

TRATAMIENTO DE AGUAS DE PRODUCCIÓN POR FLOTACIÓN CON AIRE DISUELTO

Antonio De Turrís, Suher Carolina Yabroudi, Brenyith Valbuena, Charles Gutiérrez, Carmen Cárdenas, Lenin Herrera y Carlos Rojas

RESUMEN

La producción petrolera involucra varias operaciones generadoras de impacto ambiental, entre las cuales está la utilización de agua asociada al petróleo, siendo necesario separarla antes de la comercialización. Los volúmenes de agua de producción y su composición dependen del campo petrolero y del yacimiento de donde proviene. Tradicionalmente se usan separadores API y de placas corrugadas como tratamiento; sin embargo, la tecnología de flotación con aire disuelto (FAD) representa una alternativa para mejorar la eficiencia de separación y optimizar los procesos. En este trabajo se evaluó un sistema FAD piloto para el tratamiento de aguas de producción con elevada concentración de hidrocarburos y sólidos suspendidos. Los ensayos se realiza-

ron considerando la adición de productos químicos coagulantes y modificando condiciones de operación: presión de 207, 276 y 345kPa, con variación de reciclo de 30, 40 y 50% de agua presurizada. Se caracterizó el efluente midiendo pH, cloruros, alcalinidad, turbidez, sólidos suspendidos, aceites y grasas, al inicio y al final de las pruebas de flotación, a fin de establecer las condiciones del agua. En función de los resultados obtenidos, se seleccionó un producto catiónico de alto peso molecular (FCAPM), con una dosis óptima de 3,59mg·l⁻¹, y se estableció 276kPa de presión y 40% de reciclo como la mejor condición de operación del FAD, con porcentajes de remoción de 90% de aceites y grasas, 72% de sólidos suspendidos y clarificación del efluente de 70%.

Introducción

Los requerimientos de la industria petrolera día a día se hacen más exigentes en cuanto a la calidad del crudo, debido a que el contenido de agua asociado a éste disminuye apreciablemente los costos de venta. Conocidas como aguas de producción, éstas se originan durante la explotación y el proceso de generación del crudo, y provienen de dos fuentes: agua asociada al yacimiento (agua de formación) y agua o vapor que se inyecta a los yacimientos durante los procesos de recuperación secundarios. Dependiendo del yacimiento productor, la cantidad de agua de producción puede representar de 3 a 57% del volumen total de los fluidos producidos y su potencial contaminante está relacionado a factores asocia-

dos a la explotación de cada campo, tales como edad geológica de la formación, tiempo de explotación del yacimiento, tiempo del proceso de recuperación, etc. En el caso del crudo extraído de la cuenca del Lago de Maracaibo, Estado Zulia, Venezuela, éste viene asociado con agua de la formación y gas, siendo esta mezcla petróleo-agua recolectada en las estaciones de flujo situadas en el lago y de allí enviado a los cinco patios de almacenamiento situados en la costa, donde es fiscalizado por personal del Ministerio de Energía y Minas. La industria petrolera actualmente emplea separadores API y de placas corrugadas como técnica de separación crudo-agua para cumplir con esta parte del tratamiento, sin embargo, diversos estudios señalan que la flotación con aire disuelto

(FAD) es un proceso con altos porcentajes de remoción de sólidos suspendidos, aceites y grasas, por lo que el objetivo principal del presente trabajo consistió en evaluar un equipo FAD a escala piloto, para establecer los parámetros de diseño y condiciones óptimas de operación (presión, porcentaje de reciclo), empleando para ello aguas de producción provenientes de uno de los principales patios de tanques de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo (Díaz, 1987; Drostte, 1997; Soto, 2002; Di Bernardo y Di Bernardo, 2005).

Materiales y Métodos

Procesos en el patio de tanques

El agua de formación empleada en el estudio proviene del patio de tanques principal

(Figura 1) del Municipio Simón Bolívar, Tía Juana, Estado Zulia, Venezuela. La alimentación hacia este patio se hace mediante tuberías provenientes de distintas estaciones de flujo ubicadas en tierra y lago, para las segregaciones de las producciones de los crudos liviano (L), mediano (M) y pesado (P). Este patio cuenta con 24 tanques: 14 de techo flotante, 2 de lavado, 1 de compensación, 1 de crudo recuperado (fijo) y 6 de techo fijo. Después de lograr la deshidratación de estas segregaciones en los tanques, se procede al drenaje del agua. El crudo obtenido en estos procesos se bombea hacia otras instalaciones para su fiscalización y posterior venta, mientras que el agua asociada a las segregaciones es tratada para su posterior inyección en los pozos.

PALABRAS CLAVES / Aguas de Producción / FAD / Presión / Reciclo / Tratamiento de Agua /

Recibido: 20/01/2010. Modificado: 31/01/2011. Aceptado: 02/02/2011.

Antonio De Turrís. Ingeniero Químico y Maestría en Ingeniería Química, La Universidad del Zulia (LUZ), Venezuela. Profesor e Investigador, LUZ, Venezuela.

Suher Carolina Yabroudi. Ingeniera Química y Maestría en Ingeniería Química, LUZ, Ve-

nezuela. Profesora e Investigadora, LUZ, Venezuela. Dirección: Centro de Investigación del Agua, Facultad de Ingeniería, LUZ. Apartado 526. Maracaibo, Edo. Zulia, Venezuela. e-mail: yabroudic@yahoo.com

Brenyith Valbuena. Ingeniera Química, LUZ, Venezuela.

Charles Gutiérrez. Ingeniero Químico y Maestría en Ingeniería Química, LUZ, Venezuela. Profesor, LUZ, Venezuela.

Carmen Cárdenas. Ingeniera Química y Maestría en Ingeniería Ambiental LUZ, Venezuela. Profesora, LUZ, Venezuela.

Lenin Herrera. Ingeniero Químico, LUZ, Venezuela. Maestría en Ingeniería Ambiental y Sanitaria, University of Texas at Austin, EEUU. Profesor, LUZ, Venezuela.

Carlos Rojas. Ingeniero Mecánico y Maestría en Ingeniería Ambiental, LUZ, Venezuela.

PRODUCTION WATER TREATMENT BY DISSOLVED AIR FLOTATION

Antonio De Turrís, Suher Carolina Yabroudi, Brenyith Valbuena, Charles Gutiérrez, Carmen Cárdenas, Lenin Herrera and Carlos Rojas

SUMMARY

Oil production involves several operations that generate environmental impact. One of them is the necessary separation, before marketing, of the water that comes associated to the oil. Volume and composition of production water depend specifically on the reservoir from which it comes. Traditionally, API separators and corrugated plates are used to carry out the treatment; nevertheless, dissolved air flotation (DAF) technology offers an alternative to improve the efficiency of separation and optimize the process. In this study a pilot DAF system for the treatment of oily water with high concentrations of hydrocarbons and suspended solids was evaluated. Tests were performed with the addition of chemical coagulation agents and

changing the operating conditions: pressures of 207, 276 and 345kPa, and 30, 40 and 50% recycling of pressurized water. The effluent was characterized at the beginning and at the end of the flotation process by measuring pH, chlorides, alkalinity, turbidity, solids suspended, oils and fats, so as to establish water conditions. Based on the results, a flocculent coagulating cationic agent of high molecular weight (FCAPM) was selected, with optimal dose of 3.59mg·l⁻¹. DAF best operating conditions were established as 276kPa of pressure and 40% recycling, with removal of 90% of oils and fats, 72% of suspended solids and 70% clarification of the effluent.

TRATAMENTO DE ÁGUAS DE PRODUÇÃO POR FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

Antonio De Turrís, Suher Carolina Yabroudi, Brenyith Valbuena, Charles Gutiérrez, Carmen Cárdenas, Lenin Herrera e Carlos Rojas

RESUMO

A produção petroleira envolve várias operações geradoras de impacto ambiental, entre as quais está a utilização de água associada ao petróleo, sendo necessário separá-la antes da comercialização. Os volumes de água de produção e sua composição dependem do campo petrolífero e da jazida de onde provêm. Tradicionalmente se usam separadores API e de placas corrugadas como tratamento; no entanto, a tecnologia de flotação por ar dissolvido (FAD) representa uma alternativa para melhorar a eficiência de separação e otimizar os processos. Neste trabalho foi avaliado um sistema FAD piloto para o tratamento de águas de produção com elevada concentração de hidrocarbonetos e sólidos suspensos. Os ensaios se realizaram considerando a adi-

ção de produtos químicos coagulantes e modificando condições de operação: pressão de 207, 276 e 345kPa, com variação de reciclo de 30, 40 e 50% de água pressurizada. Caracterizou-se o afluente medindo pH, cloruros, alcalinidade, turbidez, sólidos suspensos, óleos e gorduras, ao início e ao final das provas de flotação, com o fim de estabelecer as condições da água. Em função dos resultados obtidos, foi selecionado um produto catiônico de alto peso molecular (FCAPM), com uma dose ótima de 3,59mg·l⁻¹, e se estabeleceu 276kPa de pressão e 40% de reciclo como a melhor condição de operação do FAD, com porcentagens de remoção de 90% de óleos e gorduras, 72% de sólidos suspensos e clarificação do afluente de 70%.

El proceso al cual se someten las aguas se inicia con la adición de coagulante primario en las tuberías de producción del crudo mediano (M) a nivel del patio de tanques. La mezcla crudo-agua se recibe en los tanques de almacenamiento de 23849m³ de techo flotante, ubicados en el patio, donde ocurre el proceso de separación por deshidratación. Concluido este proceso, el agua se drena a través de las dos tuberías de 0,3m de diámetro, donde reciben otra inyección de coagulante primario a objeto de desestabilizar la emulsión remanente y la formada durante el proceso de drenaje de los tanques. Paralelamente, el agua producida por los crudos L y P se drena hacia un

múltiple, luego de tratarse químicamente con el coagulante primario. Culminado el proceso, el agua se transporta hasta un punto en el cual se mezclan todos los afluentes y luego de drenada de los tanques del patio se conducen a través de una tubería de 0,91m de diámetro hasta los separadores por gravedad API 1, 2, 3 y 4, los cuales operan en forma paralela y donde el agua permanece el tiempo de residencia requerido para permitir la separación del crudo libre presente y del originado como producto de la desestabilización de la emulsión. Seguidamente el agua de los cuatro separadores es transferida por gravedad al separador API 5, unidad que permite una se-

gunda etapa de remoción de crudo. Posteriormente, se transfiere al clarificador circular a través de tres bombas de 0,18m³·s⁻¹ de capacidad cada una, y se deja reposar el tiempo necesario para separar el resto del crudo presente. En el extremo de esta unidad se encuentran instaladas tres bombas de 0,09m³·s⁻¹ de capacidad cada una, las cuales envían el agua a los pozos inyectoros de los yacimientos. Esta agua debe contener <10mg·l⁻¹ de crudo y <20mg·l⁻¹ de sólidos suspendidos, a objeto de mantener la inyectabilidad de los pozos y evitar la reducción de la permeabilidad, minimizando el taponamiento de los yacimientos (Díaz, 1987; Soto, 2002).

Caracterización y selección del coagulante

Para cumplir con los objetivos planteados, se colectó por un período de diez semanas agua de producción proveniente del Separador API 5 (Figura 1), caracterizadas siguiendo la metodología descrita por el *Standard Methods of Water and Wastewater* (APHA, 2005). Como el propósito del trabajo era evaluar la eficiencia de los sistemas FAD en diferentes condiciones operacionales con y sin la adición de productos químicos coagulantes, la primera etapa del estudio consistió en determinar el tipo y concentración de agente coagulante, para lo cual se evaluaron cuatro tipos de coagulantes (Tabla

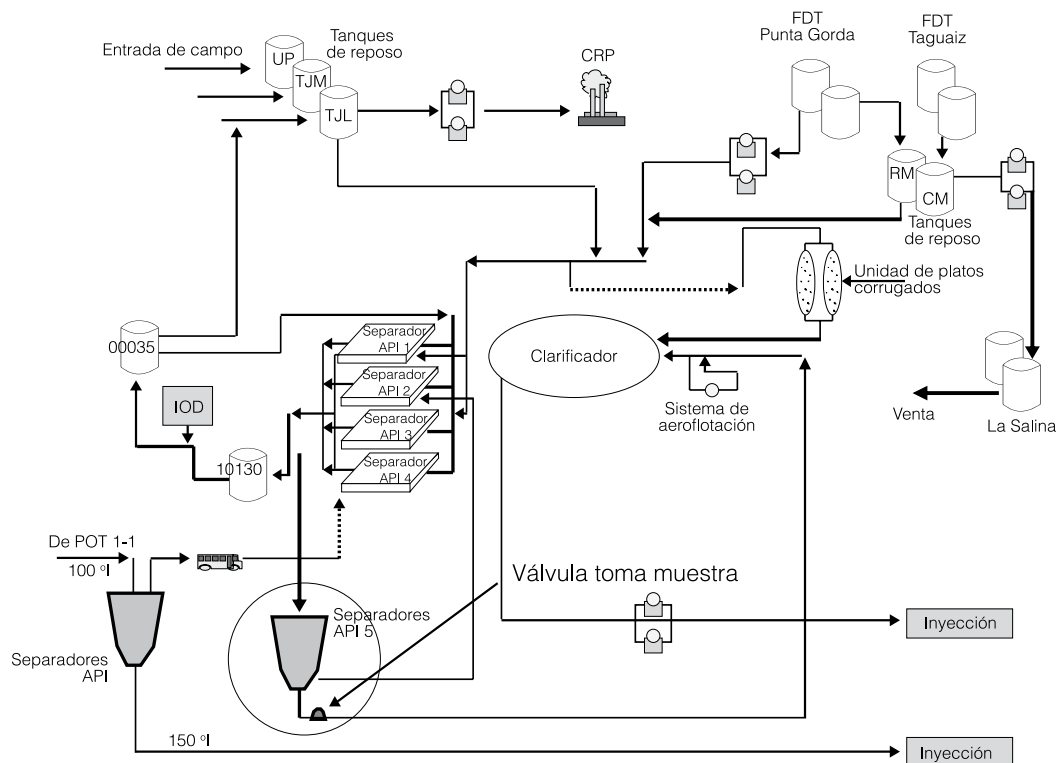


Figura 1. Diagrama del patio de tanques.

I) empleando el ensayo de jarras, conformado por una etapa de mezcla rápida a 150rpm durante 1min, seguido de agitación lenta a 40rpm por 20min. Se hicieron ensayos por separado modificando la concentración de producto desde 0,006 a 0,018%, en pasos de 0,004%. La selección del coagulante empleado estuvo condicionada a la obtención de mayo-

res porcentajes de clarificación, con mínima variación en los parámetros medidos y cuyo costo asociado fuese económicamente viable. La prueba de jarra fue adaptada al esquema de flotación empleado.

Descripción de la unidad FAD

El equipo a escala piloto utilizado consta de una celda

de presurización o cámara de saturación (Figura 2) consistente en un recipiente de 90mm de diámetro externo y 270mm de altura, con un agitador manual de acero inoxidable y un filtro de Berrea (piedra arenisca con >90% de caliza) que funciona como difusor para aumentar la superficie de contacto líquido-

gas; así mismo la celda presenta a la salida una válvula reductora de presión que permite la liberación del líquido presurizado y conexiones flexibles con acoples de rápida instalación-desinstalación. La unidad posee en el tope una empackadura (o-ring) y un liberador y medidor de presión de 0-13790kPa. El equipo de flotación cuenta con un cilindro de plástico graduado de 1000ml, 70mm de diámetro externo y 450mm de altura, que es denominado como celda de flotación. La unidad presenta un compresor de 373W, dos medidores de presión con escala graduada de 0-689kPa y 0-1379kPa, y cuenta con un medidor de flujo de aire y válvulas reguladoras. Los límites permisibles para la celda de presurización son: presión máxima de 862kPa, temperatura entre 4 y 38°C y capacidad de fluido de ~1125ml. El equipo debe ser encendido 15min antes de iniciar la prueba para saturar con aire el agua que será empleada como reciclo, siendo el volumen de agua de producción agregado a la cámara de flotación determi-

TABLA I
PORCENTAJES DE CLARIFICACIÓN PARA LOS PRODUCTOS QUÍMICOS EVALUADOS

Coagulante	Descripción	Concentración de producto (ml·l ⁻¹)			
		3	5	7	9
FCAPM	Polímero líquido, tipo poliacrilamida de carga catiónica y alto peso molecular Gravedad específica a 25°C = 1,08-1,18	98%	98%	74%	43%
PA	Polímero sólido, tipo poliacrilamida de alta carga catiónica y alto peso molecular Viscosidad a 25°C= 100-200cps al 0,1%	79%	15%	5%	57%
FC	Polímero líquido coagulante-floculante Gravedad específica a 25°C= 1,02-1,10	99%	73%	87%	57%
PAPM	Ayudante de coagulación, polímero líquido con alta densidad de carga catiónica Gravedad específica a 25°C = 1,25-1,35	96%	90%	57%	-

FCAPM: floculante catiónico de alto peso molecular, PA: poliacrilamida, FC: floculante catiónico, PAPM: polímero de alto peso molecular.

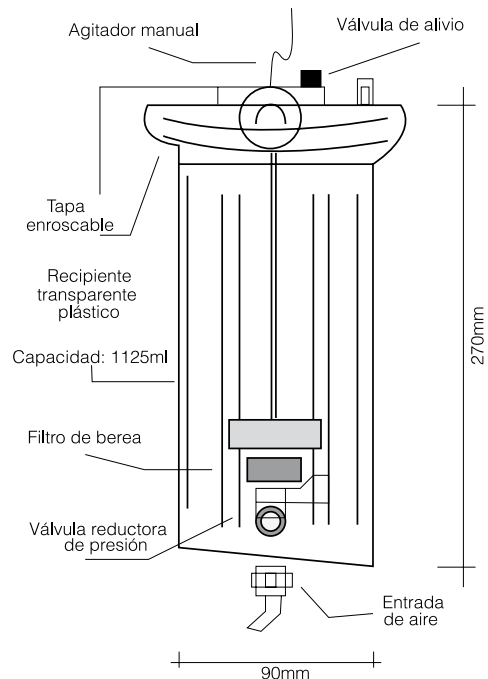


Figura 2. Cámara de saturación o celda de presurización.

nado por la Ec (1). En ese momento se abre la válvula reductora de presión ubicada a la salida de la cámara de saturación para liberar la presión hacia la celda de flotación, induciendo la formación de burbujas (AWWA, 1999, 2005; Crittenden *et al.*, 2005; Kawamura, 2000).

$$Va = \text{Porcentaje de reciclo} \times Vc \quad (1)$$

donde Va: volumen a agregar, Vc: volumen de la cámara de flotación, Porcentaje reciclo: fracción de agua saturada con aire que será adicionada una vez iniciado el ensayo de flotación.

Evaluación del equipo FAD

Durante la segunda etapa se evaluó el FAD variando las condiciones de operación en base a la bibliografía consultada, donde se recomiendan valores de 207 a 483kPa de presión y caudales de recirculación de 5 a 50% (AWWA, 1999; Metcalf & Eddy, 2003; Kawamura, 2000). Las condiciones fijadas fueron: presiones de 207, 276 y 345kPa, con una variación de reciclo para cada uno de 30, 40 y 50% de efluente tratado, considerando la adición y ausencia de producto químico. Cuando se realizó la adición de agente coagulante (tipo y concentración seleccionado en la primera etapa), previo al tratamiento con FAD se efectuó con el equipo de jarras el proceso de coagulación-floculación de las muestras a ser introducidas en la cámara de flotación. Con la variación de estos parámetros se midieron, en cada ensayo, los tiempos de retención en la celda y el caudal de reciclo que constituyen parámetros de diseño, así mismo al inicio y al final de cada una de las etapas del estudio se efectuaron mediciones de pH, temperatura, cloruros, alcalinidad, turbidez, sólidos suspendidos, aceites y grasas, siguiendo la metodología descrita en APHA (2005).

Comparación técnico-económica de tecnologías de separación crudo-agua

La selección de la mejor alternativa de tratamiento se realizó por medio de una comparación entre los sistemas tradicionales (separadores API y separadores de placas corrugadas) y los sistemas de flotación con aire disuelto (FAD) y aire inducido (FAI). Esto requirió la recopilación de información técnica de cada uno de los sistemas de separación estudiados, tales como material de construcción, área efectiva de separación, presión de operación, empleo de productos químicos, costo de inversión, tiempo de retención hidráulico (TRH), porcentaje de separación de crudo, costos de mantenimiento, facilidad de operación, consumos energéticos, requerimiento de operadores y caudales manejados por cada uno de ellos. La comparación económica se efectuó aplicando dos métodos, el método del valor presente neto (VPN) y el de la tasa externa de rendimiento (TER). El método VPN toma en cuenta el costo del proyecto en el presente, por lo que la mejor alternativa de tratamiento se seleccionó tomando aquel sistema cuyo VPN fuera menor. Para el equipo de flotación se asumió un valor de salvamento equivalente al 10% de la inversión total. Para el método de la TER se consideró la tasa del mercado para la fecha, la cual de acuerdo al Banco Central de Venezuela era de 28%, considerada como la tasa de rendimiento mínima atractiva (TREMA) para la elección de la mejor alternativa. Si la TER es mayor que la TREMA, el sistema de separación tomado como base de análisis es rentable con respecto al sistema con el cual se comparó, mientras que si la TER es menor que la TREMA se considera como mejor alternativa de separación la opción contra la cual se comparó (Reynolds y Richards, 1996; De Garmo y Sullivan, 1997; Sincero y Sincero, 2003; Crit-

tenden *et al.*, 2005; Di Bernardo y Di Bernardo, 2005;).

Diseño a escala real

Se consideraron los resultados experimentales de presión óptima de operación, porcentaje de reciclo de agua tratada, tiempo de recirculación, tiempo de retención hidráulico, temperatura y concentración de sólidos en el efluente. Las variables: área de flotación, relación aire:sólido y carga hidráulica, fueron calculadas a partir de los resultados experimentales con ecuaciones empíricas. Como el área de flotación está referida a la forma geométrica de la cámara, se determinó para este caso el área efectiva de un cilindro bajo las condiciones del equipo a escala real (Ec. 2). Con la Ec. 3 se estimó la carga hidráulica (CH) que permite establecer la relación entre los caudales de alimentación y reciclo para obtener una separación óptima. La relación aire:sólido se calculó de acuerdo a la Ec. 4, y con este parámetro de diseño se verificó la eficiencia del sistema de flotación a las condiciones de operación, ya que permite determinar la cantidad en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ o el porcentaje de sólidos que pueden ser eliminados a la presión de operación considerada. Los caudales de alimentación se asumieron en función de los volúmenes de aguas tratadas en el mercado, y a partir de estos datos se determinó el tamaño de las unidades para distintas necesidades (Qasim *et al.*, 2000; Metcalf & Eddy, 2003; AWWA, 2005; Crittenden *et al.*, 2005; Di Bernardo y Di Bernardo, 2005; Pacheco y Arruda, 2005;).

$$A_{\text{flotación}} = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (2)$$

$$CH = \frac{Q_{\text{alimentación}} + Q_{\text{reciclo}}}{A_{\text{flotación}}} (1/\text{m}^2 \times \text{s}) \quad (3)$$

$$A:S = \frac{1,3 \times S_a \times Q_{\text{reciclo}} \times (f \times P - 1)}{S_i \times Q_{\text{alimentación}}} (1/\text{m}^2 \times \text{s}) \quad (4)$$

donde A:S: relación aire-sólidos, ml de aire liberados por mg de

sólidos aplicados, Sa: saturación del gas a las condiciones atmosféricas ($\text{cm}^3 \cdot \text{l}^{-1} \cdot \text{atm}^{-1}$), Si: sólidos suspendidos en el caudal de entrada ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$), f: relación solubilidad del gas en el agua a tratar/solubilidad del gas en el agua (usualmente 0,5 para aguas residuales), P: presión absoluta en atmósferas, Q_{reciclo} : caudal de reciclo presurizado ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$), y $Q_{\text{alimentación}}$: caudal de entrada ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$).

Resultados y Discusión

Caracterización de las muestras de agua de producción

Estos resultados corresponden a la caracterización de las muestras tomadas del patio de tanques y efectuadas antes de realizar el tratamiento con FAD. Los valores de pH en las muestras de aguas de producción provenientes del separador API 5 presentaron poca variación, manteniéndose entre 7,6 y 7,9. La medición de este parámetro es importante para el proceso de coagulación, ya que la efectividad de los productos coagulantes-floculantes se ve afectada por el mismo. Para los productos empleados el valor de pH presenta un intervalo de acción entre 4-10. La variación de temperatura se encuentra entre 23 y 32°C, la cual no afecta la floculación, pero sí la saturación de agua con aire, razón por la que el tiempo de saturación del volumen de reciclo se sobreestimó en 15min, a fin de asegurar la saturación de aire. El contenido de cloruros y de alcalinidad, los cuales afectan al igual que el pH el proceso de coagulación, fue de 1420-2370 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ de Cl⁻ y 2050-2920 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ de CaCO₃. La concentración de aceites y grasas varió entre 400-1500 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$,

mientras que la cantidad de sólidos suspendidos totales en las muestras fue relativamente constante con valores entre 67 y 134 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Estos resultados muestran que el agua de for-

mación a la salida del separador API 5 no cumple con los requisitos de 10mg·l⁻¹ de crudo y 20mg·l⁻¹ de sólidos suspendidos para ser inyectada nuevamente en los yacimientos.

Selección del producto químico

En la Tabla I se muestran los resultados obtenidos con los diferentes productos utilizados. Se puede apreciar que tres de los cuatro productos estudiados (FCAPM, FC, PAPM) presentaron resultados satisfactorios de clarificación empleando bajas dosis, mientras que la poliacrilamida, aun cuando clarifica la muestra en un porcentaje razonable, éste es relativamente bajo con respecto al producido por los demás productos. Por otro lado, se evidenció un comportamiento típico del proceso de clarificación con productos de alto peso molecular (PAPM y la poliacrilamida), ya que éstos provocan que los flóculos formados tiendan a sedimentar y no a flotar, razón por la cual no pueden ser aplicados en un proceso de flotación. Analizando las tendencias de los resultados obtenidos con los productos que funcionan para un proceso de flotación (FCAPM y FC), se puede notar que existe un patrón común de comportamiento de ambos. La Figura 3 muestra la tendencia del porcentaje de clarificación respecto a la concentración utilizada de productos químicos coagulantes; donde el porcentaje de clarificación de las muestras de agua de producción tiende a disminuir a medida que aumenta la concentración de los productos químicos. Este comportamiento normalmente se aprecia en procesos de clarificación cuando la efectividad del producto coagulante em-

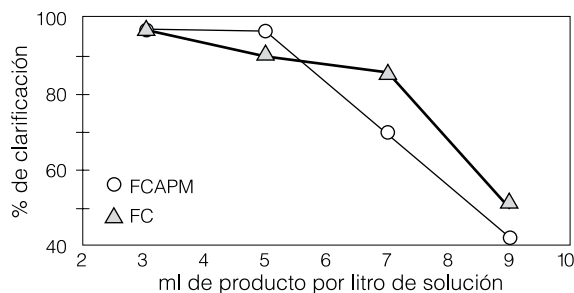


Figura 3. Porcentaje de clarificación respecto a la concentración utilizada de productos químicos.

pleado es alta y el nivel de acción de parámetros que inciden en esta efectividad, tales como la alcalinidad, pH y concentración de cloruros, es alto; es decir, dosis muy bajas

también afectada por el factor económico, ya que a pesar de que el producto FC registra una efectividad mayor en 1%, su costo es 55% mayor al FCAPM, ocasionando que los costos por metro cúbico de agua tratada sean más elevados. Por estas razones se seleccionó el FCAPM, que corresponde a una concentración de 0,006% en volumen (3,54mg·l⁻¹) (Sawamura, 1997; AWWA, 1999; Metcalf & Eddy, 2003).

adición previa del coagulante FCAPM en una concentración de 3,59mg·l⁻¹. Los valores de pH para las diferentes condiciones estudiadas se incrementaron ligeramente con la adición del FCAPM, observándose una variación entre 7 y 8,2 en todos los casos. La mejor condición de operación para las presiones 207 y 276kPa de presión corresponde a un 40% de reciclo, mientras que cuando la presión es de 345kPa, el valor de reciclo donde se alcanzan mayores porcentajes de clarificación y remoción de sólidos suspendidos, aceites y grasas es 30%. Los porcentajes de remoción

TABLA II
RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL FAD CON ADICIÓN DE 3,59mg·l⁻¹ DE FCAPM

Parámetro	207 kPa			276 kPa			345 kPa		
	Porcentaje de reciclo 30%	40%	50%	Porcentaje de reciclo 30%	40%	50%	Porcentaje de reciclo 30%	40%	50%
Temperatura (°C)	25	25	26	24	25	25	22	25	26
pH	8,12	8,05	8,01	7,86	7,68	7,81	7,92	8,01	8,14
Alcalinidad (mg·l ⁻¹ CaCO ₃)	1940	2300	2050	1950	1860	1980	2180	2180	2260
Cloruros (mg·l ⁻¹)	1130	1000	1510	2000	2240	1680	1670	1670	1320
Turbidez (NTU)	229	166	200	115	103	145	145	154	164
Sólidos suspendidos totales (mg·l ⁻¹)	294	25	27	8	15	19	28	33	43
Grasas y aceites (mg·l ⁻¹)	284	189	284	95	47	95	95	378	95
TRH (s)	156	248	325	244	364	359	374	456	510
T _R (s)	49	56	59	39	45	52	30	38	48
Q _R (m ³ ·s ⁻¹)	2,2×10 ⁻⁴	2,4×10 ⁻⁴	2,2×10 ⁻⁴	1,9×10 ⁻⁴	1,7×10 ⁻⁴	1,7×10 ⁻⁴	1,4×10 ⁻⁴	1,4×10 ⁻⁴	1,4×10 ⁻⁴
Remoción de SST	45	62	59	66	77	72	59	50	36
Remoción grasas y aceites	80	88	70	80	90	90	80	67	67
Porcentaje de clarificación	51	51	60	66	70	70	71	69	67

TRH: tiempo de retención hidráulico, T_R: tiempo de reciclo, Q_R: caudal de reciclo, caudal de aire empleado para saturar el agua de reciclo.

o muy altas de productos coagulantes tienden a desestabilizar los flóculos, disminuyendo de esta forma su efectividad.

Con la prueba de jarras se determinó la concentración mínima operativa para estos productos, siendo la selección final del producto a utilizar

Evaluación del FAD

Los resultados indicados en la Tabla II corresponden a las pruebas realizadas para las presiones de operación de 207, 276 y 345kPa, variando el porcentaje de reciclo en 30, 40 y 50% considerando la

y clarificación para las condiciones más favorables se resumen en la Tabla III, donde se evidencia que la eficiencia del proceso se incrementa con la adición de productos químicos. Analizando con mayor detalle la influencia de la presión sobre los porcentajes de clarificación y remoción de sólidos suspendidos, aceites y grasas, se observa que la presión favorece la remoción y la clarificación de las muestras hasta 276kPa, revirtiendo este efecto al incrementarse a 345kPa; sin

TABLA III
PORCENTAJES DE REMOCIÓN PARA LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN MÁS EFICIENTES DEL FAD

	Resultados con adición de 3,59mg·l ⁻¹ de FCAPM			Resultados sin adición de producto químico		
	207kPa 40% de reciclo	276kPa 40% de reciclo	345kPa 30% de reciclo	207kPa 40% de reciclo	276kPa 40% de reciclo	345kPa 30% de reciclo
Remoción grasas y aceites	88%	90%	80%	50%	30%	42%
Remoción sólidos suspendidos	62%	77%	54%	50%	50%	20%
Remoción clarificación	59%	69%	69%	34%	59%	58%

embargo, para esta presión se presenta un caso especial cuando se trabaja con 30% de reciclado presurizado en la remoción de grasas y aceites y en el porcentaje de clarificación, donde la tendencia en ambos casos es a aumentar sin presentar ningún punto de inflexión visible; no obstante no ocurre lo mismo con los SST, ya que su variación es igual al

resto de las condiciones de reciclado para esta presión. Este comportamiento se debe a que la densidad del aceite (crudo) es menor que la del agua y su tendencia natural es a la flotación y no a la sedimentación como en el caso de los sólidos, por lo que la fuerza necesaria para arrastrar estos materiales es menor que la requerida para arrastrar por flotación los sólidos suspendidos. Por lo tanto, es posible obtener mayores porcentajes de clarificación y remoción de grasas para presiones por encima de 345kPa, sin embargo, para remover sólidos suspendidos se hace ineficiente, dificultando su remoción en todos los casos.

Al igual que la presión, el efecto del reciclado sobre la remoción de sólidos suspendidos, aceites y grasas va aumentando hasta llegar a un punto de inflexión correspondiente a 40% de reciclado presurizado, donde la eficiencia de remoción de los parámetros de interés comienza a disminuir. La condición de 276kPa es la que presenta los mejores porcentajes de remoción, confirmando la tendencia a disminuir la eficiencia cuando se

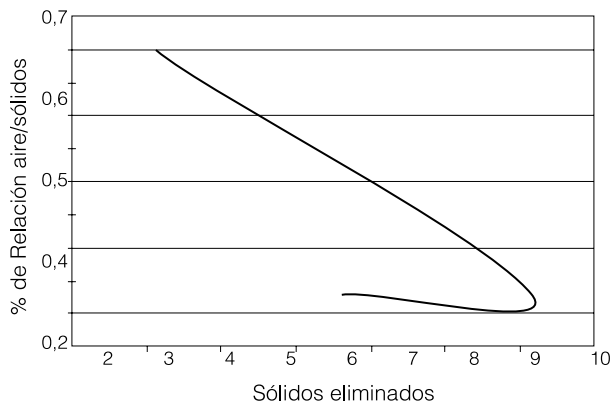


Figura 4. Efecto de la relación aire/sólidos en el porcentaje de sólidos eliminados a 276kPa.

considera 50% de reciclado. La eficiencia disminuye ya que al haber menor caudal inicial (el equipo trabaja con volúmenes iniciales fijos de acuerdo al porcentaje de reciclado a emplear), las burbujas deben recorrer un trayecto mayor a lo largo de toda la cámara de flotación, incrementando el tamaño de las inyectadas al sistema a través del reciclado por colisión con otras burbujas, disminuyendo así el área superficial de arrastre y con esto la eficiencia del sistema. El aumento del tamaño de burbujas, además de disminuir el

área superficial, causa un efecto de turbulencia al llegar a la superficie de la cámara de flotación, ocasionando que el material flotado sedimente por acción de la fuerza liberada al igualar la presión atmosférica. La Figura 4 muestra el efecto de la rela-

ción aire/sólidos en el porcentaje de sólidos eliminados para la presión de 276kPa, demostrando que con bajas relaciones aire/sólido se alcanzan los mayores porcentajes de remoción. De acuerdo a los valores obtenidos a escala piloto, para este sistema de flotación con aire disuelto las condiciones óptimas de operación, donde se obtuvieron las mayores eficiencias de remoción de aceites y grasas (90%) y sólidos suspendidos (77%), corresponden a una presión de 276kPa y 40% de reciclado de agua tratada.

La Tabla IV presenta una comparación entre los diferentes sistemas de flotación, recopilando los parámetros más importantes al momento de seleccionar un sistema de separación crudo-agua de acuerdo a las necesidades existentes. Para los separadores API, la mayor fortaleza se evidencia en la capacidad de manejar grandes volúmenes, y su debilidad en requerir de grandes áreas para su instalación, así como bajos porcentajes de remoción. Para los separadores de placas corrugadas, las principales desventajas son la poca capacidad de manejo además de bajos porcentajes de remoción, siendo la facilidad en la operación la ventaja principal. Los sistemas de flotación con aire inducido son una opción técnicamente viable, ya que los costos de inversión comparados con los sistemas FAD son bajos, necesitan poca área de separación y presentan alta eficiencia; sin embargo, los costos de mantenimiento (gran consumo de energía) opacan las bondades de estos sistemas, aunado con su relativa dificultad para la operación.

Los sistemas de flotación con aire disuelto (FAD) al igual que los sistemas con aire inducido (FAI) representan opciones viables debido a las ventajas presentadas, más en el caso de los sistemas FAD los porcentajes de remoción son mayores, los costos de mantenimiento son bajos (bajo consumo de energía), y las áreas de instalación pequeñas, siendo la única desventaja que los costos de inversión son mayores comparados con los del sistema de flotación con aire inducido. Técnica-

TABLA IV
COMPARACIÓN TÉCNICA ENTRE SISTEMAS
DE SEPARACIÓN CRUDO-AGUA

Parámetro	Separador API	Separador CPI	FAI	FAD
Material de construcción	Acero al carbón	Separador: acero al carbón Placas: fibra de vidrio, acero al carbón con recubrimiento epóxico	Acero al carbón	Acero al carbón
Área efectiva de separación (m ²)	5,5 x 10 ⁻²	2,1 x 10 ⁻³	2,4 x 10 ⁻⁵	2,4 x 10 ⁻⁵
Presión de operación	Atmosférica	Atmosférica	Hasta 103kPa	138-483kPa
Productos químicos	Pretratamiento	Pretratamiento	Pretratamiento	Pretratamiento
Costos de Inversión	Alto	Alto	Bajo	Dos veces el costo de FAI
TRH	1-2h	1-2h	4-6min	6-10min
Separación de crudo	60%	72%	90%	98%
Costo de mantenimiento	Bajo	Moderado	Alto	Alto
Consumo de energía	-	-	Alto consumo	Bajo
Requerimiento continuo de operador	Desnataadores manuales	Desnataadores manuales	No se requiere	No se requiere
Caudales manejados en el mercado	15-600gpm	5-1200gpm	70-3800gpm	1-1800gpm

mente, los sistemas FAD y FAI representan las mejores opciones de tratamiento para la remoción de sólidos y aceites, siendo la flotación con aire disuelto preferida debido a las características descritas anteriormente (Reynolds y Richards, 1996; AWWA, 1999; Kawamura, 2000; Metcalf y Eddy, 2003; Di Bernardo y Di Bernardo, 2005; Pacheco y Arruda, 2005).

Con respecto al análisis económico, éste fue realizado empleando el método del valor presente neto (VPN) y el de la tasa externa de retorno (TER). La Tabla V indica los costos considera-

dos para los sistemas FAD y FAI por ambos métodos, donde la elección de la mejor alternativa de tratamiento se basó en el análisis económico de ambos, ya que los separadores API y de placas corrugadas fueron descartados técnicamente. En la tabla se muestra el análisis económico de comparación de alternativas basado en el método del VPN, cuyo criterio se basa en seleccionar aquella opción cuyo VPN sea menor; el análisis se realizó para tres capacidades distintas, siendo en este caso la mejor opción el sistema FAD, cuyo VPN es menor para todas las capacidades de tratamiento en comparación con el sistema FAI, aún cuando la inversión necesaria es mayor para sistemas FAD que para sistemas FAI, debido a que los costos anuales de tratamiento son mayores para el método FAI que para sistemas FAD, observando el punto crítico en el consumo energético de los sistemas FAI. De acuerdo al

TABLA V
SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS. MÉTODOS VPN Y TER

Método VPN	100gpm		500gpm		1000gpm	
	FAD	FAI	FAD	FAI	FAD	FAI
Capital invertido						
Costo de equipos	95.202.000	61.920.000	199.950.000	157.380.000	399.900.000	299.280.000
Costos de transporte y nacionalización	28.560.600	18.576.000	59.985.000	47.214.000	119.970.000	89.784.000
Costo de instalación	14.280.300	9.288.000	29.992.500	23.607.000	59.985.000	44.892.000
Costos total de equipos	138.042.900	89.784.000	289.927.500	228.201.000	579.855.000	433.956.000
Costos de instrumentos y control	13.804.290	8.978.400	28.992.750	22.820.100	57.985.500	43.395.600
Costos eléctricos	15.184.719	9.876.240	31.892.025	25.102.110	63.784.050	47.735.160
Costo total de Inversión	167.031.909	108.638.640	350.812.275	276.123.210	701.624.550	525.086.760
Gastos anuales						
Mano de obra y mantenimiento	16.703.191	10.863.864	35.081.228	27.612.321	70.162.455	52.508.676
Energía consumida	156.322.200	208.429.600	312.644.400	416.859.200	312.644.400	416.859.200
Suministros operacionales	2.505.479	1.629.580	5.262.184	4.141.848	10.524.368	7.876.301
Labor	24.964.200	24.964.200	24.964.200	24.964.200	24.964.200	24.964.200
Productos químicos	48.072.420	48.072.420	236.689.746	236.689.746	479.955.250	479.955.250
Servicios de laboratorio	3.744.630	3.744.630	3.744.630	3.744.630	3.744.630	3.744.630
Supervisor	3.744.630	3.744.630	3.744.630	3.744.630	3.744.630	3.744.630
Total gastos anuales (O+M)	256.056.750	301.448.924	622.131.018	717.756.575	905.739.933	989.652.887
Valor de Salvamento	16.703.191	10.863.864	35.081.228	27.612.321	70.162.455	52.508.676
Factores						
(P/A, 28%, 10)	3	3	3	3	3	3
(P/F, 28%, 10)	0,0847	0,0847	0,0847	0,0847	0,0847	0,0847
VP Total	1.002.645.305	1.093.129.887	2.381.535.318	2.620.070.886	3.656.470.047	3.755.732.056
Tasa Externa de Retorno						
Cálculo de Depreciación						
(P/A, 28%, 10)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Depreciación de equipos	432.809	281.502	909.015	715.483	1.818.031	1.360.591
%ΔTER, B,A		-77,48		-127,77		-47,27

TABLA VI
PARÁMETROS DE DISEÑO
Y DIMENSIONAMIENTO DEL FAD

Parámetros de diseño del FAD (resultados experimentales)				
Presión óptima de operación: 276kPa				
Porcentaje de reciclaje de agua tratada: 40%				
Tiempo de recirculación: 51,5seg				
TRH: 6				
Temperatura: 25,2°C				
Saturación del aire a presión atmosférica: 16,588cm ³ ·l ⁻¹ ·atm ⁻¹				
Relación aire/sólido (A:S): 0,2807				
Carga hidráulica: 10 l·m ⁻² ·s ⁻¹				
Dimensionamiento del FAD para diferentes caudales (condiciones óptimas de operación)				
Q _{alimentación} (m ³ /día)	Q _{reciclo} (m ³ /día)	A _{flotación} (m ²)	D _{cámara} (m)	Altura (m)
545	218	0,88	1,06	2,01
1090	436	1,77	1,50	2,85
1635	654	2,65	1,84	3,48
2180	872	3,53	2,12	4,02
2725	1090	4,42	2,37	4,50
3270	1308	5,30	2,60	4,93
3815	1526	6,18	2,81	5,32
4360	1744	7,06	3,00	5,69
4905	1962	7,95	3,18	6,04
5450	2180	8,83	3,35	6,36
5995	2398	9,71	3,52	6,67
6540	2616	10,60	3,67	6,97
7085	2834	11,48	3,82	7,25
7630	3052	12,36	3,97	7,53
8175	3270	13,25	4,11	7,79
8720	3488	14,13	4,24	8,05
9265	3706	15,01	4,37	8,30
9810	3924	15,90	4,50	8,54

método TER, se selecciona como mejor alternativa el sistema cuya tasa externa de retorno sea mayor o igual a la tasa de rendimiento mínima atractiva (TREMA). Si la TER es menor que la TREMA esto indica que la mejor alternativa es la otra opción contra la cual se comparó. En virtud de esto se seleccionó al sistema FAD como la mejor opción de tratamiento. Para todas las capacidades analizadas, la TER es menor a la TREMA, cuyo valor corresponde al 28%, y de esta forma los sistemas FAD son mejor opción que los sistemas FAI por los criterios mencionados (De Garmo y Sullivan, 1997).

Los parámetros calculados en base a los resultados obtenidos experimentalmente para efectuar el diseño a escala real son resumidos en la Tabla VI. Estos fueron realizados seleccionando las condiciones óptimas del equipo, mientras que los caudales de alimentación fueron establecidos en base a los volúme-

nes manejados en el mercado. También se muestra el dimensionamiento a escala real de equipos de flotación y el diseño en unidades cilíndricas (separadores con diseños verticales), tal y como es físicamente el equipo a escala piloto. Los volúmenes varían entre 545 y 9810m³/día (100-1800gpm), por lo que las unidades tendrán desde 2m de altura hasta un máximo de 8,54m, con diámetros asociados entre 1,06 y 4,50m (Stevenson, 1999; Kawamura, 2000; Metcalf y Eddy, 2003; Sincero y Sincero, 2003; AWWA, 2005; Crittenden *et al.*, 2005; Di Bernardo y Di Bernardo, 2005).

Conclusiones

Desde el punto de vista técnico y económico los sistemas FAD resultan ser una opción en la remoción de sólidos suspendidos, grasas y aceites de aguas de formación, obteniéndose altos

porcentajes de remoción y clarificación (90 y 77% de remoción de aceites y grasas y de sólidos suspendidos, respectivamente) en períodos de tiempo cortos (6-10min) para las condiciones de operación de 276kPa (40psi) de presión y 40% del reciclo tratado, además de requerir un bajo consumo de energía y poca área de separación efectiva en comparación con los sistemas tradicionales para las condiciones analizadas.

REFERENCIAS

APHA (2005) *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater*. 21^a ed. APHA/AWWA/WEF. Nueva York, EEUU. 1325 pp.

AWWA (1999) *Water Quality and Treatment. A Handbook of Community Water Supplies*. 5^a ed. American Water Works Association. McGraw Hill. Nueva York, EEUU. 1248 pp.

AWWA (2005) *Water Treatment: Plant Design*. 4^a ed. American Water Works Association. Mc-

Graw Hill. Nueva York, EEUU. 896 pp.

Crittenden J, Trussell R, Hand D, Howe K, Tchobanoglous G (2005) *Water Treatment: Principles and Design*. 2^a ed. Wiley. Hoboken, NJ, EEUU. 1948 pp.

De Garmo P, Sullivan W (1997) *Ingeniería Económica*. 10^a ed. Prentice Hall. México. 759 pp.

Díaz J (1987) *Evaluación de Separador de Placas Corrugadas en la Recolección de Petróleo Proveniente de Aguas de Efluentes o Formación*. Tesis. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. 187 pp.

Di Bernardo L, Di Bernardo A (2005) *Métodos e Técnicas de Tratamiento de Água*. Vol I. 2^a RiMa. São Paulo, Brasil. 792pp.

Droste R (1997) *Theory and Practice of Water and Wastewater Treatment*. 1^a ed. Wiley. Hoboken, NJ, EEUU. 800 pp.

Kawamura S (2000) *Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities*. 2^a ed. Wiley. Hoboken, NJ, EEUU. 691 pp.

Metcalf & Eddy (2003) *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*. 4^a ed. McGraw Hill. Nueva York, NY, EEUU. 1819 pp.

Pacheco Jordão E, Arruda Pessôa C (2005) *Tratamento de Esgoto Doméstico*. 4^a ed. ABES. Rio de Janeiro, Brasil. 932 pp.

Qasim S, Motley E, Zhu G (2000) *Water Works Engineering*. 1^a ed. Prentice Hall. Upper Sadle River, NJ, EEUU. 844 pp.

Reynolds T, Richards P (1996) *Unit Operations and Process in Environmental Engineering*. 2^a ed. PWS. Boston, MA, EEUU. 798 pp.

Sawamura M (1997) *Desemulsificação de Águas Residuárias de Indústria de Refino de Óleo Lubrificante. Estudo de Caso*. Tesis. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. Brasil. 220 pp.

Sincero A, Sincero G (2003) *Physical-Chemical Treatment of Water and Wastewater*. 1^a ed. CRC/IWA. Boca Ratón, Florida, EEUU. 832 pp.

Soto M (2002) *Evaluación del Sistema de Crudo Recuperado de las Unidades de Clarificación de los Patios de Tanques ULÉ y F-6*. Tesis. Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia. Maracaibo, Venezuela. 225 pp.

Stevenson D (1999) *Water Treatment Unit Process*. 2^a ed. Imperial College Press. Londres, RU. 474 pp.