

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

Ordóñez, Carlos; Guerrero, María; España Elena; Florez, Juan  
Universidad de Cauca, Popayán, Colombia.

December 26, 2022

**Resumen.** La eficiencia de los sistemas DAF, tiene una estrecha relación con el diámetro y velocidad de las microburbujas, pero muchos de los medios para poder caracterizar las microburbujas requieren de adaptaciones al proceso y/o el uso de dispositivos de altas prestaciones, es por ello que en este proyecto se busca, el desarrollo de una aplicación para realizar esta caracterización, con la ayuda de un teléfono móvil.

*Abstract. The efficiency of the DAF systems is closely related to the diameter and speed of the microbubbles, but many of the means to characterize the microbubbles require adaptations to the process and/or the use of high-performance devices, which is why In this project, the development of an application to carry out this characterization is sought, with the help of a mobile phone.*

## 1 Introducción

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 las mismas 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 tienen 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]. Es por ello que se propone el diseñar e implementación de 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.

El artículo se compone de 5 secciones, en la sección I se encuentra la introducción, En la sección II se encuentra la metodología, en la sección III se presentan los resultados, en la sección IV conclusiones.

## 2 Metodología

La metodología a seguir para la implementación de la propuesta, está dividido en 3 fases, primera fase correspondiente al diseño del sistema de microfotografía, la segunda enfocada en el desarrollo del algoritmo basado en visión de máquina, finalmente se describe el proceso de toma de vídeos para su posterior procesamiento.

### 2.1 sistema de microfotografía

Debido a las características particulares presentes en la planta en la cual se pondrá a prueba el sistema de microfotografía, se escogieron los siguientes elementos que permiten

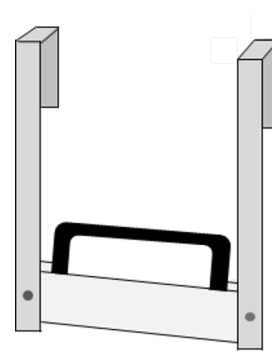


Figure 1: Soporte Para teléfono móvil

**Fuente:** Elaboración propia

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, 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 doblez 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 [17].

Como sistema de iluminación, se emplea una sola fuente de luz ubicada en el lado opuesto de la cámara generando con ello una sistema de luz de fondo, se eligió una Lámpara de Panel Led Cuadrado S/p Luz Dia marca Karluz, referencia kl-2201, con un Voltaje de 110 V y una potencia de 12 W [18]

El mecanismo óptico a utilizar es un "Lente Gran Angular" para teléfono inteligente, 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 un distancia focal de aproximadamente 7 cm permitiendo así una captura óptima de la imagen, Lente macro de 12,5 x, lente de rosca de 1.457 pulgadas de diámetro, tomar fotos a una dis-



Figure 2: Lente para teléfono inteligente  
**Tomado:** [19]

tancia de 1.18 a 1.57 pulgadas, tomar fotos a una distancia de 1.18 a 1.57 pulgadas [19], este estará ubicado sobre el lente de la cámara.

La cámara a utilizar es de un teléfono inteligente Huawei P30 pro, 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 [20], dentro de los detalles más relevantes de la cámara tenemos:

- **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 (velocidadX32).

Estos elementos se acoplan al sistema DAF, como se muestra en la figura 3

## 2.2 Software

El algoritmo se realizó en C#, en la plataforma unity, con ayuda de la librería de uso libre OpenCV versión 1.7.1.

Esta sección estará dividida en 5 secciones, la primera enfocada en la preparación del vídeo, pre-procesamiento; la segunda, es el

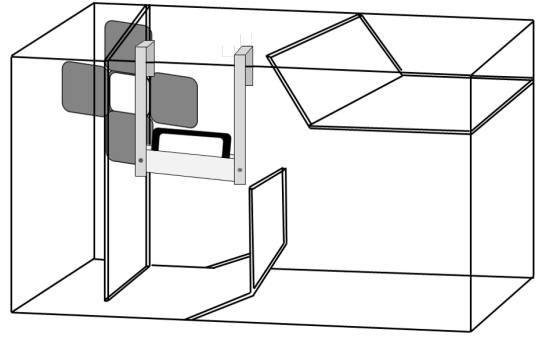


Figure 3: Distribución de los componentes de microfotografía en el sistema DAF

**Fuente:** Elaboración propia

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.

### 2.2.1 Pre-procesamiento de vídeo

Una vez tomados los vídeos, al ser insertado en Unity, este se encuentra en un formato llamado texture que vendría a ser como 3D, por ello primero se hace un paso a 2D, posteriormente se pasa esta información al formato Mat que es el requerido como entrada para las funciones de openCVSharp, finalmente aplicar la función Undistor, aplicando con ello la calibración de cámara.

### 2.2.2 Eliminación de ruido

Para realizar la caracterización primeramente se realizó un ajuste a la imagen, a través de la utilización de filtros, Como entrada el algoritmo recibe el frame a procesar, posteriormente se aplica una conversión a escala de grises, después se aplica un filtro de mediana para eliminación de ruido, a continuación se aplicó el filtro de gauss, para difuminar los elementos irrelevantes y el ruido, posteriormente se aplicó dos veces la función de relleno desde el punto (0,0) primero con un valor de 255, y después con 0, a continuación se aplicó la operación dilatación, posteriormente se utilizó la

operación erosión, seguido de la aplicación de binarización con el umbral 110, para terminar se utilizó el filtro de Canny para determinar el contorno de las MB, en el valor de 0, utilizando una apertura de 3.

### 2.2.3 Detección de microburbujas

Para realizar la identificación de MB, se utilizó la transformada de Hough, con un valor de acumulador en 0.5, con una distancia mínima entre los centros de 5, el primer parámetro del método en 11 y el segundo en 14, un valor mínimo de radio en 0 y máximo en 20, 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 se hace uso de dos listas de arreglos de enteros, una para guardar la información de todas las burbujas detectadas en el frame y el otro 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.

### 2.2.4 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 forma 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 abajo 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 una lista de coordenadas de distancias inicialmente vacía, se toma cada el valor de la Mb que viene desde abajo y por cada burbuja detectada se calcula la distancia, es decir, se tiene el

punto X1, y X2 para calcular la distancia en X, además de Y1 y Y2 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 una lista de distancias, como lo que nos interesa es las coordenadas de la burbuja para futuros procesos y sabemos 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 obtenemos que en la posición 0 está la distancia más pequeña, ya con el valor de distancia mínima determinada, lo que hacemos es buscar 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.

### 2.2.5 Cálculo de diámetro y velocidad

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, 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 X1, y X2 para calcular la distancia en X, además de Y1 y Y2 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 video y multiplicar por el valor de conversión de píxeles a mm, para este caso, se calcula como:  $0.6/272.544 \text{ mm/Px}$ , dejando la velocidad en mm/seg

## 2.3 Adquisición de datos

El propósito del proyecto es realizar el análisis de mb, 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.

para realizar la grabación de las microburbujas, se requiere establecer una conexión

inalámbrica entre el teléfono celular y 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 los procedimientos.

El control de iluminación, se hace esencialmente cerrando 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, soporte para teléfono móvil, el cual se ubica al ras del tanque.

### 3 Resultados

En la realización de este proyecto se planteo la toma de videos a cámara lenta de la planta en funcionamiento a distintas presiones, las presiones que se escogieron fueron 34 y 36 psi, todo estos considerando el entorno y las limitaciones de la planta DAF del laboratorio de hidráulica de la Universidad del Cauca, se capturaran entre 10 a 27 videos con una duración de 10 segundos (tiempo es delimitado por el software de captura) por presión en cada prueba, realizando un total de 2 lotes de videos.

Ambas pruebas se realizaron bajo las siguientes condiciones: caudal de recirculación 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, con la diferencia que cada lote hace uso de un distinto tubo Venturi, ya que al ser una impresión 3D la cavitación desgasta el material haciendo que algunas burbujas salgan con un tamaño relativamente más grande y también se

debe tener en cuenta que cada tubo tendrá un comportamiento distinto al generar microburbujas ya que la impresión no son exactamente iguales una de otras.

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 cumplieran las condiciones para ser procesados adecuadamente, estas condiciones radican en que el video presenten como minimo 10 microburbujas en el plano focal de la cámara. Los resultados obtenidos con las condiciones antes mencionadas y a una presión de 34 en cuanto a velocidad se presentan en la tabla 1.

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 antes mencionado, se tomaron 25 videos a 34 psi y para 36 psi 26 para un total de 41. De este lote se seleccionaron 24 videos que cumplieran las condiciones antes expuestas, Los datos correspondientes a los resultados a una presión de 36psi del primer lote y los del segundo lote se encuentran en la sección de Anexos en las tablas 2, 3 y 4 .

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 4, se puede apreciar rangos desde  $22\mu\text{m}$  hasta  $215\mu\text{m}$  aproximadamente, esto debido al desgaste mencionado del tubo Venturi a lo largo de su uso, 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.

De la prueba también se observó que el promedio general en cuanto al diámetro, los videos a 34psi del primer lote fue de  $62,384\mu\text{m}$  y de 36 psi del mismo lote fue  $76,24\mu\text{m}$ , por otro lado, en el segundo lote los promedios fueron de  $80,6741667\mu\text{m}$  y  $89,0792308\mu\text{m}$  para 36 y 34 psi respectivamente esta información se visualiza de mejor forma en las figuras 5 y 6. Esta distinción en cuanto al tamaño promedio en cada lote se atribuye al cambio de tubos

Primer lote 34 psi							
Video	Burbujas	Diametro ( $\mu\text{m}$ )			Velocidad (mm/s)		
		Minimo	Maximo	Promedio	Minima	Maxima	Promedio
1	17	52,8355	92,4621	72,24	2,0966	11,5869	2,65
2	11	35,2236	88,0591	68,27	2,0966	5,3202	2,59
3	19	22,0147	83,6562	49,23	2,0966	11,5869	2,65
4	12	22,0147	105,6710	62,97	2,0966	7,8789	2,27
5	14	22,0147	88,0591	47,12	2,0966	3,7016	2,17
6	16	30,8207	118,8798	64,9	2,0966	11,0534	3,89
7	16	26,4177	149,7005	104,63	2,0966	11,7166	2,32
8	16	26,4177	70,4473	47,88	2,0966	2,0966	2,1
9	16	26,4177	96,8650	62,52	2,0966	15,6273	7,71
10	22	44,0295	118,8798	75,99	2,0966	5,8311	2,47
11	10	22,0147	149,7005	52	2,0966	17,1599	3,55
12	16	22,0147	134,7305	41,94	2,0966	14,8250	8,97
13	13	22,0147	145,2976	61,31	2,0966	10,7277	3,6

Table 1: Resultados primer lote 34 psi

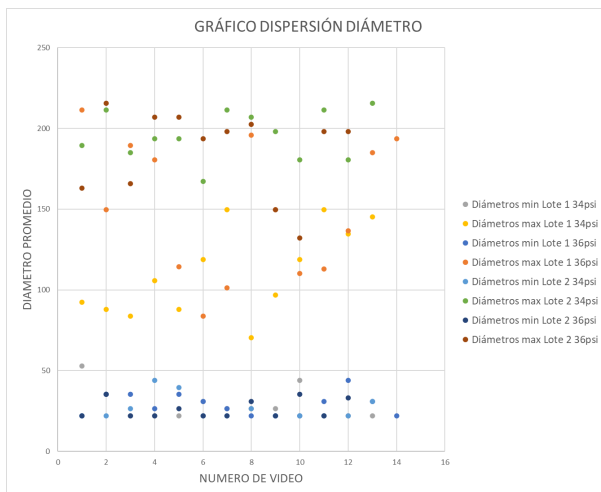


Figure 4: Dispersión de datos respecto al diámetro en ambas pruebas

**Referencia: Elaboración propia**

Venturi, puesto que al ser una impresión 3D, cada tubo presenta comportamientos distintos al generar microburbujas

En cuanto a la velocidad siempre se mantuvo un valor mínimo estable de 2,0966 mm/seg como se aprecia en la figura 8, esto puesto a que la velocidad es influencia 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 2,0966mm/seg hasta 21,8404 mm/seg, en el calculo de esta variable se presentaron algunos

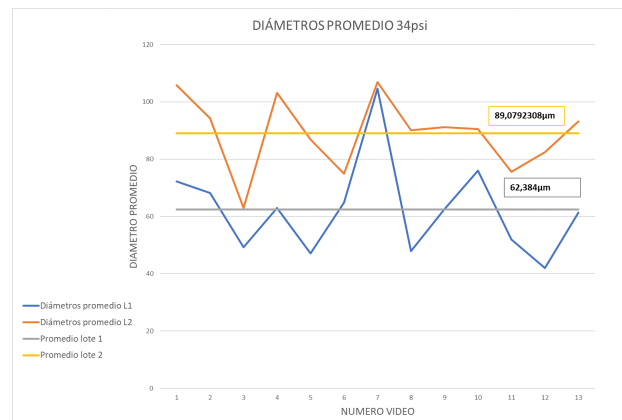


Figure 5: Gráfico de tendencia de diámetro en ambos lotes 34 psi.

**Referencia: Elaboración propia**

casos como que algunas burbujas presentaban 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 mas reducida, Para comprobar esta cuestión se realizo un grafico 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 7. En general las velocidades obtenidas entran dentro de los rangos es-

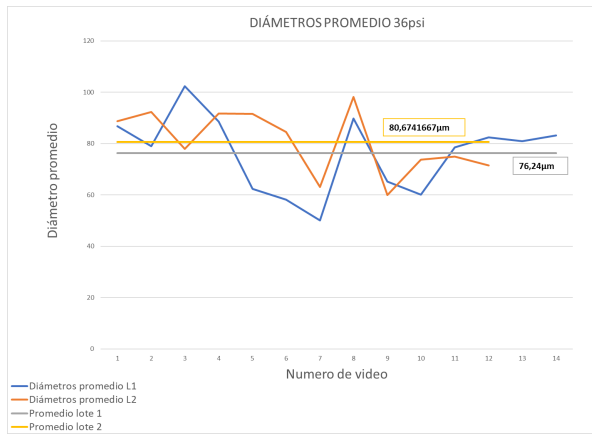


Figure 6: Gráfico de tendencia de diámetro en ambos lotes 36 psi.

**Referencia: Elaboración propia**

tipulados en los objetivos e incluso el algoritmo es capaz de estimar velocidades mayores.



Figure 7: Trayectoria del desplazamiento de las microburbujas

**Referencia: Elaboración propia**

## 4 INTERFAZ

Después de recolectar información sobre los distintos dispositivos, se filtró las personas que en sus dispositivos la aplicación funciona debidamente, se proporcionó 3 videos 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

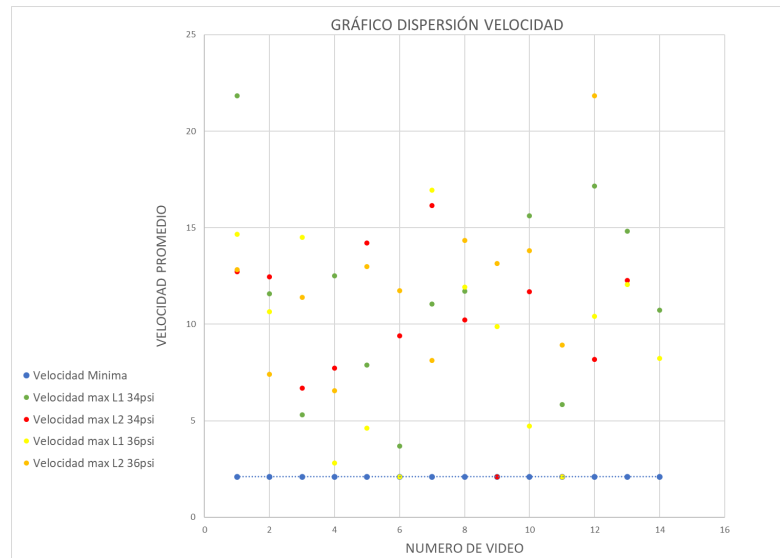


Figure 8: Dispersión de datos respecto a la velocidad en ambas pruebas

**Referencia: Elaboración propia**

con la versión de escritorio y con teléfonos proporcionados por nosotros; 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:

### 4.1 Usabilidad

Como se muestra en la figura 9 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.

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 10 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 11, en escala de likert lineal, donde 1 se considera malo y 5 se considera excelente, el 41.7% de las personas



¿Es fácil usar la aplicación ?

24 respuestas

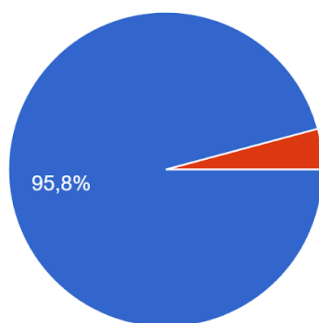


Figure 9: Pregunta sobre facilidad de uso

**Fuente:** Elaboración propia

¿Cómo calificarías tu experiencia usando la aplicación?

24 respuestas

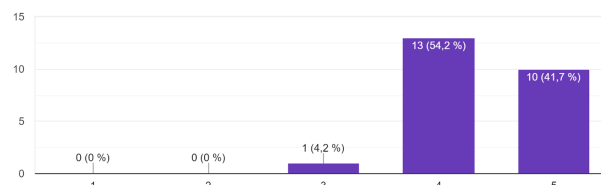


Figure 11: Pregunta sobre la experiencia usando la app

**Fuente:** Elaboración propia

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

24 respuestas

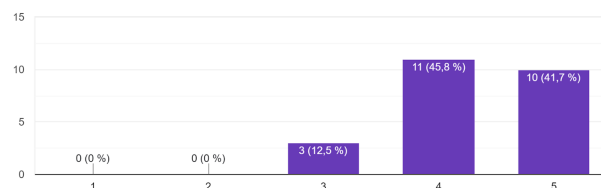


Figure 12: Pregunta sobre colores e información

**Fuente:** Elaboración propia

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%.

## 4.2 Interfaz

Se formuló también una pregunta, enfocada en que tan visible es la información en tema de colores como se muestra en la figura 12, 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 13, utilizando 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%.

¿Qué tan fácil es navegar por la aplicación?

24 respuestas

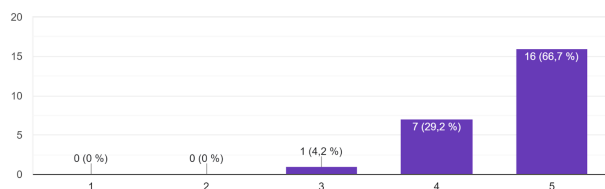


Figure 10: Pregunta sobre facilidad de navegación

**Referencia:** Elaboracion propia



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

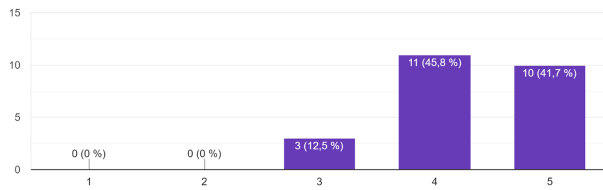


Figure 13: Pregunta proporción de información

**Fuente:** Elaboración propia

### 4.3 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 14 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.

Se planteó una pregunta en relación a los textos como en la figura 15, ya que a través de estos se informa sobre el estado del video, 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,

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

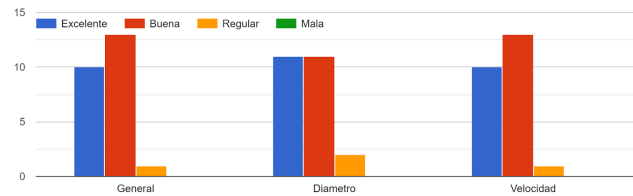


Figure 14: Pregunta indicaciones de ingreso a ventanas

**Fuente:** Elaboración propia

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

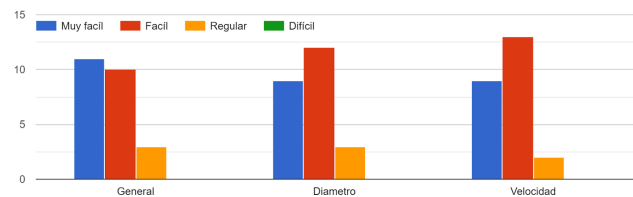


Figure 15: Pregunta sobre dificultad de lectura de textos

**Fuente:** Elaboración propia

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 16, 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.

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

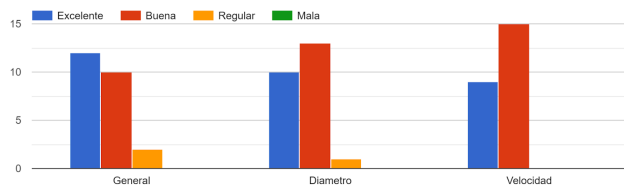


Figure 16: Pregunta de opinión sobre la organización de la información

**Fuente:** Elaboración propia

## 5 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 22μm a 215 μm 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,
- 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 videos 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 con 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.

haciendo un análisis prácticamente en el tiempo de ejecución del video a procesar.

## References

- [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. Eskanolu, 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] 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>
- [18] “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>
- [19] A.-U. Direct, “Lente de cámara de teléfono,” *AMAZON*, Mar. 2016, [Accessed: 17-Mar-2022]. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/-/es/teléfono-mejorado-angular-profesional-compatible/dp/B01D1CDW9O?th=1>
- [20] Huawei, “Huawei p30 pro,” Mar. 2019, [Accessed: 01-mar-2022]. [Online]. Available: <https://consumer.huawei.com/mx/phones/p30-pro/specs/>

## 6 Anexos

Primer lote 36 psi							
Video	Burbujas	Diametro ( $\mu\text{m}$ )			Velocidad (mm/s)		
		Minimo	Maximo	Promedio	Minima	Maxima	Promedio
1	16	22,0147	211,3420	86,78	2,0966	14,6563	3,57
2	11	35,2236	149,7005	79,04	2,0966	10,6365	3,64
3	12	35,2236	189,3272	102,31	2,0966	14,5087	7,11
4	11	26,4177	180,5213	88,58	2,0966	2,8017	2,11
5	13	35,2236	114,4769	62,29	2,0966	4,6051	2,2
6	13	30,8207	83,6562	58,1	2,0966	2,0966	2,1
7	27	26,4177	101,2680	50,11	2,0966	16,9476	6,04
8	15	22,0147	195,9316	89,84	2,0966	11,9172	5,13
9	10	22,0147	149,7005	65,18	2,0966	9,8784	3,68
10	10	22,0147	110,0739	60,13	2,0966	4,7312	2,55
11	15	30,8207	113,0092	78,5	2,0966	2,0966	2,1
12	10	44,0295	136,4917	82,38	2,0966	10,4066	4,06
13	10	30,8207	184,9242	80,9	2,0966	12,0557	2,9
14	14	22,0147	193,7301	83,22	2,0966	8,2364	2,33

Table 2: Resultados primer lote 36 psi

Segundo lote 34 psi							
Video	Burbujas	Diametro ( $\mu\text{m}$ )			Velocidad (mm/s)		
		Minimo	Maximo	Promedio	Minima	Maxima	Promedio
1	11	22,0147	189,3272	105,88	2,0966	12,7219	2,44
2	24	22,0147	211,3420	94,22	2,0966	12,4588	5,78
3	21	26,4177	184,9242	62,95	2,0966	6,6973	2,17
4	31	44,0295	193,7301	103,09	2,0966	7,7355	2,87
5	16	39,6266	193,7301	86,83	2,0966	14,2034	3,54
6	35	22,0147	167,3124	74,96	2,0966	9,3968	3,49
7	17	22,0147	211,3420	106,96	2,0966	16,1556	3,21
8	40	26,4177	206,9390	90,18	2,0966	10,2320	2,56
9	16	22,0147	198,1331	91,17	2,0966	2,0966	2,1
10	27	22,0147	180,5213	90,57	2,0966	11,6747	2,68
11	26	22,0147	211,3420	75,57	2,0966	2,0966	2,1
12	28	22,0147	180,5213	82,42	2,0966	8,1826	2,47
13	23	30,8207	215,7449	93,23	2,0966	12,2649	2,95

Table 3: Resultados segundo lote 34 psi

Segundo lote 36 psi							
Video	Burbujas	Diametro ( $\mu\text{m}$ )			Velocidad (mm/s)		
		Minimo	Maximo	Promedio	Minima	Maxima	Promedio
1	18	22,0147	162,9094	88,69	2,0966	12,8390	3,03
2	29	35,2236	215,7449	92,27	2,0966	7,4193	2,52
3	38	22,0147	165,8447	77,95	2,0966	11,3939	4,53
4	20	22,0147	206,9390	91,69	2,0966	6,5507	2,35
5	24	26,4177	206,9390	91,65	2,0966	12,9895	3,51
6	35	22,0147	167,3124	74,96	2,0966	9,3968	3,49
7	19	22,0147	198,1331	63,1	2,0966	8,1193	2,26
8	16	30,8207	202,5361	98,15	2,0966	14,3450	4,77
9	25	22,0147	149,7005	59,89	2,0966	13,1504	4,46
10	11	35,2236	132,0887	73,81	2,0966	13,7998	5,08
11	22	22,0147	198,1331	74,9	2,0966	8,9282	3,39
12	28	33,0221	198,1331	71,5	2,0966	21,8404	7,18

Table 4: Resultados segundo lote 36 psi