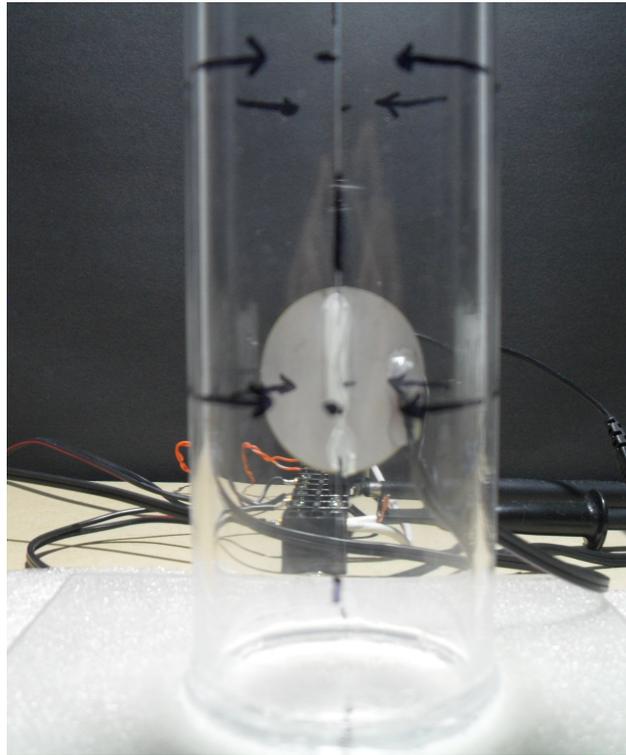
► Condiciones de operación:  $23 \pm 3^\circ\text{C}$  40-70 % Humedad Relativa.

► Transductor para vibración, dispersor de materia, transductor para sonar, sensor ultrasónico, sensor de espesor en muros, sensor de tensión en materiales, sensor de presión, generador de energía en harvesting, sensor de peces, sensor de compresión, sensor en aplicaciones biomédicas.



**Figura 3-7.:** Presentación Física PZTA SMR 3515T55 izquierda, PZTD SMD35T4S311 derecha. Autor.

Los PZT se adhieren a la CA, utilizando silicona de calor, de esta forma se logra adecuadas transmisiones del ultrasonido a través del medio en virtud de su adherencia y se puede reutilizar este PZT en otro lugar y medición. La forma en la que se adhieren los PZT se observa en la figura a continuación:



**Figura 3-8.:** Presentación Pegue PZT DISCO Autor.

### 3.5. OSCILOSCOPIO

El osciloscopio utilizado para el monitoreo de las señales tanto en el PZT emisor, como en el PZT receptor, es el UNI-T 2102CEL con las siguientes características básicas:

<b>Especificaciones</b>	<b>Valores</b>
Canales	2
Banda	100 Mhz
Tiempo de Muestreo	1 GSa/s
Memoria Interna	2 x 600K
Pantalla	7". Color
Dimensiones	306 x 147 x 122 (mm)

**Tabla 3-2.:** Características básicas Osciloscopio UNI-T 2102CEL.



Figura 3-9.: Osciloscopio Utilizado. Autor.

### 3.6. GENERADOR DE SEÑALES

El desarrollo de la investigación planteada, requirió la generación de señales en frecuencia tipo sinusoidal, para ello, se utilizó el generador de señales Uni-T 1010A. En la tabla 3-3, se observan sus características básicas:

Especificaciones	Valores
Tasa de Muestreo	125 MSa/s
Rango de frecuencias	0.1 $\mu$ Hz~10Mhz
Resolución de frecuencia	1 $\mu$ Hz
Voltaje	100-240 VAC
Display	4.3" Cristal Líquido

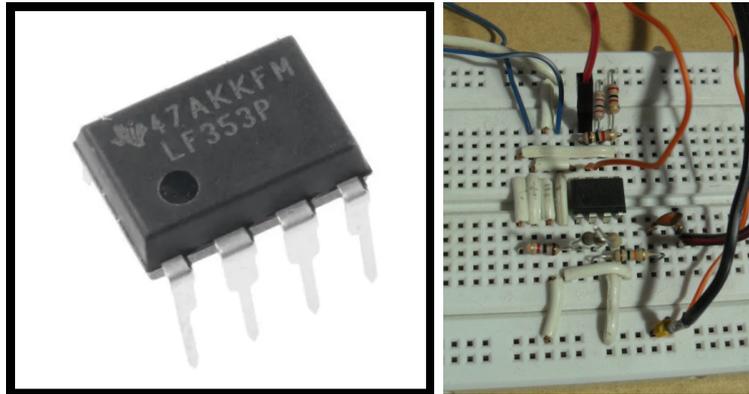
Tabla 3-3.: Características básicas Generador UNI-T 1010A.



**Figura 3-10.:** Generador de señales. Autor.

### 3.7. DETECCIÓN DE SEÑALES-ADQUISICIÓN DE DATOS

Toda vez que se verifica tanto al emisión como la detección de la señal utilizando el osciloscopio, se procede a implementar el sistema para capturar los datos, tratarlos y enviarlos para su posterior analisis en el programa implementado para tal fin. De esta forma se diseña e implementa por una parte, un dispositivo compuesto por un amplificador operacional que funciona como filtro pasa altos y como sumador activo. Para este fin se trabajó con el AMPOP (amplificador operacional) LF353P de la firma Texas Instruments, así como sus componentes pasivas. La imagen del sistema para acondicionamiento de señal utilizado se muestra en la figura 3-10.



**Figura 3-11.:** Imágenes LF-353P y Circuito Acondicionamiento Señal. Autor.

Es de anotar que la alimentación del circuito, se realiza con dos fuentes de voltaje reguladas WEP 1502 DD+, en un rango de 12 VDC, conectadas en serie.

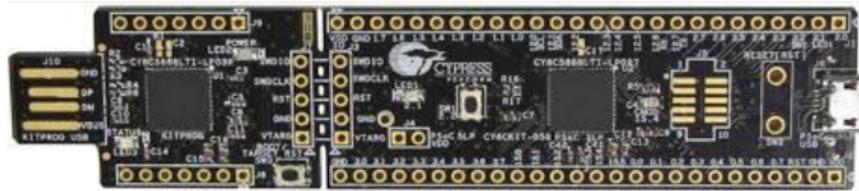


**Figura 3-12.:** Fuentes Reguladas de Voltaje. Autor.

Una descripción mas pormenorizada de este sistema, será considerada en el capítulo 5.

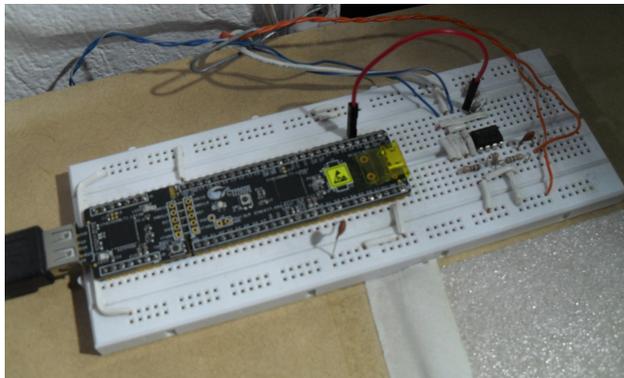
Como segunda medida, la captura de datos proveniente del PZT, fue desarrollada basados en el sistema PSoC (Programmable System-on-Chip) 5LP CY858LP.

La imagen del componente PSoC se muestra en la imagen 3-12.



**Figura 3-13.:** Imagen PSoC. Autor.

De igual forma, la interfaz PSoC-Circuito para acondicionamiento de señal, se realiza montando los componentes en una protoboard, como se indica en la figura 3-13.



**Figura 3-14.:** Montaje Protoboard. Autor.

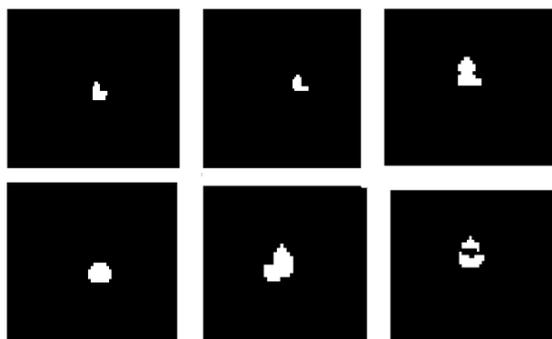
En la imagen 3-13, se muestra: en la parte derecha, el componente LF 353-P que actúa como filtro pasa altos y sumador activo. La conexión proveniente de la señal del PZT y sus componentes pasivas, se mostrarán con detalle en la sección 5.1. En la parte izquierda de la misma, el montaje del PSoC unido al puerto USB para transporte de datos al PC, que se detallará en la sección 5.2.

### 3.8. SISTEMA DE VIDEO

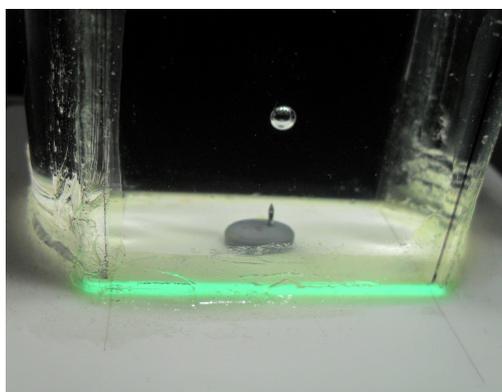
Ante la imposibilidad de determinar el tamaño de las burbujas generadas en forma directa, se utilizó el video como mecanismo para poder hallar dichos tamaños. El proceso consistió en tomar un video de las burbujas generadas y descomponerlo en sus fotogramas, de esta forma,

analizar las imágenes obtenidas para poder determinar características de área y diámetro.

Aunque inicialmente, la prueba se realizó con agua como medio líquido, las imágenes obtenidas para las burbujas, no tenían la esfericidad esperada. Sumado a lo anterior, la velocidad y recorrido del aire en el agua eran difíciles de seguir sin el equipamiento adecuado por tanto los cálculos de tamaño y aspectos relacionados, presentarían altos niveles de complejidad en su tratamiento. Para superar este inconveniente, se decide entonces, probar con un medio de mayor viscosidad que permitiera: por una parte lograr figuras de burbujas esféricas, permitir un desplazamiento lineal durante el recorrido de la burbuja y ralentizar la velocidad del mismo. De esta forma se escoge y utiliza la glicerina, obteniendo las formas que se muestran en las figuras a continuación:



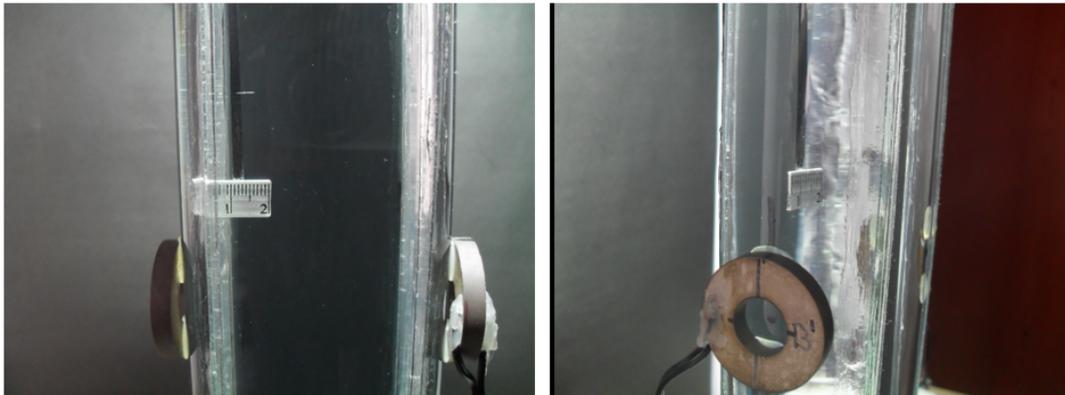
**Figura 3-15.:** Imágenes Procesadas a partir de burbujas en Agua. Autor.



**Figura 3-16.:** Imagen Obtenida en Glicerina. Autor.

Se puede observar en la figura 3-16, la forma esférica de la burbuja lograda en la glicerina. De igual manera se observa en detalle, el acople del sistema generador de burbujas con la CA para ingreso del aire.

Como se indicó anteriormente, el sistema diseñado para realizar la toma de vídeos, se basó en una cubeta de caras planas, la frontal en vidrio y la posterior en lamina acrílica pintada de negro mate para evitar la reflexión de las imágenes en el fondo. A su vez dos caras curvas donde se adhieren los PZT, la tapa inferior aloja el corcho que permite la inserción de las agujas y la posterior entrada de aire. El sistema de iluminación consta de un reflector tipo led marca Sylvania de 20 vatios. Se utilizó cámara de filmación Samsung EKG C-100, resolución modo video 1080p (1920x1080), con una velocidad de registro de 60 cuadros por segundo (fps por sus siglas en inglés), empotrado en trípode y con fondo general negro, en la parte frontal. Dentro de la cubeta, se instaló una regla para poder calibrar los tamaños de los objetos en las imágenes obtenidas, como se indica en la figura 3-16.



**Figura 3-17.:** Detalle Ubicación Regleta al interior de la CA. Autor.

En la figura 3-17, podemos observar el sistema montado para la toma de videos tendiente a su posterior análisis como se verá en el capítulo 4. Es importante señalar que la cara plana de la CA, forma una perpendicular respecto de la cámara de filmación.

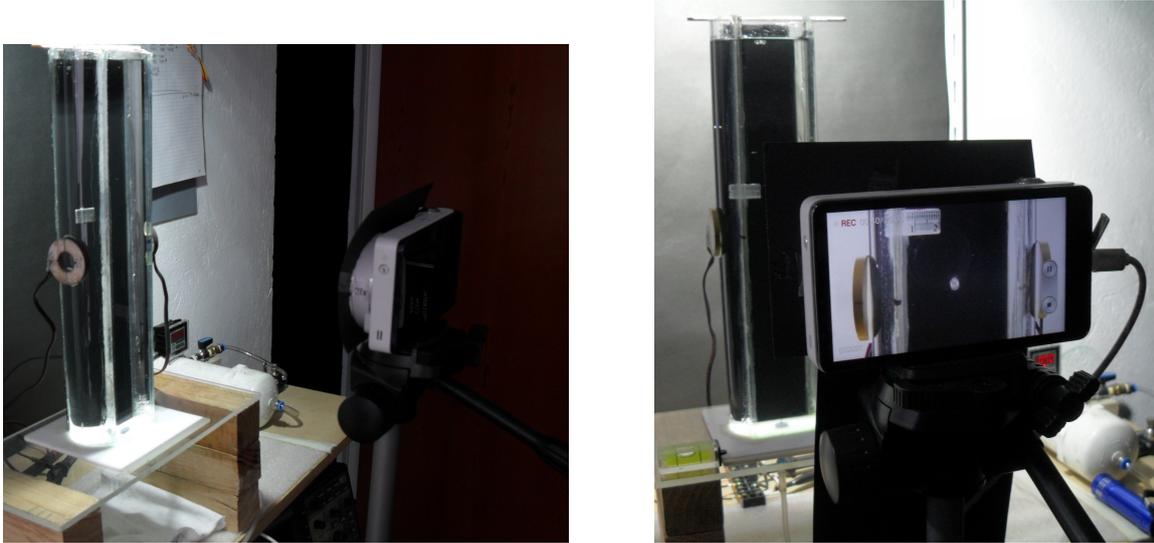


Figura 3-18.: Sistema de video. Autor.

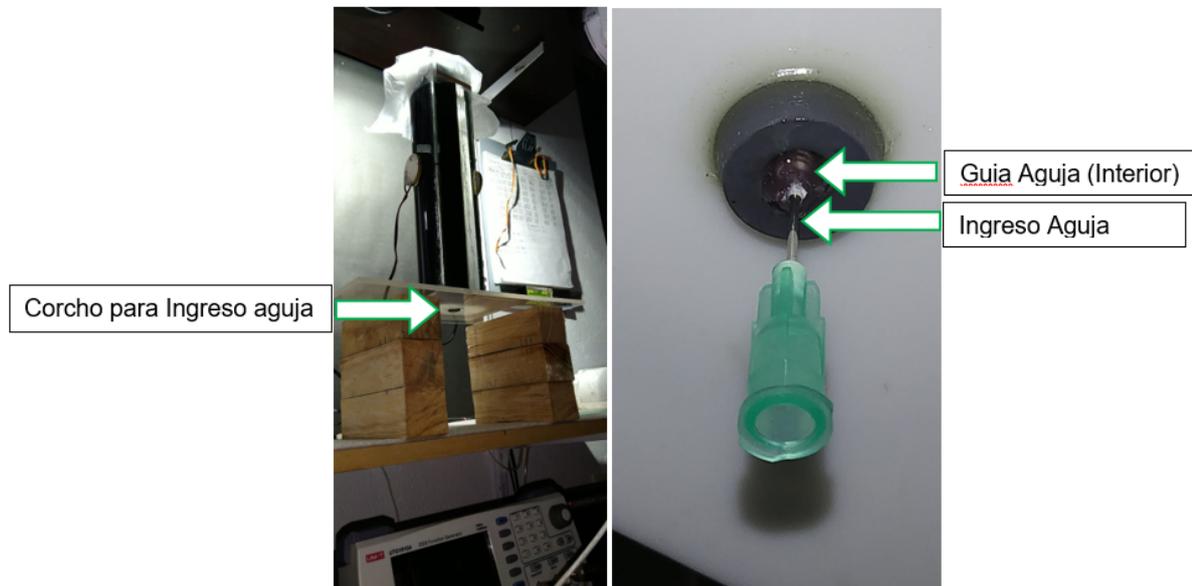
### 3.9. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El montaje general para el desarrollo de la investigación, se ilustra en la figura 3-18.



Figura 3-19.: Montaje general en sitio. Autor.

La prueba consiste en adherir los PZT a lado y lado de las caras curvas de la CA, en una altura de 15 cm, al centro de dicho elemento. Posteriormente, se procede a llenar la CA con glicerina, manteniendo constante el nivel del fluido utilizado, en la altura de 28 cm de los 30 cm totales del recipiente. Se realizan las conexiones de los electrodos del PZT emisor a la salida del generador. Por su parte, los electrodos del PZT receptor, se conectan a la protoboard donde se aloja el sistema de acondicionamiento de señal, teniendo en cuenta que el negativo del PZT receptor, se conecta directamente a la tierra del sistema. Adicionalmente se conecta el componente para envío de señales (PSoC) a la terminal USB configurada en la PC para recibir los datos provenientes del componente para acondicionamiento de señal. La primera serie de pruebas, se realiza con el PZTA, una vez se finaliza la serie de mediciones, se retiran éstos y se ubican los PZTD. Se inserta la aguja en la parte inferior de la CA, en el corcho diseñado para tal fin. Es importante señalar que cualquier variación en el eje de entrada de la aguja a través del corcho, genera resultados diferentes por prueba, de esta manera y buscando unos resultados homogéneos, se diseñó una guía metálica que pudiera alojar las agujas utilizadas dentro del corcho, afectando lo menos posible, la posición final de la aguja. Igualmente, la aguja utilizada, ingresa en el interior de la CA hasta donde se visualiza el chafán como se observa en la figura 3-19. Se procede a generar burbujas, calibrando el sistema de tal manera que, se pueda establecer paso de una sola burbuja en la CA. Una vez se logra establecer esta condición, se inicia el proceso de medición desde el PSoC dejándola transcurrir para cinco burbujas. Los valores hallados, se referencian en la tabla correspondiente para los PZTA y para los PZTD, como se describe en el capítulo 6.



**Figura 3-20.:** Detalle Guía Corcho-Ingreso aguja en CA. Autor

En el siguiente capítulo describiremos el proceso para análisis de imágenes a partir de los videos para determinar los tamaños de burbuja.

## 4. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

El proceso para determinar el tamaño de la burbuja en el interior de la CA, lo constituye el procesamiento de las imágenes a través de software especializado. En este caso, fue realizado con el programa MATLAB y se proyectó de acuerdo con lo indicado en el diagrama de bloques de la figura 4-1.

MATLAB es un lenguaje de programación de cuarta generación y de alto nivel un entorno de análisis numérico. Los usos de MATLAB incluyen cálculos matriciales, desarrollo y ejecución de algoritmos, creación de interfaces de usuario (UI) y visualización de datos. MATLAB, que significa Matrix Laboratory, es un entorno de programación completo que abarca su propio lenguaje de programación, IDE (entorno de desarrollo integrado), bibliotecas (llamadas cajas de herramientas en MATLAB), entre muchas otras cosas. IDE (Integrated Development Environment) es el lugar donde se escribe su código. La ventaja de usar un IDE (más que usar un editor de texto como el Bloc de notas) es que ofrece funciones como la comprobación de errores, la finalización de la sintaxis y sugerencias de rendimiento [44]. En MATLAB, una imagen es considerada una función bidimensional descrita en forma matricial tal que cada coordenada de la matriz, representa una característica de un pixel en la imagen [45].

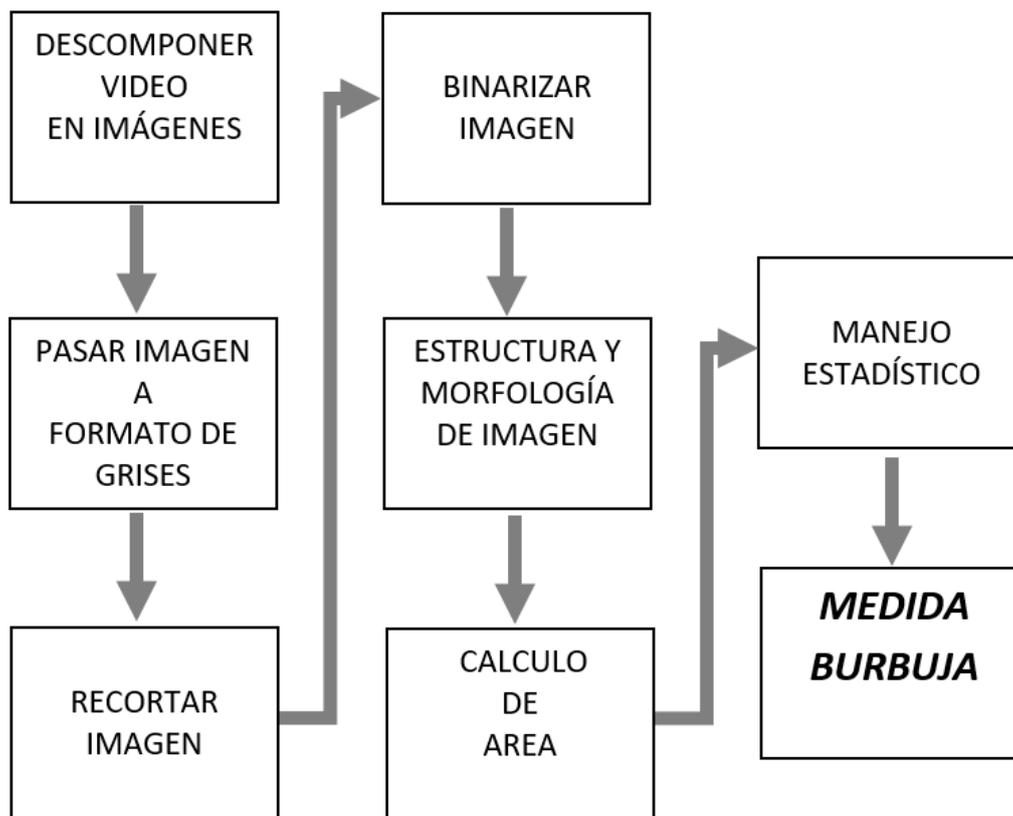


Figura 4-1.: Diagrama de Bloques. Procesamiento de imágenes MATLAB. Autor.

El procesamiento de imágenes así como las funciones utilizadas en el desarrollo de la investigación, serán analizadas a continuación.

#### 4.1. DESCOMPONER VIDEO EN IMÁGENES

Un video en esencia, no es más que un conjunto de imágenes secuenciales. El código diseñado en MATLAB, permite descomponer un archivo en formato de video (AVI, MP3, MP4, etc.) en sus fotogramas, asignarles un nombre y guardar éstos fotogramas para las posteriores acciones de procesamiento de las imágenes.

## 4.2. IMÁGENES A FORMATO DE GRISES

Una imagen es una representación visual que manifiesta la apariencia de un objeto cualquiera real o imaginario. Existen diferentes técnicas para la representación de imágenes, algunas de ellas son el dibujo, la pintura o la fotografía [46]. Una imagen digital, puede ser considerada como una representación bidimensional de datos discretos, que poseen información tanto de distribución espacial, como de intensidad [47]. Considerando estas características, elementos como las matrices son ideales para la representación matemática de imágenes. De esta manera cada elemento de la matriz que representa la imagen (pixel), tendrá una intensidad  $I(x, y)$  asociada a sus coordenadas  $x$  y  $y$ . En el caso de las imágenes a color, la definición de éste, se establece a partir del modelo RGB (Red, Green, Blue), éste es un formato de color aditivo, lo que significa que la combinación de colores se basa en la adición de los componentes individuales considerando como base el negro. Equivale a traslapar tres rayos de luz de colores rojo, verde y azul y cuya intensidad puede ser controlada y variada para obtener una amplia gama de colores. Dicha información es almacenada en una matriz vectorial con componentes  $(R_i, G_i, B_i)$  y donde cada componente del vector cumple con  $0 \leq R_i, G_i, B_i \leq 255$ .

Una imagen a escala de grises, es la representación en la que cada pixel se dibuja usando un valor numérico individual que representa su luminosidad frente a los valores entre blanco y negro. Si la imagen es del tipo `uint8`, entonces los datos que la conforman se encuentran en el intervalo  $[0-255]$ . Si la imagen es de tipo `double`, los datos son de tipo flotante y se encuentran en el intervalo  $[0-1]$ .

En nuestro caso, las imágenes originales, se establecen en color pero, para el análisis correspondiente, se convierten a escala de grises por medio del comando `"rgb2gray"`, de esta manera la imagen queda en formato de grises como se muestra en la figura 4-2.



**Figura 4-2.:** Procesamiento de imágenes. Imagen en color a Imagen en grises. Autor.

Una vez establecido el anterior proceso, se procede a ubicar la zona de interés, es decir, aquella donde se ubica la burbuja para realizar el corte de la imagen.

### 4.3. RECORTAR IMAGEN

Se trata de seleccionar un conjunto de elementos contiguos de la matriz, escogiendo de esta manera regiones específicas de la imagen, a fin de realizar sobre la selección, operaciones de diferentes tipos. El proceso de corte, se realiza en la región donde se evidencia la presencia de burbuja, las demás zonas de la imagen, no ofrecen datos relevantes para la investigación. Este corte se establece desde la imagen en tonos de gris realizada en el paso anterior, definiendo una zona rectangular por donde se evidencia el tránsito de la burbuja, como se muestra en la figura 4-3.



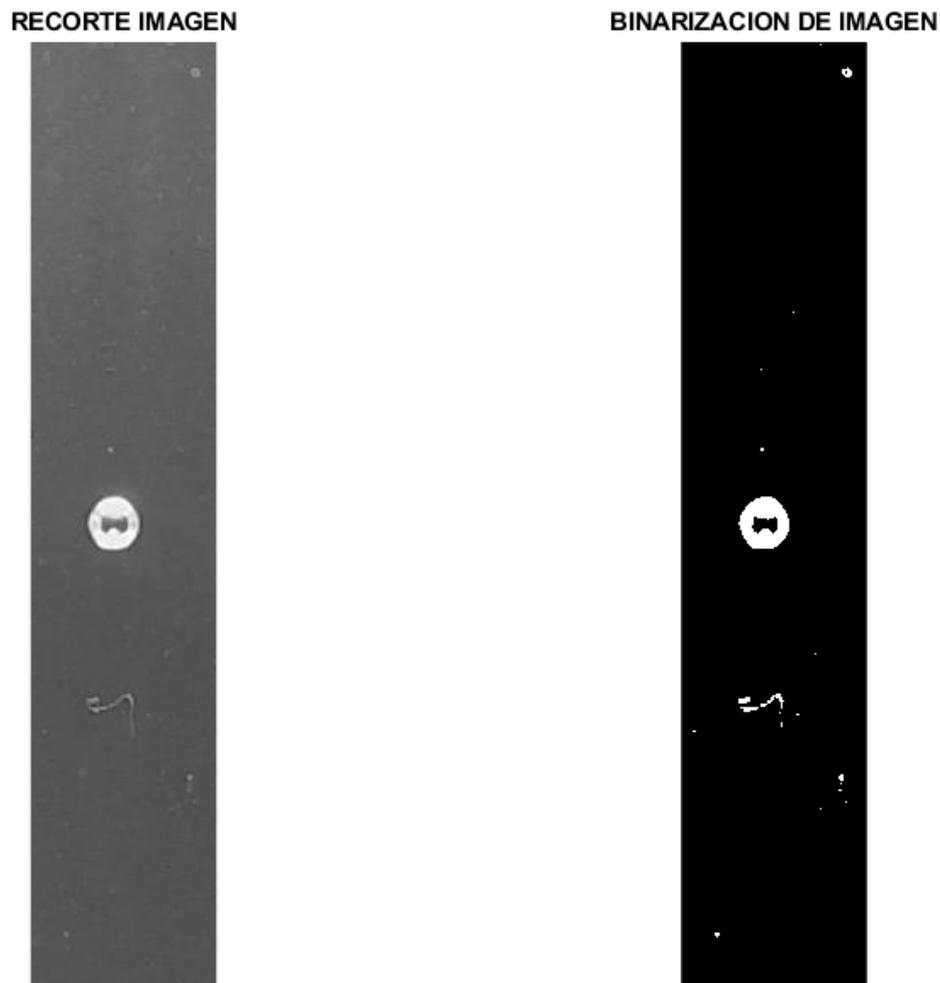
**Figura 4-3.:** Procesamiento de imágenes. Recorte de la imagen. En la imagen de la izquierda, se muestra la fotografía en tonos de gris. En la derecha se muestra el recorte de la zona de interés donde el único objeto relevante es la burbuja. Autor.

## 4.4. BINARIZACIÓN

Una imagen binaria se representa en MATLAB como un arreglo que solo contiene ceros y unos, la función básica de la binarización, es lograr que una imagen de grises, entre 0 y 255, se convierta en solamente tonos blancos y negros, es decir ceros y unos. Estos ceros y unos no implican valores numéricos, sino, el estado de Falso(0) o Verdadero(1). En el análisis de imágenes, es empleado para seleccionar las regiones de interés en una imagen, separándola del resto de componentes no relevantes de la misma. La binarización de manera general, parte de un valor llamado umbral. En el proceso, la intensidad de cada píxel de la imagen es comparado con este valor. Si el valor de intensidad del píxel es superior al umbral, se convertirá en uno, si por el contrario el valor de intensidad del píxel comparado es inferior al umbral, éste sera convertido en cero [48]. MATLAB además de la binarización convencional, ofrece un conjunto de herramientas mas especializadas que permiten delimitar mejor el contorno de una imagen al ser binarizada. Para este análisis se utilizó la función *imbinarize* de la siguiente manera:

```
BN=imbinarize(corteframe,'adaptive','ForegroundPolarity','dark',  
'Sensitivity',M);
```

El primer parámetro (corteframe) corresponde a la imagen en escala de grises, el segundo determina el tipo de umbral, que en este caso es adaptativo. El tercero y cuarto dan relevancia a los colores blancos sobre el fondo oscuro (ForegroundPolarity, dark) y se introduce un valor de sensibilidad M, que corresponde a un umbral de referencia. La imagen obtenida, se ilustra en la figura 4-4.



**Figura 4-4.:** Procesamiento de imágenes. Binarización de la imagen. A la izquierda imagen en escala de grises, a la derecha resultado de la binarización. Autor.

## 4.5. ESTRUCTURA Y MORFOLOGÍA DE IMAGEN

En la imagen binarizada (figura 4-4,) se observan elementos blancos fuera de la zona que corresponde a la burbuja. Además la misma figura no está completa en el interior. Estas inconsistencias deberán ser corregidas antes de proceder a estimar los tamaños de la burbuja. Se debe por tanto, implementar herramientas que permitan eliminar los valores blancos fuera de la figura de interés y rellenar esta imagen en su interior.

Las funciones utilizadas para tal fin fueron:

**Strel.** La función “strel”, representa un elemento de estructuración morfológico plano. Es decir identifica las formas dentro de la imagen que se asemejen a un parámetro, en este caso "disco". Es esencial, porque sobre éste, se aplicaran las demás instrucciones.

**Imclose.** Este comando permite realizar el cierre morfológico de los elementos identificados anteriormente. Significa que cierra toda estructura que asemeje a un disco.

**bwareaopen.** Este comando remueve elementos pequeños de la imagen, basados en la cantidad de píxeles tomados como parámetro.

En esta etapa, se han seleccionado de la imagen los elementos con forma circular, se define su contorno y se han eliminado los más pequeños. De esta forma se selecciona el elemento correspondiente a la burbuja. Luego de esto es necesario rellenar el interior de la burbuja. Los comandos utilizados se muestran a continuación.

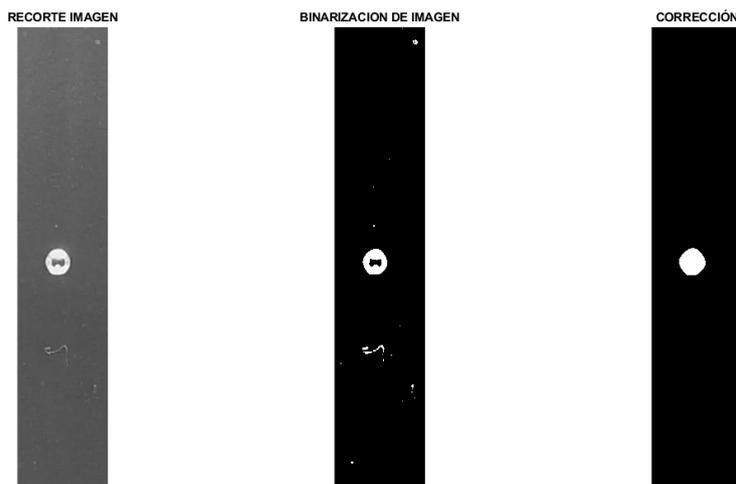
**Imfill.** Realiza una operación de relleno en los píxeles del fondo en el elemento seleccionado, la zona donde se ve la burbuja. La operación se realiza con la sintaxis “imfill(bw,'holes’)”

donde se especifica el archivo sobre el cual se hará el procedimiento de relleno.

**Imerode imdilate.** Estas dos herramientas erosionan y dilatan, respectivamente, el objeto binaria en escala de grises o binaria, de esta forma logramos la mejor definición posible de la imagen para posterior análisis. La implementación de las herramientas mencionadas, se muestra en las siguientes líneas.

```
%correccion figura
se=strel('disk',0);
imagen_cerrada=imclose(b,se);
bw=bwareaopen(imagen_cerrada,75);
%mask
mask = imfill(bw,'holes');
mask= imerode(mask,strel('disk',3)); mask = imdilate(mask,strel('disk',4));
```

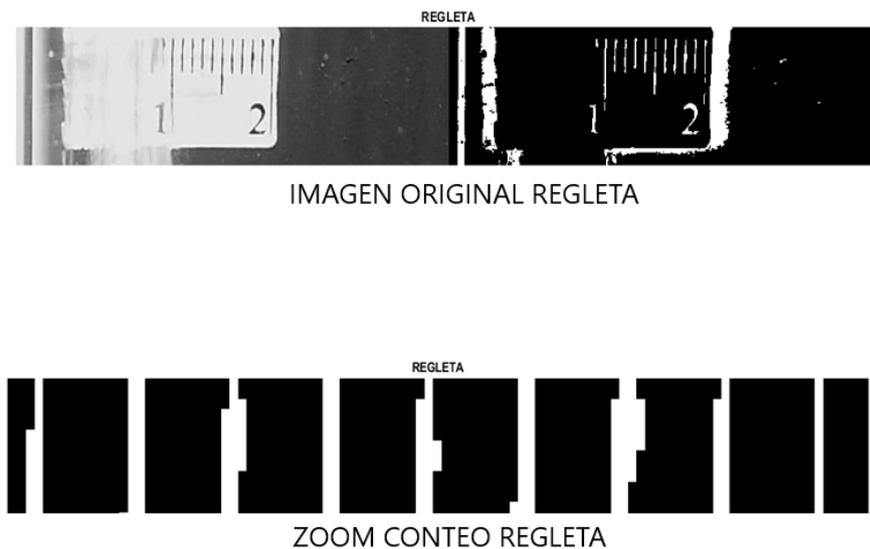
El resultado de este proceso se ilustra en la figura 4-5.



**Figura 4-5.:** Procesamiento de imágenes. Corrección de la imagen. Izquierda: imagen en escala de grises, centro: imagen binarizada, derecha: imagen modificada. Autor.

## 4.6. CÁLCULO DE ÁREA

Calcular el área a partir de las imágenes, parte de dos principios básicos. Por una parte el conteo de píxeles activos en la imagen de la derecha para la figura 4-5 y la equivalencia de esa cantidad en una unidad de medida. En este momento del proceso, la imagen esta definida como una matriz de ceros y unos, de este modo, buscamos la forma de contar los pixeles activos. La función utilizada para contarlos se define como “length(find,N)” donde length y find combinados, realizan el conteo de elementos no nulos en el archivo N. Una vez establecido el conteo se realiza una equivalencia entre milímetros y píxeles, a partir de una imagen de la regleta inmersa en la cubeta; como se observa en la figura 4-6. La linea que muestra los milímetros no esta perfectamente definida como se muestra en el acercamiento de la figura 4-6, por lo cual, se toma toda la imagen para realizar un promedio que permita establecer la relación entre los milímetros y los píxeles.



**Figura 4-6.:** Procesamiento de imágenes. Correlación píxeles-milímetros. Arriba izquierda: Imagen de regleta en color. Arriba derecha: Imagen regleta binarizada. Abajo: Acercamiento. Autor.

El resultado de este proceso es el área de la burbuja en cada uno de los fotogramas donde esta exista.

Utilizando los valores de área obtenidos para cada fotograma, se determina el valor promedio de área para cada una de las pruebas realizadas. Para cada aguja, se hicieron tres medidas y cinco burbujas por cada medida. De esta manera, el análisis de cada burbuja comprende entre 40 a 46 fotogramas, es decir cerca de 200 imágenes.

Es necesario aclarar, que la descripción realizada, aunque se ilustra solo con una figura, realmente comprende tres programas secuenciales. En el primero se descompone el video, en el segundo se ubica la zona de la burbuja y los valores de equivalencia píxeles-milímetros, en el tercero, se realiza el procesamiento descrito para las imágenes extraídas.

Una vez se desarrolló el proceso referenciado en la figura 4-1, se da paso al proceso para determinar los voltajes que cada burbuja genera al paso por el detector.

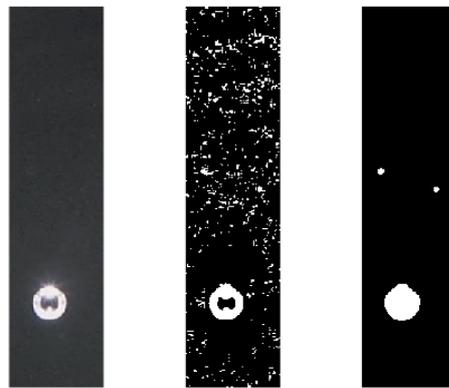
#### **4.6.1. ERRORES EN EL CÁLCULO DE TAMAÑO**

Es importante señalar que, aunque el proceso se realiza buscando la fidelidad de los resultados, se establece indefectiblemente, un error asociado al método. Este error parte del principio que aunque se da una serie de parámetros a las funciones de binarización y corrección de la figura, no son los únicos sino que existe un rango donde se pueden realizar estas operaciones. Para determinar estos rangos, se buscan los valores de los parámetros que permiten evidenciar pérdida de la forma circular en la imagen de la burbuja. Calculando el área en los límites de estos rangos, se establece el intervalo de incertidumbre para el cálculo de área.

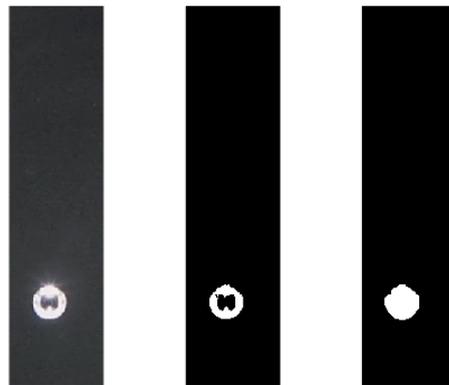
En la figura 4-7 observamos los dos límites en el tratamiento para la imagen; por una parte tenemos en (a) que al utilizar valores por debajo del mínimo, no desaparecen elementos que debían haber sido removidos y se considerarían en el conteo final de píxeles. De manera

análoga en (b), se evidencia un proceso de erosión que disminuye la cantidad de píxeles en la imagen original.

Este aspecto es un error sistemático que se considera en el proceso de trabajo y constituye un factor a tener en cuenta, como se verificará en el capítulo 6 de este documento.



(a) Tratamiento de imagen por debajo del mínimo aceptable. Se evidencia presencia de elementos por fuera de la burbuja.

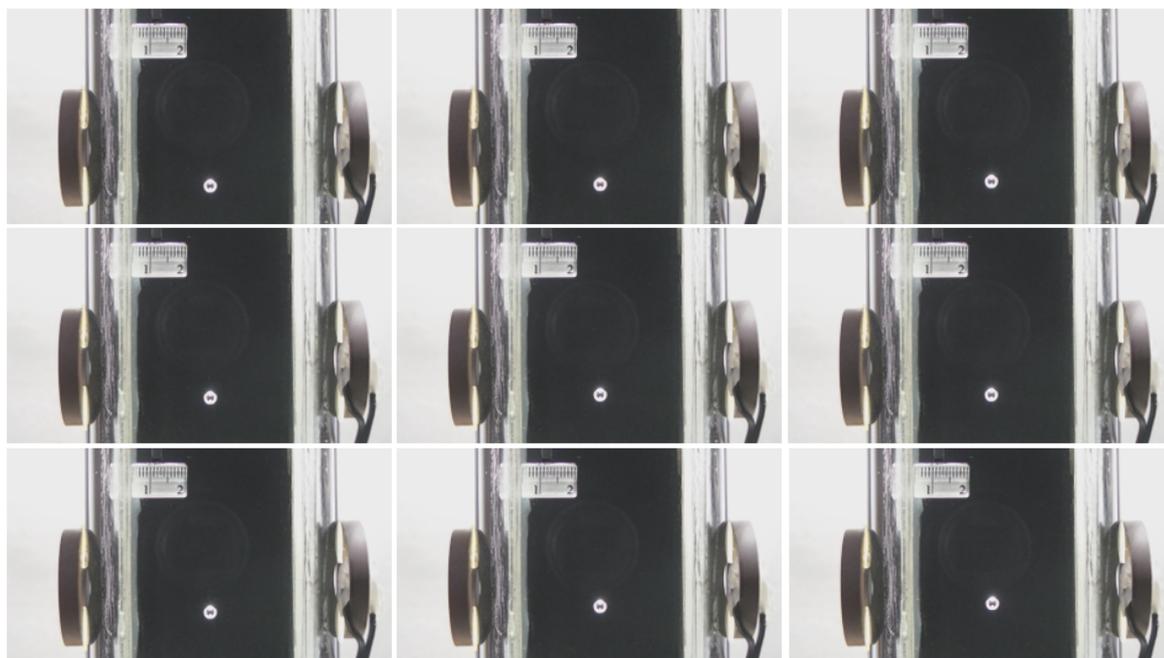


(b) Tratamiento de imagen por encima del máximo aceptable. Se evidencia pérdida de la forma circular.

**Figura 4-7.:** Variaciones de Parámetros en proceso de tratamiento imágenes.

## 4.7. EFECTOS DEL ULTRASONIDO EN LA FORMA DE LA BURBUJA

Finalmente, como se menciona en el capítulo 2, numeral 2-5, la burbuja no evidencia cambios apreciables en forma ni tamaño por efecto de su interacción con la onda de ultrasonido. Este hecho se evidencia en la figura 4-8, donde se muestra la secuencia original de 12 fotografías, obtenidas de video, para una misma prueba. Lo anterior constituye una base para suponer que en este caso se puede aplicar un modelo lineal para describir la interacción ultrasonido-burbuja que se trató en el capítulo 2, sección 2-6.

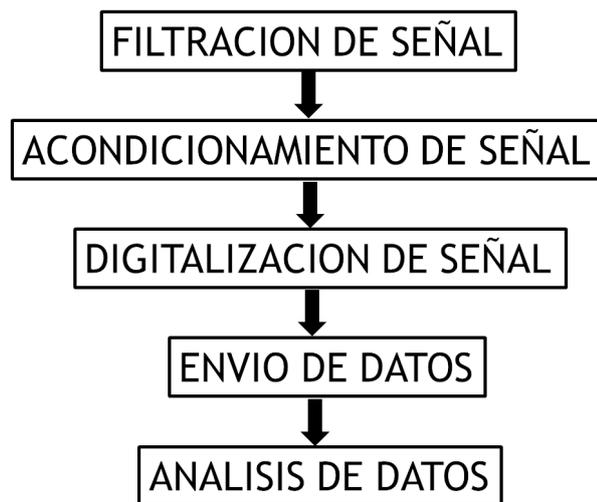


**Figura 4-8.:** Secuencia fotogramas Aguja No 20, prueba 1. PZTA. Secuencia correspondiente a las fotografías Nos: 96-98-100-102-104-106-108-110-112.

La siguiente etapa corresponde con la medición de los voltajes que provienen de la señal presente en los PZT y que será descrito en el siguiente capítulo.

## 5. CUANTIFICACIÓN DE VOLTAJES

El proceso para medir los voltajes a partir de la señal recibida en los PZT, se fundamenta en los siguientes subprocesos:



**Figura 5-1.:** Diagrama Procesamiento de Señal. Fuente: Autor

El primer proceso consiste en implementar un circuito eléctrico para acondicionamiento de la señal proveniente de los PZT y de esta manera, ajustar los rangos de voltaje a los parámetros de entrada para digitalización y la eliminación de ruidos e inestabilidad de la señal eléctrica. En el segundo proceso se codifican los datos convirtiendo valores analógicos a digitales y se envían dichos datos para el análisis correspondiente en la unidad de cómputo.

## 5.1. CIRCUITO AMPLIFICADOR SUMADOR

Durante el desarrollo de la investigación se pudo evidenciar interferencias en las señales, provenientes de la frecuencia de la red eléctrica ( $60\text{ Hz}$ ). Adicionalmente no era posible utilizar los valores de señal, tal como salen de los PZT, debido a la configuración específica del componente a usarse en el tercer proceso; es allí donde se diseña un circuito que elimine las frecuencias de la red eléctrica, ya que esta frecuencia, es baja en comparación con las frecuencias de trabajo para los PZT. Por su parte, lograr la transformación de la señal dentro de los rangos permitidos en el tercer proceso, es decir valores 0-5 voltios. Dicho circuito se esquematiza en la figura 5-2.

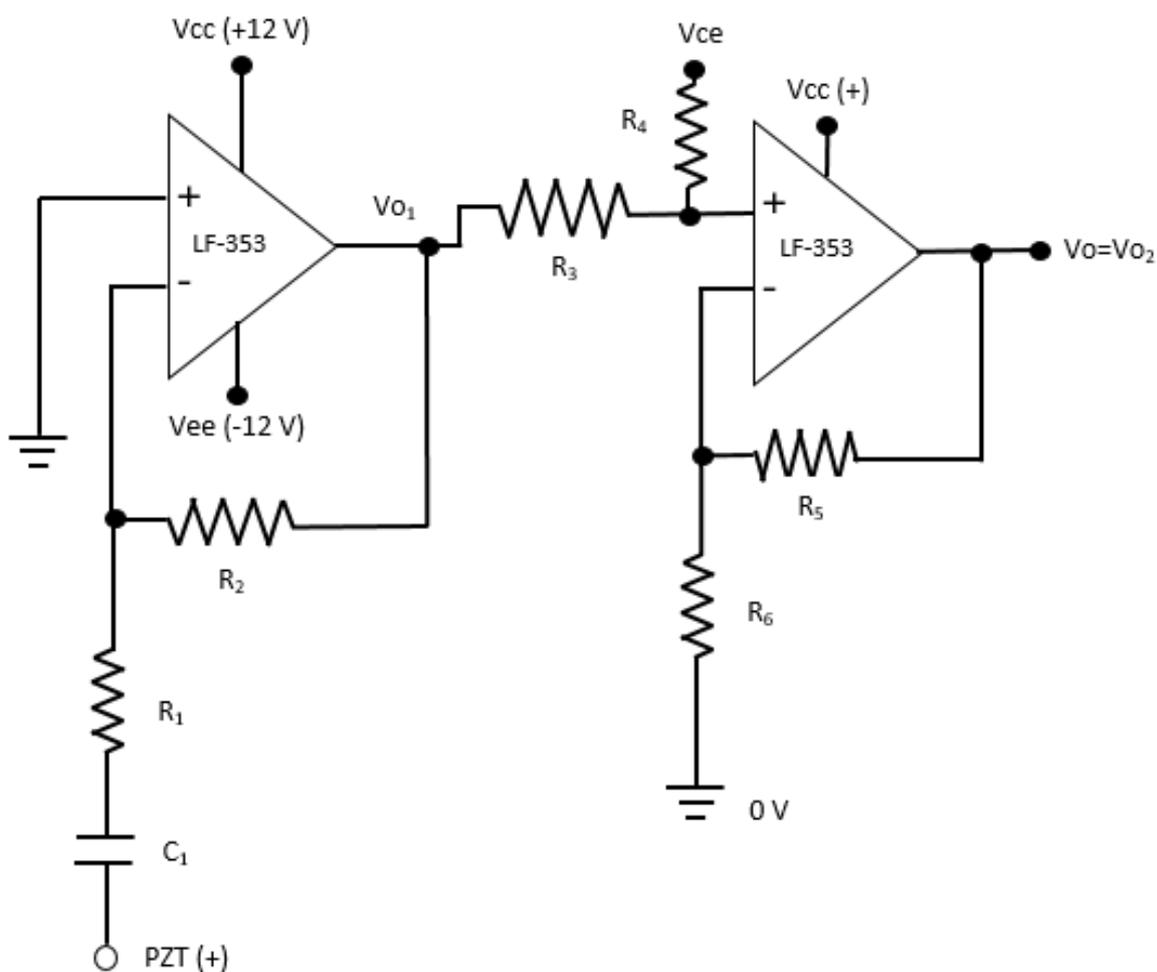
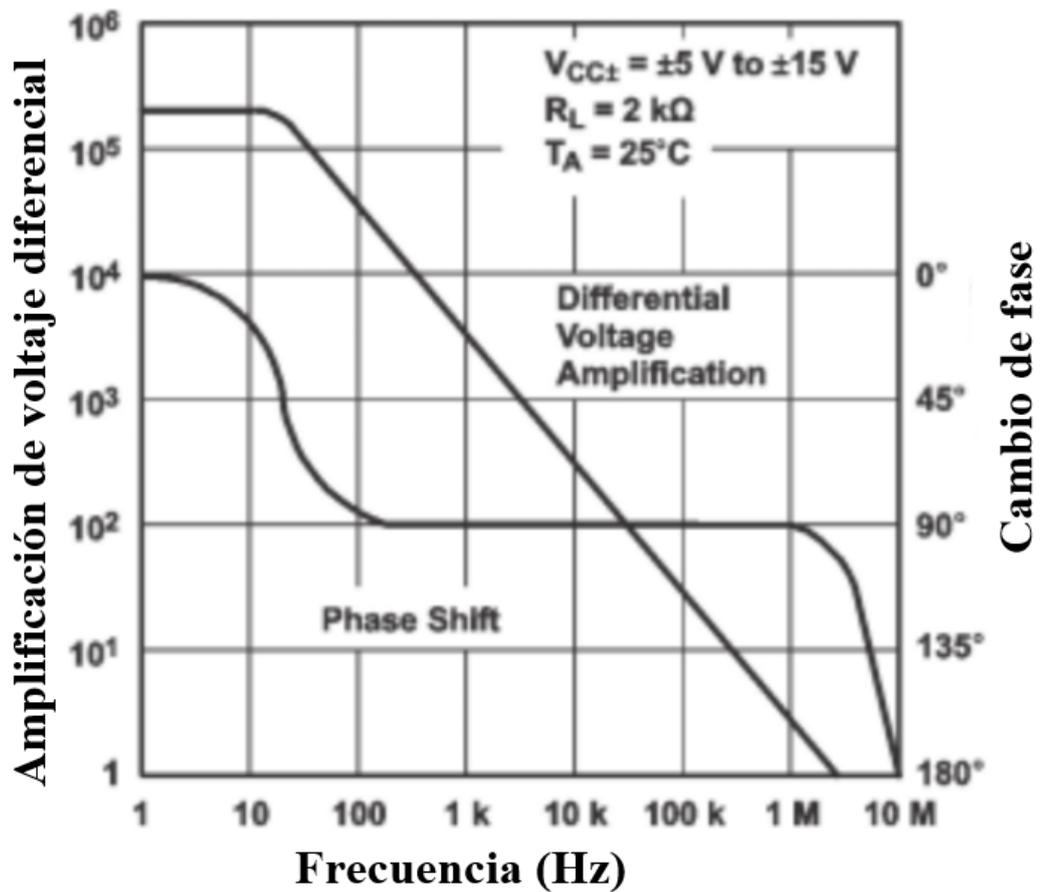


Figura 5-2.: Topología Filtro Pasa Alto y Sumador Multi entrada Fuente: Autor

Para la implementación del circuito mostrado en la figura 5-2, se decidió utilizar el amplificador operacional LF-353P de la firma Texas Instruments. Este elemento se escogió por su relación respecto del ancho de banda, el corto tiempo de respuesta, su bajo consumo y su relación de costo. Igualmente presenta un buen rendimiento para las frecuencias a utilizar en este caso, PZTA 48.2 kHz y PZTD 52.9 kHz., producto del ancho de banda propio del operacional y verificado en su curva de rendimiento, como se indica en la figura 5-3.



**Figura 5-3.:** Curvas de Rendimiento en Amplificación LF-353P. El punto óptimo de trabajo se da donde se cruzan las curvas, rango acorde con las frecuencias a manejar. Fuente: [2]

Para la topología seleccionada como se referencia en la figura 5-2, las ecuaciones de diseño

son:

$$F_{corte} = \frac{1}{2\pi R_2 C} \quad \text{Frecuencia de Corte} \quad (5-1)$$

Donde  $R_2$  es la resistencia de realimentación y  $C_1$  es el condensador que conecta con la entrada como se muestra en la figura 5-2. Esta Frecuencia de corte, para nuestro caso derivada del filtro pasa alto, representa el valor mínimo que el filtro permitirá pasar. Las señales con frecuencia mayor que la de corte pasan por el filtro sin sufrir atenuación y las señales de frecuencia menor que la de corte, son eliminadas, idealmente [49]. De acuerdo con la ecuación 5-1, fijando los valores de nuestra frecuencia de corte (al menos diez veces mas que la frecuencia que buscamos eliminar) en  $1.6 \text{ kHz}$  y el valor del condensador  $C_1$  en  $10 \text{ nF}$ , tendremos que al despejar el valor de  $R_2$  la resistencia para PZTA, es de  $180 \text{ k}\Omega$ , mientras que para PZTD, es de  $20 \text{ k}\Omega$ .

Una vez desarrollado el anterior cálculo, se verifican los valores de diseño para el sumador incorporado en la segunda parte del operacional:

$$V_{o2} = \frac{R_5}{R_3} V_{o1} + \frac{R_5}{R_4} V_{ce} - \frac{R_5}{R_6} (0) \quad (5-2)$$

De acuerdo con la ecuación 5-2 [50], donde el primer término constituye el voltaje proveniente del primer amplificador, el segundo término es el voltaje  $V_{ce} = (+5)$  voltios y el tercero es el valor a tierra, obtenemos el valor de salida de la segunda parte del circuito, donde la señal se ubica en el rango 0-5 voltios, necesaria para la siguiente fase del proceso.

Nótese que en todos los voltajes de la ecuación 5-2, el factor de amplificación (FA) está dado por:

$$FA = \frac{R_{Rlm}}{R_{Ent}} \quad (5-3)$$

En la ecuación 5-3  $R_{Rlm}$  son las resistencias de realimentación ( $R_2$  y  $R_5$ ) y  $R_{Ent}$  son las resistencias de entrada ( $R_1, R_3, R_4, R_6$ ). Por otra parte, se calcula el valor del sumador para no tener valores de voltaje negativos, por cuanto el PSoC, elemento de la siguiente fase, no trabaja con dichos valores, únicamente con valores positivos. De esta forma podemos “subir” la señal hasta el rango 0-5 voltios. Se hizo necesario aumentar en 2.5 voltios la señal antes de entrar al PSoC, por lo tanto, viendo el factor de amplificación de la ecuación 5-2, se encontró que la resistencia  $R_4$  debería ser de  $2\text{ k}\Omega$ , así mismo con la  $R_5$  con un valor de  $1\text{ k}\Omega$ , obtendríamos el valor de 2.5 voltios.

Así, se encontró que la amplificación para el caso del PZTA es de 18 veces, mientras que en el caso del PZTD tan solo se requerían 2 veces, por esta razón, las resistencias de realimentación para cada caso eran de  $180\text{ k}\Omega$  en el primer caso y de  $20\text{ k}\Omega$  en el segundo. Estas resistencias de realimentación permitieron ajustar los rangos de la señal en una primera instancia entre  $-2.5\text{V}$  y  $+2.5\text{V}$ . Es importante aclarar que este FA es negativo por la topología utilizada, pero, como la señal es alterna en una primera parte, este valor lo que hará es desfazar la señal, lo cual no afecta la finalidad del circuito, porque queremos medir la amplitud de la señal, no su desfase.

Una vez diseñado y ajustado el circuito para sistema de filtración, veremos entonces como se realizó el proceso de digitalización y transmisión para los datos obtenidos. La siguiente etapa se basa en el sistema PSoC, encargado de realizar el envío de los datos al PC para ser analizados con MATLAB.

## 5.2. DIGITALIZACIÓN Y ENVÍO DE DATOS

El PSoC es un sistema que ofrece capacidades operativas integradas en un solo circuito integrado, fabricados por la compañía norteamericana Cypress Semiconductor, con un moderno

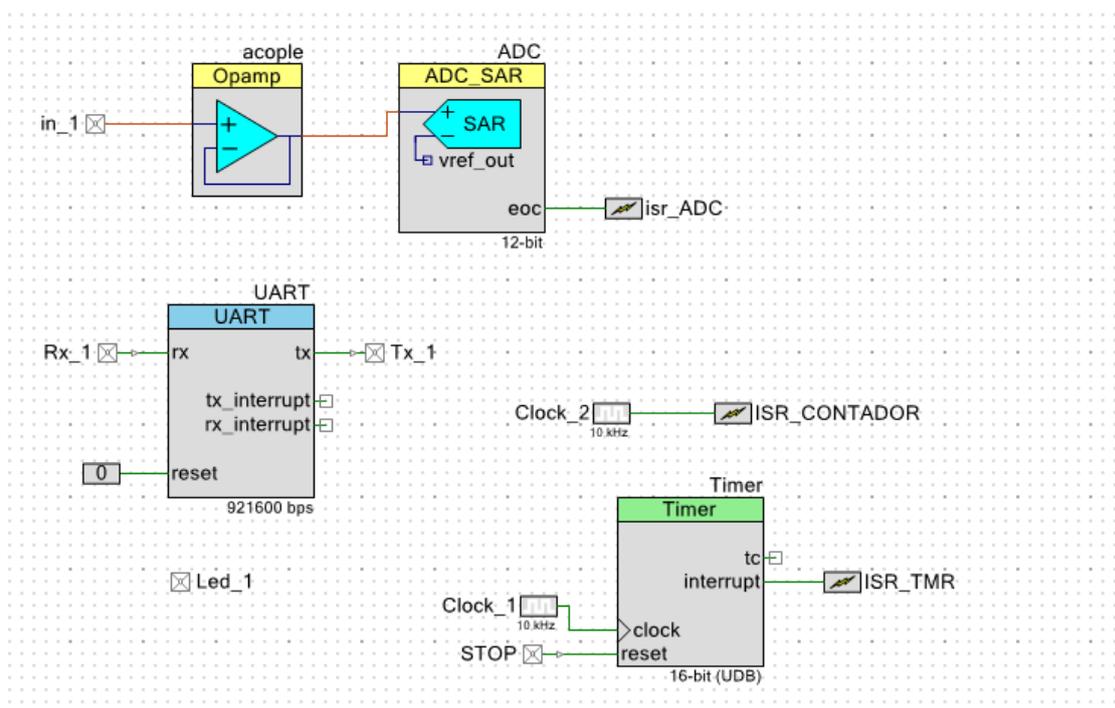
método de adquisición, procesamiento y control de señales y una excelente precisión. Incluye además un arreglo de bloques digitales (UDB) y analógicos que hacen del PSoC una muy buena propuesta para el desarrollo de proyectos de ingeniería, lo que proporciona al sistema la capacidad de asignar cualquier función, a cualquier terminal del circuito integrado. Los PSoC emplean una arquitectura configurable para el control del diseño embebido, ofreciendo un equivalente a un FP-ASIC (field programmable application-specific integrated circuit) con la ventaja del tiempo de implementación. Los dispositivos PSoC integran circuitos digitales y analógicos configurables, controlados por un micro controlador interno, de modo que proveen tanto una capacidad para la revisión de los diseños como la disminución del número de componentes usados.

Un solo PSoC puede integrar hasta 100 funciones periféricas, y ahorrar de esta manera tiempo de diseño, espacio físico y consumo de energía mientras que se mejora la calidad del sistema y se reduce su costo [51]. Las razones por las cuales fue escogido el PSoC obedecieron entre otras:

1. La relación de costo beneficio respecto de una tarjeta de adquisición de datos.
2. Comparado con otros sistemas como Arduino, la velocidad de procesamiento de datos y capacidad de trabajo, son muy superiores en PSoC.
3. Al ser un sistema embebido, reduce considerablemente el uso de otros componentes periféricos que serían necesarios en otros sistemas como Arduino.
4. La facilidad de programación, ya que no es un lenguaje tan bajo como los PIC (Programmable Integrated Circuit), sino que trabaja con lenguaje C.

En la figura 5-4, se muestra el diagrama simplificado para PSoC 5LP CY858LP, indicando sus





**Figura 5-5.:** Diagrama de Bloques Top Design. Digitalización y envío datos. Fuente: Autor

Explicaremos a continuación sus características, sus funciones y parámetros implementados.

### Bloque Opamp-Acople

Este bloque trabaja desde el acople de impedancia, es el encargado de verificar la señal de entrada contra la entrada del PSoC.

### Bloque ADC (Analogic Digital Converter) SAR

En este bloque se convierte la señal de análogo a digital, permitiendo transformar el valor continuo de las medidas a valores discretos. Para ello se configura la resolución del ADC en 12 bits, permitiendo calcular la sensibilidad del ADC, dada por la ecuación 5-4.

$$S_n = \frac{V_{ref}}{R_s} \quad \text{Sensibilidad PSoC} \quad (5-4)$$

Donde  $V_{ref}$  es el voltaje de referencia (5V) y  $R_s$  es la resolución ( $2^{12}$ ). Para nuestro caso, la sensibilidad está calculada en 0.00122070312 V, siendo la variación mínima detectable por el elemento. Esta parte del circuito, además se constituye en la primera aproximación a la incertidumbre propia del elemento de medición.

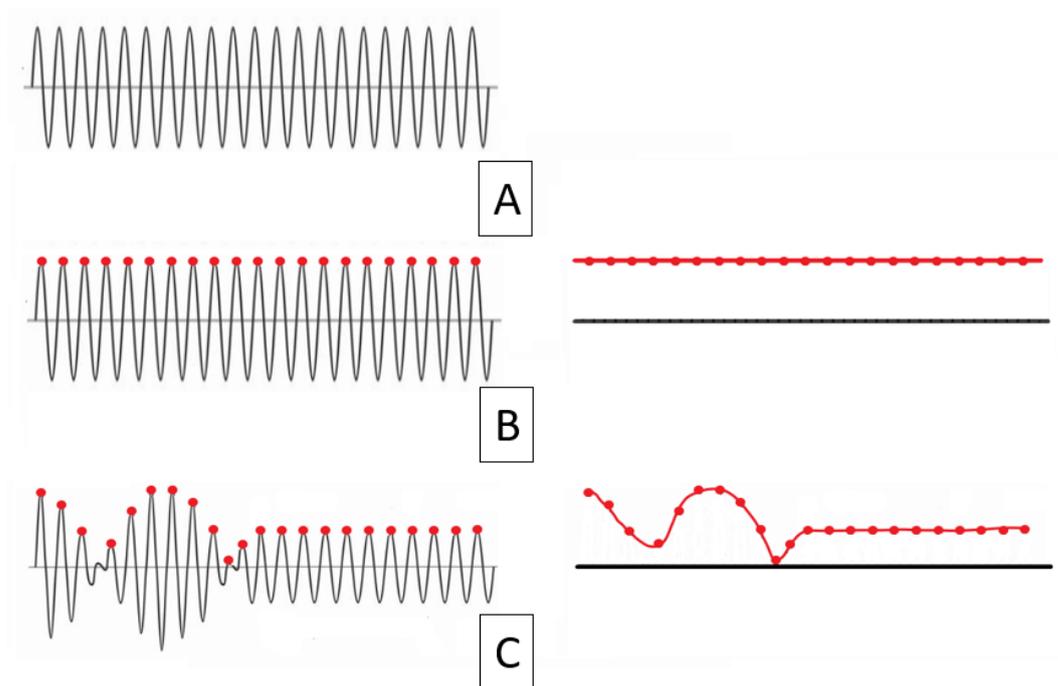
Otro valor para la configuración del bloque, lo constituye la frecuencia de muestreo. El bloque fue configurado con una tasa de 550000 muestras por segundo; por cuanto las frecuencias medidas fueron 48200 Hz para el PZTR y 52900 Hz para el PZTD. Por lo tanto se puede configurar a un orden de magnitud mayor que la señal original.

### **Bloque ISR-ADC**

Con este bloque, se realiza la recolección de información y alerta en memoria.

### **UART**

El bloque UART maneja la transmisión de datos y el tipo de comunicación con otros dispositivos. Aplica el protocolo del mismo nombre (UART, Universal Asynchronous Receiver Transmitter), el cual es el conjunto de normas para el intercambio de datos entre dos dispositivos. Inicialmente la tasa de envío de datos está configurada en 921.600 baudios o bit/segundo. Como la frecuencia de muestreo es muy alta, la tasa de generación de datos es mucho mayor a la tasa de envío, por esta razón solo se configuró el protocolo para enviar la envolvente, es decir los valores extremos de la señal, tal como se muestra en la figura 5-6. Los valores son digitalizados directamente por el PSoC a su correspondiente valor en voltios. Es decir, no se requieren fórmulas externas para interpretar el dato (se obtiene directamente). Una desventaja es que un único valor de voltaje, ocupa 5-6 bytes en la trama, aumentando la tasa de generación de datos, en comparación con si se enviara directamente el valor en su representación binaria donde ocuparía 2 bytes. De esta forma estaríamos en un envío real por el orden de 23000 muestras por segundo.



**Figura 5-6.:** Proceso de muestreo: A: Señal original. B: Señal sin burbuja, puntos de muestreo. C: Señal con burbuja, puntos de muestreo. Autor.

## Clock 2

Este bloque por su parte, nos permite programar un tiempo de retraso en el inicio del muestreo, para evitar el efecto de ruido por accionamiento del pulsador en el PSoC, que es la forma como se inicia la transmisión de datos.

## ISR\_ Contador

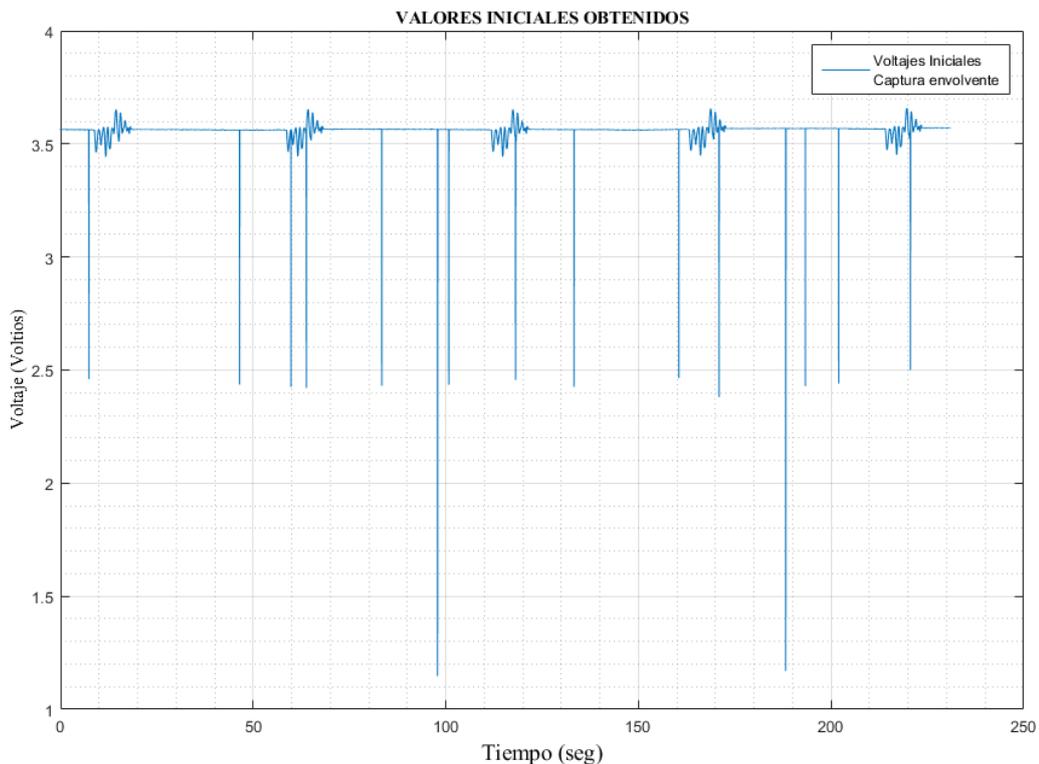
Con este bloque, se da señal de encendido y parada para adquirir datos. Su configuración está dada por defecto.

## Timer

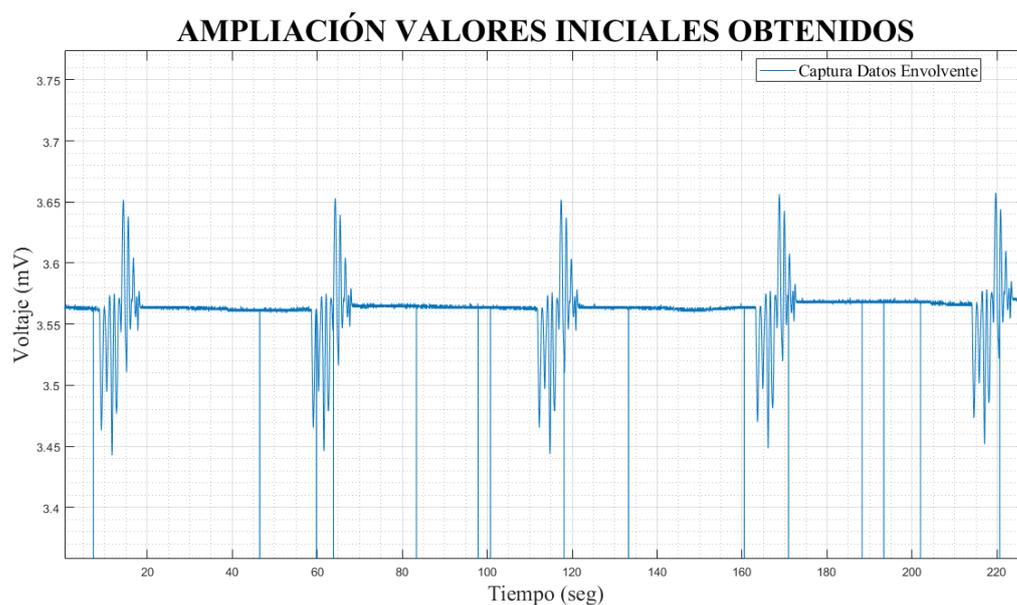
Bloque encargado de tomar y determinar el tiempo de medición. Así mismo permite ignorar el efecto de rebote, aplicando los tiempos de espera. Es el último proceso desarrollado. Su configuración se determina a partir de la resolución (16 bits) para este caso.

## 5.4. TRATAMIENTO DE DATOS CON MATLAB

En la práctica, para iniciar la toma de datos, se activan los protocolos de transmisión PSoC - computador, utilizando un primer programa implementado en MATLAB para realizar dicha tarea. Luego empieza la recolección y transmisión de datos por parte del PSoC, para lo cual se utiliza el pulsador inserto en el dispositivo. Accionar de nuevo el pulsador detiene estos procesos. A continuación se genera la gráfica inicial de los valores obtenidos como se muestra en la figura 5-7. Posteriormente, se activa un segundo programa, donde se reconstruye la señal a partir de los valores de voltaje válidos recibidos, de esta forma se hallan las gráficas finales de voltaje en función del tiempo. El valor de voltaje que genera el paso de la burbuja frente al PZT, así como sus respectivas incertidumbres se calculan para los valores de cinco burbujas.



**Figura 5-7.:** Gráfica Voltajes en función del tiempo al paso de la burbuja, obtenidos por digitalización en el PSoC. Fuente: Autor

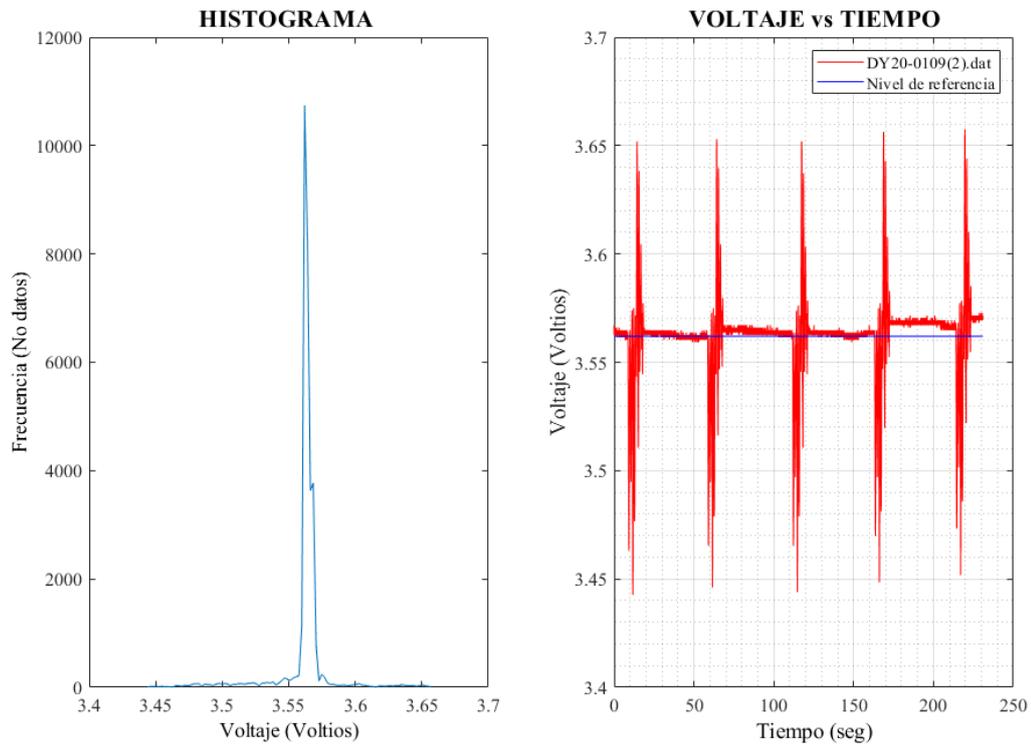


**Figura 5-8.:** Ampliación zona de Voltajes en función del tiempo al paso de la burbuja, obtenidos por digitalización en el PSoC. Fuente: Autor

En las figuras 5-7 y 5-8, observamos la señal tal como fue recibida y decodificada en su valor de voltaje. Al analizar esta gráfica, se puede evidenciar por una parte, ciertos puntos donde se muestran caídas abruptas que son consideradas errores en el proceso de medición y se filtran en el análisis en MATLAB.

En el tiempo en que no hay burbuja en la CA ni frente al PZT, la señal de referencia permanece en un rango entre 3.56 a 3.57 voltios. Cuando la burbuja ingresa en la CA y pasa frente a los PZT, se da una caída de voltaje, producto del “bloqueo” que hace la burbuja a la señal establecida entre emisor y receptor.

Después del paso frente al PZT, viene un proceso de amortiguación de la señal que se evidencia en un aumento por sobre la señal de referencia. Este efecto se debe al comportamiento propio del filtro activo utilizado. Cuando la burbuja sale de la zona de los PZT, la señal vuelve a los patrones del nivel de referencia iniciales.



**Figura 5-9.:** Gráficas: A la izquierda se observa el Histograma que permite definir la señal de referencia. A la derecha, gráfica de Voltaje en función del tiempo a partir del manejo de datos por MATLAB. Fuente: Autor

En la figura 5-9, tenemos las gráficas obtenidas después de la depuración mencionada anteriormente. Por una parte, se estima el valor del nivel de referencia a partir del histograma de voltaje en las muestras recogidas. Este nivel de referencia, es el valor de voltaje en ausencia de burbuja. Como el experimento fue diseñado para medir con una sola burbuja en la CA, al paso de cada burbuja, se esperaba un tiempo para estabilizar la señal en su nivel de referencia y posteriormente se daba ingreso a la siguiente burbuja. La segunda gráfica 5-9 derecha, es la señal depurada proveniente de los datos que generaron la gráfica expuesta en la figura 5-7, pero eliminando los picos correspondiente a los errores en la medida. Para eliminar dichos picos, se descartan los datos de voltaje que se encuentren en un rango superior o inferior al 10% de la señal de referencia. Finalmente para medir el cambio de la señal, al paso de la burbuja, se hallan los valores mínimos de voltaje en la muestra de datos y se promedian.

En el ejemplo presentado, se muestran los resultados para el PZTD con la aguja No 20. El promedio calculado, establece la variación de voltaje que junto con los valores de área, daría lugar a la relación tamaño burbuja-voltaje. Este análisis será abordado en el siguiente capítulo.

## 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En el presente capítulo, se recogen los resultados obtenidos, una vez se realizan las fases de medición tanto para tamaño de la burbuja, como para los voltajes medidos en los PZT. Recordemos que la medición de cada parámetro, exigió configurar dos procesos diferenciados a partir del análisis de imágenes de video y la implementación con PSoC para voltajes.

Se realizaron tres pruebas de medición por cada uno de los calibres de las agujas, donde cada prueba inicia calibrando el sistema para garantizar la presencia de una sola burbuja a la vez en la CA. Se procede entonces a activar el sistema de detección de señal PSoC dando lugar a mediciones de una secuencia de cinco burbujas y con un total de 18 pruebas. De esta forma se obtienen 18 tamaños diferentes de burbuja para cada uno de los PZT empleados. Finalizada la medición de voltaje, se procede a dar inicio a la grabación del video, para la misma cantidad de burbujas. Una vez terminada la grabación, se realiza el análisis de la información en cuanto a mediciones de voltaje y su posterior análisis en cuanto al tamaño.

Igualmente es importante señalar la cuantificación de las incertidumbres asociadas al manejo de los datos recopilados. En el caso del voltaje, se consideran dos errores; el error de escala propio del instrumento, calculado a partir de la sensibilidad como se indica en la ecuación 5-4 y el error estadístico acorde con la cantidad de burbujas por prueba. En el caso del tamaño de la burbuja, se tiene en cuenta el error estadístico al igual que en el caso del voltaje, pero también el error asociado al proceso de tratamiento de la imagen expuesto en la sección

4.6.1.

## 6.1. RESULTADOS MEDIDAS DE VOLTAJE

<i>Calibre de Aguja</i>	<i>Número de prueba</i>	<i>Voltaje (mV)</i>
27	(1)	58.00 ± 0.0025
27	(2)	61.00 ± 0.0023
27	(3)	60.00 ± 0.0016
25	(1)	126.20 ± 0.0067
25	(2)	149.50 ± 0.0068
25	(3)	123.60 ± 0.0031
23	(1)	153.60 ± 0.0026
23	(2)	168.90 ± 0.0033
23	(3)	156.40 ± 0.0065
21	(1)	176.70 ± 0.0045
21	(2)	166.10 ± 0.0033
21	(3)	165.10 ± 0.0039
20	(1)	135.40 ± 0.0030
20	(2)	140.30 ± 0.0072
20	(3)	146.30 ± 0.0025
18	(1)	155.10 ± 0.0042
18	(2)	166.50 ± 0.0050
18	(3)	153.80 ± 0.0066

**Tabla 6-1.:** Voltajes generados burbuja PZTA. Frecuencia 48.2 *KHz*.

En las tablas 6-1 y 6-2 se puede evidenciar que no hay replica exacta entre las pruebas del mismo calibre de la aguja y los valores de voltajes obtenidos. Esto se debe a la imposibilidad de reproducir el ejercicio dadas las imprecisiones en el flujo de aire y posición final de la aguja en la CA para cada prueba. Por ejemplo en el caso del calibre 23 en el PZTA tabla 6-1, se observan valores diferentes para la misma aguja.

<i>Calibre de Aguja</i>	<i>Número de Prueba</i>	<i>Voltaje (mV) ±</i>
25	(1)	48.30 ± 0.0045
25	(2)	47.30 ± 0.0026
25	(3)	60.50 ± 0.0018
23	(1)	116.10 ± 0.0084
23	(2)	127.10 ± 0.0062
23	(3)	123.00 ± 0.0107
21	(1)	270.30 ± 0.0022
21	(2)	306.50 ± 0.0068
21	(3)	250.30 ± 0.0178
20	(1)	144.00 ± 0.0015
20	(2)	115.00 ± 0.0038
20	(3)	80.70 ± 0.0064
20	(4)	79.30 ± 0.0066
20	(5)	111.00 ± 0.0152
18	(1)	269.50 ± 0.0027
18	(2)	294.40 ± 0.0029
18	(3)	231.80 ± 0.0069
18	(4)	166.10 ± 0.0024

**Tabla 6-2.:** Voltajes generados burbuja PZTD. Frecuencia 52.9 *KHz*. Valores de error.

## 6.2. RESULTADOS TAMAÑO DE BURBUJA

El proceso de toma de video, como se ilustra en la figura 6-1, establece la filmación para cinco burbujas, es decir, la misma cantidad de burbujas sobre las cuales se midió voltaje. Las duraciones de filmación en concordancia con la velocidad de la cámara (60 cuadros por segundo), podían oscilar entre 1 a 4 minutos, dependiendo de la separación posible entre burbujas que permitiera la válvula de control de aire. Una vez se terminaba el proceso de filmación, se remite al PC en archivo formato MP4, copiándolo al entorno de trabajo de MATLAB para los análisis correspondientes como se ilustró en el capítulo 4.



**Figura 6-1.:** Montaje CA, Procesamiento del Video. Fuente: Autor

En las tablas 6-3 y 6-4, se consignan los resultados de área para las 18 pruebas por cada uno de los PZT.

<i>Aguja/No Prueba</i>	<i>Area (mm<sup>2</sup>)</i>	<i>Error Sist +</i>	<i>Error Sist -</i>	<i>Error Estadístico</i>	<i>Error +</i>	<i>Error -</i>
27 (1)	5.4450	0.0805	0.1170	0.3060	0.3164	0.3276
27 (2)	5.1209	0.0969	0.1006	0.0499	0.1090	0.1123
27 (3)	5.3323	0.3769	0.1413	0.0489	0.3801	0.1495
25 (1)	11.5954	0.1313	0.0107	0.1147	0.1743	0.1152
25 (2)	13.4108	0.2022	0.1666	0.1889	0.2767	0.2519
25 (3)	10.7191	0.1529	0.1662	0.1703	0.2289	0.2380
23 (1)	13.1514	0.1859	0.2184	0.3272	0.3763	0.3934
23 (2)	13.0425	0.2076	0.1761	0.1940	0.2841	0.2620
23 (3)	13.6039	0.2511	0.1929	0.5086	0.5672	0.5440
21 (1)	14.0786	0.2114	0.2689	0.4744	0.5194	0.5453
21 (2)	13.6983	0.2410	0.2689	0.1938	0.3093	0.3315
21 (3)	13.4327	0.2110	0.2787	0.3438	0.4034	0.4426
20 (1)	11.0508	0.2392	0.1951	0.1752	0.2965	0.2622
20 (2)	11.0208	0.2291	0.2167	0.1843	0.2940	0.2845
20 (3)	11.9516	0.2387	0.0784	0.3987	0.4647	0.4063
18 (1)	13.2270	0.2020	0.2521	0.3818	0.4319	0.4575
18 (2)	14.9011	0.1169	0.1933	0.3941	0.4111	0.4390
18 (3)	13.4441	0.2622	0.2430	0.6061	0.6604	0.6530

**Tabla 6-3.:** Valores de Área a partir de las Imágenes PZTA. Las columnas 3 y 4 describen intervalos de error asociados al procesamiento de la imagen (error sistemático). Las columnas 6 y 7 muestran los intervalos de error considerando el error estadístico y sistemático.

<i>Aguja/No Prueba</i>	<i>Area (mm<sup>2</sup>)</i>	<i>Error Sist +</i>	<i>Error Sist -</i>	<i>Error Estadístico</i>	<i>Error +</i>	<i>Error -</i>
25 (1)	10.5703	0.0820	0.1855	0.3687	0.3777	0.4127
25 (2)	10.2476	0.1240	0.2067	0.2484	0.2776	0.3232
25 (3)	10.6269	0.1050	0.2085	0.3382	0.3541	0.3973
23 (1)	12.0406	0.1132	0.2103	0.1080	0.1565	0.2364
23 (2)	12.2325	0.1210	0.2016	0.0932	0.1527	0.2221
23 (3)	12.1713	0.1501	0.3279	0.1508	0.2128	0.3609
21 (1)	13.9931	0.1403	0.1930	0.1579	0.2112	0.2494
21 (2)	15.6255	0.1014	0.2807	0.1742	0.2016	0.3304
21 (3)	14.9904	0.1554	0.2666	0.1603	0.2233	0.3111
20 (1)	11.1311	0.1092	0.1771	0.0998	0.1479	0.2033
20 (2)	11.0131	0.1639	0.1848	0.1291	0.2086	0.2254
20 (3)	10.9174	0.1354	0.1832	0.1431	0.1970	0.2325
20 (4)	10.3232	0.0598	0.0716	0.2384	0.2458	0.2489
20 (5)	12.1780	0.0588	0.1408	0.1186	0.1324	0.1841
18 (1)	12.8835	0.1100	0.1845	0.1332	0.1727	0.2276
18 (2)	13.6508	0.1079	0.1855	0.1349	0.1727	0.2294
18 (3)	13.5827	0.2040	0.2084	0.1825	0.2737	0.2770
18 (4)	12.2016	0.0632	0.1123	0.3608	0.3663	0.3779

**Tabla 6-4.:** Valores de Área a partir de las Imágenes PZTD. Las columnas 3 y 4 describen intervalos de error asociados al procesamiento de la imagen (error sistemático). Las columnas 6 y 7 muestran los intervalos de error considerando el error estadístico y sistemático.

En los valores procesados para el análisis, cobra importancia el hecho del margen de error en el tratamiento de las imágenes mencionadas en el aparte 4.8. Se comprueba que las incertidumbres asociadas con el tratamiento de imágenes no son simétricas, por cuanto dependen de parámetros no necesariamente proporcionales al área calculada.

Al igual que en los resultados de voltaje, se puede verificar que la misma aguja, no genera los mismos tamaños de burbuja. Es necesario considerar los efectos de cantidad de aire y la posición de la aguja en la generación de la burbuja.

### 6.3. RELACIÓN TAMAÑO VOLTAJE

Una vez llevadas a cabo las etapas anteriores donde se puede verificar resultados respecto de área de burbuja a partir de la imagen, y voltaje a partir de análisis de la señal, se procede a presentar y evaluar los resultados de la relación entre estas variables. A partir de las tablas 6-1 a 6-4, se toman los valores de área y voltaje para los PZTA y PZTD, generando las tablas

6-5 y 6-6.

Estos datos serán representados en las gráficas 6-2 y 6-3 para el caso de PZTA y PZTD respectivamente.

<i>Área (mm<sup>2</sup>)</i>	<i>Error +</i>	<i>Error -</i>	<i>Voltaje (mV)</i>	<i>Error Voltaje</i>
5.1209	0.1090	0.1123	61.00	± 0.0023
5.3322	0.3801	0.1495	60.00	± 0.0016
5.4450	0.3164	0.3276	58.00	± 0.0025
10.7191	0.2289	0.2380	123.60	± 0.0031
11.0208	0.2940	0.2845	140.30	± 0.0072
11.0508	0.2965	0.2622	135.40	± 0.0030
11.5954	0.1743	0.1152	126.20	± 0.0067
11.9516	0.4647	0.4063	146.30	± 0.0025
13.0425	0.2841	0.2620	168.90	± 0.0033
13.1514	0.3763	0.3934	153.60	± 0.0026
13.2270	0.4319	0.4575	155.10	± 0.0642
13.4108	0.2767	0.2519	149.50	± 0.0068
13.4327	0.4034	0.4426	165.10	± 0.0039
13.4441	0.6604	0.6530	153.80	± 0.0066
13.6039	0.5672	0.5440	156.40	± 0.0065
13.6983	0.3093	0.3315	166.10	± 0.0033
14.0786	0.5194	0.5453	176.70	± 0.0045
14.9011	0.4111	0.4390	166.50	± 0.0050

**Tabla 6-5.:** Relación Voltaje- Área PZTA.

<i>Area (mm<sup>2</sup>)</i>	<i>Error +</i>	<i>Error -</i>	<i>Voltaje (mV)</i>	<i>Error Voltaje</i>
10.2476	0.2776	0.03232	47.30	± 0.0026
10.3232	0.2458	0.2489	79.30	± 0.0066
10.5703	0.3777	0.4127	48.30	± 0.0045
10.6269	0.3541	0.3973	60.50	± 0.0018
10.9174	0.1970	0.2325	80.70	± 0.0064
11.0131	0.2086	0.2254	115.00	± 0.0038
11.1311	0.1479	0.2033	144.00	± 0.0015
12.0406	0.1565	0.2364	116.10	± 0.0084
12.1713	0.2128	0.3609	123.00	± 0.0107
12.1780	0.1324	0.1841	111.00	± 0.0152
12.2016	0.3663	0.3779	166.10	± 0.0024
12.2325	0.1527	0.2221	127.10	± 0.0062
12.8835	0.1727	0.2276	269.50	± 0.0027
13.5827	0.2737	0.2770	231.80	± 0.0069
13.6508	0.1727	0.2294	294.40	± 0.0029
13.9931	0.2112	0.2494	270.30	± 0.0022
14.9904	0.2233	0.3111	250.30	± 0.0178
15.6255	0.2016	0.3304	306.50	± 0.0068

**Tabla 6-6.:** Relación Voltaje- Área PZTD.

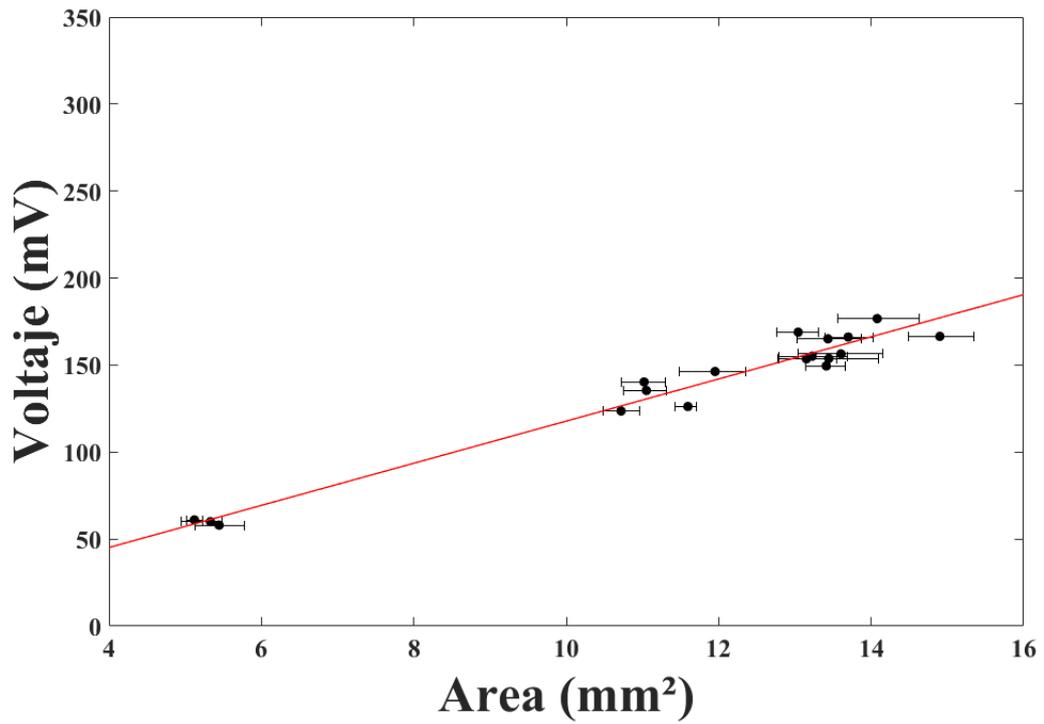


Figura 6-2.: Gráfica Área-Voltaje PZTA

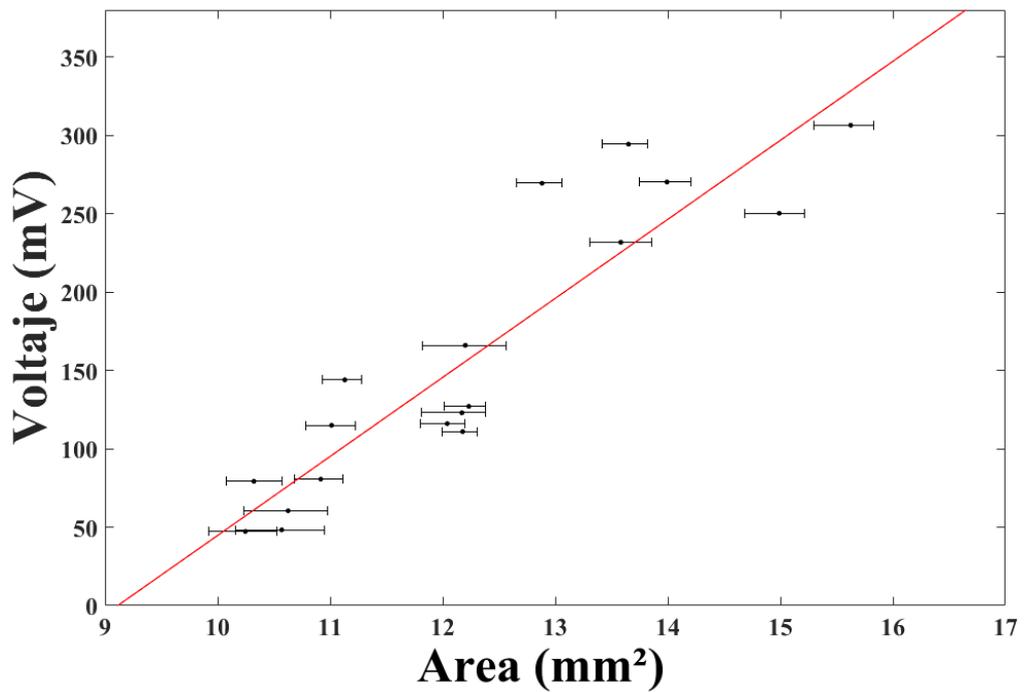


Figura 6-3.: Gráfica Área-Voltaje PZTD

Se evidencia una relación de proporcionalidad directa entre las áreas medidas a partir de la imagen, respecto de los cambios de voltaje observados con la medición de los PZT. Aunque se intentó realizar ajustes de orden superior, únicamente el de tipo lineal alcanzó los valores máximos enunciados en este documento.

Los rangos de área medidos en la prueba con el PZTA están entre,  $5 \text{ mm}^2$  y  $16 \text{ mm}^2$ . Para el caso del PZTD, el rango se ubica entre  $10 \text{ mm}^2$  y  $16 \text{ mm}^2$ . Se debe a que durante la prueba con el PZTD, no se pudo utilizar la aguja de calibre No 27. En su reemplazo, se hicieron pruebas adicionales con otras agujas. por otra parte al no tener un control preciso del aire que forma la burbuja, se dificulta dar un rango mas amplio de tamaños que copen, por ejemplo, la zona de la gráfica en la figura 6-2, en las áreas de 6 a  $11 \text{ mm}^2$ .

Por su parte, los rangos de voltaje obtenidos para PZTA se ubican entre 50 y 200 mV, mientras que los rangos para PZTD están entre 50 a 350 mV. Esto era de esperarse, por ser dos componentes PZT con diferente tipo de respuesta.

La respuesta evidenciada con los resultados de PZTA y PZTD, no conduce a comportamientos apreciablemente distintos para dichos elementos. Hasta el alcance experimental desarrollado, la geometría general de los PZT, no afecta sustancialmente el comportamiento de tipo lineal en la respuesta de area vs voltaje.

Al aplicar una regresión lineal a los conjuntos de datos para los dos PZT, se obtienen las siguientes ecuaciones. Para PZTA  $[V(A) = 12A - 3,3]$  (mV), mientras que para PZTD corresponde con  $[V(A) = 50A - 460]$  (mV). Sus coeficientes de correlación son para PZTA  $R^2 = 0,963$  y para PZTD  $R^2 = 0,834$ .

A partir de los valores en los coeficientes de correlación obtenidos, es razonable suponer una

relación lineal entre el área y el voltaje. Sin embargo, la dificultad en la reproducibilidad de las pruebas tiene un efecto en la dispersión presentada en los datos, que se refleja en los coeficientes, al no presentar un ajuste preciso sobre todo en el PZTD. Cabe mencionar que en este punto del desarrollo experimental, la válvula de control de flujo ya experimentaba desgaste por uso, normalmente, este componente no está diseñado para ajustar en forma continua, y ya se había utilizado en las pruebas del PZTA.

Al no poderse verificar cambios significativos ni en el tamaño, ni en la forma de la burbuja, en presencia de la onda de ultrasonido, se podría suponer un comportamiento de la burbuja como un oscilador lineal, modelo con el que se está describiendo la interacción ultrasonido-burbuja en el capítulo 2. De acuerdo con el modelo, se tiene que la burbuja disipa energía en función de su área superficial. Esta apreciación, explicaría la caída de voltaje en la señal al paso de la burbuja frente de los PZT. Sin embargo se debe realizar un análisis tanto teórico como experimental más profundo y una contrastación de modelos numéricos o simulaciones respecto de los resultados experimentales.

Al comparar las barras de error en cuanto al área y el voltaje, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones. Respecto del error relacionado con los voltajes, se nota el alto nivel de precisión derivado del uso del PSoC, esto arroja errores muy bajos en la medición. Respecto del tamaño de la burbuja, aunque los errores se vean altos en las gráficas, para efectos prácticos, solo constituyen errores de, en el caso más grande, alrededor de  $0.5 \text{ mm}^2$ , lo cual muestra un método bastante fiable, teniendo en cuenta que es una medición indirecta.

Pensando en una posible aplicación en temas industriales, aparece un problema y es tener en cuenta la posición de la burbuja respecto de la ubicación de los sensores. Cambiar levemente la posición de ésta, mostrará variaciones en las medidas de voltaje, situación evidenciada en la reproducibilidad del experimento a la hora de tomar los datos. Aunque no se presentan

estos valores, durante las pruebas iniciales, se evidenció variación significativa en términos de voltaje, de allí la implementación de la guía en el ingreso de las agujas, para evitar en lo posible, la inclinación de las mismas.

# 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El propósito general de la investigación, consistía en validar un prototipo que permitiera detectar burbujas por medio de ultrasonidos, para esto se desarrollaron una serie de dispositivos, que permitieran captar señales, acondicionarlas y determinar el tamaño de burbujas para hallar la relación voltaje tamaño. La experimentación realizada, presenta viabilidad en cuanto a la posibilidad de detectar burbujas por medio de ultrasonidos.

## 7.1. CONCLUSIONES

- Se implementó un sistema para generación de burbujas en una columna de glicerina, que permitió obtener burbujas uniformes de distintos tamaños.
- Se ubicó un arreglo de PZT en modo emisor y receptor para señal de ultrasonido, la cual se digitalizó utilizando un dispositivo PSoC, para un posterior análisis.
- Se establece que al paso de una burbuja frente al arreglo de piezo eléctricos, se evidencia perturbaciones en la señal recibida, las cuales fueron medidas y cuantificadas. Los rangos obtenidos, oscilaron entre 58 y 166 mV para el arreglo PZTA y entre 47 y 306 mV para el arreglo PZTD.
- Al implementar el sistema para determinar los tamaños de la burbuja por medios

digitales, se pudo constatar que el método de análisis por medio del video y apoyado en el procesamiento digital de imágenes con MATLAB, es viable para poder determinar estos tamaños. Los rangos obtenidos fueron entre 5 a 15  $mm^2$  para las pruebas con PZTA y entre 10 y 16  $mm^2$  para las pruebas con el PZTD.

- El análisis de los resultados experimentales, permite concluir que existe una relación lineal entre el área superficial de las burbujas y la caída de voltaje en la señal de los PZT al paso de las mismas. Este comportamiento no depende de la forma del PZT utilizado.
- Se evidencian las bondades de trabajo del PSoC, como dispositivo que permite tomar este tipo de medidas de forma fiable acorde con los valores del orden de hasta 50  $kHz$ . Esto también se ve impactado por su facilidad de adquisición y facilidad de programación.
- El proceso de tratamiento de imágenes con MATLAB, permitió determinar los tamaños de burbuja, con una precisión cercana a los 0.5  $mm^2$ , es decir un error de cerca del 4% en términos generales.

## 7.2. RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS

- Aumentar valores de frecuencia e intensidad de la onda de ultrasonido con arreglos de PZT de otras características, para obtener comportamientos no lineales en la burbuja y contrastar con las señal de voltaje obtenida.
- Al experimentar con frecuencias mayores a 50  $kHz$ , se requiere así mismo utilizar equipos de adquisición de datos con mayor nivel de muestreo.
- Se requiere implementar mecanismos para controlar de forma mas precisa el flujo de aire y la posición de las agujas, así se daría mayor homogeneidad en los tamaños de

burbuja obtenidos entre prueba y prueba.

- Aunque se evidencia proporcionalidad entre el voltaje obtenido y el área superficial, lo que podría describirse a partir de un modelo de oscilador lineal para la burbuja, se requiere profundizar en el modelo teórico e implementar modelos numéricos o simulaciones que sean contrastados con los resultados experimentales.
- En futuras experimentaciones, se hace necesario la adquisición de mayores recursos técnicos para el desarrollo del ejercicio experimental. Agujas de otros diámetros, cámaras de mayor zoom y resolución entre otros, mejoraran ostensiblemente la posibilidad de datos y medidas mas fiables.

# A. Anexo: Linealización Ecuación Rayleigh Plesset.

En términos generales, la ecuación de Rayleigh Plesset, es una ecuación diferencial ordinaria que describe la mecánica de una burbuja de gas inmersa en un líquido. Es de anotar que, la ERP, contempla como parte fundamental, la variación de radio en virtud de la presión externa ejercida por una onda de presión incidente. Para el contexto de esta investigación y campos de investigación futuros, se hará un proceso de linealización para poder relacionarla con la ecuación de oscilador amortiguado forzado, que describe el comportamiento, en los casos donde la variación del radio es mínima, basados en una perturbación pequeña tal que, el cambio en el radio es pequeño con respecto al radio que mantendría en el equilibrio.

$$R\ddot{R} + \frac{3\dot{R}^2}{2} = \frac{1}{\rho} \left[ \left( p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} - p_v \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3k} + p_v - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\eta\dot{R}}{R} - p_0 - p(t) \right] \quad (\text{A-1})$$

Para linealizar, se hace una expansión en serie tal que:

$$f(x) = f(0) + x f'(0) + x^2 \frac{f''(0)}{2} + \dots \quad (\text{A-2})$$

Si la función es:

$$\frac{1}{(1-x)^k} \approx 1 + kx \quad (\text{A-3})$$

Entonces para:

$$R = R_0 + R_\epsilon(t) \quad (\text{A-4})$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0 + R_\epsilon(t)} = \frac{1}{R_0 \left(1 + \frac{R_\epsilon(t)}{R_0}\right)} \quad (\text{A-5})$$

Si decimos que:  $R_\epsilon(t)/R_0$  es  $=x$ , entonces:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_0} \frac{1}{1+x} = \frac{1}{R_0} \frac{1}{1-(-x)} = \frac{1}{R_0} (1-x) \quad (\text{A-6})$$

También:

$$\frac{1}{R^k} = \frac{1}{R_0} (1-kx) \quad (\text{A-7})$$

Entonces:

$$\left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} - p_v\right) \left(\frac{R_0}{R}\right)^{3k} = \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} - p_v\right) \left(1 - 3k \frac{R_\epsilon}{R_0}\right) \quad (\text{A-8})$$

Ahora tenemos que en:

$$-\frac{2\sigma}{R} - \frac{4\eta\dot{R}}{R} = \frac{2\sigma + 4\eta\dot{R}}{R_0} \left(1 - \frac{R_\epsilon}{R_0}\right) \quad (\text{A-9})$$

La ecuación queda:

$$\rho R \ddot{R} + \rho \frac{3\dot{R}^2}{2} = \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} - p_v\right) \left(1 - 3k \frac{R_\epsilon}{R_0}\right) + p_v - \frac{2\sigma}{R} \left(1 - \frac{R_\epsilon}{R_0}\right) - \frac{4\eta\dot{R}}{R} \left(1 - \frac{R_\epsilon}{R_0}\right) - p_0 - p(t) \quad (\text{A-10})$$

Teniendo en cuenta que:  $\dot{R} = \dot{R}_\epsilon$  y que  $\ddot{R} = \ddot{R}_\epsilon$  se daría que:

$$\rho R_0 \ddot{R}_\epsilon + \rho \frac{3\dot{R}^2}{2} = \left( p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} - p_v \right) \left( -3k \frac{R_\epsilon}{R_0} \right) + p_v - \frac{2\sigma}{R_0^2} (-R_\epsilon) - \frac{4\eta\dot{R}}{R_0} \left( 1 - \frac{R_\epsilon}{R_0} \right) - p_0 - p(t) + cte \quad (\text{A-11})$$

Ahora se puede tener que  $\dot{R}R_\epsilon \approx 0$ , dependiendo de la frecuencia de oscilación. Además considerando a  $r$  como el radio de una esfera imaginaria de radio mayor a la burbuja, por donde se calcula el flujo de fluido circulante; tendríamos que:

$$4\pi R^2 \dot{R} = 4\pi r^2 \dot{r} \quad (\text{A-12})$$

Con lo anterior, la expresión A-11 quedaría:

$$\dot{R}^2 = \dot{R}r^2\dot{r}/R^2 \approx \dot{R}r^2\dot{r} \left( 1 - 2\frac{R_\epsilon}{R_0} \right) \quad (\text{A-13})$$

Así:

$$\rho \frac{3\dot{R}^2}{2} = \rho \frac{3r^2\dot{r}}{2R^2} \dot{R} = \rho \frac{3r^2\dot{r}}{2R_0^2} \left( 1 - 2\frac{R_\epsilon}{R_0} \right) \dot{R} \quad (\text{A-14})$$

$$\rho \frac{3\dot{R}^2}{2} = \rho \frac{3r^2\dot{r}}{2R^2} \dot{R} = \rho \frac{3r^2\dot{r}}{2R_0^2} \dot{R} = f(\dot{r})\dot{R} \quad (\text{A-15})$$

La ecuación total queda:

$$\rho R_0 \ddot{R}_\epsilon + b_{rad}(\dot{r})\dot{R} = \left( p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} - p_v \right) \left( -3k \frac{R_\epsilon}{R_0} \right) + p_v - \frac{2\sigma}{R_0^2} (-R_\epsilon) - \frac{4\eta\dot{R}}{R_0} \left( 1 - \frac{R_\epsilon}{R_0} \right) - p_0 - p(t) + cte \quad (\text{A-16})$$

Que es una expresión de la forma:

$$m_{RP}\ddot{R} + b\dot{R} + kR = p(t) \tag{A-17}$$

# Bibliografía

- [1] Pluke, “CPT-sound-physical-manifestation.svg,” p. 1, 2012. [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CPT-sound-physical-manifestation.svg>
- [2] D. Information, “LF353 Wide-Bandwidth JFET-Input Dual Operational Amplifier,” p. 22, 2016. [Online]. Available: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lf353.pdf?HQS=TI-null-null-alldatasheets-df-pf-SEP-wwe&ts=1651681582099&ref\\_url=https](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lf353.pdf?HQS=TI-null-null-alldatasheets-df-pf-SEP-wwe&ts=1651681582099&ref_url=https)
- [3] Julián Rolando Camargo L. César Andrey Perdomo C., *Introducción al PSoC5LP. Teoría y aplicaciones prácticas*, 1st ed. Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016.
- [4] L. J. B. Dale Ensminger, *Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications, Third Edition.*, 3rd ed., CRC Press, Ed., Sunnyvale CA, 2011.
- [5] F. Gueuning, M. Varlan, C. Eugene, and P. Dupuis, “Accurate distance measurement by an autonomous ultrasonic system combining time-of-flight and phase-shift methods,” *Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, vol. 1, pp. 399–404, 1996.
- [6] M. Parrilla, J. J. Anaya, and C. Fritsch, “Digital Signal Processing Techniques for High Accuracy Ultrasonic Range Measurements,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 40, no. 4, pp. 759–763, 1991.

- [7] L. J. Bond, W. F. Kepler, and D. M. Frangopol, “Improved assessment of mass concrete dams using acoustic travel time tomography. Part I - theory,” *Construction and Building Materials*, vol. 14, no. 3, pp. 133–146, 2000.
- [8] S. Lawson, “Ultrasonic Testing and Image Processing for in Progress Weld,” vol. 4, p. 2, 1996. [Online]. Available: [www.ndt.net/article/shaun/shaun.htm#brit](http://www.ndt.net/article/shaun/shaun.htm#brit)
- [9] W. Li and B. S. Hoyle, “Ultrasonic process tomography using multiple active sensors for maximum real-time performance,” *Chemical Engineering Science*, vol. 52, no. 13, pp. 2161–2170, 1997.
- [10] Y. Cheng, R. Mitra, and P. Hagan, “Development and Future Aspect of Acoustic Emission Data Processing Methods,” ... *on Acoustic Emission Testing & 7th ...*, no. September, pp. 12–15, 2012. [Online]. Available: [http://212.8.206.21/article/ewgae2012/content/papers/21\\_Cheng\\_Rev1.pdf](http://212.8.206.21/article/ewgae2012/content/papers/21_Cheng_Rev1.pdf)
- [11] D. G. Aggelis, “Wave propagation through engineering materials; Assessment and monitoring of structures through non-destructive techniques,” *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 46, no. 4, pp. 519–532, 2013.
- [12] C. Arcos and I. Idiem, “Informes de la Construcción Vol. 29, n<sup>o</sup> 286 Diciembre de 1976,” vol. 29, 1976.
- [13] E. W. Massey and R. E. Moon, “Neurology and diving,” in *Handbook of Clinical Neurology*. Elsevier B.V., 2014, vol. 120, pp. 959–969.
- [14] PADI AMERICAS INC, “Recreational Dive Planner,” p. 2, 2002. [Online]. Available: <https://www.a1scubadiving.com/wp-content/uploads/2018/06/PADI-Recreational-Dive-Table-Planner.pdf>
- [15] M. I. Haraguchi, H. Y. Kim, F. E. Sprenger, W. Aparecido, and P. Calvo, “Industrial

- equipment troubleshooting with imaging technique improved gamma-ray absorption scans,” *Journal of Physical Science and Application*, vol. 2, no. 9, pp. 359–371, 2012.
- [16] R. A. N. M.D., *Squire´s Fundamentals of Radiology*, 7th ed., Harvard University Press, Ed., Cambridge MA USA, 2018.
- [17] J. R. Roelandt, “Seeing the invisible: a short history of cardiac ultrasound.” *European journal of echocardiography : the journal of the Working Group on Echocardiography of the European Society of Cardiology*, vol. 1, no. 1, pp. 8–11, 2000.
- [18] K. A. Kaproth-Joslin, R. Nicola, and V. S. Dogra, “The history of US: From bats and boats to the bedside and beyond,” *Radiographics*, vol. 35, no. 3, pp. 960–970, 2015.
- [19] S. R. V. C. Faughn., *Fundamentos de Física*, 9th ed., C. Learning, Ed., Cruz Manca Santa Fe Mexico, 2012.
- [20] J. P. Baker, “The history of sonographers.” *Journal of ultrasound in medicine : official journal of the American Institute of Ultrasound in Medicine*, vol. 24, no. 1, pp. 1–14, 2005.
- [21] S. D. P. MARTÍNEZ RODRÍGUEZ, JAIRO ALEJANDRO; VITOLA OYAGA, JAIME; SANDOVAL CANTOR, “Disponibile en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=257021012001>,” 2007.
- [22] William F. Armstrong. Thomas Ryan., *Feigenbaum´s Echocardiography*, 8th ed., W. Kluwer, Ed., 2018.
- [23] M. GOFELD, “Advanced Ultrasound Imaging in Pain Medicine,” *Pain Medicine*, pp. 1–8, 2011. [Online]. Available: <https://dolor.org.co/biblioteca/articulos/Ultrasonido medicina dolor1.pdf>
- [24] A. Carovac, F. Smajlovic, and D. Junuzovic, “Application of Ultrasound in Medicine,” *Acta Informatica Medica*, vol. 19, no. 3, p. 168, 2011.

- [25] E. Ostrom, “No Title No Title,” *Journal of Chemical Information and Modeling*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2015.
- [26] D. F. L. R., “Simulacion y analisis del comportamiento de microburbujas empleadas como eco-potenciadores en la sangre.” Thesis, UAN, 2021.
- [27] L. Hoff, *Acoustic Characterization of Contrast Agents for Medical Ultrasound Imaging*, K. A. Publishers, Ed., Dordrecht Netherlands, 2001.
- [28] C. H. Leow, F. Iori, R. Corbett, N. Duncan, C. Caro, P. Vincent, and M. X. Tang, “Microbubble void imaging: A non-invasive technique for flow visualisation and quantification of mixing in large vessels using plane wave ultrasound and controlled microbubble contrast agent destruction,” *Ultrasound in Medicine and Biology*, vol. 41, no. 11, pp. 2926–2937, 2015.
- [29] H. Shekhar and J. J. Rychak, “Modifying the size distribution of microbubble contrast agents for high-frequency subharmonic imaging,” vol. 40, no. August, pp. 1–10, 2013.
- [30] E. Mohseni, R. Herrmann-Heber, S. F. Reinecke, and U. Hampel, “Bubble generation by micro-orifices with application on activated sludge wastewater treatment,” *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.04.011>
- [31] S. ruiz Andres, “Digital signal analysis for air bubbles detection on artificial thigh vessels,” p. 139, 2015.
- [32] R. Iwasaki, R. Nagaoka, S. Yoshizawa, and S. I. Umemura, “Selective detection of cavitation bubbles by triplet pulse sequence in high-intensity focused ultrasound treatment,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 57, no. 7, 2018.
- [33] Y. F. Y. Liu., “3-D Bubble Reconstruction Using Multiple Cameras and Space Carving Method,” *Measurement Science and Technology*, p. 27, 2018.

- [34] Z. Izadifar, P. Babyn, and D. Chapman, “Ultrasound Cavitation/Microbubble Detection and Medical Applications,” *Journal of Medical and Biological Engineering*, vol. 39, no. 3, pp. 259–276, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40846-018-0391-0>
- [35] W. N. McDicken and T. Anderson, *Basic physics of medical ultrasound*, third edit ed. Elsevier Ltd, 2011, vol. 1. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-7020-3131-1.00001-8>
- [36] J. David N. Cheeke, *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves.*, 1st ed. Montreal Canada: CRC Press, 2002.
- [37] Frederick W. Kremkau., *Sonography. Principles and Instruments.*, 9th ed. St Louis Missouri: Elsevier B.V., 2016.
- [38] Michiel Postema, *Fundamentals of Medical Ultrasonics*, 1st ed. CRC Press, 2011.
- [39] T.G. Leighton, *The Acoustic Bubble*, 1st ed. Oval Road. London. UK: Academic Press, 1997.
- [40] C. A. Chacón, J. D. Cortés, D. Giral A, and R. Romero Romero, “Piezoelectricidad en un BUZZER,” *Tecnura*, vol. 16, no. Especial, pp. 111–119, 2012. [Online]. Available: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/6818>
- [41] N. Castellanos, “Evaluación preliminar del uso del efecto piezoeléctrico para generación de energía,” *Inventum*, vol. 8, no. 15, pp. 35–40, 2013.
- [42] Henrich Kuttruff, *Ultrasonics Fundamental and Applications*, 1st ed. Essex England: Elsevier Ltd, 1991.
- [43] E. M. P. Charles A. Harper, *Plastics Materials and Processes: A Concise Encyclopedia*, 1st ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2003.

- [44] J. L. . Souto Iglesias, Antonio. Bravo Trinidad, *Curso Basico de Programación en Matlab.*, 2nd ed. Tebar, 2014.
- [45] E. C. D. Z. M. P. Cisneros., *Procesamiento digital de imágenes con MatLAB y SIMU-LINK*, 1st ed., A. G. Editor., Ed., Mexico DF., 2010.
- [46] Carela Pablo Andrés, “Tratamiento Digital de Imagenes en MATLAB para la Deteccion de Fallas,” Ph.D. dissertation, Universitat Politecnica de Catalunya BarcelonaTech, 2019. [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/330399/>
- [47] C. Solomon and T. Breckon, *FUNDAMENTALS OF DIGITAL IMAGE PROCESSING*, 1st ed. Garsington Road, Oxford.: John Wiley & Sons, Ltd, 2011. [Online]. Available: [http://share.its.ac.id/pluginfile.php/827/mod\\_resource/content/1/referensi](http://share.its.ac.id/pluginfile.php/827/mod_resource/content/1/referensi)
- [48] E. Ieno, L. M. Garcés, A. J. Cabrera, and T. C. Pimenta, “Simple generation of threshold for images binarization on FPGA,” *Ingenieria e Investigacion*, vol. 35, no. 3, pp. 69–75, 2015.
- [49] JOSÉ LEONARDO SIMANCAS GARCÍA, “FILTRADO ANALÓGICO EN INSTRUMENTACIÓN PARA ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES DE PULSOS EN PROCESOS INDUSTRIALES UTILIZANDO LA TÉCNICA POSICAST,” Magister, Universidad de La Costa, 2017.
- [50] M. S. Charles Alexander, “Fundamentals of Electric Circuits,” *McGraw-Hill*, 2004.
- [51] A. T. Pattnayak and G. Thanikachalam, “PSoC® 5LP: CY8C58LP Family.” [Online]. Available: <https://www.cypress.com/documentation/datasheets/psoc-5lp-cy8c58lp-family-datasheet-programmable-system-chip-psoc>