

## REMOCIÓN DE ACEITES (PETRÓLEO) EMULSIFICADOS EN AGUA POR FLOCULACIÓN-FLOTACIÓN JET

Mario Santander<sup>1</sup>, Rafael Rodrigues<sup>2</sup>, Jorge Rubio<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Metalurgia – Universidad de Atacama  
Centro Regional de Investigación y Desarrollo Sustentable de Atacama  
Avenida Copayapu 485-Copiapó-Chile

[mario.santander@uda.cl](mailto:mario.santander@uda.cl)

<sup>2</sup> Laboratório de Tecnologia Mineral e Ambiental (LTM), Departamento de Engenharia de Minas, PPG3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Avenida Bento Gonçalves. 9500, CEP 91501-970 – Porto Alegre – RS – Brasil

[jrubio@ufrgs.br](mailto:jrubio@ufrgs.br)

### RESUMEN

Este trabajo presenta resultados obtenidos en estudios de remoción de aceites (petróleo) emulsificados en agua en celda de flotación tipo Jameson “jet” (convencional y modificada). Fueron estudiados los siguientes parámetros: concentración y diámetro medio de las gotas de petróleo (aceite) emulsificado; y modificaciones estructurales en el diseño de la unidad de flotación. Estos estudios permitieron optimizar parámetros de “design”, químicos, físico-químicos y operacionales. Basándose en los resultados obtenidos en los estudios de laboratorio fue proyectada y construida una unidad de flotación piloto de 4,8-5 m<sup>3</sup>/h y probada en una plataforma marítima, en el sistema de extracción y producción de petróleo. En las mejores condiciones operacionales fueron obtenidas, en una sola etapa, descargas que varían entre 20 y 30 mg/L de aceite, con eficiencias de remoción > 81 %, para una capacidad de 592 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d. Los resultados mostraron el gran potencial de la flotación jet modificada en el área de tratamiento de aguas contaminadas con sustancias orgánicas (aceites, solventes, hidrocarburos). Las principales ventajas son la simplicidad de su diseño y la elevada capacidad de tratamiento.

**Palabras claves:** aceites (petróleo), floculación-flotación, flotación jet.

### ABSTRACT

This work presents results of emulsified oil (petroleum) removal by jet flotation, Jameson type (conventional or modified). Parameters studied were oil concentration, oil droplets size distribution and flotation cell design. These studies allowed optimizing the design and process parameters: chemical, physico-chemical and operating. A flotation unit (4,8-5 m<sup>3</sup>/h) was then projected, built and installed in an oil off-shore platform, after the oil extraction-production point. At optimal conditions, in a single stage, discharges varied between 20 and 30 mg/L oil concentration or 81 % removal for a 592 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d process capacity. Results showed the great potential of this jet cell for treating polluted wastewaters bearing oils, organic compounds and solvents. Main advantages are the equipment design simplicity and a high loading capacity.

**Keywords:** oil (petroleum), flocculation-flotation, jet flotation.

## 1. INTRODUCCIÓN

La reducción de los índices de contaminación es motivo de preocupación constante de las organizaciones de control ambiental y de la industria. Esta preocupación ha dado origen al desarrollo de nuevas tecnologías para el tratamiento de efluentes líquidos (aguas de proceso) contaminados con compuestos orgánicos y aceites, emulsificados o no. Las principales fuentes generadoras de aguas de proceso contaminadas con desechos orgánicos, entre otras, son la industria del petróleo y petroquímica, industria minero-metalúrgica-mecánica, industria de procesos químicos y alimenticia. En el área minero-metalúrgica, las aguas contaminadas con aceites (residuos orgánicos) están relacionadas con el uso de diferentes reactivos de flotación, solventes orgánicos y aceites [1, 2, 3].

Por otro lado, el aceite y/o compuestos orgánicos pueden estar presentes en los efluentes líquidos en las siguientes formas: disperso, emulsificado o solubilizado y en concentraciones de hasta 1000 mg/L [4]. En el caso del aceite emulsificado, el diámetro de las gotas normalmente es menor que 50  $\mu\text{m}$ , lo que dificulta su separación por procesos gravitacionales. Frecuentemente, el tratamiento de aceite emulsificado requiere la utilización de otros procesos tales como flotación asociada a la adición de productos químicos [5, 6, 7, 8, 9, 10].

La separación de aceites por flotación, requiere de burbujas finas y condiciones hidrodinámicas relativamente tranquilas especialmente en la zona de separación de la celda de flotación, debido a los siguientes factores: las gotas de aceite presentes en la agua son muy finas (2-30  $\mu\text{m}$ ), la densidad del aceite es menor que la del agua y el aceite es naturalmente hidrofóbico [11].

La tecnología de flotación jet (celdas tipo Jameson), que utiliza macroburbujas (600  $\mu\text{m}$ ), condiciones hidrodinámicas turbulentas y con un gran "hold-up" de aire (> 40 %) en la zona de captura de partículas por burbujas y relativamente tranquilas en la zona de separación de la celda y bajos tiempos de retención (< 3 min), aparecen como

alternativas factibles para el tratamiento de grandes volúmenes de efluentes contaminados con aceites emulsificados [10, 12, 6, 13]. La celda Jameson presenta un enorme potencial en diversas áreas como tratamiento de minerales y en la remoción de partículas en efluentes líquidos (12).

Este trabajo presenta resultados de tratamiento (separación aceite (petróleo)/agua) por flotación tipo Jet (a chorro) en escala de laboratorio y piloto en una plataforma marítima. El trabajo, también, incluye la introducción de modificaciones estructurales en el diseño de la celda de flotación jet original (convencional) con el objetivo de optimizar la eficiencia de separación aceite/agua [8, 14, 15].

## 2. EXPERIMENTAL

### 2.1 Materiales

**Estudios de laboratorio:** Las emulsiones aceite/agua fueron preparadas con petróleo bruto con las siguientes características físico-químicas a 30 °C, densidad real 0,890 kg/m<sup>3</sup>, viscosidad 0,042 Ns/m<sup>2</sup>, tensión superficial 34,4 mN/m. Los estudios de remoción de aceite por flotación fueron realizados utilizando un polímero floculante no iónico, alcohol polivinílico (APV), y espumante, dodecil sulfato de sodio (DSS).

Las aguas aceitosas (emulsiones aceite/agua) fueron generadas bombeando, con una bomba helicoidal de alta presión (25 kgf/cm<sup>2</sup>) y caudal variable (máximo, 2 m<sup>3</sup>/h), soluciones acuosas, conteniendo concentraciones variables de petróleo, a través de placas de acero inoxidable con orificios de distintos diámetros (3 a 7 mm). El paso de la mezcla petróleo/agua por las placas cizalla el petróleo, dispersándolo en gotas pequeñas, produciendo emulsiones estables con distintas distribuciones de tamaño de gotas.

Las aguas aceitosas fueron caracterizadas determinando los siguientes valores: distribución de tamaño de gotas, "on line",

con un analizador de tamaño de partículas, y concentración de aceite (petróleo) con un medidor de hidrocarburos (Horiba OCMA-220). Las muestras para caracterización fueron colectadas por medio de cortadores de muestra localizados en el tubo que transporta el agua aceitosa al equipo de flotación.

**Estudios piloto:** Los estudios se realizaron, en la plataforma marítima PNA-1, con emulsiones petróleo-agua en concentraciones variadas y que dependían del punto de colecta. Las variables estudiadas fueron tipo de gas (gas o aire), tipo y concentración de floculante (Alcohol Polivinílico, PVA y

Dismulgan, poliacrilamida catiónica) y la concentración de petróleo. La distribución de tamaño de gotas en las emulsiones no fue medida pero se sabe que son similares a las del estudio en laboratorio.

## 2.2 Estudios de separación aceite/agua

**Estudios de laboratorio:** Los estudios de separación (remoción) de aceite emulsificado fueron realizados en una celda de flotación jet convencional (CFJC) y en una modificada (CFJM), figura 1 (a) y (b), respectivamente.

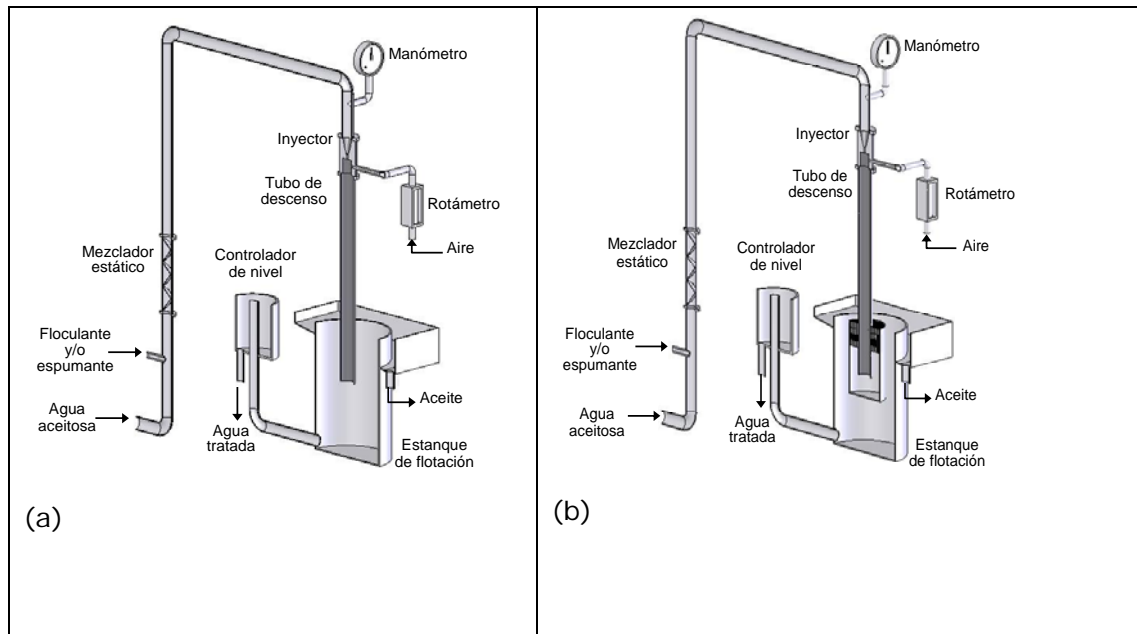


Figura 1. (a) Celdas de flotación jet convencional, CFJC, y (b) Celda modificada, CFJM.

Las celdas jet, de 1,3 m<sup>3</sup>/h de capacidad, consisten de un tubo de descenso ("downcomer") del "jet", un tanque de flotación y un controlador de nivel. En estas celdas el proceso de "colección" (colisión - adhesión) formación de los agregados gotas de aceite-burbujas de aire, se produce en el tubo de descenso ("downcomer") y la separación de estos agregados desde el agua, en el tanque de flotación (separación de las fases), [15].

El agua aceitosa previamente condicionada, en un mezclador estático, con espumante y/o

floculante es alimentada a presión por el inyector, localizado en la parte superior del tubo de descenso. Al pasar el agua por la reducción de área en el inyector, aumenta la velocidad, al mismo tiempo que decrece la presión. La reducción de presión induce la entrada de aire por la abertura dispuesta para este fin. El movimiento subsecuente de la corriente de dos fases a través de la región de baja velocidad (alta presión) resulta en la dispersión del aire en burbujas pequeñas. Estas son forzadas a descender en sentido opuesto a su flotabilidad natural, en dirección al tanque de flotación.

En la CFJM fue incluido en el centro del tanque de flotación un colector o cilindro concéntrico cerrado en el fondo y empaquetado en la parte superior. Este colector concéntrico evita el arrastre de gotas de aceite no adheridas a las burbujas de aire. El hecho de descargar los agregados gotas de aceite-burbujas de aire en este colector, fuerza a las gotas de aceite no adheridas a

las burbujas aire a ascender a la interface aceite/agua, aumentado la probabilidad, que éstas queden retenidas en la camada de aceite. Este colector, también, permite operar el tubo de descenso en condiciones hidrodinámicas turbulentas lo que favorece el proceso de floculación en el propio tubo de descenso y no alterar el régimen de flujo en el tanque de flotación.

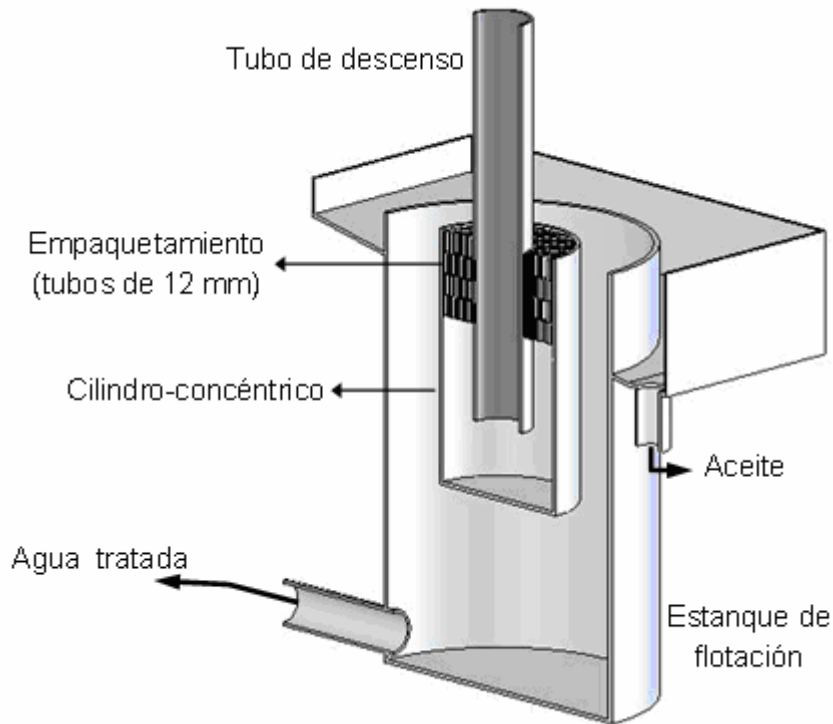


Figura 2. Flotación Jet. Detalle del cilindro cerrado en el fondo y empaquetado en la parte superior, localizado en el centro del tanque de flotación de la celda de flotación jet modificada-CFJM.

**Estudios piloto en plataformas:** Fueron realizados estudios de flotación a jato en la plataforma PNA-1 (Petrobras, Rio de Janeiro-Brasil) con aguas aceitosas provenientes de dos puntos del sistema: 1. Sistema de desgasificación o de separación de gas, que viene junto con el petróleo y 2. Efluente del separador de producción (figura 3).

En los estudios de flotación con agua aceitosa del desgasificador, ésta fue bombeada en un

flujo de 5,0 m<sup>3</sup>/h, hasta la CFJM por medio de una bomba helicoidal de 8,3 m<sup>3</sup>/h de capacidad y dosificada con concentraciones preestablecidas de floculante. El floculante fue inyectado por medio de una bomba dosificadora en el tubo de descarga de la bomba helicoidal y acondicionado con un mezclador estático de 800 mm de largo y 25 mm de diámetro.

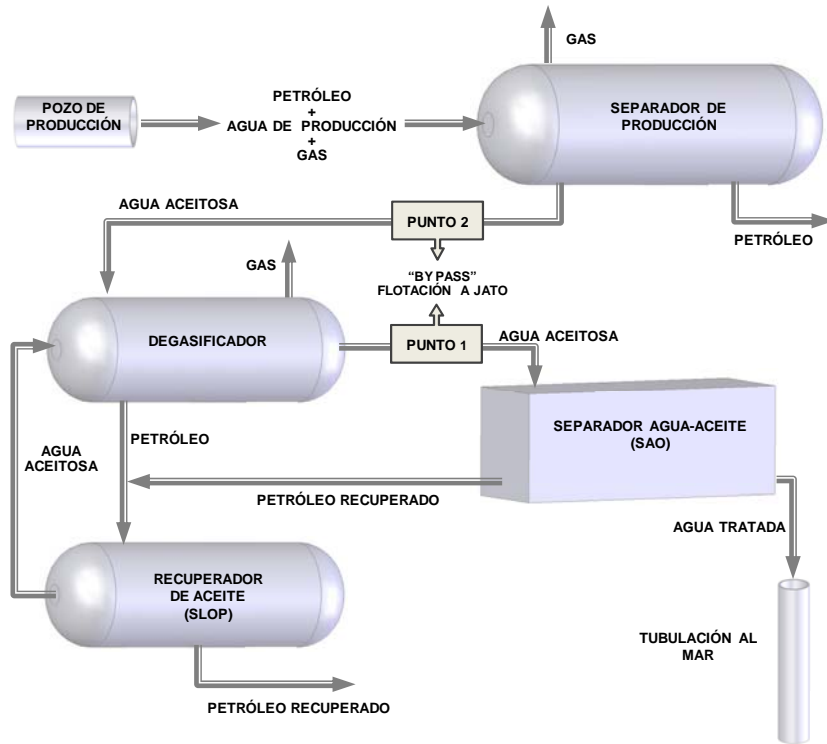


Figura 3. Sistema de extracción y tratamiento de aguas aceitosas en plataforma marítima-PNA1- Petrobras-Rio de Janeiro-Brasil.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Estudios continuos de laboratorio

**Celda de flotación jet convencional (CFJC):** Los estudios de flotación, para analizar la influencia del diámetro medio volumétrico de las gotas,  $d(4,3)$ , y la concentración de aceite, fueron realizados alimentando a la CFJC, 3 L/min de aire y 20 L/min agua aceitosa previamente condicionadas, en un mezclador estático, con 3 mg/L de APV y 28 mg/L de DSS. Los valores de estos parámetros fueron fijados en estudios reportados por Santander [8]. En la figura 4, se observa que una disminución en el  $d(4,3)$  de 40 para 10  $\mu\text{m}$  reduce el porcentaje de remoción,  $R$  (%), de aproximadamente 90% para 70% e incrementa la concentración de aceite en el efluente tratado de 10 para 30 mg/L. Cuando  $d(4,3)$  decrece de 40 para 12  $\mu\text{m}$  la concentración de gotas menores que 10  $\mu\text{m}$  aumenta de cero para 37% (ver figura 5).

Cuanto menor es el tamaño de gotas, menor es la eficiencia de colección debido a la dificultad para que estas venzan las líneas de corriente generadas por las burbujas de aire, que en el caso de la CFJC son del orden de 0,1-0,8 mm [16 y 17].

Strickland [18], Sato y colaboradores [19], reportan que la recuperación de aceite se incrementa cuando el tamaño de las gotas aumenta y el tamaño de las burbujas decrece. Sato explica que la mayor eficiencia de las burbujas pequeñas en la flotación de gotas pequeñas se debe a dos efectos, uno geométrico y otro hidrodinámico. Según este investigador, las burbujas pequeñas tienen una gran área proyectada lo que facilita la colisión con las gotas pequeñas y la hidrodinámica de las burbujas pequeñas es más accesible a las gotas pequeñas. Sin embargo, Rajinder y Masliyah [20] encontraron en estudios de remoción de aceites emulsificados químicamente con surfactantes no iónico, que una disminución en el tamaño de las burbujas decrece la eficiencia de separación porque aumentan el

grado mezcla en la zona de colección de la columna de flotación. Un aumento en el grado de mezcla causa una reducción en la eficiencia de adhesión a pesar que la frecuencia de colisiones aumenta. Para que la adhesión ocurra, las gotas de aceite deben

penetrar a través de la película de líquido que envuelve a las burbujas de aire. La adhesión no ocurre si el tiempo requerido para adelgazamiento de dicha película es mayor que el tiempo de contacto, este decrece con el aumento en el grado de mezcla.

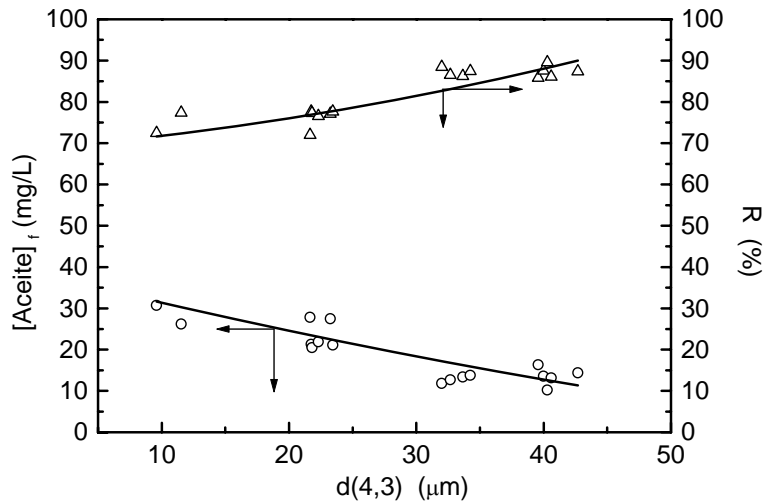


Figura 4. Efecto del diámetro medio volumétrico de las gotas de aceite en la eficiencia de separación aceite/agua por CFJC.  $[Aceite]_i$  90-120 mg/L, 3 L/min de aire,  $[APV]=$  3 mg/L,  $[DSS]=$  27 mg/L, temperatura 27 a 35 °C y pH 6,5.

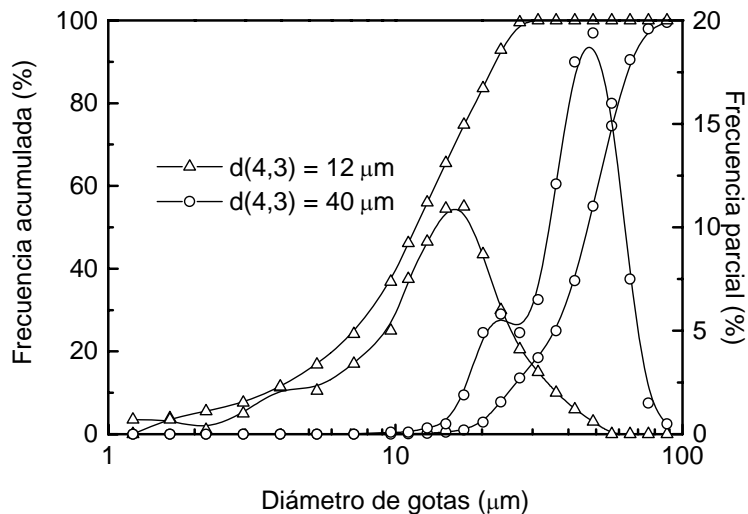


Figura 5. Comparación de la distribución de tamaño de gotas en aguas aceitosas con distintos diámetros medios volumétricos.

La figura 6 muestra que, hasta aproximadamente 400 mg/L, la remoción permanece aproximadamente constante, del orden de 80%. Para concentraciones mayores que 400 mg/L, el porcentaje de

remoción disminuye drásticamente hasta, 60% de remoción del aceite contenido. Estos valores fueron obtenidos en condiciones optimizadas de los diversos parámetros involucrados.

La disminución en la eficiencia de separación de aceite es función de varios fenómenos entre los cuales se destacan: a) grado de floculación- coalescencia con baja cinética en las gotas menores; b) aumento de la cantidad de gotas menores que 10  $\mu\text{m}$  que generan los problemas ya discutidos y c) problemas hidrodinámicos de inestabilidad en el régimen de flujo en el tubo de descenso.

La inestabilidad del régimen de flujo en la zona de contacto genera turbulencia en la zona de separación de las fases porque el jet penetra con mayor velocidad, incrementado de esta manera o arrastre de gotas finas de aceite (no floculadas) y/o débilmente adheridas a las burbujas de aire.

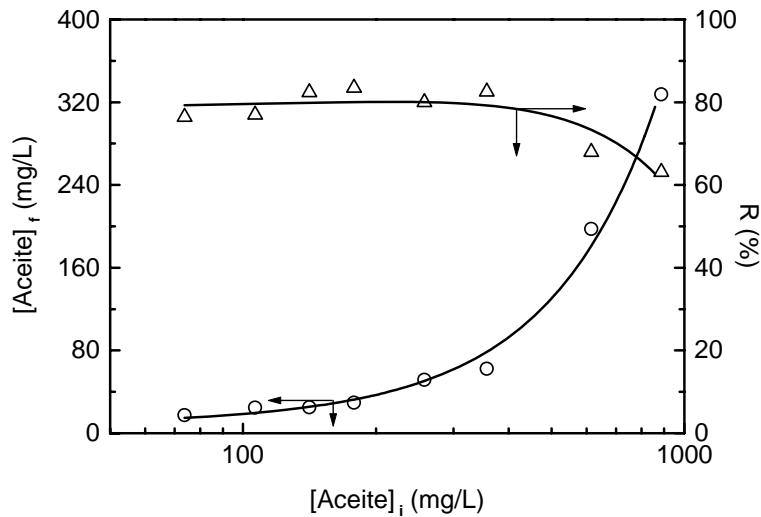


Figura 6. Efecto de la concentración inicial de aceite, en el agua aceitosa alimentada a la CFJC, en la eficiencia de separación aceite/agua. Aire 3 L/min, [APV]= 3 mg/L, [DSS]= 27 mg/L, temperatura 27 a 35°C,  $d(4,3)=23 \mu\text{m}$  y pH 6,5.

**Celda de flotación jet modificada (CFJM):**

Las condiciones experimentales para estos estudios fueron iguales a las utilizadas en los estudios realizados en la CFJC, excepto flujo de aire, se utilizó el máximo auto aspirado. Estudios previos mostraron que en la CFJM no es necesario utilizar espumante.

La tabla 1 muestra que con diámetros medios de gota del orden de 12  $\mu\text{m}$  es posible

alcanzar eficiencias de remoción mayores que 82%. El aumento en la eficiencia de separación de las gotas con tamaños menores confirma nuevamente el incremento en la eficiencia de floculación y/o la reducción del corto circuito. En la tabla, también se observa que la eficiencia de remoción es mayor cuanto mayor es la concentración inicial de aceite en el agua aceitosa. Eficiencias de 82% son alcanzadas con concentraciones (alimentación) de 90 mg/L y 86% con 160 mg/L.

Tabla 1. Efecto del diámetro medio de las gotas de aceite en la eficiencia de separación aceite/agua por CFJM. Flujo de aire variable, 5 a 9 L/min (máximo auto aspirado).

$d(4,3)$ ( $\mu\text{m}$ )	[Aceite] <sub>i</sub> (mg/L)	[Aceite] <sub>r</sub> (mg/L)	R (%)
23,96	98,1	16,9	83
11,77	91,5	16,0	82
24,43	161,7	25,6	84
12,15	161,2	21,8	86

La figura 7 compara la CFJC y la CFJM, en función de la concentración inicial de aceite. En esta figura, se observa que, para el rango de concentración de 100 a 600 mg/L, en las mismas condiciones experimentales y sin la adición de espumante, la celda modificada presenta eficiencias de remoción aproximadamente 5 puntos porcentuales mayor que la convencional.

El aumento en la eficiencia de remoción de la CFJM con relación a la CFJC se debe probablemente a la disminución del arrastre

de las gotas pequeñas no adheridas o débilmente adheridas a las burbujas de aire.

La intensidad de la turbulencia en el tubo de descenso es función de la cantidad de aire auto aspirado, la que al mismo tiempo, es función de las características físico-químicas del agua aceitosa tratada. Fue observado que esta decrece cuando la concentración de aceite aumenta. Para aguas aceitosas con 600 mg/L de aceite, el máximo flujo de aire auto aspirado fue 5 L/min y para aguas con 100 mg/L de aceite, esta fue de 10 L/min.

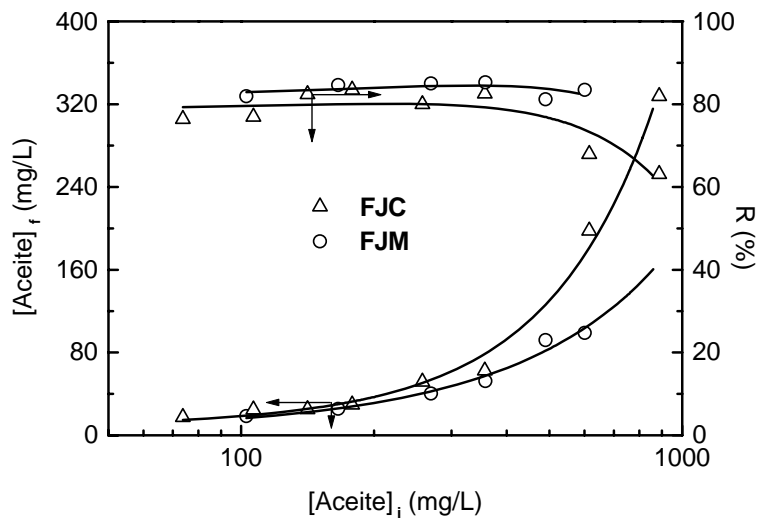


Figura 7. Comparación de la eficiencia de separación aceite/agua entre las celdas CFJM y CFJC, en función de la concentración inicial de aceite. Flujo de aire variable entre 4 a 9 L/min (máximo auto aspirado), en la CFJM y 3 L/min en la CFJC.

### 3.2 Estudios Piloto de flotación en celda CFJM, en Plataforma marítima

**Separación en agua aceitosa del desgasificador:** La tabla 2 y la figura 8 muestran los resultados de los estudios de remoción de aceite utilizando agua aceitosa del desgasificador (ver flow-sheet esquemático en la figura 3). En estos ensayos la CFJM fue operada auto-aspirando gas proveniente del desgasificador con un flujo de 12 L/min (máximo).

Los resultados muestran que las eficiencias de remoción, en estas condiciones, son

menores que las alcanzadas en los estudios realizados con aguas aceitosa sintéticas con características similares, temperatura, salinidad y concentración de aceite. Esta menor eficiencia de separación se debe a la presencia en el agua aceitosa de: a) productos químicos residuales tales como desmulsificadores, inhibidores de corrosión e incrustación, que disminuyen la acción del PVA o b) sólidos coloidales, recubiertos con aceite, los cuales no están siendo floculados por PVA. Fue observado visualmente una alta proporción de sólidos coloidales dispersos en las aguas aceitosas tratadas y una formación de lodo, especialmente con el floculante Dismulgan.



Tabla 2. Estudios de remoción de aceite desde aguas aceitosas (efluente del desgasificador) en la CFJM. Flujo da Alimentación, 83,3, L/min.

Ensayo	T1	T2	T3	T4
Flujo Floculante, mL/min	50	80	50	50
Concentración de PVA, mg/L	1,8	3	3	3
Concentración de Dismulgan, mg/L	0	0	0	1
Presión, entrada a la celda Jet, kgf/cm <sup>2</sup>	1	1	0,8	0,8
Flujo de gas, L/min	12	12	12	12
[Aceite] Alimentación, mg/L	553	335	423	336
[Aceite] Descarga, mg/L	116	118	101	107
Eficiencia de Separación, %	79	65	76	68

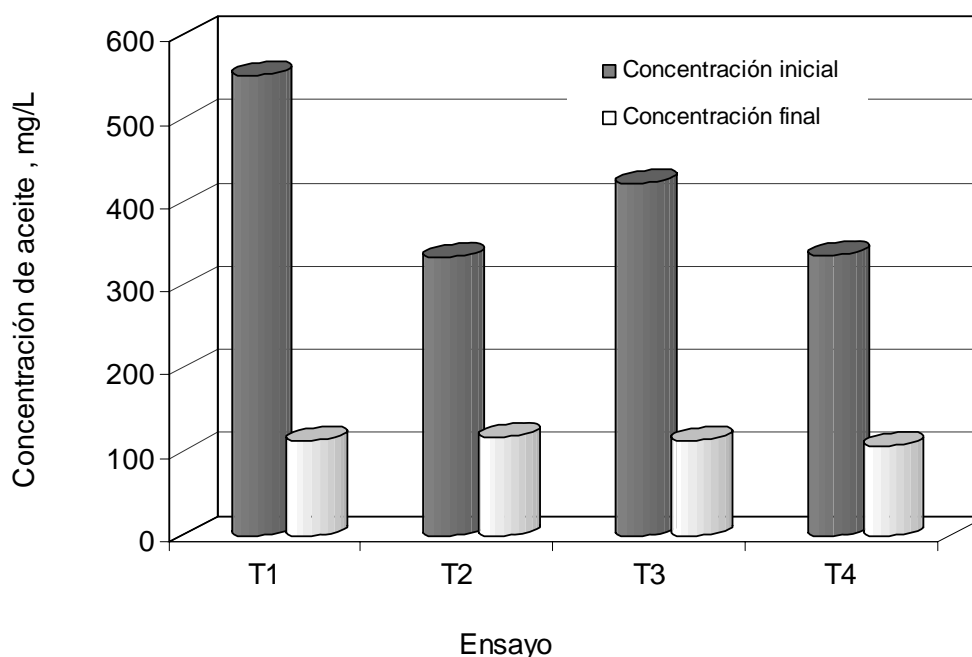


Figura 8. Flotación en celda CFJM (capacidad de 592 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d) de separación aceite/agua utilizando agua aceitosa del desgasificador. CFJM operada auto-aspirando gas del desgasificador.

**Estudios de floculación-flotación con la celda CFJM con agua aceitosa del separador de producción:** En la tabla 3 y figura 9 son descritos las variables de operación y los resultados de los estudios de separación aceite/agua con agua aceitosa del separador de producción, por flotación en la CFJM, durante 7 horas.

Los resultados obtenidos muestran que la eficiencia de remoción es mayor que las

obtenidas con aguas aceitosas del desgasificador. Esta mayor eficiencia de remoción probablemente se deba al hecho de que en este caso, no hubo formación de lodo a pesar de que se dosificó la misma concentración de Dismulgan. Los resultados están dentro de lo permitido en términos de emisión de aceite en alta mar (20-30 mg/L).

Tabla 3. Resultados del estudio de separación aceite/agua utilizando agua aceitosa del separador de producción. CFJM operada auto-aspirando gas y con 10 mg/L de Dismulgan y 3 mg/L de PVA. Flujo da Alimentación, 83,3 L/min.

Flujo Floculante, mL/min	100
Concentración de PVA, mg/L	3
Concentración de Dismulgan, mg/L	10
Presión, entrada a la celda Jet, kgf/cm <sup>2</sup>	1,15
[Aceite]Alimentación , mg/L	123
[Aceite]Descarga, mg/L	30
Eficiencia de Separación	76

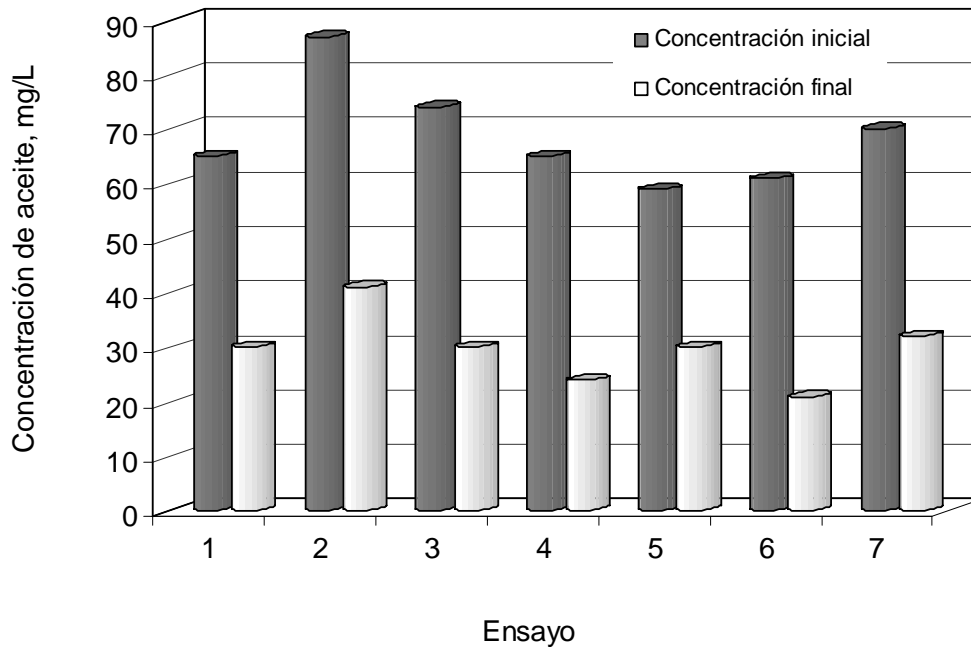


Figura 9. Flotación en celda CFJM (capacidad de 592 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d) de separación aceite/agua utilizando agua aceitosa del separador de producción, en función del tiempo (7 horas de duración). CFJM operada auto-aspirando gas y con 10 mg/L de Dismulgan y 3 mg/L de PVA.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten establecer las siguientes conclusiones:

La remoción de aceite desde aguas aceitosas, sintéticas, con concentraciones de aceite variando entre 50 a 600 mg/L y diámetro medio volumétrico de gotas del orden de 20 µm es eficiente con los dos tipos de celda de

flotación Jet, la convencional, CFJC, o la modificada, CFJM. Las modificaciones estructurales en la versión CFJM, aumentaron la eficiencia de remoción de aceite en 5 puntos porcentuales (de 80% en la CFJC a 85% en la CFJM). Este aumento en la eficiencia de separación se debe a la disminución del arrastre de las gotas pequeñas no adheridas a las burbujas de aire y a que el nuevo modo de operación del tubo

de descenso, condiciones hidrodinámicas de alta turbulencia, favorece la floculación (coalescencia) del aceite. La aplicación de la CFJM en plataforma marítima comprobó la eficiencia de este equipamiento de floculación-flotación, obteniéndose valores elevadas de remoción de petróleo en una alta capacidad de tratamiento, alcanzando los niveles permitidos de emisión de aceite, en una simple etapa. Estos valores variaron entre 20 y 30 mg/L de aceite, con eficiencias de remoción del orden de 81 %, para una capacidad de 592 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>d. La CFJM presenta debido a la simplicidad en su diseño, un gran potencial para el tratamiento de efluentes contaminados con elementos orgánicos e inorgánicos.

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las instituciones que financiaron este trabajo en Brasil donde fue realizado este trabajo (Petrobras-CNPq). Agradecimientos especiales a los Ingenieros O. de Aquino (Petrobras), S. Amaral, J. Da Rosa (UFRGS), y a B. Zazzali (UDA-Chile), por el apoyo en la realización de la parte experimental y construcción de equipos.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Rubio, J. Schneider, I. and Aliaga, W., Clean Technologies for Mining Industry: Proceedings Congress (1996) 85-98.
- [2] Rubio, J. y Rodrigues, R., Int. J. Miner. Process. 82 (1) (2007) 1-13.
- [3] Carissimi, E., Rubio, J., Rosa, J., J. International Journal of Environmental and Pollution 30 (2) (2007) 193-208.
- [4] Gopalratnam V.C., Bennett, G.F. and Peters, R., Environmental Progress, 7 (2) (1988) 84-92.
- [5] Oliveira, G.R.C., Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Rio de Janeiro, 1995, 120 p.
- [6] Rubio, J., Proceedings from Strategic Conference and Workshop, Hawaii, 2002, Edited by Ralston, J. and Miller, J. (2003) 17-32.
- [7] Rosa, J. and Rubio, J., Miner. Eng. 18 (7) (2005) 701-707.
- [8] Santander, M., Tese de Doutorado, PPGEM-UFRGS, Porto Alegre, Brasil (In Portuguese) (1998) 123 p.
- [9] Rodríguez, R.T., Dissertação de Mestrado, PPGEM-UFRGS, Porto Alegre, Brasil (In Portuguese) (1999) 101 p.
- [10] Rosa, J y Rubio, J., Revista Química Industrial (94) (2003) 58-64.
- [11] Gutkowski, B., Hupka, J. and Miller, D.J., Conference: Interfacial Phenomena in Mineral Processing, Franklin Pierce College. Rindge, New Hampshire, August 2-7. Proceedings (1981) 287-301.
- [12] Rubio, J., Souza, M. L. and Smith, R.W., Miner. Eng. 15 (3) (2002) 139-155.
- [13] Owen, J.J., Morse, D.E., Morse, W.O., Jovine, R., In: Parekh, B.K., Miller, J.D. (Eds.), Advances in Flotation Technology. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), Littleton, CO (1999) 381-389.
- [14] L. Feris, A. De Leon, M. Santander y J. Rubio, Int. J. Miner. Process. 74 (2004) 101-106.
- [15] Cowburn, J, Stone, R, Bourke, S, Hill, B. Centenary of Flotation 2005 Symposium. Brisbane. June 5-9 (2005) 193-199.
- [16] J. Jameson, E. Manlapig, Column'91. In: Proceedings of the International Conference on Column Flotation, Sudbury, Ontario, (1991) 673-687.
- [17] Clayton, R.L., Miner. Eng. 4 (7-11) (1991) 925-933.
- [18] Strickland, W.T., Soc. of Pet. Ing. J. 20 (1980) 175-190.
- [19] Sato, Y., Murakami, Y., Hirose, T., Uryu, Y. and Hirata, K., J. Chem. Eng. Japan, 13 (5) (1980) 385-389.
- [20] Rajinder y Masliyah, Can. J. Chem. Eng. 68 (6) 7 (1990) 959-967.