

DISEÑO DE UNA UNIDAD DE FLOTACIÓN CON AIRE DISUELTO PARA LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE LAS AGUAS RESIDUALES GENERADAS EN UNA EMPRESA MANUFACTURERA

Riera Maria¹ / Nelson Graterol²

¹Universidad de Yacambu. ²Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto, Edo Lara

mr.riera@hotmail.com, nelsongraterol@yahoo.com

RESUMEN: El objetivo fue diseñar una unidad de flotación con aire disuelto (FAD) para la remoción de sólidos suspendidos (SST), aceites y grasas (AyG) de las aguas residuales generadas en una empresa manufacturera. Inicialmente, se determinaron las condiciones operacionales del sistema, por lo que se construyó un equipo a escala de laboratorio estableciendo como condición de operación 40 psi y 0 ppm de concentración por ser la que presenta mayor correlación entre los datos; obteniendo una eficiencia de remoción de 64,99% para los SST y 70,00% para las AyG. Luego, se dimensionó el equipo FAD para la remoción de sólidos suspendidos, aceites y grasas en los efluentes producidos. Seguidamente, se caracterizaron los equipos mecánicos necesarios para el funcionamiento del equipo, constituido por el sistema de recolección y descarga de sólidos, sistema de presurización y equipos de bombeo. Finalmente, se determinaron los costos de inversión por la implementación del sistema diseñado; donde después de calcular la tasa interna de retorno modificada (TIRM) 32% se comparó con la tasa mínima atractiva de retorno (TMAR) 20,7%, dando como resultado que se trata de un proyecto económicamente aceptable para la empresa estudiada.

Palabras claves: Flotación por aire disuelto, SST, AyG.

DESIGN OF A UNIT DISSOLVED AIR FLOTATION FOR REMOVAL OF POLLUTANTS OF THE WASTEWATER GENERATED IN A MANUFACTURING COMPANY

ABSTRACT: The objective was to design a unit of dissolved air flotation (DAF) for removal of suspended solids (TSS), oils and greases (OG) of the wastewater generated in a manufacturing company. Initially, the operational conditions of the system were determined, so that a laboratory scale equipment was constructed, establishing operating conditions of 40 psi and 0 ppm concentration to have a higher correlation between the data; obtaining a removal efficiency of 64,99% for TSS and 70,00% for OG. Next, the DAF equipment was sized to remove suspended solids, oils and greases in the effluents produced. To continue, the mechanical equipments required to operate the DAF equipment, constituted by the system collection and discharge of solids, pressurization system and pumping equipment, were characterized. Finally, the investment costs for the implementation of the designed system were determined; where after calculating the internal rate of return (IRR) 32% was compared with the minimum attractive rate of return (MARR) 20,7%, resulting that the project is financially acceptable to the company studied.

Key words: Dissolved air flotation, TSS, OG.

NOMENCLATURA

A/S: proporción aire y sólidos, mL (aire)/mg (sólidos)
 s_a : solubilidad del aire, mL/L
f: fracción de aire disuelto a una presión P
P: presión, atm
p: presión manométrica, kPa (lb/in² manométrica)
 S_a : sólidos suspendidos del efluente, g/m³ (mg/mL)
Q: caudal del efluente (m³/s)
TRHc: tiempo de retención mínimo de la celda de flotación (min)
TRHs: tiempo de retención hidráulico para el tanque saturador
lc: longitud de la celda de flotación
bc: el ancho de la celda de flotación
hc: altura de la celda de flotación
 h_c' : altura total de la celda de flotación
hs: altura del tanque de saturación
 h_s' : altura total del tanque de saturación
Ac: ancho de la celda de flotación
As: área superficial del saturador (m²)
 V_c : volumen de la celda de flotación
 V_s : volumen del tanque de saturación
CHSc: carga hidráulica superficial para la celda de flotación
C: coeficiente de Hazen – Williams
D: diámetro de la tubería (m)
S: relación hL/L o pendiente de la línea de carga (m/m)
 \varnothing s: diámetro del tanque de saturación
 V_e : volumen de la columna empacada
he: altura mínima del empaque (m)
P: potencia (Hp)
HDT: altura dinámica total (m)
 η : rendimiento o eficiencia del sistema en el conjunto bomba motor.

1. INTRODUCCIÓN

En los sistemas de flotación por aire disuelto (FAD), las partículas presentes en el efluente a tratar, se adhieren a las burbujas que se forman mediante la introducción de aire [1]. En los procesos de FAD, el aire se introduce bajo presión en el agua a ser tratada, y se disuelve de acuerdo a la ley de disoluciones de Henry. Después de la presurización, la presión es liberada a las condiciones normales, creando así millones de microburbujas. Las burbujas envuelven las partículas de la suspensión y estas flotan a la superficie de donde pueden ser fácilmente removidas. Trabajos realizados acerca de la aplicación de este método a escala de laboratorio,

han señalado que facilita la recuperación de un 50 a un 80 por ciento de sebos, aceites y grasas, y entre 30 a un 60 por ciento de sólidos suspendidos [2]. Por otra parte, se señala que con este proceso se puede alcanzar una tasa de remoción tan alta como 90 por ciento de sólidos suspendidos y aceites y grasas [3], convirtiéndose así en una excelente alternativa para tratar las aguas residuales provenientes de la industria metalúrgica, los de la petroquímica, farmacéuticas, aguas municipales, entre otras. En el caso de las empresas productoras de neumáticos, se generan no sólo efluentes sanitarios; sino también los correspondientes a sus procesos de producción, tal como ocurre en una empresa ubicada en el Estado Lara, Venezuela, quien produce en el área de mantenimiento mecánico aguas contaminadas con sólidos suspendidos, grasas y aceites. Es así como se desarrolló esta investigación, con el objetivo de diseñar una unidad de flotación con aire disuelto para la remoción de sólidos suspendidos, aceites y grasas de las aguas residuales generadas en la empresa fabricante de neumáticos.

1.1. Flotación por Aire Disuelto

La flotación es la operación física en la que se generan pequeñas burbujas de gas, con el fin de que se adhieran a las partículas presentes en el agua para que sean elevadas hasta la superficie, de donde son arrastradas y sacadas del sistema [4]. En un sistema de flotación por aire disuelto, el aire es disuelto en el agua residual bajo una presión de varias atmósferas y seguidamente se libera la presión al nivel atmosférico. Cuando se trata de sistemas de bajas presiones, la liberación de todo el flujo puede ser por medio de una bomba a presión de 275 a 350 kPa (40 a 50 lb/in²) con aire comprimido añadido en la succión de la bomba; así todo el flujo se mantiene en un tanque de retención bajo presión por algunos minutos para que haya tiempo de que el aire sea disuelto y de allí es admitido a través de una válvula de presión-reducción al tanque de flotación donde el aire sale de la solución en burbujas muy finas [5]. La unidad de flotación sirve para separar las partículas adheridas a las burbujas del agua y el saturado de aire disuelto donde el agua se somete a elevadas presiones, que van de 4 a 8 bar. La presión que satura el agua, se introduce en la unidad de flotación a través de una válvula que reduce la presión rápidamente, lo cual provoca el exceso de gas saturado que precipita en forma de diminutas burbujas cuyo tamaño es de 30 a 80 µm.

1.2. Consideraciones para el Diseño de un Sistema de Flotación con Aire Disuelto

La flotación dependen del tipo de superficie de las partículas, por lo que se requieren las pruebas de laboratorio y planta piloto, para obtener los criterios de diseño necesarios. Metcalf y Eddy, (2003) [5], indican que los factores a considerar en el diseño de las unidades de flotación incluyen la concentración de partículas, cantidad de aire usada, velocidad de la partícula y tasa de carga de sólidos. El desarrollo de un sistema de flotación por aire disuelto depende principalmente de la proporción de volumen de aire por masa de sólidos (A/S) requeridos para lograr un determinado grado de clarificación [5] y la misma está dada por la ecuación uno (1)

$$\frac{A}{S} = 1.3s_a \frac{(fP - 1)}{s_a} \quad (1)$$

La proporción A/S es según Eckenfelder (1997) [6], el principal criterio de diseño en un sistema FAD, porque de este depende la eficiencia del sistema. Existen otros parámetros de diseño de igual o mayor importancia; estos son el tiempo de retención (TRH) y la carga hidráulica superficial (CHS). El TRH_c tiene una duración de 1 minuto para la presurización y 3 minutos de reposo para alcanzar la saturación; mientras que el TRH_s va de 10 a 20 minutos [6]. Arnolds citado por Ortiz (Ob. Cit.) [7], señala que los valores de CHS para el tanque de presurización se ubican entre 50 y 80 m³/m².h cuando este es empacado y Nickolds referenciado por Ortiz (Ob. Cit.) [7], recomienda una CHS de 20 a 60 m³/m².h.cuando es sin empaque.

2. METODOLOGÍA

2.1. Condiciones Operacionales del Sistema de Flotación con Aire Disuelto

Efluente Utilizado

Se utilizó el efluente proveniente de la corriente número dos de una empresa productora de neumáticos, la por ser la que registra sólidos suspendidos (SST), aceites y grasas (AyG). Una vez tomadas, se trasladaron y almacenaron en el Laboratorio de Calidad de Agua del Departamento de Ingeniería Química de la UNEXPO-VR-Barquisimeto, donde se mantuvieron resguardadas

hasta su uso. Para la selección de los recipientes de recolección, así como también de los tiempos de almacenamiento de las muestras, se siguieron las recomendaciones dadas por American Public Health Association, American Water Works Association y Water Environment Federation (2005) [8].

Equipo de Flotación por Aire Disuelto

Para llevar a cabo los ensayos de flotación por aire disuelto, se construyó un equipo a escala de laboratorio representado en la Figura 1, compuesto por un tanque de saturación conectado a una celda de flotación. El mismo se elaboró con acero al carbono de 8 mm de espesor, 99 mm de diámetro externo y 545 mm de altura, teniendo así una capacidad aproximada de 4 L. En su interior, se ubicó un tubo difusor de aire el cual estaba en contacto con una piedra porosa ubicada en el fondo del mismo para favorecer la generación de diminutas burbujas de aire y así aumentar la superficie de contacto líquido-gas. En la parte superior, se colocó una válvula de bola que permitió el paso del efluente al interior del tanque y un manómetro dial de 2" de diámetro con un rango de 0 a 100 psi para medir la presión dentro de éste.

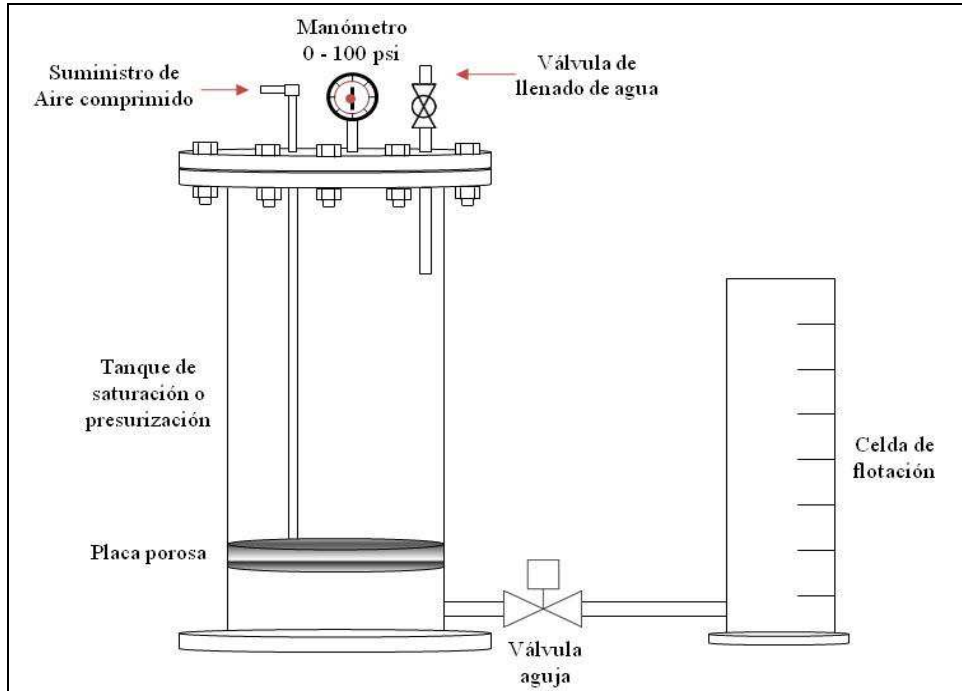


FIGURA 1. Representación gráfica del equipo DAF construido a escala de laboratorio, 2011.

La celda de flotación estuvo representada por un recipiente plástico (cilindro graduado) con una capacidad de 1000 mL. A la salida del tanque de saturación, se encontró una válvula reductora de presión de ¼" (válvula de aguja) marca Pneumax, que permitió la salida del agua presurizada a la celda de flotación. Ambos recipientes se conectaron, haciendo uso de conexiones tanto de bronce como flexibles de ¼" de diámetro, además de sujetadores de acero.

Ensayo de Flotación por Aire Disuelto

En el funcionamiento del equipo FAD, se usó el procedimiento señalado por Cecchet (2007) [9], en conjunto con lo descrito por Eckenfelder (Ob. Cit.) [6], tal como se describe. Se llenó parcialmente el tanque de saturación con 500 mL del efluente, manteniendo la válvula de aguja cerrada. Luego, se colocó en la celda de flotación 500 mL más del efluente a los cuales se le adicionó la dosis seleccionada del coagulante. Se aplicó aire comprimido a la cámara de saturación durante un minuto hasta conseguir la presión de trabajo, después se detuvo el suministro de aire y se dejó reposar el agua presurizada durante tres minutos para alcanzar la saturación. Posteriormente, se abrió la válvula de aguja para liberar el líquido presurizado y se completó la separación por flotación en el cilindro al pasar un tiempo de reposo de 20 minutos.

Condiciones Operacionales

Se trabajó con una presión de 40, 50 y 60 psi respectivamente; empleando cloruro de hierro (III) como coagulante, con dosis de 0, 25, 50, 75, 100 y 200 mg/L. Cada concentración se probó en el ensayo de flotación con cada una de las presiones fijadas, para un total de 18 muestras.

Caracterización del Efluente

El efluente se caracterizó en su estado inicial y después de cada ensayo de flotación. Los parámetros analizados para la caracterización, fueron los sólidos suspendidos totales (método gravimétrico) y aceites y grasas (extracción en Soxhlet), empleando las metodologías estándar para el análisis de aguas y aguas residuales de la publicación de los organismos American Public Health Association, American Water Works Association y Water Environment Federation [8].

2.2. Dimensiones del Equipo de Flotación con Aire Disuelto

Parámetros de Diseño para la Celda de Flotación

Se partió del caudal de alimentación de la corriente estudiada, así como también las ecuaciones de diseño usadas por Ortiz (Ob. Cit.) [7]. Es así como el volumen de la celda, el área de la celda y la altura de esta, se determinaron con las ecuaciones dos, tres y cuatro respectivamente.

$$V_c = Q \times TRH_c \quad (2)$$

$$A_c = l_c \times b_c \quad (3)$$

$$V_c = A_c \times h_c \quad (4)$$

Se hizo el cálculo para la carga hidráulica superficial para la celda de flotación (CHS_c), con la ecuación cinco (5) [10] y la determinación del diámetro de la tubería de succión y descarga de la celda de flotación, se realizó a través de la ecuación seis (6) de Hazen-Williams.

$$CHS_c = \frac{Q}{A_c} \quad (5)$$

$$Q = 0,278 \times C \times D^{2,63} \times S^{0,54} \quad (6)$$

Parámetros de Diseño para el Tanque de Saturación

Se dimensionó comenzando con el volumen requerido para el tanque de saturación a través de la expresión señalada en la ecuación siete (7). Luego, asumiendo una altura para el tanque de saturación y empleando la ecuación ocho (8), se determinó el diámetro del tanque de saturación.

$$V_s = Q \times TRH_s \quad (7)$$

$$V_s = \frac{\pi \phi_s^2 h_s}{4} \quad (8)$$

Adicionalmente, se consideró un borde libre para evitar daños en el equipo. También, se propone el uso de anillos tipo Rashing de plástico cuya dimensión fue seleccionada en función del diámetro calculado para el tanque de saturación. Con la altura del empaque y la ecuación nueve (9), se calculó el volumen que ocupan los anillos dentro del equipo.

$$V_e = A_e h_e \quad (9)$$

2.3. Equipos Mecánicos necesarios para el funcionamiento del Equipo FAD

Sistema de Recolección y Descarga de Sólidos

Para los sólidos flotados se caracterizó un mecanismo de barrido superficial, conformado por las placas barrelosos que van unidas a unas cadenas de rodillos para formar una especie de rastrillo de cadena, el cual estará accionado por medio de un motor reductor eléctrico. Para los sólidos sedimentables acumulados en la parte inferior de la celda de flotación, se contará con una válvula de purga para la eliminación de aquellos sólidos no capturados por las burbujas de aire formadas.

Sistema de Presurización

Se requirió definir las características técnicas del equipo compresor requerido para lograr la formación de numerosas burbujas a las condiciones operacionales determinadas en la fase experimental del estudio.

Equipos de Bombeo

Fue indispensable establecer las especificaciones de la bomba de alimentación de la unidad de flotación, encargada de suministrar el efluente presurizado a la celda de flotación. Igualmente, se establecieron las características de una bomba para lodo flotado. Para calcular la potencia de la bomba requerida, se la ecuación diez (10) que a continuación se presenta.

$$P = \frac{100 \times Q \times HDT}{75 \times \eta} \quad (10)$$

2.4. Costos de Inversión para la Implementación de un Sistema FAD

Se realizó un estudio económico para la instalación de un sistema de flotación por aire disuelto en la empresa estudiada. Por lo que se determinó la Tasa Externa de Retorno (TER), tasa interna de retorno modificada (TIRM). La tasa mínima atractiva de rendimiento (TMAR), se obtuvo empleando la ecuación once (11), siendo i la tasa de inflación y f el premio al riesgo.

$$TMAR = i + f + if \quad (11)$$

3. RESULTADOS

Caracterización Inicial

Antes de someter el efluente estudiado al ensayo de flotación por aire disuelto, se realizó una caracterización inicial del mismo para conocer las concentraciones de sólidos suspendidos (SST) y aceites y grasas (AyG) de este. En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos.

TABLA 1. Caracterización Inicial del Efluente Estudiado

	SST (mg/L)	AyG (mg/L)
Concentración Inicial	314,17	474,74
Valor Máximo (Decreto 883)	400,00	20,00

Ensayo de Flotación por Aire Disuelto

Los resultados obtenidos para el ensayo FAD, permitieron crear un cuadro resumen para cada presión de trabajo P (psi) utilizada, donde se señaló la concentración de coagulante empleado (ppm), la concentración de SST y AyG para el efluente clarificado, además de la eficiencia del proceso (expresado en porcentaje de remoción). En las Tablas 2, 3 y 4 respectivamente, se presentan los resultados obtenidos para $P = 40$ psi, 50 psi y 60 psi. Así mismo, en las Figura 2, 3 y 4 se muestran gráficamente la eficiencia del proceso en función de la concentración de coagulante empleado.

TABLA 2. Resultados Obtenidos en el Ensayo de FAD para P = 40psi

Concentración (ppm)	SST (mg/L)	AyG (mg/L)	E_{SST} (%)	E_{AyG} (%)
0	110,00	142,40	64,99	70,00
25	65,00	204,00	79,31	57,03
50	70,00	199,40	77,72	58,00
75	50,00	171,20	84,08	63,94
100	35,00	218,60	88,86	53,95
200	15,00	201,60	95,23	57,53

TABLA 3. Resultados Obtenidos en el Ensayo de FAD para P = 50 psi

Concentración (ppm)	SST (mg/L)	AyG (mg/L)	E_{SST} (%)	E_{AyG} (%)
0	40,00	202,40	87,27	57,37
25	55,00	118,60	82,49	75,02
50	90,00	188,00	71,35	60,40
75	165,00	299,20	47,48	36,98
100	136,67	146,20	56,50	69,20
200	90,00	175,40	71,35	63,05

TABLA 4. Resultados Obtenidos en el Ensayo de FAD para P = 60 psi

Concentración (ppm)	SST (mg/L)	AyG (mg/L)	E_{SST} (%)	E_{AyG} (%)
0	35,00	215,80	88,86	54,54
25	115,00	104,80	63,40	77,92
50	66,67	113,20	78,78	76,16
75	30,00	216,40	90,45	54,42
100	85,00	140,40	72,94	70,43
200	95,00	85,80	69,76	81,93

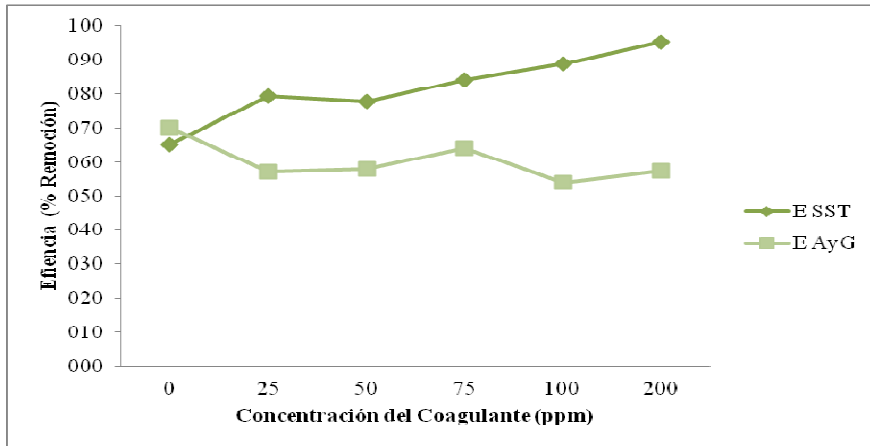


FIGURA 2. Eficiencia del proceso FAD para P = 40 psi respecto a la concentración de coagulante utilizado, 2011.

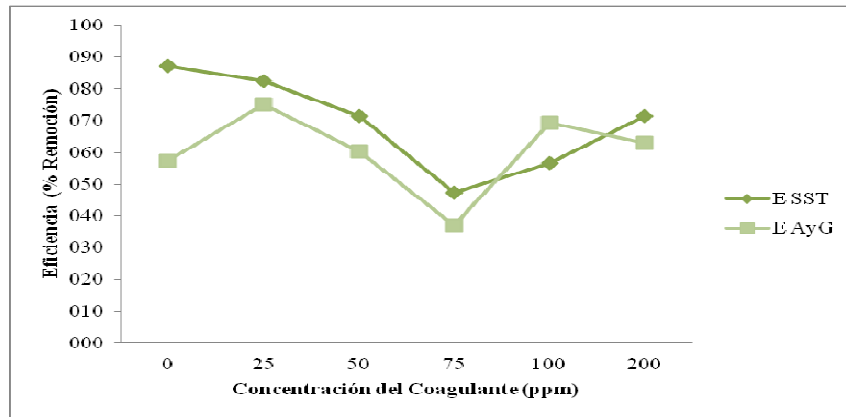


FIGURA 3. Eficiencia del proceso FAD para P = 50 psi respecto a la concentración de coagulante utilizado, 2011.

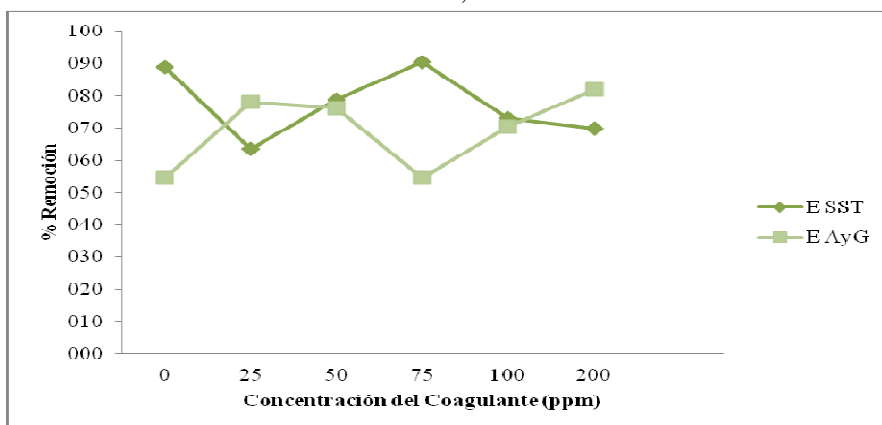


FIGURA 4. Eficiencia del proceso FAD para P = 60 psi respecto a la concentración de coagulante utilizado, 2011.

Conforme a lo obtenido, se tiene que se logró una mayor remoción de SST y por ende de eficiencia en el proceso FAD para este parámetro, cuando se trabajó con una presión de 40 psi (200 ppm) y para las AyG con una presión de 60 psi (200 ppm). Es importante destacar que pese a lo anterior señalado, la mejor correlación de los datos obtenidos se evidencia para la menor presión de trabajo probada. Los resultados obtenidos para las presiones 50 y 60 psi estuvieron afectados por la velocidad de ascenso de la burbuja, dado que se notó que al incrementar la presión de trabajo, las burbujas llegaban más rápido a la superficie de la celda de flotación en comparación con la menor presión de trabajo, reduciendo así la posibilidad de adherencia de los sólidos a esta por el poco tiempo de aglutinamiento de los mismos.

Otro aspecto a considerar al respecto, es la característica física del efluente analizado el cual era heterogéneo con flóculos de gran tamaño, lo que dificultó la obtención de muestras uniformes que arrojasen buenas correlaciones entre resultados. En referencia a este último señalamiento, es válido recordar que la FAD es más eficiente cuando se trabaja con flóculos incipientes o de reducido tamaño, porque esto favorece el ascenso de los sólidos adheridos a las burbujas, mientras que los flóculos de mayor tamaño son más pesados y esto no sólo dificulta su ascenso sino que en ocasiones requieren de mucho tiempo para lograr su remoción.

Tomando en consideración los resultados conseguidos en el ensayo FAD a escala de laboratorio, se puede concluir que las mejores condiciones operacionales son 40 psi con una concentración de 0 ppm de coagulante, puesto que para el estudio realizado se consigue mayor remoción de AyG sin la adición de un producto químico, al mismo tiempo esta disposición no afecta en gran manera la eficiencia del sistema para los SST y además contribuye con el funcionamiento de este un mínimo costo. Se puede señalar que en líneas generales el uso de coagulante no incidió en la remoción de los parámetros estudiados, por lo que no se puede establecer una firme relación entre estos, dado que en la mayoría de los casos los porcentajes fueron variables (con ascenso y descenso), al variar la dosis de producto químico agregado.

Dimensiones del Equipo de Flotación con Aire Disuelto

En esta etapa se partió de los parámetros que caracterizan el efluente residual estudiado (Tabla 5).

TABLA 5. Parámetros que Caracterizan el Efluente Residual Estudiado

	Máximo (máx.)	Promedio (prom.)	Mínimo (mín.)
Q (m³/min)	0,0323	0,0233	0,0156
pH	7,40		8,52
T (°C)	28,50	28,06	27,60

Nota. Información suministrada por la empresa estudiada, 2011, Barquisimeto.

Parámetros de Diseño para la Celda de Flotación

El cálculo de las dimensiones de la celda se hizo para un diseño rectangular, asumiendo una base de cálculo que cumpliera con las normas generales de diseño fijadas por Sainz (2005) [11], para tanques rectangulares. Con la aplicación de las ecuaciones ya descritas se obtuvieron los datos para el diseño de la celda de flotación (Tabla 6), además de las dimensiones de la tolva de sólidos flotados, compartimiento para efluentes clarificados y placa barrelo (Tabla 7).

TABLA 6. Datos para el Diseño de la Celda de Flotación

Parámetro		
Q (m ³ /min) = 0,032	A _c (m ²) = 1,60	CHSc (m ³ /m ² .min) = 0,02
T (°C) = 28,50	h _c (m) = 0,40	A/S (mL/mg) = 0,042
TRH _c (min) = 20,00	Borde libre (m) = 0,30	D (pulg.) = 3
V _c (m ³) = 0,646	Altura para sólidos sedimentables (m) = 0,40	Material de Fabricación Celda de flotación: Acero laminado en caliente ASTM A 568 (hierro negro). Tuberías: Hierro galvanizado.
l _c (m) = 2,00		
b _c (m) = 0,80	h _c ' (m) = 1,10	

TABLA 7. Dimensiones para la Tolva de Sólidos Flotados, Compartimiento para Efluentes Clarificados y Placa Barrelo

Parámetros		
<i>Tolva de Sólidos Flotados</i>	<i>Compartimiento para Efluentes Clarificados</i>	<i>Placa Barrelo</i>
Ancho (m) = 0,80 Altura (m) = 0,40 Largo (m) = 0,20 Borde libre (m) = 0,30	Ancho (m) = 0,80 Altura (m) = 1,10 Largo (m) = 0,20	Largo (m) = 0,78 Alto (m) = 0,15 Espesor (mm) = 2

Parámetros de Diseño para el Tanque de Saturación

A partir de los resultados obtenidos en la fase experimental, se fijaron los parámetros de diseño para el tanque de saturación. Con los cálculos efectuados, quedó definido el diseño del tanque de saturación cuyos datos se resumen en la Tabla 8, al igual que las especificaciones del soporte del empaque y los accesorios internos (Tabla 9).

TABLA 8. Datos para el Diseño del Tanque de Saturación

Parámetro		Material de Fabricación
$Q \text{ (m}^3\text{/min)} = 0,32$ $P \text{ (psi)} = 40$ $TRH_s \text{ (min.)} = 3$ $V_s \text{ (m}^3\text{)} = 0,0969$ $\varnothing_s \text{ (m)} = 0,40$ $h_s \text{ (m)} = 0,80$ Borde libre (m) = 0,40	$h_s' \text{ (m)} = 1,20$ Tamaño del empaque (mm) = 25,00 $h_e \text{ (m)} = 0,50$ $V_e \text{ (m}^3\text{)} = 0,0038$ Cantidad de anillos = 3800 $D \text{ (pulg.)} = 3$	Tanque: Acero laminado en caliente ASTM A568 de 4 mm de espesor. Tuberías: Hierro galvanizado.

TABLA 9. Especificaciones del Soporte y de los Accesorios

Parámetros del Soporte	Parámetros de los Accesorios	Material de Fabricación
$\text{Diámetro } \varnothing \text{ (m)} = 0,40$ Luz de malla (mm) = 5-10	Distribuidor de líquido (pulg.) = 1 ½ Distribuidor de aire (pulg.) = ½	Soporte: Tela metálica en acero. Accesorios: Tuberías de hierro galvanizado.

Para garantizar el correcto funcionamiento del tanque de saturación se consideró la inclusión de una válvula de seguridad y un manómetro. La válvula de seguridad debe ser para una presión nominal PN-40, rosca GAS/NPT en acero inoxidable AISI-316-L. También, se debe contar con un manómetro para uso general de 2” ó 2 ½” de diámetro del reloj, una conexión de bronce 1/4” N.P.T. inferior o posterior al centro, doble escala, kg/cm² – psi y con una exactitud de +/- 2% del total de la escala.

Equipos Mecánicos para el Funcionamiento del Equipo de Flotación con Aire Disuelto

Sistema de Recolección y Descarga de Sólidos

Para la eliminación de los sólidos flotados, se requiere un mecanismo desnatador ubicado en la parte superior de la celda de flotación, en el que 4 placas barrelosos estén unidas a dos cadenas de rodillo de acero desplazadas a través de piñones para brindar un barrido superficial continuo en el efluente cuyo número de paso según Jiménez (2009) [12], debe ubicarse entre 8 y 12. Dicho mecanismo, estará accionado por medio de un motor reductor eléctrico de al menos 1 Hp.

Sistema de Presurización

Para la saturación del efluente en el tanque de saturación, se requiere el suministro de aire comprimido a una presión de 40 psi, dado que esta fue la condición operacional seleccionada al culminar la parte experimental por brindar mejores resultados para el caso estudiado. Por lo anterior, se recomienda utilizar un compresor de al menos 1 Hp para cubrir los requerimientos del sistema.

Equipos de Bombeo

Se utilizó un HDT de 1,10 m por ser la altura máxima existente respecto a la horizontal entre la ubicación de los sólidos flotados y los sedimentados. Se asumió una eficiencia de 0,50 por ser una bomba pequeña, obteniendo una potencia aproximada de 1,5 Hp. Necesitando así dos bombas sumergibles de al menos 1,5 Hp para la descarga de los sólidos sedimentables, así como también aquellos sólidos flotados acumulados. Concluyendo entonces, el diseño final del sistema FAD quedó como se muestra a continuación en la Figura 9.

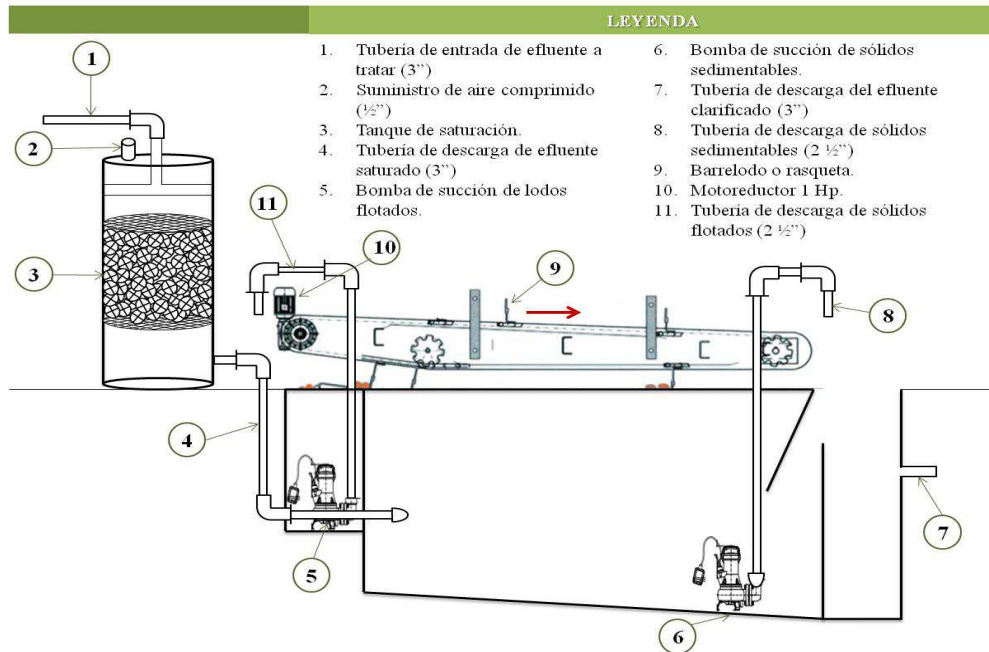


FIGURA 5. Diseño final del sistema FAD para la problemática estudiada, 2011.

Costos de Inversión para la Implementación de un Sistema de Flotación con Aire Disuelto

Se determinó considerando los materiales necesarios para la fabricación del equipo y el costo de mano de obra para dicha construcción, necesitando así una inversión de 67.399,63 BsF. para la instalación del sistema de flotación por aire disuelto diseñado. Luego, se calculó la TIRM con los flujos positivos y negativos inherentes a la instalación y funcionamiento del sistema de tratamiento de aguas, para un lapso de tiempo establecido para este trabajo de 5 años; tomando como beneficio económico anual un promedio de la multa estipulada por el Ejecutivo Nacional en caso de sufrir penalizaciones por vertido ilícito. Los flujos de caja negativos estuvieron conformados por la inversión inicial, los costos de operación y mantenimiento imputables al funcionamiento del sistema FAD. Los cálculos se efectuaron con Microsoft Excel y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 10.

Así mismo, se calculó la TMAR la cual se ubicó en 20,7% y al comparar los indicadores financieros calculados, se observa que la TIRM es mayor que la TMAR por lo que es una

inversión atractiva económicamente para la empresa objeto a estudio, siempre que se consideren 5 años como tiempo para recuperación de la inversión.

TABLA 10. Cálculo de la TIRM

	Inversión Inicial	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Flujos positivos		33.540,00	38.571,00	44.356,65	51.010,15	58.661,67
Flujos negativos	-67.399,63	-6.739,96	-8.209,27	-9.998,90	-12.178,66	-14.833,60
Total (BsF)	-67.399,63	26.800,04	30.361,73	34.357,75	38.831,49	43.828,07
Tasa de Financiamiento		17,75 %		Tasa de Reinversión		25,85 %
			TIRM		32 %	

4. CONCLUSIONES

La variabilidad en los datos obtenidos con el ensayo de flotación, impide establecer una relación en el uso de cloruro férrico y la remoción de contaminantes, motivo por el cual se induce que el empleo de coagulante no incidió en la eficiencia del proceso FAD.

Las condiciones operacionales seleccionadas con el uso del equipo FAD a escala de laboratorio, fueron 40 psi con 0 ppm de coagulante, por presentar la mejor correlación de datos respecto a los resultados obtenidos con el resto de presiones de trabajo y concentraciones probadas; ofreciendo así una remoción de 64,99% y 70% para los SST y AyG respectivamente.

El diseño del sistema FAD, se conformó por un tanque de saturación y una celda de flotación, los cuales fueron diseñados para un caudal de 0,032 m³/min, por ser el valor máximo medido para esta variable según información suministrada por la empresa.

El tanque de saturación se diseñó de manera cilíndrica para una presión de 40 psi y un TRH de 3 minutos, obteniendo así un diámetro de 0,40 m, una altura total de 1,20 m y un volumen de 0,151 m³, con una sección empacada de 0,0038 m³ con anillos tipo Pall de polipropileno por favorecer

la superficie de contacto entre el aire y el efluente. Igualmente, para un adecuado funcionamiento del tanque de saturación se consideró la inclusión de una válvula de seguridad y un manómetro.

La celda de flotación se diseñó de forma rectangular y quedó conformado por una zona de flotación, un espacio para la sedimentación de los sólidos sedimentables, una tolva para sólidos flotados y un compartimiento para el efluente clarificado. Se partió de un TRH de 20 minutos, obteniendo así una CHS de $0,02 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min}$ y una proporción A/S de $0,042 \text{ mL/mg}$, determinando además que se requiere de una tubería de $3''$ de diámetro tanto para la succión como para la descarga.

Para el correcto funcionamiento del sistema FAD diseñado, fue necesario caracterizar los equipos requeridos para el sistema de recolección y descarga de lodos, sistema de presurización y equipos de bombeo.

El uso de indicadores económicos arrojó que se trata de un proyecto económicamente factible para la empresa, ya que la TIRM (32%) superó la TMAR (20,7%) calculada, para un periodo de recuperación de la inversión de 5 años.

Finalmente la flotación por aire disuelto además de ser sencilla, es excelente para el tratamiento de efluentes residuales cargadas de SST y AyG, ya que brinda altos niveles de remoción de dichos contaminantes, tal como se demostró a nivel de laboratorio.

5. AGRADECIMIENTO

Se agradece la colaboración del Laboratorio de Calidad de Agua del Departamento de Ingeniería Química de la UNEXPO-VR-Barquisimeto, así como a la técnico TSU. Tania Rivero.

6. REFERENCIAS

- [1] Parsons S. y Jefferson B. Dissolved Air Flotation. Introduction to potable water treatment process, [Libro en línea]. Julio 2006, [consulta el 14/07/2010]. Pp.: 58
Disponible en
<http://books.google.co.ve/books?id=SPZt9H4wJQkC&printsec=frontcover&dq=Introduction+to+potable+water+treatment+process&hl=es&sa=X&ei=kJzTT7rkLMWA6gG>

[Ky4m1Aw&ved=0CEIQ6AEwAA#v=onepage&q=Introduction%20to%20potable%20water%20treatment%20process&f=false](http://books.google.co.ve/books?id=Ky4m1Aw&ved=0CEIQ6AEwAA#v=onepage&q=Introduction%20to%20potable%20water%20treatment%20process&f=false)

- [2] Veall F. Tratamiento de los desechos y eliminación de las aguas residuales. Estructura y funcionamiento de mataderos medianos en países de desarrollo, [Libro en línea]. 1993, [consulta el 12/07/2010]. Pp.: 163. Disponible en http://books.google.co.ve/books?id=BRX_LNjXre8C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbg_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- [3] Cheremisinoff N. Handbook of water and wastewater treatment technologies. Massachusetts, USA. Butterworth-Heinemann. 2002. Pp.: 317
- [4] Graterol, N. Tratamiento de aguas residuales. Barquisimeto, Venezuela. Decanato de Agronomía en UCLA. 2006. Pp.: 27
- [5] Metcalf & Eddy. Wastewater Engineering: Treatment and reuse. 4a Edición. New York, USA. McGraw-Hill Companies, Inc. 2003. Pp.: 419 – 424.
- [6] Eckenfelder W. Dissolved Air Flotation. Developing industrial water pollution control programs, [Libro en línea]. Septiembre 1997, [consulta el 15/07/2010]. Pp.: 72. Disponible en http://books.google.co.ve/books?id=FKtQj4IeO3oC&pg=PA71&dq=Eckenfelder%20dissolved+air+flotation&hl=es&ei=xBY_TPnjN8aq1Af6rKjFBw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=3&ved=0CDUQ6AEwAg#v=onepage&q&f=false
- [7] Ortiz H. Tratamiento de aguas oleosas por flotación. Trabajo de Grado de Maestría publicado. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México, 2002. 31 p.
- [8] American Public Health Association, American Water Works Association y Water Environment Federation. Standard Methods para el examen de agua y aguas residuales 21ª Edición. USA. Water Environment Federation. 2005. Pp.: 548

- [9] Cecchet J. Avaliação do desempenho de flotação por ar dissolvido no tratamento de efluente de refinaria de óleo de soja. Trabajo de Grado de Maestría publicado. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Brasil, 2007. 39 – 41 p.
- [10] De Turris, A., Yabroudi, S., Valbuenam B., Gutiérrez, C., Cárdenas, C., Herrera, L., et al. Tratamiento de aguas de producción por flotación con aire disuelto. [Artículo en línea]. *Interciencia, Revista de Ciencia y Tecnología de América*, Vol. 36, N° 3, Marzo 2011, [consulta El 31/08/ 2011]. Pp.: 211-218. Disponible en <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=33917977009>
- [11] Sainz J. Flotación. Tecnologías para la sostenibilidad: Procesos y operaciones unitarias en depuración de aguas residuales, [Libro en línea]. 2005, [consulta el 24/08/2011]. Pp.: 152–159. Disponible en http://books.google.co.ve/books?id=r9aK7UttDU8C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbg_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- [12] Jiménez Y. Diseño de un separador de sólidos por flotación con aire disuelto (DAF) con fines didácticos y de investigación. XXII Congreso Panamericano COPIMERA 2009. Confederación Panamericana de Ingeniería Mecánica, Eléctrica, Industrial y Ramas Afines (COPIMERA) 2009. Monterrey, Nuevo León, México. Noviembre, 2009. 31 p.