

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Optimización de una Celda de Flotación.

Trabajo de Investigación

Bryan Paul Pazmiño Carrillo

Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Quito, 20 de diciembre de 2017

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS**

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

Optimización de una Celda de Flotación Minera

Bryan Paul Pazmiño Carrillo

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

David Escudero, Ph.D.

Firma del profesor

.....

Quito, 20 de diciembre de 2017

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Bryan Paul Pazmiño Carrillo

Código: 00113454

Cédula de Identidad: 1720891819

Lugar y fecha: Quito, 20 de diciembre de 2017

RESUMEN

La flotación es uno de los procesos de concentración de minerales más utilizados en la industria minera. En cuanto al proceso de flotación se tiene tres zonas: agitación, intermedia y superior que se ven afectadas por las diferentes condiciones hidrodinámicas que tiene la celda de flotación. La influencia de la superficie de área de flujo de dispersión de las burbujas (S_b) es un parámetro que describe la eficiencia de la dispersión del gas en las celdas de flotación, ya que afecta en la zona de agitación donde se produce la colisión y empieza la adsorción de las partículas. Este trabajo tiene como objetivo la optimización de la celda de flotación mecánica de la USFQ analizando y evaluando las condiciones hidrodinámicas: flujo de aire, presión y la velocidad del rotor-estator en la zona de agitación que afectan la superficie de área de flujo de dispersión de las burbujas. Los resultados muestran que el flujo de aire J_g , la presión, el tamaño de la burbuja y la velocidad del impeler se encuentran dentro de los rangos de la literatura. Obteniendo los rangos óptimos de operación para el flujo de aire entre (1.32 – 1.44) cm/s, presión de aire entre (35 – 50) psi y para la velocidad del rotor-estator entre (1420 – 1520) rpm. Finalmente se calculó la dispersión de las burbujas S_b utilizando los diferentes flujos de aire y tamaños de las burbujas obteniendo un rango entre (30 – 55) s^{-1} aumentando la eficiencia de la dispersión del gas en un 19,95%. Este trabajo busca que las aplicaciones y soluciones sean viables, mejoren la recuperación de minerales de la celda de flotación a una escala de laboratorio y beneficie las futuras investigaciones del procesamiento y extracción de minerales de la USFQ.

Palabras clave: Dispersión, Burbujas, Flotación, Optimización, Dispersión del Aire, Velocidad del Rotor, Presión de Aire, Celda Mecánica

ABSTRACT

Flotation is one of the most used mineral concentration processes in the mining industry. Regarding the flotation process, there are three zones: agitation, intermediate and superior that are affected by the different hydrodynamic conditions of the flotation cell. The influence of the bubble surface area flux (S_b) is a parameter that describes the efficiency of the gas dispersion in the flotation cells, since it affects the agitation zone where the collision occurs, and the adsorption begins of the particles. The objective of this work is the optimization of the mechanical flotation cell of the USFQ, analyzing and evaluating the hydrodynamic conditions: air flow, pressure and impeller speed in the agitation zone that affects the bubble surface area flux. The results show that the air flow J_g , the pressure, the size of the bubble and the impeller speed are within the ranges of the literature. Obtaining the optimal operating ranges for the air flow between (1.32 - 1.44) cm / s, air pressure between (35 - 50) psi and for the impeller speed between (1420 - 1520) rpm. Finally, the bubble surface area flux (S_b) was calculated using the different air flows and bubble sizes obtaining a range between (30 - 55) s⁻¹ increased the efficiency of the gas dispersion by 19.95%. This work looks the solutions for the improvement of the availability of minerals laboratory of the USFQ

Key Words: Dispersion, Bubbles, Flotation, Optimization, Air Dispersion, Impeller Velocity, Air Pressure, Flotation Cell

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
OBJETIVO GENERAL.....	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
MÉTODOS	16
CELDA DE FLOTACIÓN	16
ROTOR-ESTATOR	17
SISTEMA DE AIRE.....	18
EFICIENCIA DE LA CELDA	18
EXPERIMENTOS	19
<i>Estado Inicial</i>	19
<i>Optimización</i>	21
<i>Flujo de aire</i>	22
<i>Velocidad del Rotor-Estator</i>	23
<i>Tamaño de la Burbuja</i>	24
<i>Procesamiento de Imágenes</i>	27
<i>Eficiencia y determinación de valores óptimos</i>	29
RESULTADOS	30
EFECTO DE LA VELOCIDAD DEL ROTOR-ESTATOR.....	31
EFECTO DEL FLUJO DE AIRE.....	35
EFECTO DE LA PRESIÓN DEL AIRE.....	37

TAMAÑO DE LA BURBUJA	38
CONCLUSIONES.....	42
REFERENCIAS.....	44

Índice de Tablas

TABLA 1. CONDICIONES INICIALES DE LA CELDA DE FLOTACIÓN	19
TABLA 2. FACTORES Y DOMINIO EXPERIMENTAL PARA LA OPTIMIZACIÓN DE UNA CELDA DE FLOTACIÓN (AMINI ET. AL, 2016).....	21
TABLA 3. CONDICIONES EXPERIMENTALES DE CAUDAL, PRESIÓN Y VELOCIDAD DEL IMPELLER.....	22
TABLA 4.RESULTADOS PARA CADA COMBINACIÓN	30
TABLA 5. RANGOS ÓPTIMOS DE OPERACIÓN.....	39

Índice de Figuras

FIGURA 1. CELDA DE FLOTACIÓN MECÁNICA	17
FIGURA 2. FLUJÓMETRO ORANGE RESEARCH	22
FIGURA 3. REGULADOR DE PRESIÓN Y MANÓMETRO FESTO	23
FIGURA 4. VARIADOR DE FRECUENCIA ISTECH	24
FIGURA 5. POSICIÓN DE LA CÁMARA EN LA CELDA DE FLOTACIÓN.....	25
FIGURA 6. VISTA SUPERIOR Y LATERAL DE LAS DIFERENTES POSICIONES DE LA CÁMARA Y LOS PUNTOS DE MUESTRA.	25
FIGURA 7. ALTURAS DE LAS DIFERENTES ZONAS DE LA CELDA MECÁNICA PARA FOTOGRAFÍAS.....	26
FIGURA 8. ESQUEMA DE LA VISTA DE LAS BURBUJAS EN CONTRASTE CON LA LUZ	27
FIGURA 9. IMAGEN DE LAS BURBUJAS EN LA CELDA DE FLOTACIÓN. IMAGEN ORIGINAL (IZQUIERDA) Y LA IMAGEN BINARIA (DERECHA).	28
FIGURA 10. ANÁLISIS DE LAS PÁRTICULAS.....	29
FIGURA 11. DIÁMETRO DE LA BURBUJA EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL ROTOR-ESTATOR	32
FIGURA 12. SUPERFICIE DE ÁREA DE FLUJO DE DISPERSIÓN DE LAS BURBUJAS EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD DEL ROTOR-ESTATOR	33
FIGURA 13. PROCESO DE COLISIÓN, ADSORCIÓN Y GENERACIÓN DE ESPUMA EN LAS DIFERENTES ZONAS DE LA CELDA DE FLOTACIÓN.	34
FIGURA 14. DIÁMETRO DE LA BURBUJA EN FUNCIÓN DEL FLUJO DE AIRE.....	35
FIGURA 15. SUPERFICIE DE ÁREA DE FLUJO DE DISPERSIÓN DE LAS BURBUJAS EN FUNCIÓN DEL FLUJO DE AIRE.	36
FIGURA 16. DIÁMETRO DE LA BURBUJA EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN DE SALIDA DEL AIRE COMPRIMIDO	37
FIGURA 17. DISPERSIÓN DE LAS BURBUJAS EN FUNCIÓN DEL DIÁMETRO DE LA BURBUJA	38
FIGURA 18. ALTURA DE LA ESPUMA EN FUNCIÓN DEL FLUJO DE AIRE Y VELOCIDAD DEL ROTOR- ESTATOR	40

INTRODUCCIÓN

El Ecuador es un país con gran potencial minero, que cuenta con importantes reservas de oro, plata, cobre y otros metales (Nacional et al., 2015). En la actualidad, el Ecuador tiene como una de las principales fuentes de desarrollo económico a la minería (Nacional et al., 2015) y según el ministerio de Minería desde el 2015, se ha buscado incrementar la investigación y desarrollo tecnológico en el sector minero para mejorar la producción e inclusión de la minería en el país.

El aprovechamiento de los recursos naturales no renovables pasa por varias fases: I) Exploración geológica, II) Explotación Minera, III) Procesamiento de minerales y IV) Metalurgia Extractiva. Este estudio se va a enfocar en la actividad de la fundición que es el proceso y procedimiento técnico encargado de la separación de los metales valiosos y no valiosos de minerales o concentrados (Nacional et al., 2015), donde se enfocará en un procedimiento con gran desarrollo como es la flotación.

La flotación es uno de los procesos de concentración de minerales más utilizado en la actualidad que permite mejorar la producción y extracción de minerales (Américo & Calderón, 2012). La extracción de minerales por medio de la flotación es un proceso que tiene como principal objetivo separar de forma selectiva los minerales hidrófobos de los hidrofílicos, recuperando así los sulfuros metálicos económicamente valiosos tales como: oro, plata, zinc, cobre, etc., y desechando los metales que tienen un menor grado de importancia. Este proceso ha permitido el incremento y disponibilidad de recursos mineros para la industria.

La flotación tiene un principio fisicoquímico, donde las partículas de los minerales valiosos que son hidrofóbicas colisionan con las burbujas de aire y se producen fenómenos fisicoquímicos de adsorción preferencial con los minerales que se suspenden en el agua y tienden a moverse hacia

arriba en contra de la gravedad, para llegar a un estado de espuma que posteriormente será extraída conforme pasa el tiempo, mientras que las partículas minerales no valiosos o ganga, son hidrofílicas y se las lleva hacia abajo como los relaves o desechos mineros.

Dentro de la Celda de flotación existen dos fases: la fase de pulpa y la fase de espuma, que deben ser analizadas para saber el comportamiento y rendimiento del proceso de flotación (Meng et al., 2016). La fase de pulpa tiene dos zonas en su interior. Primero la zona de agitación, que es aquella donde se produce el movimiento de la pulpa, y generando una turbulencia en el fluido lo que ocasiona la colisión y adsorción de las partículas minerales hidrófobas con las burbujas de aire. Después esta la zona intermedia, es aquella donde existe un fluido en estado transitorio con relativa calma para mejorar la adsorción preferencial y permite que las burbujas hidrofóbicas puedan desplazarse hacia arriba favoreciendo su movimiento hacia la superficie. Finalmente, dentro de la fase de espuma está la zona superior donde se tiene una fase acuosa, formada por la acumulación de las burbujas y produciendo la espuma deseada, aquí se tiene una zona con una turbulencia que tiende a disminuir considerablemente permitiendo la estabilidad de las burbujas y favoreciendo a la flotación de los minerales que serán descargados por un rebalse natural o con ayuda de paletas mecánicas.

Existe varias máquinas y reactivos utilizados para el proceso de flotación, y con el paso del tiempo se ha desarrollado diferentes tipos de maquinaria que permiten obtener de manera rápida y eficiente la flotación mediante espuma como son las celdas de flotación y sus diferentes tipos: Las máquinas de flotación mecánicas y las máquinas de flotación neumáticas.

Las mecánicas introducen aire por succión mediante la agitación mecánica y las neumáticas se produce inyección de aire a elevada presión (compresores).

Las celdas de flotación han permitido desarrollar procesos de concentración de minerales eficientes que en relación a costo-beneficio han dado a la industria minera la facilidad de procesar grandes tonelajes de material que en otro tiempo hubiera sido considerado como desecho. Las celdas de flotación mecánicas están diseñadas con un rotor-estator que es el encargado de generar el movimiento en toda la celda y proporcionar el proceso de concentración de minerales. Las principales funciones del rotor-estator son:

- Producir una buena aireación, permitiendo el paso de las burbujas de aire a través de toda la celda.
- Proporcionar dispersión de las partículas de minerales hidrofóbicos como hidrofílicos realizando las colisiones necesarias con las burbujas de aire para después tener un proceso de suspensión de los sulfuros minerales, evitando la sedimentación de las mismas.

Las celdas de flotación tienen distintos problemas para realizar un proceso de flotación eficiente estas pueden ser fisicoquímicas (soluciones químicas, propiedades del concentrado, densidad del gas) o mecánicas. Este estudio se va a enfocar en las partes mecánicas como son el rotor-estator, el flujo de aire y la presión de aire dado que cada una de las partes crea efectos importantes sobre el tamaño de la burbuja y por ende la tasa de extracción de minerales y la estabilidad de la espuma se encuentra afectada.

El tamaño de las burbujas es uno de los factores más importantes porque influye directamente en desempeño del proceso de flotación, para esto se busca tener el control sobre el proceso de flotación mediante las variables operacionales mecánicas que son: la tasa superficial de aire y la velocidad del impeller, porque permite observar cómo se produce la distribución de las burbujas de aire a través de todo el volumen de la celda de flotación, desde la fase donde se busca la suspensión de las partículas por medio del rotor-estator, hasta la zona de la adhesión y colisión de

las partículas de minerales tanto hidrófobos como hidrófilos con las burbujas para la formación de la espuma.

El tamaño de las burbujas se ve afectado por la velocidad del rotor-estator, ya que un cambio en la velocidad puede cambiar la dispersión de las burbujas a través de toda la celda de flotación. También la velocidad de rotación puede proporcionar más turbulencia a la espuma, afectado a la estabilidad de la misma. De la misma forma en las celdas de flotación mecánicas la velocidad del impeller puede regularse a un rango en el cual se promueve la recuperación de concentrado y se reduce la recuperación de la ganga, es el material secundario al que se desea explotar y puede ser visto como escombros, (Wang, Peng, Runge, & Bradshaw, 2015). Los efectos de la velocidad del impulsor dan como resultado un aumento en la recuperación de sulfuros metálicos y en general la agitación excesiva conduce a una dispersión de aire adecuada para tener una mayor cantidad de partículas minerales en contacto dentro de la celda de flotación, logrando que la estabilidad de la espuma no se vea afectada y el tamaño de las burbujas sea el adecuado para una recuperación eficiente.

La tasa de flujo de aire es otro de los factores que afectan el tamaño de las burbujas, la estabilidad de la espuma y el proceso de flotación. Visto que el aire es el encargado de producir las burbujas, la velocidad de entrada del aire se ha estudiado y se ha demostrado que el aumento de la tasa de flujo de aire, aumenta la tasa de flotación en la fase de pulpa, pero esto es perjudicial para la fase de espuma porque se reduce la recuperación de minerales valiosos (Venkatesan, Harris, & Greyling, 2014); generando un problema para la flotación por lo que se busca velocidades que estén dentro de un rango adecuado para que la fase de pulpa y espuma tenga una buena interacción. Además, la distribución de las burbujas es consecuencia de la dispersión del gas y de la colisión

de las partículas, tomando en cuenta la eficiencia se busca tener burbujas lo más pequeñas posibles en la zona de agitación y estabilizar la espuma de acuerdo a la altura de la celda de flotación.

La Universidad San Francisco de Quito (USFQ) cuenta con un laboratorio de investigación aplicada en metalurgia extractiva que tiene dentro de su maquinaria una celda de flotación de fabricación local que es utilizada a diario. Sin embargo, el desempeño no es el deseado, porque presenta limitaciones en el ingreso de aire y en la uniformidad en su dispersión dentro de la celda. Además, no permite observar de forma eficiente el proceso de flotación que es necesario para las diferentes investigaciones y los ensayos de laboratorio que se realizan a partir de esta máquina. Por esta razón para la USFQ es importante analizar el proceso y los factores que provocan este bajo desempeño.

Objetivo General

El objetivo principal de este estudio es optimizar la celda de flotación de la Universidad San Francisco de Quito.

Objetivos Específicos

Para cumplir con el objetivo general de este estudio se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Analizar el funcionamiento de las partes mecánicas de una celda de flotación.
- Observar los problemas que se presentan en la celda de flotación durante el proceso de extracción de minerales.
- Determinar las velocidades de los diferentes fluidos.
- Identificar el rango óptimo de velocidad del rotor-estator
- Determinar el rango óptimo de velocidad del flujo de aire
- Analizar las presiones del aire a través de la tubería.

- Observar el funcionamiento del motor y sus alabes.
- Establecer la altura óptima para la estabilización de la espuma.
- Proponer soluciones viables para el laboratorio de minería tanto mecánicas como financieras.
- Establecer si las mejoras propuestas tienen un impacto considerable en la productividad.

Cabe destacar que esta celda de flotación también tiene como uno de sus objetivos específicos el cuidado del medio ambiente; ya que dentro de la universidad se utilizan materiales que son considerados como desechos para la industria minera. A pesar de esto la USFQ y el área de desarrollo de procesos metalúrgicos y mineros se ha enfocado en brindar un nuevo proceso para evitar contaminar el medio ambiente. Además, esta celda de flotación no es utilizada únicamente para extraer metales sino también tiene aplicaciones para el tratamiento de aguas residuales generando plazas de trabajo en nuevas industrias por lo que se busca el beneficio del área de minería y otras áreas de interés para la Universidad San Francisco de Quito.

MÉTODOS

Se analiza de forma experimental el funcionamiento de la celda de flotación de la Universidad San Francisco de Quito, para esto se realizaron diferentes experimentos, variando las condiciones mecánicas como son: la velocidad del rotor-estator, el flujo de aire y la presión de aire. Mediante los diferentes análisis se plantearon posibles soluciones que mejoren la eficiencia del proceso de flotación de la celda.

Celda de Flotación

La celda de flotación utilizada en los experimentos es una celda de flotación mecánica con un sistema rotor-estator. Este equipo es parte del laboratorio de minería de la Universidad San Francisco de Quito. La celda de flotación tiene unas dimensiones de 1,20 m de altura y 0,80 m de diámetro como se observa en la Figura 1. Con una capacidad de almacenamiento de 150 lts, ya sea de agua o material previamente molido.



Figura 1. Celda de Flotación Mecánica

Rotor-Estator

El rotor-estator de la celda de flotación es un motor monofásico de 2 hp con una velocidad máxima de 1720 rpm, este motor es el encargado de realizar el movimiento y agitación de los

fluidos dentro de la celda. El rotor-estator de la USFQ está diseñado para que tenga una velocidad constante de 1720rpm, sin embargo, no tiene un regulador de velocidades ni un sistema de medición de las revoluciones a las que se encuentra girando.

Sistema de Aire

La celda de flotación utiliza gas que pasa a través de la celda de flotación en este estudio es aire comprimido, suministrado por un compresor de 5 hp con una capacidad de almacenamiento de 60 galones, está conectado mediante una manguera de plástico con un diámetro de 8 mm y cuenta con una válvula que permite el paso del aire de acuerdo a las necesidades y procesos a realizar.

La velocidad superficial del aire J_g es linear a la velocidad de gas en la celda de flotación y se determina por el volumen de gas que pasa a través del área de sección transversal por unidad de tiempo. Se puede calcular con la siguiente ecuación

$$J_g = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

Donde Q es la tasa de flujo de aire y A es el área de sección trasversal a través de la celda de flotación.

Eficiencia de la Celda

La eficiencia dentro de la celda de flotación se puede medir mediante la recuperación de espuma que se obtiene en el proceso de flotación, es importante identificar el nivel de espuma que se tiene dentro de la celda de flotación porque se encuentran afectados por la velocidad a la que se encuentra el concentrado y el caudal de aire que ingresa a la celda, para esto se mide la altura de espuma que se produce dentro de la celda de flotación.

Adicionalmente se puede observar la eficiencia con la superficie de área de flujo de dispersión de las burbujas S_b que es un parámetro que es usado para describir la eficiencia de la dispersión del gas en las celdas de flotación.

$$S_b = 6 \frac{J_g}{D_b} \quad (2)$$

En donde J_g es la velocidad superficial del aire y D_b es el diámetro de la burbuja de aire que ingresa a la celda de flotación.

El valor de S_b permite observar el desempeño metalúrgico a ser pronosticado porque la tasa de recolección de las partículas depende de la superficie específica de la burbuja.

Experimentos

Se quiere optimizar la celda de flotación y mejorar la eficiencia de la misma, para esto se cree que la velocidad a la que gira el rotor-estator, el flujo de aire que ingresa a la celda de flotación y la presión de aire influyen dentro del proceso de flotación.

Estado Inicial

El primer experimento se va a realizar con las condiciones iniciales de funcionamiento de la celda de flotación de la USFQ como se observa en la tabla 1. Con el siguiente procedimiento:

Tabla 1. Condiciones iniciales de la celda de flotación

Parámetros	Valores
Velocidad del Rotor-Estator (rpm)	1720
Flujo de Aire (cm ³ /s)	1.69
Presión de Aire (psi)	60

- Se introduce 140 litros de agua dentro de la celda.
- Después se prende el rotor-estator para que se produzca el movimiento del fluido, buscando tener un rango alto de turbulencia cerca del rotor.
- Luego se abre la válvula del compresor y se permite la entrada y dispersión de aire.
- Una vez que se observan burbujas que se producen naturalmente se añade un espumante y se abre la válvula de aire, incrementando el flujo de aire y generando la espuma deseada.
- Se introduce la cámara Go Pro Hero 6 dentro del agua y se toma las fotos en la zona de agitación.
- Finalmente, se mide el nivel de la espuma y se observa la estabilidad de la misma, que rebalse naturalmente por fuera de la celda hasta un recipiente.

Problemas

En el primer experimento se observan los principales problemas por los que el proceso de flotación se ve afectado. El primer problema es el flujo de aire que pasa a través de la celda, porque no se puede medir el caudal que está pasando, con lo que no se puede predecir el comportamiento del aire, ni la generación de las burbujas. El segundo problema es la velocidad del rotor-estator porque no tiene un sistema de medición de las revoluciones por minuto a las que está girando. Además, se observa que la estabilidad de la espuma se ve afectada porque no se produce uniformemente y decrece rápidamente el nivel de agua necesario para que se produzca el rebalse natural.

Optimización

Para la optimización de la celda se realizaron 12 experimentos, identificando varias posibles soluciones experimentales. Entonces se identificó la velocidad óptima de giro del rotor-estator, el flujo de aire y la presión óptima para mejorar la eficiencia del proceso de flotación.

Para cada uno de los experimentos se procesarán 140 litros de agua en la celda de flotación con una adición de 7 gramos de espumante. La optimización de la celda de flotación busca generar condiciones hidrodinámicas similares a las publicadas por Amini et al. (2016) que se observan en la tabla 2.

Tabla 2. Factores y Dominio experimental para la optimización de una celda de flotación (Amini et. al, 2016)

Parámetros	Rango Experimental
Velocidad del Rotor-Estator (rpm)	746 - 1550
Flujo de Aire (cm³/s)	0.45 - 1.60
Presión de Aire (psi)	20 - 60
Dispersión de Gas (S_b) (s⁻¹)	20 - 60

Además, los aparatos de medición que se aplicarán para evaluar las condiciones hidrodinámicas de la celda de flotación como la distribución de tamaño de la burbuja, la velocidad del flujo de aire, la velocidad del impeller y la altura de la espuma serán los mismos para cada uno de los experimentos. Finalmente, para cada uno de los experimentos se fueron alternando y configurando los diferentes valores de flujos de aire y velocidad del rotor-estator para obtener todas las posibles combinaciones las condiciones se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Condiciones experimentales de caudal, presión y velocidad del impeller

Caudal (scfm)	Caudal ($\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$)	Presión (psi)	Velocidad Impeller (rpm)	Velocidad Impeller ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)
4,00	1887,79	20	1680	4,40
5,50	2595,71	35	1520	3,98
6,00	2831,68	50	1420	3,72
6,50	3067,66	58	1720	4,50

Flujo de aire

El volumen de aire que entra en la celda de flotación fue controlado por un medidor de flujo (flujómetro) como se observa en la figura 2. Que permite tener las medidas que se encuentran dentro de los rangos de la tabla 2 y que sirven para los distintos experimentos con las condiciones de la tabla 3.

**Figura 2.** Flujómetro orange research

Un regulador de presión y un manómetro fueron instalados en la máquina como se observa en la figura 3. Para mantener las presiones entre 20 y 60 psi durante los diferentes experimentos.



Figura 3.Regulador de presión y manómetro Festo

La tasa de flujo de aire será calculada con la ecuación 1 y los experimentos en la celda de flotación se realizaron a las velocidades que se muestran en la tabla 3 que se encuentran dentro de los amplios rangos de operación de las celdas de flotación.

Velocidad del Rotor-Estator

Las condiciones hidrodinámicas en la celda de flotación dependen principalmente de la velocidad de los álabes del impeller. Además, la velocidad del impeller fue controlada durante los experimentos de flotación utilizando un variador de frecuencia que se muestra en la figura 4 que está conectado en serie con el motor eléctrico monofásico.



Figura 4. Variador de Frecuencia ISTECH

Se midió las revoluciones por minuto del impeller con un tacómetro óptico. Las velocidades del impeller usadas en los experimentos se muestran en la tabla 3.

Tamaño de la Burbuja

Para medir el tamaño de la burbuja en la celda, se instaló una Go Pro Hero 6 en el fondo de la celda de flotación como se muestra en la figura 5 tomando las fotografías necesarias para posteriormente determinar el tamaño de la burbuja.

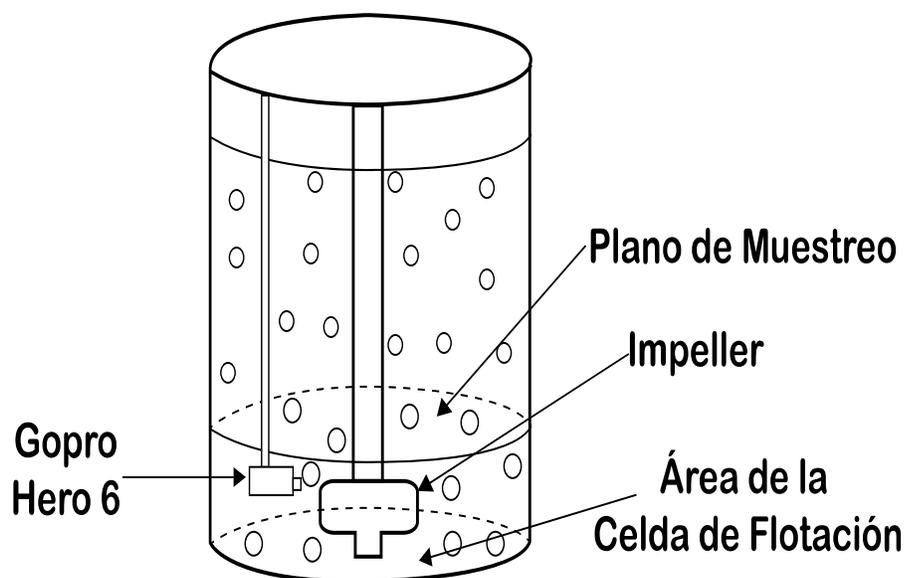


Figura 5. Posición de la cámara en la celda de flotación

Se tomaron 30 fotos para cada uno de los experimentos en tres lugares diferentes del fondo de la celda de acuerdo a los orificios y la geometría del disco de dispersión de aire como se muestra en la figura 6.

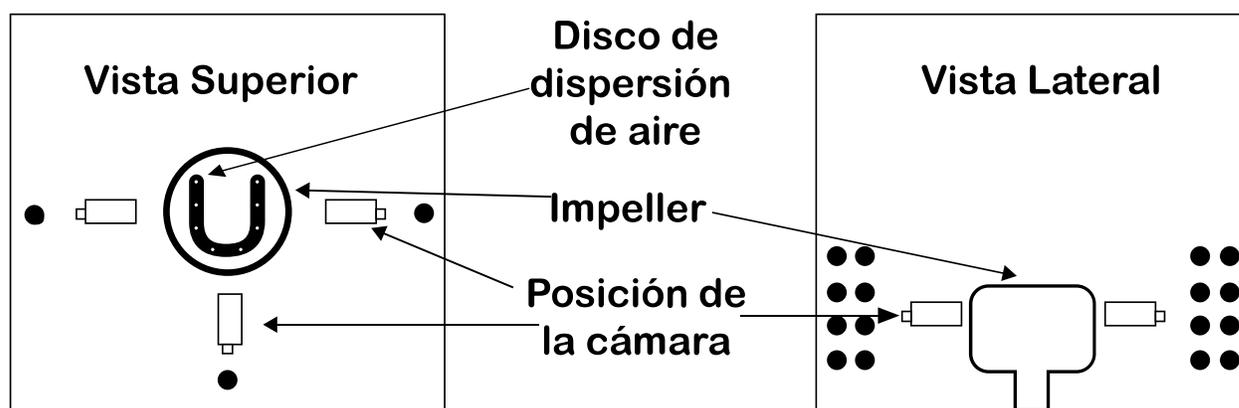


Figura 6. Vista superior y lateral de las diferentes posiciones de la cámara y los puntos de muestra.

Además, para observar el crecimiento de la burbuja, la adsorción y colisión de las burbujas para la formación de la espuma se tomaron fotos a tres alturas diferentes, la altura correspondiente

al nivel de referencia se encuentra a 10 cm de la zona de rebalse, la segunda altura a 25 cm del nivel de referencia y finalmente a 45 cm del nivel de referencia.

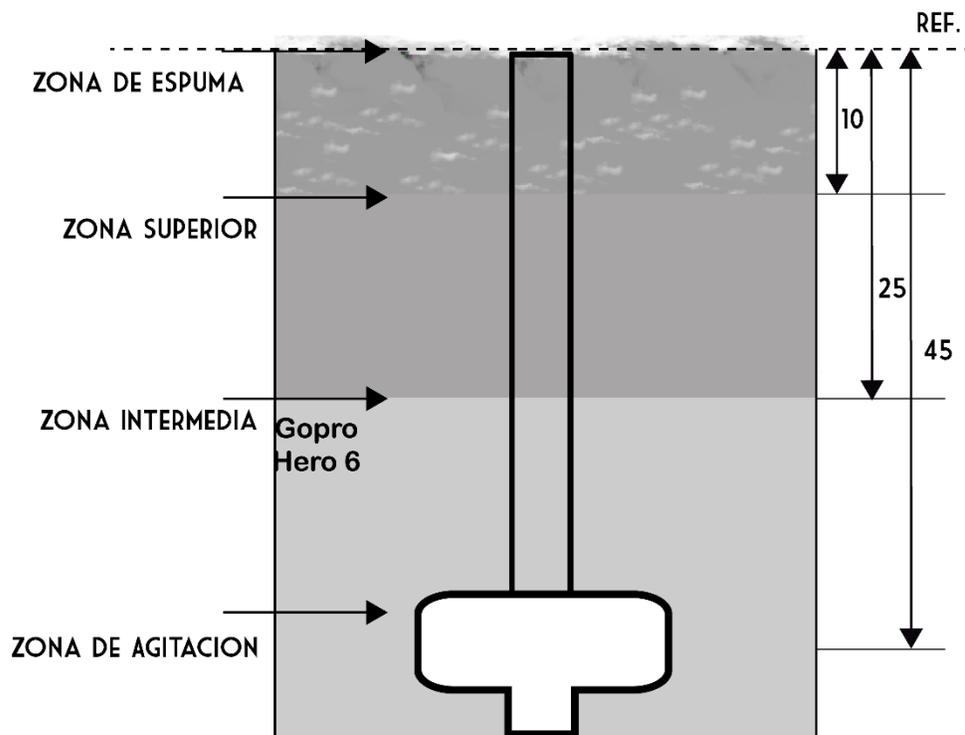


Figura 7. Alturas de las diferentes zonas de la celda mecánica para fotografías

Las imágenes se toman usando iluminación en la parte posterior para garantizar que las imágenes se encuentren bien enfocadas y tengan alto contraste (Hernandez-Aguilar, Gomez, & Finch, 2002). Esta iluminación lo que produce en la imagen es una burbuja oscura sobre un fondo brillante como se muestra la figura 7.

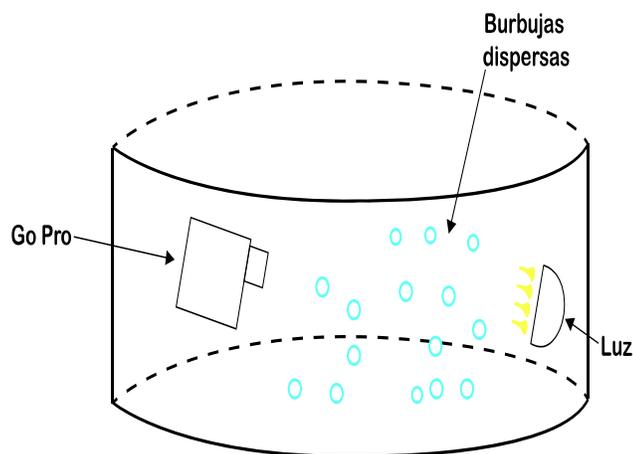


Figura 8. Esquema de la vista de las burbujas en contraste con la luz

Procesamiento de Imágenes

El tamaño de la burbuja fue medido utilizando el programa Image J. Este es un programa especializado en el procesamiento de imágenes debido a que puede mostrar, editar, analizar, procesar imágenes de diferentes formatos, de la misma manera permite calcular estadísticas, medir distancias de área, ángulo y pixel de regiones de interés definidas. También cuenta con funciones estándar de procesamiento de imágenes como manipulación de contraste, nitidez, suavizado, detección de bordes y filtrado y su calibración está disponible para proporcionar mediciones dimensionales en unidades como del sistema internacional y sistema inglés. (NIH Image, 26)

Para el uso del programa se realizaron los siguientes pasos:

1. Seleccionar la mejor foto para cada una de las tres posiciones de cada uno de los 12 experimentos.
2. Abrir la fotografía con el programa ImageJ y duplicar la imagen.
3. Seleccionar la escala de la fotografía
4. Ajustar la imagen a 8-bit o 16-bit

5. Eliminar el fondo de la imagen escogiendo la opción “Substract Background”, con la cual se corrige el fondo iluminado y desigual eliminando grandes variaciones de las intensidades de fondo.
6. Escoger el rango óptimo en lo opción “Threshold” para la escala de grises de la imagen, eligiendo un valor de corte de modo de que cada pixel menor a ese valor sea considerado una clase y el pixel mayor se considera otra clase. Descartando las burbujas que son muy largas y no tienen una forma circular.
7. Convertir la imagen en Binario
8. Escoger la opción “Fill Holes”
9. Convertir a Máscara
10. Escoger la opción “Watershed”
11. Elegir la opción “Analyze Particles”.

Una vez realizado el proceso el programa analiza la imagen y da los resultados del tamaño de la burbuja D_b , con su respectiva desviación estándar y el promedio de la burbuja. Este proceso se realizó en un total de 36 imágenes con lo que se obtienen los diámetros promedios de los 12 experimentos, el análisis se muestra en la figura 9 y figura 10.

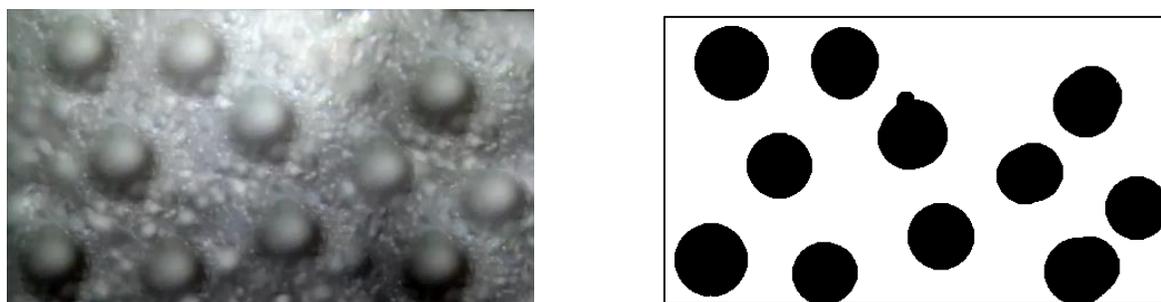


Figura 9. Imagen de las burbujas en la celda de flotación. Imagen original (izquierda) y la imagen binaria (derecha).

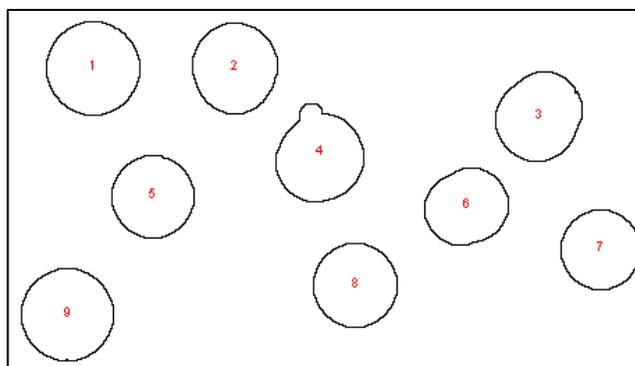


Figura 10. Análisis de las partículas

Eficiencia y determinación de valores óptimos

Una vez obtenidos los diámetros de las burbujas para cada uno de los experimentos se procedió a calcular la superficie de área de dispersión de las burbujas (S_b) que permite observar el desempeño metalúrgico con lo cual se determinarán los valores óptimos tanto de flujo de aire, presión y velocidad del rotor-estator para poder medir la eficiencia del proceso de flotación observando que la relación de velocidad y flujo de aire sea inversamente proporcional, ya que a medida que la velocidad aumenta es necesario disminuir el flujo de aire que ingresa a la celda y viceversa. Adicionalmente, se observa las mediciones de la altura en la zona de espuma producida en cada uno de los experimentos para determinar la estabilidad de la espuma. Encontrando una altura óptima en donde la espuma rebalse naturalmente con una velocidad moderada para que no exista disminución del nivel de agua y no sea necesario realizar un cambio en las condiciones hidrodinámicas ya establecidas.

Finalmente, con cada una de las posibles soluciones propuestas se estableció si las mejoras tienen un impacto considerable en la productividad de la celda de flotación y en el tamaño de las burbujas que se obtienen mediante el análisis de las partes mecánicas.

RESULTADOS

Se realizaron los experimentos en base a las condiciones hidrodinámicas de la tabla 3 buscando la optimización de la celda mecánica, en este trabajo se analiza los efectos que tienen las partes mecánicas: la velocidad del rotor-estator, el flujo de aire y la presión de aire, sobre la eficiencia del proceso de flotación calculado mediante la ecuación 2 y el análisis de la altura de la espuma.

Los datos experimentales recogidos generalmente resultaron ser muy consistentes y similares a los rangos de condiciones observados en la tabla 2 con el fin de evaluar los experimentos realizados. La celda de flotación fue operada durante un periodo de 30 minutos para cada experimento, alternando y configurando los diferentes valores de acuerdo a las condiciones de la tabla 3. Para esto se tomaron fotografías para cada uno de los experimentos y sus resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados para cada combinación

Experimento	Velocidad del Impeller ($\frac{m}{s}$)	Presión (psi)	J_g (cm/s)	D_b (mm)	D_b (cm)	S_b ($\frac{1}{s}$)	Altura de espuma (cm)
1	4,40	20	0,96	1,495	0,150	38,58	17,8
2	4,40	35	1,32	2,263	0,226	35,05	19,25
3	4,40	50	1,44	2,580	0,258	33,54	20,5
4	4,40	58	1,56	2,814	0,281	33,31	21,8
5	3,98	20	0,96	1,420	0,142	40,62	10,8
6	3,98	35	1,32	1,543	0,154	51,41	14,25
7	3,98	50	1,44	1,607	0,161	53,83	16,4
8	3,98	58	1,56	1,964	0,196	47,73	17,6
9	3,72	20	0,96	1,431	0,143	40,33	8,2
10	3,72	35	1,32	1,630	0,163	48,65	11,5
11	3,72	50	1,44	1,748	0,175	49,50	12,4
12	3,72	58	1,56	1,873	0,187	50,04	13,7
Condiciones Iniciales	4,50	60	1,68	2,980	0,298	33,88	22

Se puede evidenciar que existe variación en la altura de la espuma y en la superficie de área de flujo de dispersión de las burbujas con cada una de las condiciones hidrodinámicas propuestas. También se puede observar que se mantiene una relación entre los tres factores analizados: flujo de aire, presión y velocidad del rotor-estator. A continuación, se describen los diferentes resultados para cada uno de los factores de la tabla 3 en los cuales se enfocó la optimización de la celda mecánica.

Efecto de la velocidad del rotor-estator

Utilizando el variador de frecuencia se logró variar las velocidades del rotor-estator estableciendo tres velocidades a las cuales el motor monofásico de 2 hp pueda tener un buen rendimiento. Cada una de estas velocidades se alternaron con los diferentes flujos de aire obteniendo los resultados de la tabla 4. Los diferentes diámetros de las burbujas en comparación a las diferentes velocidades del rotor-estator se observa en la figura 11, como se observa para cada uno de los flujos de aire a medida que aumenta la velocidad del rotor-estator el tamaño de la burbuja también aumenta.

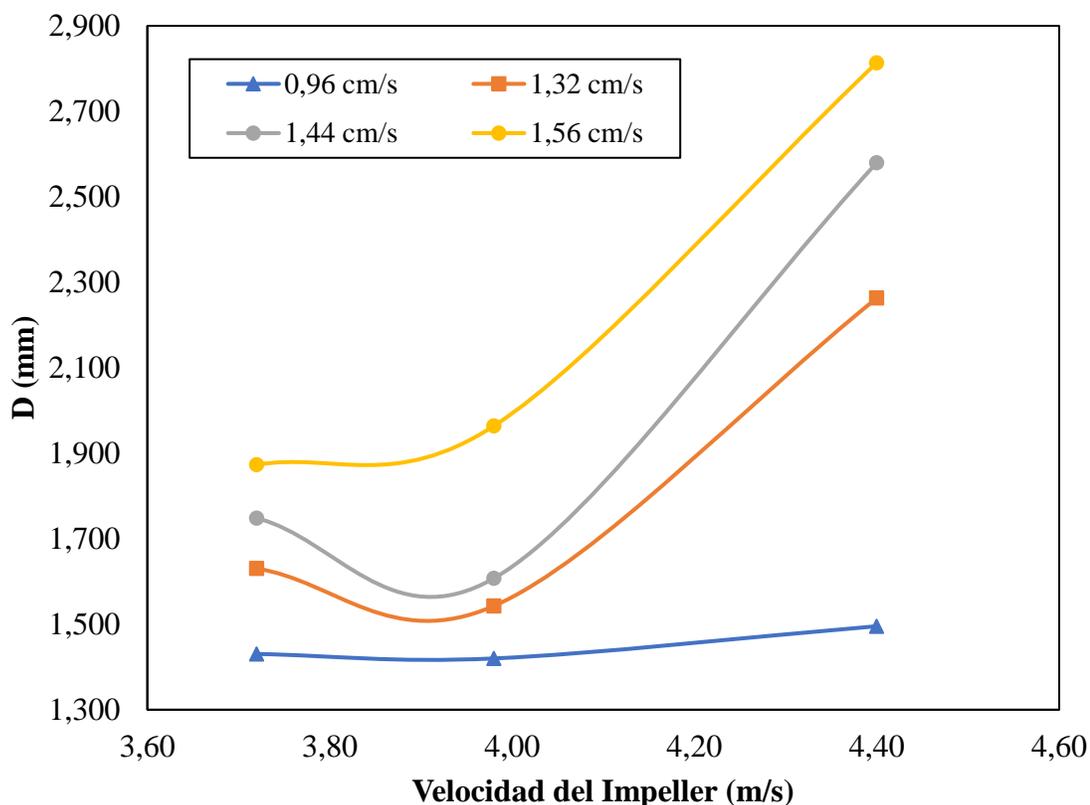


Figura 11. Diámetro de la burbuja en función de la velocidad del rotor-estator

Para determinar la condición óptima de la velocidad del rotor-estator es importante analizar la superficie de área de dispersión de las burbujas y su relación con la velocidad esto se muestra en la figura 12. Se observa que existe una eficiencia más significativa para una velocidad de 3.98 m/s igual a 1520 rpm. A esta velocidad se pudo observar que existía mayor colisión entre las burbujas de aire en la zona de agitación, mientras que en la zona intermedia se produjo una mayor adsorción entre las burbujas aumentando su tamaño conforme van subiendo hasta llegar a la zona superior donde la altura de la espuma se estabilizo para un rebalse natural como se observa en la figura 13. Sin embargo, como se muestra en la figura 12, cuando la velocidad es de 1420 rpm se puede observar que la eficiencia o dispersión de las burbujas también es baja debido a que el tamaño de la burbuja se encuentra entre 1.43 y 1.49 mm generando una dispersión de las burbujas en un rango de 40 a 38, además que los niveles en la altura de la espuma necesarios para una buena

recolección no son generados y se quedan debajo de la zona de rebalse natural. De la misma manera cuando la velocidad es de 1680 rpm se generó un gran tamaño de burbuja, pero la dispersión de las burbujas decreció y la altura de la espuma se vio afectada por lo que se generó inestabilidad en la espuma causada por una mayor turbulencia y colisión de las partículas.

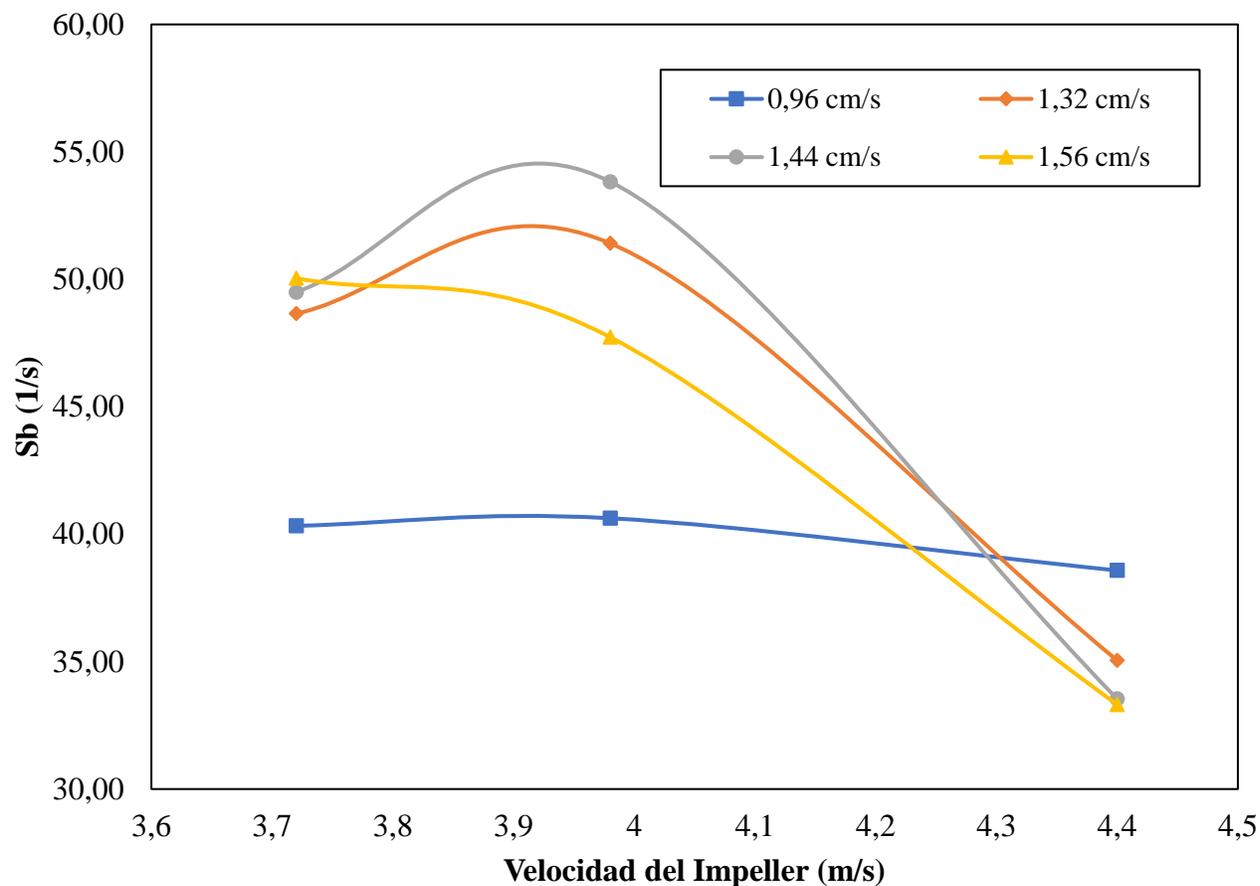


Figura 12. Superficie de área de flujo de dispersión de las burbujas en función de la velocidad del rotor-estator

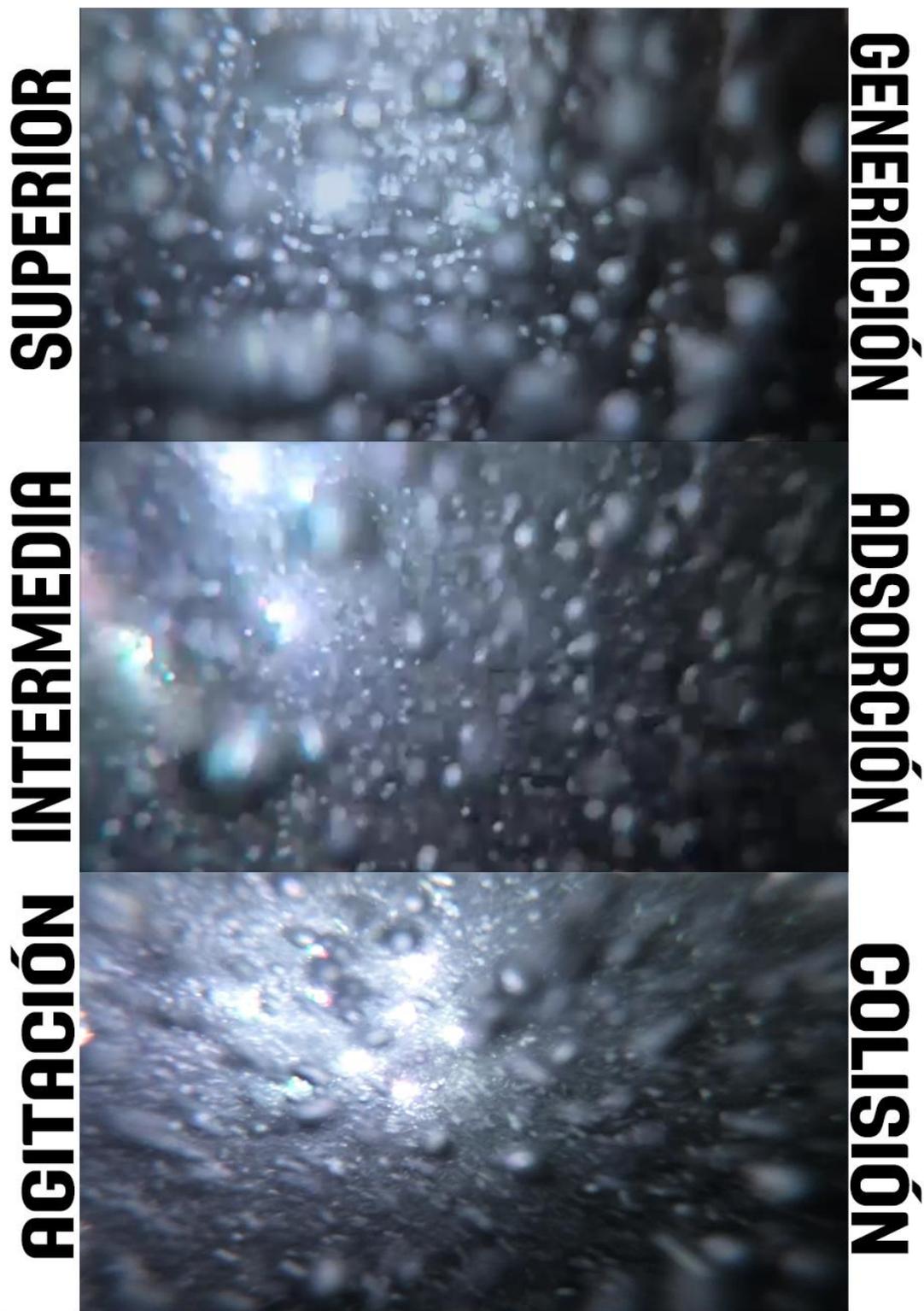


Figura 13. Proceso de colisión, adsorción y generación de espuma en las diferentes zonas de la celda de flotación.

Efecto del flujo de aire

Utilizando el flujómetro se pudieron obtener las distintas condiciones de flujos de aire de acuerdo a la tabla 3. Se observa que el tamaño de la burbuja crece proporcionalmente con el flujo de aire como se muestra en la figura 14.

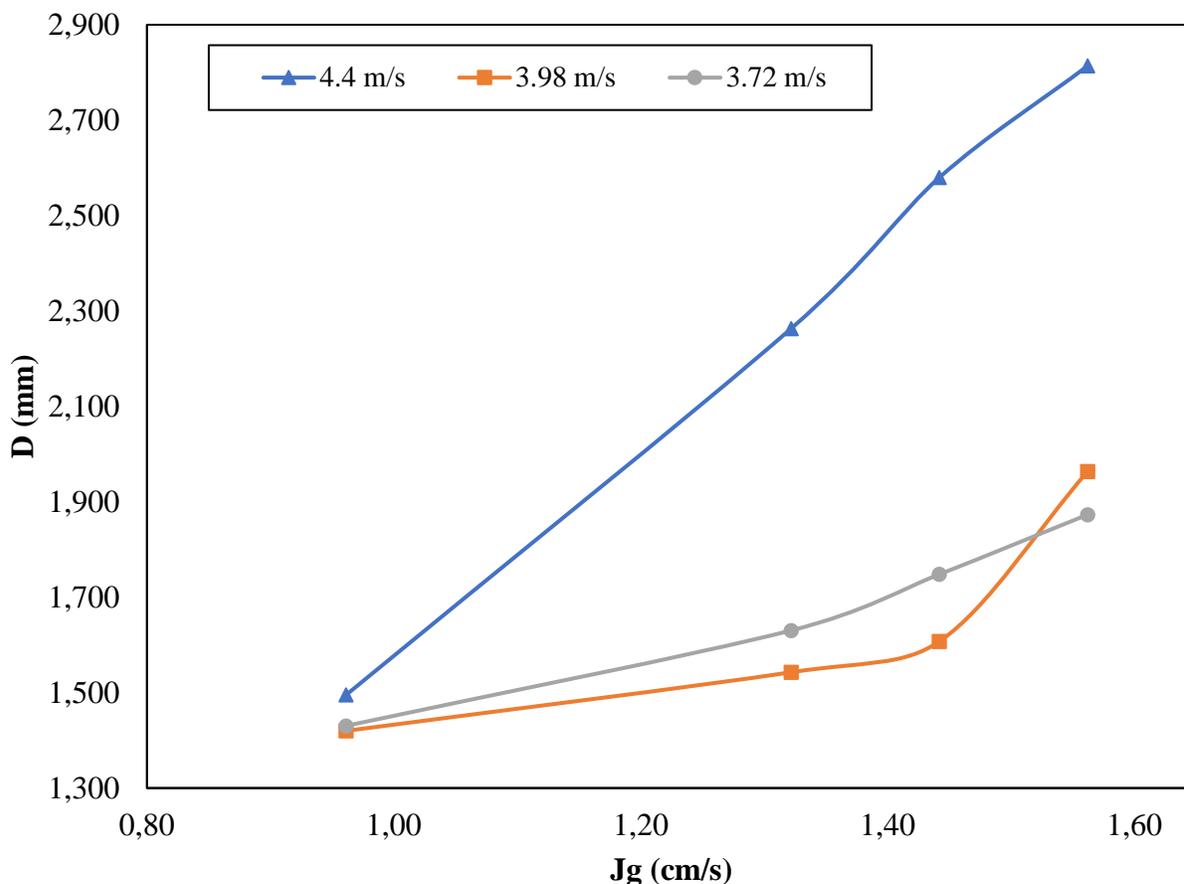


Figura 14. Diámetro de la burbuja en función del flujo de aire

La eficiencia o la superficie de área de flujo de dispersión de las burbujas fue optimizada hasta lograr un valor de 55.83 s^{-1} para un caudal igual a $1.44 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$. Además, se pudo evidenciar que existe una gran relación entre el flujo de aire y la velocidad del rotor-estator. Para flujo de aire bajos, $0.96 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$, es necesario una velocidad alta del rotor-estator, 1520 rpm , para tener una

superficie de área de dispersión de burbujas considerable de 40.62 s^{-1} y una altura de la espuma de 10.8 cm que permite un mínimo rebalse natural. En cambio, para caudales de aire altos, $1.56 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$ es necesario una velocidad baja de rotación, 1420 rpm , para poder obtener al menos una dispersión de burbujas del $38,58 \text{ s}^{-1}$ estos resultados se muestran en la Figura 15.

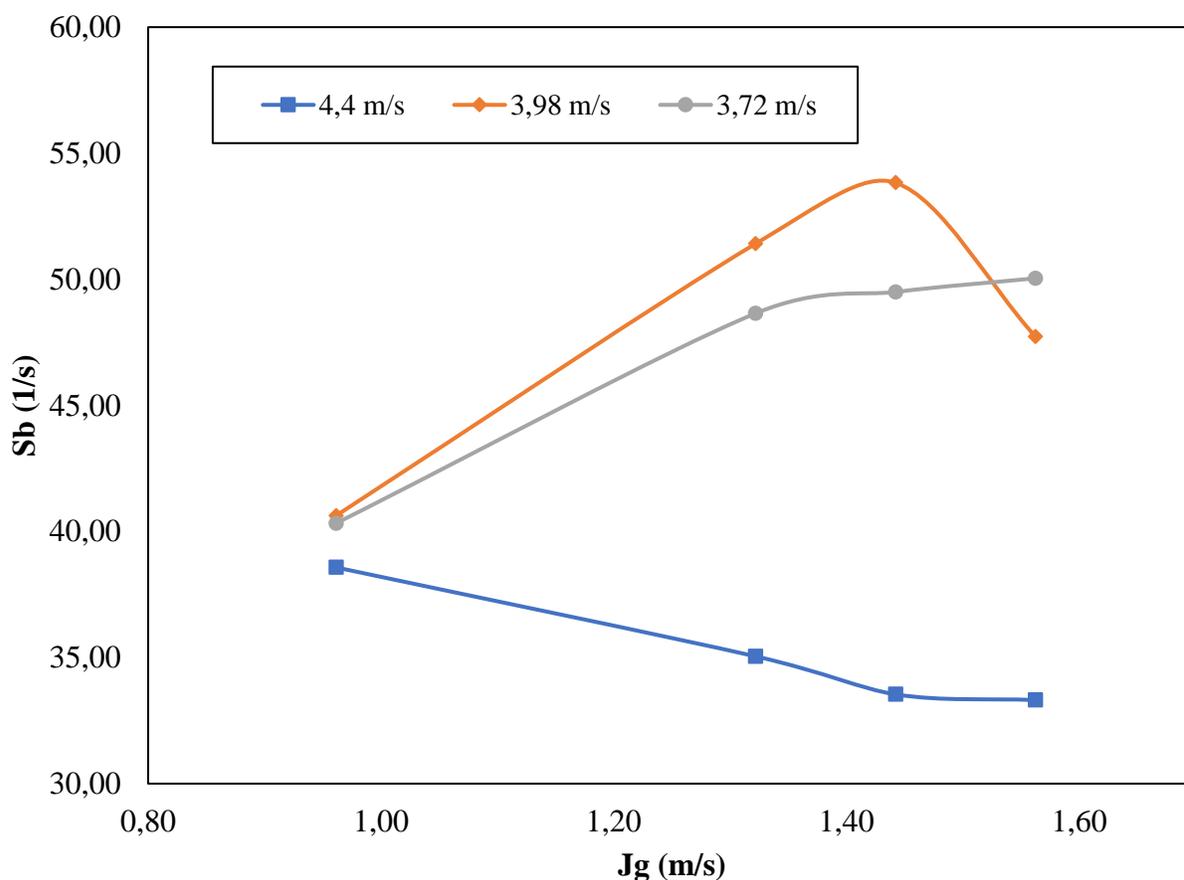


Figura 15. Superficie de área de flujo de dispersión de las burbujas en función del flujo de aire.

Esta correlación entre el flujo de aire y la velocidad del rotor estator, afecta a la zona de agitación creando tamaños pequeños de burbujas, 1.43 mm , o tamaños muy grandes de burbujas, 2.81 , que posteriormente afectan la zona superior debido a que si existe un caudal de aire alto y una velocidad alta del rotor-estator se produce inestabilidad en la espuma por lo que en un futuro no se permite la adsorción de las burbujas de aire con las partículas minerales o si existe un caudal

de aire bajo y una baja velocidad del rotor-estator la formación de espuma es baja y no supera el nivel de referencia para que se genere el rebalse natural.

Efecto de la presión del aire

Los experimentos realizados evidenciaron una relación entre la presión y el flujo de aire que aumentan proporcionalmente, considerando esta relación se identificó que la presión óptima es cuando el flujo de aire se encontraba en $1.44 \frac{cm^3}{s}$. Además, con todos los experimentos obtuvo como resultado una presión óptima de 50 psi para conseguir la superficie de área de flujo de dispersión de las burbujas mayor esto se muestra en la Figura 16.

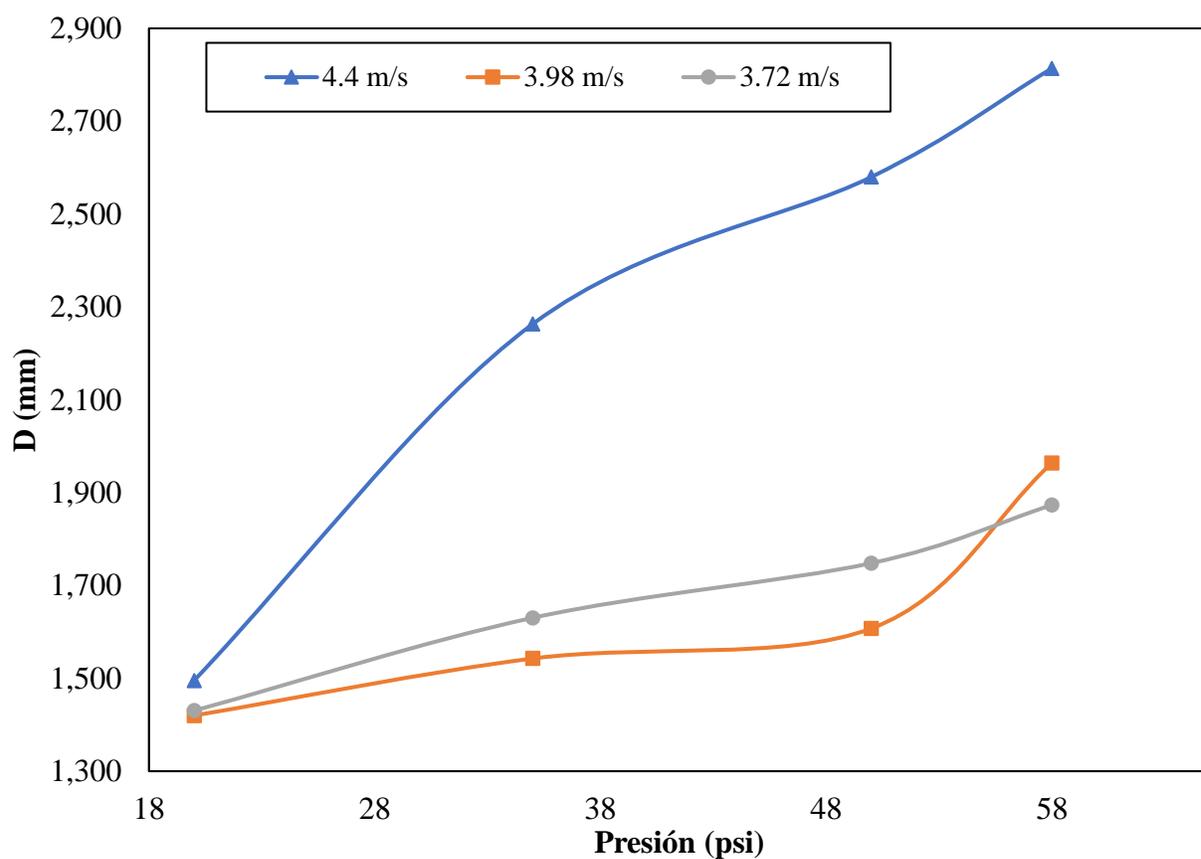


Figura 16. Diámetro de la burbuja en función de la presión de salida del aire comprimido

Tamaño de la Burbuja

El tamaño de la burbuja fue analizado con el programa ImageJ obteniendo los resultados de la tabla 4. El tamaño de la burbuja se encuentra relacionado con los tres factores mecánicos analizados: flujo de aire, presión de aire y velocidad del rotor estator. Para determinar la relación de estos tres factores se utilizó la superficie de área de dispersión de las burbujas que al ser calculada muestra la relación que tiene con el tamaño de la burbuja como se muestra en la figura 17.

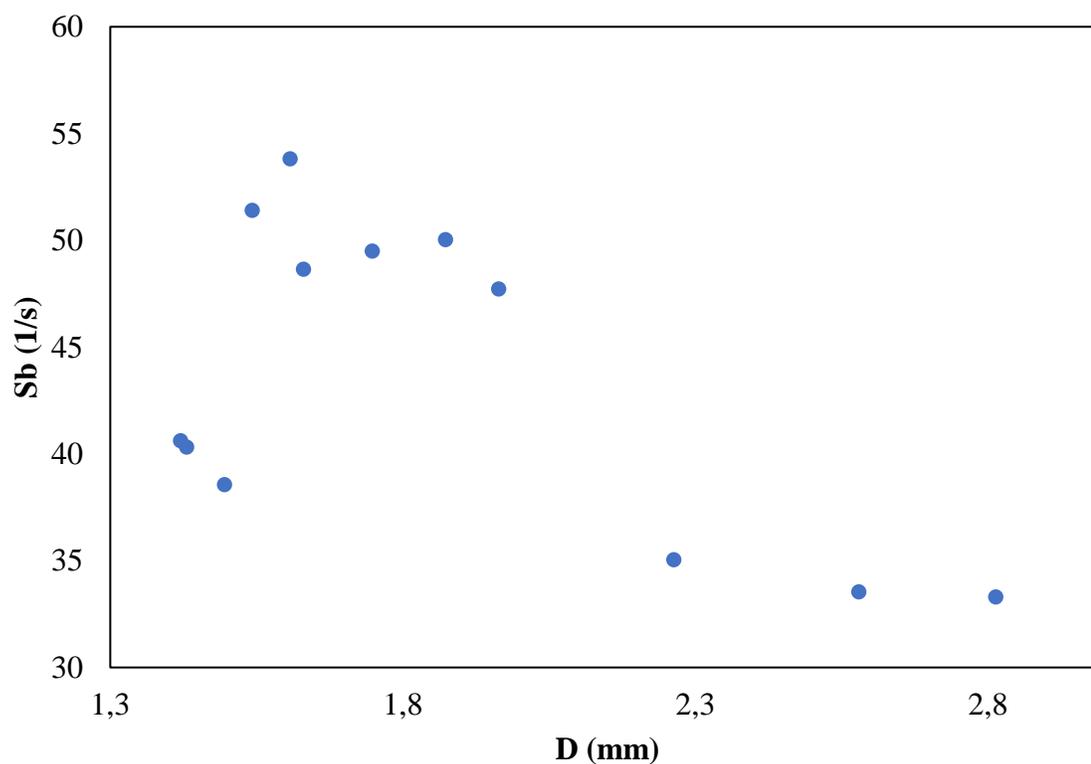


Figura 17. Dispersión de las burbujas en función del diámetro de la burbuja

Como se observa en la Figura 17, es necesario tener un rango óptimo de operación para tener un tamaño de burbuja adecuado con el cual se pueda obtener la mejor dispersión de las burbujas. Realizados los experimentos se puede determinar que el rango óptimo del tamaño de la

burbuja se encuentra entre 1.54 -1.96 (mm) en donde la dispersión se encuentra entre 47 – 51 (s^{-1}) para estos rangos también se debe tomar en cuenta las condiciones hidrodinámicas para que no se vea afectada la generación de espuma que es importante para la recolección de las partículas minerales.

Observando el rango del tamaño de las burbujas se puede determinar un rango para la velocidad del rotor-estator, el flujo de aire y la presión como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Rangos óptimos de operación.

Parámetros	Rango Experimental
Velocidad del Rotor-Estator (rpm)	1420 - 1520
Velocidad del Aire (cm/s)	1.32 - 1.44
Presión de Aire (psi)	35 - 50

También es necesario evidenciar la relación que existe entre la altura de la espuma y la velocidad del rotor-estator como se muestra en la Figura 18.

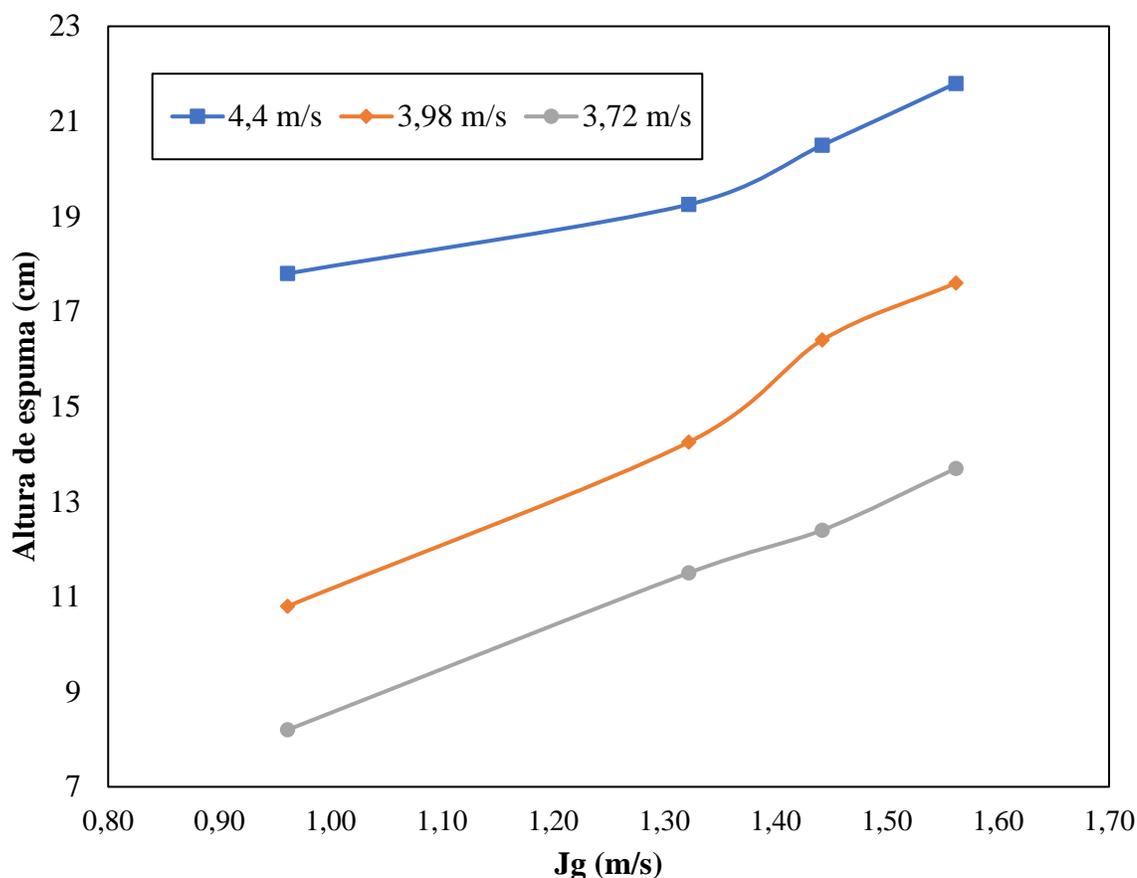


Figura 18. Altura de la espuma en función del flujo de aire y velocidad del rotor-estator

A medida que la velocidad aumenta nos permite tener una mayor altura en la zona de la espuma, sin embargo, tener niveles altos de espuma generan inestabilidad en la espuma y no permite tener una adsorción preferencial sino se tiene un rebalse de cualquier tipo de mineral. Mientras que a cuando se tiene una velocidad baja, la altura de la espuma disminuye causando que sea superada la zona de rebalse natural por lo que no se tendría una flotación de concentrado mineral.

En el presente estudio, se demostró en base a los experimentos como las diferentes condiciones hidrodinámicas de la celda de flotación afectan el rendimiento de la flotación en la zona de agitación, intermedia y superior. Para poder optimizar la celda de flotación, se deben

implementar características de diseño que minimizan o protegen la espuma de flotación de los efectos de la turbulencia y que permiten generar un tamaño de burbuja adecuado al tamaño de la celda de flotación.

Las partes mecánicas pueden resultar potencialmente útiles en un aumento de las tasas de recolección de minerales, y por lo tanto se deben evaluar. En términos de operación de la celda de flotación, la velocidad óptima del rotor-estator puede ser diferente dependiendo el tamaño de la partícula y la hidrofobicidad del mineral que se está procesando. Además, las celdas de flotación mecánicas deben contar con un variador de frecuencia para optimizar la velocidad del agitador. Otro de los resultados que puede modificarse es el flujo de aire que ingresa a la celda y su forma de dispersión lo que permite tener estabilidad en la zona de la espuma y conocer el tamaño de la burbuja. También es importante regular la presión del flujo del aire para tener un tamaño de burbuja que permita la colisión, adhesión y dispersión que mejor la eficiencia de la celda de flotación. No hay que dejar de lado la relación que existe entre cada uno de los factores por lo que las condiciones óptimas de uso de la celda de flotación son:

- Rotor-estator 1520 rpm,
- Flujo de aire $1.44 \frac{cm^3}{s}$,
- Presión del aire es 50 psi

Estos valores permitieron mejorar la superficie de área de flujo de dispersión de las burbujas aumentándola en un 19.95%, logrando tener una altura en la zona de espuma de 16 cm y una estabilidad considerable.

CONCLUSIONES

El objetivo de este estudio fue optimizar la celda mecánica de la Universidad San Francisco de Quito. Los datos experimentales recogidos resultaron ser muy consistente mejorando la eficiencia o superficie de área de dispersión de las burbujas en un 19.95%.

Tomando en cuenta las diferentes condiciones de uso experimental, se pudieron evaluar, analizar y optimizar el funcionamiento de cada una de las partes mecánicas que afectan el proceso de flotación dentro de la celda de flotación:

- La velocidad del rotor-estator óptima tuvo un efecto apreciable en el rendimiento de la flotación encontrando como velocidad optima 1520 rpm. Es importante recalcar que esta velocidad tiene una relación estrecha con el flujo de aire y que a medida que la velocidad aumento el flujo del aire debe disminuir permitiendo un incremento en la tasa de recolección de minerales.
- El flujo de aire es el encargado de crear la colisión de las partículas minerales, en este caso agua, con las burbujas de aire, por lo que su caudal óptimo es de $1.44 \frac{cm^3}{s}$ en donde se permite observar la adsorción y la generación de espuma para mejorar la dispersión de burbujas dentro de la celda de flotación.
- La presión de aire permitió observar la dispersión de aire adecuada dentro de la celda de flotación y se permitió determinar la presión óptima de 50 psi de acuerdo al tamaño de las burbujas y su relación con el flujo de aire.
- El tamaño de la burbuja óptimo fue de 1.61 mm mostrando su estrecha relación con las condiciones hidrodinámicas. Aumentando el rendimiento de la celda de flotación porque

permite tener una colisión adecuada en la zona de agitación, una adsorción en la zona intermedia y una estabilidad de espuma en la zona superior.

- La altura de la espuma se ve afectada excesivamente por la velocidad de punta del rotor-estator y el flujo de aire, por lo que el valor óptimo es de 16 cm en el cual la espuma se encuentra estable y permite el rebalse natural sin disminuir el volumen de agua de la celda de flotación.

Cabe recalcar que existe una relación entre cada uno de los factores analizados, flujo de aire, presión de aire y velocidad del rotor-estator, ya que cada uno de los factores depende de los otros dos. Por lo que se optimizó la celda de flotación manteniendo una relación adecuada entre los factores obteniendo los valores óptimos antes descritos. Finalmente, comparando con el rendimiento anterior se puede concluir que la optimización dio resultados positivos incrementando en un 19,95% la superficie de área de dispersión de burbujas.

REFERENCIAS

- Américo, G., & Calderón, R. (2012). *Evaluación por modelación CFD del proceso de flotación en una celda de agitación mecánica y del efecto de la granulometría en la recuperación de mineral*. Universidad de Chile. Retrieved from http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/110946/cf-garcia_rm.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Hernandez-Aguilar, J. R., Gomez, C. O., & Finch, J. a. (2002). A technique for the direct measurement of bubble size distributions in industrial flotation cells. *Proceedings of the 34th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors*, (May 2016), 389–402. Retrieved from <http://library.uq.edu.au/record=b2192458~S7>
- Meng, J., Tabosa, E., Xie, W., Runge, K., Bradshaw, D., & Manlapig, E. (2016). A review of turbulence measurement techniques for flotation. *Minerals Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.06.007>
- Nacional, E. G., Ejecutivo, D., Secretar, E., Objetivos, L., Ley, L., & Nacional, P. (2015). *La minería ecuatoriana*, 4. Retrieved from <https://contenido.bce.fin.ec/documentos/Estadisticas/Hidrocarburos/cartilla00.pdf>
- NIH Image. (2016 de Marzo de 26). *ImageJ: Image Processing and Analysis in Java*. Obtenido de <https://imagej.nih.gov/ij/docs/intro.html>
- Venkatesan, L., Harris, A., & Greyling, M. (2014). Optimisation of air rate and froth depth in flotation using a CCRD factorial design - PGM case study. *Minerals Engineering*, 66, 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.07.012>
- Wang, L., Peng, Y., Runge, K., & Bradshaw, D. (2015). A review of entrainment: Mechanisms, contributing factors and modelling in flotation. *Minerals Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.003>