

PROCESO DE FLOTACIÓN POR AIRE DISUELTO EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL DE BOMBEO EN LA INDUSTRIA DE HARINA DE PESCADO

G. Salas Colotta

Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química
Av. Venezuela s/n, Lima 1-Perú
e-mail: gsalas@viabcp.com

Resumen: En este trabajo se estudia experimentalmente la separación de contaminantes en aguas residuales provenientes de la industria de la harina y aceite de pescado, mediante un proceso de flotación con aire disuelto (DAF). Los resultados experimentales muestran una remoción del 60% SS, 98% FOG y 66% DBO.

Palabras claves: Flotación, tratamiento de aguas, descontaminación

Abstract: Dissolved Air Flotation process (DAF) was utilized to treatment of waste water of the oil fish industries. The experimental results show a reduction of 60% SS, 98% FOG and 66% DBO.

Key words: water wasted, flotation, process, oil fish.

1. INTRODUCCIÓN

Las embarcaciones de pesca "bolicheras" que traen los cardúmenes de anchoveta o sardina no pueden acoderar en la playa para descargar los mismos, haciéndose necesario trasvasarlos desde "chatas" ubicadas a 300 m de la playa hasta la planta utilizando bombas centrífugas o de vacío. En la operación de bombeo, se utilizan relaciones agua-pescado que van desde 2 a 1 hasta 0.5 a 1 dependiendo del tipo de sistema de bombeo a emplear. En esta operación, por acción de la fuerza de impulsión se sueltan escamas, sangre, aceite, grasa y pequeños trozos de pescado, los mismos que constituyen la carga contaminante. El pescado bombeado desde las chatas es separado del agua de bombeo en la planta haciéndolo pasar a través de un desaguador. El pescado sigue hacia el proceso de producción de aceite y harina de pescado y el agua separada con la carga contaminante constituye el agua residual o de bombeo.

En el campo del tratamiento de aguas residuales, la flotación por aire disuelto (DAF) se usa para la separación de grasas, aceites y otros sólidos de baja densidad, provenientes de los procesos de coagulación y floculación.

La flotación es un proceso para separar sólidos de baja densidad o partículas líquidas de una fase líquida. Inicialmente el líquido es sometido a un proceso de presurización con aire comprimido para conseguir la disolución del gas en el líquido. La presión oscila entre 2 a 6 atmósferas. Seguidamente el sistema es despresurizado mediante una válvula reductora de presión, formándose burbujas que se adhieren a la partículas contaminantes y los obliga a flotar sobre la superficie libre del líquido. Finalmente los sólidos se separan de la superficie por sistemas mecánicos (rastras), y parte del líquido reciclado para lograr mayores eficiencias de separación. La figura 1 muestra los mecanismos de adherencia de los contaminantes sobre las burbujas de aire.

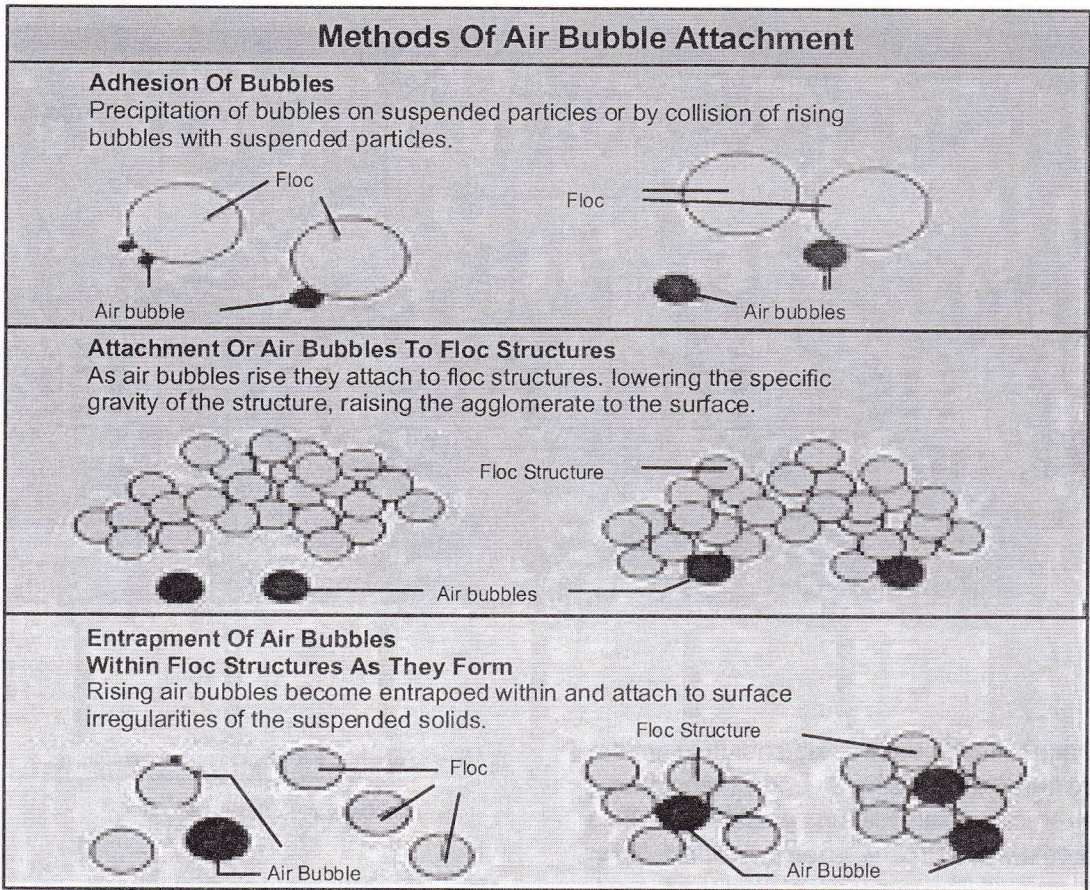


Figura 1: Métodos de adherencia de las burbujas de aire

II. FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO DAF

En la operación DAF se forman micro burbujas al inyectar de forma controlada en la celda de flotación un flujo de agua saturada con aire a una presión de 5,8 atm. La saturación del agua se lleva a cabo en un tanque de presurización de 5 m de altura conectado a un compresor. El efluente de la columna de saturación es liberado a través de una válvula de aguja en la celda de flotación, junto con el agua a tratar. Debido al cambio brusco de presión, se liberan pequeñas burbujas (20 a 100 μm de diámetro) que se adhieren a las "partículas" suspendidas (sangre y aceite de pescado), estas micro burbujas así como las partículas contaminantes flotan y son removidas continuamente por un sistema de ras-

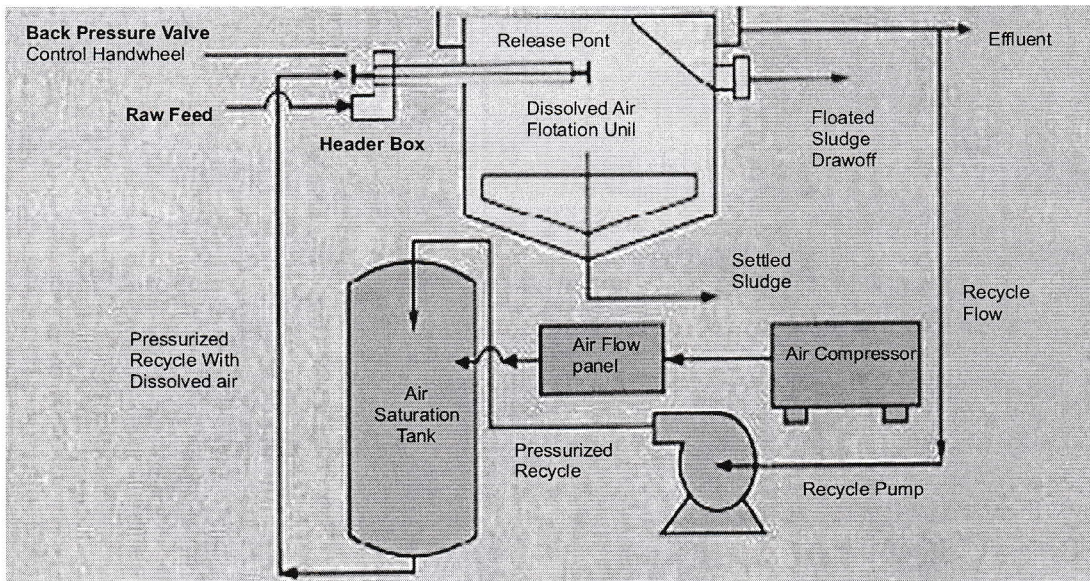
tras y evacuadas. La figura 2 muestra el diagrama de flujo para el proceso DAF.

Variables operativas

Las variables de operación que afectan el rendimiento del proceso DAF son:

- la presión de saturación,
- la razón de recirculación, y
- el modo de inyección del agua saturada o posición de la válvula de reductora de presión.

En general, a mayor presión de saturación, se tiene una mayor cantidad de aire disuelto en el agua y mayor dispersión en la distribución de diámetros de burbuja con aparición de turbulencia.



Dada la importancia de obtener un diámetro de burbujas lo más pequeño y homogéneo, es preciso establecer una presión de trabajo óptima. Por otra parte, la recirculación de agua determina la razón de aire / sólidos en la celda de flotación, la cual debe ser lo más alta posible; sin embargo, una recirculación excesiva puede provocar turbulencia, que destruiría los flóculos débiles, afectando así la eficiencia del DAF. Por tanto, la optimización del DAF requiere de un estudio experimental para cada sistema en particular.

En este trabajo se estudian las características operacionales del DAF con flóculos obtenidos con coagulantes inorgánicos como sales de aluminio y hierro (coagulantes) y polímeros como floculantes. Se determinan la razón aire/sólidos, la razón de recirculación y los rendimientos de separación.

III. PRINCIPIOS TEÓRICOS:

Parámetro aire/sólidos (A / S)

Para el diseño de los sistemas de flotación, un parámetro fundamental normalmente utilizado es la relación entre el aire utilizado y los sólidos (A / S), definida por la ecuación:

$$A / S = \frac{\text{Aire liberado por despresurización, kg / d}}{\text{Sólidos en el efluente, kg / d}}$$

Este parámetro se estima a partir de estudios realizados en celdas de flotación de laboratorio y en planta piloto. El valor de A se obtiene a partir de determinaciones de aire disuelto (mg/L) en los puntos de muestreo A1 (tanque de presurización) y A2 (celda de flotación), siendo su valor:

$$A = A_1 - A_2 \quad (1)$$

Donde :

A = kg de aire que se emiten por despresurización

A₁ = aire disuelto en punto 1, kg / d

A₂ = aire disuelto en punto 2, kg / d

Para sistemas de flotación con recirculación de parte del líquido claro, se puede obtener la ecuación:

$$A_1 = R (\text{m}^3 \text{ de recirculado/d}) \times C_1 (\text{g aire/ m}^3 \text{ recirculado}) \times 1/1000$$

$$A_1 = RC_1 / 1000 \text{ kg aire / d} \quad (2)$$

De forma similar:

$$A_2 = RC_2 / 1000 \text{ kg aird/d} \quad (3)$$

En consecuencia:

$$A_1 - A_2 = R(C_1 - C_2) \times 1 / 1000 \text{ (kg liberado/d)} \quad (4)$$

Por otro lado, si X_0 es la concentración de sólidos en suspensión SS (mg/L) en el afluente, el valor de S es:

$$S = R(m^3 \text{ vertido/d}) \times 1 / 1000 \times X_0 \quad (5)$$

Finalmente, obtenemos la relación:

$$A/S = (R/Q) [C_1 - C_2] / X_0 \quad (6)$$

Donde Q es el caudal de afluente en $m^3/\text{día}$.

Correlación de las variables de flotación con el parámetro A/S

Utilizando celdas de flotación de laboratorio, o los datos de planta piloto, es posible establecer una correlación entre los sólidos en suspensión (mg/L) y el parámetro A/S. Para un efluente dado, los kg/d de sólidos en suspensión (S) son fijos. La relación A/S se incrementa haciendo operar la instalación con mayores cantidades de aire, lo cual da como resultado un aumento en el aire que se libera (A). Se obtiene un efluente de mayor calidad.

Expresión para evaluar el parámetro A/S

En la ecuación 3, C_2 representa la solubilidad del aire en el agua en mg/L. Frecuentemente, la solubilidad del aire es expresada en cm^3 de aire / litro de agua. Las condiciones en el punto 2 de muestreo son presión atmosférica y temperatura ambiente. La solubilidad del aire en agua en cm^3 de aire / litro de agua (SA) se indica en el cuadro para presión atmosférica a varias temperaturas.

| Temperatura (AC) | SA (cm^3 / L) |
|------------------|------------------|
| 0 | 29,2 |
| 10 | 22,8 |
| 20 | 18,7 |
| 30 | 15,7 |

Tabla 1: Solubilidad del aire en agua a presión atmosférica y diferentes temperaturas.

Esta concentración de aire disuelto en cm^3 de aire / litro de agua puede convertirse en el valor C_2 (mg de aire / litro de agua):

$$C_2 \text{ (mg de aire / litro de agua)} = S_a \text{ (cm}^3 \text{ aire/litro)} \times \rho_a \text{ (mg/cm}^3) \quad (7)$$

Utilizando para la densidad del aire ρ_a un valor medio de $1,2 \text{ mg/cm}^3$ correspondiente a las condiciones de 1 atm y 20°C , se obtiene la ecuación:

$$C_2 = 1,25 S_a \quad (8)$$

Considerando ahora la ecuación 2, donde C_1 es la solubilidad del aire en mg/L. Definimos un coeficiente Φ como la relación de las solubilidades del aire en agua a la presión del tanque de retención con respecto a la presión atmosférica, es decir:

$$\Phi = C_1 / C_2$$

Suponiendo que el agua esta saturada de aire, y que sólo se puede aplicar la Ley de Henry, se puede escribir:

$$\Phi = C_1 / C_2 = P / 1 = P \quad (9)$$

En el cual, P es la presión de funcionamiento en atmósferas (Para C_2 , la presión se toma como atm). En la práctica, hay que incluir un factor f en la ecuación 9 para tener en cuenta la saturación incompleta., con lo que:

$$\Phi = fP \quad (10)$$

El valor de f depende del diseño del tanque de presurización. A 20°C , para un intervalo de presiones de 2 a 6 atm, que es utilizado en la mayoría de los sistemas de flotación, el valor de f está normalmente entre 0,5 y 0,8. Adoptando el valor más conservador de $f = 0,5$, los valores variarán entre:

$$0,5 \times 2 = 1$$

$$0,5 \times 4 = 2$$

Por lo tanto, para el intervalo de presión entre 2 y 6 atm y a 20 °C, la solubilidad del aire en los tanques de retención varía entre 1 y 2 veces su valor de saturación a 20 °C y 1 atm. Por lo tanto, a partir de la ecuación 9:

$$C1 = \Phi C2 \quad (11)$$

Sustituyendo Φ y $C2$ por sus valores, dados por las ecuaciones 8 y 10

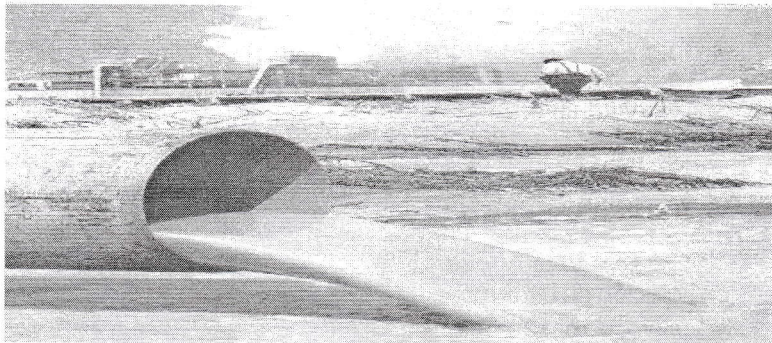


Figura 3: Tubería de descarga de agua de bombeo

$$C1 = f \times P(1,25 Sa) \quad (12)$$

Sustituyendo los valores de C_1 y C_2 , dados respectivamente por las ecuaciones 12 y 8, en la ecuación 6, se obtiene:

$$A/S = (R/Q) 1,2 Sa (f \times P - 1) / X0 \quad (13)$$

$$P = (1/f) [(A/S) X_0 / 1,2 Sa + 1] \quad (14)$$

$$R = (A/S) QX_0 / 1,2 Sa(f \times P - 1) \quad (15)$$

IV. PARTE EXPERIMENTAL

El sistema experimental esta constituido por dos etapas, a saber: producción de flóculos (acondicionamiento químico) y flotación por aire disuelto (DAF). La factibilidad técnica para desestabilizar la carga contaminante, así como para establecer las condiciones de separación por aire disuelto, comprendió las siguientes etapas: a) caracterización de las muestras, b) acondicionamiento químico, c)

pruebas en flotador por aire disuelto de banco (DAF), d) pruebas en planta piloto.

a) Caracterización de la muestra: El pescado procesado fue anchoveta; el efluente fue de color marrón oscuro, rojizo, espumoso. La carga contaminante en el agua de bombeo se encuentra como: escamas, pequeños trocitos de pescado, sangre coloidal, aceites y/o grasa dispersa y emulsionada. El pescado fue impulsado con bombas centrífugas con una relación agua: pescado de 2: 1 (Figura 3).

b) Acondicionamiento químico: El contaminante sangre en el agua de bombeo se encuentra en forma de coloide, razón por la cual cada partícula se halla estabilizada por cargas eléctricas negativas sobre su superficie, haciendo que repela las partículas vecinas, como se repelen mutuamente dos polos magnéticos. Ya que esto impide el choque de las partículas y que se formen masas mayores, llamadas "flóculos", la sangre no se separa del agua espontáneamente. La coagulación permite desestabilizar estos coloides al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados (punto isoléctrico). Esto se logra añadiendo coagulantes químicos y aplicando energía de mezclado. Las sustancias químicas empleadas fueron. sales de aluminio y hierro, ajuste de pH. El flóculo formado por la aglomeración de varios coloides no es lo bastante grande como para separarse con la rapidez deseada. La acción del floculante es reunir sangre coagulada en una red, formando puentes de una superficie a otra y enla-

zando las partículas individuales en aglomerados fáciles de separar. Se usó polímero de peso molecular alto.

Una fracción importante (aproximadamente el 90%) del aceite, de las grasas y los lípidos se encuentran en el agua de bombeo formando una emulsión aceite en agua (AC / AG) estable. Una emulsión (AC / AG) estable es un sistema coloidal de gotitas de aceite eléctricamente cargadas rodeadas por un ambiente iónico (agua de mar). Este sistema estable se forma por acción de la fuerza de cizallamiento de la bomba centrífuga en el momento del bombeo. La estabilidad de la emulsión se mantiene mediante una combinación de mecanismos físicos y químicos. El comportamiento de estas emulsiones es semejante al de los sistemas coloidales. Uno de los mecanismos de la estabilización, es el ambiente iónico del agua de mar. Estos iones, al portar carga eléctrica, buscan la zona interfacial aceite/agua de la gota emulsificada. Aquí las cargas acumuladas estabilizan la emulsión mediante la repulsión entre las gotas que poseen carga de igual signo. Las partículas sólidas finas pueden estabilizar una emulsión. En este caso, la estabilización se produce porque las partículas sólidas adsorbidas en la entrecara de las gotitas evitan el contacto entre ellas y no se separan.

Prueba de Jarras: Se utilizó la prueba de jarras "Jar test" de laboratorio para seleccionar el mejor coagulante y floculante químico y aproximarnos a la dosis óptima. Se comparó la velocidad de asentamiento de los flóculos, la claridad final del agua y el volumen de lodo producido, para la selección de los químicos y su dosificación

c) Pruebas en flotador por aire disuelto de banco (DAF): Las pruebas realizadas a nivel laboratorio fueron llevadas a cabo en un "bench test kit", como el que se muestra en la Figura 4. En dichas pruebas, se pudo establecer la eficiencia de separación para diferentes valores de la presión, razón de recirculación.

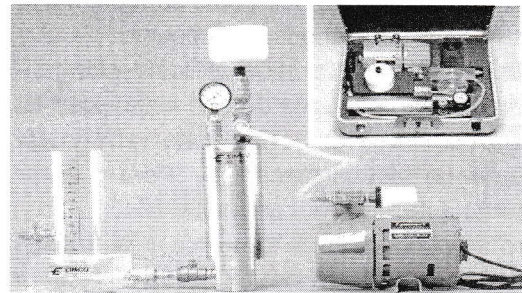


Figura 4: Equipo de flotación de laboratorio (Bench test kit)

d) Pruebas en planta piloto: Las pruebas en planta piloto fueron llevadas a cabo en un equipo formado por bomba de alimentación de flujo variable (0 - 10 m³ / h), flotador por aire disuelto con sistema de rastras de velocidad variable, sistema de presurización (tanque de saturación de aire, compresor, bomba centrífuga de reciclo, panel de control de aire y válvula de despresurización) según se muestra en la figura 2.

Pretratamiento: (Separación de gruesos) El agua de bombeo, previamente al ingreso al flotador, pasa directamente a un cedazo rotatorio (trommel), constituido por una malla de 1 mm de abertura. donde se retienen las escamas y pedacitos de pescado contenidos en el agua de bombeo. El agua sin escamas, que contiene sangre, aceites y grasas (partículas menores a 1 mm) pasa al sistema de flotación por aire disuelto (DAF).

Flotador por aire disuelto (DAF): El agua que sale del trommel se alimenta en forma continua por medio de una bomba de tornillo de caudal variable hacia el flotador por aire disuelto. En línea de succión de la bomba, se dosifica desde los tanques de químicos, ácido sulfúrico, hasta obtener un pH de 2; luego es reajustado en la línea de impulsión a 6,5 con NaOH e inmediatamente se dosifica 5 mg/L de floculante polimérico produciéndose al instante flóculos de estructura adecuada para la posterior flotación.

La carga coagulada y floculada se introduce en forma continua en la celda de flotación, originándose la separación de los flóculos por

acción de las microburbujas adheridas a la misma, produciéndose un efluente "claro" y un flotado en la superficie del flotador formando una capa flotante de una estabilidad tal que permite su remoción por medio de un sistema de rastras mecánica. Para generar microburbujas, una fracción del efluente "claro" se introduce en un tanque de presurización donde se disuelve aire a presión de 3,5 atm manométricas. El efluente del tanque de presurización se libera a través de una válvula de aguja en la celda de flotación (8 pies de diámetro por 3 pies de altura.), junto con el agua de bombeo acondicionada químicamente en línea.

Los análisis físico químicos de sólidos suspendidos (SS) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y aceites y grasas (FOG) se realizan de acuerdo con métodos estándares en un período que no excede de tres horas después del muestreo.

VI. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante todas las experiencias, la temperatura del agua varió entre 15 y 20 °C. El punto de nuestro fue el agua que sale del trommel. Las características fueron: pH = 6,50 TSS (mg / L) = 1840 DBO (mg / L) = 4563 FOG (mg / L) = 850

TSS: sólidos totales en suspensión

FOG: grasas y aceites

DBO: demanda bioquímica de oxígeno

Para el acondicionamiento químico, se ensayaron los siguientes esquemas:

La solución de lechada de cal requirió una agitación constante durante la dosificación debido a su limitada solubilidad. De acuerdo con las pruebas de jarras y a los tiempos de sedimentación, se eligió el segundo esquema de acondicionamiento químico para las pruebas piloto.

La descarga del agua saturada en la celda de flotación dio origen a la formación inmediata de gran cantidad de burbujas pequeñas, produciéndose un aspecto lechoso. Resultó de fundamental importancia para evitar la formación de burbujas de gran tamaño la posición relativa de la válvula de aguja; en efecto, un tamaño y distribución ideal se obtuvo solamente cuando ésta se instaló solidaria a la celda; evita la existencia de zonas de alta sobresaturación, las cuales generan de forma espontánea burbujas de gran tamaño.

En todas las experiencias, la carga hidráulica varió entre 3,3 y 4,6 m³/ h. m². La tabla 1 muestra que una carga hidráulica de 4,4 m³/ h. m² corresponde a una recirculación del 100 %, lográndose un valor óptimo de operación de la celda en términos de eficiencia de remoción. Una carga mayor en la celda produjo un aumento sostenido de la turbiedad del efluente debido al arrastre de flocúlos pequeños. La relación A/S en las diferentes experiencias varió entre 0,04 y 0,032. Para valores superiores a 0,029, no se observó mejora en la eficiencia de remoción de sólidos. Los cálculos fueron hechos con ayuda de la ecuación 13 y se muestran en las figuras 5 y 6.

| Esquema | observaciones |
|---|---|
| 50 – 100 mg / L Al ₂ (SO ₄) ₃ >> pH bajo a 5,6 >> pH reajustado a 6,5 con NaOH + adición de 3 – 5 mg / L de floculante | Buena estructura floculada, buen tiempo de sedimentación en prueba de jarras. Aparentemente se ha formado una buena estructura para flotación |
| Adición de H ₂ SO ₄ >> pH >>2 reajustado a 6,5 con NaOH + 5 mg/ l floculante | El descenso del pH a < 2 desestabiliza el WW muy bien, el reajuste del pH + floculante produce una excelente estructura para flotar |
| Adición de 250 mg / L FeCl ₃ >> pH bajado de 6,5 a 3.0 >> reajustado a 7,0 con Ca (OH) ₂ + 1 – 1,5 mg / L floculante | El FeCl ₃ resultó efectivo en desestabilizar el WW: + adición de floculante produce una estructura adecuada |

Tabla 1. Resultados experimentales

| Razón de recirculación (%) | Carga hidráulica m ³ / m ² . h | Remoción SS (%) | Remoción % DBO | Remoción % FOG | A / S |
|----------------------------|--|-----------------|----------------|----------------|-------|
| 50 | 3,3 | 63 | 42 | 70 | 0,014 |
| 70 | 3,8 | 72 | 48 | 85 | 0,020 |
| 100 | 4,4 | 86 | 66 | 98 | 0,029 |
| 110 | 4,6 | 60 | 55 | 58 | 0,032 |

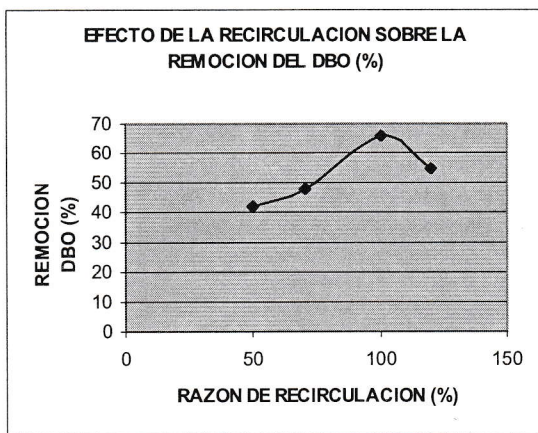


Figura N.º 5. Efecto de la relación de la carga hidráulica (% de recirculación) sobre remoción de DBO.

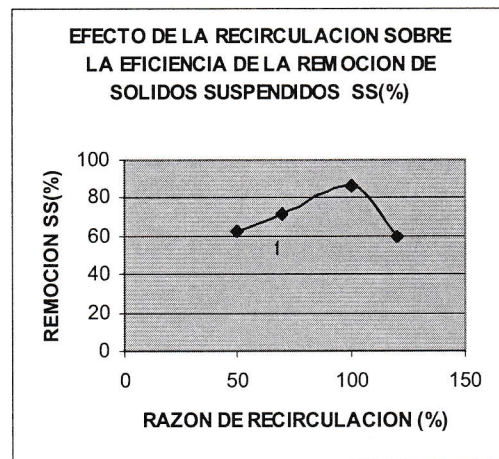


Figura N.º 6. Efecto de la relación de la carga hidráulica (% de recirculación) sobre remoción de sólidos suspendidos (SS)

VII. CONCLUSIONES

En comparación con sedimentadores convencionales, que presentan un tiempo de residencia de entre 1,5 a 2,5 horas, la flotación por aire disuelto presenta tiempos de residencia entre 4 y 12 minutos, por lo que las celdas de flotación por aire disuelto requieren de un volumen hasta 13 veces menor para un mismo caudal de agua a tratar. Esto representa menores costos de terreno y equipos para el sistema DAF, en comparación con los sedimentadores convencionales. Dada la importancia de obtener un diámetro de burbujas lo más pequeño y homogéneo posible, es preciso establecer una presión de trabajo intermedia. Se ha establecido, por la referen-

cia bibliográfica, que para un rango de presión entre 2,5 a 6 atm para aire, no se ha observado variación en la eficiencia del DAF. De las experiencias realizadas, se comprobó la eficacia del proceso de flotación por aire disuelto para la separación de sólidos suspendidos y grasas, a través del estudio de las variables de operación y los efectos sobre la remoción de flóculos.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- [1] APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 13th ed., American Public Health Association, New York (1971)

- [2] Bratby, J.R. Treatment of Raw Wastewater Overflows by Dissolved-air Flotation, Journal WPCF, vol. 54(12), pág. 15558-1565 (1971)
- [3] Cassel, E., Kaufman, k. y Matijevic, E. The Effects of Buble Size on Microflotation, Water Research, vol. 9, pág. 1017-1024 (1975).
- [4] Conway, R.A.; Nelson, R.F. y Young, B.A. High Solubility Gas Flotation. Journal WPCF. Vol. 53, pág. 1119- 1205 (1981)
- [5] Gulas, V. y Lindsey, R. Factors Affecting the Design of Dissolved Air Flotation Systems, Journal WPCF, vol. 50(7) (1978)
- [6] Waste water Engineering Treatment Disposal Reuse, Metcal&Eddy, 3ra Ed. McGraw- Hill, Inc.,USA, pág. 475-578 (1991)