

ESTIMACIÓN DEL TAMAÑO Y LA VELOCIDAD DE  
MICROBURBUJAS EN SISTEMAS DE FLOTACIÓN POR  
AIRE DISUELTO, UTILIZANDO MICROFOTOGRAFÍA



Universidad  
del Cauca

Carlos Esteban Ordoñez Ramos  
María Gabriela Guerrero Guerrero

Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Programa de Ingeniería en Automática Industrial  
Popayán, Cauca  
2022

ESTIMACIÓN DEL TAMAÑO Y LA VELOCIDAD DE  
MICROBURBUJAS EN SISTEMAS DE FLOTACIÓN POR  
AIRE DISUELTO, UTILIZANDO MICROFOTOGRAFÍA



Universidad  
del Cauca

Monografía presentada como requisito parcial para optar por el título  
de ingeniero en Automática Industrial.

Carlos Esteban Ordoñez Ramos  
María Gabriela Guerrero Guerrero

Director: Juan Fernando Florez Marulanda.  
Codirector: Elena Muñoz España.

Universidad del Cauca  
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones  
Programa de Ingeniería en Automática Industrial

Popayán, Cauca

2022

## **AGRADECIMIENTOS**

En primera instancia agradecemos a nuestras familias por su gran sacrificio, esfuerzo, amor y apoyo que nos han brindado a lo largo de la vida, lo que nos ha permitido crecer profesionalmente.

Agradecemos a nuestros asesores de tesis la Mg. Juan Fernando Florez y Mg. Elena Muñoz por habernos dado la oportunidad de compartir su conocimiento, guiarnos y apoyarnos siempre con buena actitud y disposición en la realización de este trabajo de grado.

Nuestro agradecimiento también va dirigido a Juan Sebastian Samboni y a las distintas personas que nos ayudaron en la realización del proyecto.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Estado del arte . . . . .	2
1.3. Objetivos . . . . .	4
1.3.1. Objetivo general . . . . .	4
1.3.2. Objetivos específicos . . . . .	4
1.4. Estructura del documento . . . . .	4
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>5</b>
2.1. Sistema de flotación por aire disuelto . . . . .	5
2.1.1. Definición . . . . .	5
2.1.2. Microburbujas . . . . .	7
2.1.3. Características de las Microburbujas . . . . .	7
2.1.4. Métodos de generación de micorburbujas . . . . .	8
2.1.5. Métodos de medición de microburbujas . . . . .	9
2.1.6. Captura y remoción de residuos . . . . .	10
2.1.7. Planta DAF Laboratorio Universidad del Cauca . . . . .	12
2.2. Sistema de visión de máquina . . . . .	14
2.2.1. Visión de máquina . . . . .	14
2.2.2. Sistema de iluminación . . . . .	15
2.2.3. Mecanismos ópticos . . . . .	17
2.2.4. Sensores digitales . . . . .	18
2.3. Algoritmo de procesamiento . . . . .	18
2.3.1. Calibración de cámara . . . . .	18
2.3.2. Error de re-proyección . . . . .	20
2.3.3. OpenCV . . . . .	20
2.3.4. Filtros . . . . .	21
2.3.5. Cálculo de trayectoria de las Microburbujas . . . . .	23
2.3.6. Valor de similitud . . . . .	24
2.3.7. Cálculo de velocidad de Microburbujas . . . . .	24
<b>3. Diseño</b>	<b>26</b>
3.1. Diseño Hardware . . . . .	26
3.1.1. Sistema de Microfotografía . . . . .	26
3.1.2. Configuración de la cámara . . . . .	28
3.2. Diseño Software . . . . .	29

3.2.1.	Preparación de calibración de cámara . . . . .	29
3.2.2.	Preparación para relación pixel a milímetro . . . . .	31
3.2.3.	Algoritmo . . . . .	32
<b>4.</b>	<b>Implementación</b>	<b>36</b>
4.1.	Configuración planta DAF y entorno . . . . .	36
4.2.	Calibración de cámara . . . . .	37
4.3.	Implementar Relación Px/mm . . . . .	39
4.4.	Algoritmo de Caracterización de MB . . . . .	40
4.4.1.	Pre-procesamiento de vídeo . . . . .	40
4.4.2.	Eliminación de ruido . . . . .	41
4.4.3.	Detección de microburbujas . . . . .	42
4.4.4.	Cálculo de trayectorias . . . . .	42
4.4.5.	Cálculo de diámetro y velocidad . . . . .	44
4.5.	Prueba sistema de microfotografía . . . . .	45
4.6.	Prueba planta DAF . . . . .	46
4.7.	Prueba de escritorio algoritmo de caracterización . . . . .	47
4.8.	Interfaz de Usuario . . . . .	64
4.8.1.	Menú . . . . .	65
4.8.2.	Procesamiento . . . . .	65
4.8.3.	Histograma Diámetro . . . . .	66
4.8.4.	Histograma Velocidad . . . . .	67
4.8.5.	Acerca De . . . . .	68
<b>5.</b>	<b>Resultados</b>	<b>70</b>
5.1.	Diseño Experimental . . . . .	70
5.2.	Sistema de microfotografía . . . . .	71
5.2.1.	Prueba anova diámetro . . . . .	80
5.2.2.	Prueba anova velocidad . . . . .	82
5.3.	Prueba Interfaz . . . . .	83
5.3.1.	Preguntas usabilidad . . . . .	85
5.3.2.	Preguntas interfaz . . . . .	86
5.3.3.	Preguntas por sección . . . . .	87
<b>6.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>90</b>
<b>7.</b>	<b>Anexos</b>	<b>92</b>

# Índice de figuras

2.1. Diagrama de bloques sistema DAF . . . . .	6
2.2. sistema DAF . . . . .	6
2.3. Generación de micorbubujas tubería con cuerpo esférico . . . . .	8
2.4. Generación de micorbubujas con tubo Venturi . . . . .	9
2.5. Generación de microbubujas por disolución de aire . . . . .	9
2.6. Medición mediante el uso de columnas independientes al proceso . . . . .	10
2.7. Medición directa en el tanque principal del proceso . . . . .	10
2.8. Diagrama de proceso de flotación . . . . .	11
2.9. Diagrama de las secciones tanque DAF . . . . .	12
2.10. Diagrama Planta DAF Unicauca . . . . .	13
2.11. Secciones planta DAF Unicauca . . . . .	14
2.12. Planta DAF Unicauca . . . . .	14
2.13. Iluminación de fondo . . . . .	16
2.14. Iluminación de axial . . . . .	16
2.15. Iluminación estructurada . . . . .	16
2.16. Iluminación de campo oscuro . . . . .	17
2.17. Iluminación de campo brillante . . . . .	17
2.18. Iluminación de domo difusa . . . . .	17
2.19. Modelo de circunferencia . . . . .	23
2.20. Trayectoria de Microbubujas . . . . .	24
3.1. Soporte para teléfono móvil . . . . .	27
3.2. Lámpara de 12 W . . . . .	27
3.3. Lente para teléfono inteligente . . . . .	28
3.4. Teléfono inteligente . . . . .	28
3.5. Distribución de los componentes de microfotografía en el sistema DAF . . . . .	28
3.6. Diagrama de flujo toma de vídeos . . . . .	29
3.7. Diagrama de flujo calibración de cámara . . . . .	30
3.8. Tablero de ajedrez calibración de parámetros de la cámara . . . . .	30
3.9. Diagrama de flujo obtención de información para calibración de cámara . . . . .	31
3.10. Tablero con nailon para calibración relación pixel/mm . . . . .	32
3.11. Diagrama de flujo relación px/mm . . . . .	33
3.12. Diagrama algoritmo . . . . .	34
4.1. Impresión tubo Venturi . . . . .	36
4.2. Tubo Venturi . . . . .	37
4.3. Purga motobomba . . . . .	37

4.4.	Diagrama de flujo implementación calibración de cámara . . . . .	38
4.5.	Imágenes perforaciones con nailon . . . . .	39
4.6.	Proceso relación pixel a mm . . . . .	41
4.7.	Diagrama de flujo preparación de vídeo para procesamiento . . . . .	42
4.8.	Diagrama de flujo procesamiento de vídeo . . . . .	43
4.9.	Diagrama de flujo detección de MB . . . . .	44
4.10.	Diagrama de flujo seguimiento de MB . . . . .	45
4.11.	Diagrama de flujo caracterización de MB . . . . .	46
4.12.	Frame tomado en cámara lenta . . . . .	48
4.13.	Validación diámetro . . . . .	49
4.14.	Prueba de escritorio . . . . .	64
4.15.	Interfaz menu . . . . .	66
4.16.	Interfaz procesamiento . . . . .	66
4.17.	Histograma diámetro . . . . .	67
4.18.	Histograma velocidad . . . . .	68
4.19.	Interfaz Acerca De . . . . .	69
5.1.	Presiones a usar . . . . .	71
5.2.	Caudal de recirculación . . . . .	71
5.3.	Inyección de aire . . . . .	72
5.4.	Dispersión de datos respecto al diámetro en ambas pruebas . . . . .	78
5.5.	Gráfico de caja y bigotes 34 psi L1. . . . .	78
5.6.	Gráfico de caja y bigotes 34 psi L2. . . . .	79
5.7.	Gráfico de caja y bigotes 36 psi L1. . . . .	79
5.8.	Gráfico de caja y bigotes 36 psi L2. . . . .	80
5.9.	Dispersión de datos respecto a la velocidad en ambas pruebas . . . . .	80
5.10.	Trayectoria del desplazamiento de las microburbujas . . . . .	81
5.11.	Gráfico tendencia diámetros . . . . .	82
5.12.	Gráfico tendencia diámetros . . . . .	84
5.13.	Pregunta sobre facilidad de uso . . . . .	85
5.14.	Pregunta sobre facilidad de navegación . . . . .	86
5.15.	Pregunta sobre la experiencia usando la app . . . . .	86
5.16.	Pregunta sobre colores e información . . . . .	87
5.17.	Pregunta proporción de información . . . . .	87
5.18.	Pregunta indicaciones de ingreso a ventanas . . . . .	88
5.19.	Pregunta sobre dificultad de lectura de textos . . . . .	89
5.20.	Pregunta de opinión sobre la organización de la información . . . . .	89

# Índice de cuadros

4.1. Datos relación pixels a milímetros . . . . .	40
4.2. Datos Primer vídeo . . . . .	50
4.3. Datos segundo vídeo . . . . .	53
4.4. Datos tercer vídeo . . . . .	55
4.5. Datos Cuarto vídeo . . . . .	56
4.6. Datos quinto vídeo . . . . .	58
4.7. Datos sexto vídeo . . . . .	59
4.8. Datos séptimo vídeo . . . . .	61
4.9. Datos octavo vídeo . . . . .	63
5.1. Tabla Diseño experimental . . . . .	70
5.2. Resultados primer video lote 1 34 psi . . . . .	73
5.3. Resultados diámetro primer lote 34 psi . . . . .	73
5.4. Resultados velocidad primer lote 34 psi . . . . .	74
5.5. Resultados diámetro primer lote 36 psi . . . . .	74
5.6. Resultados velocidad primer lote 36 psi . . . . .	75
5.7. Resultados diámetro segundo lote 34 psi . . . . .	75
5.8. Resultados velocidad segundo lote 34 psi . . . . .	76
5.9. Resultados diámetro segundo lote 36 psi . . . . .	76
5.10. Resultados velocidad segundo lote 36 psi . . . . .	77
5.11. Resumen datos diámetros . . . . .	81
5.12. Análisis de varianza diámetros . . . . .	82
5.13. Resumen datos velocidad . . . . .	83
5.14. Análisis de varianza velocidad . . . . .	83
5.15. Datos teléfonos probados . . . . .	84



# Capítulo 1

## Introducción

En este capítulo se presentan los antecedentes de las técnicas de visión artificial utilizadas para determinar el tamaño y velocidad de microburbujas. En la sección 1.1 se describe la importancia de determinar el tamaño y velocidad de microburbujas. En la sección 1.2 se presentan los diferentes trabajos realizados en medición de tamaño y velocidad. En la sección 1.3 se exponen los objetivos específicos. Finalmente, en la sección 1.4 se establece la estructura del documento.

### 1.1. Motivación

Las microburbujas son utilizadas en procesos industriales, que hacen uso de flotación por aire disuelto (DAF) [1], para la clarificación de aguas y eliminación de residuos. Dentro de estos procesos la caracterización de las burbujas juega un papel importante, tanto en el rendimiento [2] [3] [4], como en la eficiencia de la limpieza de aguas [5] [6]. El tamaño de las microburbujas puede verse afectado en el ascenso de la misma debido a la coalescencia con otras burbujas [6], el diámetro de la burbuja afecta la capacidad para eliminar partículas [5], las burbujas de mayor tamaño suben con una velocidad superior capturando partículas más grandes, mientras que las pequeñas tiene una velocidad de ascenso más baja y recolectan partículas de menor dimensión [5] [7], es por ello que es importante caracterizar las burbujas o microburbujas en cada proceso [5] [8].

Idealmente, la caracterización de microburbujas debe presentar una mínima interferencia en el comportamiento dinámico de estas, ya sea en su tamaño o en su velocidad de ascenso [2]. El análisis de microburbujas debe poseer las características necesarias para lograr una operación en línea bajo condiciones variables en su entorno de operación, las variables dinámicas de las burbujas requieren ser analizadas de forma precisa [9], sin comprometer el proceso DAF a adaptaciones complejas y que pueda ser utilizado en distintas plantas que usen flotación por aire disuelto con aguas a tratar.

Es fácil captar una burbuja ascendente y determinar sus características dinámicas, pero al analizar cúmulos de microburbujas en diferentes condiciones del fluido a tratar, se hace necesario la adaptación de sensores y dispositivos para lograr esta tarea [7]. Existen diferentes métodos para la caracterización de microburbujas, como: análisis de imagen [10], microfotografía [5], acústico [11], velocimetría de

partículas [12], difracción láser [4], desacople de gases [9], aunque en su mayoría presentan buenos resultados en la caracterización [2] [3] [13], gran parte de la implementación de estos métodos incurre en tecnologías o adaptaciones complejas y costosas, las cuales generalmente utilizan columnas, tubos o celdas paralelas al proceso [4] [10] [14], [1], [15], estas causan que las microburbujas sean más sensibles a los ajustes de los instrumentos [15], lo que complica el buen análisis de las microburbujas.

Los avances en teléfonos inteligentes, en especial la capacidad de grabar vídeo en cámara lenta, alta resolución de imagen, la diversidad de aditamentos para captura de imágenes, los hace atractivos para su uso en aplicaciones de microfotografía. En particular, porque es un dispositivo que necesita pocos recursos para esta tarea, presenta una flexibilidad en su uso dentro y fuera del laboratorio [16]. Este proyecto busca diseñar e implementar un sistema de microfotografía que use un teléfono inteligente con buenas características de toma de imágenes para determinar el tamaño y velocidad de microburbujas, sin usar columna de flotación independiente, directamente en el prototipo de la planta de DAF instalado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Cauca.

## 1.2. Estado del arte

La extracción de documentos se realizó de bases de datos online como: IEEE, Scielo, ScienceDirect, Taylor and Francis, Microsoft Academic y el motor de búsqueda Google Scholar. Las preguntas planteadas como tema objeto de investigación fueron: ¿Qué métodos se emplean para realizar la caracterización de microburbujas? ¿Características de los sistemas de procesamiento de imagen en DAF? ¿Cuáles son los rangos obtenidos mediante análisis de fotografía y microfotografía?; mediante palabras claves como: *microbubbles size*, *high speed*, *high speed photography*, *velocity of microbubbles*, *microbubbles rise velocity*, siempre acompañado de la palabra *flotation*. Se realizó la revisión bibliográfica de 256 artículos, de los cuales se eligieron 21 por su relación con el tema y por su especificación de métodos.

La caracterización de microburbujas implica adaptaciones del proceso, a manera general, la más utilizada es columnas, tubos o celdas de muestreo acopladas paralelamente al proceso de flotación [4], [10], [14], [1], [15], una adaptación similar a la anterior consiste en cámaras o visores de microburbujas, que son más pequeños y se pueden ubicar en cualquier parte del proceso [17], [18], [19], además los visores tienen un segmento inclinado que facilita la medición de trayectorias [18], [19].

Cada método de caracterización comprende el uso de distintos elementos o dispositivos ajenos al modelo base de un proceso de flotación por aire, estos métodos son: contador de partículas, análisis acústico, PIV (velocimetría de partículas), difracción láser, desacople de gases, análisis de imagen, microfotografía; pero se hace énfasis en los métodos de PIV, análisis de imagen y microfotografía por su relación con el tema de investigación.

La velocimetría de partículas utiliza la dispersión de un rayo láser, con ayuda de un lente, crea una fina lámina de luz, la cual interactúa con las partículas de fluido. Se analizan las imágenes capturadas con un tipo de cámara especial como

CCD o CMOS para determinar el tamaño y velocidad de las microburbujas [20], la eficiencia de este método depende de la cámara y láser a utilizar, con cámara CCD (ImagePro X2M, 1600x1200 px<sup>2</sup> ) con láser de doble pulso YAG Dantec, se obtuvo rangos de tamaño entre 20 a 50  $\mu\text{m}$  y velocidad de 0 a 0.07 mm/s [13], con cámara CCD monocromática Speed sense 1040, con láser de doble pulso Dual Power 20015 se registraron burbujas de 0 a 75 mm/seg de velocidad [6], el método presentó resultados favorables, no obstante, la superposición de las burbujas genera tamaños erróneos [6].

Análisis de imágenes, consiste en la utilización de algoritmos para el procesamiento de capturas de imágenes o vídeos. Estos hacen uso de distintos filtros de binarización, como el método de Otsu, excentricidad e intensidad mínima, junto con otros filtros facilitan la identificación y medición del tamaño de las burbujas [10] [17] [6] [2]. Las velocidades de ascenso de las burbujas se calculan mediante un análisis cuadro por cuadro de imágenes sucesivas, con respecto a la velocidad de captura de la cámara y la distancia recorrida por la burbuja [3] [6].

En análisis de imagen influyen en gran manera las características de la cámara, la calidad en la toma del material multimedia, algunos elementos adicionales como lentes y fuentes de iluminación y el algoritmo implementado para el análisis. Por ejemplo, con una cámara Thorlabs DCU224C con lente Navitar 12 zoom se obtuvieron rangos de tamaño entre 20 a 150  $\mu\text{m}$  [10], utilizando la cámara de vídeo digital Canon GL2 resolución 16 pxl/mm o cámara digital Canon EOS 60D resolución de 150 pxl / mm, se registraron burbujas de 0.5 a 2500  $\mu\text{m}$  [17], con la cámara de alta velocidad iSPEED 3, registra rangos de 100 a 380  $\mu\text{m}$  [1], 462 a 511  $\mu\text{m}$  [19], haciendo uso de cámaras de alta velocidad como la PCO DIMAX S se registraron velocidades de ascenso en las microburbujas de 0.5 a 10 mm/s [21] y con la cámara Phantom v7.3 velocidades de 0.2 a 0.5 mm/s [11].

Al momento de obtener un mejor resultado para identificar y registrar las microburbujas, en el procesamiento de imágenes se utiliza la microfotografía, en la cual se acoplan microscopios o lentes macro a las cámaras, mejorando la calidad de la información capturada del objeto de interés. Con la adaptación del microscopio digital Celestron MicroDirect 1080p HD se midió diámetros de 0 a 100  $\mu\text{m}$  [5], con estereomicroscopio, modelo SZM1000, se capturaron imágenes de 330 a 2107  $\mu\text{m}$  [4].

En términos comparativos el método de análisis de imágenes es un 15 % más preciso que el método de contador de partículas, [9] y un 30 % más preciso que el de desacople de gases [9]. Aunque este método presenta desafíos en la medición, como la superposición de las burbujas, condiciones óptimas de iluminación y el ruido en las imágenes [10] [21].

Los métodos reportados para caracterización de microburbujas utilizan dispositivos de captura de imágenes de altas prestaciones y elevado costo. Adicionalmente, se debe garantizar condiciones óptimas de iluminación, y para facilitar la medición, se utiliza una columna de flotación independiente modificando el flujo del proceso. Hasta la fecha, en la revisión realizada, no se han encontrado reportes de investigaciones que hagan uso de dispositivos móviles inteligentes como una solución o alternativa para la caracterización de microburbujas en sistemas de flotación por aire disuelto.

## 1.3. Objetivos

### 1.3.1. Objetivo general

Proponer un sistema de caracterización de microburbujas para determinar el tamaño y la velocidad, basado en microfotografía soportado en un dispositivo móvil, sobre el prototipo de la planta de flotación por aire disuelto de la Universidad del Cauca.

### 1.3.2. Objetivos específicos

- Implementar un sistema de iluminación y captura de microfotografía para un tamaño de imagen de  $1\text{ cm}^2$  instalado en el área de contacto del prototipo de la planta de flotación por aire disuelto.
- Desarrollar un algoritmo que permita la caracterización de microburbujas en agua para tamaños de  $150 - 200\ \mu\text{m}$  y velocidades de ascenso de  $0 - 10\text{ mm/s}$  con un dispositivo móvil.
- Concebir una interfaz de usuario que visualice diámetro y velocidad de las microburbujas y realice un histórico de los promedios obtenidos en cada prueba.

## 1.4. Estructura del documento

La presente monografía está organizada en 8 capítulos, el capítulo 2, Marco Teórico, se da a conocer sobre el sistema de flotación por aire disuelto, definición, componentes, principales características e implementación en la Universidad del Cauca, al igual que se da una explicación sobre visión de máquina y sus componentes, por último se expone el algoritmo, los filtros principales, y cálculos de mayor impacto; en el capítulo tres Diseño, se expone sobre el Diseño hardware y software, el primero está relacionado con el sistema de microfotografía, los componentes y composición, así mismo como de la configuración de la cámara, el segundo habla sobre calibración de cámara, relación pixel a mm y el desarrollo del algoritmo; en el capítulo cuatro Implementación, se da a conocer la configuración de la planta DAF, configuraciones de la misma y del entorno, los resultados del proceso de calibración de cámara y relación pixel a mm, al igual que las pruebas del sistema de microfotografía, la planta DAF y el algoritmo, y por último describe la interfaz de usuario, finalmente se encuentran dos capítulos, en uno están los resultados donde se expone el diseño experimental y el desempeño tanto del sistema de microfotografía como de la interfaz y en el otro las conclusiones del proyecto.

# Capítulo 2

## Marco Teórico

Este capítulo se divide en tres grandes partes: en la sección 2.1, se describe en detalle lo que es un sistema de flotación por aire disuelto, que son las microburbujas, sus características y métodos de generación, el proceso para realizar la captura y remoción de residuos y se expone la planta DAF del laboratorio; en la sección 2.2, se describe los factores relevantes en un sistema de visión de máquina, su definición y componentes; en la sección 2.3 se habla sobre los componentes del algoritmo, en orden de relevancia, se da una breve descripción sobre el proceso de calibración de cámara, la librería utilizada para realizar el procesamiento de imágenes, los filtros más relevantes, el proceso para realizar el cálculo de distancia, velocidad y el valor de similitud.

### 2.1. Sistema de flotación por aire disuelto

#### 2.1.1. Definición

La flotación por aire disuelto o DAF es un método que ha sido utilizado ampliamente alrededor del mundo desde hace varios años, en Finlandia, Suecia, Noruega, para 1960, se tenía plantas de tratamiento de aguas que utilizaban DAF [22], para 1968 en Windhoek (Namibia), se construyó una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), en la cual se reutilizaba el agua a través de este sistema [22], en 1979, en los países bajos se encuentran registros de la utilización de este método para eliminación de algas en el agua [23], en 1980, Sudáfrica tenía la primer planta de DAF terminada, enfocada en tratamiento de efluentes de aguas residuales y para el espesamiento [22] y en Gran Bretaña se descubrió la eficiencia de DAF para tratar aguas de baja turbidez, que presentan color natural o cargas de algas [22]. Con el desarrollo tecnológico este método ha evolucionado logrando grandes reconocimientos en su utilización para clarificación de agua, así como adaptaciones para mejorar la eficiencia del mismo.

DAF es un método también utilizado en limpieza de aguas residuales [22] [24], basado en la generación de burbujas producto de la disolución del aire en el agua a una alta presión [25] [26]; pero los avances que se han desarrollado sobre este método, han hecho que tenga varios campos de aplicación, como lo es en la industria láctea, mataderos y avícola, por el alto contenido de químicos y metales pesados de las

aguas [27], en la minería y metalurgia [28] [29], recuperación y eliminación de aceite y grasa [30], eliminación de petróleo [31], fabricación de papel [32] y eliminación de algas [32].

En la figura 2.1, se observa el diagrama de bloques del sistema DAF, en donde se tiene como entrada el líquido a tratar y las microburbujas (MB), las cuales actúan como agentes de transporte para llevar a la parte superior el elemento a remover y dejar el líquido limpio en la parte inferior, en la salida del sistema se tiene, el líquido ya procesado, el cuál se utiliza generalmente para retroalimentar el generador de burbujas, y el elemento a remover que es desechado.

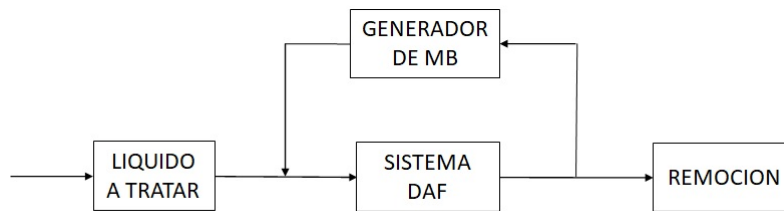


Figura 2.1: Diagrama de bloques sistema DAF

**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 2.2, se puede observar una configuración típica de los sistemas DAF, su funcionamiento es el mismo que para el diagrama de bloques, pero se hace una separación en dos fases, el método de generación de burbujas, que se representa como el saturador, el cual es retroalimentado con el agua tratada y el método de captura y remoción de residuos, que sucede sobre el tanque principal de DAF, normalmente este tanque tiene diferentes divisiones para el cumplimiento de remoción e investigación.

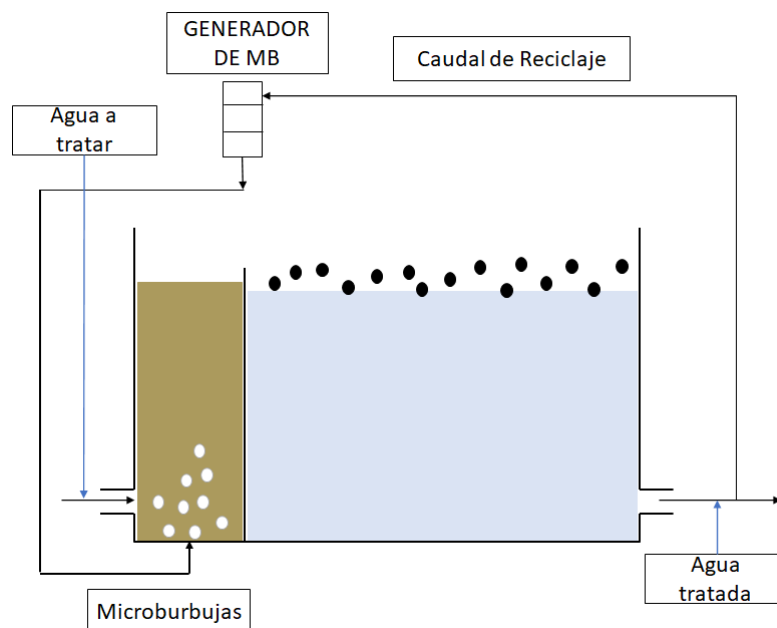


Figura 2.2: sistema DAF

**Fuente:** Elaboración propia

### 2.1.2. Microburbujas

El uso de microburbujas ha ganado un interés significativo en muchas aplicaciones domésticas e industriales debido a la estabilidad de las burbujas en solución, al aumento del área de transferencia de masa, mayor retención de gas y una velocidad de subida lenta. No obstante, estas propiedades son afectadas por el tamaño de las burbujas [10] [33]; las burbujas grandes tienden a poseer velocidades de ascenso altas, pero al ser más grandes su capacidad de colisionar con otras partículas presentes en el agua disminuye considerablemente, por el contrario las microburbujas presentan un comportamiento distinto, estas al ascender van disminuyendo su tamaño hasta que estallan [34] y debido a la alta densidad de burbujas, la gran superficie y el largo tiempo de residencia brindan un contacto efectivo entre las burbujas y las partículas en el líquido circundante y menor tendencia a desprenderse de las partículas debido a que presentan menor inercia [10].

### 2.1.3. Características de las Microburbujas

#### Tamaño

A pesar de la existencia de múltiples investigaciones en la literatura, existe una gran discusión sobre un rango en concreto que categorice una burbuja como microburbuja, ya que esta definición varía según su aplicabilidad, se concluye en que 0-200 $\mu\text{m}$  es el rango de tamaño más encontrado [24] [14] [13]. La distribución del tamaño de las microburbujas es el factor más importante para determinar propiedades como: velocidad de ascenso, retención de partículas y área interfacial gas-líquido [33]. Por su parte el tamaño se ve influenciado por el medio de generación de microburbujas [33].

#### Velocidad

Dado a que las microburbujas tienen un comportamiento similar a las burbujas esféricas, el aumento de velocidad se ve influenciado con el aumento del diámetro, ya que la fuerza de flotabilidad aumenta en relación con otras fuerzas que actúan en las burbujas [35], además, factores relacionados con la velocidad como la viscosidad, temperatura, entre otros, también afectan de manera significativa este parámetro [6] [36], debido a esta dependencia, la velocidad es un factor complicado de variar por si sola.

La velocidad de ascenso es un factor clave que influye en la colisión y unión de las microburbujas con partículas sólidas, por ende, este parámetro tiene gran relevancia en el proceso de limpieza del sistema DAF [37]. Por lo tanto, la velocidad de ascenso no debe ser demasiado alta, ya que producirá una gran turbulencia, rompiendo las microburbujas y floculos; por el contrario, si la velocidad de ascenso es muy baja las burbujas no logran colisionar con las partículas. Sin embargo, aún no se presenta en la literatura un análisis exhaustivo el cual determine una velocidad óptima de ascenso para el proceso de flotación por aire.

### 2.1.4. Métodos de generación de micorburbujas

La formación de burbujas es un fenómeno relacionado con la disminución de presión por debajo de un valor crítico [38], generalmente está dada por el proceso de ruptura y fusión dentro del cual se desarrolla el proceso de cavitación, definida como la formación, crecimiento y ruptura de las burbujas [24].

Hay dos formas para reducir la presión, por depósito de energía, los cuales emplean factores que son fácilmente replicables por la naturaleza, [38], como lo es el óptico, a través de fotones de luz láser, o por partículas, como lo son los protones de las cámaras de burbujas [38], claro está que no son los únicos métodos disponibles pero sí los más usados; la otra forma es a través de tensión superficial, como lo es con cavitación acústica, el cual hace uso de campos con ondas sonoras [38], y cavitación hidrodinámica, consiste en variar la presión a través del flujo del fluido causado por la variación de velocidad del mismo [38].

De los métodos mencionados anteriormente, se destacan los métodos de tensión, debido a que se pueden controlar a través de condiciones geométricas y parámetros operacionales (velocidad, cantidad de flujo, entre otros), además de que son fácilmente operables y escalables [38], pero en especial el de cavitación hidrodinámica ya que hace uso de equipos simples y de bajo costo de mantenimiento, además son energéticamente más eficientes por lo que es ampliamente utilizada [38].

Para aplicar cavitación hidrodinámica, se puede emplear diferentes técnicas como:

- **TUBERÍA CON CUERPO ESFÉRICO.** En el núcleo de la tubería se encuentra un cuerpo esférico, el cual afecta la velocidad del líquido circundante en región aguas abajo como se muestra en la figura 2.3, siendo mucho mayor a la de entrada generando una caída de presión, también cuenta con unos pequeños agujeros, estos se encuentran en la pared de la tubería en la cual cae menor presión, cuando la presión está por debajo de la presión atmosférica, se provoca una aspiración automática del aire [39] y al ser un flujo altamente turbulento, el aire aspirado se ve reflejado como un gran número de micorburbujas. Esta tubería tiene una gran facilidad de fabricación y perforación del tubo [39], para controlar el número de micro burbujas generadas [1] [19].

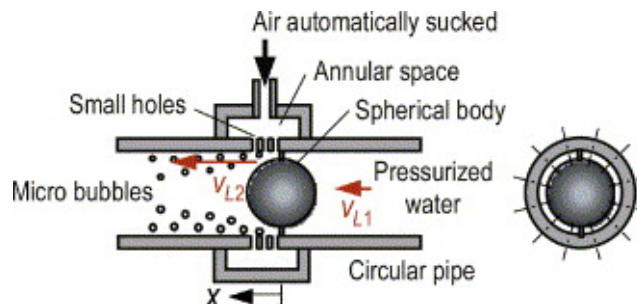


Figura 2.3: Generación de micorburbujas tubería con cuerpo esférico

Tomado: [39]

- **TUBO VENTURI.** Bernoulli establece una ley en la cual se relaciona la velocidad, la presión, el área y otros factores, en dos puntos a través de un tubo



como el que se muestra en la figura 2.4. El diferencial de presión generado por los extremos del tubo Venturi ocasiona un aumento de velocidad en el fluido y la drástica caída de presión en la parte más estrecha del mismo, que al combinarse con el gas auto aspirado desde el exterior disminuye el tamaño de las burbujas, generando microburbujas [40].

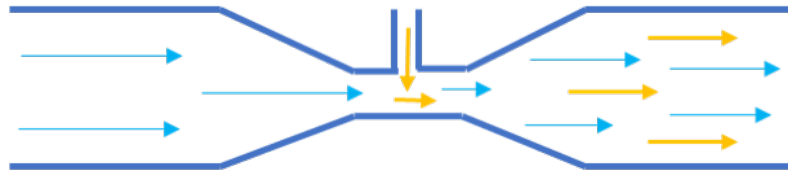


Figura 2.4: Generación de micorburbujas con tubo Venturi  
**Fuente:** Elaboración propia

- **DISOLUCIÓN PRESURIZADA.** Se utiliza un tanque de disolución, al cual le llega aire, que es mezclado con agua a través de la interfaz aire-agua, para controlar la tasa de transferencia como se muestra en la figura 2.5, la cual es afectada por el área interfacial gas-líquido, el agua disuelta pasa a través de una boquilla, esta genera una despresurización, que a su vez genera las microburbujas, [41] [11] [9].

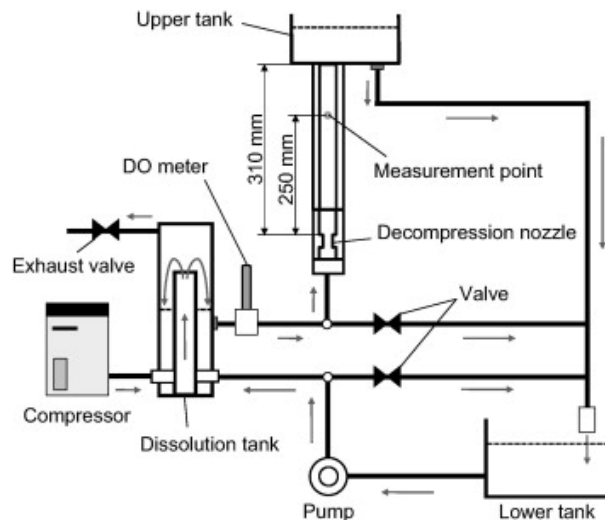


Figura 2.5: Generación de microburbujas por disolución de aire  
**Tomado:** [41]

### 2.1.5. Métodos de medición de microburbujas

Para la observación y el estudio de burbujas se han utilizado formas de medición independientes e integradas al tanque de DAF: la primera consiste en desviar parte del flujo de burbujas hacia una columna, tubo o celdas de muestreo, lo que significa que se deben adaptar paralelamente al proceso. [10] [14] [17] [3] [42] [9] [1] [4], con esta forma de análisis se puede emplear los métodos como: velocimetría de partículas, difracción láser, desacople de gases; en la figura 2.6 se observa un ejemplo con el

método de fotografía, se hace uso de una columna de flotación, fuera del sistema DAF, para la toma de imágenes y el posterior procesamiento.

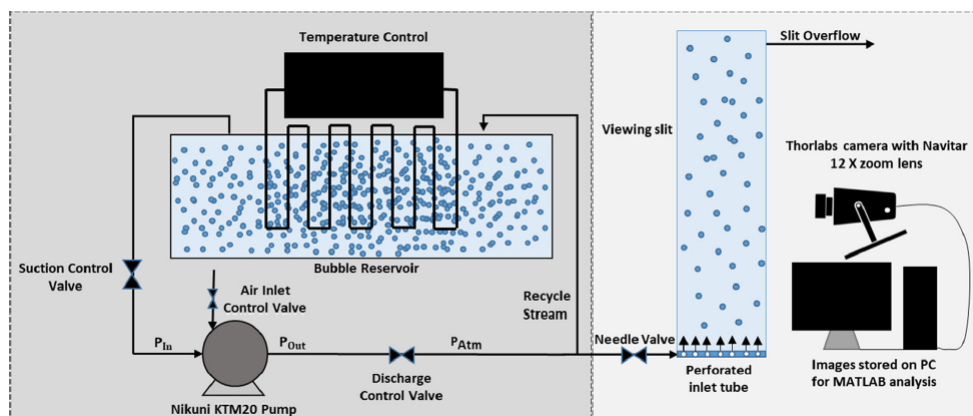


Figura 2.6: Medición mediante el uso de columnas independientes al proceso  
**Tomado:** [10]

La segunda forma comprende una medición directamente en el tanque principal, esta forma presenta algunas ventajas en cuanto a que no se deben adaptar secciones de muestreo al proceso disminuyendo costos y garantizando que la medición sea consistente con las burbujas directamente generadas [15] [6] [7] [2], se puede utilizar con los siguientes métodos: análisis de imagen, microfotografía, acústico, velocimetría de partículas, difracción láser; en la figura 2.7 se observa una ejemplificación de su uso, con el método de fotografía, en donde la cámara es ubicada sobre el tanque central de DAF, para que capture las microburbujas, y después realizar el procesamiento.

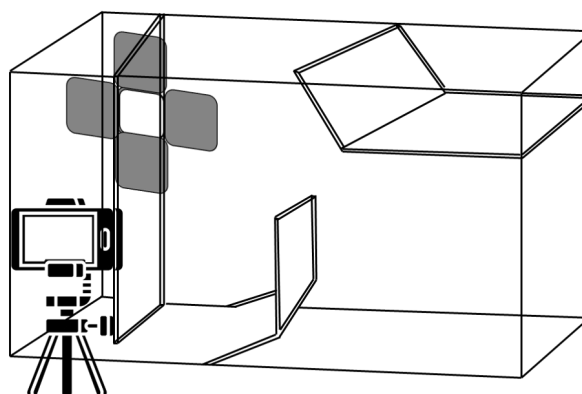


Figura 2.7: Medición directa en el tanque principal del proceso  
**Fuente:** Elaboración propia

### 2.1.6. Captura y remoción de residuos

En el tanque de DAF, se realizan dos procesos, flotación y eliminación de residuos, la primera consiste en la interacción que tienen la MB, con el líquido y las sustancias que el contiene, la segunda es el proceso continuo a la flotación, consiste en la

remoción de los elementos que habían contaminado el agua, que ahora se encuentran en la superficie.

## Flotación

La RAE define la palabra flotación como: “proceso para concentrar y separar sólidos de granulometría fina que presentan distintas propiedades superficiales, generalmente mezclas de minerales y ganga. Se hace por medio de espumas que retienen los materiales no mojados por el agua.” [43].

Como se muestra en la figura 2.8, la flotación con gas, actúa sobre la ley de Stokes modificando dos variables: densidad y diámetro de la partícula [44], es decir cuando las MB se adhieren y chocan con las partículas, se disminuye la densidad del aglomerado y se aumenta el diámetro efectivo [44]; como resultado de este proceso la partícula asciende a la superficie del fluido.

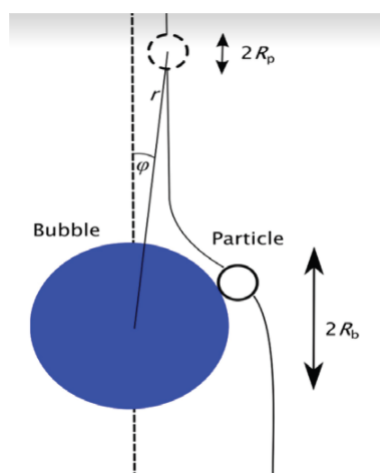


Figura 2.8: Diagrama de proceso de flotación

**Fuente:** Elaboración propia

En este proceso se observa una transferencia de masa “gas-líquido”, el cual aumenta el área interfacial [44], la cual está definida como: la superficie de todas las burbujas presentes en una unidad de volumen de dispersión gas-líquido y se constituye a su vez, de la fracción de gas retenido y del diámetro promedio de la burbuja [45].

## Eliminación de partículas

Para realizar el proceso de eliminación, se tiene en cuenta varios pasos [46] [47]:

- Distribución de burbujas en el agua a tratar.
- Colisión entre burbujas y partículas en el agua.
- Contacto interfacial burbuja/partícula.
- Arrastre de partículas, que se encuentran en la trayectoria, de los aglomerados.
- Ascenso del aglomerado para la remoción.

Este proceso se da en su totalidad en el tanque principal de la planta, como se muestra en la figura 2.9, en donde ingresan las burbujas, y se distribuyen en una primera sección, en este mismo lugar se realiza la colisión, contacto y arrastre a la superficie; en el proceso pasan a una segunda sección en donde se realiza la eliminación de las partículas, normalmente este proceso se lleva a cabo de forma manual o con ayuda de elementos mecánicos simples.

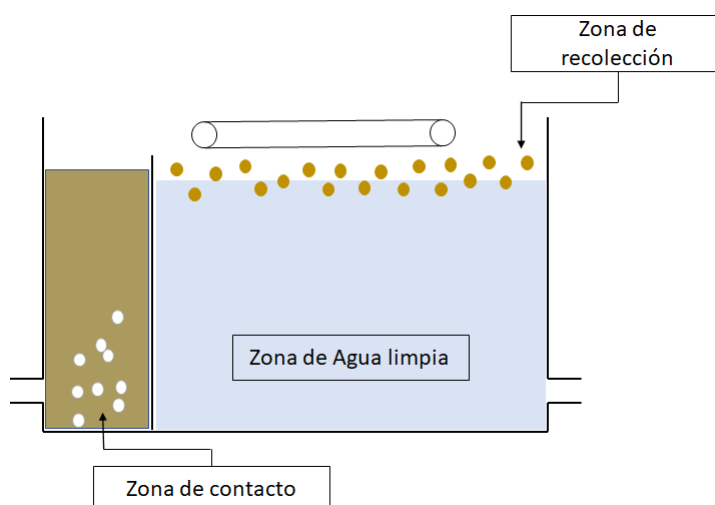


Figura 2.9: Diagrama de las secciones tanque DAF

**Fuente:** Elaboración propia

### 2.1.7. Planta DAF Laboratorio Universidad del Cauca

Teniendo en cuenta las múltiples variaciones de implementación de los sistemas DAF, se hace necesario dar claridad sobre la configuración que se utilizará para la realización de este proyecto. En la figura 2.10 se muestra el diagrama de flujo de la planta y en la figura 2.12 se presenta una imagen de la planta DAF del Laboratorio de la Universidad del Cauca.

El sistema cuenta con un tanque principal, como presenta la figura 2.11 está dividido en cuatro secciones:

1. **SECCIÓN DE OBSERVACIÓN.** Es el área donde las microburbujas generadas son desviadas para realizar su caracterización, aquí estas se presentan de manera más controlada, permitiendo una mejor visualización en la imagen.
2. **SECCIÓN DE INSERCIÓN Y CONTACTO.** Las burbujas generadas se introducen desde la parte inferior del tanque, en esta misma sección se realiza el proceso de flotación.
3. **SECCIÓN DE RECOLECCIÓN.** Después que el proceso de arrastre es culminado las partículas pasan a una zona en la parte superior del tanque, donde posteriormente son retiradas.

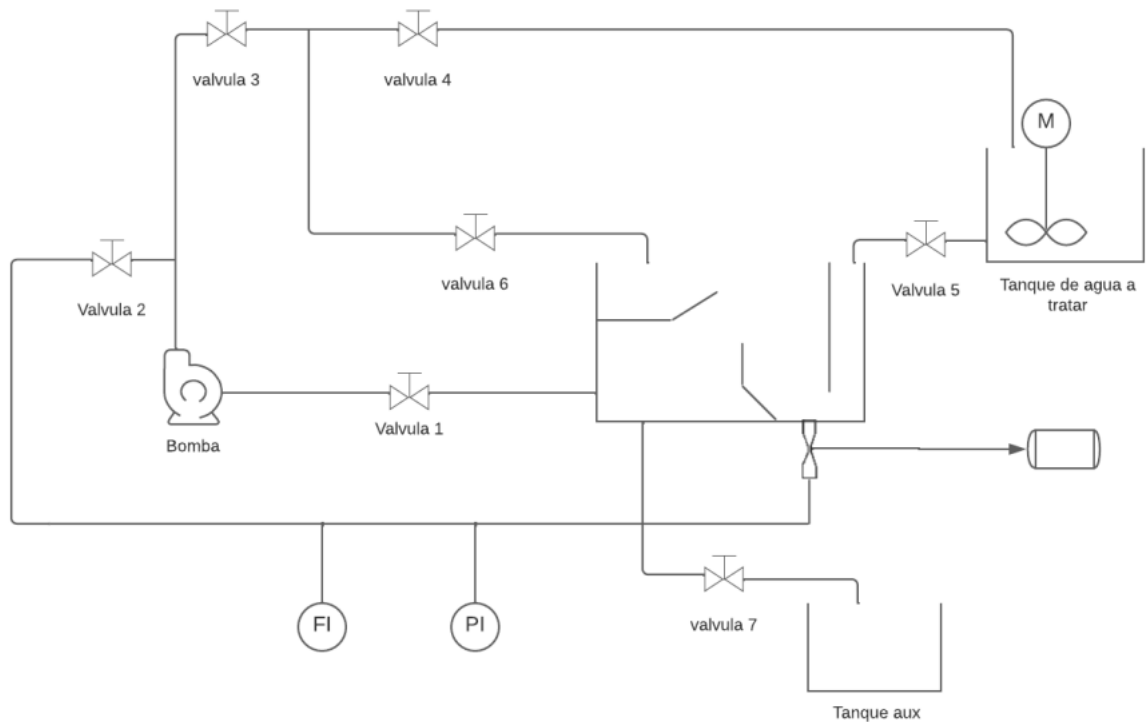


Figura 2.10: Diagrama Planta DAF Unicauca

**Fuente:** Elaboración propia

4. SECCIÓN DE AGUA LIMPIA. Con el proceso de flotación, las partículas quedan en la parte superior y el agua clarificada o limpia en una zona inferior donde posteriormente es enviada a otro tanque, para esta ser recirculada y utilizada en la generación de microburbujas.

Como método de generación de microburbujas, se emplea un tubo Venturi como indica la figura 2.11, el cual se encarga de realizar el proceso de mezcla agua-gas y además de la despresurización, como ayuda, se hace uso de una motobomba para realizar la recirculación del agua hacía el tubo, circulando así un caudal máximo de 16 litros/min.

Para realizar la inserción del gas en el tubo Venturi en caso de no haberse realizado la auto-succión, se hace uso de un compresor como se presenta en la figura 2.10, el cual tiene conectado un rotámetro, para realizar la monitorización del flujo de aire.

Además de los elementos mencionados anteriormente la planta tiene un contenedor de agua a tratar que contiene agua y el compuesto a remover, el cual cuenta con un agitador mecánico, para mantener homogeneidad en la mezcla.

Para los procesos de retroalimentación del compuesto a retirar y del agua limpia, se utilizó una motobomba, que llega a la parte superior del tanque principal para obtener residuos que después se inyectan en el tanque con la mezcla; el agua tratada es transportada a un tanque auxiliar donde es almacenada; parte de la misma es utilizada como entrada para generar las MB.

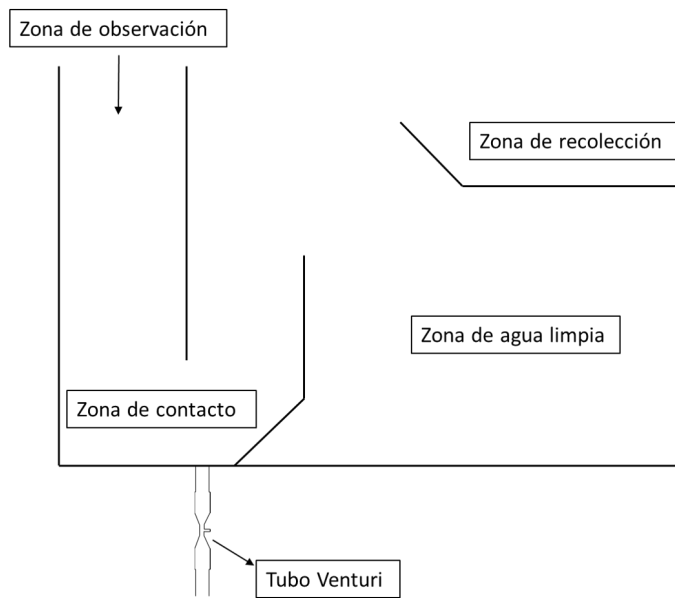


Figura 2.11: Secciones planta DAF Unicauca  
**Fuente:** Elaboración propia



Figura 2.12: Planta DAF Unicauca  
**Fuente:** Elaboración propia

## 2.2. Sistema de visión de máquina

### 2.2.1. Visión de máquina

Se define visión de máquina o visión artificial a la combinación de hardware y software para la toma de decisiones, cumplimiento de funciones o ejecución de acciones, por medio de la captura y procesamiento de imágenes digitales [48]; una imagen digital se podría definir como una función  $f(x,y)$  donde la coordenada  $x$  y la  $y$  serían puntos en el plano cartesiano [49] o píxeles, es decir es una colección de píxeles, en los cuales la luz baja produce píxeles oscuros, mientras que la luz brillante crea píxeles más brillantes [48]; la función de la visión artificial, es el procesamiento de imágenes digitales a través de medios computacionales para la toma de decisiones.

El procesamiento de imágenes es utilizado en distintos campos y también se emplea para el análisis de varios tipos de imágenes, como lo es:

- Imágenes de rayos gamma [49].
- Imágenes de rayos X [49].
- Imágenes en la banda ultravioleta [49].
- Imágenes en las bandas visible e infrarroja [49].
- Imágenes en la banda de microondas [49].
- Imágenes en la banda de radio [49].
- Sistema de inspección [48].
- Investigación académica [48].
- Desarrollos militares [48].
- Mediciones objetivas [48].

La visión artificial tiene grandes beneficios como lo es: aumentar la calidad, la productividad, la flexibilidad de producción, el control en los procesos e inventarios, disminuir el tiempo de inactividad, costo de capital, producción, desechos y almacenamiento, brindar información más completa, y mediciones más fiables [48].

Los sistemas de visión artificial tienen distintos componentes como lo son: el sistema de iluminación, mecanismos ópticos(lentes) y sensores digitales [48], juntos crean una imagen la cual la computadora es capaz de procesar, analizar, y medir sus características.

### **2.2.2. Sistema de iluminación**

El sistema de visión por computadora genera una imagen basada en el análisis de luz reflejada por el objeto y no en el objeto en sí, teniendo en cuenta esto la iluminación es un factor primordial en el éxito de la visión artificial [48], existen diversas técnicas de iluminación las cuales se componen por la fuente de luz y la relación posicional con respecto a la cámara teniendo en cuenta la característica a resaltar del objeto, estas pueden ser:

- **ILUMINACIÓN DE FONDO.** Este tipo de iluminación, es utilizada cuando se hace necesario destacar el contorno del objeto, detectar formas y medir dimensiones de manera confiable [48]. ver figura 2.13.
- **ILUMINACIÓN DIFUSA AXIAL.** La luz se une en el campo óptico desde el costado, y es dirigida a través de un espejo transparente, el cual redirige la luz hacia abajo donde se encuentra la pieza a inspeccionar, el objeto refleja la luz, dando como resultado una imagen iluminada de forma homogénea y pareja [48]. Ver figura 2.14.

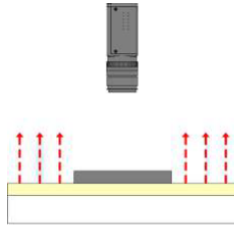


Figura 2.13: Iluminación de fondo

**Tomado:** [48]

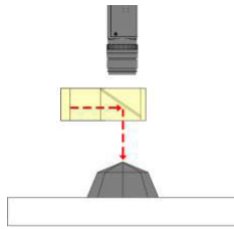


Figura 2.14: Iluminación de axial

**Tomado:** [48]

- **LUZ ESTRUCTURADA.** Es una proyección de un patrón de luz, sencillo como lo es un plano, una cuadrícula o algo un poco más complejo, en un ángulo definido por el usuario, su principal utilidad es proporcionar contraste independiente en inspecciones de superficie, permitiendo adquirir información dimensional y calcular el volumen [48]. Ver figura 2.15.

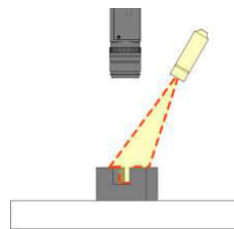


Figura 2.15: Iluminación estructurada

**Tomado:** [48]

- **ILUMINACIÓN DE CAMPO OSCURO.** La luz especular se refleja lejos de la cámara y la luz difusa se refleja desde la textura del objeto, revelando cambios, elevaciones en la cámara, es útil para detectar defectos en la superficie, por lo que se recomienda usarla en aplicaciones de bajo contraste [48]. Ver figura 2.16.
- **ILUMINACIÓN DE CAMPO BRILLANTE.** la luz genera sombras, ocasionando una iluminación inconsistente en la totalidad del campo, por lo que puede requerir una luz más difusa, es útil para aplicaciones de alto contraste [48]. Ver figura 2.17.



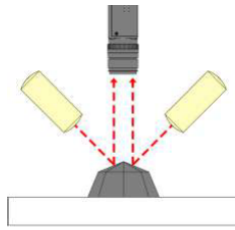


Figura 2.16: Iluminación de campo oscuro  
**Tomado:** [48]

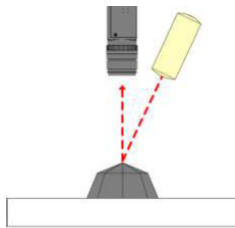


Figura 2.17: Iluminación de campo brillante  
**Tomado:** [48]

- **ILUMINACIÓN DE DOMO DIFUSA.** Brinda el tipo de iluminación más uniforme sobre las características de interés, eliminando las irregularidades que no son de relevancia [48]. Ver figura 2.18.

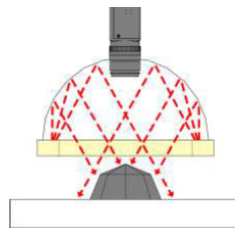


Figura 2.18: Iluminación de domo difusa  
**Tomado:** [48]

En la medición de tamaño y velocidad de microburbujas se ha utilizado: iluminación de fondo [2] [18] [6] [50] [51], iluminación difusa axial [52] [33] o luz estructurada [53]. La iluminación de fondo es la más utilizada porque la fuente ubicada al lado contrario de la cámara destaca el contorno del objeto, lo que la hace adecuada para medición del borde externo e identificación de formas confiables [48].

### 2.2.3. Mecanismos ópticos

Los lentes son requeridos para identificar las características a evaluar del objeto dentro del campo de visión (FOV), garantizar un enfoque, contraste y evitar la distorsión en la toma [54], también son responsables de la calidad y resolución de la imagen, debido a que la información no capturada no puede ser estimada o creada por el software, por lo anterior estos mecanismos deben tener la capacidad para

captar el objeto de la imagen [54] [48]. En el sistema de visión, un lente fijo utiliza un enfoque automático con un campo de visión fijo determinado a una distancia [48].

#### **2.2.4. Sensores digitales**

Para realizar la adquisición de la imagen, no solo es necesario una área con una correcta iluminación y un lente óptico, sino también del sensor que se encuentra dentro de la cámara, típicamente hacen uso de un dispositivo de carga acoplada (CCD) o semiconductor de óxido metálico (CMOS) [48], para realizar la conversión de señales eléctricas; es decir su función es capturar la luz, convertirla en imagen digital, con sensibilidad y rango dinámico, [48]; este componente es importante para una resolución correcta de la imagen, la cual se ve afecta por el tamaño de la pieza, las tolerancias de inspección, entre otros [48]. Existe una relación entre el tamaño del sensor y el campo de visión, reducir el tamaño del sensor reduce el campo de visión y de manera complementaria, aumentar el tamaño del sensor aumenta el campo de visión [54], pero se debe tener en cuenta que si el tamaño del sensor está sobredimensionado se excederá el área que crea el lente, agregando puntos en blanco en las esquinas de la imagen [54].

### **2.3. Algoritmo de procesamiento**

Para realizar un correcto procesamiento de imagen, se debe tener en cuenta que los parámetros de la cámara afectarán el análisis, por lo que se explicará el procedimiento realizado para obtener las características de la cámara y aplicarlas como primer ajuste a las imágenes; es importante dar claridad que en este proyecto se utilizara OpenCV, por lo que se dará a conocer en qué consiste esta librería de procesamiento, también se habla de los filtros utilizados, y el proceso matemático realizado para el cálculo de distancia y velocidad.

#### **2.3.1. Calibración de cámara**

Es el proceso de estimación de los parámetros de una cámara, esto significa que se tiene toda la información (parámetros o coeficientes) relativos a la cámara, para precisar una relación entre un punto 3D (mundo real) y su proyección 2D (píxel) en la imagen capturada.

Estos parámetros se dividen en:

- PARÁMETROS INTERNOS. Son los relacionados con el sistema cámara/lente. como puede ser: la distancia focal, el centro óptico y los coeficientes de distorsión radial de la lente.
- PARÁMETROS EXTERNOS. Están relacionados con la rotación y la traslación de la cámara.

Las cámaras de apertura estrecha, introducen en la imagen dos tipos de distorsión que son significativas [55]; la distorsión radial, que hace parecer curvas a las líneas

rectas, tiene un aumento significativo entre más lejos esté la imagen del centro, y la distorsión tangencial, enfocada en la desalineación paralela al plano de la imagen, ocasionando que algunas partes de la imagen se ven más cerca de lo que es en realidad. La distorsión radial y la distorsión tangencial se definen a través de las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3, 2.4 respectivamente.

$$X_{distRad} = X \cdot (1 + K1R^2 + K2R^4 + K3R^6) \quad (2.1)$$

$$Y_{distRad} = Y \cdot (1 + K1R^2 + K2R^4 + K3R^6) \quad (2.2)$$

$$X_{distTan} = X + (2P1XY + P2(R^2 + 2X^2)) \quad (2.3)$$

$$Y_{distTan} = Y + (P1(R^2 + 2Y^2) + 2P2XY) \quad (2.4)$$

Según estas ecuaciones es necesario encontrar 5 variables clave llamadas coeficientes de distorsión:

$$Coeficientes = (K1, K2, P1, P2, K3) \quad (2.5)$$

A parte de las distorsiones, también afectan a la imagen la distancia focal  $f(x), f(y)$  y centros ópticos  $C(x), C(y)$ , estos se usan para crear una matriz de cámara, que permite eliminar la distorsión causada por una cámara específica [55]; esta matriz está definida como:

$$\begin{bmatrix} Fx & 0 & Cx \\ 0 & Fy & Cy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

La matriz de la cámara es usada sobre la ecuación de proyección 3D, que está definida como:

$$\begin{bmatrix} U' \\ V' \\ Z' \end{bmatrix} = P \cdot \begin{bmatrix} Xw \\ Yw \\ Zw \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Donde  $X(w), Y(w), Z(w)$  son los puntos 3D en coordenadas del mundo con su proyección  $(u, v)$  que son las coordenadas de la imagen que se muestra y  $P$  es una matriz de  $3 \times 4$ , formada por dos partes, como se muestra a continuación:

$$P = K \cdot [R|T] \quad (2.8)$$

Donde  $K$  es la matriz de cámara,  $R$  es la matriz de rotación  $3 \times 3$  y un vector de traslación  $T$  de  $3 \times 1$  [56].

Existen diferentes tipos de calibración de cámara:

- **PATRÓN DE CALIBRACIÓN.** Usado cuando se tiene un control completo sobre el proceso de la imagen, es necesario definir un patrón de dimensiones conocidas, típicamente un modelo de tablero de ajedrez, pero también se usan otro tipo de patrones como lo son los circulares [56]; para obtener una excelente calibración se deben tomar varias imágenes, desde distintos ángulos aunque estos no deben ser muy marcados y de diferentes vistas, pero siempre visualizando el patrón.
- **PISTAS GEOMÉTRICAS.** Es útil cuando en la escena existen puntos de fuga, líneas rectas, entre otros, los cuales se usan para calibración [56].
- **BASADO EN *DEEP LEARNING*.** En los casos en los que solo se tiene una imagen de la escena o es difícil controlar la configuración de la imagen, se puede obtener información para calibración por medio de técnicas de deep learning [56].

### 2.3.2. Error de re-proyección

Se define como: “Vector2D de la diferencia entre el punto medido y proyectado” [57], es decir es un error geométrico, que calcula la distancia entre el punto 2D y un punto real.

La interpretación de este error, está sobre la precisión de detección sobre la ubicación de cada punto de la imagen, sobre la proyección en 3D [57], es de considerar que este es un error geométrico y estadístico, es por ello que al estar muy sesgados los datos de prueba brindara información equivocada.

Una de las formas de reducir este error es modificando directamente el hardware de la cámara como lo es, el sensor que mejore la resolución, aumentar el número de píxeles, entre otras [57].

Las fuentes de generación de este error, son varias, entre ellas: ruido de las características, modelos de cámara pocos flexibles para modelar con precisión, suponer que el elemento fotografiado es perfecto [57].

### 2.3.3. OpenCV

Es una librería de código abierto, que incluye varios algoritmos de procesamiento digital, esencialmente responde a una API en C++ [55], tiene una estructura modular, permitiendo agregar los componentes que sean necesarios para cada procesamiento, entre los módulos se encuentran:

- **COREIONALITY(CORE) O FUNCIONALIDAD PRINCIPAL.** Se encuentran definidas estructuras de datos básicas, funciones básicas utilizadas por otros módulos, y la matriz multidimensional MAT, esencial para realizar procesamiento de imagen [55].
- **IMAGE PROCESSING(IMGPROC) O PROCESAMIENTO DE IMAGEN.** Se encuentran los filtros de las imágenes lineales y no lineales, transformaciones de imagen en cuanto a tamaño, resignación geométrica basada en tablas, conversiones de color, histograma, entre otros [55].

- VIDEO ANALYSIS(VÍDEO) O ANÁLISIS DE VÍDEO. Especialmente utilizado para procesamiento de vídeo porque cuenta con estimación de movimiento, sustracción de fondo y seguimiento de objetos [55].
- CAMERA CALIBRATION AND 3D RECONSTRUCTION (CALIB3D) O CALIBRACIÓN DE CÁMARA Y RECONSTRUCCIÓN 3D. Cuenta con calibración de cámara única y estéreo, estimación de pose de objeto, geométrica de vista múltiple, correspondencia estero y elementos de reconstrucción 3D [55], 2D Features Framework (features2d) o marco de funciones 2D. “detectores de funciones destacadas, descriptores y comparadores de descriptores” [55].
- OBJECT DETECTION (OBJDETECT) O DETECCIÓN DE OBJETOS. Encargado de realizar el proceso de seguimiento de objetos e instancias predefinidas [55].
- HIGH-LEVEL- GUI (HIGHGUI) O GUI DE ALTO NIVEL. Brinda una interfaz sencilla de entender y usar, permitiendo así capacidades UI simples [55].
- VÍDEO I/O (VIDEOIO) o ENTRADAS Y SALIDAS DE VÍDEO. brinda una interfaz de fácil uso para la captura, codificación y compresión de archivos de audio y vídeo [55].

También tiene módulos que permiten la conexión con otras tecnologías como lo es Python, Google, entre otros.

### 2.3.4. Filtros

#### Filtro de mediana

El filtro de mediana se implementa mediante una ventana de píxeles que se va desplazando a los largo de la imagen. En cada ventana se realiza el ordenamiento (ranking) de los píxeles y se reemplaza el valor del píxel central llamado “origen” por el valor medio determinado por el resultado del ordenamiento [58]. De esta forma se homogeneizan los píxeles de intensidad muy diferente con respecto a los que se encuentran a su alrededor. El filtro de mediana se emplea para eliminar valores anómalos aislados, producto de ruidos aleatorios en la adquisición de los datos [59].

#### Filtro de Gauss

Utilizado principalmente para la eliminación de ruido, basado en una máscara de convolución que retorna una respuesta pasa-bajos [49], la expresión matemática de este filtro es:

$$H(u, v) = e^{-\frac{D^2(u, v)}{2\sigma^2}} \quad (2.9)$$

Donde  $D(u, v)$  representa la distancia desde el origen de la transformada de Fourier,  $\sigma$  es la varianza de la curva de propagación Gaussiana [60].

La parametrización de este filtro depende de la varianza, entre más elevados, serán tomados en cuenta pixeles vecinos más alejados, mientras que si la varianza decrece solo se tomaran los vecinos más cercanos [60].

## Filtros morfológicos

La morfología matemática es una herramienta útil para extraer información, en la representación y descripción de la región de interés, como el margen, el esqueleto, el casco convexo [49].

Existen dos operaciones fundamentales en este campo: erosión y dilatación, junto a ellas se utilizan elementos estructurantes de tipo línea, cruz o elipse y son aplicados sobre imágenes binarias; estas operaciones son combinadas para obtener distintos resultados y funciones.

Erosión se basa en encontrar los elementos de la imagen que están incluidos dentro del elemento estructurante dando como resultado un 1 en caso de ser verdadero o un 0 en caso contrario [60], es decir se envía un 0 en los píxeles vecinos al objeto [61]; como consecuencia de esta operación se muestra imagen más delgada [49].

Dilatación, es la operación contraria a la erosión [49] [60], está operada sobre los objetos que contiene la imagen y no sobre el fondo, el valor más grande encontrado por el elemento estructurante es el que se usa para la dilatación [60], es decir envía un 1 en los píxeles vecinos al objeto [61], como consecuencia de ello los objetos se vuelven más gruesos [49].

Relleno, es una combinación de dilatación y erosión, que permite eliminar información innecesaria de la imagen, si la imagen se encuentra en escala de grises, se resalta las partes intensas cerca de zonas claras, eliminando así los mínimos regionales [62].

## Filtro Canny

Este filtro está basado sobre la primera derivada, es usada porque mantiene un valor constante en toda la transición de intensidad y un valor de cero en las regiones donde no varía la intensidad [63]. Se diferencia de otros algoritmos de detección de bordes, ya que los detecta bajo una relación señal y ruido, agregando métodos como límite máximo del gradiente, trazar rutas de máximos y cierre de contornos, además de operar las máscaras sobre los ejes X y Y [60].

Consiste en tres pasos: obtención del gradiente, en el cual se calcula la orientación y magnitud del vector gradiente en cada pixel, supresión máxima, se realiza un adelgazamiento de los bordes hasta llegar a un ancho de un pixel, histéresis de umbral, se aplica una función de histéresis basada en dos umbrales [63].

## Transformada de Hough

El problema al detectar figuras, como por ejemplo un círculo, es saber, qué puntos pertenecen a una misma circunferencia de radio  $r$ ; es en donde la transformada de Hough influye, ya que, es utilizada principalmente para la detección y reconocimiento de figuras en imágenes digitales con patrones simples, como lo pueden ser líneas, círculos, elipses, entre otros [64], también es importante resaltar, que esta transformada es útil siempre que se pueda distinguir el borde del objeto en la imagen.

Con la transformada de Hough, se busca encontrar los puntos  $x(c), y(c)$  que serían puntos de la circunferencia, que están dentro del espacio  $x, y$ ; es por ello

que un espacio Hough es definido como una matriz, cuyas columnas representan los puntos  $x(c)$  y filas los puntos  $y(c)$  [64]; los valores de la matriz son inicialmente 0, que se van llenando conforme se analiza la imagen, se van llenando los  $x(c)$  y  $y(c)$  que corresponden a los radios y centros, de la circunferencia; en donde se presentan valores más altos, se toman como el centro de las circunferencias [64].

Las ecuaciones planteadas para encontrar los valores de  $x(c), y(c)$ , se basan en el cálculo de coordenadas polares [64], como se muestra en la figura 2.19, se puede observar la ubicación de la circunferencia dentro del plano cartesiano, con ayuda del centro, que son las coordenadas en el espacio  $x, y$ ; y el tamaño de la circunferencia con ayuda del radio, se trazan distintas rectas del centro a cada uno de los puntos de la circunferencia, obteniendo con ello las siguiente ecuaciones:

$$Xc = X - r \cos \theta \quad (2.10)$$

$$Yc = Y - r \sin \theta \quad (2.11)$$

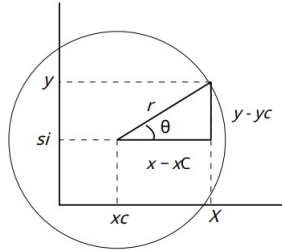


Figura 2.19: Modelo de circunferencia  
Tomado: [64]

### 2.3.5. Cálculo de trayectoria de las Microburbujas

Las microburbujas al ser inyectadas desde la parte inferior del tanque, y por sus principios físicos, realizan el ascenso desplazándose tanto en el eje X como en el Y, por lo que calcular la distancia entorno a un solo de los ejes, omite la información de su eje complementario, es por ello que la fórmula de distancia euclidiana, la cual relaciona la distancia de dos partículas entorno a sus dos ejes, es de utilidad para este caso [65].

La ecuación de distancia euclidiana es definida como la diferencia entre las coordenadas del punto actual y las coordenadas del punto anterior, como se muestra a continuación:

$$D = \sqrt{((X1 - X2)^2 + (Y1 - Y2)^2)} \quad (2.12)$$

Donde D sería la distancia, X1 y Y1, la posición actual de la MB y X2 y Y2 la posición anterior, para encontrar el valor de distancia primero se calcula el valor recorrido por parte de cada eje, es decir, se resta el punto actual menos el anterior para eje X y de la misma forma para el eje Y, puesto a que el resultado da un valor negativo se eleva al cuadrado los dos valores, y se realiza la suma, con este cálculo, se obtiene la trayectoria que sigue la burbuja, y su avance en cada frame.

### 2.3.6. Valor de similitud

Anteriormente se expuso el procedimiento para encontrar la trayectoria de las microburbujas, pero este proceso se realiza por cada microburbuja que se encuentra en el frame, tomando de base la figura 2.20, se tomaría la burbuja A que en este caso será la burbuja a la cual se le está haciendo seguimiento en el frame anterior y se calcula la trayectoria en comparación con la burbuja B, luego la C, y demás burbujas detectadas en el frame posterior; con los resultados de las trayectorias se puede aplicar el concepto de valor de similitud.

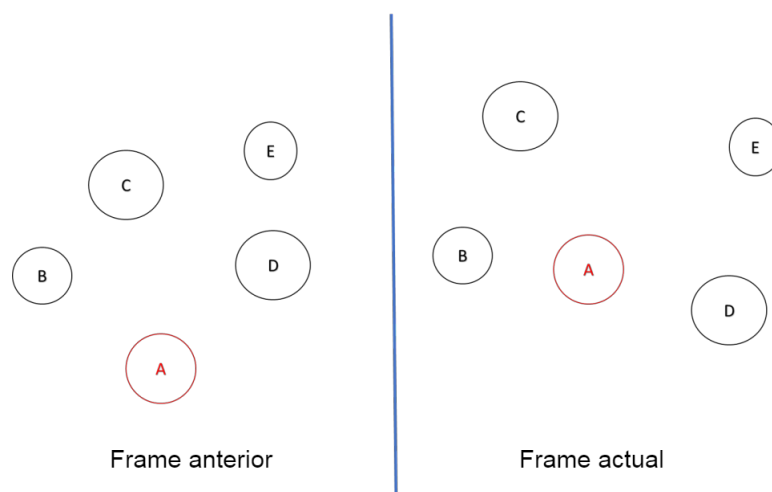


Figura 2.20: Trayectoria de Microburbujas

**Fuente:** Elaboración propia

El valor de similitud se utiliza para realizar el seguimiento de un objeto a través de frames consecutivos [66], el cual es definido como el objeto que tenga el valor mínimo de distancia corresponde al objeto en seguimiento [66], es decir, de los múltiples valores de trayectorias calculadas, la que posea un valor más pequeño o valor mínimo corresponderá al objeto del frame anterior en sus nuevas coordenadas en el frame actual, que en el caso de este proyecto el objeto hace alusión a las microburbujas. Este valor mínimo debe encontrarse dentro de un valor mínimo y máximo que se deben definir.

### 2.3.7. Cálculo de velocidad de Microburbujas

Se sabe que, la fórmula de la velocidad está definida como:

$$V = \frac{D}{t} \quad (2.13)$$

Donde V es la velocidad, D la distancia y t el tiempo; anteriormente ya se ha expuesto cómo calcular la trayectoria, es decir, la distancia, por lo cual se debe encontrar el valor de t, este se toma como el número de frames sobre el tiempo del vídeo, los valores anteriores se sustituyen en 2.13 y se obtiene la velocidad de ascenso de cada microburbuja por frame; hay que tener en cuenta que en el análisis



de imagen la velocidad encontrada está definida en medida de pixeles, por lo que se debe realizar una conversión, para pasar a unidades de ingeniería.

# Capítulo 3

## Diseño

En este capítulo se describe el diseño hardware, el cual habla a detalle sobre sistema de microfotografía empleado, sus componentes y distribución en la planta DAF. También se presenta el diseño software, en este se describe, el proceso de calibración de cámara, el cálculo de la relación pixeles a milímetros, las funciones que componen el algoritmos y procedimientos utilizados para realizar la caracterización.

### 3.1. Diseño Hardware

#### 3.1.1. Sistema de Microfotografía

Debido a las características particulares presentes en la planta en la cual se pondrá a prueba el sistema de microfotografía, se seleccionó los siguientes elementos que permiten cumplir la labor de caracterización de microburbujas de formas más cómoda y eficiente. Como soporte se creó una base de aluminio, la cual se compone de dos ganchos los cuales se ajustan en la parte superior de un lateral del tanque DAF y la base donde se acomoda la cámara como se muestra en la figura 3.1, este permite que la cámara se encuentre lo más cerca al tanque, logrando así una mejor captura de las microburbujas, la base cuenta con unas medidas de 4\*17\*1 cm de alto, ancho y profundidad respectivamente, y los ganchos o brazos tienen 30\*1\*0,2 cm de alto, ancho y profundidad, una distancia de doblado de 3,5 cm, en esta última medida se tuvo en cuenta el tamaño del lente y el de la propia base, ajustando de forma precisa el montaje de microfotografía evitando así interferir en el ángulo de la cámara [67].

Como sistema de iluminación, se emplea una sola fuente de luz ubicada en el lado opuesto de la cámara generando con ello un sistema de luz de fondo, se eligió una lámpara de panel led cuadrado S/p luz día marca Karluz como se muestra en la figura 3.2, referencia kl-2201, con un Voltaje de 110 V y una potencia de 12 W [68].

El mecanismo óptico a utilizar es un "Lente Gran Angular" para teléfono inteligente como se muestra en la figura 3.3, con clip 2 en 1, compatible con iPhone, Samsung, Google Pixel, tiene unas dimensiones de 11.5cm\*10.3cm\*5.9cm, minimiza el deslumbramiento de la lente, la reflexión, el fantasma y otros artefactos para una excelente claridad, dentro de sus características cuenta con una distancia focal de aproximadamente 7 cm permitiendo así una captura óptima de la imagen, Lente

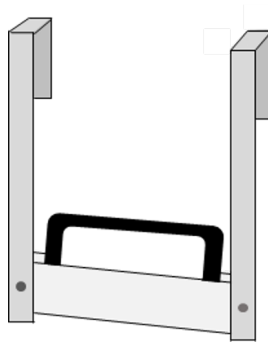


Figura 3.1: Soporte para teléfono móvil  
**Fuente:** Elaboración propia



Figura 3.2: Lámpara de 12 W  
**Tomado:** [68]

macro de 12,5 x, lente de rosca de 1.457 pulgadas de diámetro, permite tomar fotos a una distancia de 1.18 a 1.57 pulgadas [69]. Este estará ubicado sobre el lente de la cámara.

La cámara a utilizar es de un teléfono inteligente Huawei P30 pro, como el que se observa en la figura 3.4, con 4 cámaras un lente SuperZoom, y un lente ultra gran angular de 20 MP, la cámara es Super Sensing de 40 MP con un Zoom de 50x, la cámara posterior, es compatible con el enfoque automático (enfoque láser, enfoque de fase, enfoque de contraste), es compatible con AIS (Estabilización de imagen con IA de HUAWEI), cabe resaltar que en diferentes modos de fotografía, el número de píxeles puede ser ligeramente diferente [70], dentro de los detalles más relevantes de la cámara se encuentra:

- **CÁMARA POSTERIOR:** Cámara cuádruple Leica: 40 MP (objetivo gran angular, apertura de  $f/1.6$ , OIS) + 20MPX (objetivo ultra gran angular, apertura de  $f/2.2$ ) + 8 MP (teleobjetivo, apertura de  $f/3.4$ , OIS) la cámara de tiempo de vuelo (Time-of-Flight, TOF).
- **CÁMARA FRONTAL:** 32 MP, apertura de  $f/2.0$ .
- **CAPTURA DE VÍDEO:** en cámara lenta de hasta 960 fps (velocidad X32).

Estos elementos se acoplan al sistema DAF, como se muestra en la figura 3.5.



Figura 3.3: Lente para teléfono inteligente  
Tomado: [69]



Figura 3.4: Teléfono inteligente  
Tomado: [70]

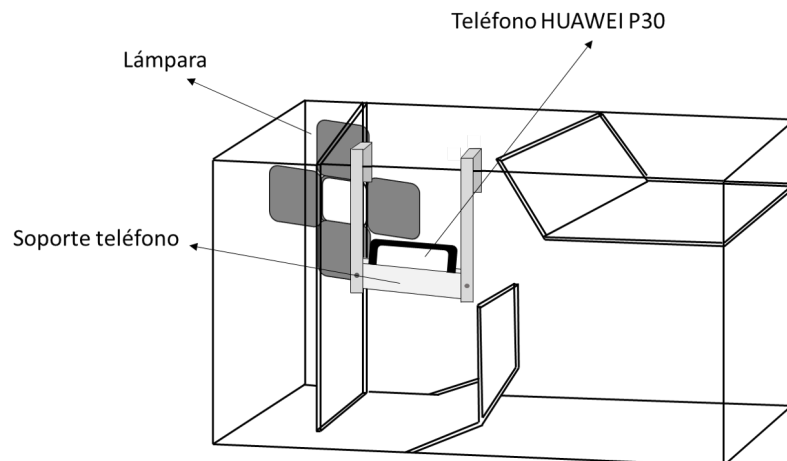


Figura 3.5: Distribución de los componentes de microfotografía en el sistema DAF  
Fuente: Elaboración propia

### 3.1.2. Configuración de la cámara

El propósito del proyecto es realizar el análisis de microburbujas, a través de microfotografía, es por ello que se acopla el lente zoom, a la cámara del teléfono celular, este se ajusta al soporte para mantenerlo estático y minimizar el ruido en la toma de imágenes.

Según como se muestra en la figura 3.6 para iniciar la grabación de las microburbujas, se requiere establecer una conexión inalámbrica entre el teléfono celular y el computador, evitando así que el factor humano interfiera con movimientos de la cámara, desconfiguraciones, entre otras; después de realizar con éxito la conexión, se selecciona el modo de captura en “cámara lenta” y se desactiva el reconocimiento de movimiento, se debe configurar el modo de foco en manual, con el propósito de que el autoenfoco no vaya cambiando entre las cámaras del teléfono, también se configura el zoom a x2, los parámetros ISO, la apertura y la obturación según como se presenten las condiciones del entorno, esto refiere al posicionamiento del acople, ubicación de la lámpara y estado del tanque, manteniendo así un estándar para realizar este procedimiento.

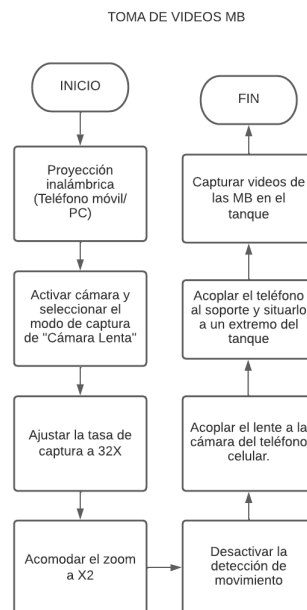


Figura 3.6: Diagrama de flujo toma de videos  
Fuente: Elaboración propia

## 3.2. Diseño Software

### 3.2.1. Preparación de calibración de cámara

El proceso de calibración de cámara se dividió en pasos, como se muestra en la figura 3.7.

1. Definir patrón de tamaño conocido.
2. Captura de imágenes desde distintos ángulos.
3. Paso de coordenadas de 3D a 2D.

Calibración de cámara

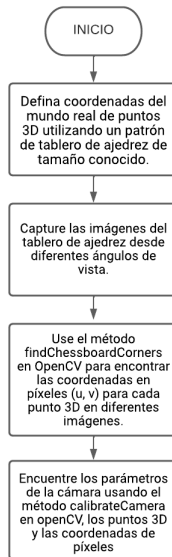


Figura 3.7: Diagrama de flujo calibración de cámara  
**Fuente:** Elaboración propia

4. Calcular parámetros de calibración.

Se definió el uso de un tablero estilo ajedrez, con un tamaño de 6 filas x 7 columnas, es importante que el patrón de los cuadros en los extremos inicie y termine con un cuadrado del mismo color (ejemplo lado izquierdo inicie con blanco y termine en blanco) como se muestra en la figura 3.8, este tablero al poseer un patrón regular facilita el proceso de su detección.

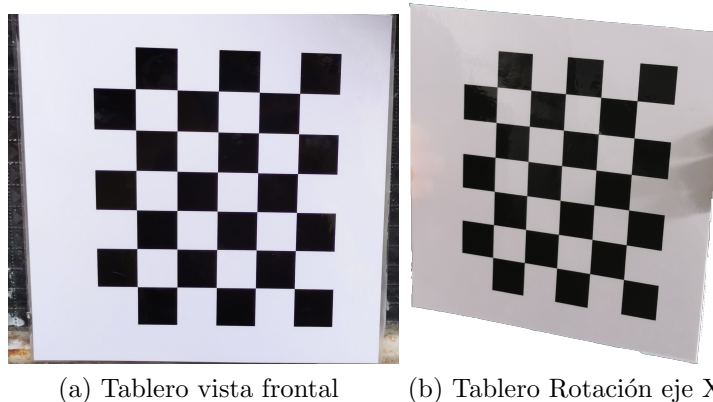


Figura 3.8: Tablero de ajedrez calibración de parámetros de la cámara  
**Fuente:** Elaboración propia

El procedimiento del paso 2, se realiza como se presenta en la figura 3.9, inicialmente se activa la cámara y se selecciona el modo de captura “Profesional”, siguiente

se configuran los parámetros de ISO, la apertura y la obturación según como se presenten las condiciones del entorno, se debe configurar el modo de foco en manual, con el propósito de que el autoenfoque no vaya cambiando entre las cámaras del teléfono, luego se ajusta el lente macro a la cámara que se encuentre activada y se acopla el teléfono al soporte, siguiente se posiciona el tablero de ajedrez a una distancia en la cual este se pueda observar completamente y por último se hace la captura de 10 a 20 imágenes del tablero en distintos ángulos los cuales no sean muy pronunciados. La cámara utilizada fue la de un teléfono celular HUAWEI P30.

Para los últimos dos pasos, se utilizó un algoritmo externo al del funcionamiento de la aplicación, debido a que este procedimiento solo se necesita realizar la primer vez, después de ello los parámetros ya quedan precargados, para su uso, los pasos a realizar son:

- Encuentra coordenadas 2D del tablero de ajedrez.
  1. Encuentra coordenadas 2D del tablero de ajedrez.
  2. Refinar las esquinas del tablero de ajedrez.
- Calibrar la cámara.

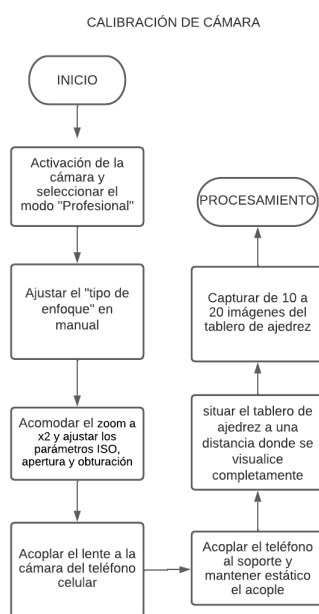


Figura 3.9: Diagrama de flujo obtención de información para calibración de cámara

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.2.2. Preparación para relación pixel a milímetro

Para el cálculo de la relación píxel a milímetro se hace uso de tarjetas las cuales tienen pequeñas perforaciones donde se introducirá un corte de hilo de nailon con

diámetro de 0.6mm como se muestra en la figura 3.10, la cual se puede utilizar como un indicador de medida para encontrar la relación entre pixel y milímetros. En esta parte es necesario acoplar el lente de aumento a la cámara del teléfono celular, configurar el zoom a x2, los parámetros ISO, la apertura y la obturación según como se presenten las condiciones del entorno (iluminación, posición de la cámara, etc), se tomó cerca de 10 videos en cámara lenta de las tarjetas con nailon, este procedimiento se puede observar en la figura 3.11.



Figura 3.10: Tablero con nailon para calibración relación pixel/mm

**Fuente:** Elaboración propia

La relación píxel/mm utiliza como filtro principal la función *HoughCircles* de OpenCV, la cual encuentra círculos en las imágenes, esta función retorna distintas propiedades del objeto entre ellos el diámetro, el valor del diámetro estará definido en unidades de pixeles, pero como se tiene certeza de la medida del diámetro correspondiente al nailon, se puede hacer una estimación de equivalencia de pixel a milímetros. La cual se utiliza para determinar el tamaño de las burbujas en unidades del mundo real.

Además de este filtro, inicialmente a cada frame se le aplica los parámetros de calibración de cámara a través de la función *undistort*, realizando las correcciones de distorsión en la imagen, posteriormente se pasa el frame a escala de grises, donde se aplica filtros los cuales serán detallados en la implementación de la relación píxel a mm, estos eliminan el ruido del fondo y reflejos indeseados.

### 3.2.3. Algoritmo

Esta sección estará dividida en 5 secciones como lo muestra la figura 3.12, la primera enfocada en la preparación del vídeo, pre-procesamiento; la segunda, es el procesamiento inicial que se le aplicará al vídeo obtenido anteriormente con el fin de eliminar el mayor ruido posible, la siguiente en donde se explica el proceso de detección de las microburbujas en frames de vídeo, la cuarta en donde se describe el proceso utilizado para realizar el seguimiento de las MB detectadas, en la última parte se encuentra el proceso de caracterización.

#### Pre-procesamiento de vídeo

El vídeo que procesa el algoritmo, se encuentra en formato 3D, es por ello que se realiza un paso a formato 2D, al igual que transformaciones para que cada frame



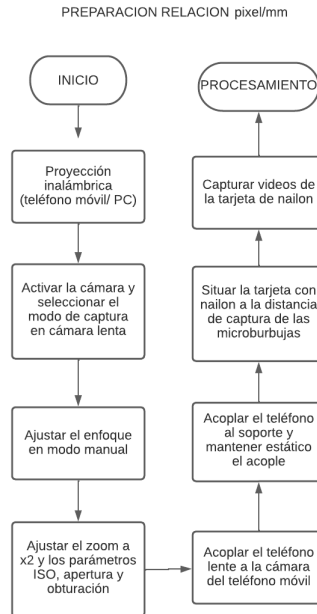


Figura 3.11: Diagrama de flujo relación px/mm  
Fuente: Elaboración propia

del vídeo, pase por los distintos filtros.

### Eliminación de ruido

Para el proceso de caracterización, es importante que el objeto sea fácil de diferenciar del fondo, es por ello que se hace uso de los siguientes filtros.

1. Conversión a escala de grises, con el objetivo de evitar reflejos indeseados.
2. Filtro de mediana, con la finalidad de eliminar contrastes de color fuertes.
3. Filtro de Gauss, para difuminar los elementos irrelevantes y el ruido.
4. Operaciones morfológicas, con el fin de mejorar la calidad del objeto a inspeccionar.
5. Filtro de Canny, con el propósito de realzar el contorno de las microburbujas.

Es de resaltar, la aplicación de estos filtros es según el orden expuesto.

### Detección de microburbujas

Para realizar la identificación de MB, se utiliza la transformada de Hough, esta función retorna un arreglo, de lo que en C# denomina CircleSegment, que contiene la información de radio, posición en  $x$  y  $y$  de cada microburbuja que ha sido detectada, estas son almacenadas para su posterior uso, además se guarda la información de las burbujas que llegan desde la parte inferior del frame, evitando con ello hacer

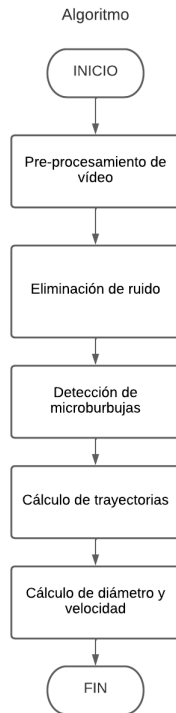


Figura 3.12: Diagrama algoritmo

**Fuente:** Elaboración propia

seguimiento de las que provengan en otras direcciones y puedan entorpecer el proceso de caracterización.

### Cálculo de trayectorias

Para iniciar con el algoritmo de seguimiento, el cual se encarga de identificar una misma burbuja a lo largo de la trayectoria, hay que tener presente que el ascenso de las burbujas no es lineal, por lo que para el cálculo de distancia se usa la ecuación euclidiana, además se hace necesario declarar un listado auxiliar en donde se almacenarán las burbujas ya ordenadas de acuerdo a su par anterior; del proceso anterior se retornan dos listas que contienen el radio, la coordenada en  $x$  y la coordenada en  $y$ , de las burbujas que llegan desde la parte inferior y las burbujas totales en el frame, para iniciar el proceso se hace un recorrido de cada uno de los elementos guardados en la lista de burbujas que llegan desde abajo, y a este se le aplica la función de distancias mínimas, la cual consiste en declarar un lista de coordenadas de distancias inicialmente vacía, se toma cada valor de la MB que viene desde abajo y por cada burbuja detectada se calcula la distancia, es decir, se tiene el punto  $x(1)$ , y  $x(2)$  para calcular la distancia en  $x$ , además de  $y(1)$  y  $y(2)$  para calcular la distancia en  $Y$ , con los dos valores se aplica la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados, obteniendo así la distancia para cada burbuja y se almacena en un la lista de distancias, como lo que se busca es las coordenadas de la burbuja para futuros procesos y se sabe que la posición de las coordenadas corresponde al de la distancia, pero el valor de

interés es el más pequeño, entonces se creó una lista copia de las distancias, a la cual se le realizó un ordenamiento y con ello se obtiene que en la posición 0 esta la distancia más pequeña, ya con el valor de distancia mínima determinada, se busca la posición de esta distancia en la lista original. Con la ubicación encontrada, se procede a guardar las coordenadas de la burbuja en la lista MB ordenadas.

### **Cálculo de diámetro y velocidad**

Este algoritmo recibe las burbujas ordenadas que son las actuales, y por cada burbuja calcula la velocidad, pero para calcular la velocidad es necesario tener la distancia recorrida, la cual se obtiene a través de la fórmula euclidiana, para ello se hace uso de una variable auxiliar que permite recorrer la lista de coordenadas anteriores, de forma paralela al recorrido de las actuales, con ello se tiene el punto  $x(1)$ , y  $x(2)$  para calcular la distancia en  $x$ , además de  $y(1)$  y  $y(2)$  para calcular la distancia en  $y$ , con los dos valores se aplica la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados obteniendo así la distancia para cada burbuja, ahora falta dividir por el tiempo, que corresponde al tiempo del vídeo y multiplicar por el valor de conversión de pixeles a mm, el resultado es la velocidad en mm/seg.

# Capítulo 4

## Implementación

En este capítulo se describe a detalle la puesta en funcionamiento del sistema de microfotografía de la planta DAF, los resultados del proceso de calibración de cámara, el cálculo de relación pixeles a milímetros y las distintas pruebas realizadas a los diferentes subsistemas.

### 4.1. Configuración planta DAF y entorno

Primero se hace la impresión del tubo Venturi, esta impresión consta de dos partes, las cuales corresponden a cada mitad del tubo como se muestra en la figura 4.1, se unen ambas partes con pegamento, luego se le adhiere al tubo una capa de masilla epóxica para proporcionar más dureza y rigidez el resultado final se aprecia en la figura 4.2 . Una vez la masilla se encuentre sólida, se procede a acoplar el tubo venturi a la tubería principal planta DAF, adicionando algunas capas de teflón a los extremos de éste, para asegurar firmemente el tubo Venturi. Por último se enlaza con el sistema de inyección de aire.

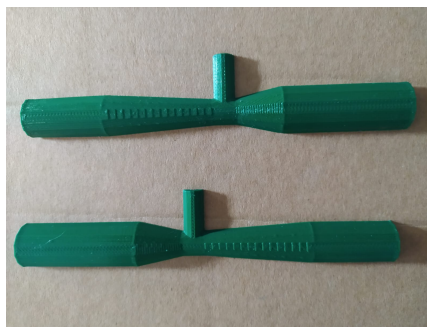


Figura 4.1: Impresión tubo Venturi

**Fuente:** Elaboración propia

Para la utilización de la planta DAF, primero se vacía por completo el tanque de DAF, asegurando que no queden partículas, y se realiza la limpieza con abundante agua y detergente líquido, siguiente se debe energizar la motobomba y el sistema de control de la planta, se purga la motobomba durante algunos segundos, con el objetivo de liberar el aire dentro de la motobomba como se muestra en la figura 4.3



Figura 4.2: Tubo Venturi  
**Fuente:** Elaboración propia

, siguiente se debe asegurar que la planta se encuentre en modo manual y que el indicador de caudal se encuentre en un porcentaje de 0, una vez rectificadas estas condiciones, se puede encender la planta.



Figura 4.3: Purga motobomba  
**Fuente:** Elaboración propia

En el control de iluminación, se hace cierre de las cortinas del laboratorio evitando así el ingreso de luz exterior, también se apagan las lámparas, dejando únicamente encendida la lámpara que está asociada al tanque DAF. Para posicionar la cámara, se utiliza el acople mencionado en la sección de diseño de hardware, sistema de microfotografía, soporte para teléfono móvil, el cual se ubica al ras del tanque.

## 4.2. Calibración de cámara

Para llevar a cabo la calibración es necesario realizar distintas tomas del tablero, en distintos ángulos tanto en el eje X como en el eje Y y posteriormente se hacen el procedimiento presente en la figura 4.4.

Es importante tener en cuenta que las imágenes se tomaron de dos formas, se tomaron 63 imágenes las cuales fueron en un ambiente directo en condiciones normales, esto quiere decir que no hubo ningún elemento externo que interfiriera en la imagen y posteriormente se tomaron la misma cantidad de imágenes pero en agua ya

que es un medio donde la luz puede ser refractada; al realizar el análisis se concluyó que las imágenes en agua, si bien, se puede extraer la matriz de calibración, esta al aplicarla sobre las imágenes, por el contrario de mejorar la imagen, la volvía de color negro, con algunas líneas blancas, o simplemente era como un cuadro gris, por consiguiente es un factor que genera ruido en las imágenes.

También es importante resaltar que para encontrar los valores correspondientes a la matriz, se utilizó dos software uno es el toolbox de “Camera Calibrator” de MATLAB y la librería de OpenCV en Python, con el propósito de evaluar cuál de los parámetros obtenidos proporciona un mejor resultado para su aplicabilidad.

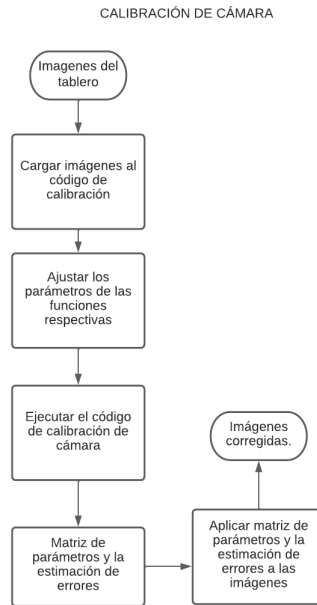


Figura 4.4: Diagrama de flujo implementación calibración de cámara

**Fuente:** Elaboración propia

Para determinar cuál será la matriz elegida, se utilizó como parámetro de diferenciación el error de reproyección, este establece que tan precisa es la información encontrada, entre más cercano esté de 0, brinda una mejor respuesta al aplicarse en las imágenes, el resultado de este proceso es favorable para los datos obtenidos en OpenCV, ya que el error en este dio un valor de 0.26 y en MATLAB de 0.91 pixeles, además de que al aplicarse las correcciones de distorsión OpenCV presenta menos distorsión que los suministrados por MATLAB.

La matriz de calibración es:

$$\begin{bmatrix} 2839,43297 & 0 & 1903,6605 \\ 0 & 2833,39169 & 8955,84317 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Los coeficientes de distorsión son:

$$\begin{bmatrix} -0,01311819 \\ 0,37176549 \\ 0,01207837 \\ 0,00885673 \\ -0,688254 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

### 4.3. Implementar Relación Px/mm

Implementar el procedimiento descrito con anterioridad en la sección de diseño, da como resultado, imágenes parecidas a la figura 4.5 que se muestra a continuación:



Figura 4.5: Imágenes perforaciones con nailon

**Fuente:** Elaboración propia

Este procedimiento se realizó según como se presenta en la figura 4.6 con 10 frames al azar de los vídeos anteriormente tomados en la sección de preparación para relación pixel a mm, y 10 imágenes tomadas con el software de captura de imágenes predeterminado del teléfono celular el cual se encontraba en modo profesional, El grupo de frames tomados de los videos, presentaban círculos con tamaños promedio más grandes que los que se presenciaban con las imágenes tomadas normalmente con el software del teléfono, esto representando un relación calculada errónea, se decidió hacer uso del grupo de frames para calcular la relación de pixel a milímetros, ya que el análisis del proyecto se enfoca en el procesamiento de vídeos de las microburbujas. De esta forma se asegura que los valores obtenidos por el algoritmo concuerdan con los valores calculados en esta sección.

Para cada frame se calculó el diámetro del nailon y la desviación estándar, obteniendo los siguientes resultados.

Según los datos presentes en la tabla 4.1 el diámetro promedio calculado es de 272.544 pixeles, también se hizo el cálculo de la desviación estándar con el fin de determinar qué tan alejados están los diámetros encontrados respecto a la media y así establecer si se puede asumir el error en el cálculo de los diámetros, la desviación estándar es de 1.4080 pixeles y aplicando regla de tres simple se obtiene la ecuación 4.3, la cual es denominada como factor de conversión.

$$X = \frac{0,6}{272,544} mm/pixel \quad (4.3)$$

El valor encontrado en la ecuación se encuentra definido en mm por lo que se hace su respectiva conversión a micrómetros. Por último resaltar que el material

N°	Diámetro
1	270.839
2	269.773
3	273.14
4	273.22
5	273.25
6	272.757
7	272.96
8	274.608
9	273.528
10	271.827
11	271.088
<b>Promedio</b>	272.544
<b>Des. Estandar</b>	1.4080

Cuadro 4.1: Datos relación pixels a milímetros

multimedia correspondiente al ascenso de las microburbujas se debe hacer con el lente y con el zoom (x2), ya que se hace la estimación de equivalencia entre pixel/mm con esos parámetros.

Con los parámetros anteriormente mencionados se obtiene frames de 1280\*720 de ancho y altura, respectivamente; aplicando el factor de conversión se obtiene que el ancho y largo en milímetros son 2.8178mm y 1.5850mm respectivamente, dando un área de trabajo de 4.4665  $mm^2$ .

## 4.4. Algoritmo de Caracterización de MB

Esta sección se divide en 5 partes, la primera enfocada a la preparación, el segundo paso que es el procesamiento inicial que se le aplicará al vídeo obtenido anteriormente, la tercera en donde se explica el proceso de detección de las microburbujas en el vídeo ya procesado, la cuarta en donde se describe el proceso utilizado para realizar el seguimiento de las microburbujas a lo largo de los cuadros del video, en la última parte se encuentra el proceso de caracterización.

### 4.4.1. Pre-procesamiento de vídeo

Una vez el vídeo se ha ejecutado exitosamente se realiza el procedimiento de la figura 4.7, al ser implementado en Unity, este se encuentra en un formato llamado texture el cual es un formato 3D, por ello primero se hace un paso a 2D a través del comando `toTexture2D(mainTexture)`, que recibe como parámetro la textura captada de una sección del video, posteriormente se convierte esta información al formato Mat requerido como entrada para las funciones de `openCvSharp`, esto se hace con la ayuda del comando `OpenCvSharp.Unity.TextureToMat(texture2D)`, finalmente se aplica la función `Undistor` haciendo uso con ello de la calibración de cámara, para ello



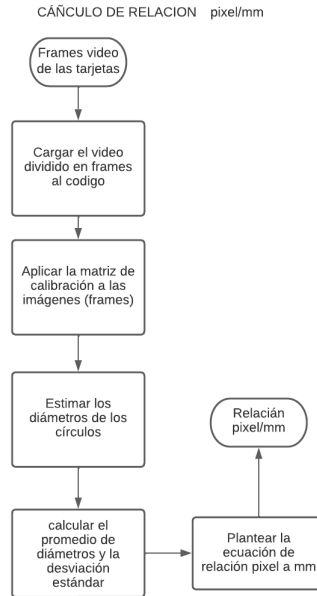


Figura 4.6: Proceso relación pixel a mm

**Fuente:** Elaboración propia

usamos la función, `Cv2.Undistort(frame, map2, InputArray.Create(cameraMatrix), InputArray.Create(distCoeffs))`; la cuál recibe el `Mat(frame)` a aplicar la función, el `Mat(map2)` que tendrá el resultado de la función y debe ser diferente al `Mat` de entrada, la matriz de calibración y los coeficientes de distorsión.

#### 4.4.2. Eliminación de ruido

Para realizar la caracterización primeramente se debe realizar algunos ajustes a la imagen, a través de la utilización de filtros, en la figura 4.8 se observa el diagrama de flujo; como entrada el algoritmo recibe el frame a procesar, posteriormente se aplica una conversión a escala de grises, para resaltar los elementos de interés, con ayuda de la función `Cv2.CvtColor(frame, frame, ColorConversionCodes.BGR2GRAY)`, posteriormente se aplica un filtro de mediana para eliminación de ruido, a través de la función `Cv2.MedianBlur(frame, frame, 11)`, a continuación se aplicó el filtro de Gauss, para difuminar los elementos irrelevantes y el ruido, utilizando la función `Cv2.GaussianBlur(frame, frame, ksize1, 180)`, la cual hace uso del tamaño del kernel definido de la siguiente manera: `Size ksize1 = new Size(3, 3)`, posteriormente se aplicó dos veces la función de relleno desde el punto (0,0) primero con un valor de 255, empleando la función `Cv2.FloodFill(frame,punto, 255)` y `Cv2.FloodFill(frame,punto, 0)`, a continuación se aplicó la operación dilatación, para esto se define un elemento estructurante de la siguiente forma: `Cv2.GetStructuringElement(MorphShapes.Rect, new Size(4, 4))` con ayuda de la función `Cv2.Dilate(frame, frame, elementStructuring)`, posteriormente se utilizó la operación erosión, para esto se define un elemento estructurante de la siguiente forma: `Cv2.GetStructuringElement(MorphShapes.Rect, new Size(6, 6))`

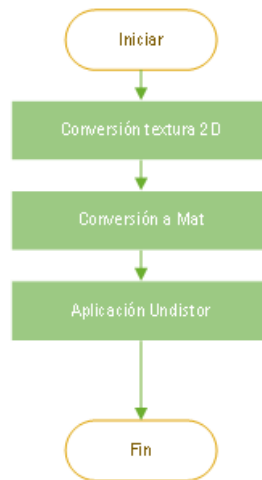


Figura 4.7: Diagrama de flujo preparación de vídeo para procesamiento  
**Fuente:** Elaboración propia

con ayuda de la función `Cv2.Erode(frame, frame, elementStructuring)`, seguido de la aplicación de binarización con el umbral 110 con la función `Cv2.Threshold(frame, frame, 110, 255, ThresholdTypes.Binary)`, por último se hace uso del filtro de Canny para determinar el contorno de las MB, en el valor de 0, utilizando una apertura de 3 y aplicando el L2Gradient, con la función `Cv2.Canny(frame, frame, 0, 255, 5, true)`.

### 4.4.3. Detección de microburbujas

En la figura 4.9 se observa que para realizar la identificación de MB, se utilizó la transformada de Hough, con un valor de acumulador en 1, con una distancia mínima entre los centros de 30, el primer parámetro de la función en 11 y el segundo en 14, un valor mínimo de radio en 5 y máximo en 50, con la función `Cv2.HoughCircles(frame, HoughMethods.Gradient, 1, 30, 11, 14, 5, 50)`, esta función retorna un arreglo, de lo que en C# se denomina `CircleSegment`, que contiene la información de radio, posición en  $x$  y posición en  $y$ , además en este algoritmo hace uso de dos listas de arreglos de enteros, los cuales se crearon con ayuda del comando `List<int> nombreLista = new List<int>();` la lista denominada 'MBActual', guardó la información de todas las burbujas detectadas en el frame y la lista 'MBOrdenar' se usa para guardar la información de las burbujas que llegan desde abajo, es decir las burbujas que tienen un valor en la posición en  $y$  mayor o igual a 670, eso se realiza para garantizar que la caracterización se haga sobre las burbujas que realizan la trayectoria completa.

### 4.4.4. Cálculo de trayectorias

Como se establece en la figura 4.10 para iniciar con el algoritmo de seguimiento, el cual se encarga de identificar una misma burbuja a lo largo de la trayectoria, se utilizó el método, 'ForEach', el cual es una función propia para recorrido de listas, el cual se aplicó sobre 'MBAnterior' y 'MBActual'; hay que tener presente que el ascenso de las burbujas no es lineal, por lo que para el cálculo de distancia se usa la

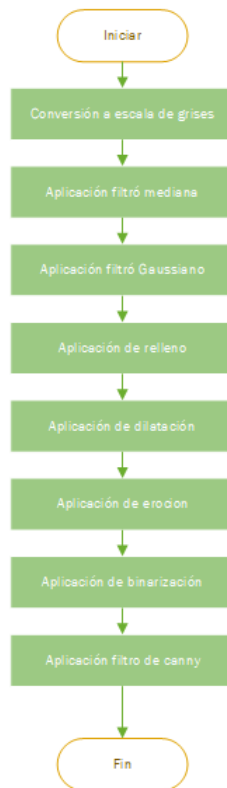


Figura 4.8: Diagrama de flujo procesamiento de vídeo  
**Fuente:** Elaboración propia

forma euclidiana, la cual se dividió en tres cálculos más pequeños:

1. Distancia en  $x$ :  
 $Mathf.Abs(coordenadasBurbujaActual[0]-coordenadasBurbujaAnterior[0]);$
2. Distancia en  $y$ :  
 $Mathf.Abs(coordenadasBurbujaActual[1]-coordenadasBurbujaAnterior[1]);$
3. Distancia total:  
 $Mathf.Sqrt((d(x)^2) + (d(y)^2));$

La función `Mathf.Abs`, se utilizó para obtener el valor absoluto de cada cálculo, el método `Mathf.Sqrt`, se uso para aplicar la raíz cuadra al cálculo anterior, donde  $d(x)$  representa la distancia que se calculo en  $x$  y  $d(y)$  en el eje  $y$ , el valor de distancia total es almacenado en la lista auxiliar denominada: ‘distancias’, esta lista se declaró inicialmente vacía y se va llenando de forma paralela que se hace el cálculo individual de la distancia contra cada microburbujas.

A continuación se creó una lista copia de las distancias denominada: ‘copiaDistancias’, para evitar afectar directamente la lista de distancias original, a la cual se le realizó un ordenamiento y con ello se obtiene que en la posición 0 esta la distancia más pequeña, siempre que la distancia sea mayor a de 7, valor obtenido en pruebas de escritorio, como la distancia mínima en frames que recorre una microburbuja por cada frame, ya con el valor de distancia mínima determinado, se busca la posición

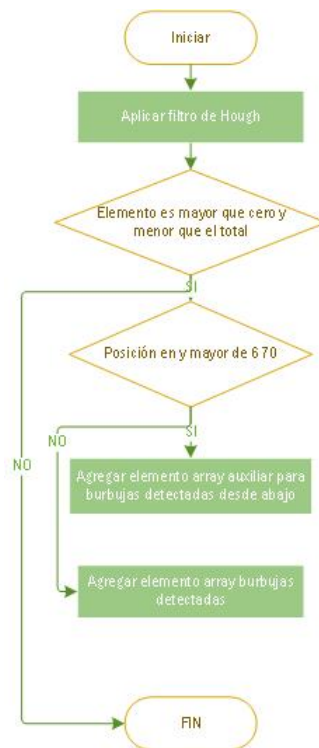


Figura 4.9: Diagrama de flujo detección de MB  
**Fuente:** Elaboración propia

de esta distancia en la lista original, y se procede a guardar las coordenadas de la burbuja en la lista MB ordenadas.

#### 4.4.5. Cálculo de diámetro y velocidad

Como se observa en la figura 4.11 este algoritmo recibe las burbujas ordenadas que serían las actuales, y por cada burbuja calcula la velocidad, pero para calcular la velocidad es necesario tener la distancia recorrida, se puede obtener a través de la fórmula euclidiana, es decir con los mismos 3 cálculos del paso anterior, para ello se hace uso de una variable auxiliar que permite recorrer la lista de coordenadas anteriores, de forma paralela al recorrido de las actuales, con ello se tiene el punto  $x(1)$ ,  $x(2)$  para calcular la distancia en  $x$ , además de  $y(1)$ ,  $y(2)$  para calcular la distancia en  $y$ , con los dos valores se aplica la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados obteniendo, este procedimiento se realiza para cada burbuja, el valor calculado se dividió por el tiempo, que corresponde al tiempo del vídeo es decir 0.0021, este valor queda en pixels, es por ello que se multiplicó por el valor de conversión de pixeles a mm, para este caso el valor de conversión es :  $0.6 / (272.544)$ ; el resultado que se obtuvo es la velocidad en mm/seg.

Para el cálculo del diámetro, se extrae la información ubicada en la posición 2 de la burbuja de cada lista, es decir el radio, y se multiplica por 2, para obtener el diámetro, este cálculo al igual que la velocidad, está inicialmente en pixels, por lo que se aplica el mismo factor de conversión, dejando el diámetro en mm, pero en esta escala el valor del diámetro no se apreció de forma adecuada, es por ello que se

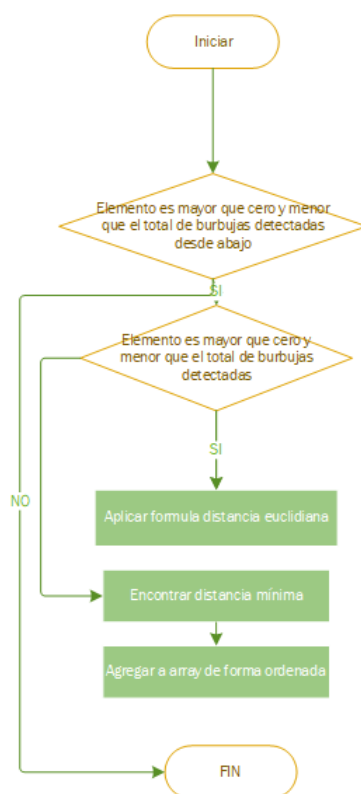


Figura 4.10: Diagrama de flujo seguimiento de MB  
**Fuente:** Elaboración propia

multiplicó por 1000, para pasar el valor a micrómetros.

## 4.5. Prueba sistema de microfotografía

Se realizaron cuatro pruebas enfocadas a los distintos componentes del sistema de microfotografía, el primero fue variando la intensidad de la luz, modificando la apertura de las cortinas del laboratorio, y la cantidad de lámparas encendidas dentro de laboratorio; finalmente se dejó una apertura total de las persianas, y encendidas las lámparas del laboratorio y la lámpara propia de la planta DAF, para realizar el realce del contorno de las MB.

El segundo fue la manipulación de la cámara de fotografía por medio de conexión inalámbrica, con ayuda de un computador portátil y una conexión wifi; se enlaza los dos dispositivos a a misma red, y se activa el modo de proyección, permitiendo con ello que el celular, pueda proyectar la pantalla y se pueda manipular desde el pc, con ayuda de la aplicación de “proyección inalámbrica”; los resultados de esta prueba muestran, que los vídeos capturados no se ven afectados por este tipo de procedimientos.

El tercer y cuarto experimento consistieron en variar la tasa de ralentización, con valores de X8 y X32, utilizando el primer valor mencionado, se observó que las microburbujas presentan velocidades muy altas, y el proceso de cámara lenta es inapreciable, en cambio al usar el segundo valor, se presencié de forma detallada la

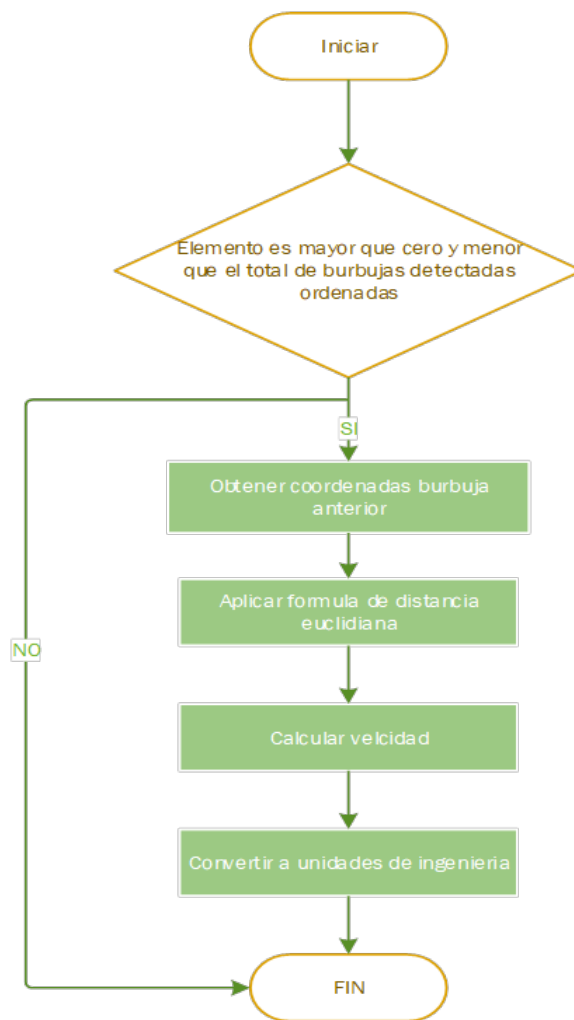


Figura 4.11: Diagrama de flujo caracterización de MB  
**Fuente:** Elaboración propia

forma de las microburbujas y la trayectoria que estas realizan.

## 4.6. Prueba planta DAF

Se realizaron 3 pruebas enfocadas a las variables principales de la planta DAF, y su efecto en el proceso, con el propósito de tener las condiciones óptimas de operación para realizar la prueba, las variables a trabajar fueron: el caudal de recirculación de agua, la presión del agua de entrada e inyección de aire; las variables mencionadas anteriormente, actúan directamente sobre el tubo Venturi

Para la inyección de aire, se hicieron algunas pruebas variando el caudal de este, pero el diámetro de burbuja presentaba mínimas variaciones entre los diferentes caudales de inyección de aire, por lo que se optó en utilizar un caudal de aire equivalente a 0.1L/m.

Para el caso de caudal de entrada, se realizó distintas variaciones entre 500 - 1000 L/h, de lo cual se pudo apreciar que el disminuir este caudal a menos de

800L/h, la presión del flujo de entrada disminuye drásticamente, y por limitaciones en las válvulas de la planta, no había la posibilidad de regular la presión a valores superiores a 27 psi, dando burbujas muy grandes, por otro lado cómo está construida la plata a un caudal superior de 1200 L/h, existía una considerable probabilidad de que algunas uniones de tuberías no soporten el aumento de presión que implica este crecimiento de caudal y como se mencionó anteriormente, por las limitaciones no se podría regular la presión a un valor óptimo de trabajo, por lo que se decidió trabajar con un valor de 1000 L/h.

Para el caso de la presión se realizó pruebas para valores entre 30-40 psi y dejando las anteriores dos variables en los valores establecidos, esto presentó cambios favorables en el tamaño y velocidad de las burbujas en un rango de 32 a 36 psi, a mayor presión de este rango la unión del tubo Venturi con la planta podría presentar problemas de desprendimiento y el tiempo de uso del mismo tubo disminuye por el material el cual está hecho, por consiguiente se establecieron las presiones de 34 psi y 36 psi para su análisis en este proyecto.

## 4.7. Prueba de escritorio algoritmo de caracterización

Para validar el funcionamiento del algoritmo se hizo un análisis “manual” siguiendo el proceso de la figura 4.14, el cual se hace con una comparativa desde la perspectiva humana y la del algoritmo en la identificación, la estimación del tamaño y seguimiento de las microburbujas, con el propósito de conocer sus limitaciones, capacidades y realizar ajustes de ser necesario. Para esto se tomaron ciertos criterios para afirmar que burbuja cumple los requisitos para ser tomada en cuenta para su posterior análisis, estos criterios fueron:

- El objeto debe poseer una figura similar a la de una esfera, con esto se descartan algunos elementos que pudieran quedar dentro del tanque que puedan alterar el análisis.
- El objeto debe estar una tonalidad oscura, la contraluz del foco de iluminación resalta los objetos dándoles en nuestro caso una tonalidad oscura.
- El objeto debe encontrarse con una resolución de imagen visiblemente aceptable, de esta forma se descartan burbujas que se encuentran muy alejadas del plano focal.
- El objeto no debe verse relativamente pequeño.

Estos criterios están sujetos a la perspectiva humana en cuanto a que se considera pequeño y la calidad de imagen del objeto. Se seleccionaron 8 videos al azar de los vídeos captados y se cargaron al algoritmo, con saltos de 15 frames, para un total de 200 frames, con el fin de ser procesados y analizados. Una vez acabado el procesamiento de los videos, el algoritmo despliega cuatro ventanas por frame, las cuales

presentan una serie de imágenes, estas representan el frame correspondiente al frame del vídeo original, el mismo frame después de aplicarse los filtro de procesamiento, las burbujas detectadas y por último las burbujas que cumplen las condiciones y a las cuales se les hará seguimiento. Para facilitar la identificación a lo largo del procesamiento se realizó una etiquetación de cada microburbuja, esto nos permite no solo saber cual es la burbuja a lo largo del procesamiento, sino también validar si esta se pierde a lo largo de los frames y su dirección del desplazamiento. Por último se imprime en consola el valor de similitud por cada burbuja.

Como se observa en la figura 4.12, la toma original muestra una línea oscura a cada lado de aproximadamente 300 pixels, esta puede representar problemas al aplicar filtros y en la identificación de microburbujas, es por eso, que se realiza un corte de forma digital de esa información, dejando un tamaño de 665 y 680, de largo y ancho, respectivamente, reforma con ello el área de trabajo a  $2,19 \text{ mm}^2$ .

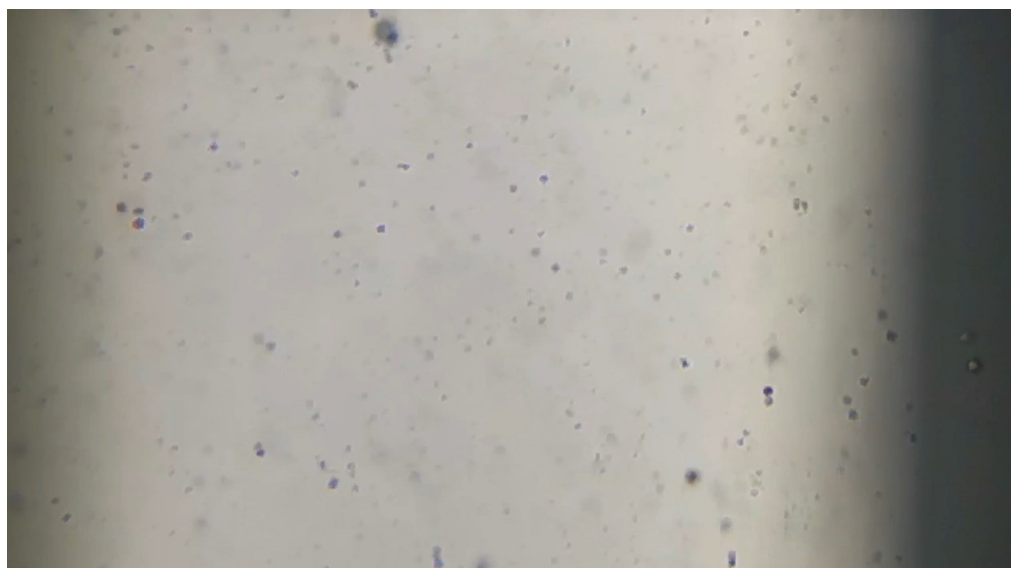


Figura 4.12: Frame tomado en cámara lenta

**Fuente:** Elaboración propia

La prueba manual fue realizada por dos personas las cuales establecieron los criterios mencionados al inicio de esta sección, las personas identificaron las burbujas que el algoritmo debe tener presentes. Los frames desplegados por el algoritmo se pasaron a un software de edición de imágenes (Photoshop), en las cuales se hizo la correspondiente marca para identificar la burbuja, también se trazó un contorno circular para ver la cantidad de pixeles correspondientes al diámetro de cada burbuja y compararlos con lo estimado por el algoritmo como se observa en la figura 4.13. Por último, se definió una línea a 670 píxeles en el eje “y”, si las burbujas se encuentran en ese espacio, entonces se debería hacer su respectivo seguimiento. Este proceso fue repetido para cada frame desplegado, los datos se organizaron en tablas las cuales se presentan por cada resultado obtenido en cada video, estas se componen del número de frame analizado, la cantidad de burbujas que cumplen las condiciones para ser tenidas en cuenta, siguiente están los diámetros en pixeles que tienen estas burbujas, en el diámetro está el valor que se establece según lo trazado por las personas en el



software de edición y su contraparte determinada por lo detectado en el algoritmo, también están las burbujas que clasifican para hacer su respectivo seguimiento en cada frame, en la columna de diámetros, se marca con color azul la primera burbuja la cual para hacer su respectivo seguimiento y el color amarillo cuando una segunda clasifica para el mismo procedimiento. Por último, al final de la tabla se presenta el error promedio en píxeles del algoritmo respecto a los datos presentes en la prueba manual.

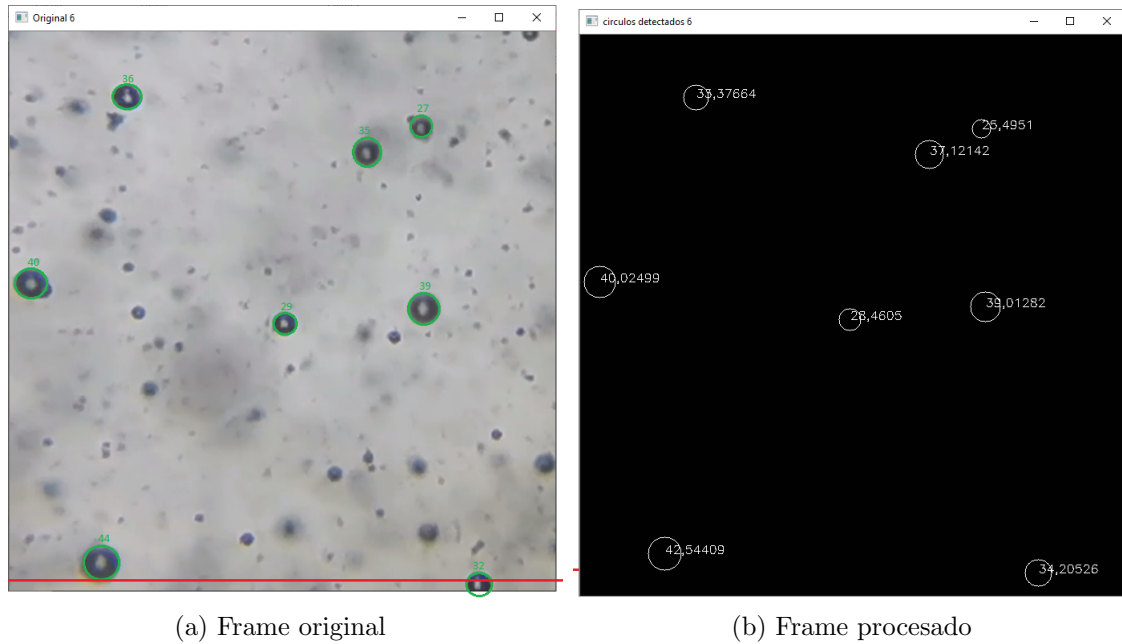


Figura 4.13: Validación diámetro  
Fuente: Elaboración propia

Video 1						
Frame	Num.Burbujas		Diámetro (Píxeles)		MB. Seguimiento	
	Real	Algo	Real	Algo	Real	Algo
1	5	6	50	48	0	0
			38	38,07		
			34	37,79		
			94	95,54		
			25	24,04		
2	6	6	57	55,73	0	0
			30	33,37		
			32	32,28		
			33	33,13		
			94	93,43		
3	6	6	60	57,008	0	0
			49			

			30	31,14		
			32	32,28		
			38	41,109		
			91	91,2		
			34	30,88		
4	6	7	95	95,63	0	0
			32	37,01		
			29	33,13		
			38	41,01		
			27	27,89		
			27	23,02		
5	6	6	88	87,69	0	0
			36	37,01		
			23	21,02		
			38	40,81		
			26	25,49		
			24	23,53		
6	5	6	63	64,51	0	0
			42	44,38		
			58	59,68		
			21	21,21		
			21	21,21		
7	3	3	35	33,01	1	1
			40	39,11		
			30	32,89		
8	5	5	50	49,09	1	1
			21	21,4		
			36	35,6		
			37	37,33		
			32	33,37		
9	4	4	40	40,81	1	1
			22	23,53		
			36	39,04		
			27	28,12		
10	10	10	48	46,065	1	1
			25	23,19		
			36	34,76		
			40	38,6		
			28	27,45		
<b>Promedio error diámetro</b>				1,52844902		

Cuadro 4.2: Datos Primer vídeo

Video 2						
Frame	Num.Burbujas		Diámetro (Píxeles)		MB. Seguimiento	
	Real	Algoritmo	Real	Algoritmo	Real	Algoritmo
1	8	8	33	36,68	0	0
			25	25,495		
			39	41,01		
			35	33,37		
			39	41,01		
			32	31,01		
			28	31,01		
			31	30,03		
2	9	9	36	39,11	0	0
			27	25,5		
			28	25,84		
			37	36,79		
			32	31,4		
			31	31,78		
			40	42,44		
			25	23,7		
			29	31,94		
3	9	10	38	36,249	0	0
			25	23,53		
			25	26,57		
			40	40,22		
			35	35,35		
			21	23,7		
			39	40,52		
			25	23,19		
			25	23,53		
4	9	9	36	37,12	0	0
			23	21,4		
			26	24,04		
			35	37,01		
			40	39,82		
			33	35,12		
			33	33,61		
			27	27,45		
29	29,21					
5	9	9	23	21,21	1	1
			40	39,111		
			26	25,49		
			40	38,28		

			33	33,13		
			37	40,02		
			33	34,2		
			26	27,01		
			31	33,61		
6	8	8	36	36,13		
			40	39,111		
			26	27,45		
			37	36,24	1	1
			37	36,68		
			25	23,7		
			26	27,45		
			30	29,15		
7	9	9	30	29,15		
			37	35,69		
			22	23,19		
			37	36,24		
			23	23,7	0	0
			41	40,71		
			36	35,46		
			26	28,6		
			24	23,53		
8	10	10	33	35,35		
			38	39,21		
			22	23,19		
			24	26,41		
			40	42,54		
			38	37,44	0	0
			37	36,68		
			40	39,21		
			26	27,313		
			24	26,48		
9	8	8	30	28,17		
			36	34,66		
			25	25,49		
			27	27,16		
			31	32,64	0	0
			42	42,5		
			30	30,36		
			27	27,01		
10	8	8	28	26,57		
			35	34,2		
			25	24,01		
			33	33,37	0	0

			34	34,2		
			41	41,1		
			37	37,33		
			27	36,567		
<b>Promedio error diámetro</b>			1,345931034			

Cuadro 4.3: Datos segundo vídeo

<b>Video 3</b>						
<b>Frame</b>	<b>Num.Burbujas</b>		<b>Diámetro (Píxeles)</b>		<b>MB. Seguimiento</b>	
	<b>Real</b>	<b>Algoritmo</b>	<b>Real</b>	<b>Algoritmo</b>	<b>Real</b>	<b>Algoritmo</b>
1	6	6	31	29,42	0	0
			32	30,36		
			41	41,01		
			29	28,46		
			40	40,01		
			25	23,19		
2	7	7	38	36,68	0	0
			25	25,4951		
			33	32,649		
			41	41,88		
			30	31,78		
			40	39,01		
3	6	6	41	41,59	0	0
			25	25,49		
			36	34,43		
			35	37,01		
			32	30,88		
			37	38,6		
4	9	9	30	29,42	1	1
			26	28,31		
			40	39,21		
			42	42,54		
			25	24,49		
			33	34,78		
			22	23,56		
			21	23,7		
			37	38,01		
5	7	7	40	39,01	1	1
			28	27,45		

			33	35,12		
			41	41,4		
			29	31,01		
			41	41,59		
			40	40,02		
6	8	8	40	39,11	1	1
			31	31,01		
			35	37,01		
			43	43,28		
			31	33,37		
			40	39,21		
			23	21,21		
			45	47,01		
7	8	8	36	33,37	2	2
			27	25,49		
			35	37,12		
			40	40,02		
			29	28,4605		
			39	39,01		
			44	42,54		
			30	32,89		
8	8	8	37	37,33	2	2
			28	27,01		
			33	32,64		
			40	39,11		
			35	37,01		
			30	29,42		
			45	45,18		
			34	33,73		
9	8	8	40	39,62	2	2
			32	31,14		
			36	37,01		
			45	44,922		
			30	31,78		
			24	25,17		
			38	38,6		
			40	39,11		
10	9	9	37	37,79	2	2
			26	28,17		
			35	38,07		
			41	41,1		
			41	41,4		
			31	32,89		
			21	23,67		

		38	39,82	
		37	36,25	
<b>Promedio error diámetro</b>			1,119126316	

Cuadro 4.4: Datos tercer vídeo

Video 4						
Frame	Num.Burbujas		Diámetro (Píxeles)		MB. Seguimiento	
	Real	Algoritmo	Real	Algoritmo	Real	Algoritmo
1	6	6	30	28,61	0	0
			32	31,2		
			25	22,94		
			31	29,31		
			38	38,49		
			30	27,97		
2	7	6	32	27,83	0	0
			34	34,76		
			25	23,48		
			28	25,29		
			30	28,61		
			38	41,12		
3	6	6	30	26,55	0	0
			34	34,88		
			25	22,87		
			26	28,63		
			38	38,04		
			25	23,75		
4	6	6	30	29,28	0	0
			32	36,02		
			29	25,91		
			29	29,28		
			37	40,06		
			25	23,84		
5	6	5	33	29,85	0	0
			32	34,23		
			28	27,44		
			35	38,01		
			24	23,59		
6	6	6	33	28,66	0	0
			34	37,24		
			29	25,83		

			29	28,34		
			34	32,27		
			25	25,65		
7	6	6	33	35,31	0	0
			32	35,38		
			28	22,61		
			27	30,12		
			35	37,99		
			24	24,36		
8	6	5	35	35,07	0	0
			34	36,18		
			28	30,77		
			36	40,58		
			25	26,53		
9	6	5	32	32,27	0	0
			34	35,85		
			38	32,4		
			36	40,62		
			24	25,85		
10	7	6	34	35,23	1	1
			34	35,64		
			25	21,87		
			26	25,03		
			38	35,98		
			37	37,3		
<b>Promedio error diámetro</b>				2,107894737		

Cuadro 4.5: Datos Cuarto vídeo

Video 5						
Frame	Num.Burbujas		Diámetro (Píxeles)		MB. Seguimiento	
	Real	Algoritmo	Real	Algoritmo	Real	Algoritmo
1	4	4	33	27,89	0	0
			49	50,43		
			35	36,79		
			36	41,03		
2	4	4	56	56,33	1	1
			37	38,47		
			37	40,15		
			35	35,68		



3	5	5	28 60 39 39 34	24,3 61,83 39,05 41,39 35,42	1	1
4	5	5	29 32 40 37 34	24,01 33,1 41,63 37,03 37	1	1
5	6	6	37 57 38 36 34 52	34,89 59,24 38,2 38,15 35,32 52,2	2	2
6	6	6	38 53 38 38 32 55	37,68 53,41 39,76 40,65 32,14 55,82	2	2
7	5	6	34 41 39 25 43	30,78 41,23 41,47 25,23 41,56	2	2
8	6	6	36 54 28 38 34 54	34,51 55,78 27,65 39,82 35,47 55,64	2	2
9	6	6	40 53 25 37 35 53	40,73 55,27 23,59 41,04 33,65 52,33	2	2
10	4	4	43 36 36 54	47,01 37,79 30,42 57,15	2	2

Promedio error diámetro

1,854705882

Cuadro 4.6: Datos quinto vídeo

Video 6						
Frame	Num.Burbujas		Diámetro (Píxeles)		MB. Seguimiento	
	Real	Algoritmo	Real	Algoritmo	Real	Algoritmo
1	8	8	25	28,7	1	1
			79	80,63		
			40	42,18		
			25	23,9		
			44	46,24		
			34	37,1		
			72	75,28		
41	43,59					
2	7	7	94	95,12	1	1
			38	38,99		
			26	27,64		
			53	55,25		
			31	34,05		
			68	73,41		
			38	36,54		
3	5	5	24	23,62	1	1
			42	42,31		
			66	67,58		
			41	40,81		
			37	36,07		
4	5	5	39	40,46	1	1
			44	44,65		
			25	25,19		
			62	63,01		
			34	35,62		
5	5	5	36	36,74	1	1
			42	41,98		
			27	26,75		
			68	73,02		
			37	37,83		
6	5	5	38	39,76	1	1
			44	47,6		
			26	27,05		
			71	73,67		

			36	35,12		
7	5	5	38 46 28 71 34	39,34 43,72 27,88 75,16 33,83	1	1
8	5	6	38 49 28 71 36	39,46 49,2 28,91 75,43 35,64	1	1
9	5	6	39 45 26 68 33	39,87 46,59 25,82 69,09 31,28	1	1
10	5	5	39 59 27 67 23	40,89 61,55 27,83 70,02 21,31	0	0
<b>Promedio error diámetro</b>				1,668		

Cuadro 4.7: Datos sexto vídeo

Video 7						
Frame	Num.Burbujas		Diámetro (Píxeles)		MB. Seguimiento	
	Real	Algoritmo	Real	Algoritmo	Real	Algoritmo
1	5	5	56	57,87	0	0
			37	38,91		
			27	27,04		
			63	65,66		
			22	23,48		
2	5	5	55	55,09	0	0
			23	25,23		
			41	43,11		
			25	27,85		
			69	71,82		
3	7	8	57	59,5	0	0
			22	21,06		

			26	25,67		
			40	42,39		
			25	28,01		
			27	29,23		
			59	61,79		
4	10	10	49	50,2		
			23	23,79		
			22	23,64		
			30	29,51		
			40	40,35	1	1
			23	25,09		
			21	21,56		
			51	52,83		
			59	61,37		
			23	23,89		
5	10	10	51	53,64		
			30	29,03		
			21	21,2		
			51	52,39		
			40	42,56	1	1
			25	27,85		
			23	23,07		
			68	71,48		
			55	57,69		
			29	31,78		
6	6	6	60	59,21		
			40	40,71		
			30	30,36	1	1
			60	61,4		
			54	55,44		
			28	27,45		
7	7	7	55	56,76		
			40	39,82		
			60	62,36		
			55	57,008	2	2
			40	40,52		
			28	28,6		
			26	27,166		
8	5	6	55	56,3		
			41	41,59		
			40	40,52	2	2
			26	27,01		
			26	25,49		
			62	64,88		
9	5	5	60		1	1

			20	21,02		
			58	56,3		
			35	37,01		
			27	25,49		
10	6	6	63	63,00794	1	1
			22	23,19		
			52	51,47		
			38	39,92		
			22	21,21		
			24	23,19		
<b>Promedio error diámetro</b>				1,458059697		

Cuadro 4.8: Datos séptimo vídeo

Video 8						
Frame	Num.Burbujas		Diámetro (Píxeles)		MB. Seguimiento	
	Real	Algoritmo	Real	Algoritmo	Real	Algoritmo
1	9	9	30	31,78	0	0
			80	79,05		
			40	40,22		
			27	26,41		
			47	48,1		
			50	50,53		
			24	23,7		
			43	41,01		
			53	55,22		
2	10	10	53	55,22	1	1
			22	21,21		
			40	40,52		
			24	23,53		
			42	43,01		
			44	44,65		
			21	23,19		
			58	57,008		
			33	32,64		
36	37,65					
3	10	10	54	55,87	1	1
			35	37,01		
			60	59,41		
			45	43,56		
			22	23,19		
			43	44,29		

			50	50,69		
			32	32,64		
			22	23,53		
			35	36,24		
4	8	8	45	47,26	1	1
			30	29,96		
			42	42,544		
			42	42,44		
			33	35,01		
			25	25,96		
			50	50,21		
			39	40,81		
5	8	8	38	37,12	1	1
			25	25,49		
			45	44,38		
			55	53,16		
			40	39,31		
			22	23,7		
			55	53,23		
			40	39,27		
6	8	8	53	55,22	1	1
			37	38,6		
			23	25,49		
			43	44,92		
			39	40,22		
			23	23,53		
			37	38,6		
			37	35,8		
7	7	7	55	56,08	1	1
			42	44,38		
			38	37,01		
			29	31,01		
			41	41,02		
			57	59,21		
			42	43,5		
8	8	8	43	43,56	1	1
			43	44,65		
			47	49,98		
			24	26,96		
			50	51,24		
			42	44,38		
			53	55		
			40	41,5		
			53	55,15		

			40	41,01		
			25	27,01		
			48	49,01		
			44	45,18		
			51	53,23		
			35	36,2		
10	6	6	48	49,09	1	1
			25	25,49		
			40	39,11		
			39	41,59		
			45	46,32		
			39	40		
<b>Promedio error diámetro</b>				1,313901235		

Cuadro 4.9: Datos octavo vídeo

En la realización de la prueba de escritorio se hicieron los respectivos ajustes a los filtros del algoritmo para mejorar su rendimiento, estos corresponden a:

- Filtro de mediana: Se ajustó el valor inicial de este método, estableciéndose en un valor de 19.
- Binarización: Se cambió el valor de umbral a 120.
- Filtro Gauss: Se aumentó el tamaño de influencia del filtro a 7x7.
- Filtro de Hough: Se afinó esta sección con los siguientes valores: 1, 30, 12, 14, 5, 50, correspondientes a cada uno de los componentes del método.

Se repitió la prueba escritorio con los nuevos ajustes, lo cual dio una imagen más limpia con los datos de interés y con una sensibilidad adecuada en la detección de microburbujas, logrando una mejora en el desempeño del algoritmo de un 40% a comparación de los parámetros de filtros iniciales, el error general del algoritmo es de 1,54950849 pixeles, que aplicando el factor de conversión equivaldrían a 3,41121 $\mu$ m, en la detección de algunas burbujas se presentaba el caso en que el algoritmo detectaba una burbuja de más, esto debido a que algunas burbujas de gran tamaño del fondo presentaban una tonalidad similar a la de las burbujas que se encuentran más cercanas a la cámara, lo cual a ojos del algoritmo se presentaban como una dentro de los parámetros establecidos procediendo a contabilizarlas. En otros casos menos frecuentes el algoritmo tenía en cuenta menos burbujas, puesto que en algunos instantes de los frames, el movimiento de las burbujas deformaba la figura, lo cual en algunos casos las hacía ser detectadas en un menor tamaño, por lo cual el algoritmo las descarta en esos instantes, ya que este posee un límite de tamaño mínimo a detectar.

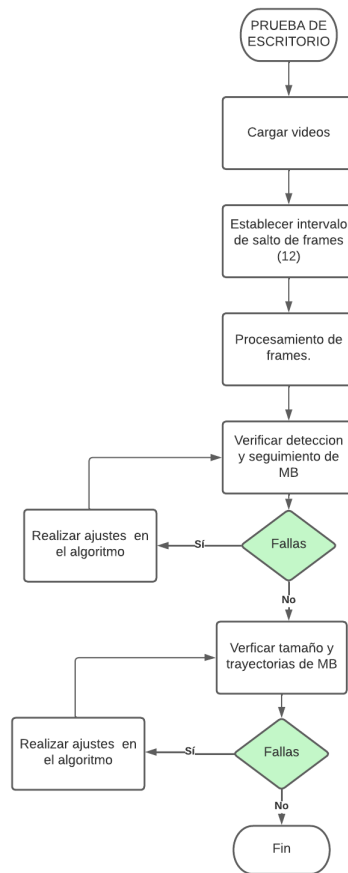


Figura 4.14: Prueba de escritorio  
**Fuente:** Elaboración propia

## 4.8. Interfaz de Usuario

La interacción entre los usuarios y la herramienta es un factor importante, por eso se creó interfaz creada en la plataforma de UNITY sobre la versión 2020.3.13f1, con ayuda de la librería UI, que viene incorporada con la herramienta, y muestra elementos de interfaz sencillos, la aplicación está compuesta de 5 escenas, con el fin de que estas presenten de forma sencilla y concreta la información relevante del proceso de caracterización de microburbujas al usuario, antes de ingresar a cada escena, se desarrolló una sección en donde se muestra el escudo de la Universidad del Cauca por dos segundos, después de ello se hace una transición automática hacia la escena de "MENU", de manera general las escenas utilizan como fondo una imagen creada en base a los colores representativos de la Universidad del Cauca, que tiene como color dominante el azul, con tonalidades negras en los bordes que hacen un énfasis en el centro de la imagen y círculos que simulan ser burbujas, cada escena se trabajó de forma independiente, y los conectores entre ellas son los botones ubicados en las mismas, que permiten la navegación total entre la aplicación, estas escenas se describen en detalle a continuación:



### 4.8.1. Menú

En esta escena se disponen algunas opciones simples que el usuario puede hacer como se muestra en la figura 4.15, en este caso el fondo de la escena tiene dos pequeñas variaciones, en la parte superior izquierda e inferior derecha se agregan dos triángulos de colores azul y rojo respectivamente, al igual que se tiene un texto en la parte superior central de la escena con el nombre "MB DETECTOR", haciendo referencia al nombre de la aplicación, hace uso del tipo de letra Anton-Regular en un tamaño 100 y con alineación central, debajo se encuentra una imagen, diseñada para ilustrar lo que se logra con la aplicación respecto a las microburbujas, sobre las cuales se puso una flecha en doble sentido que cubre el diámetro de la burbuja, además en la parte superior se encuentra la letra griega theta, en el lado vertical se presenta otra flecha, cuya punta es dirigida hacia arriba con el texto de velocidad, representando con ello el movimiento en de las microburbujas.

En relación a los botones, primeramente esta el botón de "PLAY", ubicado en la parte central inferior, con un tamaño de 298 x 254 de ancho y alto respectivamente, además se agrego una imagen, en colores negro de fondo, y un triángulo orientado al eje vertical, generando con ello el símbolo de inicio más conocido, este en sus bordes tiene los colores rojo y celeste, en términos funcionales, este botón es el que da la señal de inicio al procesamiento de un vídeo pre-cargado en la aplicación como demostración del funcionamiento de la misma. El segundo botón que se observa es el de "SELECCIONAR VIDEO", ubicado en la parte inferior izquierda, con un tamaño de 226 de alto y ancho, este tiene una imagen en color blanco, de un archivo con un símbolo en la parte inferior izquierda, que representa la carga de los archivos; en caso de que el usuario tenga vídeos propios que desee analizar. Este botón accede al gestor de archivos en caso de que se esté usando la versión de la aplicación en PC y permite seleccionar el vídeo de interés. En caso que se esté ejecutando la aplicación en un dispositivo móvil esta opción pide los permisos necesarios al usuario para que esta pueda acceder a la galería de fotos y vídeos del usuario, donde se puede navegar entre el contenido y seleccionar el vídeo que desee procesar.

El último botón de esta escena, está ubicado en la parte superior derecha, con un tamaño de 164 x 123 de ancho y alto, respectivamente, tiene como imagen una "i" contenida sobre un círculo, que representa la opción de "ACERCA DE" para brindar más información.

### 4.8.2. Procesamiento

Para acceder a esta escena, se realiza a través del botón "PLAY" en la escena de "MENÚ", aquí se presenta al usuario el material multimedia predeterminado o el proporcionado por el usuario como se muestra en la figura 4.16, esta escena tiene un texto dinámico en la parte inferior izquierda, que muestra el estado del proceso mientras se reproduce el material, hace uso del tipo de letra Anton-Regular, con un tamaño de 70 y una alineación central, al igual que en la escena de "PLAY", se tiene el texto en la parte superior central, con el nombre de la aplicación.

Para la visualización del vídeo se utilizó una RawImage, la cual es dinámica, la cual permite mostrar todo tipo de información, tiene un tamaño de 2000 x 740 de ancho y largo, respectivamente; internamente en esta sección hace el procesamiento

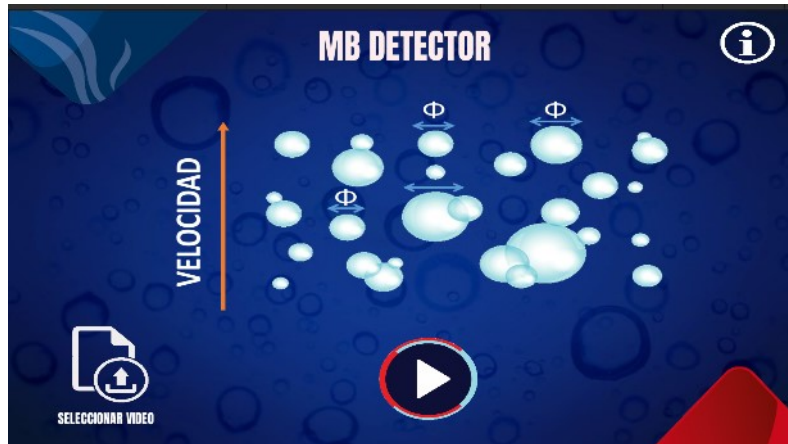


Figura 4.15: Interfaz menu  
**Fuente:** Elaboración propia

del vídeo, una vez terminado este proceso, se habilitará el botón de “HISTOGRAMA” el cual le dará acceso al usuario para poder ir a las siguientes escenas de la aplicación; este botón, está ubicado en la parte inferior derecha, con una imagen de flecha orientada a la derecha, con un tamaño de 200 x 150 de ancho y alto, respectivamente, además en la parte superior, se encuentra una imagen, de un diagrama estadístico, con un tamaño de 210 x 150 de ancho y alto, respectivamente.



Figura 4.16: Interfaz procesamiento  
**Fuente:** Elaboración propia

### 4.8.3. Histograma Diámetro

Esta escena muestra los resultados del procesamiento referente al diámetro de las burbujas como se muestra en la figura 4.17, aquí se despliega un gráfico el cual presenta un plano donde se aprecia el tamaño promedio de las burbujas detectadas en cada frame, este se encuentra escalado en un rango de 0-200  $\mu\text{m}$  en el eje y, de 0 a 1200 frames en el eje x, donde se utiliza círculos que hacen referencia al diámetro de

las microburbujas detectadas, para la implementación de este se usa una RawImage, de tamaño de 2000 x 740 de ancho y alto, respectivamente.

También se cuenta con algunos textos, uno de ellos ubicado en la parte superior central, con el nombre de la escena, cuya fuente es Anton-Regular, con un tamaño de 100 y una alineación central, además tenemos dos textos auxiliares, ubicados en la parte inferior, uno de ellos con la información "MB Detectadas: Diámetro Promedio:", y el otro "Mínimo: Máximo:", los dos utilizan una fuente de Anton-Regular, un tamaño de 45 y una alineación central izquierda; de una forma dinámica tenemos 4 textos, ubicados frente a cada texto auxiliar, el primero la cantidad de burbujas detectadas a lo largo del vídeo, el segundo, muestra, el diámetro promedio de las burbujas en el vídeo, los otros dos muestran el diámetro máximo y mínimo captado; todos utilizan la fuente Anton-Regular, tamaño de 50 y una alineación central izquierda.

Por último, en la parte superior derecha, se tiene un botón con una flecha orientada a la derecha, de un tamaño de 180 x 125 de ancho y alto, utilizado para acceder a la siguiente escena con más información.

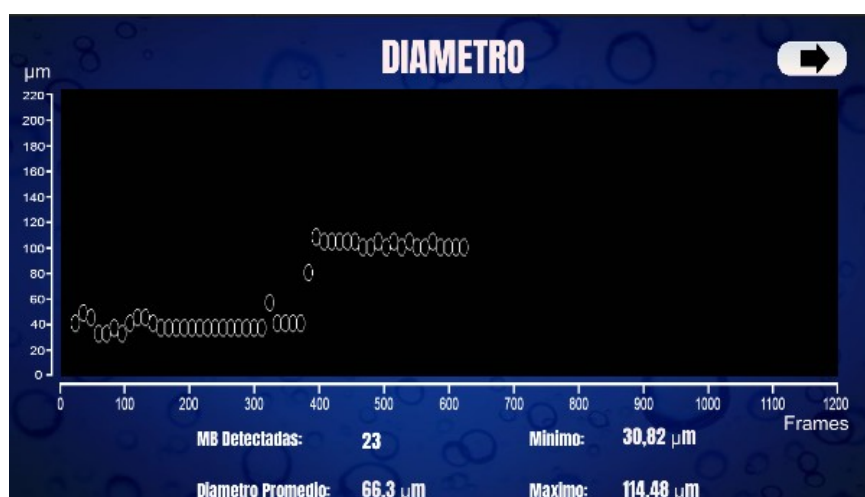


Figura 4.17: Histograma diámetro

Fuente: Elaboración propia

#### 4.8.4. Histograma Velocidad

Esta escena muestra los resultados del procesamiento referente a la velocidad de las burbujas como se muestra en la figura 4.3, al igual que en la anterior escena se despliega un gráfico el cual presenta un plano donde se aprecia la velocidad promedio de las burbujas detectadas en cada frame, este se encuentra escalado en un rango de 0-20 mm/s en el eje y, de 0 a 1200 frames en el eje x, donde se utiliza flechas que hacen referencia a velocidad promedio de las microburbujas detectadas, para la implementación de este se usa una RawImage, de tamaño de 2000 x 740 de ancho y alto, respectivamente.

También se cuenta con algunos textos, uno de ellos ubicado en la parte superior central, con el nombre de la escena, cuya fuente es Anton-Regular, con un tamaño de

100 y una alineación central, además hay dos textos auxiliares, ubicados en la parte inferior, uno de ellos con la información “MB Detectadas: Velocidad Promedio:”, y el otro “Mínimo: Máximo:”, los dos utilizan una fuente de Anton-Regular, un tamaño de 45 y una alineación central izquierda; de una forma dinámica tenemos 4 textos, ubicados frente a cada texto auxiliar, el primero la cantidad de burbujas detectadas a lo largo del vídeo, el segundo, muestra, la velocidad promedio de las burbujas en el vídeo, los otros dos muestran la velocidad máximo y mínimo captado; todos utilizan la fuente Anton-Regular, tamaño de 50 y una alineación central izquierda.

Por último, en la parte superior derecha, se tiene un botón con una flecha orientada a la izquierda, en caso que se requiera volver a observar la información referente al diámetro de un tamaño de 167 x 130 de ancho y alto, respectivamente, y un botón con una imagen de casa, para pasar al menú nuevamente y analizar un próximo vídeo, ubicado en la parte superior derecha, con un tamaño de 180 x 146 de ancho y alto, respectivamente.

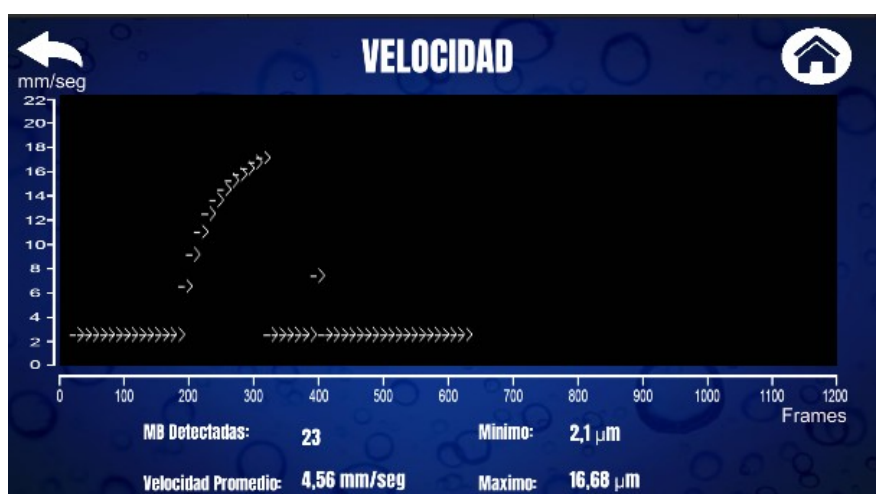


Figura 4.18: Histograma velocidad

Fuente: Elaboración propia

#### 4.8.5. Acerca De

la escena “ACERCA DE”, tiene un texto que muestra una pequeña descripción de la aplicación, ubicado en la parte central superior que llega hasta la mitad de la escena, con un tamaño de 90, una fuente Anton-Regular, y una alineación central, en color blanco; más abajo se encuentra otro texto auxiliar que dice “Elaborado por:” con un tamaño de 60, una fuente Anton-Regular, y una alineación central, en color gris; finalmente hay un texto, con el nombre de los desarrolladores, con un tamaño de 75, una fuente Anton-Regular, y una alineación central, en color blanco; como se muestra en la figura 4.19 y el botón MENU para regresar al flujo principal.

Además de un botón con una imagen de una casa, para pasar al menú nuevamente y analizar un próximo vídeo, ubicado en la parte superior derecha, con un tamaño de 300 x 240 de ancho y alto, respectivamente.

Esta aplicación realiza el proceso de caracterización de microburbujas, Es decir calcula la velocidad de ascenso y su diámetro, junto con el histórico respectivo a los promedios de estas variables.

Elaborado por:

Carlos Esteban Ordoñez  
María Gabriela Guerrero



Figura 4.19: Interfaz Acerca De  
**Fuente:** Elaboración propia

# Capítulo 5

## Resultados

En este capítulo se describen los resultados de la implementación del sistema de caracterización como un todo, es decir, el algoritmo, el sistema de microfotografía y la planta DAF, además se presentan los resultados de la evaluación de la interfaz.

### 5.1. Diseño Experimental

En la implementación de este proyecto se planteó la toma de vídeos a cámara lenta de la planta en funcionamiento a distintas presiones, las presiones que se escogieron fueron 34 y 36 psi como en la figura 5.1, todo estos considerando el entorno y las limitaciones de la planta DAF del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad del Cauca, se capturaron 81 vídeos de duración de 10 segundos (tiempo es delimitado por el software de captura) por presión en cada prueba, realizando un total de 2 pruebas generando un lote de vídeos en la primera prueba de 40 y en el segundo un total de 41, con el objetivo de observar y corroborar según la literatura el comportamiento de las microburbujas (tamaño y velocidad) como en la tabla 5.1.

La planta en ambos lotes trabajó con un caudal de 1000 L/h como se observa en la figura 5.2, una inyección de aire de 0,1 L/m como se ve en la figura 5.3, y se trató de que la iluminación fuera constante. La planta estuvo en funcionamiento durante 15 minutos, tiempo estipulado por las instrucciones de uso de la motobomba que recircula el agua en la planta y el material del tubo Venturi, al ser este una impresión 3D, el agua a presión desgasta este material, influyendo en las microburbujas y razón por la cual en cada prueba se hizo uso de distintos tubos Venturi.

Los vídeos captados, fueron posteriormente procesados por el algoritmo desarrollado, adicional a estos se les realizó un corte de un segundo al inicio del vídeo y un segundo al final, puesto que en esos instantes los vídeos se encuentran a una

	34 psi	36 psi
Tamaño		
Velocidad		

Cuadro 5.1: Tabla Diseño experimental

velocidad normal. Para determinar los datos obtenidos los cuales corresponden a velocidad y tamaño promedio, valor máximo y mínimo respecto a velocidad y tamaño y cantidad de burbujas detectadas. Cabe resaltar que el algoritmo toma en cuenta las burbujas capturadas dentro del plano focal y las condiciones desarrolladas en la prueba de escritorio, con los valores antes mencionados se hará el respectivo análisis, para dar conclusiones respecto a las pruebas empleadas, el desempeño del algoritmo y sus limitaciones de operación.

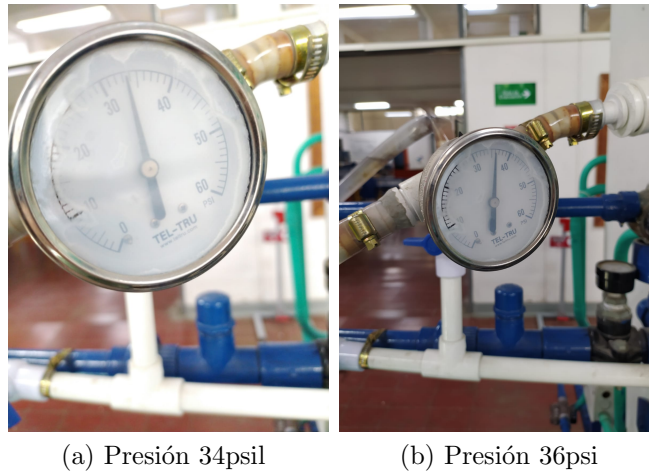


Figura 5.1: Presiones a usar  
**Fuente:** Elaboración propia

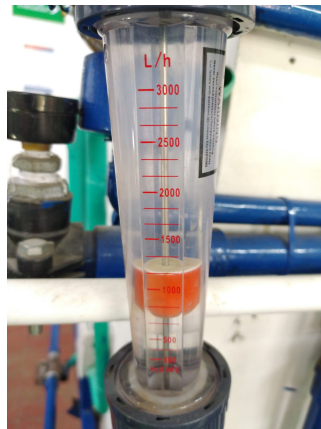


Figura 5.2: Caudal de recirculación  
**Fuente:** Elaboración propia

## 5.2. Sistema de microfotografía

En este apartado se presentan los resultados de ambos lotes de vídeos, por ende, esta sección se divide en lo obtenido en cada lote, al final de cada análisis se presentan sus respectivos resultados y condiciones que influenciaron dichos resultados,





Figura 5.3: Inyección de aire  
**Fuente:** Elaboración propia

también la efectividad del sistema de microfotografía respecto a estas condiciones y sus limitantes.

Las pruebas se realizaron bajo las condiciones expuestas en el diseño experimental, es decir, un caudal de 1000 L/h y una inyección de aire de 0.1 L/m, la iluminación se mantuvo constante durante el proceso de realización del material multimedia. Los resultados obtenidos en las condiciones antes mencionadas se presentan en forma de tablas como la tabla, en estas se encuentra la información individual de cada video, esta corresponde a la velocidad y el diámetro promedio de cada burbuja en dicho video como se observa en la tabla 5.2, estas variables serán utilizadas para su posterior análisis estadístico, la información de los demás videos se presentan los anexos del documento, con el propósito de no saturar el documento.

Video 1 34psi primer lote		
Num.Burbuja	Vel. Promedio	Dia.Promedio
1	2,09664704	66,71437132
2	2,09664704	63,49668353
3	2,09664704	71,27401343
4	2,09664704	74,81578181
5	2,09664704	81,08008517
6	11,5869	70,46501202
7	2,09664704	74,23622878
8	2,09664704	73,94301925
9	2,09664704	63,54827957
10	2,09664704	60,50179786
11	2,09664704	78,19731225
12	2,09664704	67,86210442
13	2,09664704	73,55181804
14	2,09664704	80,60691811
15	2,09664704	81,52323998
16	2,09664704	66,58610333



17	2,09664704	79,64833205
----	------------	-------------

Cuadro 5.2: Resultados primer video lote 1 34 psi

Adicional se presenta la información resumida expuesta en la aplicación al usuario, las cuales están divididas según la variable y la presión utilizada en el video. Respecto al primer lote como se observa en las tablas 5.3 y 5.5, se encuentra la información relacionada con el diámetro de las burbujas y en las tablas 5.4 y 5.6 se encuentran registrados los datos correspondientes a la velocidad de estas mismas. En el primer lote se tomaron 18 videos con una presión de 34 psi y 22 videos con 36 psi, para un total de 40 videos, del total se seleccionaron 27 videos que cumplían las condiciones para ser procesados adecuadamente.

Primer lote 34 psi				
Video	Num.Burbujas	Diámetro ( $\mu\text{m}$ )		
		Mínimo	Máximo	Promedio
1	17	52,8355	92,4621	72,24
2	11	35,2236	88,0591	68,27
3	19	22,0147	83,6562	49,23
4	12	22,0147	105,6710	62,97
5	10	22,0147	88,0591	47,12
6	16	30,8207	118,8798	64,9
7	16	26,4177	149,7005	104,63
8	16	26,4177	70,4473	47,88
9	16	26,4177	96,8650	62,52
10	22	44,0295	118,8798	75,99
11	11	22,0147	149,7005	52
12	16	22,0147	134,7305	41,94
13	13	22,0147	145,2976	61,31

Cuadro 5.3: Resultados diámetro primer lote 34 psi

Primer lote 34 psi				
Video	Num.Burbujas	Velocidad (mm/s)		
		Mínima	Máxima	Promedio
1	17	2,0966	11,5869	2,65
2	11	2,0966	5,3202	2,59
3	19	2,0966	12,5047	2,69
4	12	2,0966	7,8789	2,58
5	10	2,0966	3,7016	2,17
6	16	2,0966	11,0534	3,89

7	16	2,0966	11,7166	2,7
8	16	2,0966	2,0966	2,1
9	16	2,0966	15,6273	7,71
10	22	2,0966	5,8311	2,47
11	11	2,0966	17,1599	3,55
12	16	2,0966	14,8250	8,97
13	13	2,0966	10,7277	3,6

Cuadro 5.4: Resultados velocidad primer lote 34 psi

Primer lote 36 psi				
VÍdeo	Num.Burbujas	Diámetro ( $\mu\text{m}$ )		
		Mínimo	Máximo	Promedio
1	16	22,0147	211,3420	86,78
2	11	35,2236	149,7005	79,04
3	12	35,2236	189,3272	102.31
4	13	26,4177	180,5213	88.58
5	16	35,2236	114,4769	62,29
6	13	30,8207	83,6562	58,1
7	27	26,4177	101,2680	50,11
8	15	22,0147	195,9316	89.84
9	18	22,0147	149,7005	65.18
10	10	22,0147	110,0739	60.13
11	15	30,8207	113,0092	78.5
12	19	44,0295	136,4917	82.38
13	10	30,8207	184,9242	80.9
14	14	22,0147	193,7301	83.22

Cuadro 5.5: Resultados diámetro primer lote 36 psi

Primer lote 36 psi				
VÍdeo	Num.Burbujas	Velocidad (mm/s)		
		Mínima	Máxima	Promedio
1	16	2,0966	14,6563	3,57
2	11	2,0966	10,6365	3,64
3	12	2,0966	14,5087	7,11
4	13	2,0966	2,8017	2,15
5	16	2,0966	4,6051	2,25
6	13	2,0966	2,0966	2,1
7	27	2,0966	16,9476	6,04
8	15	2,0966	11,9172	5,13

9	18	2,0966	9,8784	3,68
10	10	2,0966	4,7312	2,55
11	15	2,0966	2,0966	2,1
12	19	2,0966	10,4066	4,06
13	10	2,0966	12,0557	3,09
14	14	2,0966	8,2364	2,53

Cuadro 5.6: Resultados velocidad primer lote 36 psi

En el segundo lote, al igual que el primero se conservaron las condiciones previamente establecidas, con la única variante que para este lote se usó un distinto tubo Venturi, debido al desgaste mencionado en el diseño experimental, se tomaron 25 vídeos a 34 psi y para 36 psi 26 para un total de 41. De este lote se seleccionaron 24 vídeos que cumplían las condiciones antes expuestas, se observa en las tablas 5.7 y 5.9, la información relacionada con el diámetro, y en las tablas 5.8 y 5.10, se encuentran registrados los datos de velocidad.

Segundo lote 34 psi				
Vídeo	Num.Burbujas	Diámetro ( $\mu\text{m}$ )		
		Mínimo	Máximo	Promedio
1	20	22,0147	189,3272	105,88
2	24	22,0147	211,3420	94,22
3	21	26,4177	184,9242	62,95
4	31	44,0295	193,7301	103,09
5	16	39,6266	193,7301	86,83
6	35	22,0147	167,3124	74,96
7	17	22,0147	211,3420	106,96
8	40	26,4177	206,9390	90,18
9	16	22,0147	198,1331	91,17
10	27	22,0147	180,5213	90,57
11	26	22,0147	211,3420	75,57
12	28	22,0147	180,5213	82,42
13	23	30,8207	215,7449	93,23

Cuadro 5.7: Resultados diámetro segundo lote 34 psi

Segundo lote 34 psi				
Vídeo	Num.Burbujas	Velocidad (mm/s)		
		Mínima	Máxima	Promedio
1	20	2,0966	12,7219	2,63
2	24	2,0966	12,4588	5,78

3	21	2,0966	6,6973	2,32
4	31	2,0966	7,7355	2,87
5	16	2,0966	14,2034	3,54
6	35	2,0966	9,3968	3,49
7	17	2,0966	16,1556	3,21
8	40	2,0966	10,2320	2,56
9	16	2,0966	2,0966	2,1
10	27	2,0966	11,6747	2,68
11	26	2,0966	2,0966	2,1
12	28	2,0966	8,1826	2,47
13	23	2,0966	12,2649	2,95

Cuadro 5.8: Resultados velocidad segundo lote 34 psi

Segundo lote 36 psi				
VÍdeo	Num.Burbujas	Diámetro ( $\mu\text{m}$ )		
		Mínimo	Máximo	Promedio
1	18	22,0147	162,9094	88,69
2	29	35,2236	215,7449	92,27
3	38	22,0147	165,8447	77,95
4	20	22,0147	206,9390	91,69
5	24	26,4177	206,9390	91,65
6	19	22,0147	193,7301	84,49
7	19	22,0147	198,1331	63,1
8	16	30,8207	202,5361	98,15
9	25	22,0147	149,7005	59,89
10	11	35,2236	132,0887	73,81
11	22	22,0147	198,1331	74,9
12	28	33,0221	198,1331	71,5

Cuadro 5.9: Resultados diámetro segundo lote 36 psi

Segundo lote 36 psi				
VÍdeo	Num.Burbujas	Velocidad (mm/s)		
		Mínima	Máxima	Promedio
1	18	2,0966	12,8390	3,03
2	29	2,0966	7,4193	2,52
3	38	2,0966	11,3939	4,53
4	20	2,0966	6,5507	2,35
5	24	2,0966	12,9895	3,51
6	19	2,0966	11,7284	4,43

7	19	2,0966	8,1193	3,008
8	16	2,0966	14,3450	4,77
9	25	2,0966	13,1504	4,46
10	11	2,0966	13,7998	5,08
11	22	2,0966	8,9282	3,39
12	28	2,0966	21,8404	7,18

Cuadro 5.10: Resultados velocidad segundo lote 36 psi

A partir de los datos presentados en las tablas, existió una distribución variada de tamaños de microburbujas cómo se expresa en el gráfico de la figura 5.4, se puede apreciar valores desde  $22\mu\text{m}$  hasta  $215\mu\text{m}$  aproximadamente, como se muestra en las figuras 5.5, 5.6, 5.7 y 5.8 existen valores atípicos en la distribución de los datos registrados en las pruebas, estos pueden ser ocasionados al desgaste mencionado del tubo Venturi a lo largo de su uso y también al mismo desplazamientos de las burbujas, ya que en algunos instantes de tiempo el mismo movimiento al ser captado digitalmente, puede presentar deformaciones en cuanto a la figura de la burbuja, variando así su tamaño de mayor o menor forma, pero esta situación dio oportunidades de presenciar distintos tamaños de burbujas para probar el alcance del algoritmo, el cual cumple satisfactoriamente la detección de burbujas dentro de los rangos estipulados en los objetivos e incluso tamaños mucho menores o mayores. De la prueba también se observó que el promedio general en cuanto al diámetro, los vídeos a 34 psi del primer lote fue de  $62,0667\mu\text{m}$  y de 36 psi del mismo lote fue  $74,5557\mu\text{m}$ , por otro lado, en el segundo lote los promedios fueron de  $80,3180\mu\text{m}$  y  $88,4600\mu\text{m}$  para 36 y 34 psi. Esta distinción en cuanto al tamaño promedio en cada lote en el mismo valor de presión se atribuye al cambio de tubos Venturi, puesto que al ser una impresión 3D, cada tubo presenta comportamientos distintos al generar microburbujas.

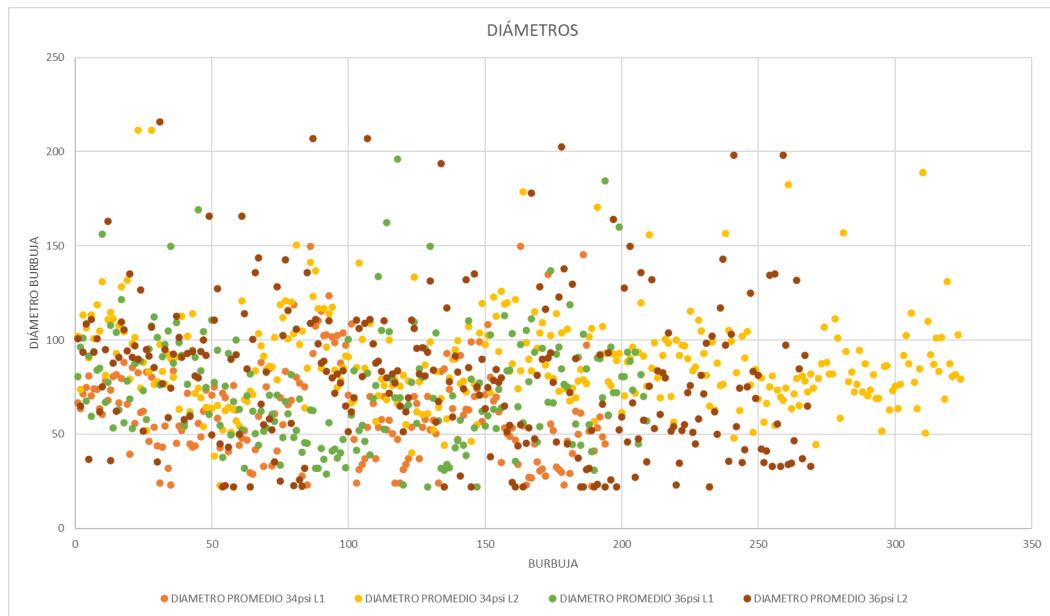


Figura 5.4: Dispersión de datos respecto al diámetro en ambas pruebas  
**Referencia: Elaboración propia**

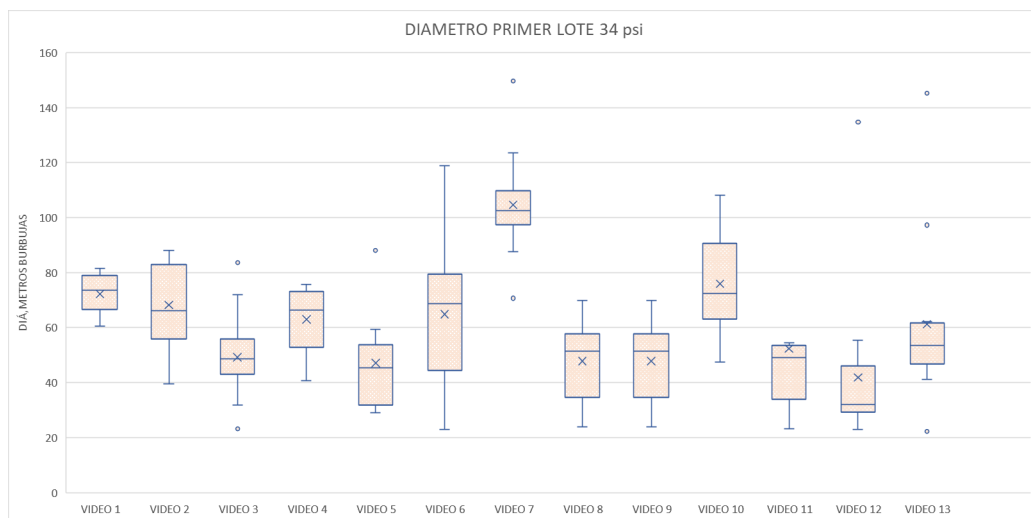


Figura 5.5: Gráfico de caja y bigotes 34 psi L1.  
**Referencia: Elaboración propia**

En cuanto a la velocidad siempre se mantuvo un valor mínimo estable de 2,0966 mm/seg como se aprecia en la figura 5.9, esto puesto a que la velocidad es influenciada por el tamaño y que el algoritmo tiene un rango mínimo de detección por tamaño, las velocidades de estas pequeñas burbujas se mantenían prácticamente similares. Se presentó un rango de velocidad de 2,0966 mm/seg hasta 21,8404 mm/seg, en el cálculo de esta variable se presentaron algunos casos como que algunas burbujas presentan una alta velocidad debido a que estas se estaban desplazando linealmente hacia arriba y también que algunas presentaban mayor tamaño, como la literatura define que burbujas de mayor tamaño tienen mayores velocidades, otro caso es el que algunas se desplazan hacia el fondo, lo cual da un efecto de velocidad más reducida,

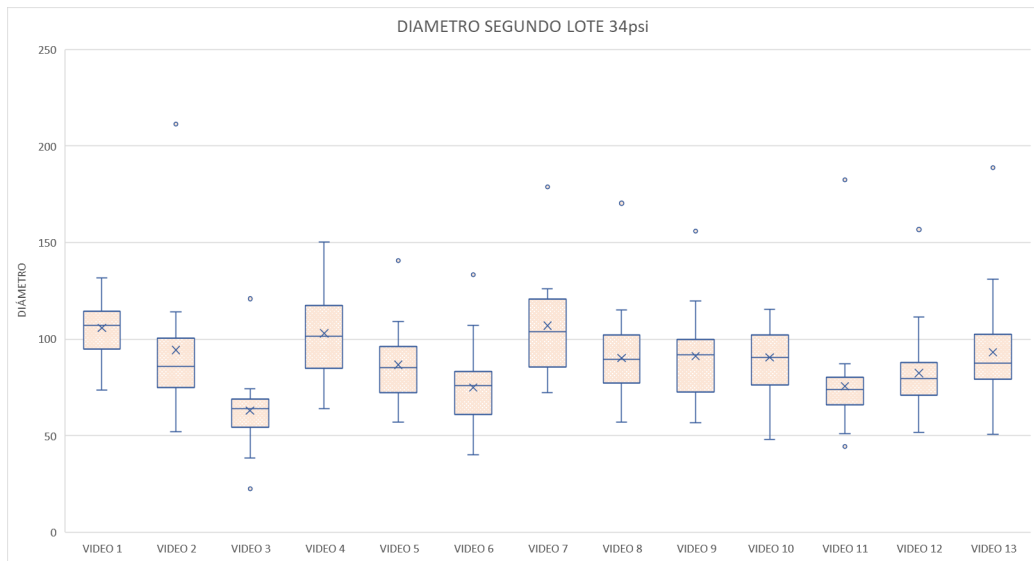


Figura 5.6: Gráfico de caja y bigotes 34 psi L2.  
**Referencia: Elaboración propia**

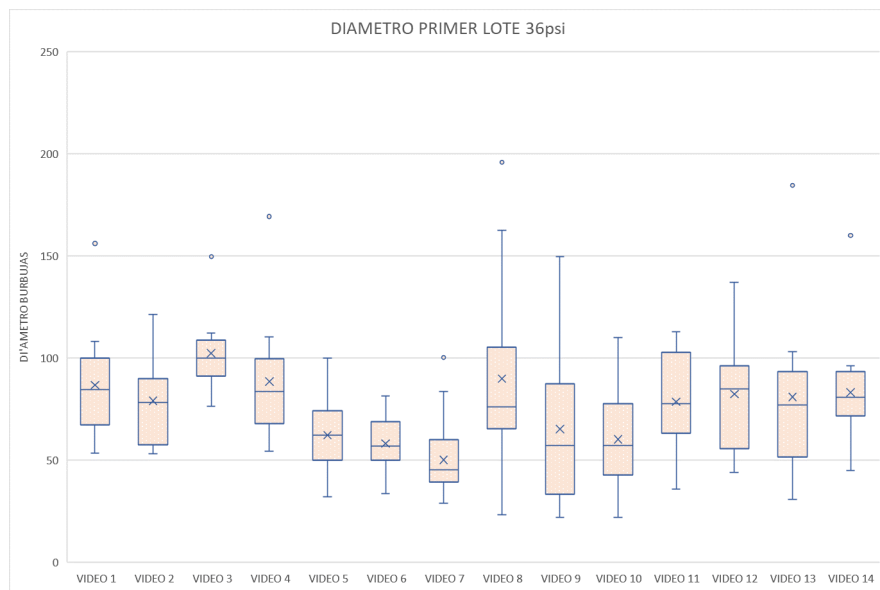


Figura 5.7: Gráfico de caja y bigotes 36 psi L1.  
**Referencia: Elaboración propia**

Para comprobar esta cuestión se realizó un gráfico donde se pintaba en tiempo real en la misma imagen la trayectoria de las burbujas dando una visualización del movimiento que estas hacían a lo largo del video como se muestra en la figura 5.10. En general las velocidades obtenidas entran dentro de los rangos estipulados en los objetivos e incluso el algoritmo es capaz de estimar velocidades mayores.

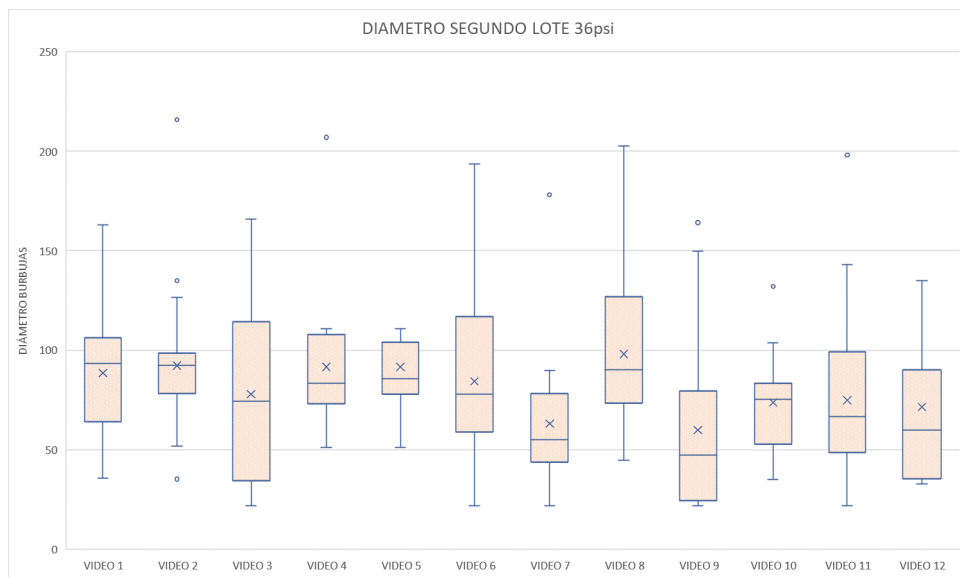


Figura 5.8: Gráfico de caja y bigotes 36 psi L2.  
**Referencia: Elaboración propia**

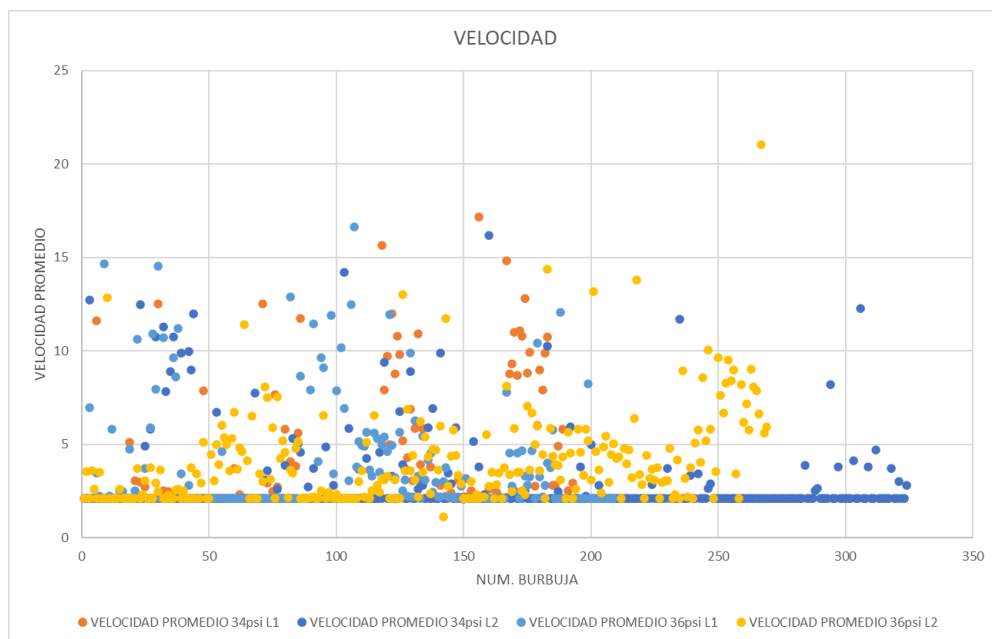


Figura 5.9: Dispersión de datos respecto a la velocidad en ambas pruebas  
**Referencia: Elaboración propia**

### 5.2.1. Prueba anova diámetro

Con el propósito de comparar los datos de las pruebas se realizó un análisis de varianza de un factor, teniendo en cuenta las dos presiones, donde los datos de ambos lotes correspondientes a 34 psi se comparan con los de 36 psi, para determinar si existe alguna diferencia significativa estadísticamente para ambos valores. Para esta prueba se trabajó con un nivel de significancia de 0.05, los datos principales se presentan en la tabla 5.13:





Figura 5.10: Trayectoria del desplazamiento de las microburbujas  
**Referencia: Elaboración propia**

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianzaa
34 psi	26	1969,03	75,73192308	393,8923042
36 psi	26	2035,45	78,28653846	185,5109035

Cuadro 5.11: Resumen datos diámetros

Como se muestra en la tabla 5.12 la razón F la cual se define como la división de la media de los cuadrados tiene un valor de 0,292848834099405, esto no excede el punto crítico determinado por la distribución F el cual es 4,034309706803. Por ende, estadísticamente podemos concluir que no hay una variación significativa en el diámetro promedio de las burbujas en cuanto al cambio de los valores de presión escogidos en la realización de la prueba (34 y 36 psi) como se muestra en la figura 5.11. Esto consecuencia de que los valores elegidos de esta variable no presentan un rango diferencia significativo, dando la posibilidad de que, si existe una diferencia más amplia entre las presiones por ejemplo de 10 psi o más, la diferencia entre los promedios de tamaño será más amplia y significativa, puesto a que es un factor que influye directamente en el tamaño de las microburbujas.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen varianza	Sum. cuadrados	Grad. libertad	Prom. cuadrados	F	Prob	Valor crítico
Entre grupos	84,8387	1	84,8387	0,2928	0,5908	4,0343
Dentro de los grupos	14485,0801	50	289,7016			
<b>Total</b>	<b>14569,91897</b>	<b>51</b>				

Cuadro 5.12: Análisis de varianza diámetros

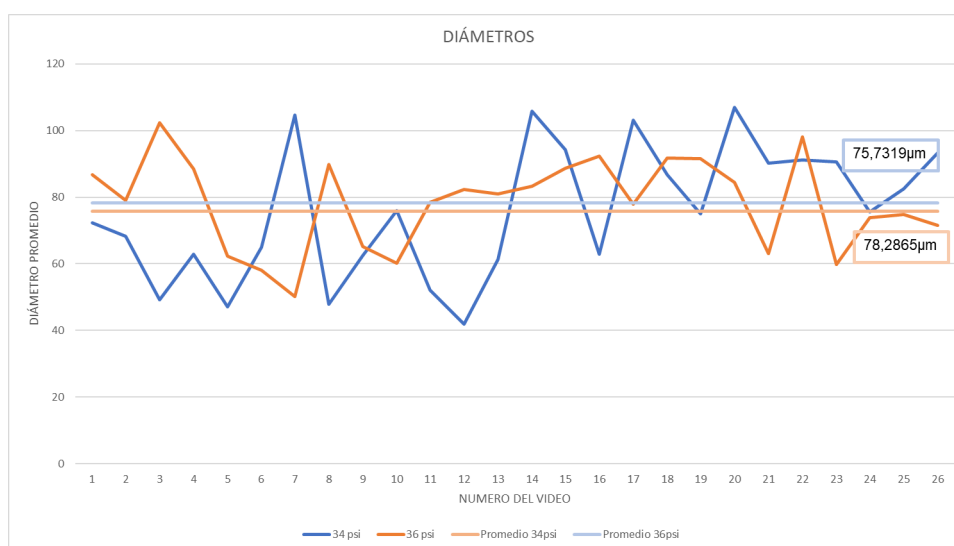


Figura 5.11: Gráfico tendencia diámetros  
Referencia: Elaboración propia

### 5.2.2. Prueba anova velocidad

Al igual que con el diámetro se realizó una prueba anova para la variable de velocidad con el propósito de comparar los datos de ambos lotes unificados en los valores de 34 y 36 psi, para determinar si existe alguna diferencia significativa estadísticamente para ambos valores. Para esta prueba se trabajó con un nivel de significancia de 0.05, los datos principales se presentan en la tabla 5.13:

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianzaa
34 psi	26	86,37	3,321923077	2,805512154
36 psi	26	98,258	3,779153846	2,122346615

Cuadro 5.13: Resumen datos velocidad

Como se muestra en la tabla 5.14 la razón F la cual se define como la división de la media de los cuadrados tiene un valor de 1,103026616, esto no excede el punto crítico determinado por la distribución F el cual es 4,03430971. Por ende, estadísticamente podemos concluir que no hay una variación significativa en la velocidad promedio de las burbujas en cuanto al cambio de los valores de presión escogidos en la realización de la prueba (34 y 36 psi) como se muestra en la figura 5.12. Esto se debe a que en promedio como se observó en la anterior prueba anova de los diámetros de las burbujas, el tamaño promedio en ambas presiones no tenía una gran diferencia, otra razón es que muchas de las burbujas presentaban un valor de velocidad que en el proyecto equivale a la velocidad mínima la cual es 2,09664704, condicionando mucho los valores de esta variable.

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen varianza	Sum. cuadrados	Grad. libertad	Prom. cuadrados	F	Prob	Valor crítico
Entre grupos	2,7177	1	2,7177	1,1030	0,2986	4,03430
Dentro de los grupos	123,1964	50	2,4639			
<b>Total</b>	125,9142487	51				

Cuadro 5.14: Análisis de varianza velocidad

### 5.3. Prueba Interfaz

Una vez obtenido los vídeos y analizados, se procedió reuniendo un grupo de 24 personas, a las cuales se les dio un contexto del proyecto, se les compartió la aplicación y se los dejó interactuar con la misma por 10 min, en donde se resolvieron preguntas que fueron surgiendo a lo largo del proceso.

Después de compartirles la apk, se validó a que personas no les funcionó la aplicación, es decir la aplicación no abría o se cerraba forzosamente, el 16.67 %, al

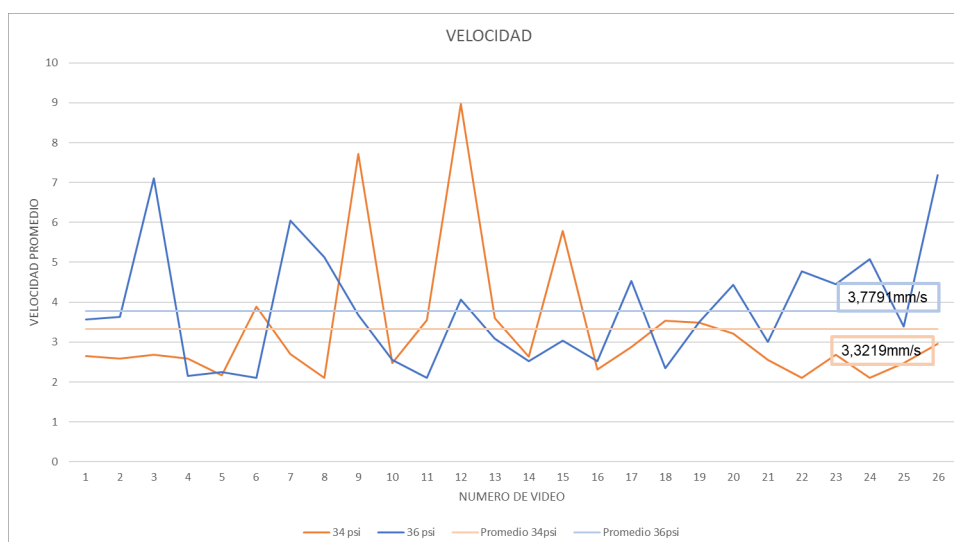


Figura 5.12: Gráfico tendencia diámetros  
**Referencia: Elaboración propia**

igual que a los que les funcionaba la aplicación pero se ponía lenta o el vídeo no era fluido, el 25 % y por supuesto a las personas que les funcionó correctamente 58.33 %; también se les pidió que nos proporcionarían información sobre sus dispositivos como por ejemplo, Ram, Android, Procesador, de donde se obtuvo la siguiente información.

ESPECIFICACIONES TELÉFONOS					
CANT	RAM	ANDROID	PROCESADOR	SIRVE	FLUIDEZ
1	2 GB	7.1.1	Qualcomm Snapdragon 410	No	-
3	3 GB	10	Octa Core Helio P 23	Si	Baja
1	2 GB	7.0.1	Qualcomm Snapdragon 617	No	-
3	4 GB	11	Qualcomm Snapdragon 662	Si	Buena
2	4 GB	10.1	Huawei Kirin 710 F	Si	Baja
1	4 GB	9	Octa core Max	Si	Buena
2	8 GB	12	Octa core Max	Si	Buena
4	5 GB	11	Qualcomm Snapdragon 680	Si	Buena
3	4 GB	12	Octa-Core Max	Si	Buena
1	1 GB	5.1.1	Quad-core	No	-
2	4 GB	12	Helio G35 Octa core	No	-
1	6 GB	10	Huawei Kirin 980	Si	Buena

Cuadro 5.15: Datos teléfonos probados

En la tabla 5.15 se encuentra el resumen de la información recolectada, dejando solo las características únicas, para así poder saber que referencias mínimas podría tener el teléfono, para realizar un correcto procesamiento de la información; se puede decir que el funcionamiento óptimo de la aplicación tiene una fuerte relación con del procesador teniendo como características mínimas 6 núcleos de procesamiento y memoria ram de 4GB, en relación a android la aplicación se puede instalar desde la

versión 5.1.1.

Después de recolectar información sobre los distintos dispositivos, a las personas que en sus dispositivos la aplicación funciona debidamente, se les proporcionó 3 vídeos extra a las personas procurando que el medio donde fueron compartidos no disminuya la calidad del material; para las personas a las cuales se les presentaban dificultades al operar la aplicación, se les permitió interactuar con la versión de escritorio y con teléfonos proporcionados en la prueba; después de 15 minutos, se les procedió a aplicar una encuesta, que contiene preguntas que manejan tres metodologías, escala de likert, preguntas dicotómicas y preguntas abiertas; de lo que podemos resaltar:

### 5.3.1. Preguntas usabilidad

Como se muestra en la figura 5.13 se preguntó sobre la facilidad de uso de la aplicación, de lo cual el 95.8% de los encuestados respondieron que era fácil de usar y un 5.2% respondieron que no, pero al tener un porcentaje superior del 80% lo cual fue tomado como válido.

¿Es fácil usar la aplicación ?

24 respuestas

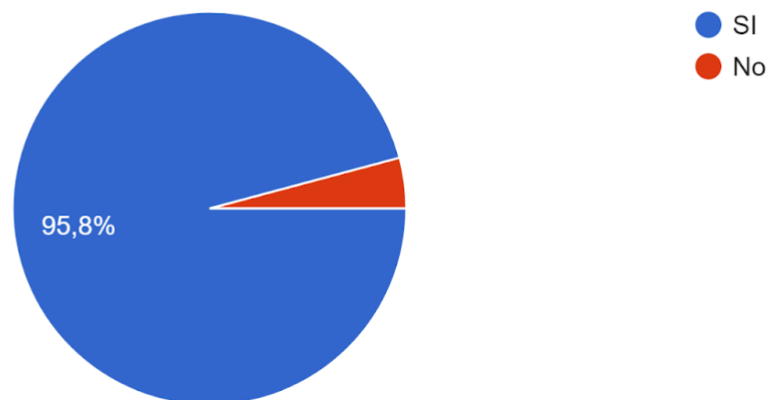


Figura 5.13: Pregunta sobre facilidad de uso

**Fuente:** Elaboración propia

Al tener varias ventanas con distinta información, es importante saber si a la persona le es fácil llegar a la información, por lo que se usó una escala de 1 -5 como se muestra en la figura 5.14 donde 1 es difícil y 5 es fácil, el 66.7% le asignó un valor de 5, el 29.2% un valor de 4 y el 4.2% un valor de 3, al sumar el valor de las personas encuestadas que asignaron un valor de 5 - 4, tenemos un 95.8% que nos permite darlo por válido.

Enfocamos una pregunta en la comodidad de la persona al utilizar la aplicación como se muestra en la figura 5.15, en escala de likert lineal, donde 1 se considera

¿Qué tan fácil es navegar por la aplicación?  
24 respuestas

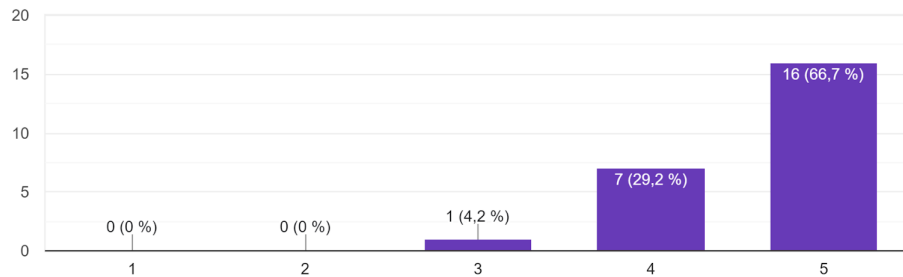


Figura 5.14: Pregunta sobre facilidad de navegación  
**Referencia: Elaboración propia**

malo y 5 se considera excelente, el 41.7% de las personas respondieron que fue “excelente”, el 54.2% respondieron “buena” y el 4.2% respondió “regular”, para la validación de esta pregunta el 80% o más de las personas deben estar ubicadas en las escalas 4-5, de lo cual se obtuvo el 95.8%.

¿Como calificarías tu experiencia usando la aplicación?  
24 respuestas

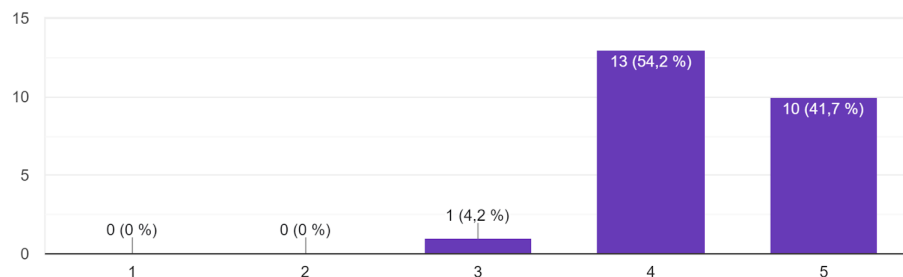


Figura 5.15: Pregunta sobre la experiencia usando la app  
**Fuente: Elaboración propia**

### 5.3.2. Preguntas interfaz

Se formuló también una pregunta, enfocada en que tan visible es la información en tema de colores como se muestra en la figura 5.16, utilizando un rango de 1 a 5, donde 1 es mala y 5 es buena, el 41.7% le asignaron un 5, el 54.8% un 4 y el 12.5% un 3, para la validación se tenía que más del 80% se encuentren entre 4-5 y se obtuvo un 87.5%.

Al ser una aplicación, en la cual se busca adaptación hacia los distintos dispositivos, se enfocó una pregunta a este tema como se muestra en la figura 5.17, utilizando

¿Cuál es tu opinión sobre los contrastes de colores de la interfaz y la información?  
24 respuestas

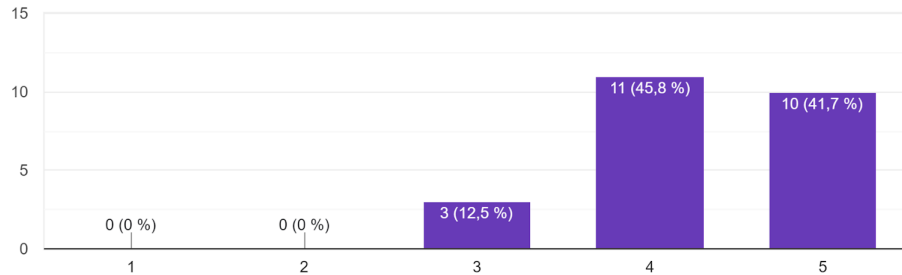


Figura 5.16: Pregunta sobre colores e información  
**Fuente:** Elaboración propia

un escala de 1 - 5 donde 1 es malo y 5 bueno, el 41.7% asignaron un valor de 5, el 45.8% un valor de 4 y el 12.5% de 3, para validar esta pregunta se establece un valor de 80% o más entre 4-5, el total fue de 87.5%.

¿Cuál es la proporción del contenido mostrado en pantalla?  
24 respuestas

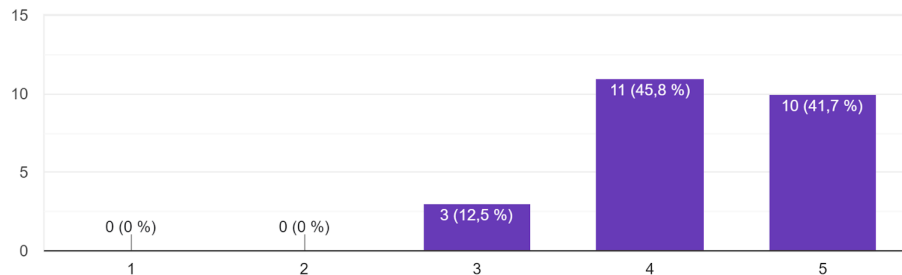


Figura 5.17: Pregunta proporción de información  
**Fuente:** Elaboración propia

### 5.3.3. Preguntas por sección

Debido a que se tiene tres secciones principales en la aplicación y estas contienen información valiosa surgen preguntas enfocadas en las mismas, es de resaltar que la sección “General”, es donde se reproduce el vídeo, “Diámetro”, en el que se muestra el histograma correspondiente al diámetro, “Velocidad”, en la cual se muestra el histograma de velocidad. Para validar se tiene que más del 80% es decir 20 personas, hayan opinado entre las opciones muy fácil y fácil o excelente y buena.

Se planteó una pregunta en relación a la accesibilidad como en la figura 5.18 a través de los botones a cada venta, puesto a que no se puede evaluar información a

la cual no se pudo acceder, en donde para la sección de “General”, 10 personas lo calificaron como excelente, 13 personas como buena, y 1 personas como regular, para validación se obtuvo 23 personas; para la sección de “Diámetro”, 11 lo calificaron como excelente, 11, como buena, y 2 como regular, teniendo un valor final de 22 personas que lo validaron; para la sección de “Velocidad”, 10 votaron por excelente, 13 por buena y 1 personas como regular, teniendo como valor final 23 personas para validación.

Las indicaciones para ingresar a las ventanas mencionadas a continuación son:

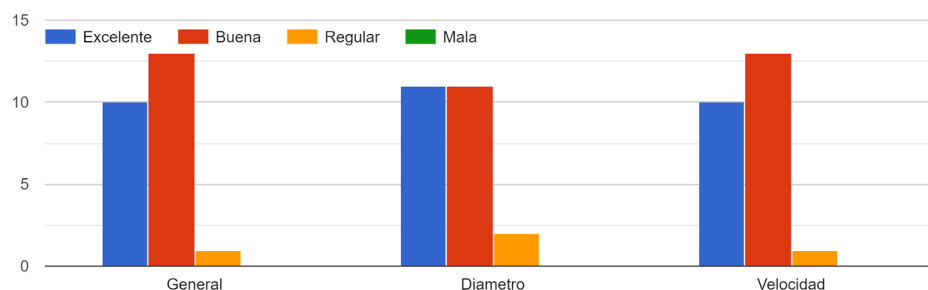


Figura 5.18: Pregunta indicaciones de ingreso a ventanas

**Fuente:** Elaboración propia

Se planteó una pregunta en relación a los textos como en la figura 5.19, ya que a través de estos se informa sobre el estado del vídeo, así mismo sobre los valores mínimo, máximo y promedio de Diámetro y velocidad, en donde para la sección de “General”, 11 personas lo calificaron como muy Fácil, 10 personas como fácil, y 3 personas como regular, para validación se obtuvo 21 personas; para la sección de “Diámetro”, 9 lo calificaron como muy fácil, 12, como fácil, y 3 como regular, teniendo un valor final de 21 personas que lo validaron; para la sección de “Velocidad”, 9 votaron por muy fácil, 13 por fácil, y 2 por regular, teniendo como valor final 22 personas para validación.

Se planteó una pregunta en relación a la relación u organización entre texto, gráficas y botones como en la figura 5.20, para verificar que toda la información de relevancia se esté mostrando de forma correcta, en donde para la sección de “General”, 12 personas lo calificaron como excelente, 10 personas como buena, y 2 personas como regular, para validación se obtuvo 22 personas; para la sección de “Diámetro”, 10 lo calificaron como excelente, 13 como buena, y 1 como regular, teniendo un valor final de 23 personas que lo validaron; para la sección de “Velocidad”, 9 votaron por excelente, 15 por buena, teniendo como valor final 24 personas para validación.

Para el caso de la pregunta abierta, fue tipo sugerencias, mejoras o quejas que se tuviera sobre la aplicación, en donde se resaltó, que los colores de la aplicación está bien, pero tratar de hacer más llamativa la aplicación.



¿Qué tan difícil es leer los texto en las ventanas mencionadas a continuación ?

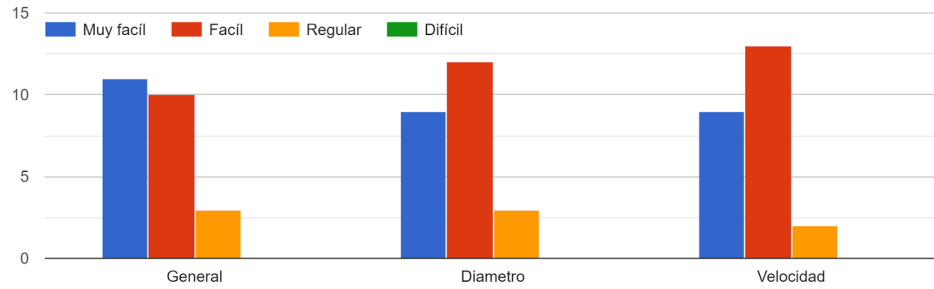


Figura 5.19: Pregunta sobre dificultad de lectura de textos  
**Fuente:** Elaboración propia

¿Cuál es tu opinión sobre la organización de la información en las ventanas mencionadas a continuación ?

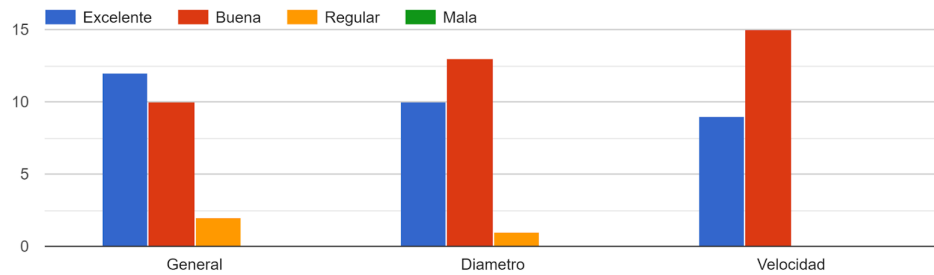


Figura 5.20: Pregunta de opinión sobre la organizacion de la información  
**Fuente:** Elaboración propia

# Capítulo 6

## Conclusiones

- Se logró implementar un sistema de microfotografía con el celular Huawei P30 pro, que cumple la función de cámara, un “Lente Gran Angular” que realiza la función de microscopio, realizando un mayor zoom sobre el área de trabajo, una lámpara led, como iluminación y un soporte diseñado de forma particular, consiguiendo un acople casi perfecto con el teléfono, brindando seguridad y tomas más precisas; la unión de todos estos elementos, permitió no solo obtener un área de captura de 4.45086 mm<sup>2</sup>, si no también un sistema que puede ser implementado y adaptado en distintas plantas que hagan uso de la flotación por aire disuelto.
- Con ayuda de la librería de uso libre OpenCV y C#, se desarrolló un algoritmo que utilizando funciones básicas de filtrado, con el propósito de eliminar información no deseada sobre la escena, también con la función de Hough circles, como método de detección de microburbujas, además de operaciones básicas para el cálculo de velocidad; se puso en funcionamiento un algoritmo con capacidad de detectar microburbujas de tamaños 22 $\mu$ m a 215  $\mu$ m y velocidades de 2,0966 mm/seg a 21,8404 mm/seg, el algoritmo demostró tener la capacidad de hacer estimaciones de tamaño y velocidad fuera de los límites establecidos, haciendo de este un sistema flexible que puede ser utilizado en pruebas más rigurosas y específicas, haciendo un análisis prácticamente en el tiempo de ejecución del video a procesar.
- El procesamiento de imágenes demostró ser un medio para caracterización de microburbujas de implementación sencilla puesto a que se necesitan contados recursos para ser empleada y esto sin alterar la planta donde se usa la flotación por aire, presentando un buen desempeño y resultados satisfactorios. Pero este método también presenta algunas notables dificultades, en cuestión de cómo se plantea el cálculo de la velocidad, al ser calculada en un plano 2D el avance de las burbujas hacia el fondo no es apreciado correctamente, e incluso puede alterar el tamaño de algunas burbujas ya que se están alejando del plano focal de captura. En cuestión del tamaño algunas burbujas de gran tamaño las cuales se encuentran al fondo de la zona de captura de imágenes, pueden alterar algunos filtros del procesamiento, lo cual implica que se pueden tener en cuenta burbujas que no se estipulan como válidas según las condiciones de

cada proyecto.

- El software unity, al ser una herramienta multiplataforma, cuyo lenguaje de programación base es C#, el cual a su vez se puede conectar con OpenCv e implementar diferentes librerías, permite poner en práctica, una aplicación que lleva inmerso un algoritmo capaz de realizar caracterización de microburbujas, que además permite al usuario agregar sus propios vídeos para caracterizar, siempre que cumplan con las condiciones ya definidas, la interfaz mostrada, lleva al usuario paso a paso, por cada proceso, dejando al final un resumen gráfico sobre el diámetro y velocidad detectadas, adicional esta aplicación puede operar en dispositivos android los cuales tengan las características mínimas de funcionamiento.

# Capítulo 7

## Anexos

A continuación se adjunta la url, en donde se encuentra la información relacionada al proyecto de forma digital:  
<https://drive.google.com/drive/folders/1hJ9imBQWQzY1E9KuaZIGZMbAZRW3Hgiz>.

- Código: Se encuentra el código realizado en Unity, con la respectiva interfaz e imágenes de la misma.
- Datos Resultados: En esta carpeta están las tablas con la respuesta de cada una de las pruebas realizadas con el algoritmo.
- Vídeos Microburbujas: Seccionada con dos carpetas, donde se almacena la información de los vídeos tomados en las distintas presiones.

# Bibliografía

- [1] G. Cheng, C. Shi, J. Liu, and X. Yan, “Bubble-distribution measurement in a flotation column,” *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, vol. 36, no. 5, pp. 241–250, 2016.
- [2] S. Gulden, C. Riedele, S. Rollié, M.-H. Kopf, and H. Nirschl, “Online bubble size analysis in micro flotation,” *Chemical Engineering Science*, vol. 185, pp. 168–181, 2018.
- [3] A. Eskinlou, M. Khalesi, M. Abdollahy, and M. Hemmati Chegeni, “Interactional effects of bubble size, particle size, and collector dosage on bubble loading in column flotation,” *Journal of Mining and Environment*, vol. 9, no. 1, pp. 107–116, 2018.
- [4] A. S. Reis and M. A. Barrozo, “A study on bubble formation and its relation with the performance of apatite flotation,” *Separation and Purification Technology*, vol. 161, pp. 112–120, 2016.
- [5] F. Sadeghi, A. J. Vissers *et al.*, “Experimental investigation of bubble size in flotation: Effect of salt, coagulant, temperature, and organic compound,” *SPE Production And Operations*, 2020.
- [6] V. R. Fanaie and M. Khiadani, “Effect of salinity on air dissolution, size distribution of microbubbles, and hydrodynamics of a dissolved air flotation (daf) system,” *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 591, p. 124547, 2020.
- [7] P. P. F. Brasileiro, L. B. dos Santos, M. J. Chaprão, D. G. de Almeida, B. A. C. Roque, V. A. dos Santos, L. A. Sarubbo, M. Benachour *et al.*, “Construction of a microbubble generation and measurement unit for use in flotation systems,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 153, pp. 212–219, 2020.
- [8] R. Ahmadi, D. A. Khodadadi, M. Abdollahy, and M. Fan, “Nano-microbubble flotation of fine and ultrafine chalcopyrite particles,” *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 24, no. 4, pp. 559–566, 2014.
- [9] R. Parmar and S. K. Majumder, “Terminal rise velocity, size distribution and stability of microbubble suspension,” *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, vol. 10, no. 3, pp. 450–465, 2015.

- [10] B. Swart, Y. Zhao, M. Khaku, E. Che, R. Maltby, Y. J. Chew, and J. Wenk, "In situ characterisation of size distribution and rise velocity of microbubbles by high-speed photography," *Chemical Engineering Science*, vol. 225, p. 115836, 2020.
- [11] X. Guan and N. Yang, "Bubble properties measurement in bubble columns: From homogeneous to heterogeneous regime," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 127, pp. 103–112, 2017.
- [12] I. Levitsky, D. Tavor, and V. Gitis, "Microbubbles and organic fouling in flat sheet ultrafiltration membranes," *Separation and Purification Technology*, p. 118710, 2021.
- [13] V. Aumelas, Y. Lecoffre, G. Maj, and J.-P. Franc, "Micro-bubbles seeding for flow characterization," vol. 49, no. 6, p. 062005, 2016.
- [14] M. Han, Y. Park, and T. Yu, "Development of a new method of measuring bubble size," *Water Science and Technology: Water Supply*, vol. 2, no. 2, pp. 77–83, 2002.
- [15] S.-Y. Jeon, J.-Y. Yoon, and C.-M. Jang, "Bubble size and bubble concentration of a microbubble pump with respect to operating conditions," *Energies*, vol. 11, no. 7, p. 1864, 2018.
- [16] A. Orth, E. R. Wilson, J. Thompson, and B. C. Gibson, "A dual mode mobile phone microscope using the onboard camera flash and ambient light," *Scientific reports*, vol. 8, no. 1, pp. 1–8, 2018.
- [17] L. Vinnett, J. Sovechles, C. Gomez, and K. Waters, "An image analysis approach to determine average bubble sizes using one-dimensional fourier analysis," *Minerals Engineering*, vol. 126, pp. 160–166, 2018.
- [18] A. Eskanlou, M. R. Khalesi, M. Mirmogaddam, M. Hemmati Chegeni, and B. Vaziri Hassas, "Investigation of trajectory and rise velocity of loaded and bare single bubbles in flotation process using video processing technique," *Separation Science and Technology*, vol. 54, no. 11, pp. 1795–1802, 2019.
- [19] G. Cheng, C. Shi, X. Yan, Z. Zhang, H. Xu, and Y. Lu, "A study of bubble-particle interactions in a column flotation process," *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, vol. 53, 2017.
- [20] A. J. Pérez Vidal, "Desarrollo de un sistema piv (velocímetro por imagen de partículas) didáctico," Ph.D. dissertation, Universitat Politècnica de València, 2016.
- [21] M. Ghannadi, S. Saghravani, and H. Niazmand, "Experimental analysis of micro-nano bubble formation inside venturi tube with high speed photography and image processing," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 19, no. 12, pp. 3039–3049, 2019.

- [22] J. K. Edzwald, “Dissolved air flotation and me,” *Water research*, vol. 44, no. 7, pp. 2077–2106, 2010.
- [23] J. Van Puffelen, P. J. Buijs, P. N. Nuhn, and W. A. Hijnen, “Dissolved air flotation in potable water treatment: the dutch experience,” *Water Science and Technology*, vol. 31, no. 3-4, pp. 149–157, 1995.
- [24] T. Temesgen, T. T. Bui, M. Han, T.-i. Kim, and H. Park, “Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: A review,” *Advances in colloid and interface science*, vol. 246, pp. 40–51, 2017.
- [25] G. Singh and S. Patidar, “Microalgae harvesting techniques: A review,” *Journal of environmental management*, vol. 217, pp. 499–508, 2018.
- [26] K.-Y. Show, Y.-G. Yan, and D.-J. Lee, “Algal biomass harvesting and drying,” *Biofuels from Algae*, pp. 135–166, 2019.
- [27] J. A. Muñoz-Alegría, E. Muñoz-España, and J. F. Flórez-Marulanda, “Dissolved air flotation: A review from the perspective of system parameters and uses in wastewater treatment,” *TecnoLógicas*, vol. 24, no. 52, pp. e2111–e2111, 2021.
- [28] A. Azevedo, H. Oliveira, and J. Rubio, “Treatment and water reuse of lead-zinc sulphide ore mill wastewaters by high rate dissolved air flotation,” *Minerals Engineering*, vol. 127, pp. 114–121, 2018.
- [29] M. M. G. Mofrad, H. Pourzamani, M. M. Amin, I. Parseh, and M. Alipour, “In situ treatment of metalworking wastewater by chemical addition-dissolved air flotation coupled with uv, h<sub>2</sub>o<sub>2</sub> and zno,” *Heliyon*, vol. 6, no. 1, p. e03091, 2020.
- [30] M. A. Radzuan, M. A.-B. Belope, and R. Thorpe, “Removal of fine oil droplets from oil-in-water mixtures by dissolved air flotation,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 115, pp. 19–33, 2016.
- [31] L. Zhang, “Advanced treatment of oilfield wastewater by a combination of daf, yeast bioreactor, uasb, and baf processes,” *Separation Science and Technology*, vol. 56, no. 4, pp. 779–788, 2021.
- [32] S. Ansari, J. Alavi, and Z. M. Yaseen, “Performance of full-scale coagulation-flocculation/daf as a pre-treatment technology for biodegradability enhancement of high strength wastepaper-recycling wastewater,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 25, no. 34, pp. 33 978–33 991, 2018.
- [33] A. Gordiychuk, M. Svanera, S. Benini, and P. Poesio, “Size distribution and sauter mean diameter of micro bubbles for a venturi type bubble generator,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 70, pp. 51–60, 2016.
- [34] A. Agarwal, W. J. Ng, and Y. Liu, “Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment,” *Chemosphere*, vol. 84, no. 9, pp. 1175–1180, 2011.

- [35] S. H. Park, C. Park, J. Lee, and B. Lee, "A simple parameterization for the rising velocity of bubbles in a liquid pool," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 49, no. 4, pp. 692–699, 2017.
- [36] Y.-N. Kim, J. S. Kim, G. C. Park, and H. K. Cho, "Measurement of sliding bubble behavior on a horizontal heated tube using a stereoscopic image processing technique," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 94, pp. 156–172, 2017.
- [37] E. Cilek and B. Yilmazer, "Effects of hydrodynamic parameters on entrainment and flotation performance," *Minerals Engineering*, vol. 16, no. 8, pp. 745–756, 2003.
- [38] F. Maoming, T. Daniel, R. Honaker, and L. Zhenfu, "Nanobubble generation and its application in froth flotation (part i): nanobubble generation and its effects on properties of microbubble and millimeter scale bubble solutions," *Mining Science and Technology (China)*, vol. 20, no. 1, pp. 1–19, 2010.
- [39] M. Sadatomi, A. Kawahara, K. Kano, and A. Ohtomo, "Performance of a new micro-bubble generator with a spherical body in a flowing water tube," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 29, no. 5, pp. 615–623, 2005.
- [40] S. Khuntia, S. K. Majumder, and P. Ghosh, "Microbubble-aided water and wastewater purification: a review," *Reviews in Chemical Engineering*, vol. 28, no. 4–6, pp. 191–221, 2012.
- [41] Y. Maeda, S. Hosokawa, Y. Baba, A. Tomiyama, and Y. Ito, "Generation mechanism of micro-bubbles in a pressurized dissolution method," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 60, pp. 201–207, 2015.
- [42] F. Rehman, G. J. Medley, H. Bandulasena, and W. B. Zimmerman, "Fluidic oscillator-mediated microbubble generation to provide cost effective mass transfer and mixing efficiency to the wastewater treatment plants," *Environmental research*, vol. 137, pp. 32–39, 2015.
- [43] B. R. A. Española, "Unidad interactiva del drae," *Boletín de Información Lingüística de la Real Academia Española*, vol. 0, no. 2, pp. 1–18, 2022.
- [44] J. E. Forero, J. Diaz, and V. Blandón, "Diseño de un nuevo sistema de flotación para tratamiento de aguas industriales," *CT AND F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, vol. 1, no. 5, pp. 67–75, 1999.
- [45] E. O. Ramírez, "Determinación del Área interfacial específica local en biorreactores por un método electrónico." *Instituto Politécnico Nacional*, Oct. 2017.
- [46] S. E. De Rijk, J. G. den Blanken *et al.*, "Bubble size in flotation thickening," *Water Research*, vol. 28, no. 2, pp. 465–473, 1994.
- [47] W. Strickland, "Laboratory results of cleaning produced water by gas flotation," *Society of Petroleum Engineers Journal*, vol. 20, no. 03, pp. 175–190, 1980.



- [48] C. Corporation, “Introducción a la visión artificial una guía para la automatización de procesos y mejorar la calidad,” 2018.
- [49] R. C. Gonzalez, R. E. Woods, and B. R. Masters, “Digital image processing,” 2002.
- [50] D. Laupsien, C. Le Men, A. Cockx, and A. Liné, “Image processing for bubble morphology characteristics in diluted bubble swarms,” *Physics of Fluids*, vol. 31, no. 5, p. 053306, 2019.
- [51] D. Laupsien, C. Le Men, A. Cockx, and A. Line, “Labelled object velocimetry: Simultaneous measurements of bubble size and velocity,” *Chemical Engineering Science*, vol. 230, p. 116180, 2021.
- [52] A. Romachev, V. Kuznetsov, E. Ivanov, and B. Jóg, “Flotation froth feature analysis using computer vision technology,” vol. 192, p. 02022, 2020.
- [53] G. Villegas Sanchez, A. Marin Hernandez, H. H. Cerecedo Nuñez, H. V. Rios Figueroa, and P. Padilla Sosa, “A computational tool for detection and parameters estimation of microbubbles generated with lasers in optical fibers,” *Computación y Sistemas*, vol. 23, no. 2, pp. 399–407, 2019.
- [54] J. Lewis, “Using optics to optimize your machine vision application: explaining the fundamentals of using optics to optimize a machine vision application,” *Quality*, vol. 51, no. 13, pp. 4VS–4VS, 2012.
- [55] DoxyGen, “Opencv introduction,” Aug. 2021, [Accessed: 18-jul-2022]. [Online]. Available: <https://calib.io/blogs/knowledge-base/understanding-reprojection-errors>
- [56] K. S. Satya Mallick, “Calibración de la cámara con opencv,” Feb. 2020, [Accessed: 27-jul-2022]. [Online]. Available: <https://learnopencv.com/camera-calibration-using-opencv/>
- [57] D. del error de reproyección, “Opencv introduction,” Dec. 2022, [Accessed: 18-jan-2022]. [Online]. Available: <https://docs.opencv.org/4.5.5/d1/dfb/intro.html>
- [58] J. Osio, W. Aróztegui, J. A. Rapallini, A. A. Quijano, and J. Ocampo, “Desarrollo de algoritmos de procesamiento de imágenes basados en “operadores de ventana” sobre una fpga,” 2011.
- [59] B. Aldalur and M. Santamaría, “Realce de imágenes: filtrado espacial,” *Revista de teledetección*, vol. 17, pp. 31–42, 2002.
- [60] J. Martínez Susunaga, “Sistema de visión artificial para la detección de espacio ocupado en lugares cerrados.”
- [61] J. C. Tello, “La visión artificial y las operaciones morfológicas en imágenes binarias,” *Una Perspectiva de la Inteligencia Artificial en su 50 Aniversario*, p. 570, 2006.

- [62] I. The MathWorks, “Flood-fill operations,” 2022, [Accessed: 26-jul-2022]. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/help/images/flood-fill-operations.html>
- [63] J. V. Rebaza, “Detección de bordes mediante el algoritmo de canny,” *Escuela Académico Profesional de Informática. Universidad Nacional de Trujillo*, vol. 4, 2007.
- [64] H. Pistori, J. Pistori, and E. R. Costa, “Hough-circles: Um módulo de detecção de circunferências para o imagej,” 2005.
- [65] J. Magaña, J. Atoche, J. Molina, M. Blanco, and E. Péez, “Estimación de la distancia a un objeto con visión computacional,” *Ingeniería*, vol. 21, no. 2, pp. 31–40, 2017.
- [66] C. Legua Cruz, “Seguimiento automático de objetos en sistemas con múltiples cámaras,” 2013.
- [67] B. Invero, “Invero aluminium mini,” *AMAZON*, Jul. 2014, [Accessed: 17-mar-2022]. [Online]. Available: <https://www.amazon.co.uk/Invero-Aluminium-Table-Top-features-Indicator>
- [68] “Panel led 12w,” *Mercado libre*, [Accessed: 17-mar-2022]. [Online]. Available: <https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-832552318-panel-led-12w-cuadrado-sp-luz-dia-karluz-kl-2201>
- [69] A.-U. Direct, “Lente de cámara de teléfono,” *AMAZON*, Mar. 2016, [Accessed: 17-Mar-2022]. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/-/es/tel\unhbox\voidb@x\bgroup\let\unhbox\voidb@x\setbox\@tempboxa\hbox{e\global\mathchardef\accent@spacefactor\spacefactor}\accent19e\egroup\spacefactor\accent@spacefactor\futurelet\@let@token\penalty\@M\hskip\z@skipfono-mejorado-angular-profesional-compatible/dp/B01D1CDW9O?th=1>
- [70] Huawei, “Huawei p30 pro,” Mar. 2019, [Accessed: 01-mar-2022]. [Online]. Available: <https://consumer.huawei.com/mx/phones/p30-pro/specs/>